

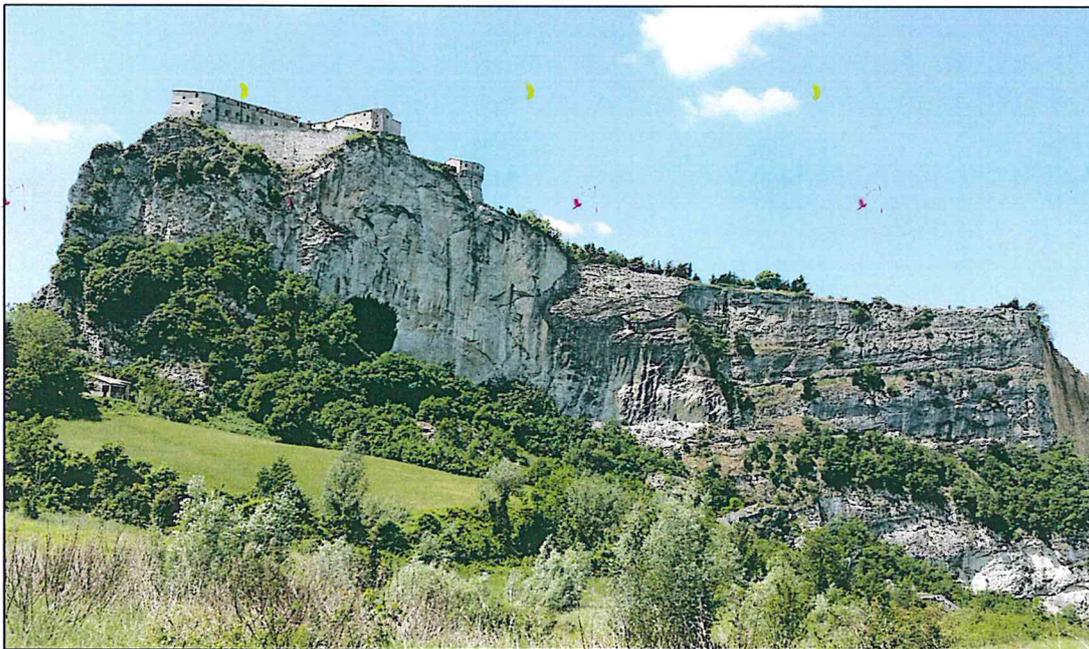
Piano nazionale contro il dissesto idrogeologico 2014 - 2020  
INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO AL  
FINE DI FAVORIRE L'ADATTAMENTO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI IN  
ATTUAZIONE DELL'ART. 19, COMMA 6, LETT. A DEL DECRETO  
LEGISLATIVO N. 30/2013 "PIANO CLIMA"

PROGETTO: **08IR326-G1** - COMPLETAMENTO DEGLI INTERVENTI PER IL  
CONSOLIDAMENTO DELLA PARETE EST DELLA RUPE DI  
SAN LEO (RN).

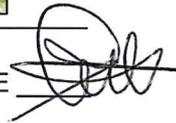
IMPORTO COMPLESSIVO: € 2'000'000,00

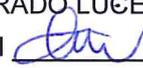
# PROGETTO ESECUTIVO

ELABORATO n° 4.1  
RELAZIONE GEOTECNICA

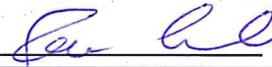


PROGETTISTI:

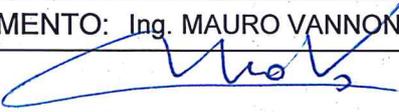
Ing. SANZIO SAMMARINI  Dott. Geol. CLAUDIO CORRADO LUGENTE 

Ing. UMBERTO UGUCCIONI  Dott. CHRISTIAN MOROLLI 

Geom. RICCARDO TURA 

Collaboratore alla progettazione: Geom. MAURO CORBELLI 

CONSULENZA GEOTECNICA: Prof. Ing. Albino Lembo-Fazio

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO: Ing. MAURO VANNONI 

Reg. 

TIPO	ANNO	NUMERO

  
del \_\_\_\_\_

REV. 16/11/2017

ad uso interno DP 

ANNO	NUMERO

 Classif. 

INDICE	LIV. 1	LIV. 2	LIV. 3	LIV. 4	LIV. 5
5685					

 Fasc. 

ANNO	NUMERO	SUB
2016	420	

## INDICE

1	Introduzione.....	2
2	Studi ed indagini sulla Rupe .....	6
2.1	Indagini effettuate in passato .....	6
2.2	Indagini effettuate a seguito del crollo del 2014 .....	9
3	Caratteristiche strutturali dell'ammasso roccioso .....	13
4	Caratterizzazione geotecnica del materiale roccioso e delle discontinuità .....	20
5	Basamento argillitico.....	24
6	Bibliografia.....	25

## 1 Introduzione

La cittadina di San Leo ed il suo castello rinascimentale si ergono sulla sommità di una rupe calcarea di forma quadrangolare, con dimensioni circa 500x600m, poggiante su un substrato di argille scagliose. La rupe è delimitata da pareti verticali spesso in aggetto, alte da 50 a 100m; la superficie superiore della rupe tende a declinare da Est verso Ovest. Nel corso dei secoli le pareti rocciose che delimitano la piastra sono state coinvolte in numerosi fenomeni di crollo che hanno interessato il muraglione della roccaforte e distrutto le strade di accesso al paese.

La placca lapidea è bordata al piede da due incisioni che partono dalla sella dei Quattro Venti, allo spigolo SE, ed incidono il substrato argilloso. Il fosso Seripa, costeggia il fianco sud della Rupe con un bacino di superficie modesta, mentre il fosso Campone si sviluppa in direzione da NNW a W e si estende su un'area piuttosto ampia, con ampie zone in forte erosione di tipo calanchivo (fig. 1).



Fig.1 – Foto aerea della rupe ripresa dopo il crollo del 2014

L'abitato occupa la zona centro meridionale della rupe fino alla "Porta di sopra" che attualmente costituisce l'unica via di accesso alla città. Un secondo ingresso alla cittadina era ubicato sul lato settentrionale e venne distrutto da una frana nel 1634.

Sul lato N le colate nelle argille scagliose del substrato sono molto attive e si estendono fino al piede della rupe; i movimenti franosi hanno in più punti sottoescavato la base di appoggio dell'ammasso roccioso sulle argille, determinando la formazione di porzioni rocciose in aggetto (fig.2).



Fig.2 – Porzione di rupe in aggetto prima del crollo del 2014; la base dell'ammasso roccioso risulta sotto-escavata dai movimenti franosi che interessano il pendio in argille.



Fig. 3 Crollo del 27/02/2014

Il crollo del 27/02/2014 (fig. 3) si è verificato in corrispondenza di una di queste zone con roccia in aggetto, in cui i fenomeni franosi del versante in argilla avevano determinato il detensionamento del terreno sotto la base della rupe. Il crollo del 2014 si aggiunge ad un precedente episodio accaduto nel 2006, sempre lungo il versante nord.

Anche il fronte meridionale è stato sede in questo ultimo secolo di numerosi crolli che hanno interessato lo spigolo sotto il Forte e la parete sottostante la porta di accesso alla città; su questo lato il fronte roccioso presenta un aggetto di circa 10m ed altezza di circa 60m.

Negli anni '30 e '40 un crollo ha coinvolto parte del muraglione perimetrale del Forte, fatto erigere da Federico di Montefeltro nel '400.

Ben più grave il dissesto che nel febbraio del 1949 ha prodotto un accumulo di detriti al piede della parete rocciosa ed ha bloccato la strada di accesso, minacciando gli edifici adiacenti. Fra il '49 ed il '62 è crollato un ulteriore cuneo di roccia, mentre la configurazione attuale della parete è dovuta ad una serie di distacchi di blocchi di dimensioni minori dalla parte basale avvenuti dal '62 ad oggi (Lembo-Fazio et al., 1998; Tommasi P., 1997).

Gli eventi che si sono verificati nel 2014 hanno indotto a ritenere assolutamente prioritario un intervento per la mitigazione del rischio da frana; il grado di rischio residuo risulta infatti ancora alto

in quanto i lavori eseguiti in passato, a partire dalla fine degli anni '60 del secolo scorso, hanno comportato una riduzione del rischio molto parziale.

L'attuale progetto, realizzato nell'ambito del Piano nazionale per il contrasto al dissesto idrogeologico 2014-2020, riguarda il consolidamento della parete est della rupe di San Leo, nel tratto che interessa la strada di accesso alla fortezza e la porzione di parete sottostante la fortezza stessa (fig. 4). L'intervento si pone l'obiettivo di ridurre il rischio di distacco e crollo di blocchi di roccia attraverso il consolidamento dell'ammasso.



