

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI*

*CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA
PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO*

TESI DI LAUREA

in

OPERE IN SOTTERRANEO M

**CARATTERIZZAZIONE E ANALISI DEI PROCESSI DI INSTABILITA' DELLE TOMBE
ETRUSCHE NELLA NECROPOLI DEI MONTEROZZI A TARQUINIA**

CANDIDATO

Saverio Mengoni

RELATORE:

Chiar.ma Prof.ssa Ing. Daniela Boldini

CORRELATORE:

Chiar.mo Ing. Daniele Spizzichino

Anno Accademico 2017/18

Sessione III

Abstract

La tematica al centro della tesi è il monitoraggio e la valutazione della stabilità del versante roccioso in cui si colloca la tomba dei Vasi Dipinti, facente parte della necropoli dei Monterozzi di Tarquinia (VT), e la proposta preliminare di interventi a basso impatto per la conservazione del sito.

Le attività svolte sono riportate di seguito:

- inquadramento geografico, storico ed archeologico della necropoli dei Monterozzi e della tomba dei Vasi Dipinti;
- inquadramento geologico, che ha compreso lo studio del foglio geologico 354 al 1:50'000 di Tarquinia;
- inquadramento geomorfologico, sviluppato interpretando le carte tematiche riguardanti la zona di interesse, comprese quelle del progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia);
- inquadramento sismico dell'area, condotto a partire dai dati forniti dall'INGV per il comune di Tarquinia;
- inquadramento meteo-climatico del comune di Tarquinia;
- inquadramento topografico attraverso: acquisizioni TLS (Terrestrial Laser Scanner), fotogrammetria digitale, rilievo topografico tramite stazione totale e georeferenziazione tramite GPS;
- monitoraggio deformativo metrico manuale che ha riguardato la progettazione, l'installazione e la lettura periodica di tre fessurimetri lineari e di sette mire (lette con estensimetro meccanico rimovibile);
- caratterizzazione fisica e meccanica della roccia in esame tramite prove di laboratorio;
- caratterizzazione delle discontinuità tramite rilievo in situ;
- classificazione tecnica dell'ammasso;
- creazione di un modello geotecnico del sottosuolo;
- analisi cinematica del versante effettuata tramite il programma Dips®;
- analisi numerica del versante effettuata tramite il programma Plaxis2D®;
- elaborazione dei risultati ottenuti e proposte di intervento quali: la regimentazione delle acque meteoriche e il divieto di lavorazione agricola della prima fascia di terreno a contatto con il piede del versante.

Le analisi svolte, in particolare l'analisi numerica, hanno permesso di scongiurare fenomeni di instabilità del versante nelle condizioni attuali.

Indice

Introduzione.....	8
Capitolo 1. Inquadramento del sito di interesse.....	10
1.1 Inquadramento geografico.....	10
1.2 Inquadramento storico e archeologico.....	12
1.3 Inquadramento geologico.....	20
1.4 Inquadramento geomorfologico.....	23
1.5 Inquadramento sismico.....	27
1.6 Inquadramento meteo climatico.....	30
Capitolo 2. Rilievo topografico.....	37
Capitolo 3. Monitoraggio manuale.....	44
3.1 Confronto ed analisi delle tecniche.....	44
3.2 Scelta tecnica ed installazione.....	48
3.3 Analisi risultati.....	49
Capitolo 4. Rilievo geomeccanico.....	54
4.1 Descrizione dei campioni di roccia.....	54
4.2 Caratterizzazione fisica.....	58
4.3 Caratterizzazione meccanica.....	63
4.4 Caratterizzazione delle discontinuità.....	79
4.5 Classificazione tecnica.....	83
4.6 Conclusioni.....	87
Capitolo 5. Analisi di stabilità.....	88
5.1 Analisi cinematica.....	88
5.2 Modello geotecnico.....	93
5.3 Simulazione in Plaxis.....	97
5.4 Conclusioni.....	112
Conclusioni.....	113
Bibliografia.....	115

Sitografia.....	116
Ringraziamenti.....	117

Introduzione

L'Italia è un paese che vanta uno dei più grandi patrimoni culturali, archeologici, artistici e storici nel mondo. Ne sono testimonianza i 54 siti dichiarati patrimoni mondiali dell'umanità dall'Unesco presenti in Italia. Dal 2004 anche la necropoli etrusca dei Monterozzi a Tarquinia (VT) si è aggiunta a questa prestigiosa lista. La necropoli può vantare un alto numero di tombe di origine etrusca (circa 6000), di cui una parte internamente dipinte (circa 200). Sono proprio queste ultime che danno valore alla necropoli: infatti, le pitture presenti nelle camere mortuarie rappresentano uno dei primi linguaggi e una delle prime testimonianze scritte conosciute della vita e della società etrusca (VII sec. a.C.).

Un patrimonio di tale valore va sicuramente protetto. La presente tesi si inserisce in una collaborazione che vede tra i principali attori la "Soprintendenza Archeologica, Belle arti e Paesaggio per l'area metropolitana di Roma, la provincia di Viterbo e l'Etruria Meridionale", il Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia di ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale) ed il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna. Scopo principale è quello di contribuire al monitoraggio e alla protezione di questo patrimonio.

Il lavoro di tesi è stato incentrato sulle condizioni di stabilità della tomba dei Vasi Dipinti. Tale tomba, così come altre tombe presenti della necropoli, rischia di essere perduta, non solo per fenomeni alla microscala (e.g. agenti atmosferici e variazione del microclima) che ne deteriorano i dipinti murari presenti, ma anche e soprattutto per fenomeni alla macroscala e di contesto (e.g. l'instabilità potenziale del versante sul quale si trova). In particolare, la richiesta di intervento è nata in seguito al manifestarsi, nell'estate del 2017, di alcune fratture proprio all'interno della tomba dei Vasi Dipinti e in altre tombe simili. Le domande a cui i gestori del sito e gli archeologi hanno chiesto di dare risposta riguardavano il possibile rischio di crollo della tomba e le eventuali tecniche di mitigazione a basso impatto per tale rischio. In una ottica di conservazione preventiva, le analisi svolte hanno permesso di effettuare scelte di gestione del sito che evitassero tra gli interventi più impattanti quelli della rimozione e delocalizzazione degli stessi dipinti.

È ai sopra menzionati interrogativi che la seguente tesi cerca di dare risposta attraverso un approccio metodologico multidisciplinare che è partito dall'inquadramento dell'area sotto vari punti di vista: topografico, geotecnico (attraverso il monitoraggio delle discontinuità e la caratterizzazione del materiale roccioso) e cinematico (analisi dei possibili meccanismi di collasso), tutti ingredienti necessari allo studio delle condizioni di stabilità.

Si è partiti dall'inquadramento storico ed archeologico, seguito da un inquadramento geologico, geomorfologico, sismico e meteo-climatico per capire da quali fenomeni l'area fosse interessata e con quale frequenza.

Il rilievo topografico è stato realizzato mediante acquisizioni TLS (terrestrial Laser Scanner), fotogrammetria digitale, battitura di punti tramite stazione totale e georeferenziazione GPS, tutte operazioni propedeutiche alla creazione di modelli per lo studio bidimensionale e tridimensionale dell'area.

L'installazione di un monitoraggio deformometrico manuale (a partire dal gennaio 2018) ha permesso di valutare in prima approssimazione l'eventuale movimento delle fratture di particolare interesse e scongiurare fenomeni in atto di tipo parossistico.

Il modello geotecnico di sottosuolo è stato messo a punto a partire dall'interpretazione dei risultati delle prove di laboratorio condotte sul materiale roccioso e dei rilievi effettuati in sito per caratterizzare le discontinuità.

L'analisi numerica, infine, ha permesso di indagare il comportamento del versante, scongiurando fenomeni di instabilità nelle condizioni attuali.

L'approccio della presente tesi è sicuramente un modello prototipale sia teorico che metodologico da poter essere replicato in situazioni analoghe.

Capitolo 1. Inquadramento del sito di interesse

1.1 Inquadramento geografico

La tomba dei Vasi Dipinti si trova nell'affioramento della necropoli dei Monterozzi, patrimonio UNESCO dal Luglio 2004, nel comune di Tarquinia, in provincia di Viterbo, nel Lazio settentrionale. Nello specifico, l'area di studio si colloca poco dopo il cimitero di Tarquinia andando in direzione sud-est, raggiungibile dopo una breve deviazione da via Ripagretta (SP43), a est della cittadina di Tarquinia. Dista dal capoluogo (VT) circa 45 km e in linea d'aria da Roma \approx 70 km in direzione sud-est. Può essere raggiunta anche dalla strada statale 1 "Aurelia" bis (figure 1 e 2).



Figura 1: Ubicazione della necropoli

Il territorio tarquiniese, che costituisce parte della maremma laziale, si presenta con un paesaggio a conformazione prevalentemente collinare, degradante fino al mare, dove diventa più pianeggiante.

L'altopiano dei Monterozzi (circa 160 m s.l.m.) corre parallelamente alla linea di costa Tirrenica, distando da essa circa 6 km. Si estende per circa 5 km in lunghezza e 1 km in larghezza. Esso è compreso tra i Monti Marciano - La Campigliola a nord-ovest, i Monti della Tolfa a sud-est e i Monti Vulsini a nord. Nel comune scorre il tratto terminale del fiume Marta che sfocia nel Tirreno. Oltre al Marta, i territori di Tarquinia sono bagnati dal torrente Arrone, che segna il confine con Montalto di Castro, e dal fiume Mignone.

L'uso del suolo in quest'area è prevalentemente agricolo.

Là dove è presente la calcarenite, sono state coltivate delle cave, a oggi per la maggior parte dismesse; esse si concentrano maggiormente in località Pisciarello (zona adiacente alla Necropoli Monterozzi).



Figura 2: Ubicazione della Tomba dei Vasi Dipinti

1.2 Inquadramento storico e archeologico

Storia della città di Tarquinia

La città etrusca di Tarquinia (in etrusco Tarch(u)na, in latino Tarquinii), distante da Roma circa 100 km, era situata su un colle dominante la valle del fiume Marta, emissario del lago di Bolsena, che si getta in mare immediatamente a nord della città.

Lambita a nord dal fosso degli Albucci e a sud dal fosso S. Savino, ambedue affluenti del Marta, l'altura dell'antica città - il Pian di Civita - sorge a circa 6 km dalla riva del mare ed è separata dalla costa dal lungo e parallelo colle dei Monterozzi, sede delle principali necropoli cittadine di età storica e sul cui sperone occidentale è situato l'abitato medioevale (Corneto) e moderno.

Le indagini archeologiche dimostrano che le origini della città etrusca di età storica risalgono molto indietro nel tempo, alla fine dell'età del Bronzo - (X sec. a.C.) -, nel periodo villanoviano.

Poche sono comunque le notizie che le fonti antiche (Cicerone, Dionigi di Alicarnasso, Livio, Strabone ecc.) ci hanno tramandato sulla storia di Tarquinia, ma tali comunque da descrivere la città come una delle più importanti dell'intera Etruria, facente parte della dodecapoli etrusca.

Tarconte, figlio dell'eroe Tirreno, il re della Lidia che condusse i Tirreni (cioè gli Etruschi) in Italia, fondò la città e le diede il proprio nome (per questo nell'antichità si credeva che fosse la prima tra le città etrusche). A Tarquinia, inoltre, era fissata l'origine della dinastia dei Tarquini, i re etruschi che regnarono a Roma tra la fine del VII ed il VI secolo a.C. Il IV secolo a.C. fu quello di maggior potenza e prosperità per Tarquinia, dovuto all'apertura del commercio greco ed alla fondazione dell'emporio marittimo di Gravisca. Dopo vari scontri Tarquinia venne sottomessa definitivamente da Roma nel 295 a.C. Nei secoli dal V all'VIII si susseguirono vari domini: il regno romano-gotico, il longobardo ducato di Tuscia, i carolingi ed infine lo Stato della Chiesa. Già a partire dal VI secolo iniziò il fenomeno di spopolamento dell'acropoli, che si completò nel tardo medioevo a favore di Corneto. Dopo la costruzione del porto di Civitavecchia nel XV secolo Corneto perse la sua importanza ed affrontò un lungo periodo di decadenza economica e demografica, fino alla riqualificazione intorno alla metà del 1900 a seguito delle bonifiche del territorio paludoso ed a seguito della riforma agraria del 1950.

La Necropoli

La collina dei Monterozzi, sede della principale necropoli di Tarquinia, si estende per 5 km in lunghezza, dall'attuale posizione della cittadina medievale fino alla località Pisciarellino verso

est, e per 1 km in larghezza, parallelamente alla costa, compresa tra questa e l'altura della Civita dove sorgeva la città etrusca.

Dei due fianchi lunghi, quello sud-occidentale degrada dolcemente verso il mare, mentre quello rivolto verso la valle del S. Savino e la Civita presenta alti dirupi interrotti da profonde spaccature attraverso cui passavano gli antichi percorsi viari di collegamento tra l'abitato e la necropoli. Ciascuna di queste spaccature è oggi attraversata dalle arcate dell'acquedotto settecentesco che prendono in questi tratti i nomi di Primi Archi, Arcatelle e Secondi Archi.

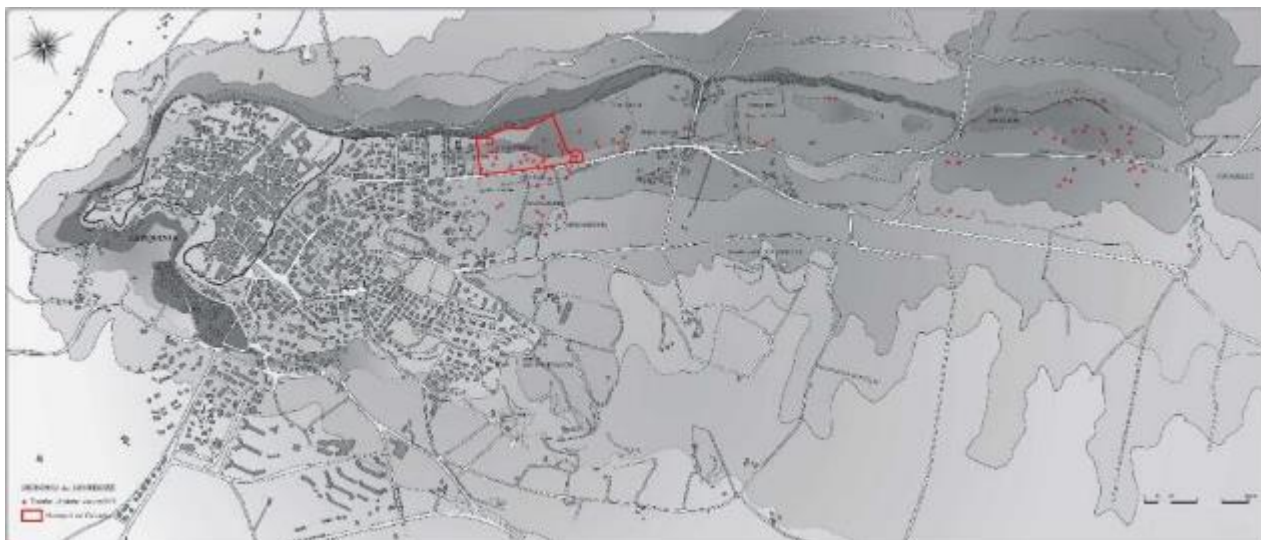


Figura 3: Veduta generale della necropoli, con indicazione delle tombe dipinte

Proprio nell'altopiano dei Monterozzi si trova la necropoli (figura 3), nata e sviluppata per opera degli abitanti dell'acropoli etrusca di Tarquinia. Ivi si collocano dunque la maggior parte delle tombe che oggi conosciamo e possiamo ammirare, circa 6000.

La collina appare gremita di un insieme disomogeneo di ipogei, scavati direttamente nei primi banchi della roccia calcarea granoblastica¹. La descrizione del XVII secolo che George Dennis (1848) fa dell'altopiano, come una superficie scabra, derivante dai tumuli (figura 4): *"..strutture concavo piane poste in superficie costituite da materiale di riporto, molto probabilmente derivante dallo scavo stesso della camera sepolcrale dove veniva inumato il defunto.."*. Proprio da questi tumuli deriva il nome popolare ed espressivo dell'altopiano.

Le formazioni archeologiche presenti sono costituite da camere sepolcrali di differente età e tipo, ricavate direttamente nella roccia a diverse profondità (in un intervallo compreso tra i 10 e i 20 m dal piano campagna). Di seguito la descrizione delle tre principali formazioni:

¹ Tessitura tipica di una roccia metamorfica: formata da un mosaico di cristalli di taglia più o meno uniforme.

- Il tipo più comune è la “tomba a camera” di tipo classico: le più antiche sono costituite da un unico loculo dove veniva inumata una sola coppia per poi passare a sistemi più evoluti di camere in cui poteva venire sepolta l’intera famiglia. L’accesso inclinato alla camera “dromos” veniva scavato dalla superficie e poi riempito di materiale di riporto. Di questa tipologia è la tomba dei Vasi Dipinti.
- Il secondo tipo è la “tomba a camera” di tipo arcaico strutturalmente molto simile al precedente ma di più antica età, più superficiale e con il tetto non ricavato direttamente dalla roccia ma ricoperto con lastre calcaree.
- La “tomba a fossa” costituisce la terza tipologia; essa veniva scavata verticalmente nella roccia, richiusa con lastre calcaree di norma completamente riempita con terreno e pietrisco. La maggior parte degli apogei veniva poi ricoperta in superficie dai tumuli, delimitati da bassi muretti circolari in pietra.

Le indagini esplorative, cronistoria

Si deve purtroppo ricordare che le maggiori attività di scavo ed espoliamento delle necropoli tarquiniesi sono state eseguite da parte dei proprietari terrieri e ricercatori clandestini, i quali nel corso dei secoli hanno impinguato il mercato nero antiquario di oggetti di inestimabile valore e, cosa ancor più grave, con la loro attività abusiva hanno contribuito al deperimento e distruzione delle eventuali decorazioni o dipinti murali, una delle poche testimonianze tangibili della civiltà etrusca.

L’interesse per le antichità etrusche di Tarquinia è noto almeno dal Rinascimento, prima infatti si era a conoscenza della presenza di alcune grotte, dette “grotte pinte”, ma non se ne conosceva l’origine e l’importanza. Ai ricordi mitico-letterari legati alla presenza a Tarquinia della reggia di Corito (Virgilio), si susseguirono importanti varie scoperte funerarie nel territorio, come il “sepolcro marmoreo” ricco d’oro detto “Nicodemio” e le raffigurazioni divine di una tomba dipinta che, secondo la tradizione, ispirarono il genio di Michelangelo. Notizie sulle antiche e favolose meraviglie venute in luce nella necropoli tarquiniese aumentarono progressivamente fino al Settecento, quando l’interesse dell’etruscheria (la corrente antiquaria tesa a rivalutare le testimonianze dell’antica Etruria) si rivolse al frenetico recupero di oggetti etruschi. In questo secolo la fama delle “grotte” *cornetane* risuonò ampiamente nel mondo degli studiosi dell’epoca: le tombe ipogee dipinte vennero aperte e visitate con entusiasmo, più tardi però lasciate all’incuria e addirittura completamente dimenticate.

Nell’Ottocento i ritrovamenti furono sempre più numerosi e solo talvolta registrati; dopo il periodo napoleonico iniziò un’intensa serie di scavi irregolari, estranei a un serio controllo scientifico, svolti dai proprietari dei terreni e dalle autorità comunali, e seguiti con interesse

da appassionati stranieri (Gerhard, Kestner, von Stackelberg, Kinnaird). Nella prima metà del XIX secolo si manifestò, come nel resto dell'Etruria, una vera e propria frenesia di esplorazioni sopra terreni rimasti fino allora quasi vergini. Uno dei principali protagonisti di questa stagione di scoperte è sicuramente Carlo Avvolta, gonfaloniere del municipio di Corneto e grande cultore delle antichità locali, che nel 1823 portò alla luce un ricco tumulo di età orientalizzante.

In questi anni le esplorazioni si concentrarono soprattutto attorno alle tombe a tumulo che offrivano un facile richiamo agli scavatori. I resoconti - spesso incompleti - su questi scavi si trovano negli Atti del Camerlengato e nei volumi del Bullettino e degli Annali dell'Istituto di Corrispondenza Archeologica di Roma. Opere illustrate sui principali monumenti emersi nella necropoli tarquiniese sono state invece curate dalla Hamilton Gray (1840), dal Dennis (1848) e dal Canina (1849).

Lo sconvolgimento della necropoli di Tarquinia perdurò fino all'unità nazionale (1861), quando vennero introdotte regole e metodi scientifici nelle esplorazioni. Con indagini più rigorose (a partire dal 1864) rispetto ai confusi ritrovamenti degli anni precedenti (Avvolta contava circa 2000 sepolcri scoperti fino agli anni intorno al 1820), si ebbe un quadro più definito dell'estensione e del carattere della necropoli dei Monterozzi. Si scavò nei possedimenti dei conti Bruschi e dei fratelli Marzi, dove emersero innumerevoli tombe. Anche il municipio di Corneto, con la partecipazione dell'Università Agraria, promosse delle ricerche nell'antica necropoli delle Arcatelle (1881-1896), per merito dell'allora sindaco Luigi Dasti, grande appassionato di antichità e autore di un volume sulla storia e sull'archeologia del centro; in seguito a tutte queste attività si formarono due importanti collezioni archeologiche, quella Bruschi e quella Comunale, in seguito confluite nel Museo Nazionale di Tarquinia. Non si conoscono i metodi di indagine utilizzati in quel periodo, ma si conoscono, grazie al periodico "Notizie degli scavi di antichità - 1876" la natura dei ritrovamenti, ossia oggetti in bronzo raffiguranti scene familiari e oggetti in osso da parte dei fratelli Marzi, il comune invece annovera un cospicuo numero di urne, sarcofagi con epigrafi, vasi a figure nere e oggetti in osso. Risultati importanti si ebbero di nuovo sullo scorcio del XX secolo, con la scoperta di altre tombe affrescate e del prezioso deposito orientalizzante della "tomba di Bocchoris", appartenuto probabilmente a una nobildonna vissuta attorno al 700 a.C., all'interno del quale era presente una pregiata situla in faïence con il cartiglio del faraone egizio della XXIV dinastia. Nel primo trentennio del Novecento vennero scavate tombe a tumulo con corredi orientalizzanti e arcaici, mentre spettò a G. Cultrera, direttore del nuovo museo di Tarquinia e ispettore agli scavi, l'esplorazione del primo dei due monumentali tumuli della Doganaccia. Seguirono scavi a carattere episodico di nuove sepolture arcaiche da parte di P. Romanelli, subentrato al Cultrera.

La pubblicazione monografica su Tarquinia del 1937 di M. Pallottino costituisce ancora oggi un punto di riferimento importante per la conoscenza storico-archeologica della necropoli

etrusca. Lo sviluppo agricolo ha comportato, con la meccanizzazione dei lavori, uno stravolgimento della necropoli tarquiniese: testimoni di un paesaggio funerario segnato dalla presenza di decine e decine di tumuli sono le descrizioni di G. Dennis, che calcolò almeno 600 monumenti visibili sul piano dei Monterozzi, e i disegni del Canina. Molti di questi tumuli furono distrutti dai lavori agricoli e attualmente sono in parte localizzabili attraverso l'analisi delle fotografie aeree.

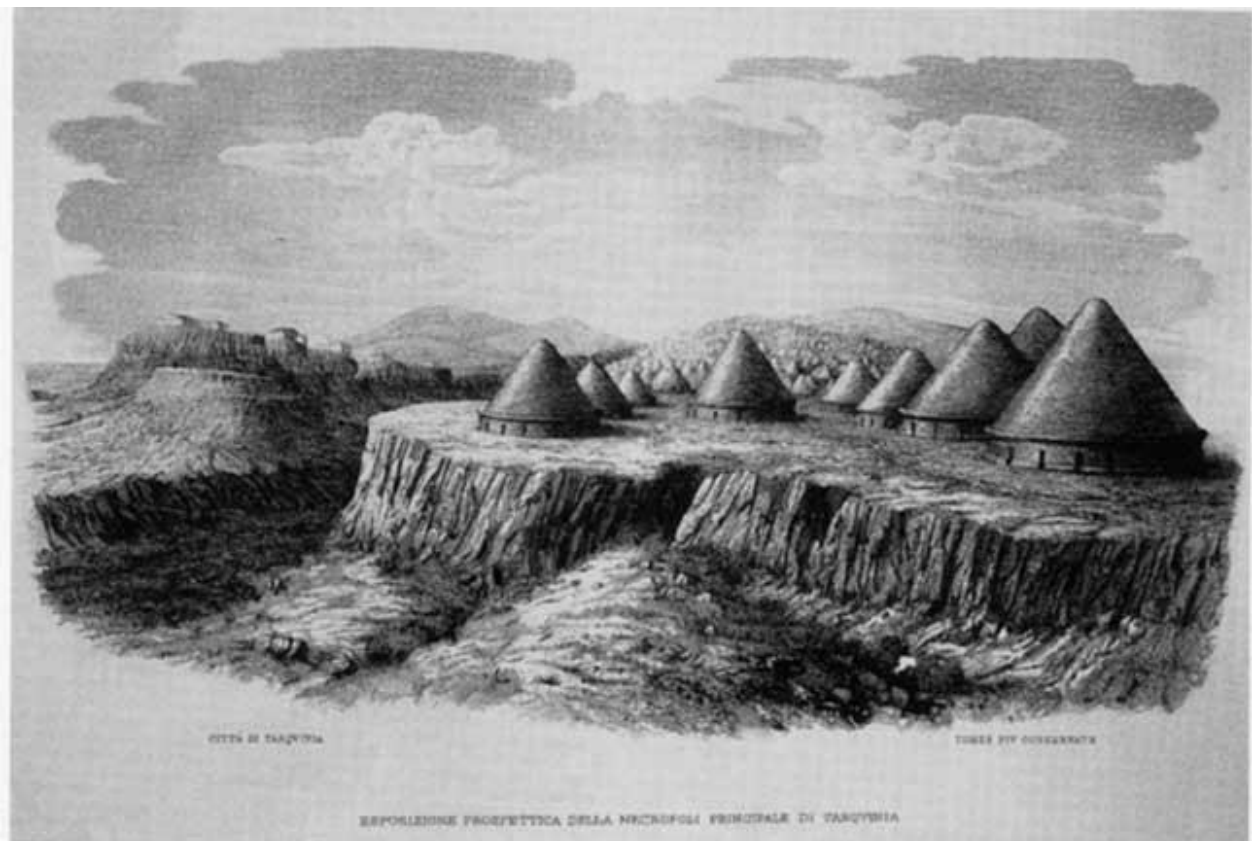


Figura 4: Veduta ottocentesca dei Monterozzi (viadeiprincipi.it)

Le prospezioni geofisiche condotte nella necropoli dal 1956 dalla Fondazione Lerici, insieme alla Soprintendenza Archeologica, permisero di identificare e in parte esplorare numerose tombe a tumulo e dipinte, con maggiore concentrazione nelle zone del Calvario, di Scataglini e dei Secondi Archi. Portarono inoltre alla partecipazione in collaborazione del politecnico di Torino e dell'università della Pennsylvania, interessati ai metodi d'indagine all'avanguardia utilizzati.

L'ultimo rinvenimento di formazioni archeologiche si deve ad un evento alluvionale del 1987 che investì i territori del tarquiniese. Proprio la pioggia erose il suolo agricolo portando alla luce l'accesso alle camere sepolcrali più superficiali.

Negli anni dal 1960 al 2000 importante è stata l'azione della Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Etruria Meridionale, che costantemente ha monitorato il territorio e salvaguardato il prezioso patrimonio funerario di Tarquinia.

La pittura funeraria

Introducendo un breve excursus sui temi delle pitture funebri, ricordiamo che la serie straordinaria di tombe dipinte - ne conosciamo circa 200 - rappresenta il nucleo più prestigioso della necropoli che resta, per questo aspetto, la più importante del Mediterraneo, se ne ha un esempio in figura 5.

L'uso di decorare con pitture le camere sepolcrali è documentato in numerosi centri dell'Etruria, ma è solo a Tarquinia che il fenomeno assunse dimensioni così ampie e continuate nel tempo; esso è infatti attestato dal VII al II sec. a.C., cioè per quasi tutta la durata della vita della città.

Le tombe dipinte costituiscono una minima parte (circa il 2%) dei sepolcri di Tarquinia: esse sono infatti espressione della classe aristocratica dell'epoca, che sola poteva permettersi il lusso di decorare i propri sepolcri. Queste sono per la maggior parte contenute sull'altopiano dei Monterozzi, la principale necropoli cittadina, ma si ha qualche testimonianza anche negli altri sepolcreti minori. Al '700 risale infatti la notizia della scoperta di una tomba dipinta sul colle del Pisciarello, una sorta di propaggine orientale della necropoli dei Monterozzi. Sul Poggio del Cavalluccio, uno dei sepolcreti suburbani a nord della città, negli anni '50 del 1900 la Sovrintendenza scavò due tombe gentilizie di età ellenistica appartenenti alla nobile famiglia Camna: una di queste, che ha restituito numerosi sarcofagi ora esposti al museo, aveva una banchina addossata alla parete e affrescata con festoni e nastri. Sul vicino colle della Perazzeta è stato infine individuato, nel 1989, un ipogeo decorato con esili alberelli e corone floreali.



Figura 5: Tipica scena di un banchetto affrescato all'interno di una tomba

I più antichi ipogei dipinti (fine del VII-prima metà del VI sec. a.C.), destinati alla sepoltura della sola coppia maritale, sono piccole camere rettangolari con soffitto a doppio spiovente e fasce colorate che ne sottolineano gli elementi architettonici. Alle camere, scavate nella roccia a profondità variabile, si accede mediante lunghi corridoi (dromoi) in discesa, con gradini.

Dalla metà del VI sec. a.C. prevalse l'uso di una decorazione figurata, limitata ai frontoni delle pareti corte, con animali contrapposti in schema araldico ai lati di un pilastro centrale.

Verso il 530 a.C. le pitture coprivano ormai tutte le pareti della camera con scene figurate che alludevano alla vita e alla morte della classe aristocratica dell'epoca: caccie, banchetti allietati da musiche e danze, komos (danza orgiastica i cui partecipanti suonano, bevono e si ubriacano), celebrazioni di congedo dal morto con giochi ginnici e gladiatori in onore del defunto. Spesso la camera era immaginata come la tenda sotto cui si esponeva il corpo del morto e intorno alla quale si svolgevano gli atti rituali della cerimonia funebre.

Il carattere delle raffigurazioni, con scene riferite alla vita reale, riflette una concezione primitiva e serena della morte, secondo la quale il defunto sopravvive là dove le sue spoglie sono sepolte. Lo stile di queste pitture più antiche denuncia la presenza, fra i decoratori delle tombe Tarquiniesi, di pittori stranieri, soprattutto artisti greco-orientali immigrati dalla Ionia asiatica (Asia Minore). Il rinvenimento al porto di Gravisca di campioni di minerali notoriamente impiegati come materie coloranti nelle tombe, conferma il ruolo che questi artisti stranieri approdati allo scalo Tarquiniese hanno avuto nell'elaborazione degli schemi decorativi dei sepolcri dipinti.

Nel corso del V sec. a.C., la profonda crisi economico-sociale che investì l'Etruria fece registrare a Tarquinia una brusca diminuzione ed un impoverimento stilistico dei sepolcri affrescati: le scene di banchetto divennero il tema quasi esclusivo della decorazione.

Nei sepolcri della seconda metà del V secolo apparvero già però i primi segni di una nuova concezione dell'oltretomba di tipo ellenizzante con richiami ad un mondo soprannaturale: accanto alle prime figure di personaggi ultraterreni (geni alati e demoni) troviamo le più antiche rappresentazioni del viaggio del defunto verso l'aldilà.

All'inizio del secolo successivo la città conobbe una fase di nuovo splendore e si assistette ad un conseguente nuovo fiorire degli ipogei dipinti. Le profonde trasformazioni che nel frattempo avevano però modificato il contesto sociale cittadino si rifletterono naturalmente anche nell'architettura e nella decorazione dei sepolcri aristocratici. Le tombe diventarono camere grandiose per la sepoltura dell'intero clan gentilizio e nei dipinti erano ormai esplicite le nuove credenze sull'aldilà affermatesi sotto l'influsso del mondo ellenico: le scene figurate si svolgevano ora nella cornice degli Inferi alla presenza di demoni della morte. Alle tombe aristocratiche che continuarono la tradizione decorativa degli ipogei di età arcaica e classica, si affiancarono tombe con decorazione dipinta parziale e di modesta qualità, appartenenti ai nuovi ceti gentilizi di recente origine e di limitate capacità

economiche. Il numero dei sepolcri affrescati diminuì sensibilmente quando Tarquinia entrò a far parte dell'orbita politica romana: allo scorcio del III sec. a.C. e agli inizi del successivo se ne contavano ormai solo pochi esemplari.

