



Internationales Symposion INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

INTERVENTI DI SISTEMAZIONE E STABILIZZAZIONE DELLA RUPE DI SAN LEO

ARRANGEMENT AND STABILIZATION OF THE SAN LEO CLIFF

Sonia D'Ambr¹, Giovanni Giglio², Albino Lembo-Fazio³

RIASSUNTO

La città di San Leo ed il suo castello rinascimentale si ergono sulla cima di una placca arenaceo-calcareo, sovrastante un substrato di argille scagliose. 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. Per verificare le condizioni di stabilità della parete sotto il castello sono state effettuate analisi numeriche alle differenze finite ed agli elementi finiti (FDM, DEM). Le analisi suggeriscono che il severo stato di sforzo al piede del piastrone è principalmente influenzato dall'interazione fra il rigido ammasso roccioso ed il substrato deformabile. I risultati delle analisi agli elementi distinti, in accordo con i rilievi effettuati, evidenziano che il margine del piastrone roccioso è interessato dalla progressiva apertura dei giunti con giacitura parallela alla parete rocciosa, sollecitati a trazione e taglio.

Parole chiave: Modelli numerici, Giunti, Interazione roccia-terreno

ABSTRACT

The town of San Leo and his Renaissance castle rise at the top of a calcarenite-sandstone butte, overlying a clay-shale substratum. Over the centuries, the walls of the cliff have been repeatedly involved in instability phenomena affecting, in particular, the wall of the castle and destroying the roads leading up to the town.

Numerical analyses (FDM, DEM) had been performed with the aim of evaluating the stability condition of the rock face under the castle. The analyses suggest that the severe state of stress, which characterizes the toe of the butte, is greatly influenced by the interaction between the rigid rock mass and the underlying deformable substratum. The DEM results, in agreement with field observations, also suggest that the margin of the rock slab is affected by a progressive opening of the rock joints striking parallel to the rock face, which are subjected to tensile and shear stresses.

Key words: Numerical analyses, Joints, Rock-soil interaction

Department of Science of Civil Engineering, University of RomaTre, Via Vito Volterra 62, 00146 Rome, Italy

1 email: dambra@uniroma3.it; Tel.: +39-6-5517-3474; Fax: +39-6-5517-3442

2 email: giglio@uniroma3.it; Tel.: +39-6-5517-3421; Fax: +39-6-5517-3442

3 email: alf@uniroma3.it; Tel.: +39-6-5517-3474; Fax: +39-6-5517-3442

INTRODUZIONE

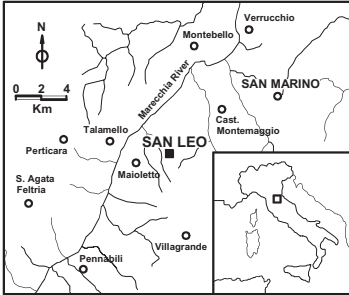


Fig1: Posizione geografica del città di San Leo
Fig1: Geographic position of the San Leo town

La cittadina di San Leo è situata nell'entroterra Pesarese, a 16 km dalla Repubblica di San Marino (fig. 1), e si sviluppa sulla sommità di una rupe calcarea di forma quadrangolare (fig. 2), con dimensioni circa 500x600m, poggiante su un substrato di argille tettonizzate. La rupe è limitata da pareti verticali spesso in aggetto, alte da 50 a 100m; la superficie superiore della rupe tende a declinare da Est verso Ovest (fig. 3).