Fig. 4 – Parete Est della Rupe; gli interventi in progetto verranno finalizzati a mitigare il rischio frana nella zona centrale di questo fronte alla cui sommità è presente la strada che conduce al Forte.

## 2 Studi ed indagini sulla Rupe

### 2.1 Indagini effettuate in passato

I fenomeni di instabilità che interessano le pareti che perimetrano la rupe risultano fortemente condizionati dai movimenti franosi del sottostante pendio e dai complessi fenomeni di interazione tra la placca rocciosa rigida ed il substrato argilloso deformabile.

A seguito del crollo di una importante fetta di roccia, che bloccò l'unica strada di accesso alla cittadina, venne decisa la costruzione di un viadotto, ultimato nel 1954, che allontanava la strada dalla parete (fig. 5).

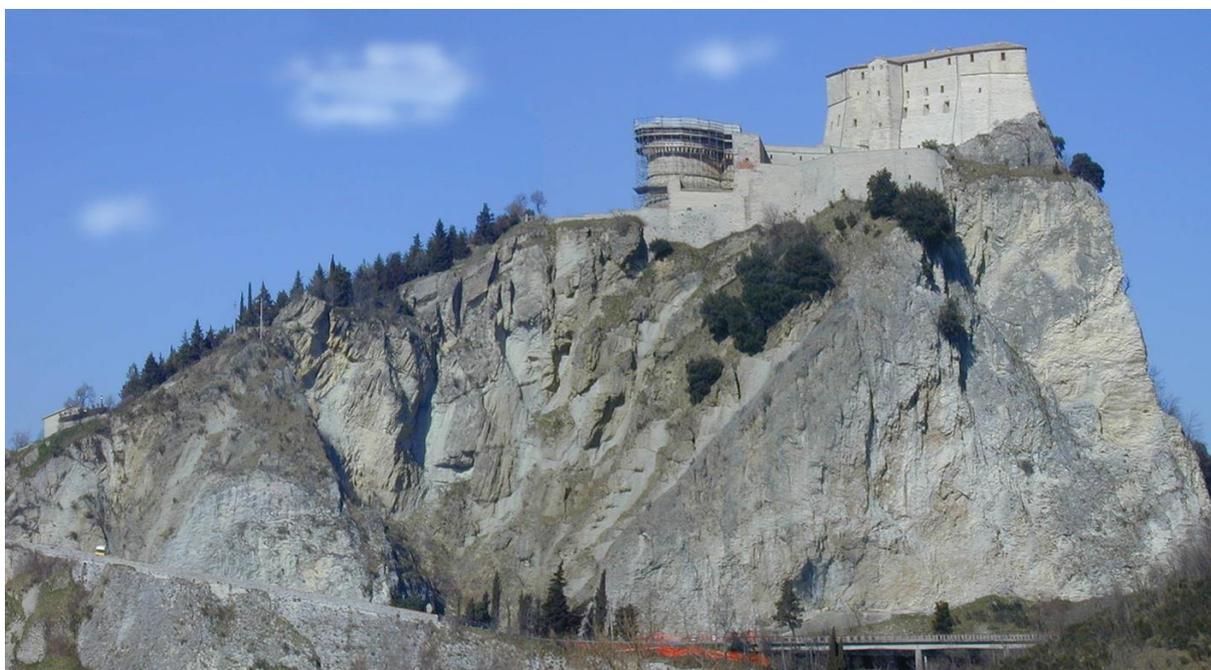


Fig. 5 - Fronte sud della Rupe, sovrastante l'unica strada di accesso alla cittadina.

In questa zona l'ammasso roccioso risulta intensamente fratturato e suddiviso in elementi di dimensioni decimetriche, mutuamente incastrati e ben giustapposti fra loro (fig. 6).

Alcuni sondaggi orizzontali, realizzati in tempi successivi su questo spigolo della rupe, hanno messo in evidenza l'intenso stato di fratturazione dell'ammasso anche a profondità di oltre 25m dal fronte. In occasione di alcuni lavori di consolidamento, alla base della parete fu realizzato un sondaggio orizzontale (SE3) attrezzato con estensimetri a barra. In questa perforazione, sebbene l'indice RQD sia risultato complessivamente superiore al 76% e mai inferiore al 50%, la curva di frequenza della spaziatura cumulata (fig. 7) indica una spaziatura media dei giunti di circa 11 cm (Tommasi P., 1997).



Fig. 6 –Parete sud della rupe in occasione dei lavori di consolidamento del fronte S (2002-2003); ben evidente l'intenso stato di fratturazione ed allentamento della fascia più superficiale dell'ammasso.

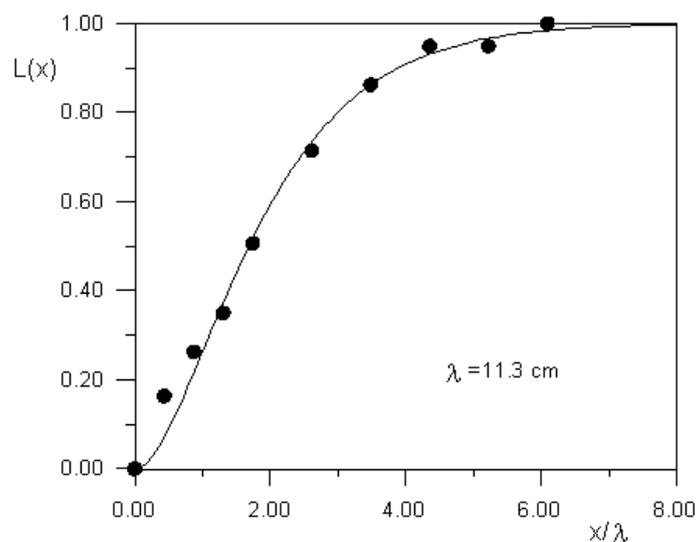


Fig. 7 - Frequenza della spaziatura cumulata nel sondaggio SE3

Altre due perforazioni orizzontali sono state realizzate dal ponteggio costruito per l'esecuzione dei lavori del 2002-2003, ad un'altezza di circa 573 m s.l.m. (S1) e 625 m s.l.m. (S2); i carotaggi hanno

indicato uno stato di fratturazione più intenso di quanto rilevato alla base della parete, con valori dell'indice RQD compresi fra 16% e 60% (fig. 8). Il sondaggio S2 ha inoltre evidenziato la presenza di una frattura subverticale, aperta circa 30 cm, alla profondità di circa 10m dalla parete; la frattura si estende dalla sommità della rupe fino ad un'altezza di circa 34 m dalla base.

Questa importante discontinuità tende a chiudersi verso il basso, dove risulta parzialmente riempita da detriti, e potrebbe essere stata generata dall'apertura per trazione di giunti appartenenti ad un sistema principale, con direzione circa parallela a quella del fronte e molto inclinati.

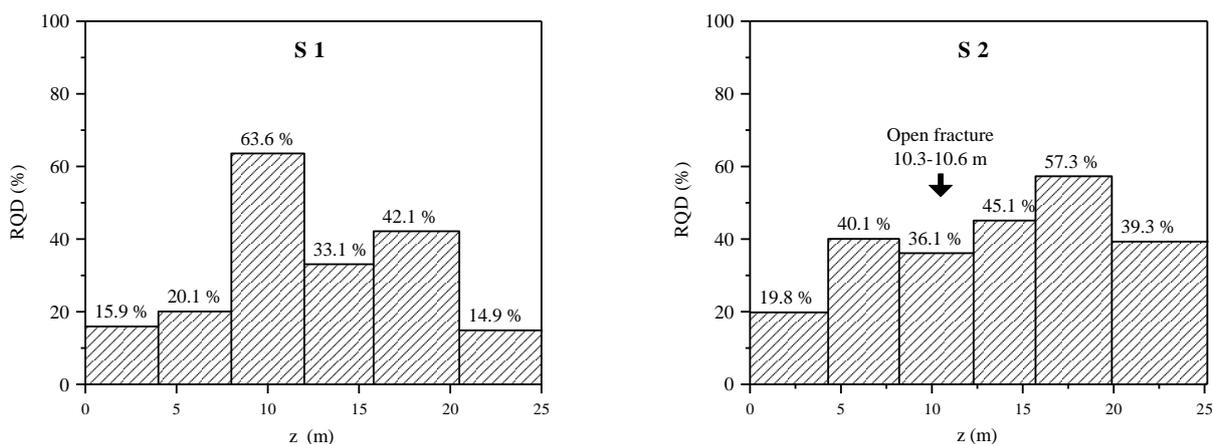


Fig. 8 - RQD nelle perforazioni di sondaggio S1 e S2 realizzate da ponteggio.

Le giaciture dei giunti rilevati alla base ed alla sommità della parete risultano alquanto disperse; dalle curve di isodensità si individuano 3 famiglie di discontinuità, ciascuna poi suddivisa in sottoinsiemi (fig. 9). La stratificazione S ha giacitura media pari a 210/52 (imm./incl.) alla sommità della parete e diventa circa subverticale alla base (215/88).