1.3 Inquadramento geologico

Il paesaggio della campagna tarquiniese, geologicamente molto complesso, si distingue da quello degli altri centri - anche vicini - dell'Etruria meridionale prevalentemente tufacei, e costituisce un unicum: vi abbondano formazioni calcaree ricche di conchiglie fossili, localmente chiamate "macco", arenarie e - meno diffuso - il grigio "nenfro"², testimonianza dei fenomeni vulcanici del quaternario, materiali tutti usati fin dall'antichità sia nell'architettura che nella scultura.

Escludendo i terreni di origine vulcanica, si hanno prevalentemente terreni di origine sedimentaria, la cui successione è costituita dai seguenti gruppi di formazioni (Alberti et al., 1970):

- Formazioni della serie di tipo "toscano";
- Formazioni del flysch argilloso-calcareo-arenaceo del Cretaceo-Eocene;
- Formazioni prevalentemente argillo-sabbiose e conglomeratiche, calcareo-sabbiose ed arenacee. Di ambiente marino, subcontinentale e continentale in parte con materiale vulcanico. Tra loro sono in contatto stratigrafico e la serie risulta pressoché continua, di età del Miocene, Pliocene e Quaternario. Esse sono in trasgressione sui terreni delle precedenti formazioni più antiche.

Maggiore dettaglio sulle formazioni è fornito nel foglio geologico 354 di Tarquinia (scala 1:50'000), fornito da ISPRA (www.isprambiente.gov.it). Dall'immagine di figura 6 si nota come la cittadina di Tarquinia e l'intera necropoli insistono sulla Fm. Macco (MCC) facente parte del supersistema Tarquinia (TR). La formazione costituisce un altopiano che sovrasta le altre litologie per la sua maggiore competenza; esso è allungato in direzione NO-SE quindi parallelo alla linea di costa. Questa formazione crea delle scarpate sub verticali a nord, dove poggia con un contatto stratigrafico netto sull'unità San Savino (SBM), più antica, facente parte del supersistema Spalle della Ciuffa (CF).

L'unità più recente di Lestra dell'Ospedale (LOS) insiste a ovest sul Macco.

A sud un lembo dell'unità di Podere San Marcello (SML) poggia sulla Fm. Macco.

Il Macco riveste un importante ruolo geomorfologico; compreso, infatti, tra sabbie e argille, cioè tra rocce facilmente erodibili, è portato ad "emergere" topograficamente per fenomeni di litoselezione. L'assetto suborizzontale, infine, ne determina l'affioramento "a giropoggio" lungo l'intero versante meridionale del colle sul quale sono gli insediamenti di Tarquinia vecchia e si identifica con la ripida scarpata, praticamente inaccessibile, alta in media dai 5 ai 15 m, che circonda l'intero insediamento dell'antica Tarquinia.

² Ignimbrite trachitica, una varietà di tufo grigio scuro.

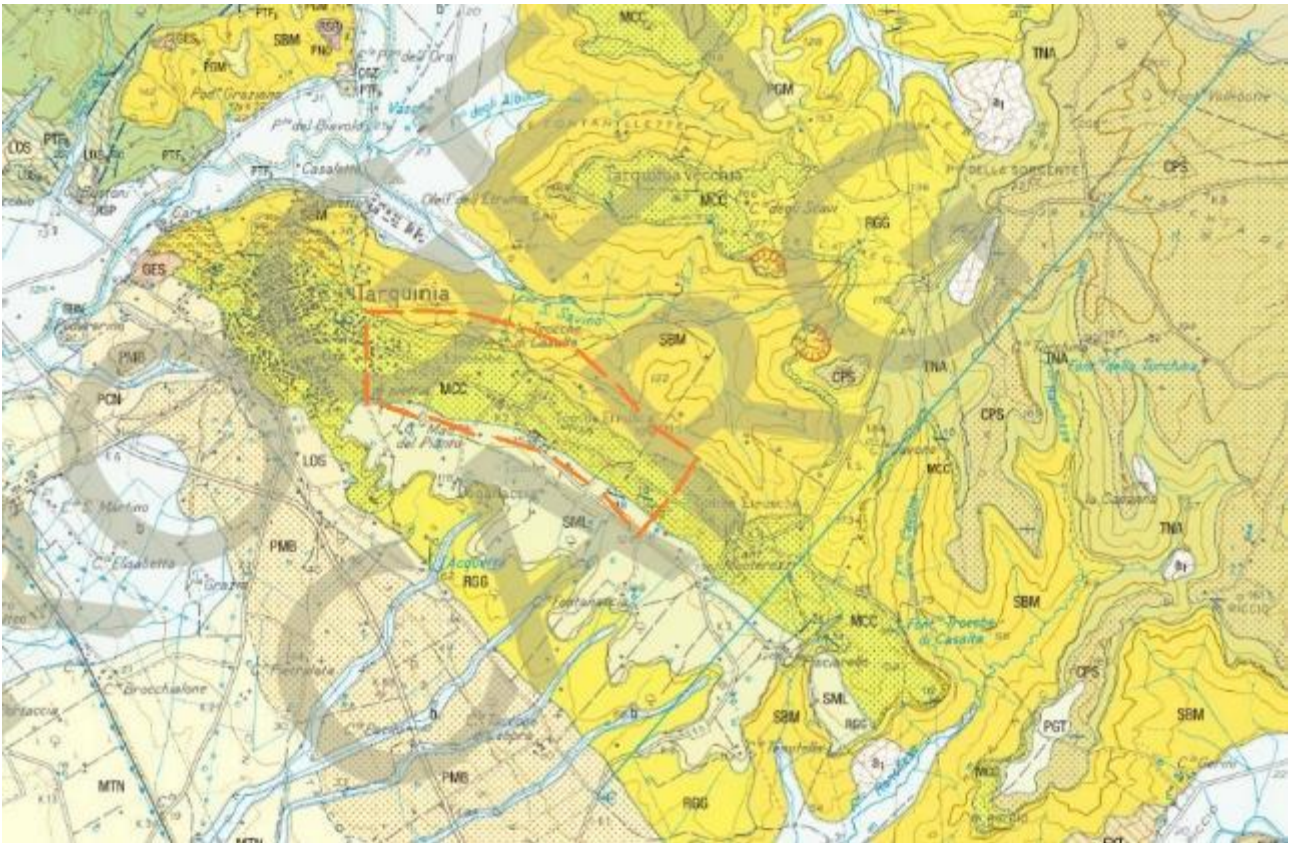


Figura 6: Dettaglio della carta geologica con inquadramento dell'area di interesse

Nell'area di Pian della Civita le sabbie sono state completamente erose e la sommità del rilievo (superficie strutturale) coincide con il tetto della formazione calcarea. Dalla sezione in Fig.7 si nota come la formazione di nostro interesse (MCC) sia in contatto eteropico con l'unità di Pian della Regina (RGG) ad indicare un andamento trasgressivo con approfondimento del sistema. Entrambe poggiano sulle argille dell'unità SBM e formano una blanda antiforame in drappoggio sul deposito del Pliocene Inferiore.

Si riporta in figura 7 la stratigrafia delle formazioni di interesse, dalla più antica.

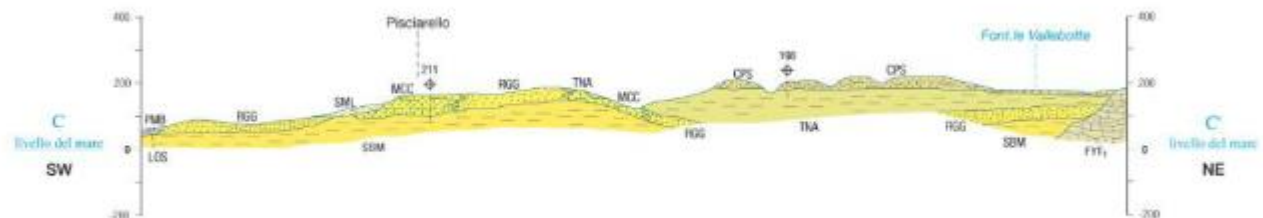
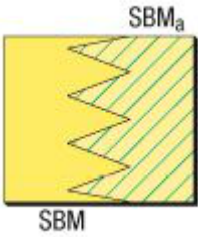
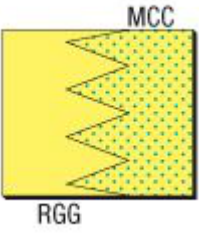



Figura 7: Sezione geologica CC'

	<p>Supersistema Spalle della Ciuffa (CF):</p> <p>Unità del Fosso di San Savino (SBM, Pliocene inferiore p.p.): Argille e argille limose e sabbiose grigie con intercalazioni di conglomerati eterometrici calcareo marnosi evoluti, in abbondante matrice sabbiosa, appartenenti alla successione calcareo-marnosa di Monte Romano. L'ambiente di sedimentazione è marino circa litorale. Spessore massimo stimato inferiore ai 100 m.</p>
	<p>Supersistema Tarquinia (TR):</p> <p>Macco (MCC, Pliocene medio p.p. – Pliocene superiore p.p.): Calcarenite fossilifera, sabbie bioclastiche cementate di colore giallo paglierino (cfr. Macco ALBERTI et alii, 1970; Calcare di Tarquinia, FAZZINI et Alii, 1972; Calcare di Amphistegina di CONTI et Alii, 1983), con abbondante macrofauna a lamellibranchi, gasteropodi, macroforaminiferi e foraminiferi bentonici, subordinatamente echinidi, brozoi, spugne, brachiopodi e ditrupe. L'ambiente di sedimentazione è marino infralitorale inferiore – circalitorale superiore. Potenza di circa 40 m.</p> <p>Unità di Pian della Regina (RGG, Pliocene medio p.p. – Pliocene superiore p.p.): Sabbie e sabbie argillose gialle con calcinazioni e concrezioni carbonatiche, a luoghi con lenti argillose e ghiaiose anche consistenti; calcareniti sabbiose cementate. Abbondante macrofauna marina a lamellibranchi e gasteropodi. L'ambiente di sedimentazione è marino circalitorale. Potenza massima di circa 100 m.</p>

 <p>SML</p>	<p>Sintema Grascetelle:</p> <p>Unità di podere San Marcello (SML, Pleistocene inferiore p.p. Pleistocene medio p.p.): Calcareniti e sabbie cementate, sabbie ad elementi calcarei e quarzosi, conglomerati ad elementi evoluti di dimensioni centimetriche a cemento carbonatico, a luoghi molto cementati a formare “panchine di spessore modesto”, 3 – 6 m al massimo, trasgressive sul substrato argilloso pliocenico; ambiente costiero; ricche di malacofauna.</p>
--	---

1.4 Inquadramento Geomorfologico

Il Macco, come già detto, riveste un importante ruolo geomorfologico perché è portato ad “emergere” topograficamente per fenomeni di erosione selettiva.

Il Calcarea di Tarquinia presenta caratteristiche sedimentologiche variabili sia verticalmente che orizzontalmente; coesistono e sfumano gli uni negli altri addensamenti calcarenitici, strati calcareo-marnosi e livelli o lenti di limi sabbiosi, mentre la struttura e l’assetto generale sono in strati e banchi discontinui. Il comportamento fragile determina un alto grado di fratturazione e un’elevata permeabilità. Il comportamento meccanico della roccia varia pertanto anche su modesti volumi, mentre la dissoluzione risulta il processo morfogenetico più efficace (carsificazione). La generale stabilità della superficie strutturale calcarea si interrompe lungo la scarpata che la delimita e che, ovviamente, risulta esposta al pericolo di crolli.

Le argille manifestano un comportamento meccanico duttile abbastanza omogeneo e costante su ampie superfici di affioramento, sono sovraconsolidate, dotate di una moderata coesione e la loro permeabilità è decisamente ridotta anche se, in superficie, lo strato d’alterazione ha un notevole spessore (frequentemente attorno al metro) e viene continuamente areato e rimosso dalle pratiche agricole (Cattuto et Al.,2006).

Il versante che borda l’altopiano, impostato su calcarenite tenera a comportamento fragile, presenta un profilo fortemente irregolare, caratterizzato da rientranze e sporgenze morfologiche di origine erosiva (nicchie di frane antiche) o strutturali, queste ultime legate all’esistenza di un fitto reticolato di fratture ortogonali fra loro. Il dislivello complessivo fra la sommità ed il piede del pendio è generalmente intorno ai 30 m. Numerose sono le cavità

funerarie presenti lungo il pianoro ed il versante. Al piede del versante, la formazione calcarenitica poggia sulla formazione argillosa più antica attraverso un contatto stratigrafico netto, per lo più mascherato dalla falda detritica. In figura 8 è possibile osservare l'andamento delle pendenze del terreno.

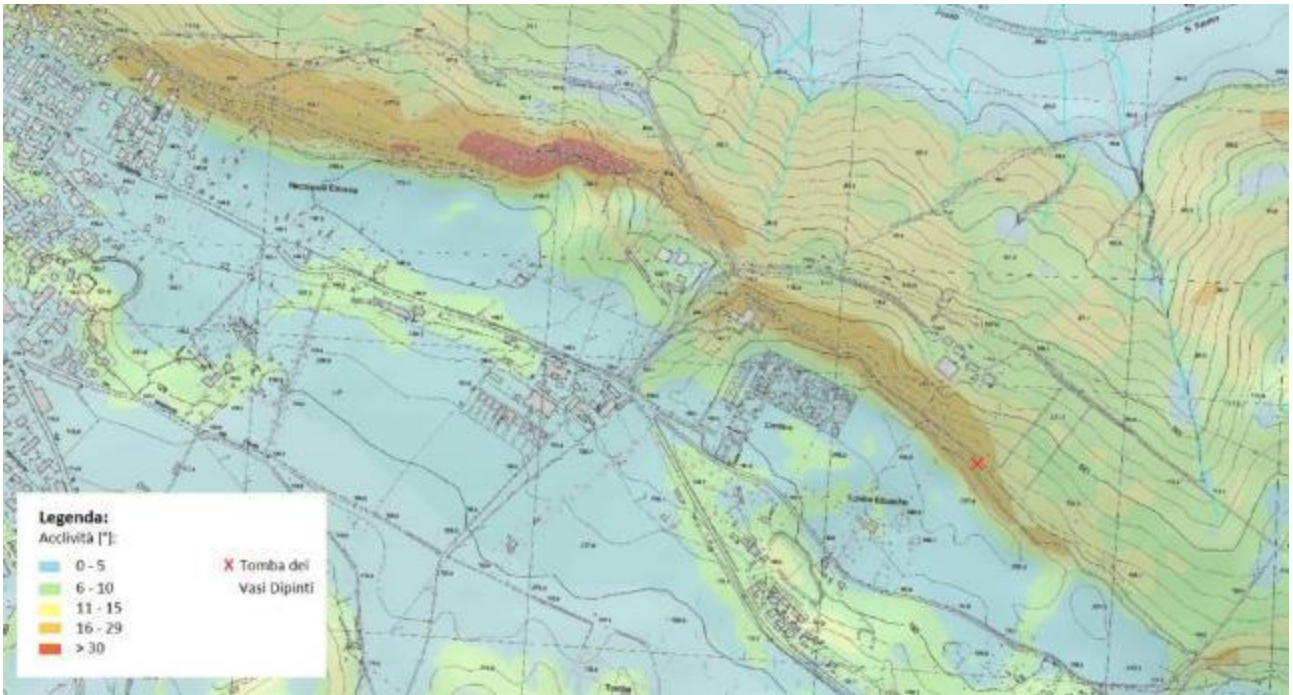


Figura 8: Pendenze del terreno, con indicazione della Tomba dei Vasi Dipinti

In figura 9 si riporta un estratto della cartografia on line fornita dal progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia).



Figura 9: Estratto della cartografia on line del progetto IFFI del comune di Tarquinia.

L'immagine descrive i fenomeni franosi nell'area considerata e riporta l'area di studio. In particolare si ha:

- giallo tratteggiato: Necropoli dei Monterozzi (area di interesse).
- rosso con trama a quadretti: aree soggette a crolli e ribaltamenti diffusi.
- rosso: crollo o ribaltamento.
- verde: colamento lento.
- punti azzurri: punto identificativo del fenomeno (punto più alto).

Si hanno dunque fenomeni di crollo, ribaltamento e colamenti lenti.

Un colamento lento (esempio in figura 10) è un fenomeno franoso poco profondo che interessa un tipo di terreno duttile e con risposta plastica su versanti anche a debole pendenza.

Si tratta di uno spostamento verso valle di una buona porzione di terreno. Nel nostro caso i colamenti interessano sicuramente le argille, che hanno infatti un comportamento duttile e plastico e si trovano in una zona collinare, quindi in pendenza.

Le argille e le argille limose della zona infatti, pur essendo dotate di moderata coesione e permeabilità ridotta, hanno un notevole strato d'alterazione, dovuto anche alle pratiche agricole. Questo può portare ad una notevole infiltrazione locale e alla completa saturazione superficiale delle argille: in tali condizioni è facile che le argille raggiungano lo stato plastico e che si producano fenomeni gravitativi di vario tipo, più frequentemente scivolamenti e colamenti superficiali (Cattuto et Al., 2006).



Figura 10: Colata presente sul pian della Regina. In rosso la nicchia verticale, in giallo la colata.

I fenomeni di crollo e ribaltamento interessano in genere una formazione con risposta fragile.

Il crollo è un processo di evoluzione naturale dei versanti, le cui cause sono molteplici. Si ricordano la circolazione di acqua nelle discontinuità, l'alterazione provocata da agenti atmosferici, le vibrazioni indotte da eventi sismici, l'erosione da parte dei corsi d'acqua, l'azione delle radici delle piante e le modifiche dello stato tensionale.

Il ribaltamento è un fenomeno di instabilità che si manifesta con la rotazione rigida o l'inflessione verso valle di blocchi o lastre di roccia delimitati da giunti paralleli al fronte, immergenti verso monte e subverticali (Ribacchi et Al., 2018).

Nel caso in esame il macco è effettivamente un tipo di roccia tenera con risposta fragile ed è esposto a parecchi dei fenomeni sopra elencati, per cui è sicuramente soggetto a crolli e ribaltamenti. Ciò è confermato dalle osservazioni in situ.

Se ora si considerano entrambi i processi si nota come la presenza di argille al di sotto del macco ed i possibili fenomeni franosi, con conseguente scalzamento al piede della roccia calcarea, non fanno altro che accelerare il processo di crollo o ribaltamento.

Inoltre il contrasto di competenza tra il basamento plastico (formazione argillosa) e l'orizzonte rigido delle calcareniti soprastante, porta anche a fenomeni di "lateral spread", causato dal movimento delle argille sottostanti che, esercitando una sollecitazione di trazione sul macco, provoca la formazione di discontinuità parallele al fronte e l'allargamento di quelle preesistenti fino al distacco di costoni di roccia. I costoni distaccati

poggiano sulle argille e possono dunque crollare, ribaltare o “galleggiare” su di esse e venire lentamente allontanati dalla scarpata.

In figura 11 (Cattuto et Al., 2006) è possibile osservare il fenomeno appena descritto. Gli autori inoltre hanno apportato alcuni suggerimenti di mitigazione.



Figura 11: Dettaglio sul fenomeno del lateral spread, con suggerimenti di mitigazione (Cattuto et Al., 2006)

1.5 Inquadramento Sismico

La classificazione sismica del territorio nazionale ha introdotto normative tecniche specifiche per le costruzioni di edifici, ponti ed altre opere in aree geografiche caratterizzate dal medesimo rischio sismico.

Si riporta la zona sismica per il territorio di Tarquinia, indicata nell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003, aggiornata con la Delibera della Giunta Regionale del Lazio n. 387 del 22 maggio 2009.

Zona sismica 3B	Zona con pericolosità sismica bassa, che può essere soggetta a scuotimenti modesti. La sottozona 3B indica un valore di $a_g < 0,10g$.
--------------------	---

I criteri per l'aggiornamento della mappa di pericolosità sismica sono stati definiti nell'Ordinanza del PCM n. 3519/2006, che ha suddiviso l'intero territorio nazionale in quattro zone sismiche sulla base del valore dell'accelerazione orizzontale massima (a_g) su suolo rigido o pianeggiante, che ha una probabilità del 10% di essere superata in 50 anni.

Zona sismica	Descrizione	accelerazione con probabilità di superamento del 10% in 50 anni [ag]	accelerazione orizzontale massima convenzionale (Norme Tecniche) [ag]
1	Indica la zona più pericolosa, dove possono verificarsi fortissimi terremoti.	$a_g > 0,25 g$	0,35 g
2	Zona dove possono verificarsi forti terremoti.	$0,15 < a_g \leq 0,25 g$	0,25 g
3	Zona che può essere soggetta a forti terremoti ma rari.	$0,05 < a_g \leq 0,15 g$	0,15 g
4	E' la zona meno pericolosa, dove i terremoti sono rari.	$a_g \leq 0,05 g$	0,05 g

Il comune di Tarquinia ricade dunque nella zona sismica 3B, nella quale l'accelerazione con probabilità di superamento del 10% in 50 anni è pari a 0,10 g.

Inoltre se si considera lo storico dei terremoti registrati (dati da portaleabruzzo.com) si nota che in un raggio di 30 km si registrano solamente quattro terremoti che non superano i 5,2 gradi di magnitudo. Inoltre scendendo sotto un raggio di 20 km si registra un solo terremoto, avvenuto nel 1819.

Considerando i dati INGV, il cui storico dei terremoti è consultabile on line e raccoglie i terremoti dal 1985, si può notare come negli ultimi 40 anni la zona non sia stata interessata da terremoti di magnitudo superiore a 4 e scarsamente interessata da qualsiasi tipo di fenomeno sismico anche di più lieve entità.

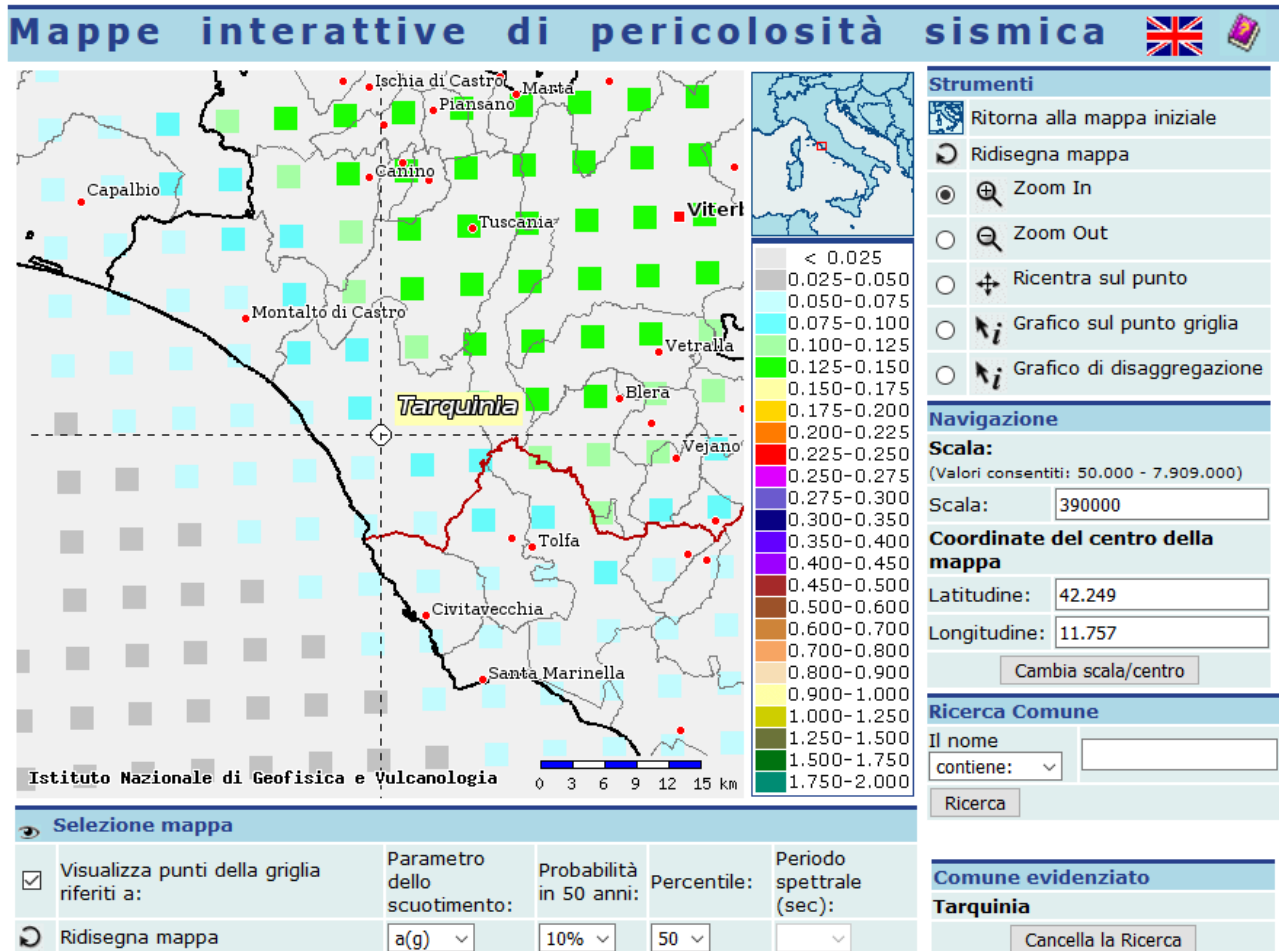


Figura 12: Mappa di pericolosità sismica, dettaglio su Tarquinia

In figura 12 è riportata la mappa di pericolosità sismica estratta dal sito INGV. Si nota come nella zona di interesse (comune di Tarquinia) l'accelerazione con probabilità di superamento del 10% in 50 anni rientra nel range $0,075 < a(g) < 0,100$, il che conferma ciò che si era già detto inquadrando l'area nella zona sismica 3B.

Si può inoltre concludere come l'intera area del comune considerato non sia una zona particolarmente a rischio: i valori di accelerazione, infatti, non hanno mai superato storicamente quelli indicati e scendendo verso il mare decrescono.

1.6 Inquadramento Meteo Climatico

Per l'inquadramento meteo climatico dell'area di interesse sono considerati principalmente dati di pioggia e di temperatura.

I dati sono stati ricavati dal sito del Centro Funzionale Regionale della regione Lazio e dal sito dell'Arsial (Servizio Integrato Agrometeorologico della Regione Lazio).

In particolare, il Centro Funzionale Regionale fornisce dati dal Gennaio 2003 al Maggio 2018, ricavati tramite stazione elettronica, posta in località Portaccia a 18 m s.l.m.. Questi dati comprendono l'altezza di pioggia caduta giornalmente, le temperature massime e minime giornaliere e le temperature medie mensili.

I dati ricavati dall'Arsial vanno dal 1980 al 2010 e sono relativi ad un stazione meccanica posta in località Portaccia a 15 m s.l.m.. I dati comprendono la temperatura minima mensile e le medie delle temperature minime mensili, la temperatura massima mensile e le medie delle temperature massime mensili, la temperatura media mensile e l'altezza di pioggia caduta ogni mese.

Le stazioni si trovano a circa 4,5 km in direzione SE rispetto alla tomba dei Vasi Dipinti.

Analisi dei dati:

Si riportano inizialmente i grafici con le temperature medie annue (figura 14) e le altezze di pioggia (figura 13) per anno:

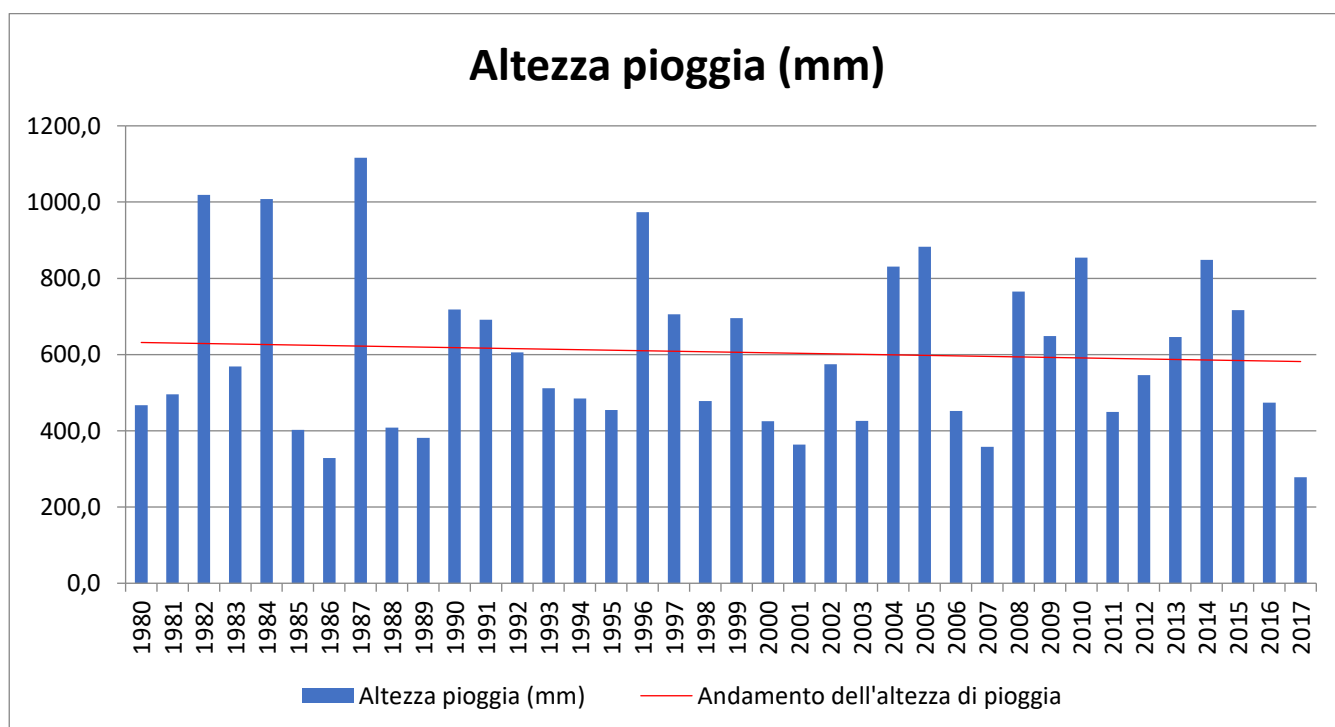


Figura 13: Somma delle altezze di pioggia per anno, con andamento (dati Arsial)

Si nota che la tendenza è negativa. La linea di tendenza passa da un valore compreso tra i 600 ed i 700 mm di pioggia nel 1980 ad un valore inferiore ai 600 mm nel 2017.

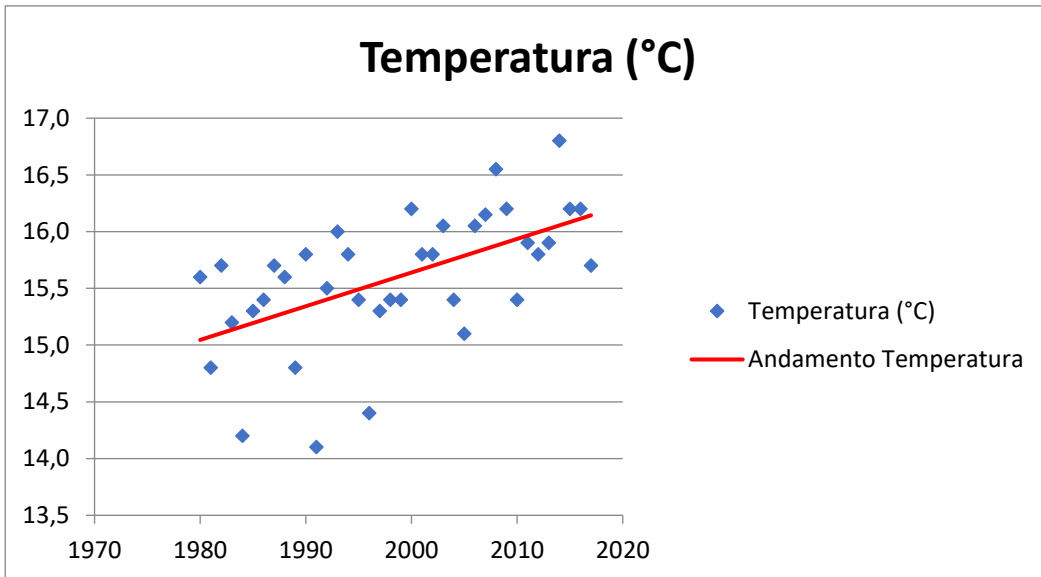


Figura 14: Temperature medie annue, con andamento

Per quanto riguarda la temperatura si può dire che l'andamento ottenuto rispecchia l'andamento generale della temperatura a livello globale. Infatti si registra dagli anni '80 ai giorni nostri un innalzamento di temperatura che supera di poco il grado.