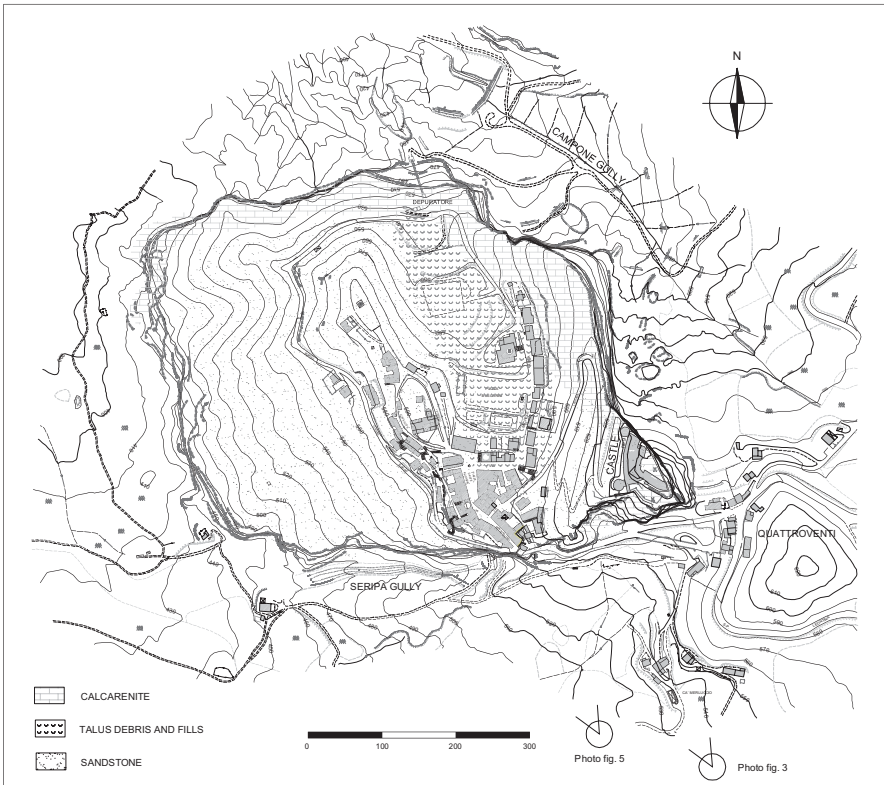


Fig2: Planimetria della piastra rocciosa
Fig2: Map of the rock slab



Fig3: Vista della parete sud della rupe
Fig3: View of the south wall of the cliff

Alla sommità dello spigolo sud-orientale si erge la Roccaforte (fig. 3) che domina tutta la circostante valle di Montefeltro⁴, caratterizzata da un paesaggio ondulato, inciso nei terreni della formazione delle Argille Varicolori della Val Marecchia.

La Rocca, nella sua configurazione attuale, è il frutto di numerose aggiunte e modifiche stratificate nel corso dei secoli sulla prima fortificazione edificata dai Romani sulla cima della rupe che, per la sua conformazione, costituiva di per sé una fortezza naturale.

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 NNW-NW e si estende su un'area piuttosto ampia e caratterizzata da una morfologia tormentata, con ampie zone in forte erosione di tipo calanchivo.

L'abitato occupa la zona centrale della rupe fino alla "Porta di sopra", sul bordo meridionale, che costituisce attualmente 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. In questa zona le colate nelle argille scagliose del substrato sono molto attive e si estendono fino al piede della rupe, sottoscavando l'appoggio dell'ammasso roccioso sulle argille e determinando pertanto la formazione di porzioni rocciose in aggetto.

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, dove 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, che lo cingeva lungo il lato sud. 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).

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il settore appenninico in cui è situato il rilievo di San Leo è costituito da terreni alloctoni appartenenti al Dominio Ligure Esterno, accavallati in ampie falde. I movimenti traslativi, che hanno caratterizzato le fasi orogeniche della catena appenninica, sono avvenuti in condizioni subacquee che perdurarono anche dopo la completa sovrapposizione delle varie unità

⁴ nome derivato da *Mons Feretrius* con cui veniva anticamente designata la rupe e la città di San Leo.

tettoniche. Sui terreni corrugati si impostarono vari bacini minori entro i quali si depositarono sequenze sedimentarie.

Il complesso ligure basale, alloctono nell'area considerata, è costituito prevalentemente da argille policrome, con colori variabili dal nero al grigio chiaro, al rossastro, al verde, al vinaccia, al bluastro, al rosato, da cui il nome di Argille Varicolori della Val Marecchia (Cretaceo inf. – Eocene inf.). L'unità appare fortemente deformata per l'elevato grado di tettonizzazione che ha interessato un litotipo prevalentemente pelitico.

Nella successione stratigrafica alle Argille Varicolori seguono le torbiditi calcareo marnose della Formazione di Monte Morello (Eocene inf. – med.).