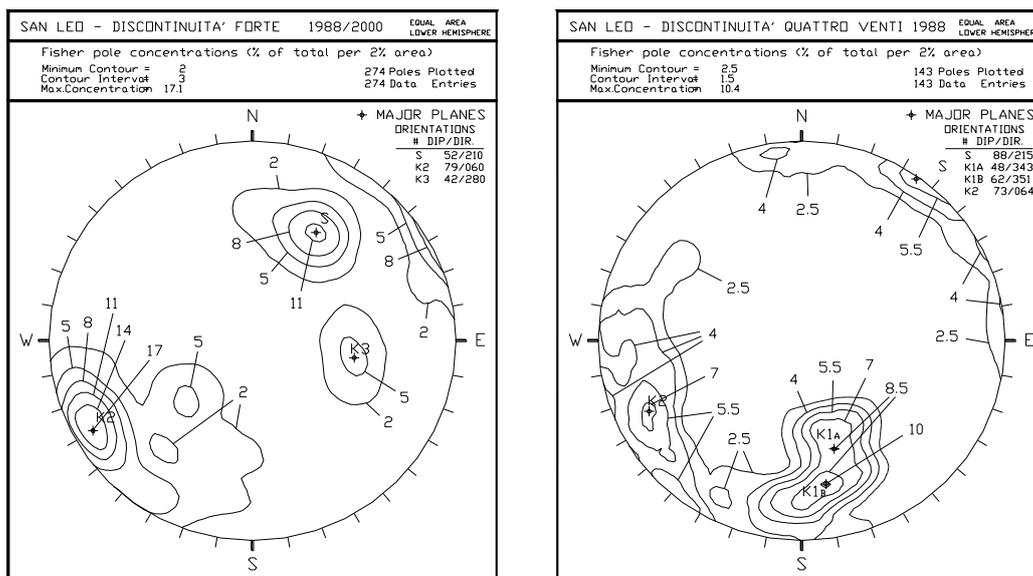


Fig. 9 – Curve di isodensità delle discontinuità rilevate sul fronte S.

Numerosi dissesti, storicamente documentati, hanno anche interessato la parete sottostante la porta d'ingresso alla cittadina, con fenomeni di ribaltamento e scivolamento di blocchi di roccia le cui dimensioni sono generalmente modeste. I continui scoscendimenti lungo il fosso Seripa hanno determinato uno strapiombo di oltre 10m della parete rocciosa, privata del sostegno alla base, al contatto con l'argilla. La sommità della piastra rocciosa, in aggetto, è interessata da una progressiva deformazione rotazionale verso l'esterno, evidenziata anche da una serie di fratture aperte nella roccia ed alcune lesioni negli edifici soprastanti (Tommasi P., Rotonda T., 1995).

L'antica strada di accesso alla porta, che si arrampicava dal fosso Seripa fino alla sommità della rupe con un tortuoso percorso a tornanti su muraglioni ad arco (fig. 10), è stata completamente distrutta dalle frane nelle argille; l'attuale accesso all'antica "Porta di sopra" è costituito da una strada a mezza costa che la collega alla zona dei "Quattro Venti".



Fig. 10 – Resti dell'antica via di accesso alla cittadina da Fosso Seripa (fronte S).

## 2.2 Indagini effettuate a seguito del crollo del 2014

A seguito del crollo che si è verificato in data 27/02/2014, che ha coinvolto un volume di roccia di circa 330.000 m<sup>3</sup>, sulla parete Nord della rupe e sull'adiacente parete Est, alla cui sommità si

sviluppa la strada che conduce alla Rocca rinascimentale, sono stati eseguiti numerosi studi ed indagini.

In particolare, sono state effettuate ispezioni dirette in parete con tecniche alpinistiche (calate in corda), rilievi geostrutturali di dettagli in parete e sulla sommità della rupe, rilievi dei piani di frattura con la tecnica laser scanner, due sondaggi a carotaggio continuo suborizzontali (attrezzati con estensimetri in foro) e un sondaggio a carotaggio continuo verticale spinto fino alla profondità di 111 metri da testa foro (fig. 11)



Fig. 11 - Sondaggi realizzati in corrispondenza della strada di accesso alla Fortezza.

In fig. 12 è indicata la posizione delle calate su corda effettuate per l'ispezione delle pareti rocciose. La descrizione di dettaglio di questi rilievi è riportata nei documenti redatti da ALPIGEO (S14031-08-RE01 / RE02 / RE03) di cui si riporta una sintetica descrizione delle calate di maggiore interesse per il presente progetto (calate 1 e 2), nel tratto compreso tra la Fortezza ed il tornante della strada. I rilievi in parete sono stati indirizzati soprattutto ad ispezionare le fratture maggiormente pervasive, che potenzialmente potrebbero dare origine a crolli di una certa entità.

La calata 1 si è sviluppata principalmente lungo l'estesa superficie inclinata a lato del diedro sottostante la Rocca. La superficie ha una giacitura prossima a 59/060, con locali variazioni di inclinazione che ne imprimono una ondulazione molto dolce a scala plurimetrica.



Fig. 12 – Posizione delle calate su corda per l'ispezione in parete

Le pareti sottostanti la rocca sono caratterizzate da una esfoliazione, dovuta a fratture parietali, con placche di spessore stimato attorno a 40-70 cm. La superficie inclinata esposta ad Est del diedro è ricca di colate cementizie e residui di lavorazioni dovuti all'ancoraggio delle impalcature di vecchi interventi (De Carolis, Soccodato, 1980). La superficie del giunto inclinato, che rappresenta l'attuale fronte, si estende sotto lo spigolo del diedro e presenta a tratti un'apertura di circa 1-2 cm (fig. 13).

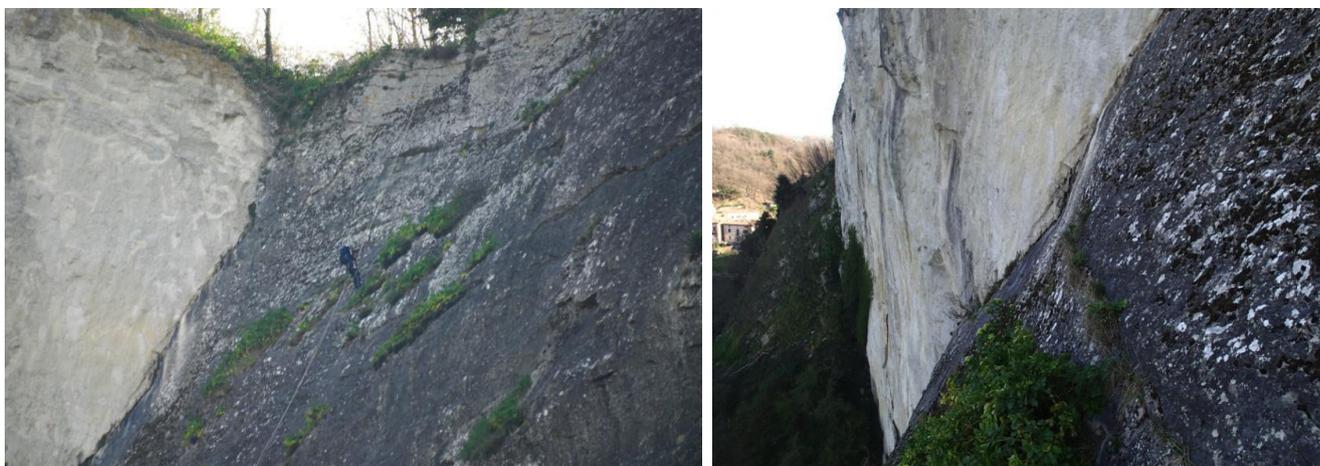


Fig. 13 – Diedro su cui è stata effettuata la calata n.1

A valle del piano inclinato la parete diviene aggettante. Il raccordo è abbastanza netto e nessuna frattura appare evidente nella zona di cambio di pendenza.

Lungo il piano inclinato è presente una frattura persistente per quasi tutta la larghezza del piano con apertura in superficie di circa 1-3 cm, riempita di terreno con vegetazione, e giacitura stimata di 88/060.

La calata n.2 ha consentito di osservare lo stato di fratturazione della parete rocciosa prospiciente la strada d'accesso alla fortezza, in prossimità del tornante, e verificare l'eventuale presenza di fratture che possano isolare una grossa placca rocciosa.

L'intero settore è caratterizzato da esfoliazione di placche rocciose di spessore variabile da 0.1 a 1m, separate da fratture variamente persistenti, appartenenti tutte alla famiglia K1 (88/060). In corrispondenza della sommità, in prossimità della zona del tornante, alcune di queste fratture separano un oggetto potenzialmente instabile. Il collasso di queste masse lambirebbe la strada d'accesso alla fortezza, ponendola direttamente sul limite del dirupo.