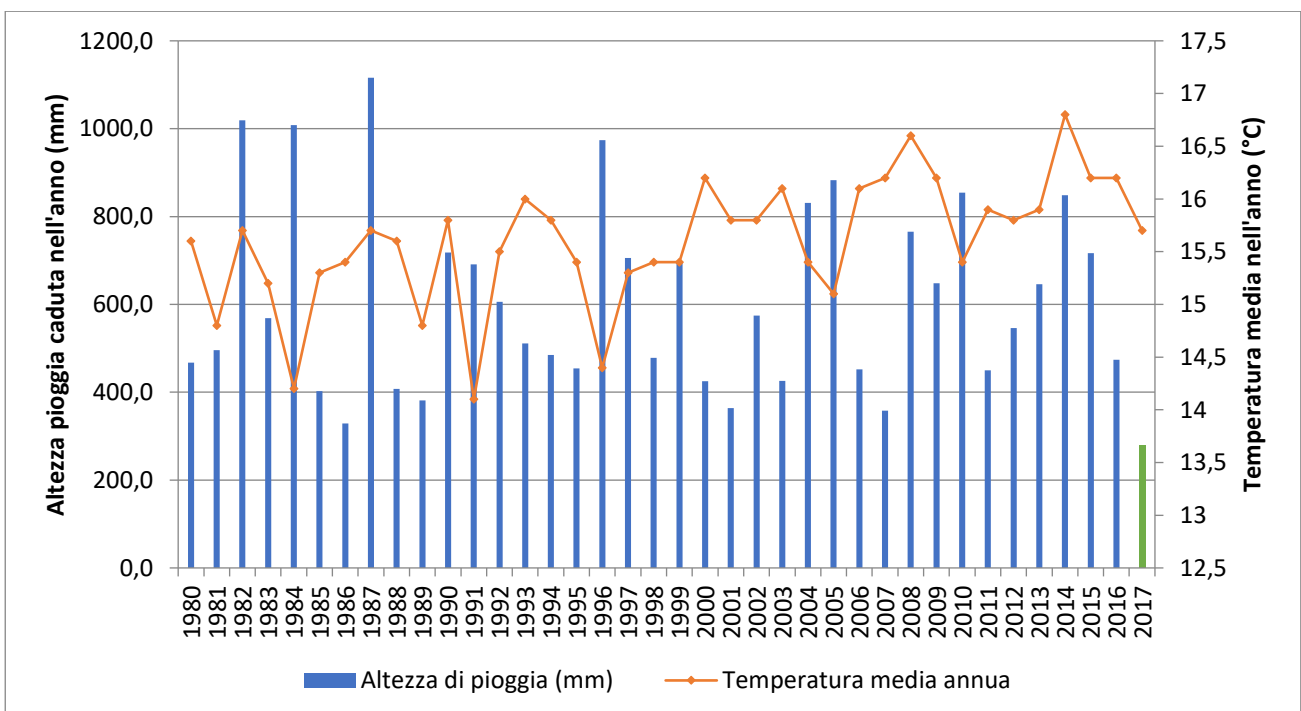


Figura 15: Altezza pioggia e temperatura media annua

Osservando la figura 15 non sembrerebbe esserci una relazione diretta tra le temperature medie e la pioggia caduta nell'anno. Andrebbero pertanto analizzati dati giornalieri per avere un'idea più precisa su di una eventuale relazione.

Nelle tabelle 1 e 2 sono riportate le medie, i massimi ed i minimi dei dati di pioggia e temperatura considerando tutti gli anni (dal 1980 al 2018), dove per l'altezza di pioggia sono state considerate le somme delle altezze di pioggia dell'intero anno, mentre per le temperature sono state considerate le medie annue.

	Dati Regione (stazione elettronica) (mm)	Dati Arisial (stazione meccanica) (mm)	Media (mm)
media	618,0	605,4	601,0
	anno 2005	anno 1987	anno 1987
max	963,8	1116,0	1116,0
discostamento dalla media	345,8	510,6	515,0
rapporto rispetto alla media	155,96%	184,33%	185,69%
	anno 2017	anno 1986	anno 2017
min	277,8	328,8	277,8
discostamento dalla media	340,2	276,6	323,2
rapporto rispetto alla media	44,95%	54,31%	46,22%

Tabella 1: Medie, massimi e minimi dei dati di altezza pioggia

	Dati Regione (stazione elettronica) (°C)	Dati Arisial (stazione meccanica) (°C)	Media (°C)
media	15,7	15,6	15,6
	anno 2014	anno 2008	anno 2014
max	16,8	17,6	16,8
discostamento dalla media	1,1	2,0	1,2
rapporto rispetto alla media	106,92%	112,77%	107,73%
	anno 2005	anno 1991	anno 1991
min	14,7	14,1	14,1
discostamento dalla media	1,0	1,5	1,5
rapporto rispetto alla media	93,55%	90,35%	90,42%

Tabella 2: Medie, massimi e minimi dei dati di Temperatura media annuale

Per quel che riguarda i dati di pioggia, considerando sia i dati Arisial che i dati della Regione, si nota come il massimo per quanto riguarda la precipitazione totale annua si ha nel 1987, mentre il minimo lo si ha nel 2017. Questo dato, pur potendosi trattare di un semplice caso, conferma l'andamento notato precedentemente per l'altezza di pioggia: infatti, ritroviamo il massimo negli anni '80 e il minimo nello scorso anno.

Si nota come il discostamento percentuale rispetto alla media sia in entrambi i casi superiore al 50%.

Di nuovo massimi e minimi rispettano l'andamento evidenziato in precedenza per l'andamento della temperatura: si ha infatti la temperatura massima nel 2014 e la minima nel 1991. I discostamenti percentuali non si avvicinano al 10%, ma ricordiamo che per l'ecosistema un cambio di temperatura anche di un solo grado è significativo e può portare gravi conseguenze.

Si sono a questo punto analizzati i dati di altezza pioggia forniti dal Centro Funzionale Regionale, cioè quelli andati dal 2003 al 2018, allo scopo di trovare un andamento medio dell'altezza di pioggia in funzione dei mesi, i risultati sono illustrati nelle figure 16 e 17. In questo modo si potrà in futuro cercare una correlazione tra i dati di deformazione forniti dagli strumenti installati in situ e i dati di piovosità, per capire se le problematiche che riguardano la tomba dei Vasi Dipinti e altre tombe siano influenzate anche dalla stagionalità.

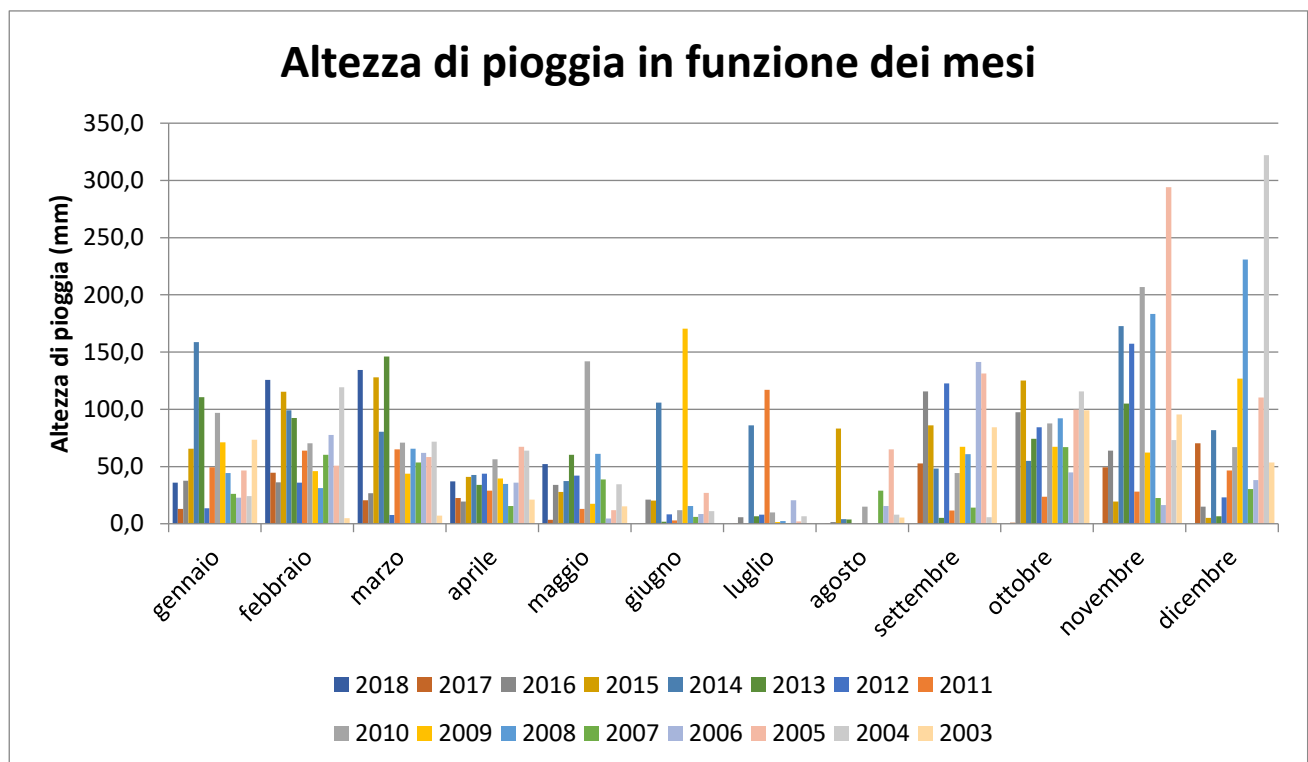


Figura 16: Altezza della pioggia per mese, anni 2003-2018

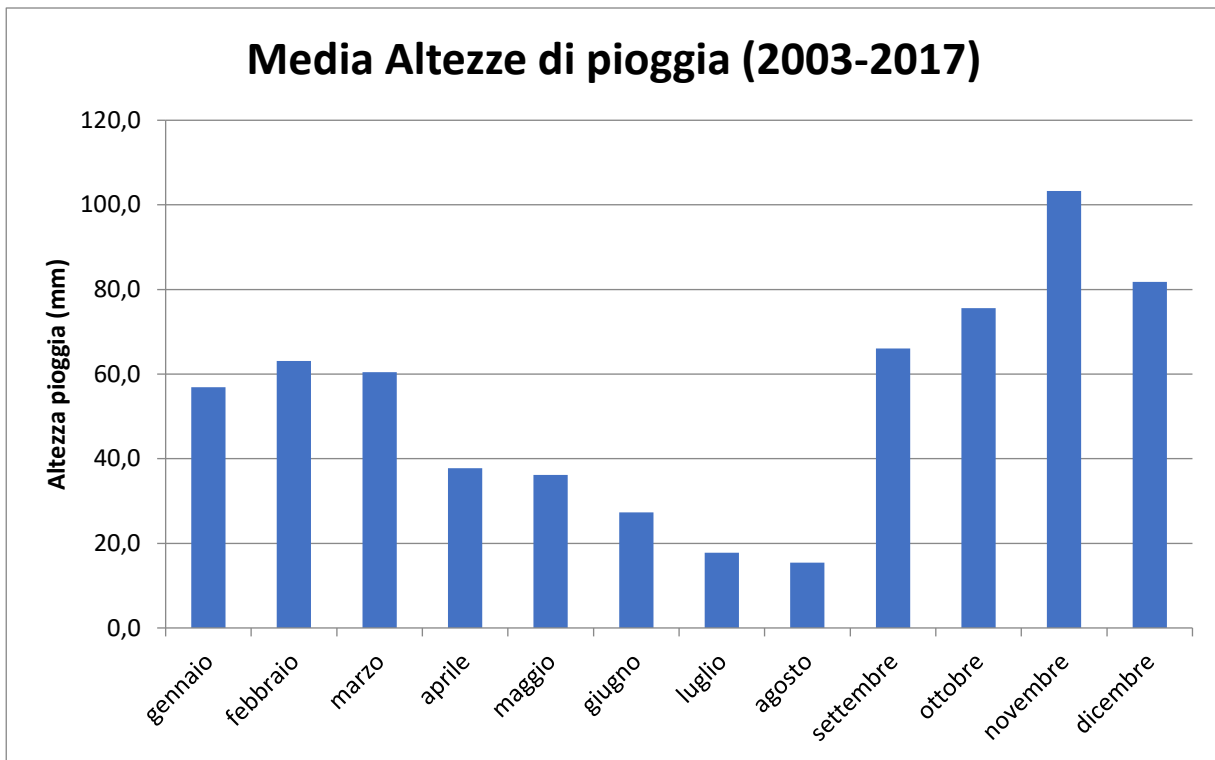


Figura 17: Media delle Altezze di pioggia per mese. Anni considerati: 2003 – 2017

Il mese più piovoso risulta essere novembre, con addirittura più di 20 mm in media di scarto da dicembre. Il mese meno piovoso invece è agosto, che però non si discosta molto da luglio e giugno. In generale si nota una bassa piovosità nei mesi primaverili ed estivi, con un decrescendo da marzo fino ad agosto. I mesi autunnali e invernali risultano invece i più piovosi, con picchi in particolare nei mesi di novembre e dicembre.

Nell'analisi dei dati si può osservare un'anomalia nell'anno 2017, in questo anno infatti le piogge risultano più scarse che negli altri anni, si è deciso quindi di analizzare in maniera più approfondita i dati di questo anno.

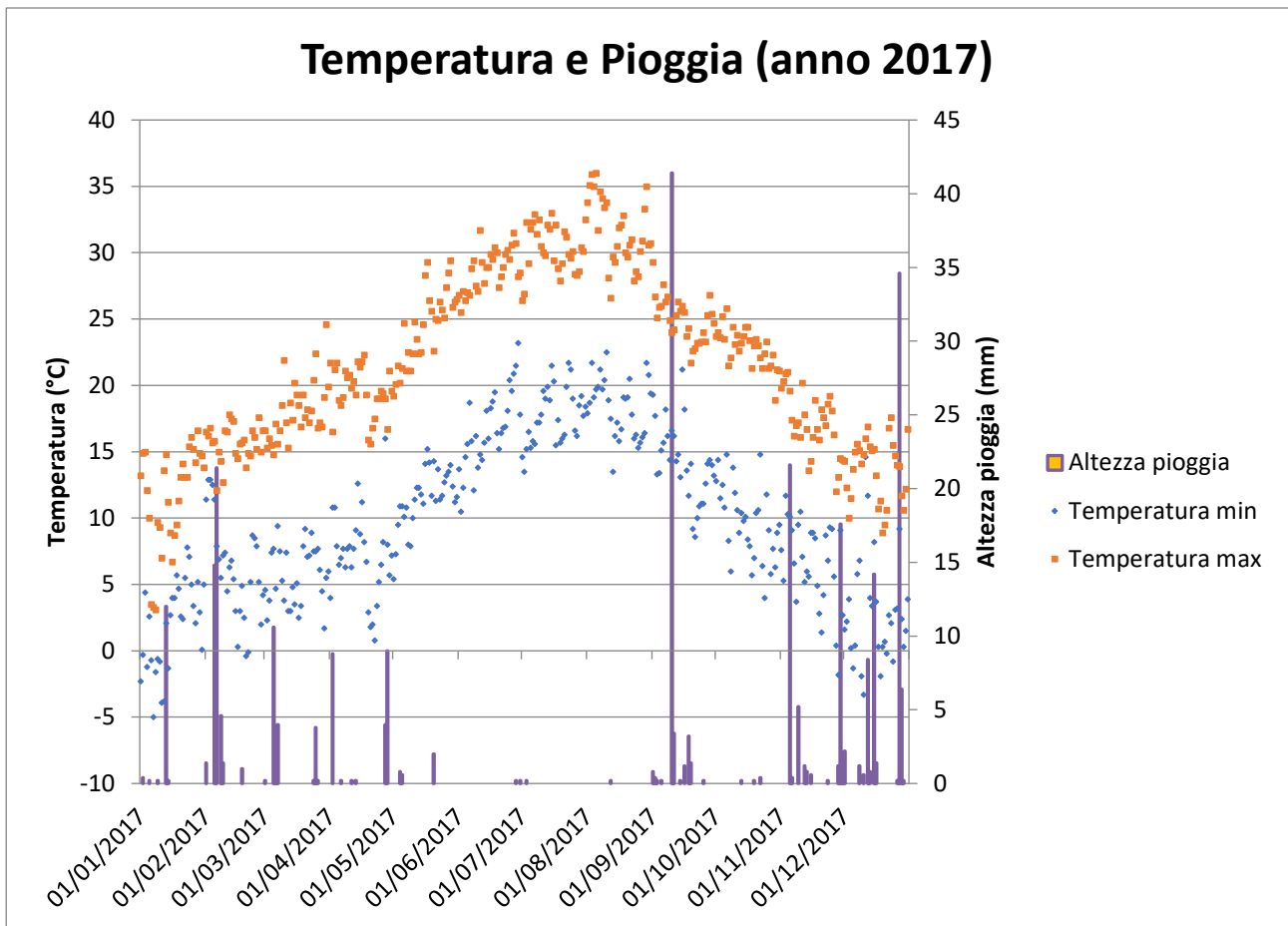


Figura 18: Altezze di pioggia giornaliere e massimi e minimi di Temperatura giornalieri per il 2017

Quello che è possibile notare immediatamente dalla figura 18 è che la piovosità nei mesi estivi è praticamente nulla e che la pioggia massima annua si ha nei primi giorni di settembre, dopo il lungo periodo di scarse piogge. Per il resto l'andamento sembra seguire quello medio tracciato in precedenza, con altezze di pioggia però che rimangono sotto la media per tutto il corso dell'anno (vedi Figura 19).

Nell'analisi dei dati di temperatura non si riscontrano particolari anomalie.

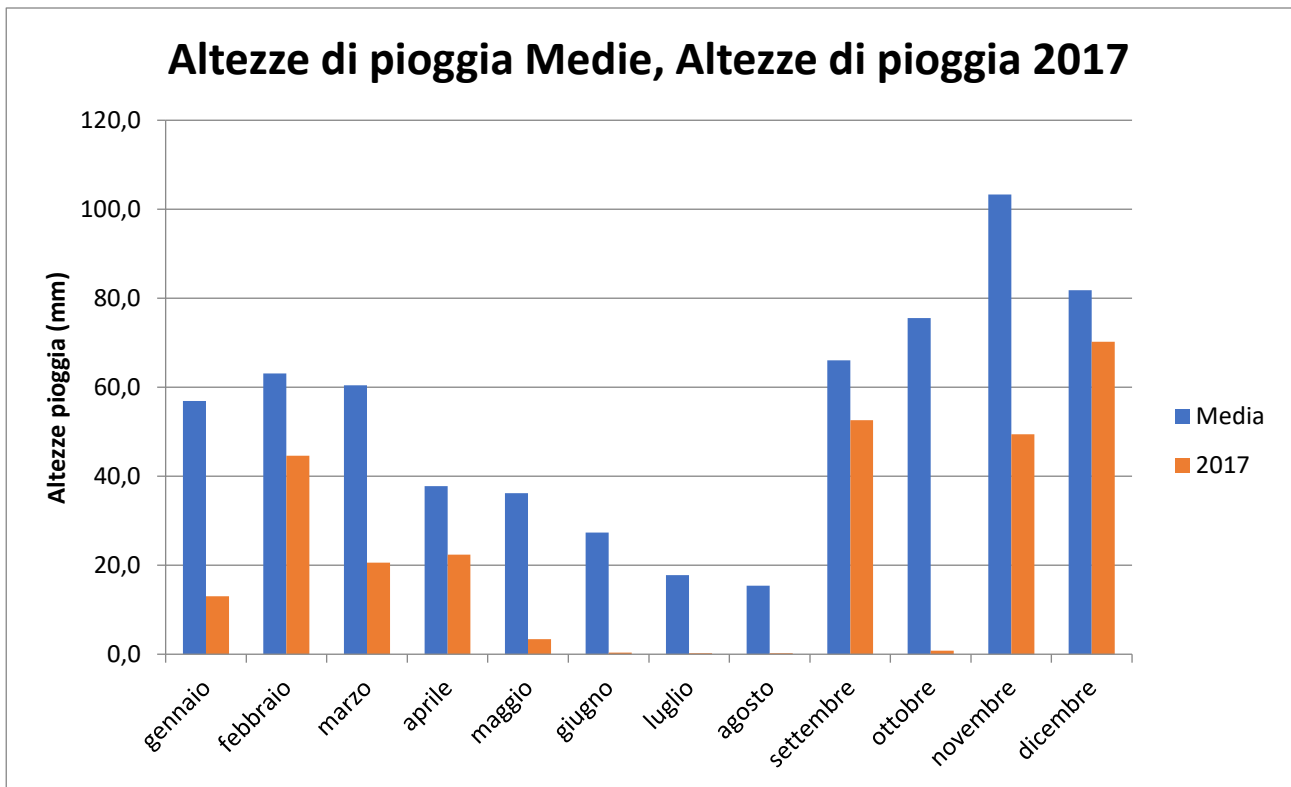


Figura 19: Confronto tra le Altezze di pioggia medie e le Altezze di pioggia del 2017

Un'analisi più approfondita delle condizioni meteo climatiche del 2017 è stata fatta anche perché proprio in questo anno si sono notati per la prima volta gravi dissesti all'interno della Tomba dei Vasi Dipinti e di altre tombe vicine. Ulteriore indizio che suggerisce una relazione tra le condizioni climatiche e i dissesti.

In generale i fenomeni di imbibizione e drenaggio nella roccia e nelle argille sottostanti possono portare a rigonfiamento e ritiro delle argille. Questo fenomeno è molto comune e non sempre è pericoloso, ma ricordiamo che il Macco è una roccia tenera con comportamento fragile, per cui se il fenomeno di rigonfiamento o ritiro, che provoca un continuo cambio nello stato tensionale del materiale, è molto accentuato possono formarsi delle fratture o possono aggravarsi le condizioni di quelle preesistenti.

Inoltre ricordiamo che, come già detto nel cap. 1.4, anche le argille sviluppano criticità in condizioni sature (colamenti lenti).

Capitolo 2. Rilievo topografico

Un rilievo topografico è il complesso delle operazioni di misura e dei procedimenti da eseguire al fine di produrre la rappresentazione grafica, ed in scala, di una porzione di superficie terrestre.

Nel nostro e in casi simili l'utilità di un tale procedimento è quella di ricreare uno spazio 2D o 3D che sia rappresentativo della realtà e sul quale poter lavorare andando ad inserire i dati ottenuti dal rilievo geomeccanico, in modo che anche questi siano referenziati.

In particolare nell'ambito di questo lavoro l'interesse è indirizzato alla geometria della tomba dei Vasi Dipinti e alla sua collocazione all'interno del costone in roccia, dove si sviluppa a quote inferiori anche un ipogeo

Il rilievo topografico è stato realizzato tramite l'utilizzo di diverse tecniche; in particolare: acquisizioni TLS, fotogrammetria digitale, rilievo topografico e georeferenziazione tramite GPS. Di seguito si propone una breve descrizione delle tecniche e dello svolgimento del rilevamento.

Acquisizioni TLS (laserscanner)

Le acquisizioni laser scanner sono state realizzate in occasione del sopralluogo del 14 giugno 2018 con lo strumento Stonex X300 (figura 20), in dotazione a ISPRA, che utilizza il metodo TOF (calcolo del tempo di volo) capace di acquisire fino a 40'000 punti al secondo con una precisione inferiore a 6 mm (per le distanze a cui lo si è utilizzato).

Sono stati dunque effettuati diversi rilievi laser-scanner (5 stazionamenti), che hanno riguardato l'esterno della tomba dei Vasi Dipinti ed il suo interno, al fine di creare una nuvola di punti. Lo scopo è stato quello di avere una nuvola di punti che permettesse di creare un modello 3D e delle sezioni di 2D per lo studio dettagliato della tomba.



Figura 20: Acquisizione con Laser-Scanner Stonex X300

Fotogrammetria digitale

La tecnica fotogrammetrica digitale è stata utilizzata all'interno della tomba dei Vasi Dipinti e dell'ipogeo sottostante.

In data 14 giugno 2018 sono state scattate circa 70 foto in totale dell'interno della tomba, successivamente elaborate mediante il software Photoscan © per creare una mesh di punti e quindi una riproduzione 3D.

Allo stesso modo si è proceduto nel sopralluogo successivo (12 Luglio 2018). Sono state scattate numerose foto dell'interno dell'ipogeo sottostante per poterne creare una riproduzione 3D.

Allo scopo di studiare la relazione geometrica, geologica e geomeccanica tra la tomba e l'ipogeo, ed in particolare la prosecuzione delle discontinuità presenti al di sotto della tomba dei Vasi Dipinti in corrispondenza dell'ipogeo, si è reso

necessario legare le due mesh (passando da rilievi relativi ad assoluti) e per questo è stato effettuato un rilievo topografico di dettaglio.

Rilievo topografico

Il rilievo topografico è stato svolto in data 12 luglio 2018. È stato realizzato con la stazione totale Leica TS60 (figura 21) in dotazione della ditta Stage SRL.

Il rilievo è stato svolto a partire dall'interno della tomba, in modo da poter legare i punti battuti con le acquisizioni laser e fotogrammetriche fatte in precedenza tramite dei punti omologhi. All'interno della tomba sono state scattate delle foto con la stazione totale ed è stato battuto un punto di aggancio all'esterno. Ci si è quindi spostati all'esterno e dal punto precedentemente battuto si battuti un numero di punti sufficienti, con un prisma riflettente e con il laserscanner, per ottenere l'andamento topografico del ciglio sul quale si trova la tomba. Allo stesso modo si è operato lungo la scarpata, ottenendo così una poligonale aperta, cioè una serie di punti per riprodurre nel dettaglio l'andamento del ciglio e della scarpata, dalla tomba fino all'ipogeo.



Figura 21: Acquisizioni all'interno della tomba con la stazione totale Leica TS60

Georeferenziazione tramite GPS

La georeferenziazione è stata effettuata tramite antenna GPS Leica VIVA GS08 Plus (figura 22), in dotazione alla ditta Stage SRL. È stata usata la tecnica NRTK (*network real time kinematic*): la tecnica permette di agganciare lo strumento ad una rete permanente che in tempo reale fornisce le informazioni necessarie all'utente (fissaggio dell'ambiguità dei satelliti e altre correzioni) per una corretta acquisizione delle coordinate assolute. In particolare, si è sfruttato il pacchetto ItalPOS fornito da SmartNet Italy.

Si è potuto quindi procedere con un rilievo cinematico, molto più veloce di altre tecniche a parità di precisione, prendendo le coordinate di dieci punti in totale. I primi cinque sono stati acquisiti durante il primo sopralluogo, e corrispondono ai punti in cui si è effettuato lo stazionamento con il laserscanner. Gli altri cinque sono stati acquisiti il 12 Luglio; questi ultimi sono stati battuti anche con la stazione totale.

Per quel che riguarda la precisione, lo strumento e la tecnica utilizzati permettono delle precisioni pari a 10 mm in orizzontale e 20 mm in verticale circa. Le precisioni sono leggermente più basse di quello che permetterebbe un posizionamento statico con post elaborazione, che però richiederebbe alcune ore di lavoro rispetto ad un'ora circa con la tecnica utilizzata.

La georeferenziazione consente di legare tra di loro i dati acquisiti (in relativo) ad una rete geodetica (assoluta), permettendo di inquadrare in maniera definitiva la posizione dell'area di studio.



Figura 22: L'antenna GNSS durante le acquisizioni

Elaborato tecnico

Grazie al lavoro di post elaborazione, per il quale si ringrazia la ditta Stage SRL, in particolare nella persona del geologo Ermanno Marino, si sono potute ottenere una serie di immagini (figure 23, 24, 25, 26) che mostrano l'andamento del versante di roccia e la posizione relativa tra la tomba dei Vasi Dipinti e l'ipogeo sottostante. In figura 27 viene riportata una particolare sezione 2D di interesse ottenuta dalla rielaborazione dei dati in AutoCad.