Sulle formazioni della coltre della Val Marecchia si susseguono le unità del dominio epiligure con le *Breccie poligeniche del Sasso Simone* (Eocene med. ? – Mioc. Inf. Burdigaliano ?) seguite, in successione stratigrafica, dalla *Formazione di San Marino* (Mioc. Inf.) e dalla *Formazione di Monte Fumaiolo* (Mioc. inf.). In quest'ultima le caratteristiche litologiche verso l'alto precludono ad un brusco inizio di una importante fase trasgressiva, con le *Argille di Montebello* (Mioc. med.) e la *Formazione Acquaviva* (Mioc. med.), discordanti su tutte le unità precedenti sia liguri che epiliguri. Con un progressivo aumento della frazione pelitica, sia verso l'alto sia lateralmente, si passa alle *Formazione delle Argille di Casa Gessi* (base del Messiniano). Sopra questa unità seguono le Evaporati (Messiniano med- sup.) che chiudono l'importante fase tettonica messiniana. Dopo tale fase la sedimentazione riprende, discordante sulla precedente, con la *formazione di Casa Monte Sabatino* a cui segue la deposizione delle *Argille Azzurre* del Pliocene.

La piastra rocciosa su cui sorge l'abitato di San Leo può essere considerata un archetipo di placca epiligure della Val Marecchia, costituita dai calcari della *Formazione di San Marino* ai quali si sovrappone la sequenza arenaceo-calcareo della Formazione di Monte Fumaiolo. Il contatto fra queste due formazioni è in parte tettonico e in parte stratigrafico.

I Calcari di San Marino comprendono calciruditi e calcareniti ben cementate. Le arenarie del Monte Fumaiolo passano dal basso verso l'alto da arenarie a grana grossa mal cementate, con intercalati banchi di siltite, ad alternanze di arenarie e siltiti.

La placca calcarea appoggia sulla Formazione delle Argille Varicolori della Val Marecchia. Il contatto, ben visibile alla base della parete sud, è invece coperto sul lato orientale da un potente accumulo di detriti di spessore superiore a 10m. Le argille scagliose sono costituite da un insieme di porzioni diverse per litologia e struttura, a volte con assetto abbastanza ordinato a volte scompagnate. In profondità la componente argillitica diventa prevalente con scaglie centimetriche lucide e consistenti; salendo verso la superficie le scaglie divengono più piccole e piatte per effetto del rimaneggiamento e dell'essiccamento.

Lo spigolo sud-orientale della piastra rocciosa, sulla cui sommità si erge la Rocca, è disarticolato da una faglia principale e da una fitta rete di fratture che lo scompongono in cunei di dimensioni variabili.

FENOMENI DI INSTABILITA'

I fenomeni di instabilità che interessano le pareti marginali della rupe sono determinati dai movimenti franosi del sottostante pendio e dai complessi fenomeni di interazione tra il placcane roccioso rigido ed il substrato argilloso deformabile.

Lo spigolo SE della rupe è stato interessato da numerosi crolli, storicamente documentati, che hanno anche parzialmente interessato il Forte e la sottostante strada (Lembo-Fazio et al., 1998). La successione dei principali eventi è stata ricostruita dal confronto di foto storiche che coprono il periodo dagli anni '30 ad oggi.

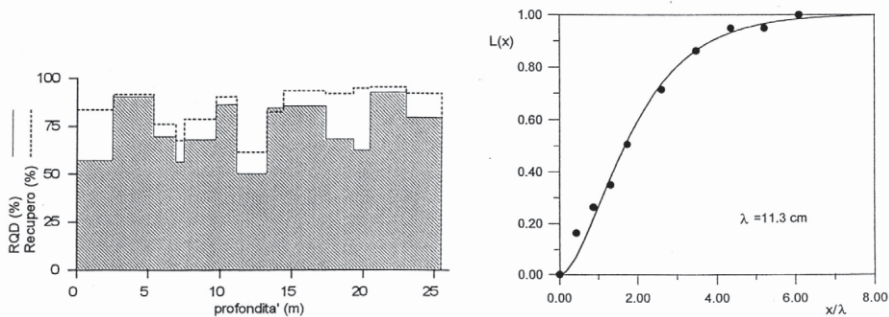


Fig4: Indice RQD e curva della frequenza delle spazature cumulate del sondaggio (Tommasi P., 1997)

Fig4: RQD index and cumulative length distribution inside the borehole SE3 (Tommasi P., 1997)

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

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 negli anni '60, alla base della parete fu realizzato un sondaggio orizzontale (SE3) attrezzato con estensimetri a barra. Sebbene l'indice RQD sia risultato complessivamente superiore al 76% e mai inferiore al 50%, la curva di frequenza della spaziatura cumulata (fig. 4) indica una spaziatura media dei giunti di circa 11 cm (Tommasi P., 1997).