Le calate hanno consentito di ben individuare un blocco parallelo alla strada di accesso alla rocca. Il blocco è isolato a tergo da una grande frattura K1 e, verso la base, da grandi fratture appartenenti alla famiglia K4. Osservata frontalmente (Fig. 14) la parete superiore è delimitata da una frattura appartenente alla famiglia K4 e denominata nel prospetto K4.3; le due fratture verso la base, K4.4 e K4.5, risultano invece discontinue, con presenza di frequenti ponti di roccia.



Fig. 14 – Tracce dei giunti individuati con le calate in parete su corda.

### 3 Caratteristiche strutturali dell'ammasso roccioso

A seguito dell'importante crollo che si è verificato nel 2014, nel settore Nord ed Est della rupe sono stati effettuati numerosi rilievi strutturali sulla sommità della rupe e sulle pareti rocciose che la delimitano.

I rilievi e le indagini effettuate in questa prima fase di studio dalla Enser e dalla società Alpigeo sono illustrate nei documenti S14031-007-RE01-0 e S14031-008-RE01-0 allegati al presente progetto.

Le tracce delle principali fratture rilevate in corrispondenza del piano campagna nella porzione nord-est della rupe successivamente all'evento del 2014 sono state raggruppate in 5 famiglie, denominate K1, K2, K3, K4 ed KS (piani di stratificazione), in relazione alla loro giacitura ed origine. Le giaciture dei giunti appartenenti alle famiglie K1 e K2 sono molto simili e si ritiene che questa suddivisione sia stata effettuata considerando che le superficie di alcuni giunti (sistema indicato con K1) si presentano lisce e a tratti striate, e potrebbero essere messe in relazione alla dislocazione della parte centrale della rupe.

Nella zona alta del fronte esposto ad est sono stati anche realizzati rilievi di dettaglio in parete, mediante calate su corda (fig. 15); i risultati di questi rilievi sono rappresentati in proiezione stereografica polare nella figura 16. Il rilievo in parete mette bene in evidenza i giunti della famiglia K4, a frana-poggio rispetto al fronte, che rappresentano le superfici di potenziale scivolamento di blocchi e cunei di roccia su questo fronte. Dal rilievo diretto in parete si osserva anche la presenza dei giunti sub-verticali appartenenti alla famiglia K1, che delimitano a tergo i blocchi di roccia potenzialmente instabili per scivolamenti sulle superfici di giunto K4.

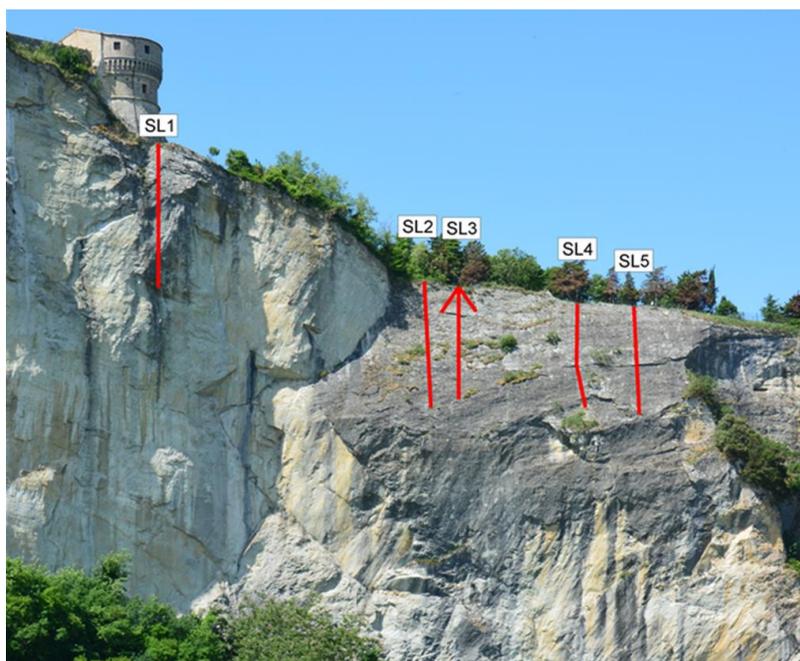


Fig. 15 – Calate su corda per rilievi diretti in parete.

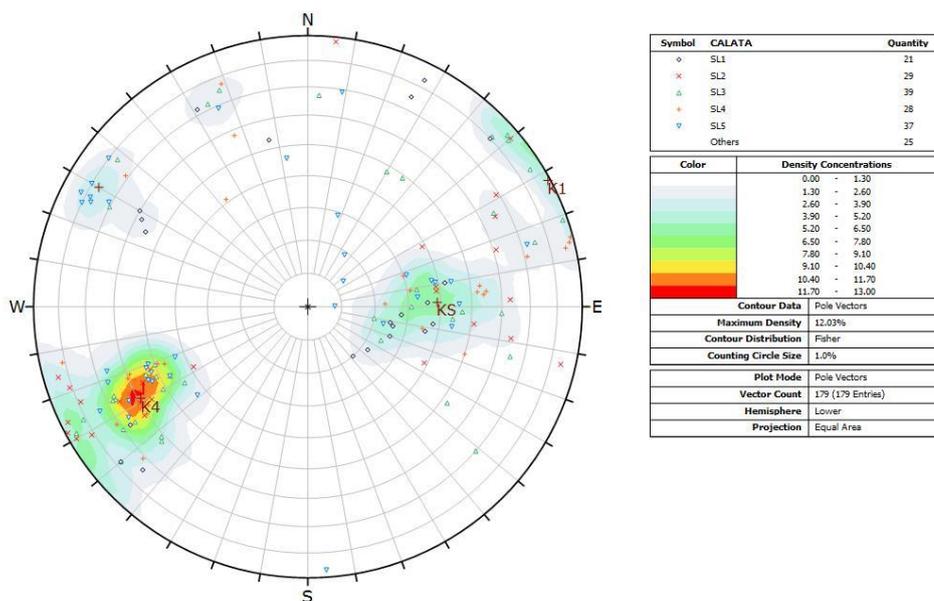


Fig. 16 – Zone del rilievo strutturale in parete e rappresentazione polare dei giunti rilevati.

I giunti di stratificazione Ks presentano giacitura media 39/268.

La giacitura dei piani e delle superfici che formano la parete est è stata anche rilevata con la tecnica laser scanner; i risultati di questo rilievo sono illustrati nel rapporto S14031-02-RE02-0.

Il software utilizzato per l'analisi del rilievo laser scanner ha evidenziato la presenza di sei famiglie di discontinuità riconducibili a quelle rilevate direttamente su roccia, oltre ad altre famiglie accessorie probabilmente dovute a effetti erosivi.

In figura 17 è riportata la proiezione stereografica dei poli delle superfici che formano la parete; nella sottostante tabella, è indicata la direzione di immersione ed inclinazione di queste superfici, la tolleranza dell'analisi e la famiglia associata.

Nella fig.18 si riporta infine la ripresa fotografica della parete messa a confronto con l'immagine della nuvola di punti in cui è indicata, in colori diversi, la giacitura delle discontinuità rilevate.

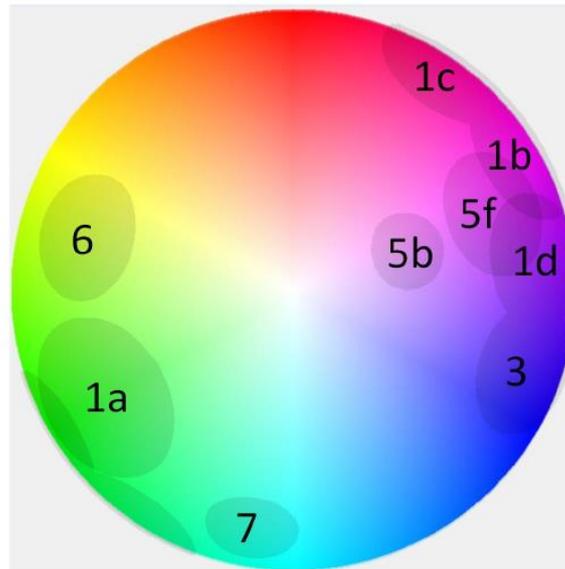


Figura 6. Set di discontinuità individuate sulla nuvola.

<b>Id SET</b>	<b>Direzione di immersione</b>	<b>Inclinazione (°)</b>	<b>Tolleranza (°)</b>	<b>Famiglia</b>
<b>1a</b>	60	67	20	K4
<b>1b</b>	239	84	15	K1÷K2
<b>1c</b>	215	85	15	K2
<b>3</b>	289	76	15	K5
<b>1d</b>	263	75	15	K1
<b>5b</b>	251	35	10	-
<b>5f</b>	249	65	15	-
<b>6</b>	105	65	15	-
<b>7</b>	10	75	10	K0

Fig.17 – Proiezione stereografica delle superfici che costituiscono la parete est e giacitura media di queste superfici.