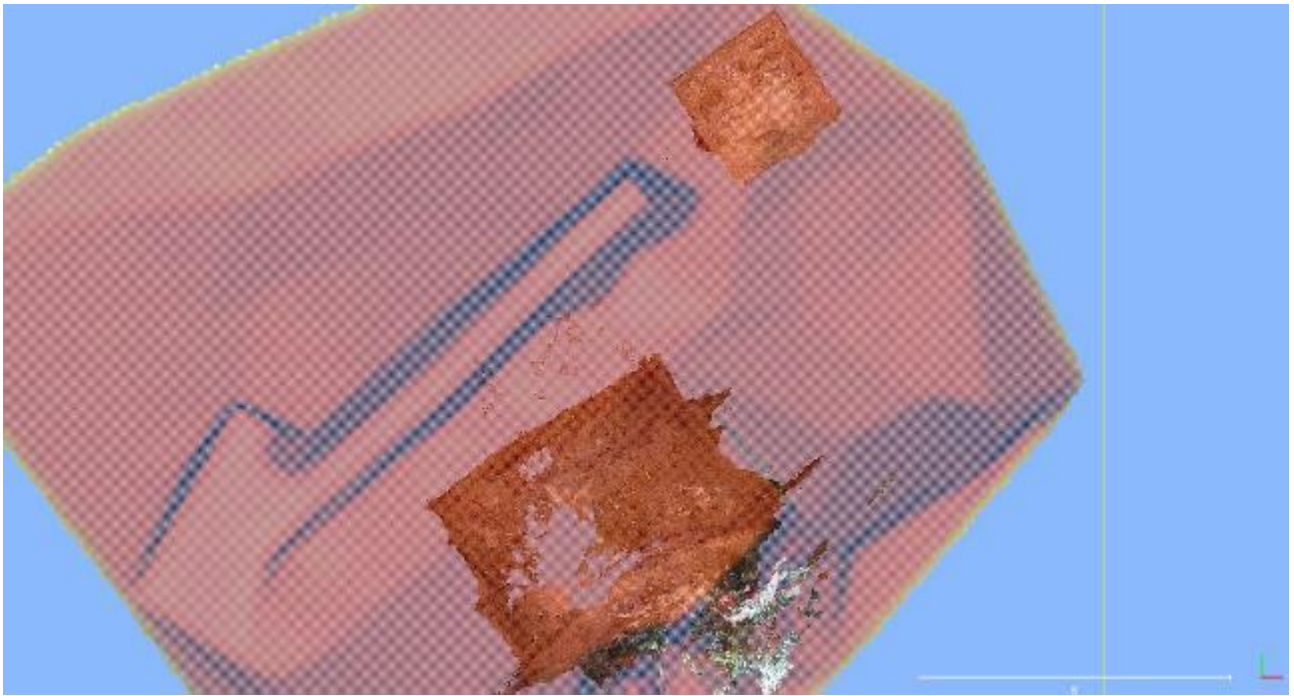


Figura 23: Vista dall'alto del versante, con localizzazione della Tomba (in alto) e dell'ipogeo (in basso)

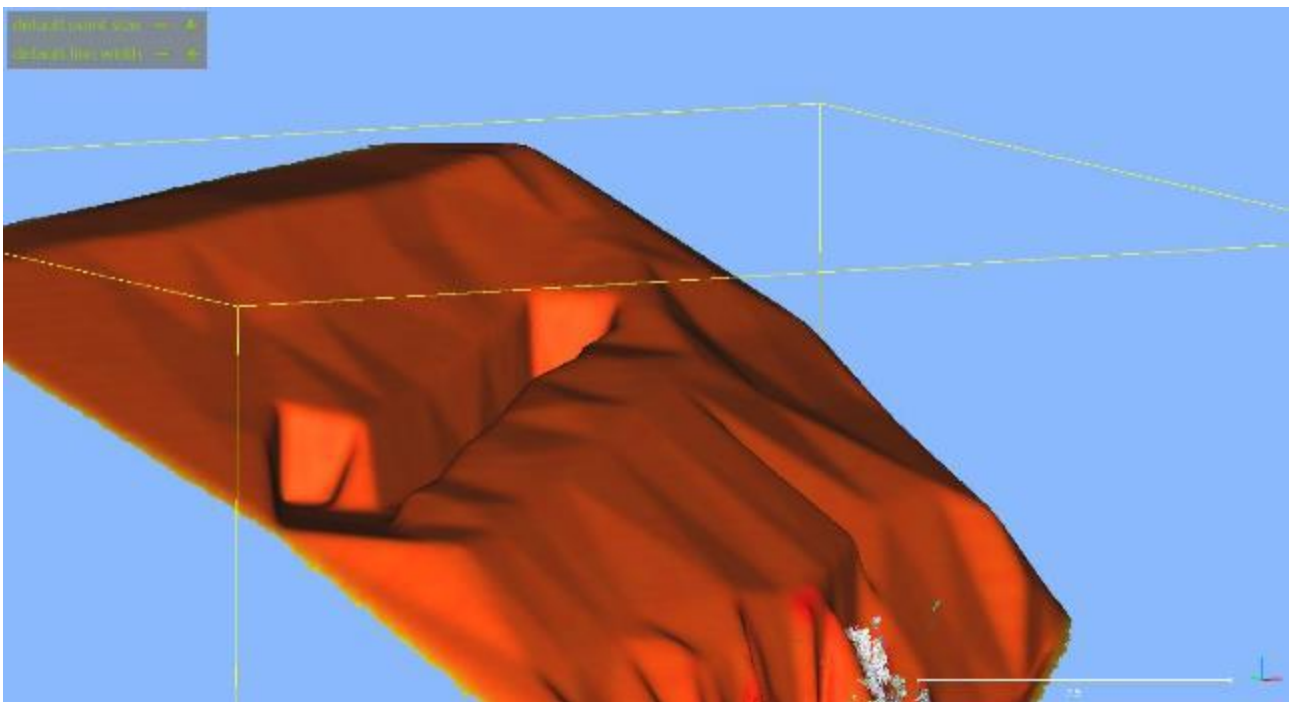


Figura 24: Andamento del versante

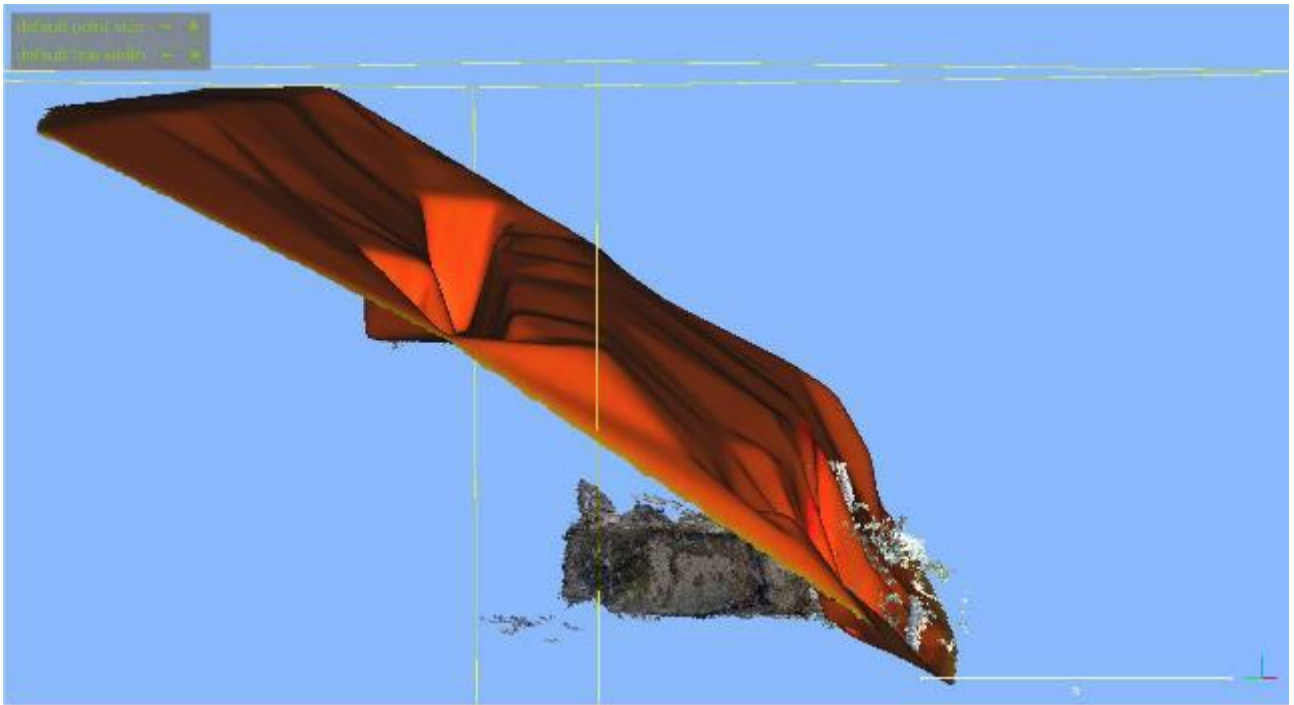


Figura 25: Andamento del versante con vista laterale

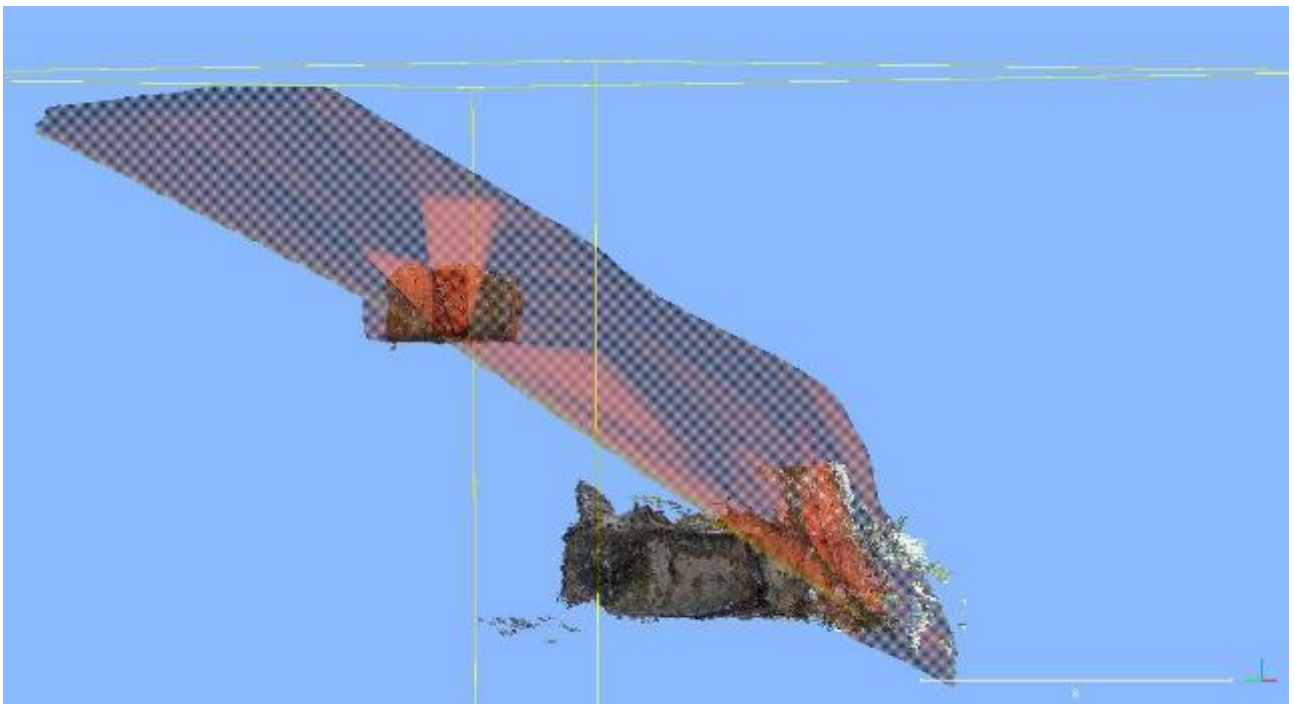


Figura 26: Vista laterale del versante con localizzazione della tomba (in alto) e dell'ipogeo (in basso)

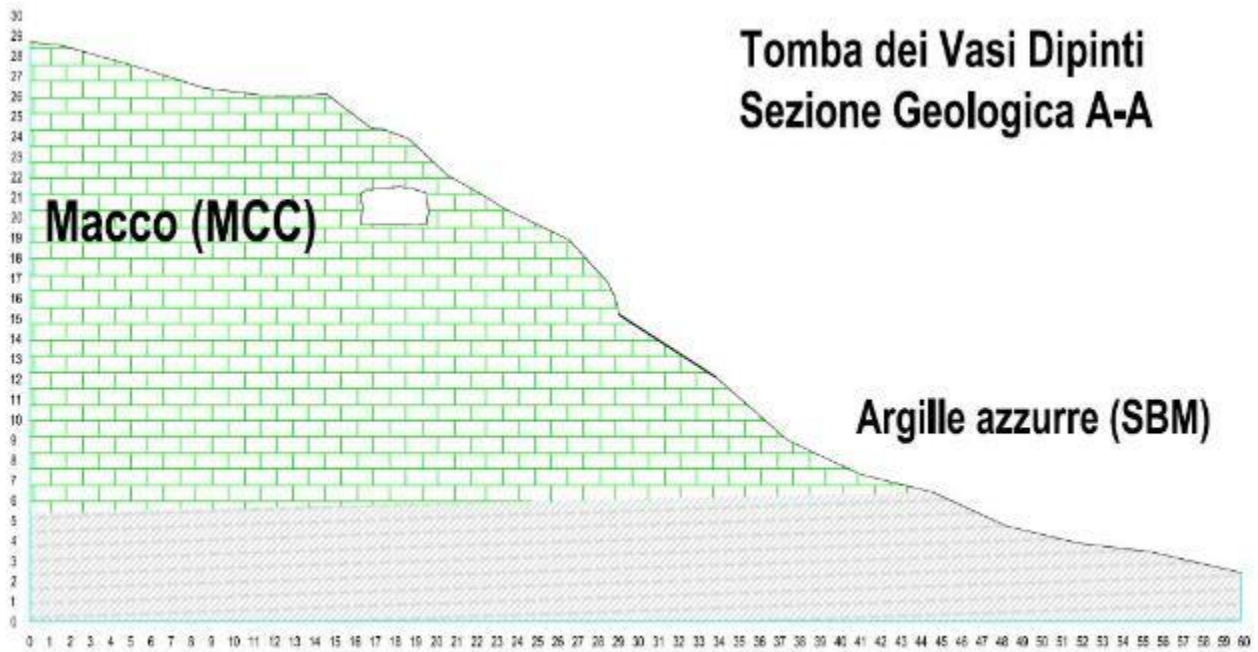


Figura 27: Sezione 2D del versante roccioso passante per la tomba dei Vasi Dipinti

Dalle immagini ottenute si possono avanzare delle ipotesi sull'influenza che l'ipogeo esercita sulla tomba. Si nota innanzitutto che non c'è un'esatta corrispondenza in verticale tra le due cavità e neanche una parziale sovrapposizione. In ogni caso, la distanza che le separa non è tale da poter escludere qualsiasi tipo di interazione, è plausibile, infatti, che alcune delle principali discontinuità siano in comune tra la tomba e l'ipogeo.

Capitolo 3. Sistemi di monitoraggio

I sistemi di monitoraggio possono essere di vario genere e possono essere utili per diversi scopi. La scelta del sistema da adottare è funzione di molte variabili (es. parametro da misurare, logistica del sito, budget). Di nostro interesse sono in questo caso quei sistemi che ci permettono di monitorare le variazioni di apertura delle discontinuità presenti nell'ammasso roccioso, i volumi interessati da fenomeni di distacco e la piezometria dell'area.

Si elencheranno di seguito quindi i sistemi atti a fornire tali informazioni, e si analizzeranno quali sono i più adatti al nostro caso, non solo in base al dato fornito ed alla sua precisione, ma considerando anche le condizioni del sito in analisi.

3.1 Confronto ed analisi delle tecniche

STRUMENTI PER LA MISURA DI SPOSTAMENTI

Fessurimetro

I fessurimetri sono gli strumenti più semplici e immediati che consentono di monitorare l'evoluzione nel tempo (in senso orizzontale e/o verticale e/o le rotazioni) delle fratture formate sulla superficie di elementi strutturali per effetto ad esempio di cedimenti e/o assestamenti.

I fessurimetri possono essere di differenti tipi in funzione del tipo di misurazione che si vuole effettuare, tuttavia i più utilizzati sono quelli a piastra (lineari) formati da due piccole piastre trasparenti lunghe generalmente 10 cm e larghe 3 cm, che si sovrappongono parzialmente per 5 cm e possono scorrere l'una sull'altra (esempio in figura 28).

La piastra superiore è incisa con un sistema di due assi ortogonali (croce di riferimento), su quella inferiore è invece presente una griglia millimetrata (sia in senso orizzontale che verticale con l'azzeramento sulle 4 parti mediane) e goniometrica. Le due piastre vanno fissate a cavallo della fessura (mediante semplici viti o tasselli, oppure colla, silicone o altro materiale chimico adatto allo scopo), facendo in modo che la croce di riferimento sulla piastra superiore coincida con lo zero dell'asse cartesiano della griglia millimetrata inferiore. Dopo un determinato periodo di tempo si procede alla lettura dello strumento, sono consigliate letture a cadenza mensile o trimestrale a seconda della cinematica ipotizzata.

La misura del movimento della lesione viene indicata in millimetri leggendo lo sfasamento tra la piastra con reticolo e quella millimetrata sottostante.

Il costo di questo tipo di strumento è al massimo di poche decine di euro.

Qualora fosse necessaria una precisione maggiore rispetto a quella garantita dal fessurimetro (millimetro) si preferisce l'utilizzo del crepometro con comparatore analogico o digitale centesimale.

Crepometro

I crepometri sono degli strumenti che consentono di monitorare l'evoluzione delle lesioni formate sulla superficie piana di elementi strutturali o ammassi rocciosi per effetto di

cedimenti e/o assestamenti. Tale apparecchio di misura, al contrario dei fessurimetri, permette di misurare una evoluzione del quadro fessurativo dell'ordine del centesimo di millimetro (lettura 0,01mm). Lo strumento consiste in un comparatore, le cui estremità vengono fissate su due punti di riferimento a cavallo della lesione per mezzo di due pastiglie metalliche, cementate o comunque rese solidali con la struttura stessa. La lettura dello spostamento tra le due estremità viene eseguita sul comparatore con la precisione del centesimo di millimetro.

Estensimetro superficiale

Il principio di funzionamento dell'estensimetro si basa sulle variazioni di distanze di coppie poste a cavallo di una o più fessure.

Il più pratico fra gli estensimetri è quello meccanico rimovibile, disponibile in diverse lunghezze (tipicamente 20 o 40 cm). Per utilizzarlo si cementano in posizione simmetrica rispetto alle fessure, coppie di piccole piastrine di acciaio inox (mire), che recano al loro centro una sede conica per l'alloggiamento dell'estensimetro rimovibile durante la lettura. Un comparatore azionato da un sistema a leva permette di misurare le variazioni di lunghezza tra le coppie di piastrine. La precisione di questi strumenti può arrivare a valori pari a 0.005 mm. Un solo estensimetro rimovibile permette perciò il controllo di un alto numero di punti di misura ed esistono estensimetri ad astina ed estensimetri a filo.

Gli estensimetri possono essere anche di tipo elettrico, il grosso vantaggio è che consentono misure automatiche, con trasmissione via radio dei dati acquisiti. Ci sono estensimetri ad asta, che sono maneggevoli e leggeri da trasportare, ma hanno bisogno di strutture di protezione.

Gli estensimetri a tubo telescopico sono più robusti ed hanno un'estensione fino a 5 m.

Gli estensimetri a filo a base lunga possono raggiungere lunghezze fino a 25 m, ma bisogna fare attenzione perché il dato può essere influenzato dalle condizioni di vento e di temperatura.

Distometro

Il distometro, strumento comunemente impiegato per misure di convergenza in galleria, può essere impiegato per basi di lunghezza superiore al metro. Le variazioni di lunghezza sono rilevate dalla misura di distanza tra una serie di coppie di ancoraggi, fissati sulle pareti rocciose o su supporti metallici cementati nel terreno. Ad uno dei due ancoraggi è collegato lo strumento, dal quale parte un filo o un nastro d'acciaio invar, che è collegato con il secondo ancoraggio. La ripetibilità delle letture è assicurata tesando il filo o il nastro tramite opportuno dispositivo tarato, di cui lo strumento di misura è provvisto. La distanza è rilevata

per misura diretta su nastro (parte intera) e tramite un comparatore centesimale per la parte frazionaria.

Esistono distometri a filo e a nastro.

Estensimetro in foro di sondaggio

Un estensimetro profondo è costituito da: uno o più ancoraggi, messi in opera a differenti profondità in un foro da una testa di riferimento, situata generalmente alla bocca del foro; da un'asta o un filo, che collegano gli ancoraggi; da un tubo di protezione, che serve per evitare il contatto dell'asta o del filo con il terreno circostante. Lo spostamento relativo tra gli ancoraggi e la testa è misurato con appositi trasduttori. Il numero delle basi di misura per strumento è funzione del diametro del foro. Con gli usuali diametri dei fori (101-158 mm) si possono installare fino a 6 basi, anche se è consigliabile non superare le 3-4 basi.

La misura degli spostamenti alle teste di misura si può eseguire con trasduttori di spostamento di tipo meccanico o di tipo elettrico.

Inclinometro

Gli inclinometri possono essere di diverso tipo: manuali, fissi, automatici.

I rilievi inclinometrici manuali consistono nelle misure di deviazione della verticalità di punti significativi disposti lungo una verticale. Dalle misure si risale agli spostamenti, evidenziando così le zone in movimento nel sottosuolo. I rilievi sono generalmente effettuati in modo manuale con attrezzature removibili munite di guide (sonde inclinometriche) che sono calate in appositi tubi scanalati, cementati in un foro di sondaggio. Ogni elaborazione di rilievi inclinometrici è confrontata con la deformata della lettura iniziale (di zero).

Se i movimenti del terreno devono essere controllati con osservazioni molto frequenti o in forma automatica, si ricorre invece a catene inclinometriche fisse, collegate a un sistema di acquisizione dati automatico, che può prevedere anche la generazione di segnali di allarme. In questo caso la configurazione strumentale prevede un certo numero di sensori (inclinometri), collegati tra loro da aste rigide e snodi oppure da cavi, che sono inseriti in modo permanente nel foro.

STRUMENTI PER LA MISURA DI LIVELLI DI FALDA

Piezometro

La presenza delle falde nel sottosuolo ha un ruolo fondamentale per la stabilità dei pendii. Le falde sono individuabili tramite rilevazione delle pressioni dell'acqua nei vuoti (intertizi), che viene eseguita con i piezometri.

Il tubo piezometrico aperto è lo strumento più semplice per misurare i livelli dell'acqua in suoli permeabili o semipermeabili. In pratica si tratta di un tubo di PVC o di metallo, forato alla quota in cui si vuole misurare la pressione, che è inserito in un foro, isolando la zona di

misura con un materiale impermeabile. I limiti della soluzione risiedono nella scarsa selettività e nell'elevata costante di tempo con cui lo strumento segnala le variazioni d'altezza piezometrica.

Di solito la misura di livello nella falda viene effettuata manualmente, da boccaforo, con un freatimetro munito di nastro centimetrico, di precisione scarsa, ma comunque spesso sufficiente nel quadro generale della modesta precisione del metodo.

Per ridurre la costante di tempo del tubo piezometrico in zone caratterizzate da medi valori di permeabilità è utilizzata, come sezione filtrante una cella porosa collegata con l'esterno tramite un tubetto di sezione sottile. La misura si esegue con un apposito sondino da infilare nel tubetto. Il piezometro di questo tipo è stato sviluppato da Casagrande. Poiché nei materiali di bassa permeabilità la costante di tempo è ancora elevata, è pratica consueta munire il piezometro di due tubetti invece di uno. Questa configurazione è nota come piezometro idraulico.

Il piezometro Casagrande chiuso costituisce una variante del piezometro appena descritto; consente l'automatizzazione delle misure mediante l'installazione di un trasduttore di pressione. Esso è costituito da una cella porosa collegata con l'esterno mediante due tubi in PVC di diametro differente. Il raccordo avviene mediante un'apposita struttura d'acciaio inox munita di due alloggiamenti, dedicati l'uno al posizionamento di un tappo di chiusura, l'altro alla sistemazione di un trasduttore di pressione. Il trasduttore di pressione è contenuto all'interno di una custodia in acciaio inossidabile che assicura la perfetta tenuta idraulica tra porta trasduttore e manicotto di collegamento. Il cavo di alimentazione e trasmissione dei segnali è collegato direttamente al trasduttore senza utilizzo di connettori. Lo strumento consente di avere tempi di risposta brevi, di automatizzare le misure e di recuperare il trasduttore per eventuali verifiche o sostituzioni.

Un altro tipo di piezometro è quello pneumatico in cui la pressione dell'acqua agisce su un diaframma ed è bilanciata dall'applicazione di una pressione esterna a mezzo generalmente di idrogeno o di altro fluido. Quando la pressione esterna uguaglia quella dell'acqua, si apre una valvola che permette al fluido di defluire lungo una tubazione di ritorno verso un rilevatore che segnala la compensazione della pressione di falda. Il sensore viene inserito in un apposito elemento poroso da sigillare nei fori. I vantaggi di questo piezometro sono la durata nel tempo, la relativa semplicità di operazione, l'elevata velocità di risposta, la precisione (dell'ordine di $\pm 0,2$ m di carico idrostatico).

3.2 Scelta tecnica ed installazione

Come già accennato in precedenza, le scelte effettuate sono state condizionate da una serie di limiti, che verranno di seguito esposti.

Il primo limite è quello della preservazione del bene culturale. Andando infatti ad operare nella tomba dei Vasi Dipinti ci si deve ricordare che il bene ha un'importanza storica, archeologica e culturale enorme e che dunque la sua integrità va preservata il più possibile. Si è cercato quindi di effettuare operazioni, sia nella fase di monitoraggio che in quelle successive, che non arrecassero danno alla Tomba, sia di tipo strutturale che di tipo visivo. Cioè in contesti come questi, sono sconsigliate, se non vietate, operazioni che vadano a danneggiare o in qualsiasi modo a deturpare il bene da conservare.

Il secondo limite, è quello economico, il progetto infatti si è svolto con la minima spesa possibile, dato che la "Soprintendenza Archeologica del Lazio e dell'Etruria Meridionale" alla data delle operazioni citate non aveva accesso ad alcun fondo pubblico da utilizzare esclusivamente per questo progetto. Quindi la scelta dei sistemi di monitoraggio è stata fatta considerando un investimento minimo.

Date queste premesse la scelta dei sistemi di monitoraggio è risultata pressoché obbligata, ma non per questo meno affidabile o meno precisa di altre.

In particolare si è optato per dei fessurimetri lineari (figura 28), i quali hanno un prezzo trascurabile e impattano in maniera minima sull'aspetto della Tomba, infatti l'area che occupano è di pochi cm² e sono costituiti in plastica trasparente.

I fessurimetri sono stati installati uno per tomba, nelle tombe dei Vasi Dipinti, delle Iscrizioni e della Porta di Bronzo, in punti adatti all'installazione, cioè dove è presente una discontinuità che procede linearmente e con aperture millimetriche.

Le letture devono essere fatte in maniera manuale, ma possono essere fatte anche da personale non qualificato, semplicemente facendo una foto del fessurimetro ed inviandola al referente ISPRA.



Figura 28: Fessurimetro lineare ottico

Il secondo strumento di monitoraggio di cui ci si avvale è l'estensimetro meccanico rimovibile (figura 29). La scelta risulta efficace dato che l'impatto visivo è quasi nullo, si tratta solo di installare delle piastrine in alluminio di raggio dell'ordine di pochi millimetri (da qui in avanti "mire") sulla parete delle Tombe, ed anche il prezzo risulta minimo, dato che lo strumento necessario per la misura è già in possesso di ISPRA.

Le mire sono state installate nelle Tombe sopracitate, a cavallo delle discontinuità di interesse. In particolare se ne sono installate due nella tomba dei Vasi dipinti, due nella tomba delle Iscrizioni e tre nella tomba della Porta di Bronzo.

Le letture possono essere fatte solo da personale qualificato, la cadenza consigliata è trimestrale/semestrale o annuale.



Figura 29: Esempio di mire installate

3.3 Analisi risultati

Si riportano inizialmente le piantine delle tre tombe con indicazione della posizione dei sistemi di monitoraggio (figure 30, 31 e 32).

Tomba dei Vasi Dipinti:

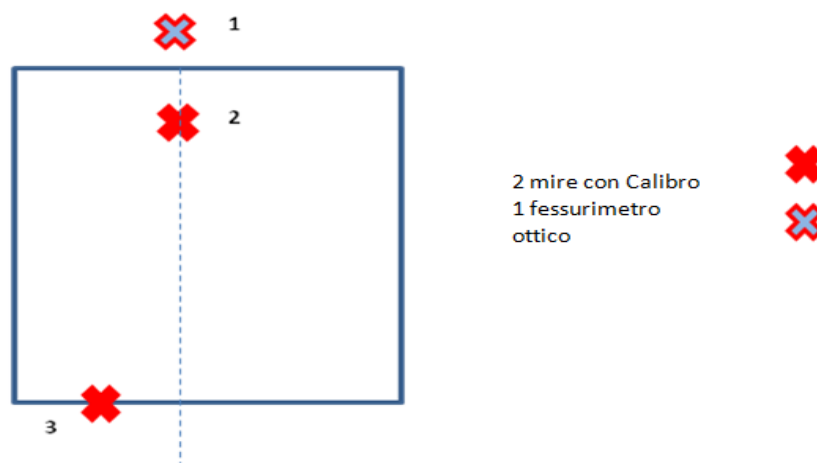


Figura 30: Piantina Tomba dei Vasi Dipinti con ubicazione dei sistemi di monitoraggio installati

Si specifica che le mire n°2 sono state installate sul soffitto.

Tomba delle Iscrizioni:

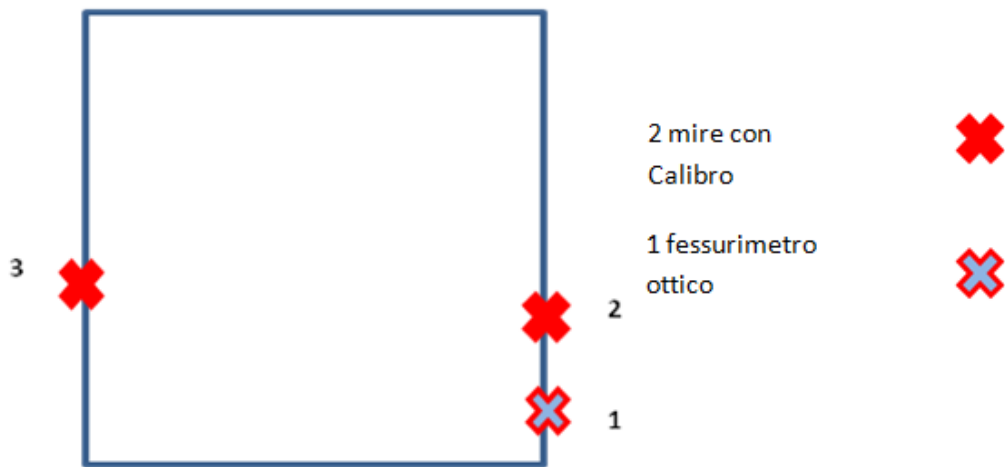


Figura 31: Piantina Tomba delle Iscrizioni con ubicazione dei sistemi di monitoraggio installati

Tomba della Porta di Bronzo:

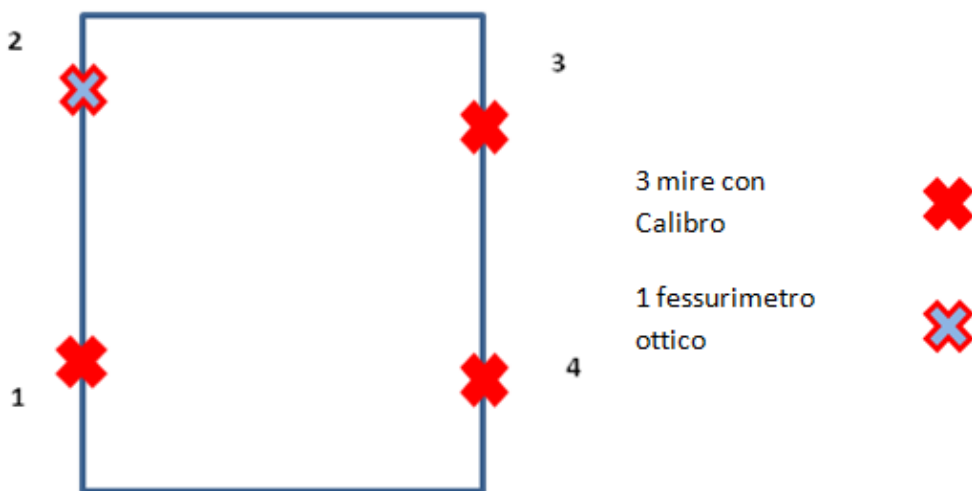


Figura 32: Piantina Tomba della Porta di Bronzo con ubicazione dei sistemi di monitoraggio installati

Si riportano ora i dati di misura ottenuti durante i sopralluoghi effettuati (tabelle 3, 4 e 5):

Tomba dei Vasi Dipinti					
Dati mire con calibro letture punti			Dati fessurimetro ottico deformazioni (mm)		
data	2	3	data	orizzontali	verticali
21/02/2018		8,628	14/06/2018	1	0,5
14/06/2018	0,958	7,621	12/07/2018	1	0,5
12/07/2018	0,798	7,597	08/10/2018	1	0,5
08/10/2018	0,973	7,617			

Tabella 3: Lettura dati Tomba dei Vasi Dipinti

Tomba delle Iscrizioni					
Dati mire con calibro letture punti			Dati fessurimetro ottico deformazioni (mm)		
data	2	3	data	orizzontali	verticali
21/02/2018	4,098	4,319	14/06/2018	1	0
14/06/2018	3,997	3,783	08/10/2018	0,5	0
08/10/2018	3,9	4,22			

Tabella 4: Lettura dati Tomba delle Iscrizioni

Tomba della Porta di Bronzo						
Dati mire con calibro letture punti				dati fessurimetro ottico deformazioni (mm)		
data	1	3	4	data	orizzontali	verticali
21/02/2018	4,944	5,216	3,748	14/06/2018	0,7	0,5
14/06/2018		5,237	4,347	08/10/2018	0	0,5
08/10/2018	5,380	5,223	4,403			

Tabella 5: Lettura dati tomba della Porta di Bronzo

La presenza di celle vuote in tabella indica un errore nella misura dato da assestamento delle mire o da errori strumentali, per questo i dati sono stati rimossi.