Altre due perforazioni orizzontali sono state realizzate di recente da ponteggio (fig. 5), ad un'altezza di circa 573 m s.l.m. (S1) e 625 m s.l.m. (S2) ed 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. 6). Il sondaggio S2 ha inoltre evidenziato la presenza di una frattura aperta (circa 30 cm), alla profondità di circa 10m dal fronte, che si estende dalla sommità della parete fino ad un'altezza di circa 34 m dalla base.

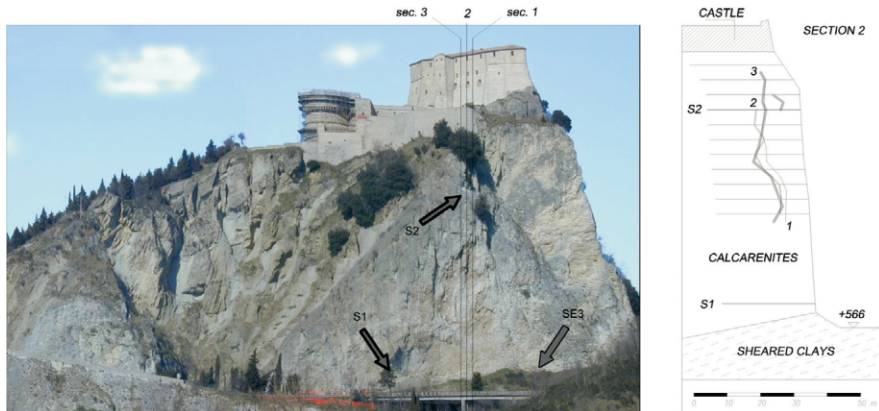


Fig5: Vista dello spigolo SE della rupe e sezione N-S sotto il forte

Fig5: View of the SE corner of the butte and N-S section underneath the castle

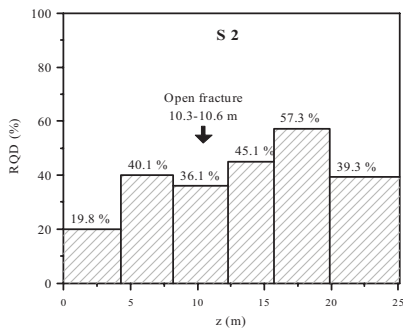
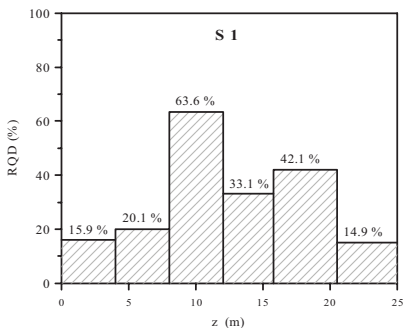


Fig6: Indice RQD nei fori di sondaggio S1 e S2

Fig6: RQD index inside the boreholes S1 and S2

Questa importante discontinuità tende a chiudersi verso il basso (fig. 5 in destra), 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. 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. 7). La stratificazione S ha giacitura media pari a 210/52 (imm./incl.) alla sommità della parete e diventa circa subverticale alla base (215/88). 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 oggetto 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).