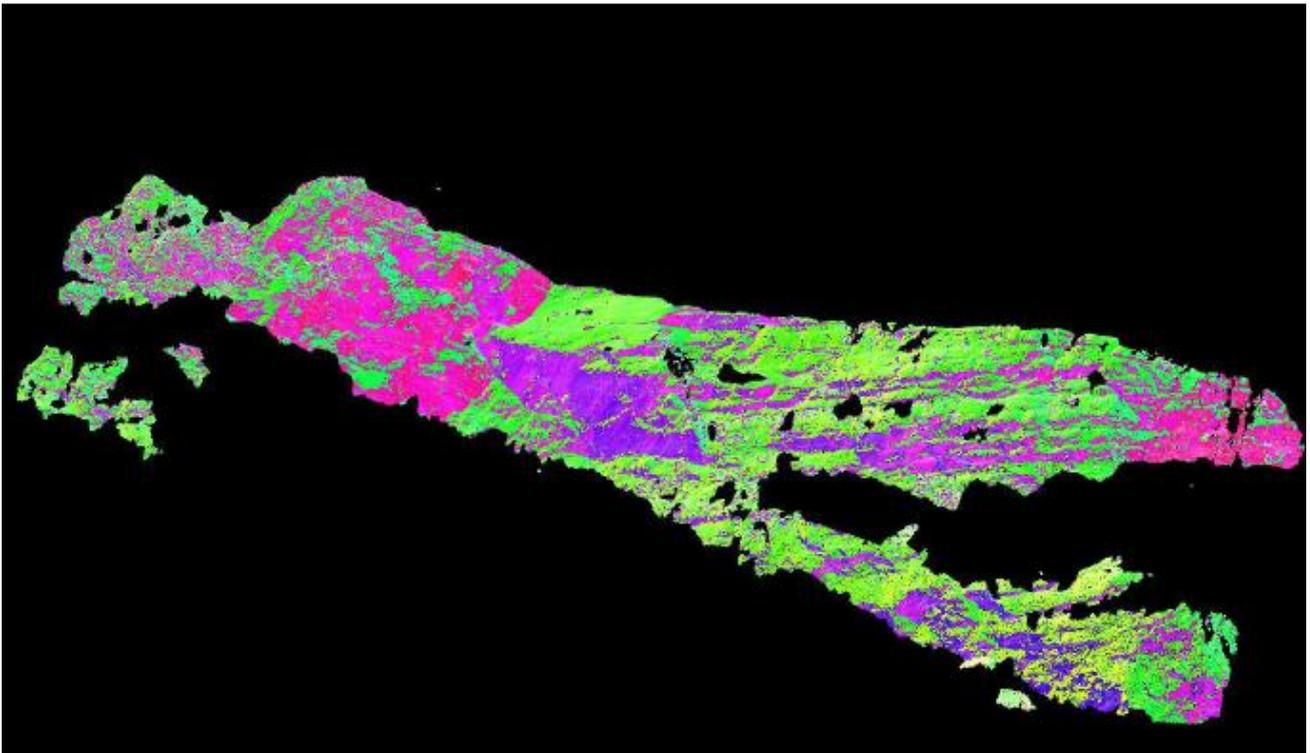


Fig. 18. Foto della parete messa a confronto con il rilievo laser scanner in cui sono indicati, in colori diversi, la direzione di immersione delle superfici che costituiscono il fronte.

Nella perforazione verticale a carotaggio continuo BH-LV-1, profonda 110 m, e nelle perforazioni S9-S15, sub-orizzontali con lieve inclinazione verso il basso, sono stati effettuati rilievi con telecamera ottica che consente di ottenere una immagine continua ed orientata delle pareti del foro di sondaggio. L'ubicazione di queste perforazioni è riportata nella tavola G1.

Le immagini ottenute dalla scansione delle pareti del foro, opportunamente elaborate, hanno consentito di individuare la giacitura (inclinazione ed azimuth) di tutte le superfici di giunto intercettate dalle perforazioni. Le descrizioni stratigrafiche delle perforazioni S9-S15 sono riportate nelle tavole G2, G3 e G4, insieme alla rappresentazione stereografica polare dei giunti rilevati in ciascun sondaggio.

Nella figura 19 è riportata la proiezione stereografica delle giaciture di tutti i giunti rilevati mediante sonda televisiva nelle perforazioni S9-S15; l'indice RQD medio, calcolato sulla lunghezza complessiva di tutte le perforazioni, risulta pari a circa 88% e la frequenza di giunti per metro è pari a 4.43.

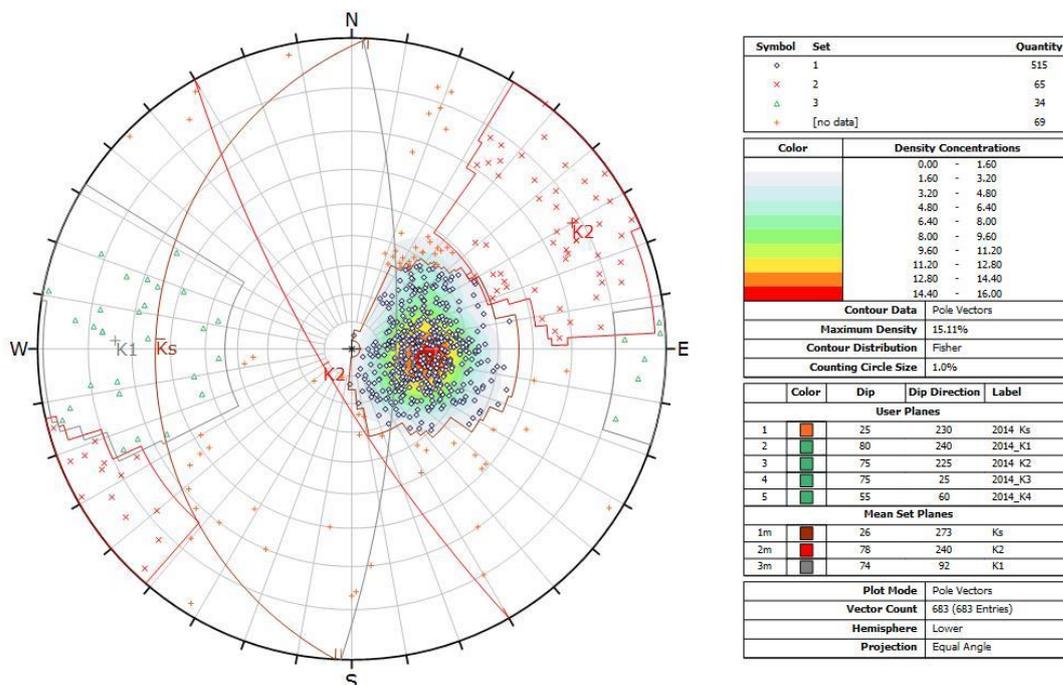


Fig. 19 \_ Proiezione stereografica dei giunti rilevati con sonda televisiva nei sondaggi S9-S15.

Nel rilievo con sonda televisivo prevalgono nettamente i giunti di stratificazione Ks, che presentano una giacitura media di 26/273; la spaziatura media effettiva (misurata sulla normale ai piani) dei giunti appartenenti a questa famiglia risulta pari a 0.2 m.

Ben rappresentata nel reticolo è anche la famiglia K2 che presenta una giacitura media pari a 78/240; la spaziatura media effettiva di questi giunti è pari a 1.5 m. Infine, i giunti della famiglia K1 risultano molto dispersi con giacitura media 74/092 e spaziatura media pari a circa 2.1 m.

La direzione di queste perforazioni di sondaggio risulta poco favorevole ad intercettare i giunti della famiglia K4 che, su questo fronte della rupe, costituiscono i potenziali piani di scivolamento di porzioni di roccia.

Dall'insieme di tutti i dati disponibili, nella zona della rupe in cui è previsto l'intervento in progetto si hanno a disposizione 1086 giaciture di giunti. L'insieme dei poli dei piani è rappresentato in Figura 20, nella figura sono anche indicate le aree del reticolo in cui ricadono i poli di ciascuna famiglia e le ciclografie dei piani medi.

Le famiglie più rappresentate sono le K1-K2, K4 e KS.

La famiglia K1-K2 presenta una giacitura piuttosto dispersa, caratterizzata da una inclinazione elevata ed immersione sia verso WSW che verso ENE. Il piano medio è caratterizzato da un angolo di immersione di  $240^\circ$  ed inclinazione di  $76^\circ$ .

I piani attribuiti alla famiglia K4 sono ben individuati sul reticolo polare e presentano una giacitura media pari a  $59^\circ/061^\circ$ ; l'inclinazione è prevalentemente compresa tra  $45^\circ$  e  $65^\circ$ .