Per evidenziare eventuali aperture o chiusure delle deformazioni si vanno a graficare le letture delle mire (figure 33, 34 e 35):

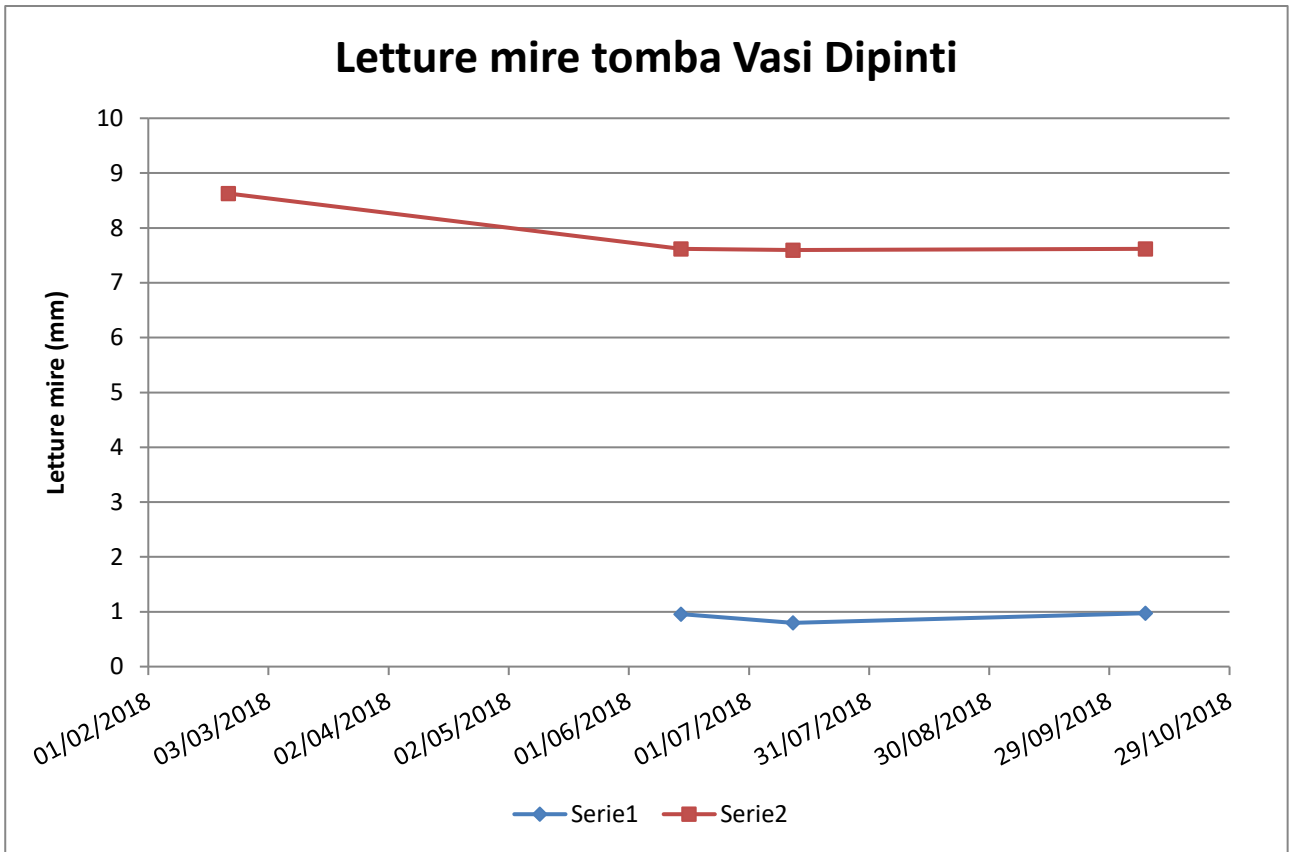


Figura 33: Letture mire della Tomba dei Vasi Dipinti

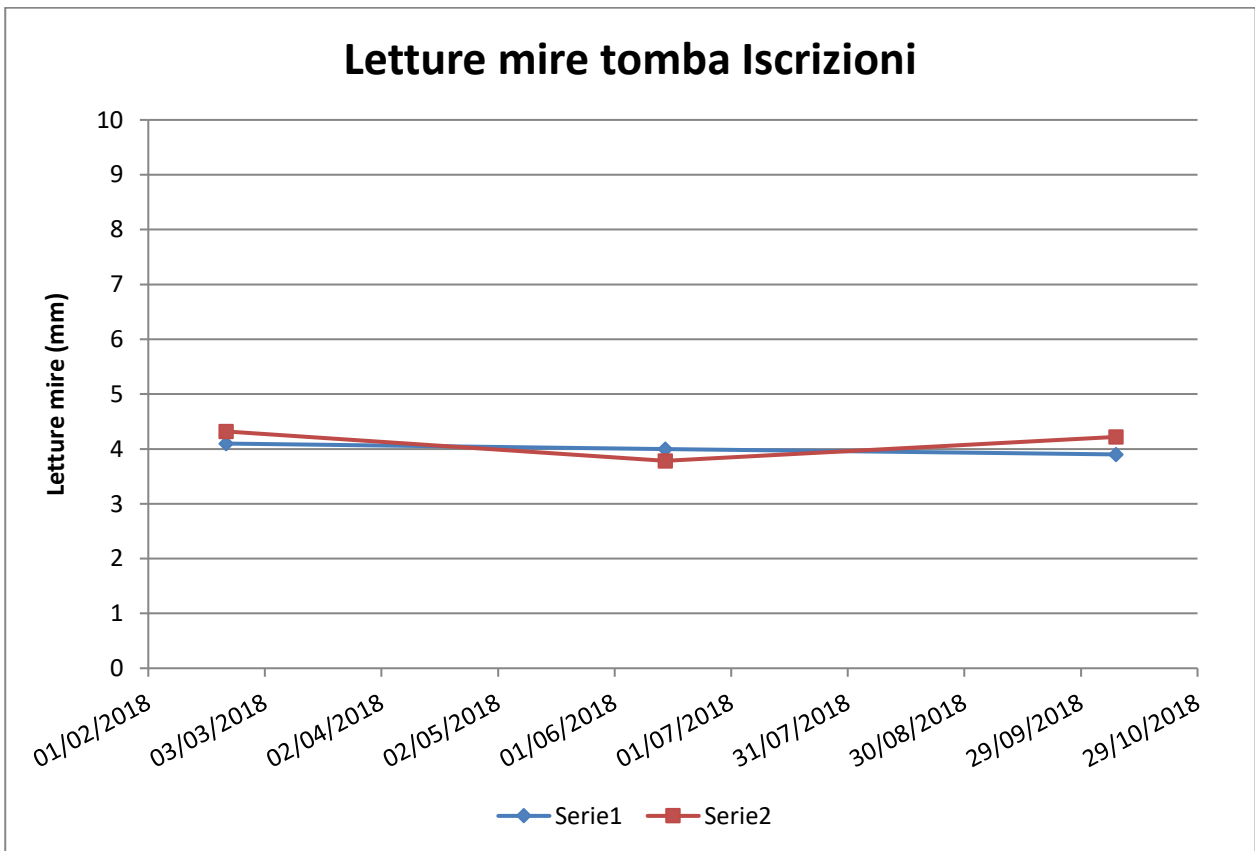


Figura 34: Letture mire della Tomba delle Iscrizioni

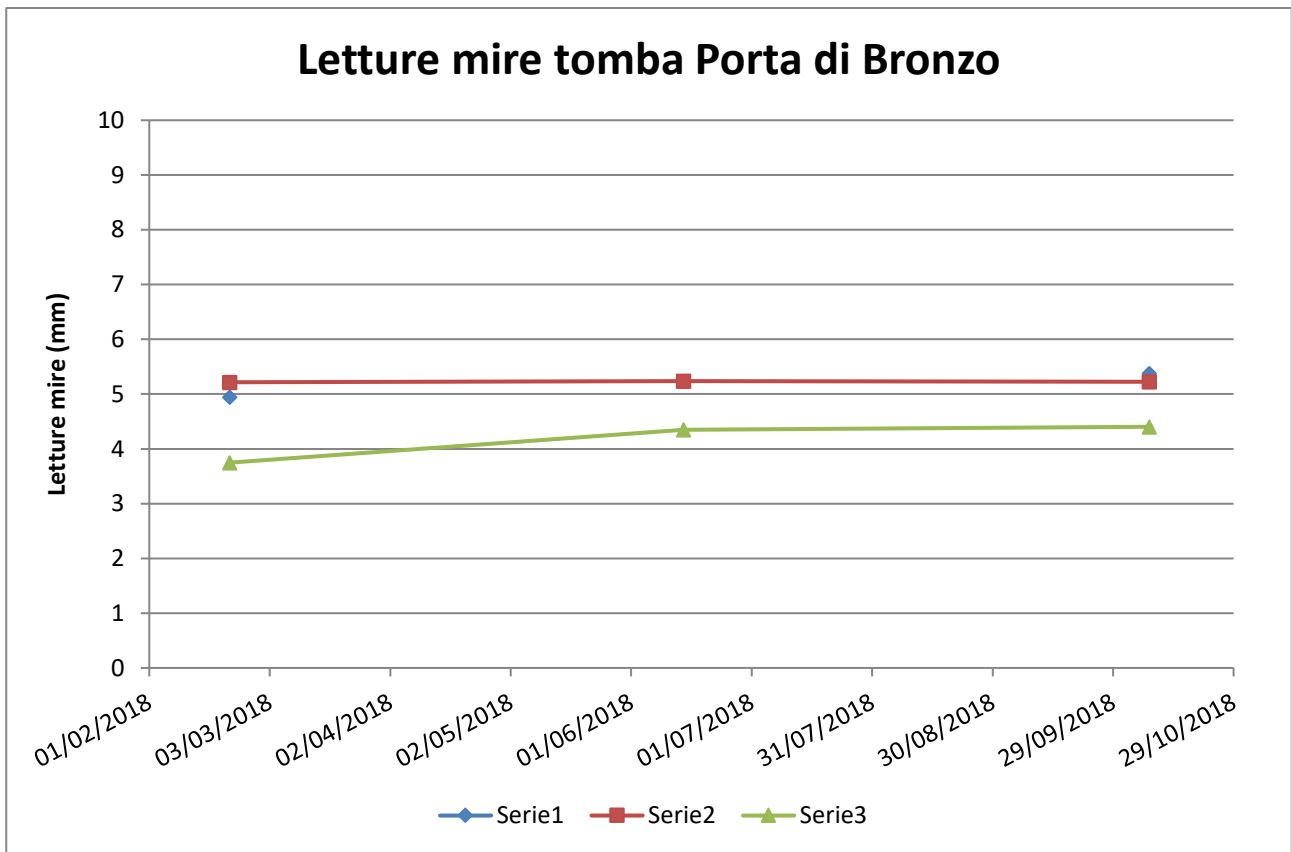


Figura 35: Lecture mire della Tomba della Porta di Bronzo

Dai grafici si nota come gli andamenti siano pressoché lineari ed orizzontali, cioè senza grosse variazioni. Non si registra dunque una deformazione netta, né di chiusura né di apertura delle discontinuità. Nell'unico caso in cui la variazione non sembra del tutto lineare (serie 2 della Tomba delle Iscrizioni) le variazioni rimangono comunque sotto al millimetro, per cui non sufficientemente grandi da suggerire un effettivo movimento della discontinuità.

Capitolo 4. Rilievo geomeccanico

Per rilievo geomeccanico si intende, generalmente, la raccolta e l'analisi delle caratteristiche meccaniche del materiale roccioso, dell'ammasso roccioso e delle sue discontinuità. La raccolta di questi dati ha lo scopo di caratterizzare l'ammasso roccioso, nel proprio contesto, per capire quali parametri e caratteristiche debbano essere prese in considerazione nelle analisi successive. L'inserimento nel contesto è garantito dal rilievo topografico (acquisizione laser 3D e sezioni di dettaglio 2D).

Nel caso di studio, il rilievo geomeccanico è risultato necessario per poter poi effettuare le analisi di stabilità del versante in cui è collocata la tomba dei Vasi Dipinti.

4.1 Descrizione dei campioni di roccia

A seguito di campionatura in situ, otto blocchi (esempio in figura 36) sono stati portati al laboratorio di Geingegneria e Risorse Naturali (LAGIRN) del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna per essere analizzati.

I blocchi provenienti dall'altopiano dei Monterozzi nel comune di Tarquinia (VT), sede della omonima necropoli, sono stati prelevati direttamente nei pressi della tomba dei Vasi Dipinti durante diversi sopralluoghi (i blocchi 1, 2 e 3 sono stati raccolti nel sopralluogo del 14 Giugno 2018, i blocchi 4 e 5 nel sopralluogo del 12 Luglio 2018 ed i blocchi 6, 7 ed 8 sono stati raccolti nel sopralluogo dell'8 Ottobre 2018). Essi sono quindi rappresentativi dell'ammasso roccioso in esame. In figura 37, 38 e 39 è riportata l'esatta localizzazione dei blocchi rispetto alla tomba dei Vasi Dipinti.

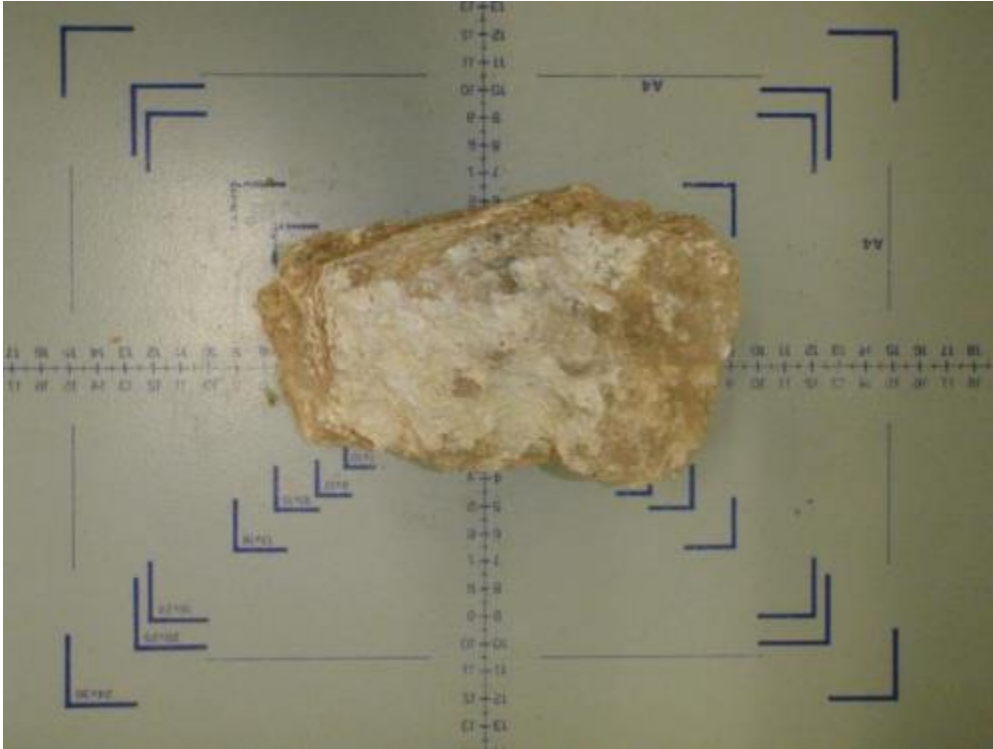


Figura 36: Uno dei blocchi prima del carotaggio

I blocchi sono stati classificati numericamente dall'1 all'8. Si riporta una breve descrizione per ogni singolo campione:

1. Il blocco è di forma irregolare, le sue dimensioni sono 14x14x10 cm circa. Il colore risulta giallo paglierino con macchie ocracee; ci sono inoltre macchie verdi di origine probabilmente vegetale e macchie brune dovute alla presenza di terriccio. L'aspetto è poroso, polveroso al tatto e poco compatto.
2. La forma irregolare si avvicina a quella di un parallelepipedo con dimensioni di 24x19x14 cm circa. Il colore è di un giallo scuro e si ritrovano macchie verdi e brune per la vegetazione ed il terreno. L'aspetto è poroso, polveroso al tatto e poco compatto.
3. Il blocco 3 ha una forma irregolare piuttosto piatta e allungata, le dimensioni sono 30x18x10 cm circa. Il colore va da un giallo scuro ad un giallo paglierino e si hanno macchie di verde e di bruno. L'aspetto è poroso (con pori millimetrici visibili ad occhio nudo), polveroso al tatto e poco compatto.
4. La forma del blocco 4 è irregolare e leggermente schiacciata, le dimensioni sono 18x14x11 cm circa. Il colore va dal giallo paglierino al giallo orca, con delle macchie più scure verso il bruno e con qualche punto di colore bianco. Il blocco è polveroso al tatto, di aspetto poroso, ma all'apparenza più compatto rispetto agli altri.

5. Il blocco è di forma irregolare, le sue dimensioni sono 20x15x13 cm circa. Il colore va da un bianco sporco ad un rossastro. Il blocco presenta dei graffi e delle discontinuità superficiali, riconducibili comunque ad eventi atmosferici ed antropologici (interventi agricoli) più che a discontinuità dell'ammasso. L'aspetto è meno poroso e più compatto degli altri campioni.
6. La forma irregolare del blocco 6 si avvicina a quella di un parallelepipedo delle dimensioni di 40x30x30 cm. Il colore è sul giallo paglierino con macchie brune e bianche. L'aspetto è poroso e polveroso al tatto.
7. Il blocco è di forma irregolare, le sue dimensioni sono 36x34x24 cm circa. Il colore è sul giallo paglierino, ma non si notano particolari macchie. L'aspetto è poroso, polveroso e fragile al tatto.
8. Il blocco è di forma irregolare simile ad un cono allungato, le dimensioni sono di 40x27x27 cm circa. Il colore è di un giallo simile a quello degli altri blocchi, ma un lato è macchiato di verde. L'aspetto è poroso e polveroso.

Un primo lavaggio superficiale ha permesso di asportare il terriccio e quindi le macchie brune. Si sono quindi potuti notare dei punti di colore bianco su alcuni blocchi, che saranno ben visibili dopo i carotaggi.



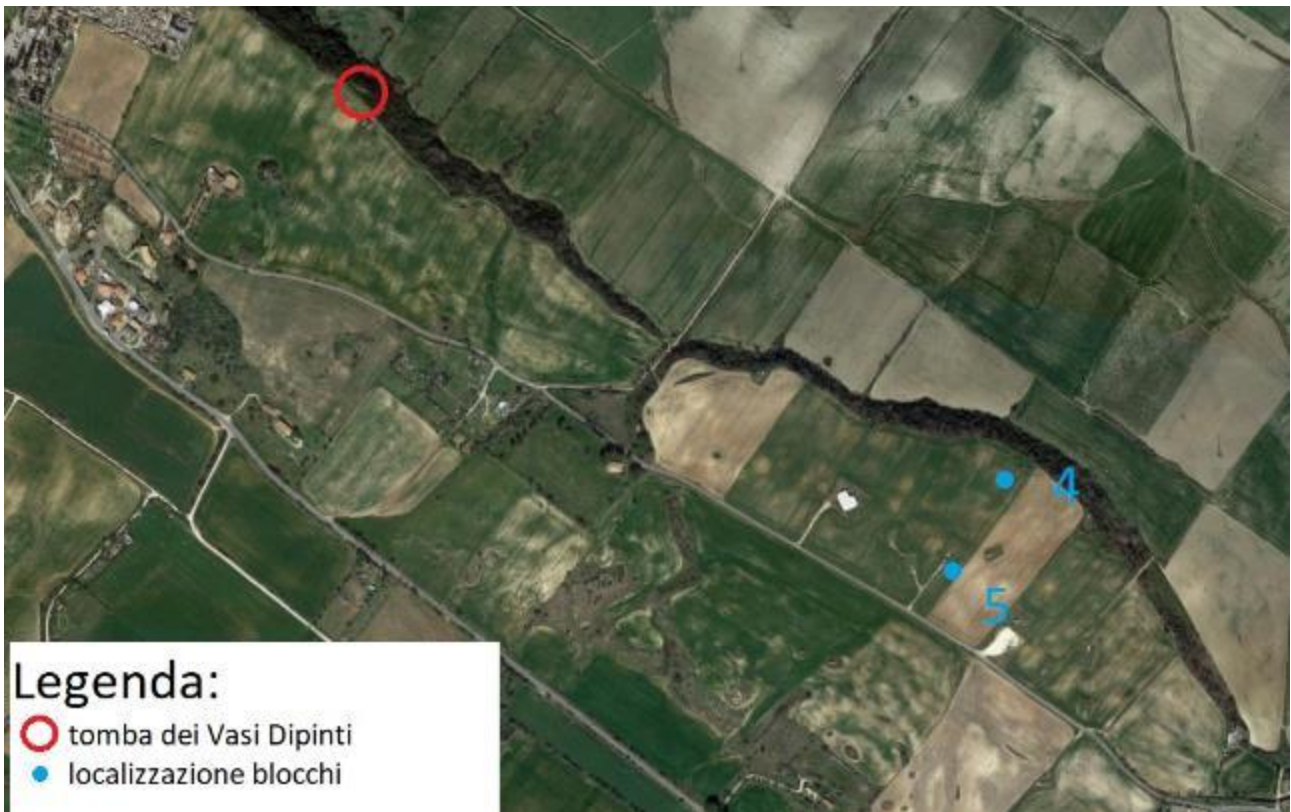


Figura 38: Localizzazione blocchi 4 e 5



Figura 39: localizzazione blocchi 6, 7 e 8

Si specifica che i blocchi 6, 7 ed 8 sono stati raccolti nei pressi della tomba dei Vasi Dipinti; in particolare il blocco 6 è stato raccolto subito al di fuori della tomba, mentre i blocchi 7 ed 8 sono stati raccolti nell'ipogeo sottostante.

Si è quindi proceduto con il carotaggio dei blocchi per ottenere provini di dimensioni standard, altezza di 25 mm e diametro di 50 mm per i campioni destinati alle prove brasiliane, altezza di 76 mm e diametro di 38 mm per i campioni destinati a prove uniassiali o triassiali. Le carote sono state numerate a partire dai blocchi di partenza (e.g. la prima carota proveniente dal blocco 1 avrà nome 1.1 e così via), da alcune carote sono stati ottenuti più provini, che sono stati distinti con delle lettere (e.g. se dalla carota 1.1 si sono ottenuti due provini questi avranno nome 1.1A ed 1.1B). Un esempio si ha in figura 40.



Figura 40: Carote ottenute dal blocco 4

Conoscendo il numero di provini a disposizione si è quindi effettuata una pianificazione delle prove da svolgere; in particolare si è dovuto scegliere quali provini destinare alle prove uniassiali e quali alle triassiali. È stato possibile quindi preliminarmente associare alcuni provini provenienti da blocchi diversi le cui caratteristiche tessiturali risultavano simili ad occhio nudo. Successivamente, l'associazione è stata rivista e perfezionata considerando anche i dati di porosità e peso specifico. Questo è stato fatto al fine di poter avere una sovrabbondanza di provini dello stesso tipo per svolgere prove uniassiali, triassiali e brasiliane in condizioni sia asciutte che sature.

4.2 Caratterizzazione fisica

Prima delle prove meccaniche sono state svolte quelle di caratterizzazione fisica. Le dimensioni dei provini, in termini di altezza e raggio, sono state determinate con un calibro.

Si è poi misurato il peso asciutto, il peso saturo ed in qualche caso anche il peso idrostatico e da questi dati sono stati ricavati il volume dei pori, la densità di volume, il peso specifico e la porosità.

In particolare per i calcoli sono state utilizzate le seguenti relazioni:

$$V_t = (P_{saturo} - P_{idrostatico})/\gamma_w \quad (4.1)$$

Dove V_t indica il volume totale e γ_w il peso dell'unità di volume dell'acqua.

Allo stesso modo è stato ricavato il volume dei pori V_p :

$$V_p = (P_{saturo} - P_{secco})/\gamma_w \quad (4.2)$$

A questo punto è stato possibile ricavare la porosità idraulicamente connessa percentuale:

$$n = \left(\frac{V_p}{V_t}\right) * 100 \quad (4.3)$$

Si ha inoltre:

$$\gamma_{dry} = P_{secco}/V_t \quad (4.4)$$

dove γ_{dry} indica il peso dell'unità di volume del materiale in condizioni asciutte.

Queste operazioni sono state effettuate per i campioni provenienti dai blocchi dall'1 al 5, mentre per i rimanenti tre blocchi si è deciso di operare in maniera leggermente differente, questo per evitare che il materiale venisse danneggiato dalla saturazione (nel caso in cui fossero previste delle prove sature è stata comunque calcolata la porosità idraulicamente connessa). È stato utilizzato un picnometro ad elio per il calcolo del volume effettivo V_e , dato che questo metodo permette di considerare anche le porosità non idraulicamente connesse tra loro, quindi la porosità effettiva. Data la natura dello strumento non è stato possibile calcolare il V_e sui provini stessi, ma sono stati ricavati dei provini delle dimensioni di 2,5 cm di diametro e 2,75 cm di altezza. La porosità è stata poi calcolata in maniera indiretta per i singoli campioni. In questo caso si sono utilizzate le seguenti relazioni:

$$n = \left(\frac{V_e}{V_t}\right) * 100 \quad (4.5)$$

$$\gamma_s = P_{secco}/V_e \quad (4.6)$$

dove γ_s indica il peso dell'unità di volume della matrice solida.

Per il calcolo della porosità per i singoli campioni è stata quindi utilizzata la relazione:

$$n = 1 - \frac{\gamma_{dry}}{\gamma_s} \quad (4.7)$$

Sono stati utilizzati dei γ_s medi differenti per i diversi blocchi: 26,62 kN/m³ per il blocco 6, 26,37 kN/m³ per il blocco 7 e 26,61 kN/m³ per il blocco 8.

Nelle tabelle 6.1, 6.2 e 7 ed in figura 41 si riportano i risultati significativi. Nella tabella 6 è possibile apprezzare la differenza tra la porosità effettiva e quella idraulicamente connessa nei i campioni per i quali è stato possibile calcolarle entrambe.

CAMPIONE	POROSITA' (effettiva) (%)	POROSITA' (idraulicamente connessa) (%)	γ_s (kN/m ³)	γ_{dry} (kN/m ³)
1.1		33,43		17,67
1.2		30,30		18,50
1.3		37,93		16,47
2.1		34,91		17,30
2.2		34,97		17,29
2.3		34,48		17,42
2.5		36,51		16,91
2.6		37,08		16,76
2.7		35,39		17,20
2.8 B		39,03		16,23
2.9		38,61		16,30
3.1		39,28		16,12
3.2		38,35		16,37
3.3		38,05		16,25
3.4		40,24		15,87
3.5 A		40,44		15,80
3.5 B		38,35		16,35
3.6 A		37,95		16,47
3.6 B		38,15		16,42
3.7		39,07		16,18
3.8 B		37,91		16,49
4.1		15,86		22,38
4.2		18,43		21,71
5.1		24,13		20,16
5.2		24,79		19,97
5.2		24,08		20,16

Tabella 6.1: Valori di porosità e peso dell'unità di volume per i campioni

CAMPIONE	POROSITA' (effettiva) (%)	POROSITA' (idraulicamente connessa) (%)	γ_s (kN/m ³)	γ_{dry} (kN/m ³)
6.1	41,10		26,62	15,68
6.2	40,51		26,62	15,84
6.3	40,17		26,62	15,92
6.4	41,12		26,62	15,67
6.5	45,29		26,62	14,56
6.6	43,84	41,12	26,62	14,95
6.7	44,29	42,04	26,62	14,83
6.8	43,30		26,62	15,09
6.9	43,93	39,17	26,62	14,92
6.10	41,78	39,50	26,62	15,50
6.11	45,48	43,10	26,62	14,51
6.12	41,78		26,62	15,50
6.13	42,34		26,62	15,35
7.1	32,38		26,37	17,83
7.2	33,19		26,37	17,62
7.3	29,53		26,37	18,58
7.4	33,46		26,37	17,55
7.5	29,87	27,22	26,37	18,49
7.6	29,87		26,37	18,49
7.7	34,99	30,91	26,37	17,14
7.8	32,84		26,37	17,71
7.9	36,79		26,37	16,67
7.10	34,46		26,37	17,28
7.11	34,16	32,26	26,37	17,36
7.12	36,96	34,46	26,37	16,62
8.1	42,61	41,74	26,61	15,27
8.2	44,16	42,53	26,61	14,86
8.3	42,73	40,86	26,61	15,24
8.4	41,76		26,61	15,50
8.5	42,77		26,61	15,23
8.6	45,63		26,61	14,47
8.7	43,01		26,61	15,16
8.8	43,06		26,61	15,15

Tabella 6.2: Valori di porosità e peso dell'unità di volume per i campioni

	effettiva	idraulicamente connessa				
media n (%)	39,37	35,33	media γ_{dry} (kN/m ³)	16,70	media γ_s (kN/m ³)	26,52
deviazione standard n	5,10	6,60	deviazione standard γ_{dry}	1,69	deviazione standard γ_s	0,12

Tabella 7: Media e deviazione standard della porosità e del peso dell'unità di volume

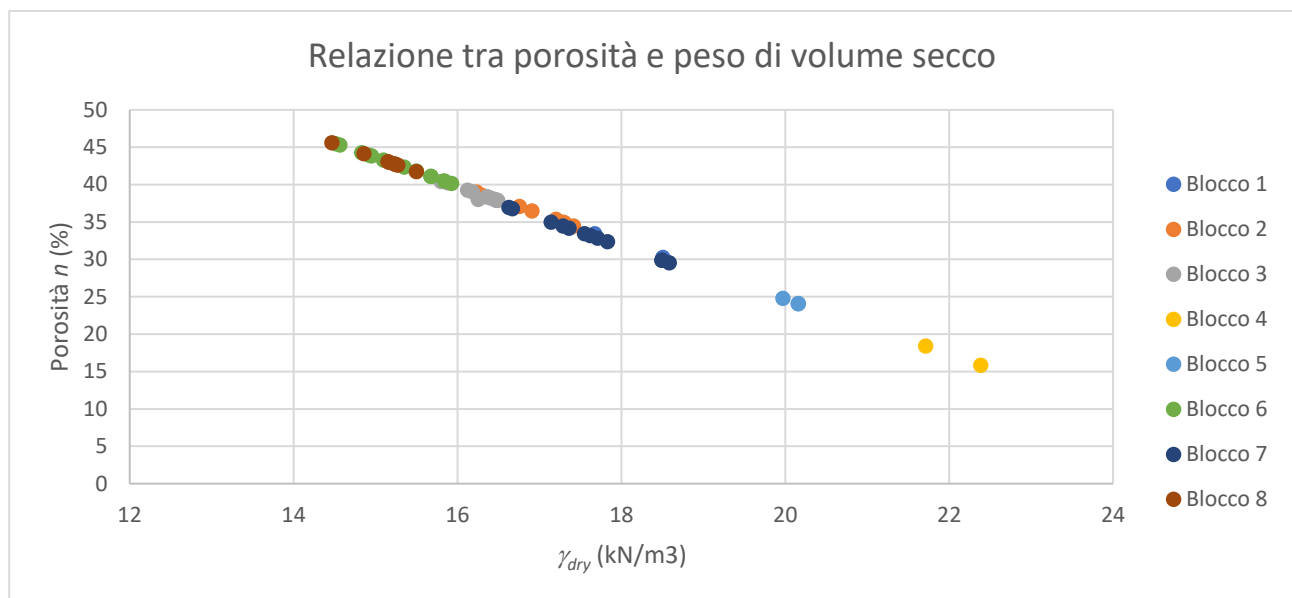


Figura 41: Andamento della porosità in funzione del peso dell'unità di volume

In figura 41, e nei grafici che seguiranno riguardanti la porosità, è stata considerata la porosità effettiva dove disponibile (campioni 6, 7 ed 8), altrimenti è stata considerata quella idraulicamente connessa. Risulta evidente l'esistenza di una correlazione tra la porosità ed il peso dell'unità di volume: infatti, i dati si distribuiscono in maniera lineare lungo una retta. All'aumentare del peso dell'unità di volume diminuisce la porosità, infatti i blocchi 4 e 5 evidenziano una bassa porosità, mentre i restanti blocchi sono abbastanza omogenei tra loro, con il blocco 7 che ha una porosità mediamente più bassa fino ai blocchi 6 ed 8 che risultano quelli con il minor peso di unità di volume e dunque maggiore porosità.

Le prove di caratterizzazione fisica sono state utili per associare tra di loro i campioni provenienti dai diversi blocchi. Va anche ricordato che i campionamenti sono stati effettuati con una certa distanza temporale tra loro, per cui sono stati analizzati inizialmente solamente i campioni dall'1 al 5 e solo successivamente si è deciso di effettuare un nuovo campionamento per garantire una caratterizzazione più completa.

I risultati ottenuti hanno infatti evidenziato le caratteristiche in comune tra i campioni, in particolare tra i provini provenienti dai blocchi 1, 2 e 3 (porosità compresa tra il 30 ed il 40%,

γ_{dry} compreso tra i 15,5 e i 18,5 kN/m³) e tra i provini provenienti dai blocchi 4 e 5 (porosità compresa tra il 15 ed il 25%, γ_{dry} compreso tra i 20 e i 22,5 kN/m³). Si è dunque proceduto alla caratterizzazione meccanica dei primi cinque blocchi, cercando tramite le associazioni fatte di ottenere una varietà di prove che consentissero comunque una buona ridondanza di dati; le prove scelte sono state quindi prove di compressione uniassiale e di trazione indiretta con esclusione delle prove di compressione triassiale, per le quali sarebbero stati necessari un numero maggiore di provini per renderle rappresentative ed attendibili (almeno 8 provini).