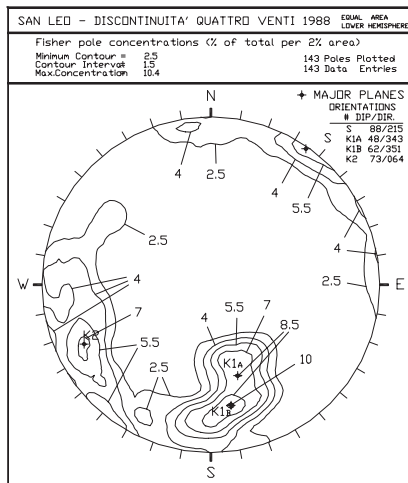
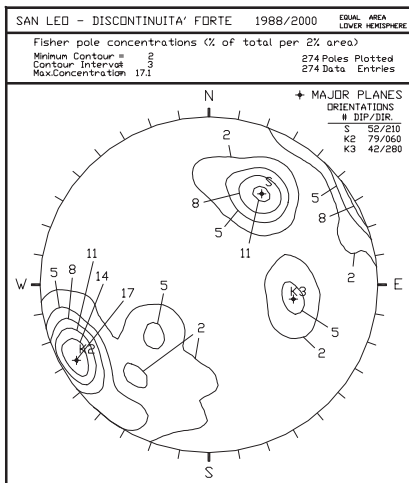


Fig7: Curve di isodensità delle discontinuità rilevate alla sommità (sinistra) e alla base (destra) della parete

Fig7: Contours of equal density of joints surveyed at the top (left) and at the base (right) of the cliff's wall

L'antica strada di accesso alla porta, che si arrampicava dal fosso Seripa alla sommità della piastra con un tortuoso percorso a tornanti su muraglioni ad arco, 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".

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

Per la caratterizzazione geotecnica del materiale roccioso e delle discontinuità che interessano l'ammasso sono state effettuate nel tempo varie campagne d'indagini di laboratorio i cui risultati sono riportati nella letteratura tecnica (Caturani et al., 1991; Tommasi P. e Rotonda T., 1995; Tommasi P., 1997).

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

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

Il peso di unità di volume del solido varia fra 25.2 e 26.7 kN/m³. La porosità, compresa fra il 3% ed l'11%, è ben correlata con la velocità V_p delle onde longitudinali, soprattutto per i campioni del sondaggio SE3 che sono interessati da giunti serrati, più che da discontinuità nette.

Il modulo elastico tangente (E_t), calcolato al 50% del carico di rottura, è invece fortemente influenzato dalla presenza di discontinuità nei campioni. 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 E_t costanti o leggermente decrescenti all'aumentare del carico assiale σ_a ;
- un secondo tipo con numerosi pori e microfessure per lo più aperte, caratterizzato da valori di E_t 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 σ_a .

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, in presenza di giunti cementati, la resistenza a compressione uniassiale 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 CaCO₃ 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.

In base alla morfologia le discontinuità possono essere distinte in 2 classi (Tommasi P., 1997):

- giunti planari, piuttosto regolari e caratterizzati a piccola scala da rugosità più o meno accentuata;
- giunti non planari, irregolari poco continui con labbra piuttosto frastagliate e scarso riempimento.

L'angolo d'attrito di base ϕ_b , determinato con prove di scivolamento su superfici segate, è risultato pari a 36° per tutte le superfici esaminate.

Sulla base delle caratteristiche morfologiche e del tipo di riempimento è stato possibile suddividere i giunti planari sottoposti a prove in due grandi classi:

- giunti planari a scabrezza bassa o medio bassa (JRC inferiore a 10-12) con riempimento poco o nulla cementato e superfici poco resistenti;
- giunti planari a scabrezza elevata o medio-alta (JRC superiore a 12) con riempimento lapideo e superfici di resistenza medio-alta.

Le discontinuità presenti nella zona più superficiale dell'ammasso roccioso, in cui si verifica l'apertura per trazione del giunto all'interfaccia roccia-riempimento, presentano scabrezza elevata o medio-alta.

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 (ψ) fra 7° e 12° .

La Formazione delle Argille Varicolori è piuttosto disomogenea; le naturali sequenze di deposizione hanno prodotto strati di differenti caratteristiche litologiche e strutturali, rimodellate e disarticolate dai processi tettonici che hanno interessato la zona.