Infine, i giunti di strato KS hanno una immersione media di  $271^\circ$  ed un angolo di inclinazione modesto, mediamente pari a  $27^\circ$ .

Durante il rilievo effettuato nella porzione nord-est della rupe sono state misurate anche altre grandezze caratteristiche delle discontinuità, quali l'apertura, la scabrezza (espressa dal parametro JRC) e l'altezza di rimbalzo mediante martello di Schmidt, correlabile al parametro JCS (ovvero alla resistenza a compressione uniassiale del materiale roccioso che costituisce la superficie del giunto). Per quanto riguarda il parametro JRC sono state eseguite 25 misure, con valori compresi tra 6 e 17. Mediamente le famiglie K1, K2 e K3 presentano un valore medio di JRC pari a 12. La famiglia K4, per la quale le osservazioni eseguite sono state solamente 3, è invece caratterizzata da un valore mediamente più basso e pari a 10. Non si hanno rilievi per i giunti di stratificazione KS.

Il parametro JCS, stimato in base alle altezze di rimbalzo, è risultato abbastanza disperso, soprattutto per la famiglia K1 per la quale si dispone di più misure (13). I valori ottenuti, compresi tra 32 ed 80 MPa, forniscono un valore medio di circa 45 MPa. Analogo valore si ottiene mediamente per la famiglia K2. Per ciascuna delle famiglie K4 ed KS si dispone di un'unica misura di altezza di rimbalzo che fornisce un valore di JCS rispettivamente pari a 65 e 45 MPa.

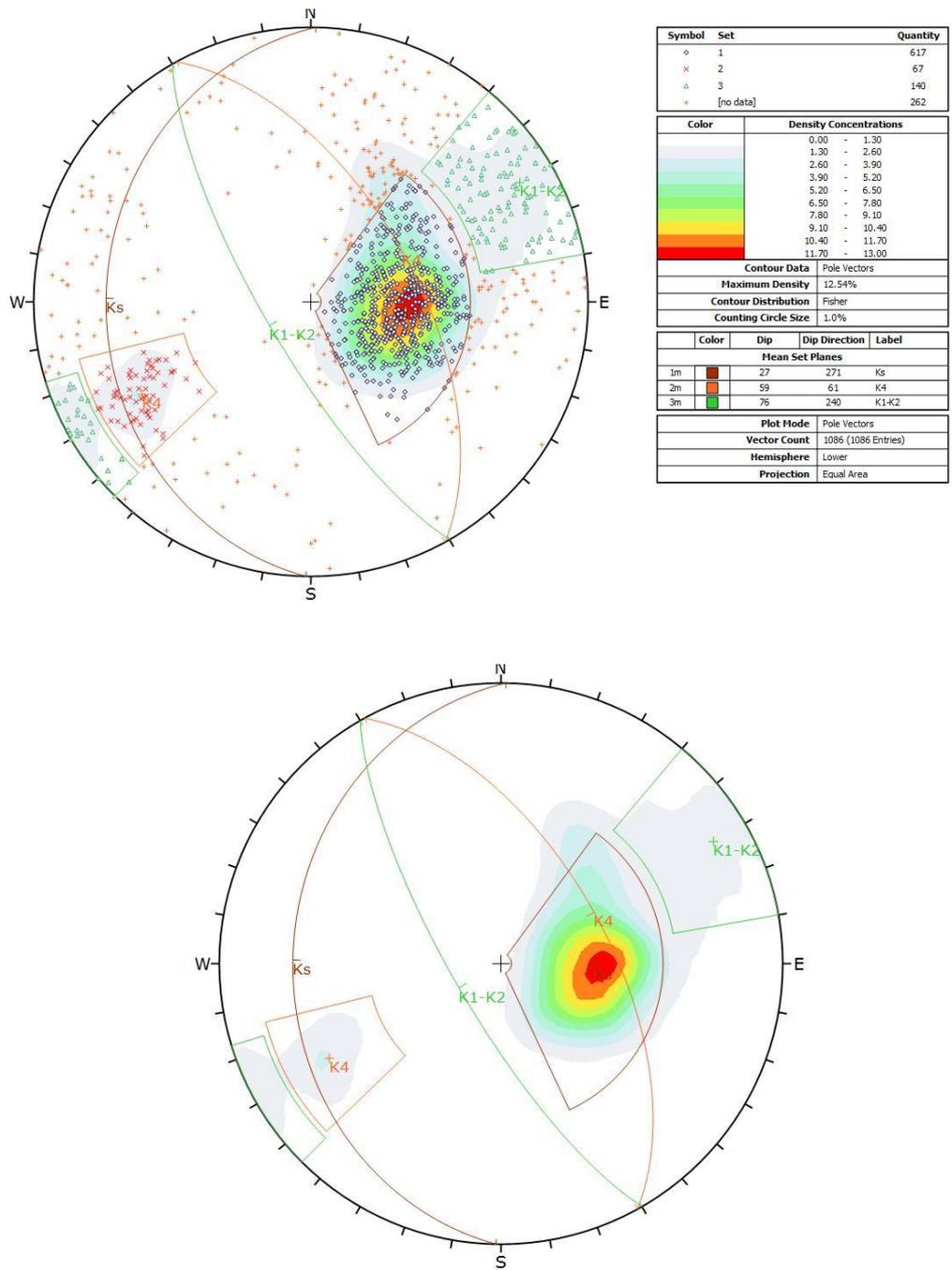


Fig. 20 – Proiezione stereografica dei giunti rilevati nella zona Est della rupe.

## 4 Caratterizzazione geotecnica del materiale roccioso e delle discontinuità

Per la caratterizzazione geotecnica del materiale roccioso e delle discontinuità che interessano l'ammasso, è possibile fare riferimento a varie campagne d'indagini in laboratorio realizzate in più fasi temporali.

Le caratteristiche meccaniche del materiale roccioso della formazione di San Marino sono state determinate su campioni provenienti dal sondaggio estensimetrico SE3 realizzato alla base della parete meridionale, e su campioni prelevati dai sondaggi eseguiti dalla sommità della rupe negli anni '70.

L'ammasso roccioso è costituito da calcarenite, la cui grana ed il grado di cementazione sono piuttosto variabili.

Il peso di volume del solido varia fra 25.2 e 26.7 kN/m<sup>3</sup>. La porosità, compresa fra il 3% ed l'11%, è ben correlata con la velocità V<sub>p</sub> delle onde longitudinali (fig. 21), soprattutto per i campioni del sondaggio SE3 che sono interessati da giunti serrati, più che da discontinuità nette.

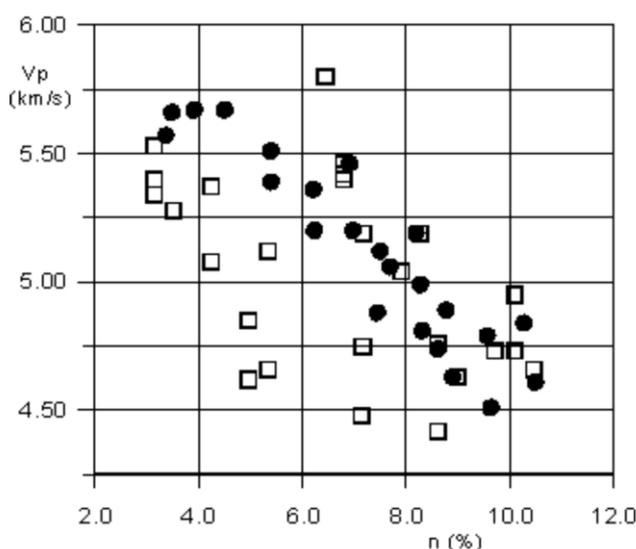


Fig. 21 – Correlazione tra la velocità delle onde di pressione e la porosità.

Il modulo elastico tangente (Et), calcolato al 50% del carico di rottura, è invece fortemente influenzato dalla presenza di discontinuità nei campioni (fig. 22). Prove di carico monoassiale hanno evidenziato l'esistenza di due comportamenti tipici associabili a materiali con diverso tipo di porosità:

- un materiale con pori diffusi e microfessure, prevalentemente chiuse, caratterizzato da valori di Et costanti o leggermente decrescenti all'aumentare del carico assiale;
- un secondo tipo con numerosi pori e microfessure per lo più aperte, caratterizzato da valori di Et che, inizialmente elevati, decrescono bruscamente per valori di sforzo pari al 10-15% del carico di rottura, per poi aumentare di nuovo al crescere del carico assiale.