Per quel che riguarda i blocchi dal 6 all'8 invece, quelli più rappresentativi perché prossimi alla tomba dei Vasi Dipinti, l'associazione è stata fatta sfruttando anche le prove uniassiali e brasiliane; in particolare, per ogni blocco si sono svolte preliminarmente due prove uniassiali in condizioni asciutte e due brasiliane in condizioni asciutte (i risultati vengono riportati in seguito). I dati di porosità non sono stati utilizzati per decidere le prove di caratterizzazione meccanica dato che le prove per il loro ottenimento sono state completate solamente in seguito; si nota comunque che i valori ottenuti si avvicinano a quelli dei primi tre blocchi. Dalle prove effettuate si è evidenziata una somiglianza tra i risultati dei campioni provenienti dal blocco 6 ed 8.

4.3 Caratterizzazione meccanica

Prova di compressione uniassiale

La prova di compressione uniassiale è uno dei metodi più semplici e rapidi per determinare un "indice di qualità" della roccia stessa. La prova viene condotta applicando incrementi di spostamento assiale o carico assiale, fino al raggiungimento della rottura del provino. Se P_f è il massimo carico ed A è la sezione del provino. Il loro rapporto viene definito resistenza a compressione uniassiale σ_f (indicata in letteratura anche con σ_c o UCS):

$$\sigma_f = P_f/A \quad (4.8)$$

Eventualmente può essere effettuata una misura delle deformazioni longitudinali e trasversali con estensimetri a resistenza, consentendo la determinazione del modulo di Young e del coefficiente di Poisson del materiale roccioso in esame. Per un determinato valore dello sforzo assiale, σ_a , e deformazioni assiale e trasversale, ε_a ed ε_t , il modulo di Young, E , ed il coefficiente di Poisson, ν , sono così definiti:

$$E = \sigma_a/\varepsilon_a \quad (4.9)$$

$$\nu = -\varepsilon_t/\varepsilon_a \quad (4.10)$$

Le definizioni date sono valide per materiali con comportamento elastico, ma nel caso delle rocce i due moduli vengono calcolati in base agli incrementi; convenzionalmente vengono calcolati i moduli secanti e tangenti relativi al 50% del carico di rottura.

Prova di trazione indiretta

La prova a trazione indiretta considerata è anche detta prova “brasiliana”. Consiste nell’applicare una compressione diametrale tra le piastre di una macchina di prova di compressione, eventualmente utilizzando un telaio che distribuisce il carico su un arco di circonferenza, ad un provino cilindrico di altezza L (uguale al raggio). Nell’ipotesi di mezzo elastico lo stato di sollecitazione piano in corrispondenza del diametro su cui viene applicato il carico è caratterizzato da una tensione orizzontale costante pari a:

$$\sigma_x = -2P/\pi DL \quad (4.11)$$

e da una tensione verticale di compressione pari a 3 volte quella orizzontale nella zona centrale del provino e che tende ad infinito in corrispondenza del punto di applicazione del carico. Si può ritenere che la rottura avvenga per superamento della resistenza a trazione uniassiale a partire dalla zona centrale del provino con il piano di rottura perpendicolare alla direzione della sollecitazione di trazione. In pratica, la resistenza a trazione della roccia può essere calcolata dalla (4.11), con P_t valore del carico che ha provocato la rottura:

$$\sigma_t = -2P_t/\pi DL \quad (4.12)$$

Prova di compressione triassiale

Nella prova di compressione triassiale il provino è sottoposto a sforzi diversi da zero nelle tre direzioni: uno sforzo principale massimo lungo l’asse del provino e uno sforzo principale minimo nel piano normale a tale asse. La prova viene effettuata in una cella di compressione triassiale, detta di Hoek. La pressione laterale è applicata per mezzo di un fluido, in genere olio idraulico, isolato dal provino di roccia tramite una guaina impermeabile. La tensione principale maggiore invece viene applicata dalla sola pressa. La procedura di applicazione dei carichi prevede una prima fase di percorso di carico in condizioni isotrope ed una successiva fase in cui viene mantenuta costante la pressione di cella ed incrementata la sola forza assiale fino al raggiungimento del carico ultimo.

Prove effettuate e risultati

Le prove uniassiali e brasiliane sono state effettuate con una pressa che opera a controllo di carico, cioè la velocità di carico può essere impostata prima della prova. Si ricorda che la velocità con cui viene effettuata la prova influenza il risultato. La prova di compressione uniassiale in condizioni asciutte è stata effettuata ad una velocità di 0,5 MPa/s, come previsto dalle linee guida ISRM: la velocità di applicazione della tensione deve essere infatti

compresa tra 0,5-1 MPa/s (ISRM, 1994). Per condizioni sature la velocità è stata ridotta a 0,1 MPa/s per evitare l'eventuale insorgere di sovrappressioni interstiziali. La prova "brasiliana", invece, è stata condotta con una velocità di 0,2 kN/s, come suggerito dall'ISRM (1997). Infine, la prova triassiale è stata effettuata con una velocità di 0,05 kN/s.

Le prove sono state divise per tipologia: nelle tabelle 8, 9 e 10 i risultati delle prove uniassiali e brasiliane, nelle tabelle 11 e 12 i risultati delle prove triassiali.

CAMPIONE	Prova Effettuata	condizione	σ_f (MPa)
2.1	uniassiale	asciutto	8,00
2.2	uniassiale	asciutto	7,67
2.3	uniassiale	asciutto	10,23
2.5	uniassiale	asciutto	8,06
2.6	uniassiale	asciutto	6,68
2.7	uniassiale	asciutto	7,98
3.1	uniassiale	asciutto	4,29
3.2	uniassiale	asciutto	4,40
3.3	uniassiale	saturo	2,94
3.4	uniassiale	saturo	1,90
4.1	uniassiale	asciutto	35,22
4.2	uniassiale	asciutto	18,42
5.1	uniassiale	asciutto	26,36
5.2	uniassiale	asciutto	29,88
5.2	uniassiale	asciutto	30,22
6.2	uniassiale	asciutto	4,42
6.5	uniassiale	saturo	2,63
6.6	uniassiale	asciutto	1,50
7.3	uniassiale	asciutto	10,16
7.4	uniassiale	asciutto	3,76
7.5	uniassiale	saturo	6,29
7.7	uniassiale	saturo	1,93
7.8	uniassiale	asciutto	4,10
8.1	uniassiale	saturo	2,18
8.4	uniassiale	asciutto	3,09
8.5	uniassiale	asciutto	2,91
8.6	uniassiale	asciutto	2,74

Tabella 8: Risultati prove uniassiali

Si nota fin da subito una marcata corrispondenza con i dati di caratterizzazione fisica ottenuti: infatti, la resistenza a compressione uniassiale σ_f è molto maggiore nei provini ottenuti dai blocchi 4 e 5, gli stessi per i quali si aveva una porosità non superiore al 25%, mentre la resistenza è più bassa per i restanti campioni, per i quali infatti la porosità è molto maggiore. Per apprezzare meglio la relazione appena esposta si riportano in due grafici la

relazione tra la porosità e la resistenza a compressione uniassiale (figure 42 e 43). In esso si nota come la relazione possa essere approssimata anche con una equazione di tipo lineare. Questi risultati mettono in luce la possibile presenza di una stratificazione nel materiale, o eventualmente una coesistenza di diversi tipi di materiale con una differente compattezza. Ricordiamo che il Macco coesiste con l'Unità di Pian della Regina e che entrambe poggiano sull'unità di Fosso di San Savino, che è un'argilla in abbondante matrice sabbiosa. È possibile dunque che all'altezza della ripa dove si trova la tomba dei Vasi Dipinti e scendendo lungo la ripa ci si trovi lungo l'interfaccia che divide i vari materiali, i quali sono costituiti tutti da una matrice sabbiosa. Non è immediato capire, tramite analisi visiva, se si tratti effettivamente dello stesso litotipo. Per questo è stato deciso di effettuare un nuovo campionamento direttamente nei pressi della tomba. I dati di resistenza che ne derivano non sono confortevoli: si ha infatti una resistenza a compressione molto bassa, anche più bassa della media dei dati totali riportata in tabella 10, ma si nota una certa omogeneità tra i risultati, specialmente dai blocchi 6 ed 8.

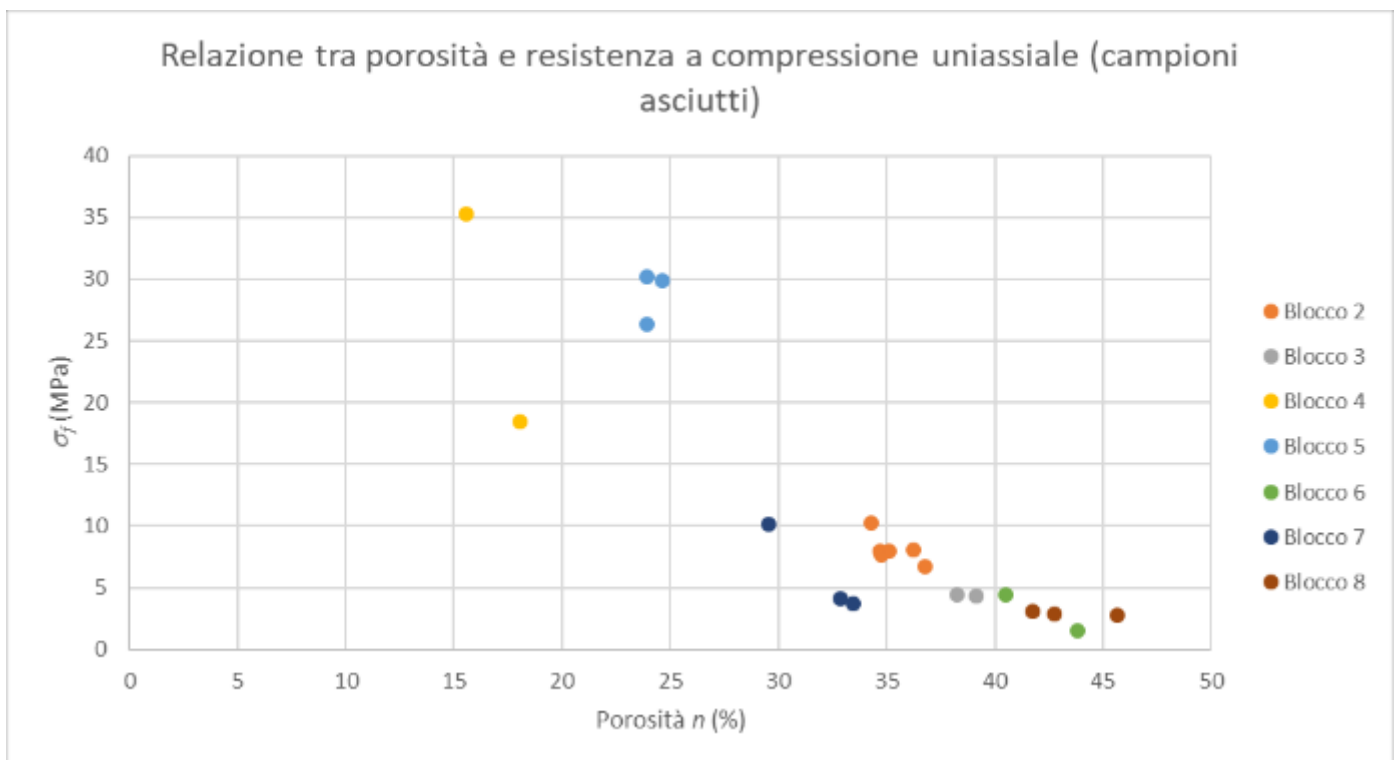


Figura 42: Relazione tra porosità e resistenza a compressione uniassiale (campioni asciutti)

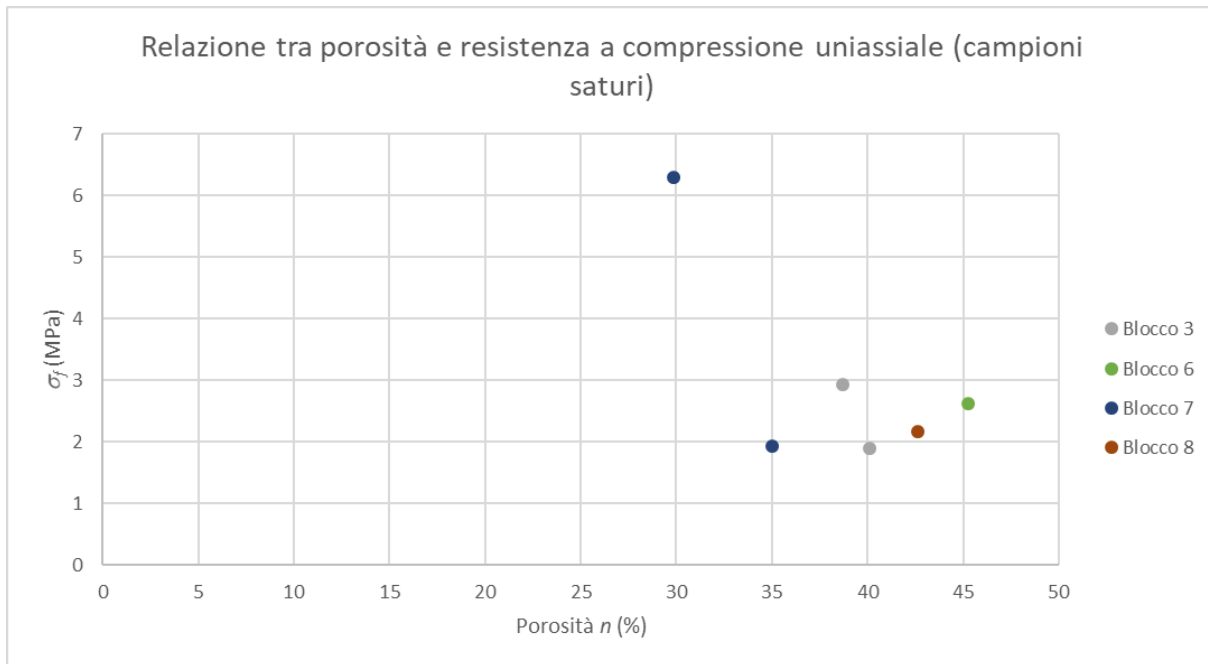


Figura 43: Relazione tra porosità e resistenza a compressione uniassiale (campioni saturi)

CAMPIONE	Prova Effettuata	condizione	σ _f (MPa)
1.1	brasiliiana	asciutto	1,19
1.2	brasiliiana	asciutto	1,42
1.3	brasiliiana	asciutto	0,50
2.8 B	brasiliiana	asciutto	0,65
2.9	brasiliiana	asciutto	0,60
3.5 A	brasiliiana	asciutto	1,25
3.5 B	brasiliiana	asciutto	0,95
3.6 A	brasiliiana	asciutto	1,53
3.6 B	brasiliiana	saturo	0,81
3.7	brasiliiana	saturo	0,99
3.8 B	brasiliiana	saturo	0,91
6.8	brasiliiana	asciutto	0,98
6.9	brasiliiana	saturo	0,75
6.10	brasiliiana	saturo	0,85
6.11	brasiliiana	saturo	0,37
6.12	brasiliiana	asciutto	0,85
6.13	brasiliiana	asciutto	0,98
7.9	brasiliiana	asciutto	1,00
7.10	brasiliiana	asciutto	0,62
7.11	brasiliiana	saturo	0,76
7.12	brasiliiana	saturo	0,60
8.7	brasiliiana	asciutto	0,63
8.8	brasiliiana	asciutto	0,88

Tabella 9: Risultati delle prove brasiliane

Per i campioni saturi non si riesce ad apprezzare ed ipotizzare una possibile relazione. Si riportano in tabella 9 i risultati delle prove brasiliane.

Anche in questo caso si nota una relazione tra i dati di porosità e quelli di resistenza a trazione (figure 44 e 45). Infatti, i blocchi 1 e 3 raggiungono valori maggiori rispetto ai blocchi 6 ed 8. I dati di resistenza però non sono molti ed i valori ottenuti sono abbastanza bassi e non molto differenti tra di loro, per cui di nuovo la possibile presenza di una relazione si apprezzerebbe maggiormente con un numero maggiore di provini.

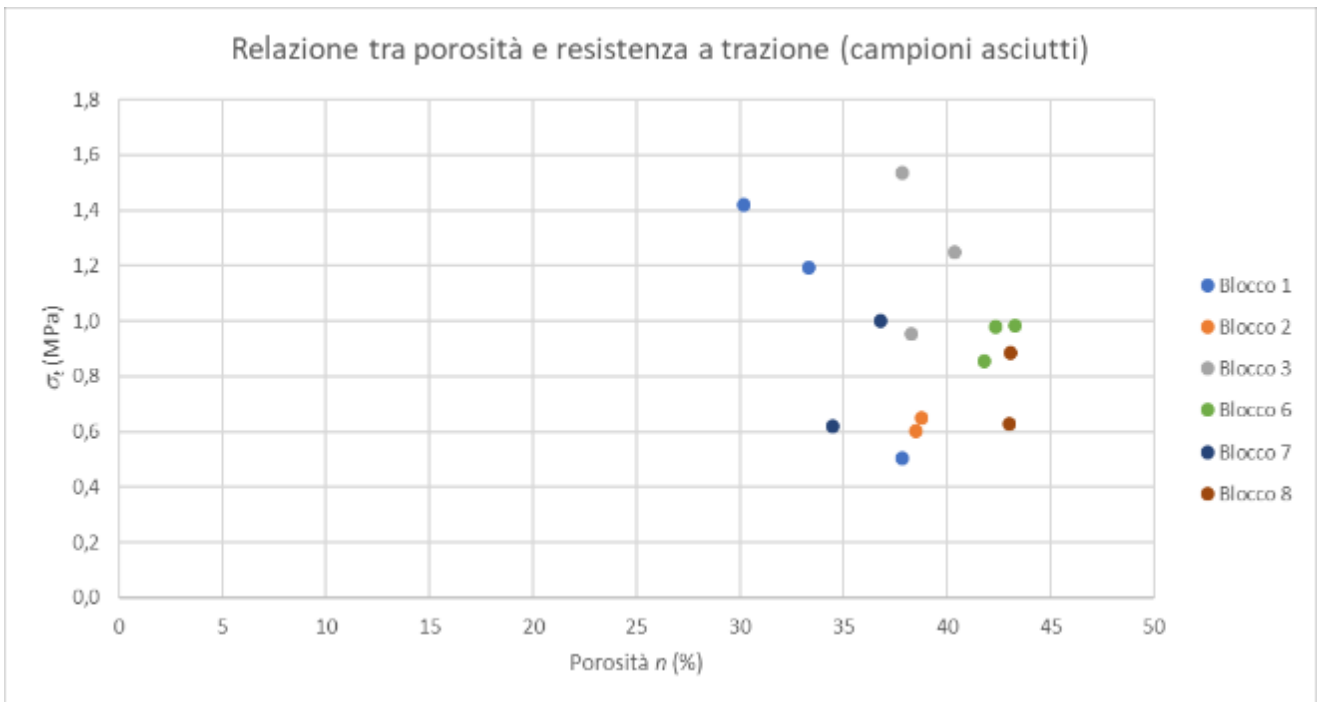


Figura 44: Relazione tra porosità e resistenza a trazione (campioni asciutti)

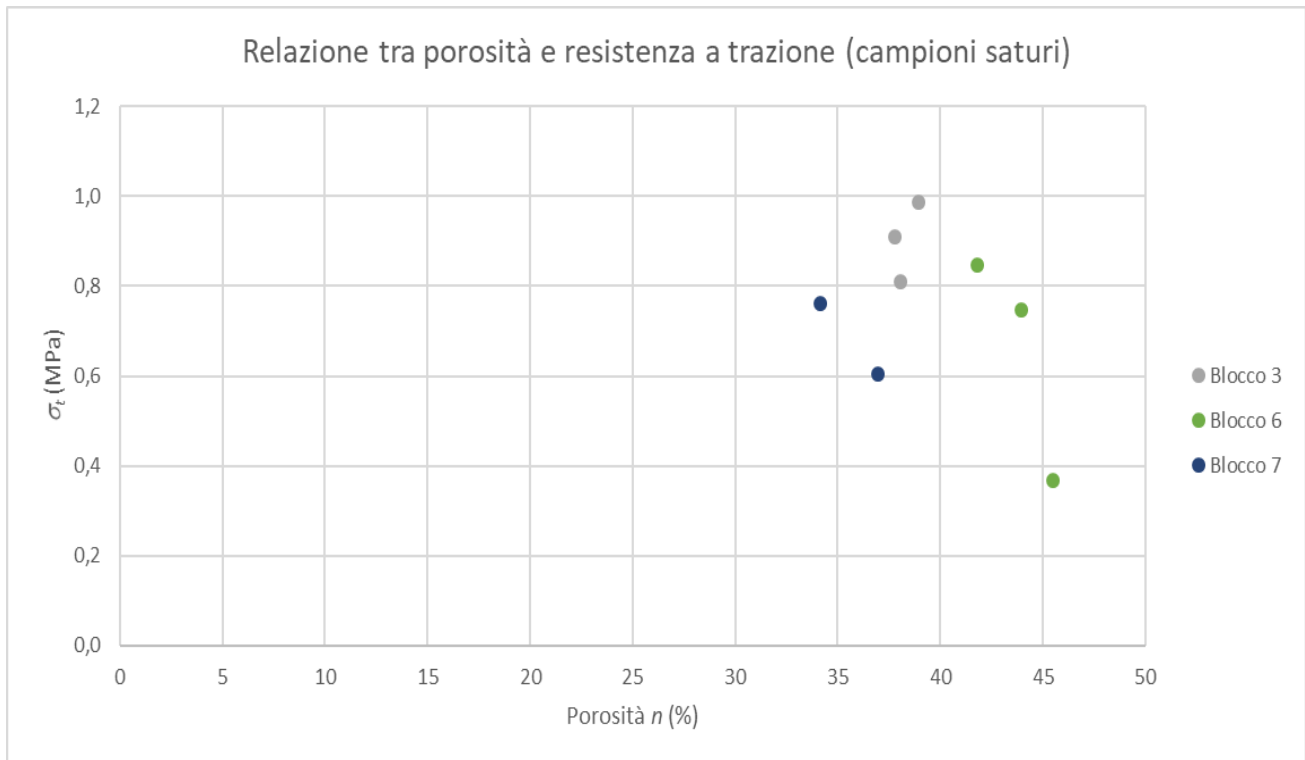


Figura 45: Relazione tra porosità e resistenza a trazione (campioni saturi)

Si sono poi calcolate le medie e le deviazioni standard per le resistenze a compressione ed a trazione divise tra prove asciutte e sature, questi dati sono riportati in tabella 10.

Condizioni asciutte				Condizioni sature			
media σ_f (MPa)	10,96	media σ_t (MPa)	0,94	media σ_f (MPa)	2,98	media σ_t (MPa)	0,67
deviazione standard σ_f	10,44	deviazione standard σ_t	0,31	deviazione standard σ_f	1,68	deviazione standard σ_t	0,31
rapporto σ_f/σ_t		11,70		rapporto σ_f/σ_t		4,44	

Tabella 10: Media e deviazione standard per i dati di resistenza a compressione e a trazione

Nelle tabelle 11, 12 e 13 sono riportati gli stessi dati per i blocchi associati tra loro.

Blocchi 1, 2 e 3							
Condizioni asciutte				Condizioni sature			
media σ_f (MPa)	7,16	media σ_t (MPa)	1,01	media σ_f (MPa)	2,42	media σ_t (MPa)	0,90
deviazione standard σ_f	2,00	deviazione standard σ_t	0,39	deviazione standard σ_f	0,73	deviazione standard σ_t	0,09
rapporto σ_f/σ_t		7,07		rapporto σ_f/σ_t		2,68	

Tabella 11: Media e deviazione standard per i dati di resistenza per i blocchi 1, 2 e 3

Blocchi 4 e 5	
Condizioni asciutte	
media σ_f (MPa)	28,02
deviazione standard σ_f	6,23

Tabella 12: Media e deviazione standard per i dati di resistenza per i blocchi 4 e 5

Blocchi 6, 7 e 8							
Condizioni asciutte				Condizioni sature			
media σ_f (MPa)	4,09	media σ_t (MPa)	0,85	media σ_f (MPa)	3,26	media σ_t (MPa)	0,66
deviazione standard σ_f	2,62	deviazione standard σ_t	0,16	deviazione standard σ_f	2,05	deviazione standard σ_t	0,19
rapporto σ_f/σ_t		4,81		rapporto σ_f/σ_t		4,90	

Tabella 13: Media e deviazione standard per i dati di resistenza per i blocchi 6, 7 e 8

Come atteso la resistenza a trazione, σ_t , è molto minore rispetto alla resistenza a compressione uniassiale. Dai dati di letteratura si sa che generalmente il rapporto σ_f/σ_t è pari a 10. Nel nostro caso il rapporto si discosta di poco dal 10 per condizioni asciutte, il valore risultante è 11,7, mentre per condizioni sature il rapporto si ferma ad un valore di 4,44, abbastanza basso rispetto ai valori di letteratura. Il valore ottenuto per condizioni sature può essere forse spiegato alla luce del fatto che le prove sature di compressione uniassiale sono state eseguite più lentamente e quindi il valore ottenuto è stato in parte inficiato sia dalla presenza d'acqua che dalla minor velocità con cui è stata effettuata la prova.

Si riportano i risultati per le prove triassiali in tabella 14 e 15:

CAMPIONE	Prova Effettuata	condizione	σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
6.1	triassiale	asciutto	5,32	0,6
6.3	triassiale	asciutto	7,32	0,9
6.4	triassiale	asciutto	4,54	0,3
6.7	triassiale	asciutto	3,30	0,3
7.1	triassiale	asciutto	8,98	1
7.2	triassiale	asciutto	12,12	2
7.6	triassiale	asciutto	14,69	3
8.2	triassiale	asciutto	3,27	0,6
8.3	triassiale	asciutto	4,56	0,9

Tabella 14: Risultati per la prova triassiale

media σ_1 (MPa)	7,12	media σ_3 (MPa)	1,07
deviazione standard σ_1	4,06	deviazione standard σ_3	0,89

Tabella 15: Media e deviazione standard per la prova triassiale

I risultati delle prove uniassiale e triassiale sono rappresentati in figura 46.

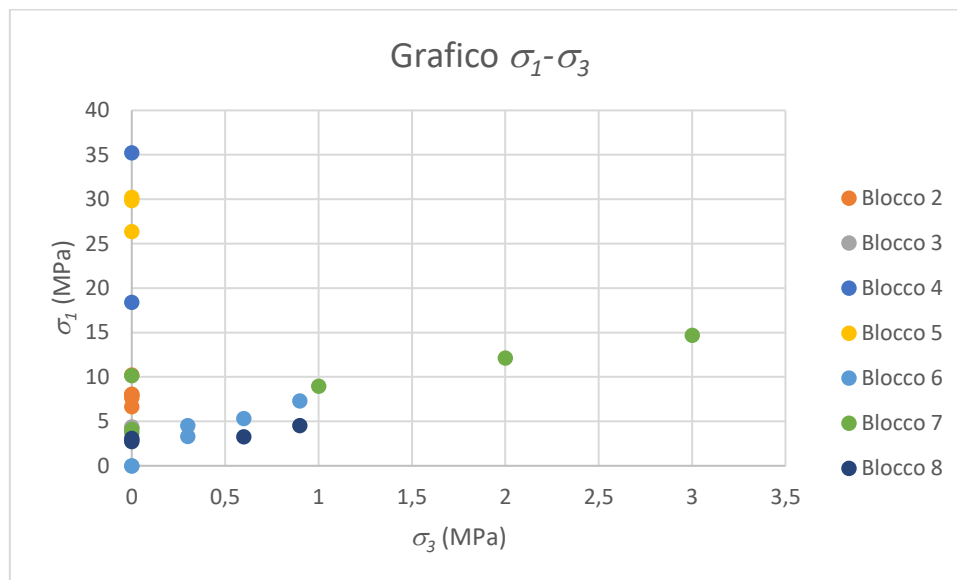


Figura 46: Interpolazione prove uniassiali e triassiali

Elaborazione dati:

Un criterio di resistenza è un modello che rappresenta la superficie limite di resistenza di un materiale o un ammasso roccioso. È possibile rappresentare questa superficie su un grafico, considerando che le condizioni di resistenza siano poco influenzate dalla tensione principale intermedia σ_2 . Un criterio spesso utilizzato per la sua semplicità è il criterio di Mohr-Coulomb (4.14), definito come:

$$\sigma_1 = \sigma_f + \sigma_3 N \quad (4.13)$$

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (4.14)$$

$$\sigma_f = 2c \frac{\cos \varphi}{(1 - \sin \varphi)} \quad (4.15), \quad N = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi) \quad (4.16)$$

Un altro criterio valido per rocce dure e fragili è il modello di Hoek e Brown:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m_i \sigma_{ci} \sigma_3 + \sigma_{ci}^2} \quad (4.17)$$

Dopo aver definito l'indice di qualità GSI e il fattore di disturbo D , è possibile calcolare il criterio di Hoek e Brown per l'ammasso roccioso, dato da una legge di resistenza analoga a quella proposta per il materiale roccioso:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(\frac{m_b \sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4.18)$$

dove:

$$m_b = m_i \exp((GSI - 100)/(28 - 14D)) \quad (4.19)$$

$$s = \exp((GSI - 100)/(9 - 3D)) \quad (4.20)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(\exp(-GSI/15) - \exp(-\frac{20}{3}) \right) \quad (4.21)$$

È sempre possibile trovare il criterio di Mohr-Coulomb equivalente a quello di Hoek e Brown in un preciso intervallo tensionale di σ_3 nel quale si vanno ad eguagliare le aree sottese dai criteri, ottenendo così le seguenti espressioni dei parametri c' e ϕ' .

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{(a-1)}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{(a-1)}} / (1+a)(2+a)} \quad (4.22)$$

$$\phi' = \sin^{-1} \frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{(a-1)}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{(a-1)}} \quad (4.23)$$

dove:

$$\sigma'_{3n} = \sigma'_{3max} / \sigma_{ci} \quad (4.24)$$

$$\sigma'_{3max} = 0,72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{(-0,91)} \sigma'_{cm} \quad (4.25)$$

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s)) \left(\frac{m_b}{4} + s \right)^{(a-1)}}{2(1+a)(2+a)} \quad (4.26)$$

con γ che indica il peso dell'unità di volume del materiale ed H l'altezza del versante.

Per poter procedere con la costruzione dei criteri di resistenza è stato necessario selezionare i campioni e quindi i dati più rappresentativi del materiale nell'intorno della tomba. Per questo motivo, si sono scelti i campioni provenienti dai blocchi 6, 7 ed 8. Utilizzando i dati di

resistenza ottenuti dalle prove uniassiali e triassiali sono stati calcolati tutti parametri presenti nelle operazioni illustrate sopra. Sono stati così ottenuti diversi modelli utilizzando i dati dei blocchi singoli, accoppiando i blocchi ed infine utilizzandoli tutti assieme. Osservando i risultati si è deciso di utilizzare tutti i dati (delle prove asciutte) ad esclusione della uniassiale svolta sul campione 7.3. Nelle figure 47, 48, 49 e 50 si riportano i risultati significativi ottenuti dal procedimento effettuato.