La frazione argillosa, variabile fra il 65% e l'85%, è costituita principalmente da montmorillonite e subordinatamente da caolinite e illite. Il contenuto di carbonato di calcio è tipicamente compreso fra 0 e 25%, ma può raggiungere anche valori più elevati (65-70%). Il peso specifico del solido è poco variabile intorno al valor medio $\gamma_s = 27.8 \text{ kN/m}^3$, mentre il peso di unità di volume varia fra 16.1 e 22.4 kN/m^3 , in relazione alla porosità del terreno e al contenuto d'acqua. I limiti di consistenza sono molto variabili e l'indice di plasticità è piuttosto elevato a causa dell'abbondanza di montmorillonite. Dai campioni prelevati nella zona del fosso Campone sono stati ricavati valori del limite di liquidità fra 70 e 170%, mentre i campioni della zona del fosso Seripa hanno mostrato un comportamento più omogeneo con IP variabile fra 40 e 70% (Ribacchi et al., 1988).

La resistenza dei materiali argillosi, in condizioni drenate, è stata determinata mediante prove triassiali consolidate non drenate su campioni di grande diametro, prove di taglio diretto e prove di taglio anulare. Le caratteristiche di resistenza risultano fortemente influenzate dalla struttura del materiale e dalla direzione dei carichi applicati in fase di prova rispetto all'orientazione dei piani di fissilità. I risultati delle diverse prove hanno indicato per le argille prelevate nella zona del fosso Seripa valori di coesione ed angolo di attrito di picco pari a $c'_p = 40 \text{ kPa}$ e $\phi'_p = 12^\circ$, mentre in condizioni residue la coesione si annulla e l'angolo di attrito scende a circa 6° (Ribacchi et al., 1988).

ANALISI NUMERICHE

La situazione geologica di San Leo, rappresentata da una placca lapidea poggianti su una formazione di terreno più deformabile, è comune a molte regioni italiane. Le attuali condizioni di fratturazione della parete e l'evoluzione delle stesse, con il conseguente innesco di fenomeni di crollo, possono essere ragionevolmente attribuite alle condizioni di sforzo derivante dalla diversa deformabilità della formazione lapidea e della sottostante formazione argillosa. In situazioni così complesse, lo studio delle condizioni di stabilità dei fronti in roccia non può essere effettuato attraverso i tradizionali metodi dell'equilibrio limite.

Nel caso in esame, lo stato di sforzo è stato valutato mediante analisi numeriche condotte sia con un codice di calcolo alle differenze finite (FLAC), sia con un codice agli elementi distinti (UDECC). Le analisi sono state condotte su una sezione N-S normale alla parete, alta circa

80m, in corrispondenza della Fortezza. Analisi simili erano state precedentemente effettuate da Tommasi e Rotonda (1995) per una sezione in corrispondenza della porta di accesso alla città.

Le simulazioni numeriche sono state finalizzate allo studio delle condizioni statiche indotte dai fenomeni di erosione dei terreni argillosi, a partire da una situazione iniziale nella quale si è ipotizzato un piastrone calcareo di spessore uniforme appoggiato sulla formazione argillosa pliocenica.

Per valutare lo stato tensionale nell'ammasso roccioso, in particolare in prossimità delle pareti verticali della placca maggiormente influenzate dall'interazione con il substrato argilloso, sono state effettuate una serie di analisi numeriche per simulare l'erosione ed i fenomeni di softening delle argille di base. In tabella 1 sono riportati i parametri di resistenza e deformabilità assunti nelle analisi.

Le analisi sono state condotte ipotizzando diversi modelli di comportamento del terreno:

- A - Analisi elastica, in cui l'ammasso roccioso ed il substrato argilloso sono stati schematizzati come mezzi continui, omogenei ed isotropi, a comportamento elastico.
- B - Analisi elasto-plastica con softening nella quale si è ipotizzato che la formazione argillosa in prossimità della superficie del pendio ed al di sotto dell'ammasso roccioso sia soggetta a fenomeni di ammorbidimento che ne riducono i parametri di resistenza.
- C - Analisi agli elementi distinti, in cui la fascia parietale della placca rocciosa è stata schematizzata mediante un mezzo discontinuo costituito da blocchi delimitati da una rete di giunti con inclinazione compresa fra 35° e 90°. L'intensità di fratturazione diminuisce verso l'interno dell'ammasso; nel modello di calcolo si è ipotizzato che alla profondità di circa 20m dal fronte i giunti sono serrati e cementati e pertanto la roccia assume le caratteristiche di un mezzo continuo.