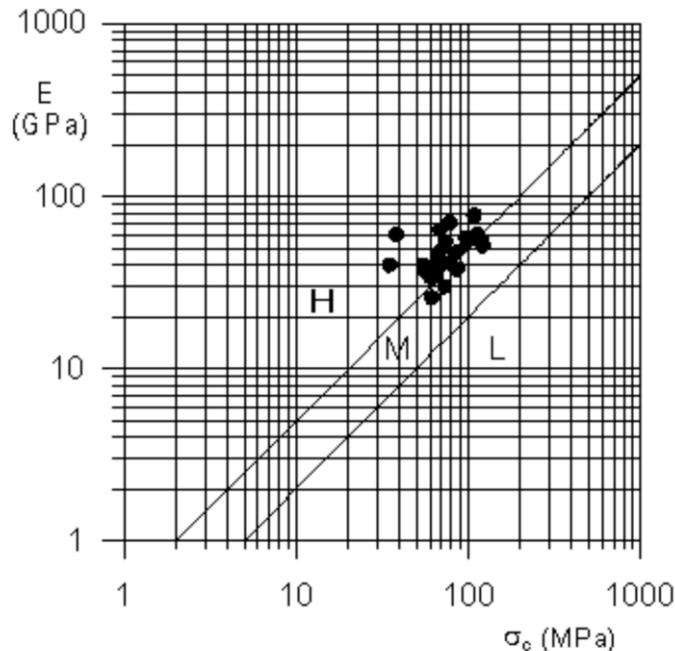


Fig. 22 – Diagramma di Deere

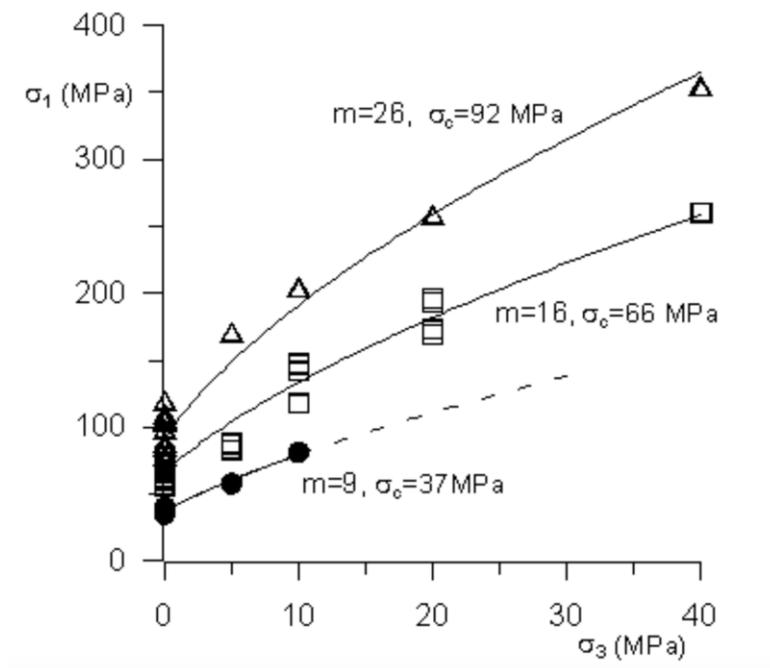


Fig. 23

L'eventuale presenza di giunti cementati all'interno dei provini riduce i parametri di resistenza di circa il 60% (Rotonda T., 1991; Tommasi P., 1997). Nelle prove di laboratorio (fig. 23), in presenza di giunti cementati, la resistenza a compressione uniaassiale si è ridotta da 92 MPa a 37 MPa, e la resistenza a trazione da 10 MPa a 3 MPa. L'influenza delle discontinuità sul modulo elastico è invece trascurabile (Rotonda T., 1991).

Nelle carote i giunti si differenziano per tipologia e spessore del materiale di riempimento, che varia fra 2 e 5 mm.

Il principale componente mineralogico che costituisce il riempimento è il carbonato di calcio, sempre superiore al 60%, ma in ogni caso minore del contenuto tipico in CaCO<sub>3</sub> dell'ammasso roccioso che non risulta mai inferiore al 95%. Dai diffrattogrammi eseguiti su alcuni giunti, fra gli altri componenti mineralogici sono stati individuati minerali argillosi, quarzo, feldspati, idrossidi e sostanze amorfe in percentuali variabili.

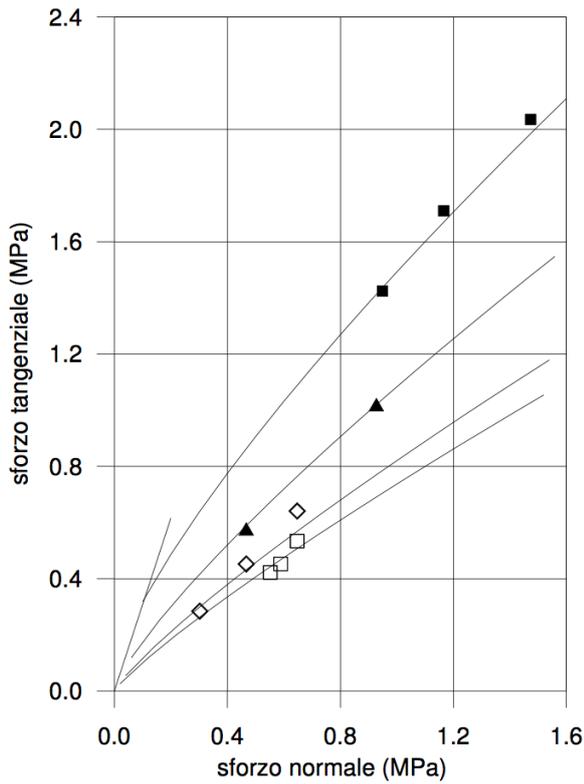
Nel corso di ricerche condotte dal CNR alla fine degli anni 90, riprese nell'ambito del Progetto Esecutivo del 2001, sono state eseguite prove di taglio diretto e prove di tilt test sui giunti. La scabrezza è stata inoltre misurata su ciascun giunto mediante profilometro.

Dall'esame delle prove di taglio e delle caratteristiche litologiche e strutturali sono state individuate quattro classi di giunti a diverso comportamento come riassunto in Fig. 24. I giunti delle classi I e II sono quelli lisci con sottile riempimento non cementato mentre i giunti del tipo III hanno riempimento assente o lapideo e scabrezza più elevata. I giunti del tipo IV possono essere considerati rappresentativi di discontinuità scabre, con riempimento lapideo e con possibili ponti di roccia, rotti durante le operazioni di campionamento.

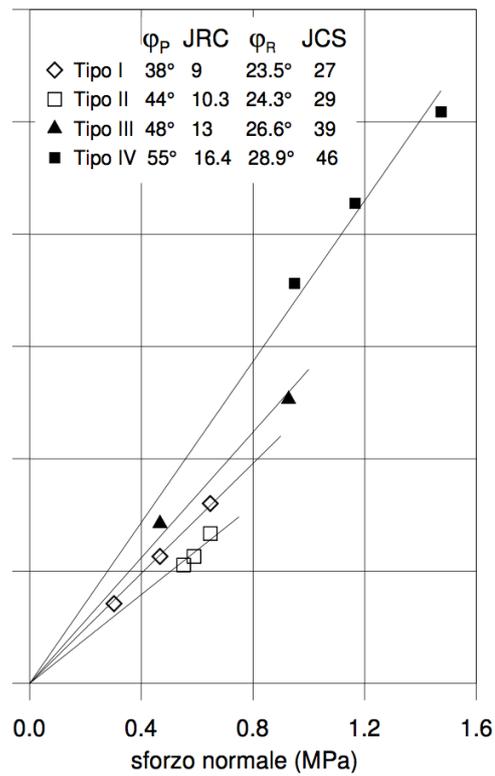
Dal confronto con il rilievo effettuato sul piano campagna della porzione nord-est della rupe in prossimità del crollo, Boldini e Tommasi (S14031-007-RE01-0) ritengono possa esserci un'analogia fra le caratteristiche di resistenza delle fratture nella zona di interesse e quelle appartenenti alle classi II e III identificate in Fig. 24, soprattutto in termini di valori di JRC.

CLASSE	SCABREZZA	RIEMPIMENTO	STATO DELLE SUPERFICI	RESISTENZA	
				Barton	Mohr-Coulomb
I	giunti lisci	assente o scarso e non cementato (tipo A)	superficie alterata	$JRC=9$ $JCS=27$	$\phi_p=38^\circ$ $\phi_r=23.5$
II	giunti poco scabri	poco o non cementato (tipo A)	superficie alterata	$JRC=10.3$ $JCS=29$	$\phi_p=44^\circ$ $\phi_r=24.3$
III	giunti scabri	lapideo (tipo B)	superficie parzialmente alterata	$JRC=13$ $JCS=39$	$\phi_p=48^\circ$ $\phi_r=26.6$
IV	giunti molto scabri	lapideo (tipo B)	superficie fresca	$JRC=16.4$ $JCS=46$	$\phi_p=55^\circ$ $\phi_r=28.9$

c)



a)



b)

Fig. 24 -

L'angolo d'attrito di base  $\phi_b$ , determinato con prove di scivolamento su superfici segate, è risultato pari a  $36^\circ$ .