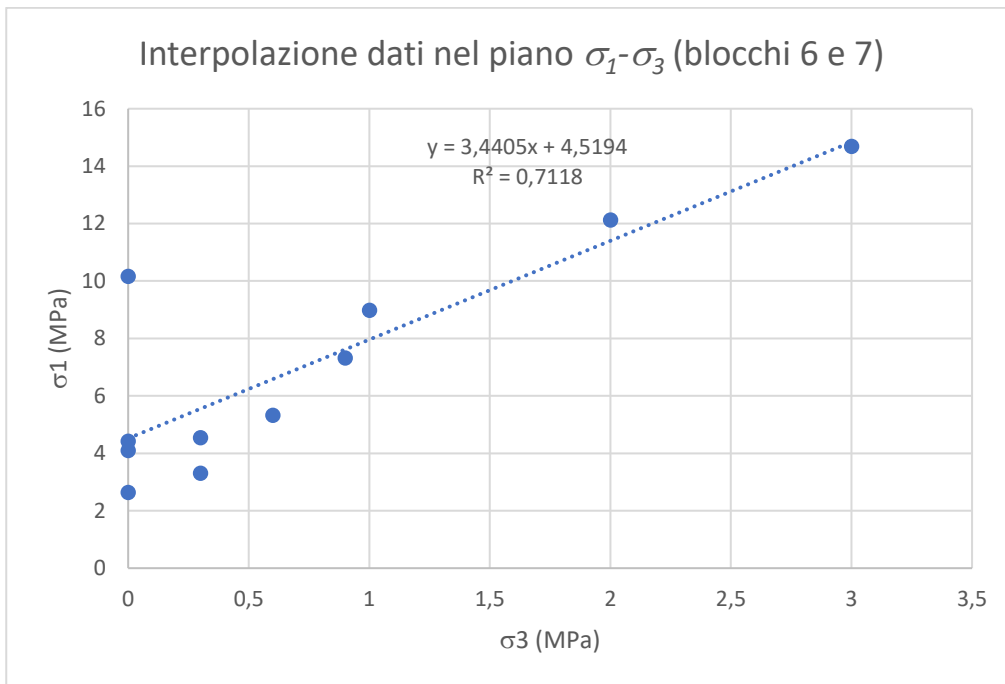


Figura 47: Interpolazione dei dati (blocchi 6 e 7)

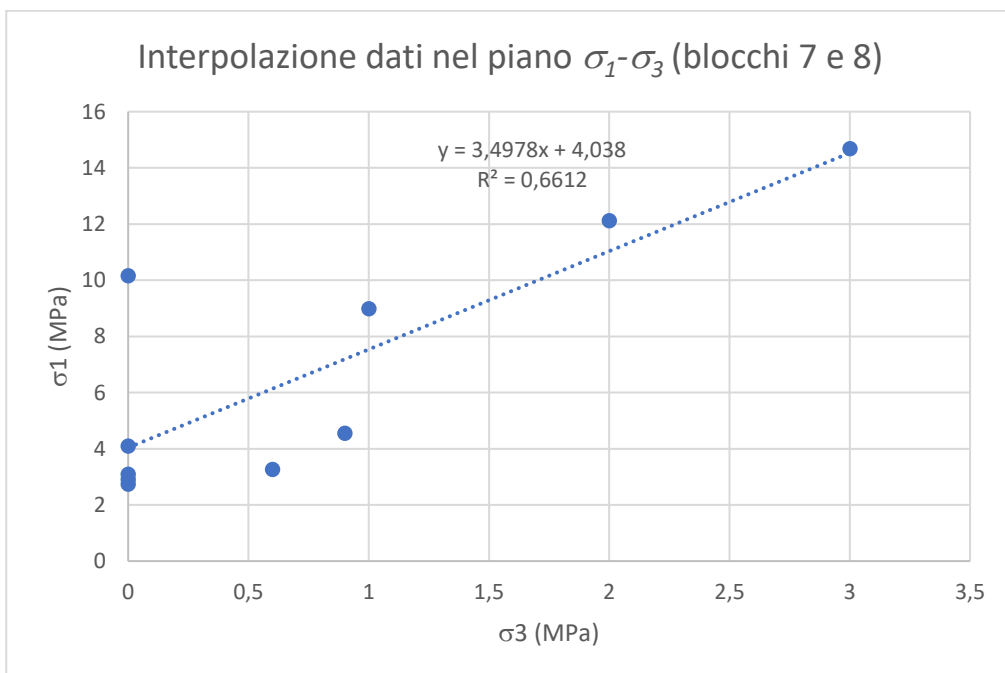


Figura 48: Interpolazione dati (blocchi 7 e 8)

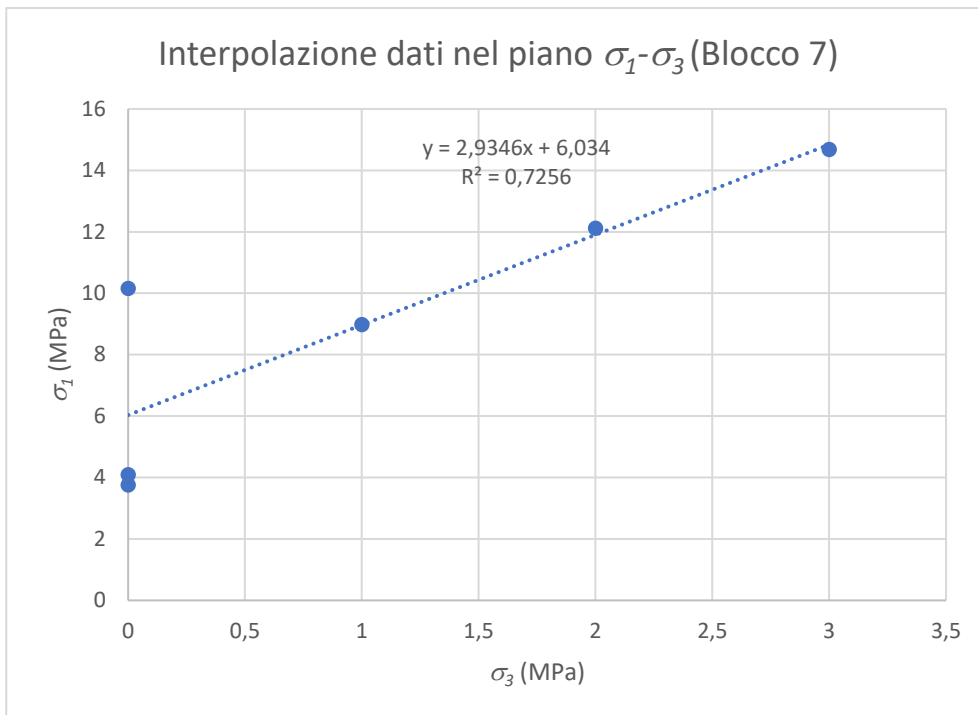


Figura 49: Interpolazione dati blocco 7

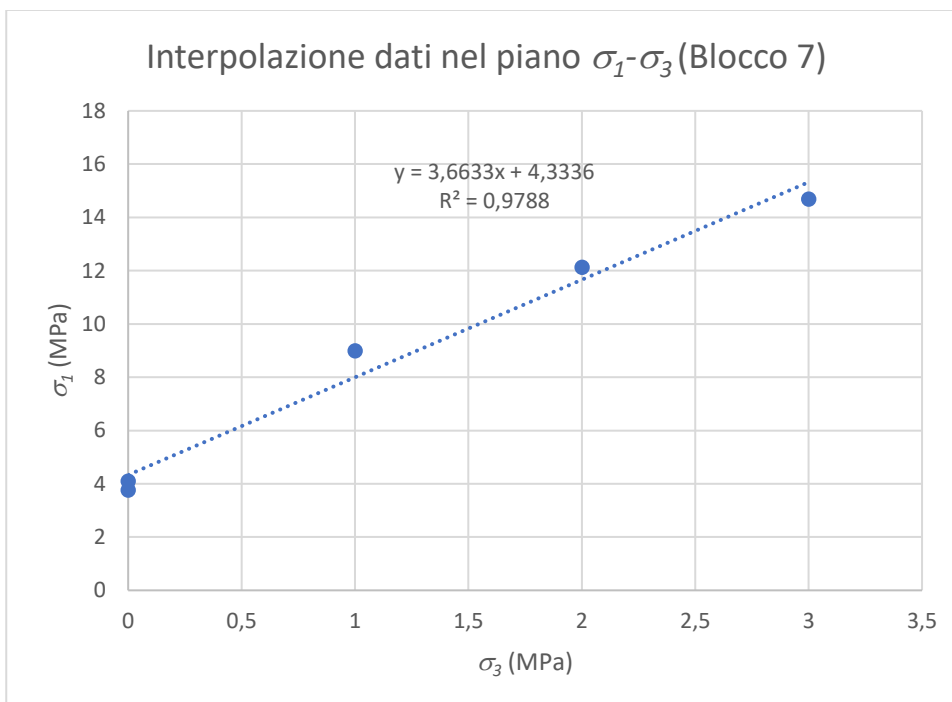


Figura 50: Interpolazione dati blocco 7 (con esclusione del campione 7.3)

In generale i dati si interpolano linearmente abbastanza bene, va comunque sottolineato che nella figura 50, nella quale si esclude il campione 7.3, l'interpolazione è decisamente migliore, lo si può osservare dal fatto che il fattore R^2 è prossimo al valore 1.

Nella tabella 16 vengono riportati i dati considerati ed in figura 51 l'interpolazione degli stessi tramite il criterio di Mohr-Coulomb.

CAMPIONE	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)
6.2	0	4,42
6.5	0	2,63
8.4	0	3,09
8.5	0	2,91
6.1	0,6	5,32
6.3	0,9	7,32
6.4	0,3	4,54
7.1	1	8,98
7.2	2	12,12
7.6	3	14,69
6.7	0,3	3,30
8.2	0,6	3,27
8.3	0,9	4,56
8.6	0	2,74
7.4	0	3,76
7.8	0	4,10

Tabella 16: Dati utilizzati per la costruzione dei criteri

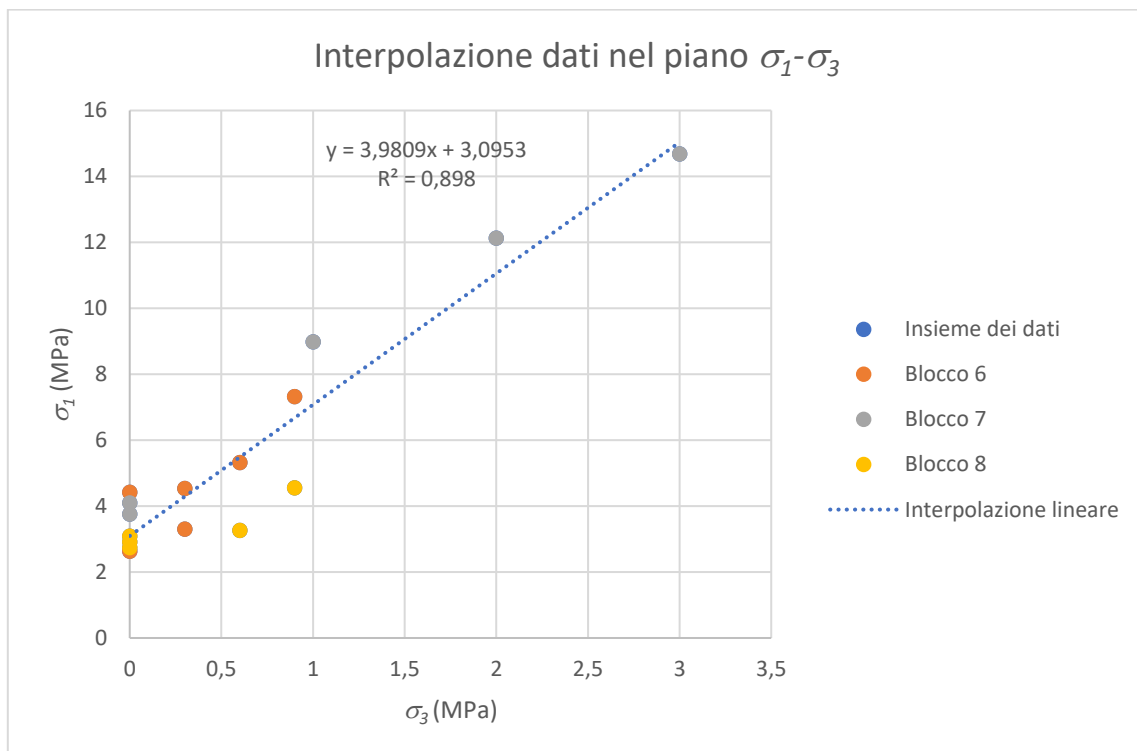


Figura 51: Interpolazione dei dati

In tabella 17 i dati per la costruzione del criterio di Mohr-Coulomb, ed in figura 52 la rappresentazione del modello.

N	σ_f (MPa)	c (MPa)	ϕ (rad)	ϕ (gradi)
3,981	3,095	0,776	0,642	36,760

σ_t (MPa)	σ_t (cut-off) (MPa)
0,778	0,388

Tabella 17: Parametri del criterio di Mohr-Coulomb

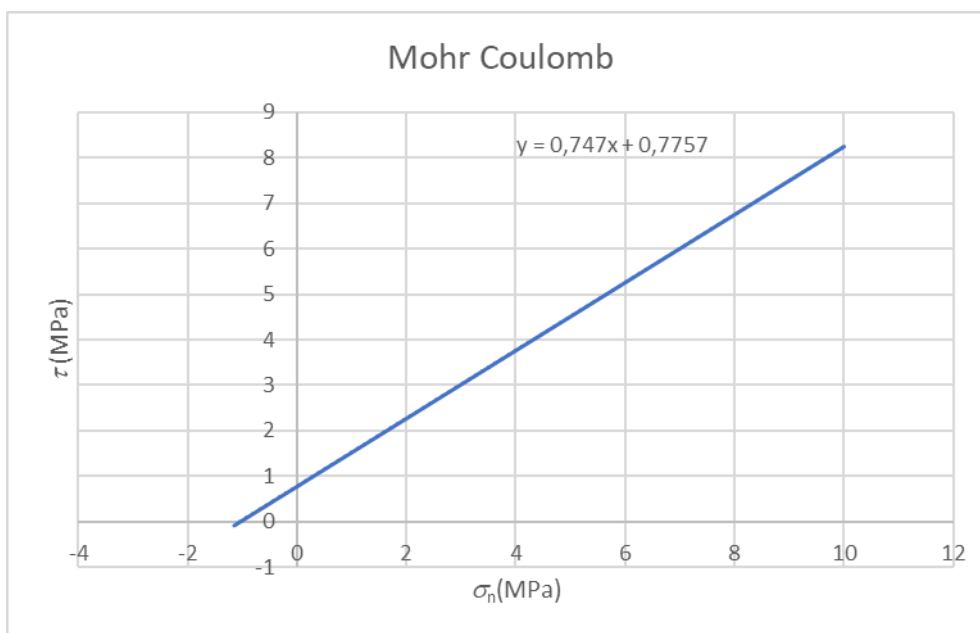


Figura 52: Criterio di resistenza di Mohr-Coulomb per il materiale roccioso

Il criterio di Hoek e Brown linearizzato è illustrato in figura 53. Grazie ad esso si sono ottenuti i dati in tabella 18 utilizzati per la costruzione del criterio, rappresentato graficamente in figura 54.

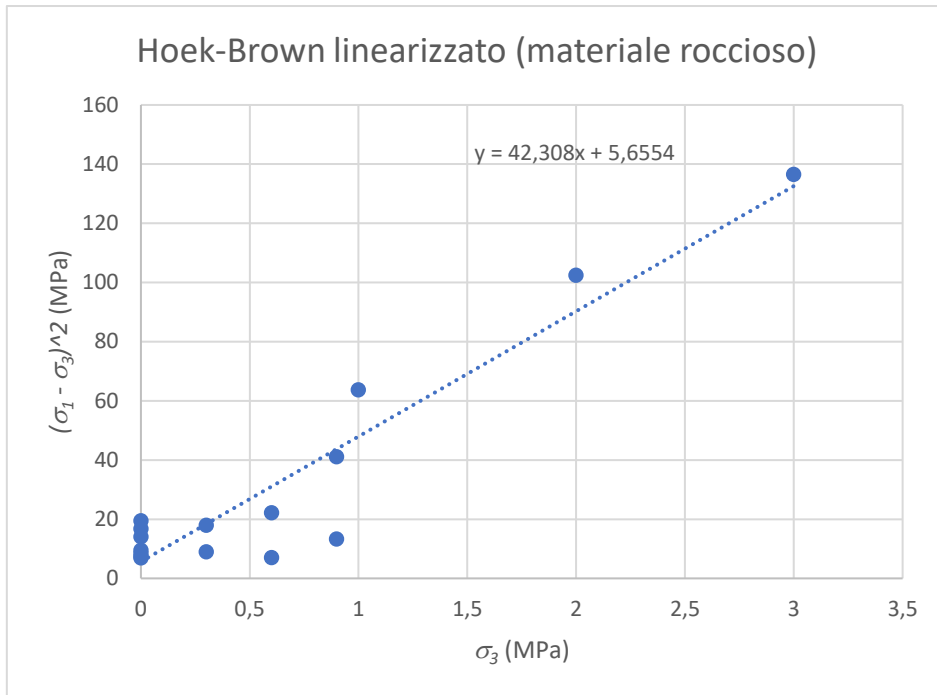


Figura 53: Criterio di resistenza linearizzato di Hoek Brown (materiale roccioso)

$m_i * \sigma_{ci}$	σ_{ci}^2	σ_{ci} (MPa)	m_i	σ_i (MPa)
42,31	5,66	2,38	17,79	0,13

Tabella 18: Parametri criterio di Hoek Brown (materiale roccioso)

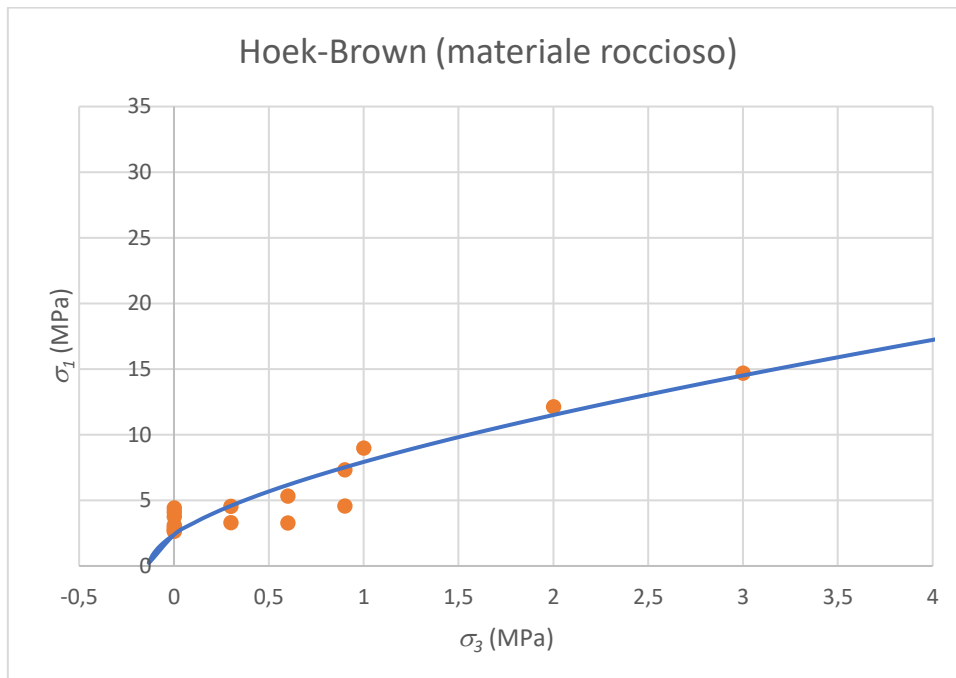


Figura 54: Criterio di Hoek-Brown per il materiale roccioso con dati sperimentali

Per poter costruire il criterio di Hoek e Brown per l'ammasso si sono definiti l'indice di qualità GSI (definizione e calcolo illustrati in seguito) ed il fattore di disturbo D , e sono stati così trovati gli altri parametri dalle relazioni (4.19), (4.20) e (4.21), e sono riportati in tabella 19. Il fattore di disturbo D fornisce un'indicazione su quanto l'ammasso sia disturbato dallo

scavo, in particolare è influenzato dalla qualità dello scavo e dalla profondità dello stesso. Il fattore D può assumere valori da 0 (scavo indisturbato) a 1 (scavo disturbato), nel caso in esame è stato scelto un valore pari a 0,2 con l'aiuto delle linee guida fornite da Hoek-Brown, infatti pur essendo lo scavo superficiale il metodo di scavo della tomba è poco invasivo. In ogni caso "è chiaro che un grande numero di fattori possono influenzare il grado di disturbo di uno scavo in un ammasso roccioso e potrebbe non essere possibile quantificare questi fattori in maniera precisa" (Hoek-Brown, 2002).

GSI	D	m_b	s	a	E (GPa)
64	0,2	4,264	0,014	0,502	3,107

Tabella 19: Parametri criterio di resistenza di Hoek Brown (ammasso roccioso)

Si riporta in figura 55 il criterio di Hoek e Brown valido per l'ammasso roccioso, unitamente alla linearizzazione dello stesso nel criterio di Mohr-Coulomb:

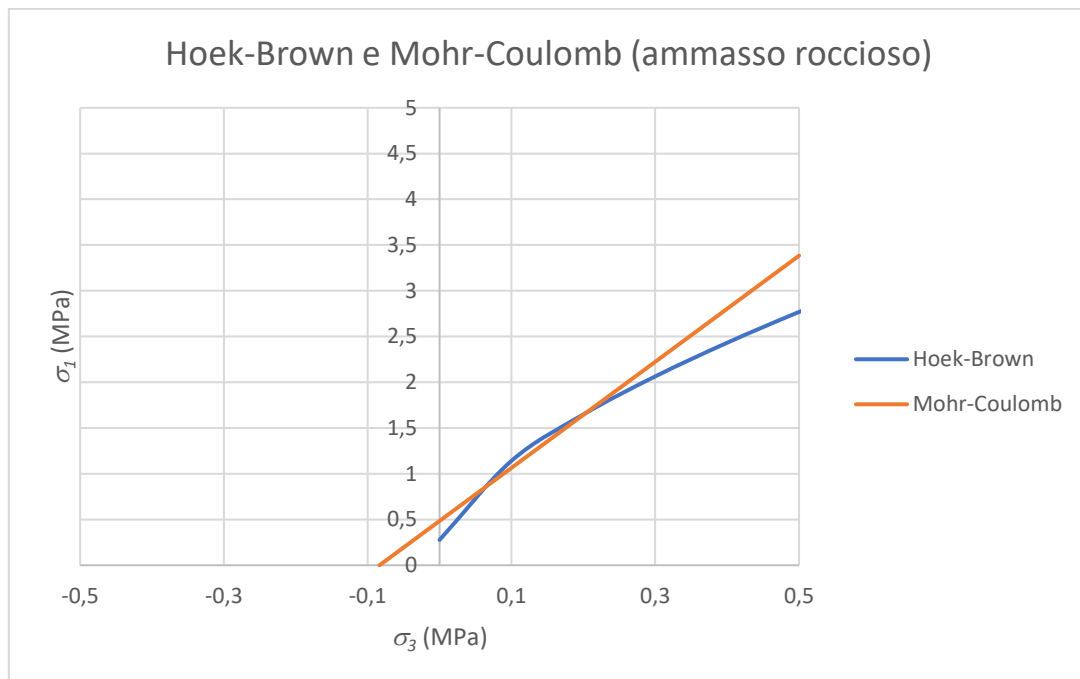


Figura 55: Criterio di resistenza di Hoek Brown e di Mohr-Coulomb (ammasso roccioso)

È stato quindi linearizzato il criterio in un criterio di Mohr-Coulomb, si riportano i parametri in tabella 20 ed il modello in figura 56.

σ_t (MPa)	σ_{cm} (MPa)	σ_{3max} (MPa)	σ_{3n} (MPa)	c' (MPa)	ϕ' (gradi)
0,00768	0,680	0,2745	0,1154	0,164	38,45

Tabella 20: Parametri del criterio e per la sua linearizzazione

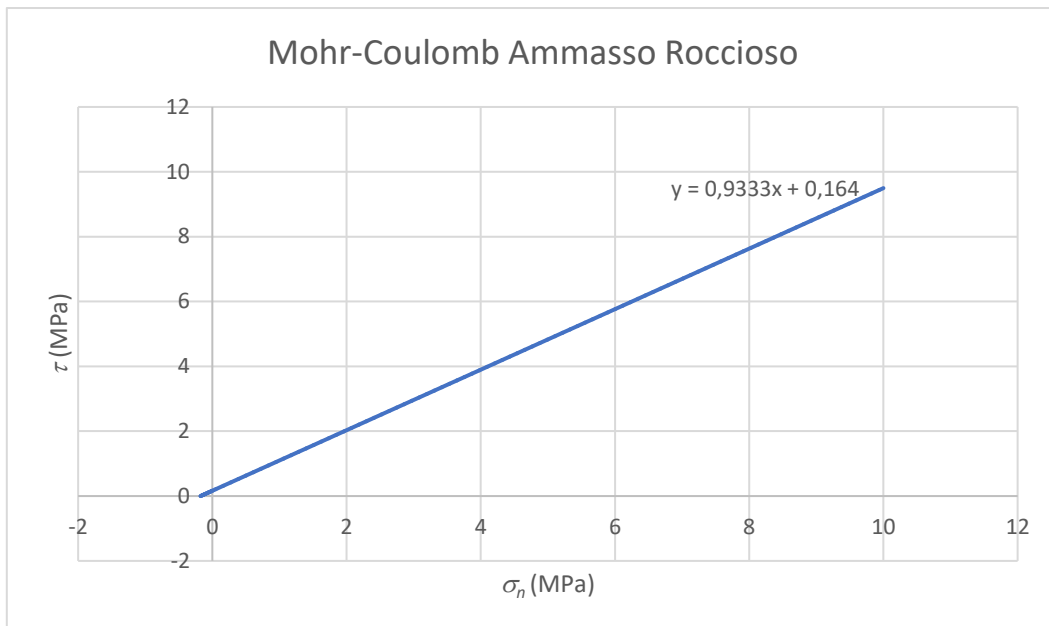


Figura 56: Criterio di Mohr-Coulomb (ammasso roccioso)

4.4 Caratterizzazione delle discontinuità

Le discontinuità di un ammasso roccioso possono essere descritte tramite le seguenti caratteristiche:

- *Giacitura*: la giacitura è definita assimilando le discontinuità a delle superfici piane. L'orientazione della discontinuità è definita da due angoli: l'immersione α_g (azimut della linea di massima pendenza) e l'inclinazione ψ_g (angolo rispetto all'orizzontale).
- *Sistematicità*: un gruppo di discontinuità della stessa famiglia della stessa origine è caratterizzato da una sistematicità della giacitura e costituisce una "famiglia di discontinuità".
- *Spaziatura*: La distanza tra intersezioni successive di discontinuità lungo sondaggi o allineamenti su pareti definisce la spaziatura s . La frequenza di fratture f è l'inverso della spaziatura.
- *Estensione o Persistenza*: l'estensione indica per quanto la discontinuità si estende in maniera lineare o areale.
- *Scabrezza*: la scabrezza di una discontinuità si riferisce alle irregolarità a piccola scala.
- *Apertura*: è l'apertura delle fratture. Influisce molto sulle caratteristiche idrauliche (permeabilità) di un ammasso roccioso.
- *Riempimento*: le discontinuità si possono presentare riempite con materiale sciolto, o apportato dall'esterno o derivante da disgregazione meccanica o chimica delle

pareti. In altri casi il riempimento è costituito da materiale di cementazione, depositato per fenomeni chimici.

- *Stato di alterazione delle pareti*: le discontinuità costituiscono sempre una via preferenziale di circolazione delle acque e quindi spesso le pareti sono interessate da fenomeni di alterazione più accentuati che nel resto del materiale roccioso.

Le discontinuità sono state analizzate principalmente nell'ipogeo sottostante la Tomba dei Vasi Dipinti, dove la minor presenza di vegetazione ha permesso un'ispezione più approfondita e un rilievo più preciso. Le discontinuità sono state inizialmente individuate ad occhio nudo e successivamente ne sono stati registrati i dati di giacitura con l'apposita bussola per il rilievo strutturale. La scabrezza è stata valutata con un pettine di Barton. Altri parametri come la sistematicità, la spaziatura, l'estensione e l'apertura sono stati misurati con l'ausilio di un metro (metodo delle linee di scansione) ed il riempimento e alterazione delle pareti sono stati valutati ad occhio nudo.

Le famiglie di discontinuità trovate sono state principalmente tre: la più importante è sicuramente quella che ha la stessa immersione del versante ed una inclinazione leggermente minore (figura 57): è questa famiglia infatti che ha causato e continua a causare fenomeni di scivolamento e ribaltamento di massi lungo il fronte.

Di questa famiglia in particolare sono stati acquisiti i dati delle relative discontinuità. La spaziatura è ampia, dai 30-40 cm fino a 1-2 m. L'estensione e la persistenza sono importanti, a volte di non facile valutazione, ma potrebbero occupare tutto il fronte. La scabrezza è stata analizzata tramite pettine di Barton: nello specifico, sono stati acquisiti due profili che hanno portato risultati diversi, si ha $JRC_1 = 7$, $JRC_2 = 18$, a dimostrazione che il macco di Tarquinia alla scala della discontinuità è caratterizzato da una disomogeneità litostratigrafica, con livelli più deboli, siltosi e lisci intercalati da livelli più competenti e con scabrezza maggiore. Le aperture passano dall'ordine dei mm (>3-4 mm) fino all'ordine dei cm (> 10 cm). Il riempimento è praticamente assente.

La seconda famiglia (figura 58) è perpendicolare al fronte e non sembra interessare la stabilità dell'ammasso in quanto le discontinuità non sono molto aperte (ordine dei mm) e l'estensione o persistenza è molto ridotta: In ogni caso queste discontinuità possono originare cunei di roccia instabili e soggetti al crollo.

La terza ed ultima famiglia di discontinuità è quella stratigrafica, di origine sedimentaria, che ha lo stesso orientamento della monoclinale. Di questa famiglia non sono state rilevate particolari discontinuità, ma la sua presenza è stata riconosciuta a partire dai rilievi effettuati presso la cava di Macco presente nella vicina località Pisciarello, dove affiora con giacitura sub-orizzontale la formazione del Calcere di Tarquinia in strati e banchi calcarenitici

compatti, intercalati con strati calcareo-marnosi giallastri poco cementati e livelli sabbioso-limosi a diverso grado di cementazione (figura 59).

I dati relativi alla giacitura delle discontinuità vengono riportati in tabella 21.

FAMIGLIA	DISCONTINUITA'	PIANI		POLI	
		Immersione (°)	Inclinazione (°)	Immersione (°)	Inclinazione (°)
1	1.1	48	70	228	20
	1.2	40	78	220	12
	1.3	50	77	230	13
2	2	122	88	302	2
	3	124	65	304	25
	4	118	80	298	10
3	5	220	15	40	75

Tabella 21: Giaciture delle diverse famiglie di discontinuità

Nelle figure 53, 54 e 55 vengono illustrate alcune discontinuità indagate sul campo, rappresentative della loro famiglia.



Figura 57: Discontinuità della famiglia 1, messa in luce da un blocco caduto



Figura 58: Discontinuità appartenente alla seconda famiglia



Figura 59: Osservazione dell'andamento della monoclinale caratterizzata da alternanze calcarenitiche a diversi gradi di cementazione, presso la cava di Macco in località Pisciareello

Si riportano inoltre in figura 60 i piani formati dalle famiglie di discontinuità sul reticolo stereografico, rappresentati tramite il programma Dips.

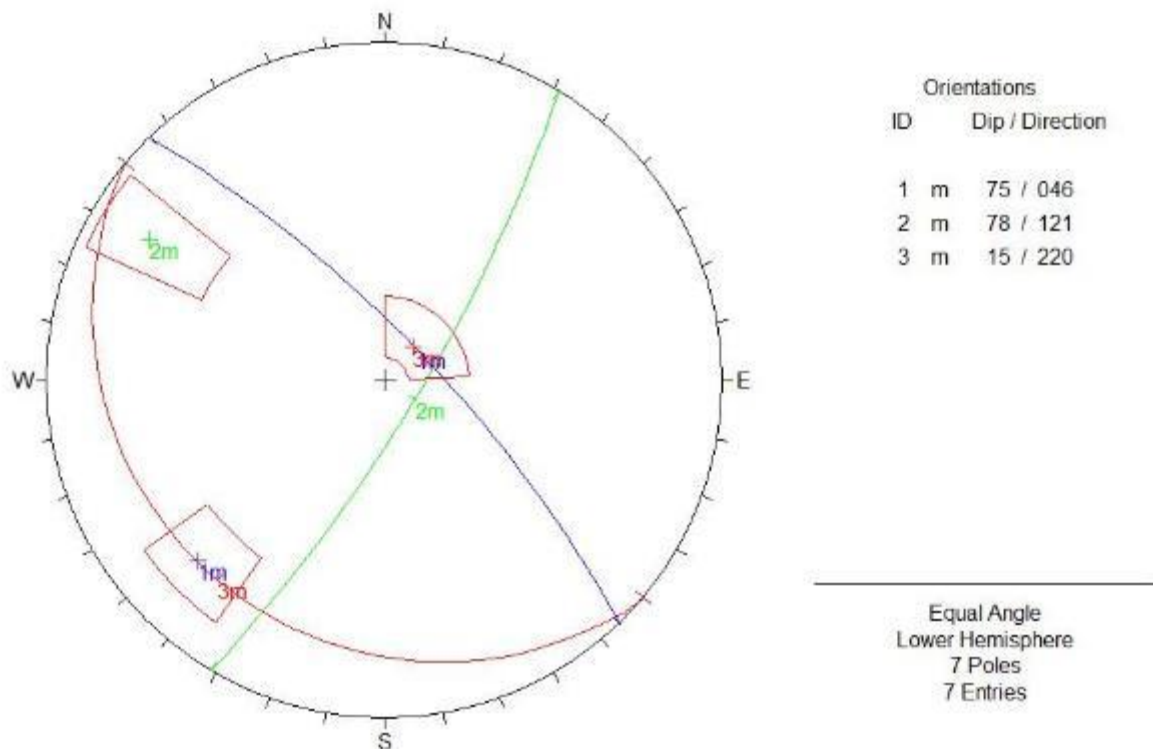


Figura 60: Giaciture e piani delle famiglie di discontinuità 1, 2 e 3

4.5 Classificazione tecnica

Grazie ai dati ottenuti dal rilievo geomeccanico, cioè l'insieme delle operazioni di campionamento, analisi ed elaborazione in laboratorio e all'indagine in campo sulle discontinuità, è stato possibile definire delle classifiche tecniche dell'ammasso. Di seguito la descrizione delle varie classifiche e i risultati ottenuti.