I risultati dell'analisi elastica (A) evidenziano che lo stato di sollecitazione nella placca rocciosa è caratterizzato da sforzi di trazione nella fascia inferiore (con valori massimi di 0.8MPa) ed in prossimità del bordo ove tuttavia gli sforzi sono nel complesso modesti (massimo 0.1MPa).

Con l'analisi elasto-plastica (B) si è voluto studiare l'effetto indotto sullo stato tensionale dai fenomeni di allentamento del materiale argilloso in prossimità della superficie e sotto il margine della rupe. La penetrazione dell'acqua meteorica fra le scaglie argillose ed il decadimento dei legami diagenetici provocano una progressiva diminuzione della coesione; la severità dello stato di sforzo è tale da portare la coltre superficiale in condizioni prossime al limite di resistenza. Una volta innescate le deformazioni plastiche, queste contribuiscono ad esaltare ed accelerare i fenomeni di ulteriore allentamento e decadimento delle argille. Nel modello di calcolo è stato considerato uno strato, in corrispondenza della superficie del pendio e al di sotto della piano di separazione della rupe, avente uno spessore di 5 metri, con caratteristiche meccaniche confrontabili con quelle del materiale allentato. Per questo strato la coesione è stata annullata e l'angolo d'attrito residuo è stato ridotto a 9°.

Tab. 1: Parametri meccanici assunti nelle analisi

Tab. 1: Mechanical parameters adopted in the analyses

	γ (kN/m ³)	E (MPa)	G (MPa)	ϕ' (°)	c (kPa)	σ_t (MPa)
Calacari	22.9	10000	4166	36.0	4000	2000
Arenarie	23.7	10000	4166	36.0	4000	2000
Argille	22.0	500	18.5	28.0	20	0.0

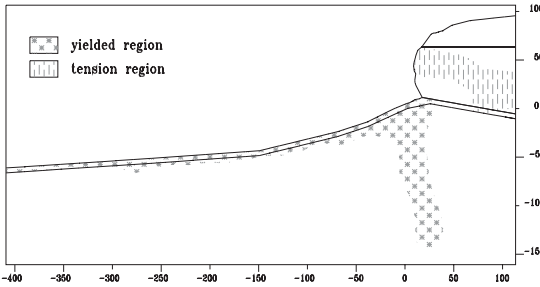


Fig8: Zone di plasticizzazione e di trazione
Fig8: Yielded and tensile regions

I risultati delle analisi hanno messo in evidenza che il principale effetto di un “softening” dell’argilla consiste in un significativo incremento delle sollecitazioni di trazione all’interno della placca lapidea, in particolare in tutta la fascia inferiore, per uno spessore di circa 40 metri. La zona di trazione si espande rispetto al caso elastico, pur riscontrando dei valori massimi dello sforzo

complessivamente minori, pari a 0.4 MPa (figura 8).

Con le analisi agli elementi distinti (C) sono state esaminate le condizioni di stabilità della zona parietale della rupe in cui l’ammasso roccioso risulta intensamente fratturato.

Nel modello si è ipotizzato che il grado di fratturazione e allentamento dell’ammasso diminuisca procedendo verso l’interno della rupe. La maggiore fratturazione del fronte può essere verosimilmente correlata con lo stato di sforzo derivante dall’oggetto della parete e dal maggiore effetto delle escursioni termiche giornaliere e dei cicli di gelo e disgelo, che possono influire sulla cementazione in parte argillosa dei giunti. Per le discontinuità si è fatto riferimento ad un modello elasto-plastico, con decadimento dei parametri di resistenza dai valori di picco a quelli residui.

Le analisi hanno evidenziato che la differente deformabilità tra la placca lapidea e la sottostante formazione argillosa induce nella rupe un complesso stato di sforzo, con zone sollecitate a trazione in cui è favorito l’allentamento e l’apertura dei numerosi giunti esistenti. In figura 9 sono evidenziati i giunti in cui si verifica uno scorrimento a taglio; nella zona alta della rupe gli scorrimenti avvengono prevalentemente lungo discontinuità molto inclinate, mentre al piede sono localizzati lungo giunti che immergono verso l’esterno della parete con un angolo di inclinazione di circa 30°-45°.

Gli scorrimenti a taglio sono associati all’apertura di alcuni piani di discontinuità, le cui tracce sono evidenziate in figura 10.