Prove di taglio diretto a carico controllato eseguite sui campioni contenenti giunti hanno indicato valori di rigidità a taglio ( $K_s$ ) compresi fra 0.19 e 0.27 MPa/mm ed angoli di dilatanza fra  $7^\circ$  e  $12^\circ$ .

## 5 Basamento argillitico

Dati sulle caratteristiche geotecniche del basamento argilloso possono essere reperiti nella letteratura tecnica. Alcune indagini di laboratorio sono state anche realizzate dalla dott. L. Borgatti nell'ambito di uno studio svolto dall'Università di Bologna per conto dell'Agenzia Regionale per la sicurezza del territorio e la Protezione Civile, Servizio Area Romagna, sede di Rimini.

Il substrato argillitico è attribuito alla formazione delle Argille Varicolori e può essere classificato come argilla limosa, con 44% di argilla e 66% di limo. La frazione argillosa è costituita prevalentemente da montmorillonite e subordinatamente da caolinite ed illite. La presenza di questi materiali spiega anche il comportamento rigonfiante, misurato con le prove edometriche.

Il peso di volume del solido varia tra 24.9 e 26.7 kN/m<sup>3</sup>; il peso di volume in condizioni asciutte è compreso tra 17.1 e 17.6 kN/m<sup>3</sup>, con indice dei vuoti medio pari a 0.43.

Nella carta di plasticità di Casagrande il materiale può essere classificato come Argilla inorganica di Alta Plasticità, caratterizzata da un limite di Liquidità pari a 74% ed Indice di Plasticità del 57% circa. I limiti di consistenza risultano tuttavia molto variabili e l'indice di plasticità è piuttosto elevato a causa dell'abbondanza di montmorillonite. Alcuni campioni prelevati nella zona del Fosso Campone hanno fornito valori del limite di Liquidità compresi tra 70 e 170% mentre i campioni prelevati nella zona del Fosso Seripa hanno mostrato un comportamento più omogeneo con IP variabile tra 40 e 70% (Ribacchi et al, 1988).

Le caratteristiche di resistenza delle argilliti sono influenzate dalla struttura del materiale e dalla direzione di applicazione dei carichi rispetto ai piani di fissilità. Prove triassiali su campioni di grande diametro prelevati nella zona di Fosso Seripa hanno fornito valori di coesione ed angolo di attrito di picco pari a  $c'_p = 40$  kPa e  $\varphi'_p = 12^\circ$  (Ribacchi et al., 1988).

Cicli di rigonfiamento e ritiro portano alla progressiva degradazione delle proprietà meccaniche dei materiali argillitici (Picarelli 2000) ed a cambiamenti nella struttura dei terreni (Vogel et al. 2005). L'infiltrazione di acque in questi terreni molto poco permeabili è favorita dalle profonde fessure che si creano nei periodi secchi, e favoriscono l'innescio di frane superficiali.

## 6 Bibliografia

- 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, 853-858.
- Cecere V., Lembo-Fazio A. (1986). “Condizioni di sollecitazione indotte dalla presenza di una placca lapidea su un substrato deformabile”. *XVI Convegno Nazionale di Geotecnica*, Bologna, 1, 191-202.
- D’Ambra S., Giglio G., Lembo Fazio A (2004) : Interventi di sistemazione e stabilizzazione della rupe di San Leo. *Int. Symp. INTERPRAEVENT*, IV, 103-114.
- Lembo-Fazio A., Ribacchi R., Sciotti M., Tommasi P. (1998): “Problematiche di intervento su versanti naturali per la salvaguardia di abitati ed opere di ingegneria. Alcuni esempi in relazione a diversi tipi di dissesto”. *6° Ciclo di conferenze di Meccanica delle Rocce*, Torino.
- Picarelli, L. et al., 2000. Properties and behaviour of tectonized clay shales in Italy. *In Evangelista & Picarelli, eds. The geotechnics of hard soils-soft rocks. rotterdam: Balkema*, pp. 1211–1242.
- Ribacchi R., Sciotti M., Tommasi P. (1988): “Stability problems of some towns in central Italy: Geotechnical situations and remedial measures”. *IAEG Int. Symp. on Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites*, Athens, 1, 27-36.
- Ribacchi R., Tommasi P. (1988): “Preservation and protection of the historical town of San Leo (Italy)”. *IAEG Int. Symp. on Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites*, Athens, 1, 55-64.
- Ribacchi R., Tommasi P. (1989): “Instability problems of the San Leo Cliff. In “Reading historical sites through geotechnical evidence”, 85-90. *ISSMFE TC19 and AGI*.
- Rotonda T. (1991). “Caratteristiche di resistenza delle rocce calcareo-dolomitiche fessurate”. *2° Convegno del Gruppo Nazionale di coordinamento per gli studi di Ingegneria Geotecnica del C.N.R.*, Ravello (SA), 1, 119-135.
- Tommasi P. (1997): “Analisi dei fattori che influenzano la resistenza dei giunti in rocce calcaree: un esempio di caratterizzazione per lo studio di una parete rocciosa”. In “Il modello geotecnico del sottosuolo nella progettazione delle opere di sostegno e degli scavi”. *IV Convegno Nazionale dei Ricercatori Universitari*, Perugia, 1, 549-565.
- Tommasi P., Rotonda T. (1995): “Analysis of deformations occurring at the edge of a rock cliff underneath a historical center”. *VIII ISRM Int. Congr. on Rock Mechanics*, Tokyo, 1, 383-388.

### **Documenti delle indagini e rilievi del 2014**

Lavori di somma urgenza per il monitoraggio ed approfondimento conoscitivo della nuova morfologia dei luoghi del versante nord della rupe di San Leo (RN) interessata da crollo.

S14031-002-RE02-0 (30.06.2014): Laser scanner da terra, **Relazione 02, Giacitura interpolata delle principali fratture**

S14031-002-RE03-0 (30.06.2014): Laser scanner da terra, **Relazione 03, Modello 3d delle pareti**

S14031-003-RE01-0 (30.06.2014): Rilievo fotogrammetrico di dettagli con drone dell’abitato e della parete del crollo 2014 a supporto geologi rocciatori, **Relazione 01, Relazione tecnica illustrativa delle modalità rilievo.**

S14031-003-RE02-0 (30.06.2014): Rilievo fotogrammetrico di dettagli con drone dell’abitato e della parete del crollo 2014 a supporto geologi rocciatori, **Relazione 02, Modello 3D delle pareti.**

- S14031-005-RE01-0 (30.06.2014): Rilievo geomeccanico lungo la parete di crollo 2014. **Relazione 01, Rapporto dell'ispezione in corda delle pareti rocciose.**
- S14031-005-RE02-0 (30.06.2014): Rilievo geomeccanico lungo la parete di crollo 2014. **Relazione 02, Documentazione fotografica.**
- S14031-005-RE03-0 (30.06.2014): Rilievo geomeccanico lungo la parete di crollo 2014. **Relazione 03, Prospetti.**
- S14031-007-RE01-0 (30.06.2014): Analisi di stabilità all'equilibrio limite e analisi di stabilità FEM-DEM per la parete est, **Relazione 01, Relazione illustrativa sull'analisi all'equilibrio limite della parete est.**
- S14031-007-RE02-0 (30.06.2014): Analisi di stabilità all'equilibrio limite e analisi di stabilità FEM-DEM per la parete est, **Relazione 02, Relazione sull'analisi probabilistica dei parametri geomeccanici.**
- S14031-007-RE03-0 (30.06.2014): Analisi di stabilità all'equilibrio limite e analisi di stabilità FEM-DEM per la parete est, **Relazione 03, Relazione illustrativa sull'analisi di stabilità agli elementi finiti (FEM) della parete est.**
- S14031-007-RE04-0 (30.06.2014): Analisi di stabilità all'equilibrio limite e analisi di stabilità FEM-DEM per la parete est, **Relazione 04, Relazione illustrativa sull'analisi di stabilità DEM della parete est.**
- S14031-007-RE05-0 (30.06.2014): Analisi di stabilità all'equilibrio limite e analisi di stabilità FEM-DEM per la parete est, **Relazione 05, Allegato 3N – UDEC sezione 11.**
- S14031-008-RE01-0 (30.06.2014): Rilievo geomeccanico lungo la parete est, **Relazione 01, Rapporto sull'ispezione in corda delle pareti rocciose.**
- S14031-008-RE02-0 (30.06.2014): Rilievo geomeccanico lungo la parete est, **Relazione 02, Documentazione fotografica.**
- S14031-008-RE03-0 (30.06.2014): Rilievo geomeccanico lungo la parete est, **Relazione 03, Prospetti.**