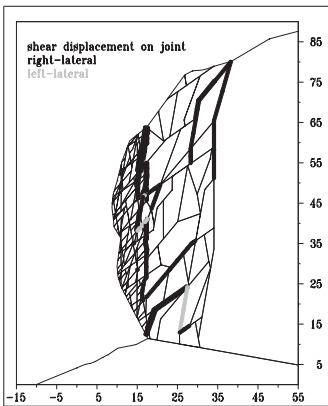


Fig9: Spostamento tangenziale dei giunti
Fig9: Shear displacement on joints

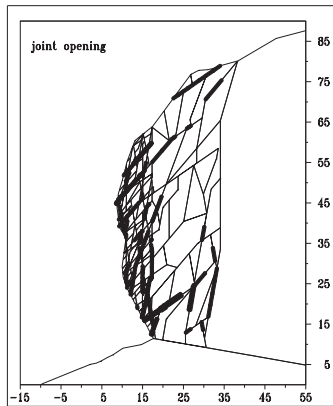


Fig10: Discontinuità beanti
Fig10: Joint opening

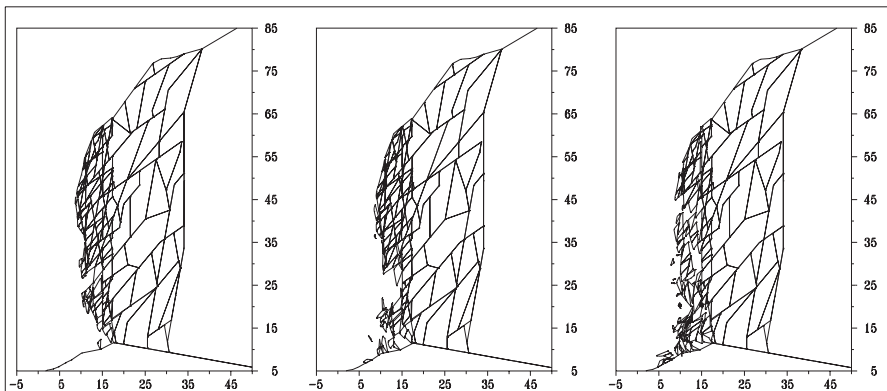


Fig11: Simulazione numerica (DEM) dei crolli
Fig11: Numerical simulation (DEM) of rock fall

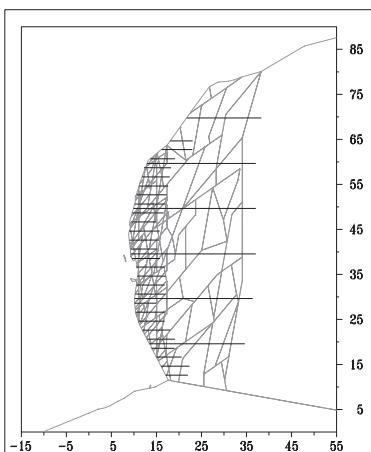


Fig12: Intervento di stabilizzazione
Fig12: Stabilization measures

L'apertura ed il superamento della resistenza a taglio in corrispondenza di alcuni giunti nella fascia corticale della rupe determina l'innesco dei fenomeni di crollo che, a partire dalla zona bassa del fronte, si propagano poi verso la sommità della parete. In figura 11 è riportata una sequenza di distacchi e crolli dei blocchi perimetrali della rupe. Su questo fronte sono attualmente in fase di realizzazione degli interventi di stabilizzazione della parete rocciosa realizzati mediante chiodature passive con barre di acciaio ad alto limite di snervamento. Un primo ordine di barre, con lunghezza pari a 5m e spaziatura di 2m è finalizzato al rinforzo della zona corticale maggiormente fratturata. Un secondo ordine di barre, lunghe 25m e ad interasse di 10m, consente l'ancoraggio di questa zona perimetrale alla roccia in profondità. Le analisi agli elementi distinti hanno consentito di verificare l'efficacia

di questo intervento, a seguito del quale i fenomeni di crollo possono interessare solo blocchi di dimensioni modeste (fig. 12), per i quali si dovrà prevedere una rete di protezione superficiale.

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.
- 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.
- 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.