Le classifiche tecniche degli ammassi rocciosi forniscono una valutazione complessiva dell'ammasso basandosi sulle proprietà del materiale e sulle caratteristiche delle discontinuità. L'utilità consiste nella standardizzazione della raccolta e della presentazione dei parametri significativi e nella possibilità di fornire una base comune per trasferire le esperienze acquisite da progettisti diversi in siti diversi. In particolare gli obiettivi perseguiti sono due: fornire il comportamento meccanico dell'ammasso roccioso e indicazioni progettuali. Nel nostro caso l'interesse è principalmente quello di definire il comportamento meccanico dell'ammasso, dato che non si è nella fase di progettazione di un'opera.

Esistono diverse classifiche tecniche, alcune più adatte a dare indicazioni progettuali e altre indirizzate principalmente alla definizione del comportamento dell'ammasso.

Il *Rock Quality Designation (RQD)*, il *Rock Mass Rating (RMR)* e il *NGI* o *Rock Quality Index (Q)* fanno parte della prima categoria di indici, i quali ad un indice di qualità dell'ammasso

(in genere da ottimo a molto scadente) associano ad esempio un tempo di autosostentamento dello scavo.

L'*RQD* è concettualmente molto semplice, considera infatti la frequenza delle discontinuità, in particolare, tenendo conto di tutte le discontinuità presenti, si considerano quelle che hanno una spaziatura superiore ai 10 cm. L'indice è dato dal rapporto percentuale tra la lunghezza occupata da spaziature superiori a 10 cm sulla lunghezza totale considerata. In genere l'indagine si fa su carote di almeno un metro di lunghezza o direttamente in situ considerando una sezione di roccia.

RMR						
				Valore		
σ_f (Mpa)	condizioni asciutte		11	2		
	condizioni sature		2,5			
RQD (%)			85,00%	18		
spaziatura (m)	famiglia 1		1	18		
	famiglia 2		0,3			
Condizione delle discontinuità			lunghezza discontinuità (m)	tra 10 e 20	1	
			apertura (mm)	>5	0	
	famiglia 1			scabrezza JCR	scabra	4
				spessore riempimento (mm)	assente	6
				alterazione pareti	moderatamente elevata	2
				lunghezza discontinuità (m)	tra 1 e 3	4
	famiglia 2			apertura (mm)	tra 0,1 e 1	3
				scabrezza JCR	scabra	4
				spessore riempimento (mm)	assente	6
				alterazione pareti	moderatamente elevata	2
	media pesata				16	
	Condizioni idrauliche				10	
RMR intrinseco				64		
Famiglie di discontinuità	ϕ_g (gradi)	α_g (gradi)				
1		75	46	-9		
2		78	121	-3		
media				-6		
RMR				58		

Tabella 22: Indice *RMR* dell'ammasso roccioso

L'*RMR* va ad analizzare più aspetti. Va detto che ne esistono diverse versioni ed in genere viene utilizzata quella del 1989 proposta da Bieniawski. Il sistema prevede il calcolo di un indice (compreso tra 0 e 100) ottenuto come somma di 5 indici parziali stimati sulla base di:

1. resistenza a compressione uniassiale, σ_f ;
2. indice di qualità, *RQD*;
3. spaziatura media delle discontinuità, *s*;
4. condizione delle discontinuità (scabrezza, apertura, riempimento, alterazione delle pareti);
5. condizioni idrauliche.

Da questi primi sotto indici si ricava l'*RMR* intrinseco al quale va applicato un fattore correttivo negativo (compreso tra 0 e -12) che tiene conto dell'avanzamento dell'eventuale opera di scavo in esame rispetto all'immersione e l'inclinazione delle discontinuità. In tabella 22 si riportano i risultati ottenuti per l'indice *RMR*.

Il *Rock Quality index (Q)* del Norwegian Geotechnical Institute (NGI) è stato proposto da Barton et al. nel 1974 ed utilizzato soprattutto nei paesi scandinavi, il risultato è proposto in tabella 23.

L'indice *Q* è dato dai 6 fattori seguendo la relazione:

$$Q = \frac{RQD \cdot J_r \cdot J_w}{J_n \cdot J_a \cdot SRF} \quad (4.27)$$

A ciascuno dei parametri presenti nella relazione è associato un indice parziale. I parametri rappresentano:

- *RQD*;
- Indice del numero dei sistemi di discontinuità, J_n ;
- Indice di scabrezza, J_r ;
- Indice di alterazione delle discontinuità, J_a ;
- Indice di influenza dell'acqua, J_w ;
- Stress reduction factor, *SRF*;

Si nota inoltre che i quozienti stessi rappresentano una particolare caratteristica, nel dettaglio:

- RQD/J_n si riferisce alla struttura dell'ammasso roccioso e corrisponde ad una misura approssimata delle dimensioni del blocco medio che costituisce l'ammasso;
- J_r/J_a rappresenta la resistenza delle discontinuità. Esso assume valori elevati nel caso di discontinuità molto scabre, con superfici a diretto contatto fra loro, le quali, in virtù del comportamento dilatante, risultano favorevoli alla stabilità dei fronti. Eventuali alterazioni delle superfici di discontinuità, o la presenza di materiale di riempimento,

- riducono sensibilmente la resistenza; in questo caso è importante valutare lo spessore del materiale di riempimento e la scabrezza a grande scala;
- J_w/SRF è un fattore empirico che esprime in qualche modo la severità dello stato tensionale efficace agente.

Indice Q	
RQD	85
J_n	9
J_r	4
J_a	4
J_w	0,5
SRF	5
<hr/>	
Q	0,944

Tabella 23: Indice Q per l'ammasso roccioso di interesse

Diversi dagli indici appena esposti sono l'indice *GSI* (*Geological Strength Index*) e l'indice Q' , i quali derivano rispettivamente dall'*RMR* e dal Q , questi infatti forniscono un indice della qualità "intrinseca" dell'ammasso roccioso e non sono più legati alla realizzazione di opere di scavo (es. gallerie).

Il *GSI* (Hoek et al. 1995) coincide con la versione dell'*RMR* del 1976, dalla quale viene esclusa l'influenza dell'orientazione delle discontinuità ed è attribuito un valore costante al fattore che tiene conto dell'influenza dell'acqua. Nel nostro caso è l'indice di maggiore interesse, dato che è stato utilizzato nella realizzazione del modello di resistenza per l'ammasso roccioso. Si riporta il risultato in tabella 24.

L'indice Q' (Hoek e Brown 1997) è dato dalla relazione:

$$Q = \frac{RQD * J_r}{J_n * J_a} \quad (4.28)$$

Cioè la relazione (4.27) privata del termine che esprime lo stato tensionale. Si riporta il risultato in tabella 25.

GSI				
			Valore	
σ_f (Mpa)	condizioni asciutte	15	2	
	condizioni sature	2,5		
RQD (%)		85,00%	18	
spaziatura (m)	famiglia 1	1	20	
	famiglia 2	0,3		
Condizione delle discontinuità	famiglia 1	lunghezza discontinuità (m)	tra 10 e 20	1
		apertura (mm)	>5	0
		scabrezza JCR	scabra	4
		spessore riempimento (mm)	assente	6
		alterazione pareti	moderatamente elevata	2
		media pesata		16
	famiglia 2	lunghezza discontinuità (m)	tra 1 e 3	4
		apertura (mm)	tra 0,1 e 1	3
		scabrezza JCR	scabra	4
		spessore riempimento (mm)	assente	6
		alterazione pareti	moderatamente elevata	2
		totale*5/6		13
Condizioni idrauliche			10	
GSI			64	

Tabella 24: Indice *GSI* per l'ammasso roccioso di interesse

Indice Q'	
<i>RQD</i>	85
J_n	9
J_r	4
J_a	4
J_w	1
<i>SRF</i>	1
Q'	
	9,444

Tabella 25: Indice Q' per l'ammasso roccioso di interesse

4.6 Conclusioni

Attraverso le analisi di tipo fisico e meccanico svolte sui campioni di roccia ed attraverso l'indagine sulle caratteristiche delle discontinuità osservate in situ sono stati ottenuti diversi risultati. Quelli di maggiore importanza sono: il criterio di resistenza per il materiale roccioso (tabelle 17 e 18, figure 52 e 54), il criterio di resistenza per l'ammasso roccioso (tabelle 19 e

20, figure 55 e 56), la giacitura e le caratteristiche della famiglia 1 di discontinuità (tabella 21) e l'indice *GS* (tabella 24).

Capitolo 5. Analisi di stabilità

L'analisi di stabilità del versante in cui è situata la tomba è stata eseguita con due diversi metodi. Il primo è un'analisi cinematica che indica le tipologie di cinematisimo più probabile, ma non fornisce precisi valori quantitativi sulla lontananza dalle condizioni di rottura. Il secondo metodo è un'analisi tensio-deformativa in 2D effettuata con il programma Plaxis[®], programma di analisi agli elementi finiti.

5.1 Analisi cinematica

Conoscendo la giacitura di alcune discontinuità dell'ammasso roccioso, tramite il programma Dips[®] è stata svolta un'analisi cinematica del versante, cioè è stata valutata la presenza delle condizioni per il manifestarsi di fenomeni di instabilità e quali di questi fenomeni si possano presentarsi con maggior frequenza.

Prima di riportare i risultati si dà una descrizione degli eventi possibili e come questi vengono individuati.

Scivolamento in condizioni piane (planar sliding)

Tale tipo di dissesto è cinematicamente possibile quando l'inclinazione del giunto è minore dell'inclinazione del fronte. Dal punto di vista stereografico la zona critica è quella all'esterno del cono di attrito, all'interno del *daylight envelope* (zona che indica quali potrebbero teoricamente scivolare considerando un dato versante) e all'interno dei limiti laterali.

L'analisi all'equilibrio può essere effettuata su una striscia di larghezza unitaria; viene in particolare esaminato il solo equilibrio alla traslazione trascurando l'influenza dei momenti, cioè l'analisi di equilibrio al ribaltamento. L'analisi deve poter portare in conto la possibilità che sia presente nella parte alta della scarpata una frattura aperta e che sia eventualmente presente acqua in pressione entro tale frattura, entro il giunto di scivolamento e sul fronte. Un esempio è illustrato in figura 61.

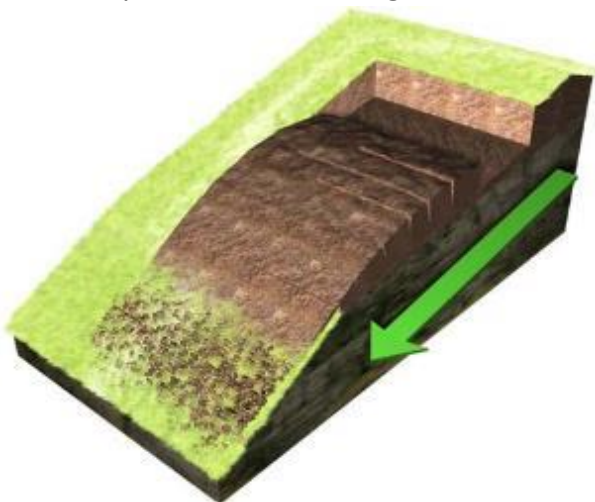


Figura 61: Scivolamento in condizioni piane

Scivolamento blocchi (wedge sliding)

Tale tipo di dissesto è dato dalla presenza di più famiglie di discontinuità che intersecandosi formano dei blocchi soggetti a scivolamento. Dal punto di vista cinematico lo scivolamento è possibile se la retta data dall'intersezione di due piani di discontinuità ha un'inclinazione minore del fronte. Nel reticolo stereografico è sufficiente controllare se il punto che rappresenta tale retta sottosta o meno alla linea che indica il piano del fronte e che sia compreso all'interno del cono di attrito. Il principio che si segue per l'analisi all'equilibrio è lo stesso discusso in precedenza, sebbene in questo caso la tridimensionalità complichino i calcoli.

Ribaltamento di blocchi rigidi (block toppling o direct toppling)

Il *block toppling* consiste nel ribaltamento in successione di una serie di blocchi di roccia adiacenti che ruotano in modo rigido. L'ammasso roccioso è interessato da due sistemi principali di discontinuità: un sistema di giunti regolare, persistenti e ben spaziati, immergenti verso monte che suddividono l'ammasso in colonne; un secondo sistema, pressoché normale al primo, che delimita le colonne superiormente e forma la superficie basale del ribaltamento, che può essere piana o scalettata. In genere i primi blocchi della scarpata (più tozzi) tendono a scivolare, mentre i blocchi centrali (più snelli) tendono a ribaltare, per cui va fatta un'analisi sia al ribaltamento che allo scivolamento e si va a considerare la situazione peggiore.

Nel reticolo stereografico la zona critica a rischio ribaltamento è quella compresa all'interno dei limiti laterali e con un'inclinazione minore di quella del fronte.

Ribaltamento flessionale (flexural toppling)

Il *flexural toppling* ha luogo quando l'ammasso roccioso è suddiviso in sottili lastre da una famiglia di giunti ravvicinati immergenti verso monte. Lo stato di sforzo indotto dalla morfologia naturale o da tagli artificiali dà luogo all'inflessione delle lastre, nelle quali insorgono tensioni di trazione che ne possono provocare la rottura ad una certa profondità. La rottura procede retrogressivamente fino alla cresta del versante; l'involuppo delle fratture delimita inferiormente il ribaltamento.

Nel reticolo la zona critica è individuata dai poli compresi nei limiti laterali e con inclinazione minore del limite di scivolamento. Per quanto riguarda l'analisi si effettua una verifica di equilibrio a pressoflessione.

In figura 62 vengono illustrati esempi di ribaltamento di blocchi rigidi e di ribaltamento flessionale.

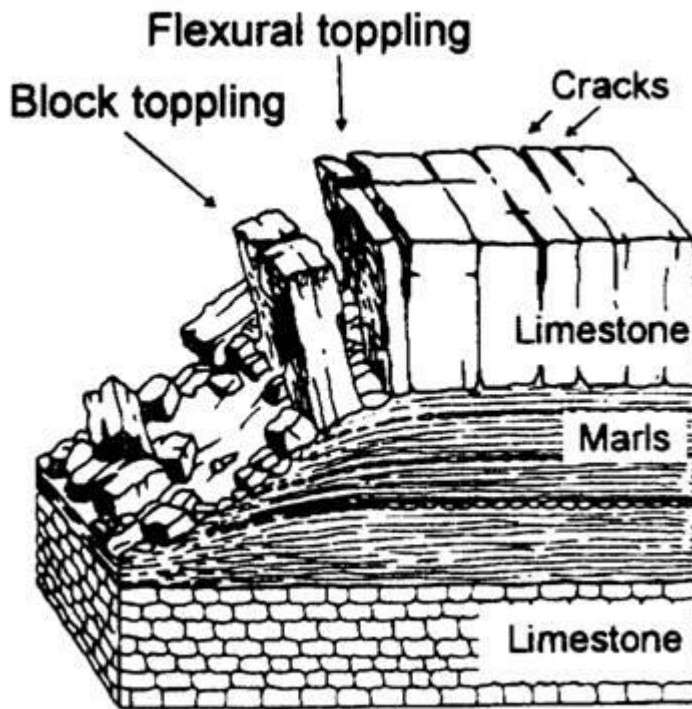


Figura 62: Ribaltamento di blocchi rigidi e ribaltamento flessionale

Si riportano dunque i risultati ottenuti ed i relativi commenti. Per una migliore interpretazione dei risultati si sappia che il fronte ha immersione 45° ed inclinazione 82° .

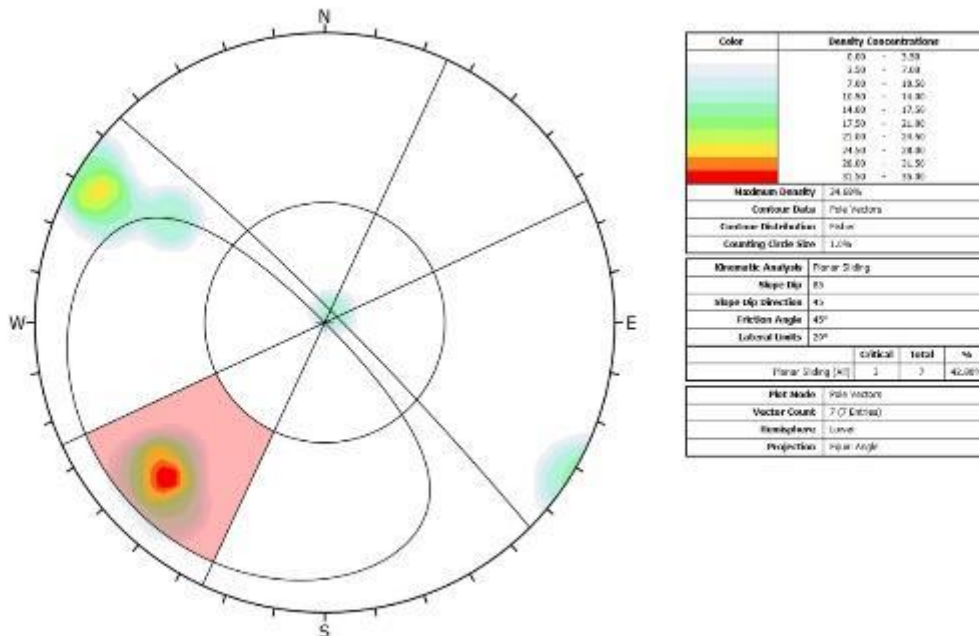


Figura 63: Scivolamento in condizioni piane

Per quel che riguarda lo scivolamento in condizioni piane si sono evidenziate alcune criticità. In particolare si è notato che le discontinuità principali, cioè quelle con la stessa immersione

del fronte, possono essere soggette a scivolamento. Infatti queste hanno un'inclinazione minore di quella del fronte come si può osservare dalle figure 63 e 64.

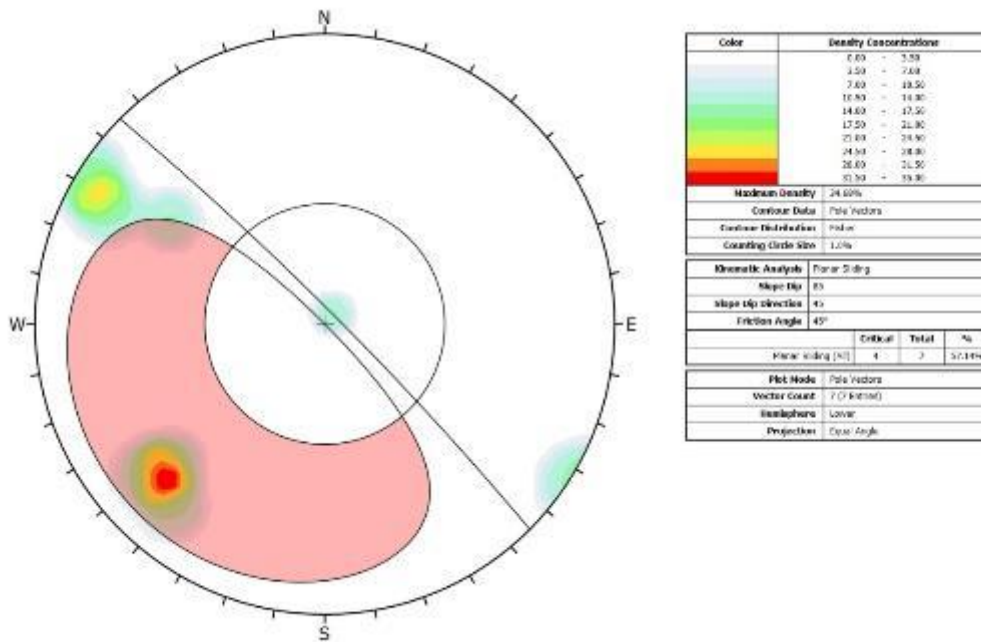


Figura 64: Scivolamento in condizioni piane

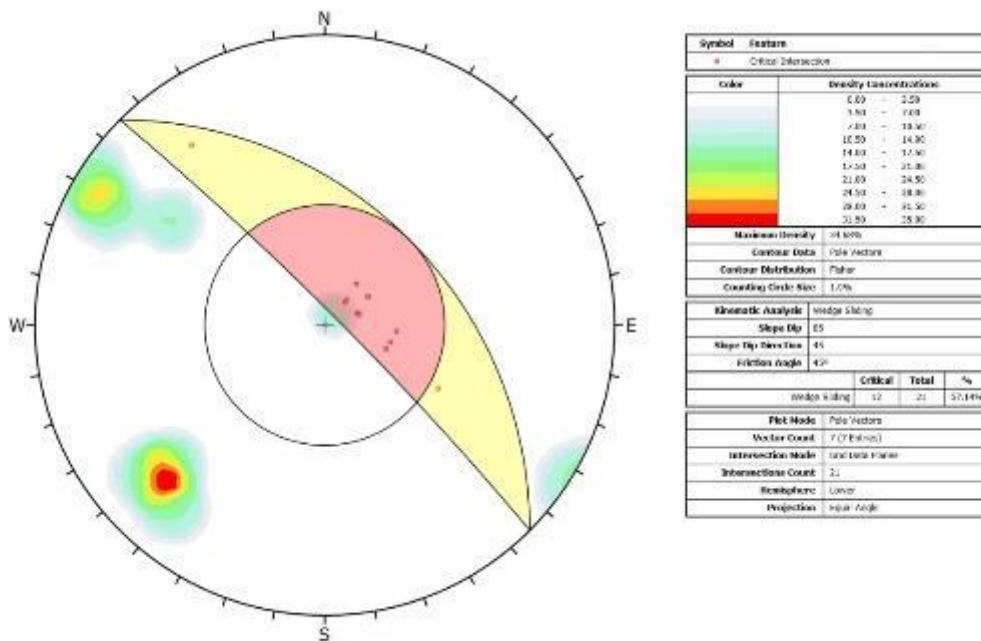


Figura 65: Scivolamento blocchi

Nel caso dello scivolamento di blocchi, che è osservabile in figura 65, si sono individuate ventuno rette di intersezione tra i piani: infatti, i piani di cui era stata presa la giacitura erano sette. Di queste ventuno rette ce ne sono dodici comprese nella zona critica. Di fatto, escludendo le intersezioni tra le discontinuità appartenenti alla stessa famiglia (nove rette) tutte le altre rientrano nella zona critica.

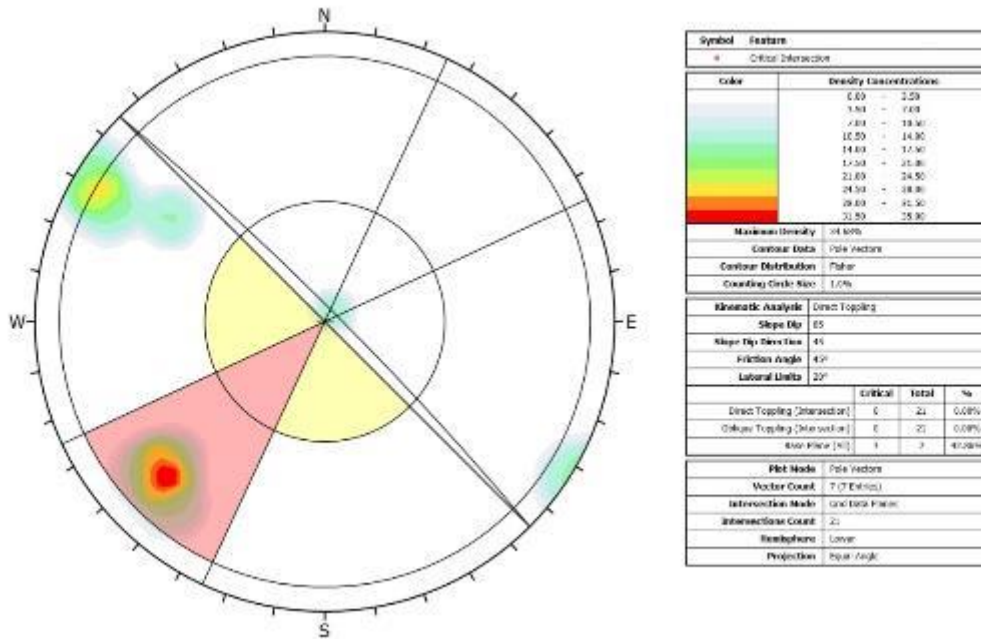


Figura 66: Ribaltamento di blocchi rigidi

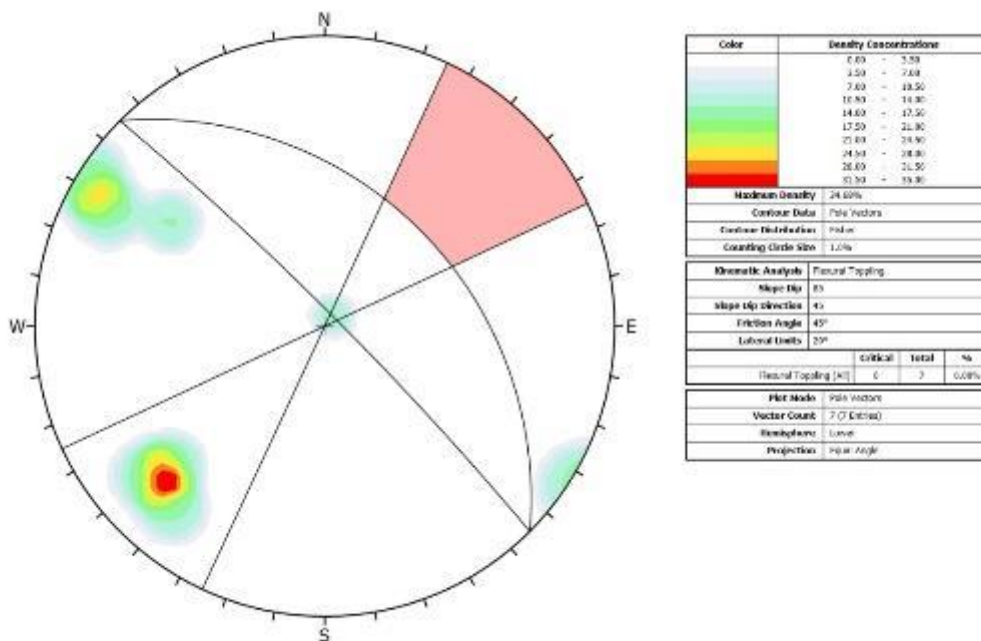


Figura 67: Ribaltamento flessionale

Passando al ribaltamento di blocchi rigidi (figura 66) ed al ribaltamento flessionale (figura 67) è stato osservato che il ribaltamento può essere dato dalla famiglia 1 di discontinuità, cioè la stessa che potrebbe essere soggetta a scivolamento piano. Non si sono riscontrate criticità per quel che riguarda il ribaltamento flessionale.

Unendo i risultati ottenuti alle osservazioni fatte in situ è stato possibile affermare che certamente il versante potrebbe soffrire di fenomeni di instabilità: infatti, alla base della scarpata si rinvengono diversi blocchi ormai distaccati da tempo, a testimonianza di

fenomeni di instabilità passati. La maggior parte di questi sembrano aver subito un fenomeno di scivolamento, infatti le fratture sono dalla parte del versante, che potrebbe essere dunque il cinematismo principale, pur non potendo del tutto escludere frequenti fenomeni di ribaltamento.

5.2 Modello geotecnico

Il modello geotecnico è stato creato riassumendo e selezionando le informazioni raccolte e formulando ipotesi ad integrazione dei dati incompleti.

La prima scelta effettuata è stata la geometria del modello: è stata adottata una sezione 2D passante per la tomba dei Vasi Dipinti con una immersione di 135° . La sezione comprende parte del Macco e parte delle argille sottostanti e prosegue oltre la tomba all'interno del versante per circa 16 m. In figura 68 viene riportata sezione 2D.

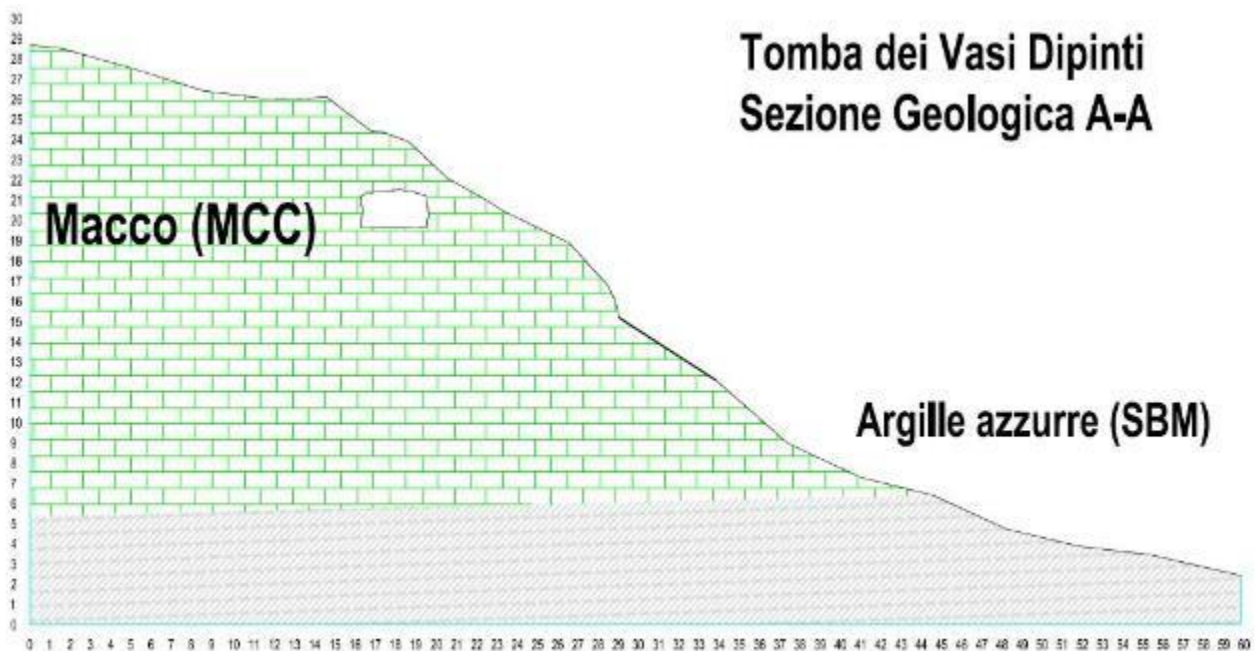


Figura 68: Sezione geologica adottata per il modello geotecnico

Oltre alla sezione in figura 68, è stata creata un'altra sezione del tutto identica che comprende anche la discontinuità passante per la tomba dei Vasi Dipinti riportata in figura 69. La discontinuità è stata inserita all'interno del modello con un'inclinazione apparente di 75° , ricavata dal confronto delle giaciture della discontinuità stessa e della sezione in un reticolo stereografico. Essendo le immersioni pressoché perpendicolari tra loro, l'inclinazione apparente della discontinuità coincide con la media dell'inclinazione delle discontinuità della famiglia 1: questo è un aspetto importante perché ha permesso di studiare in maniera più appropriata e realistica il comportamento della discontinuità e della tomba.

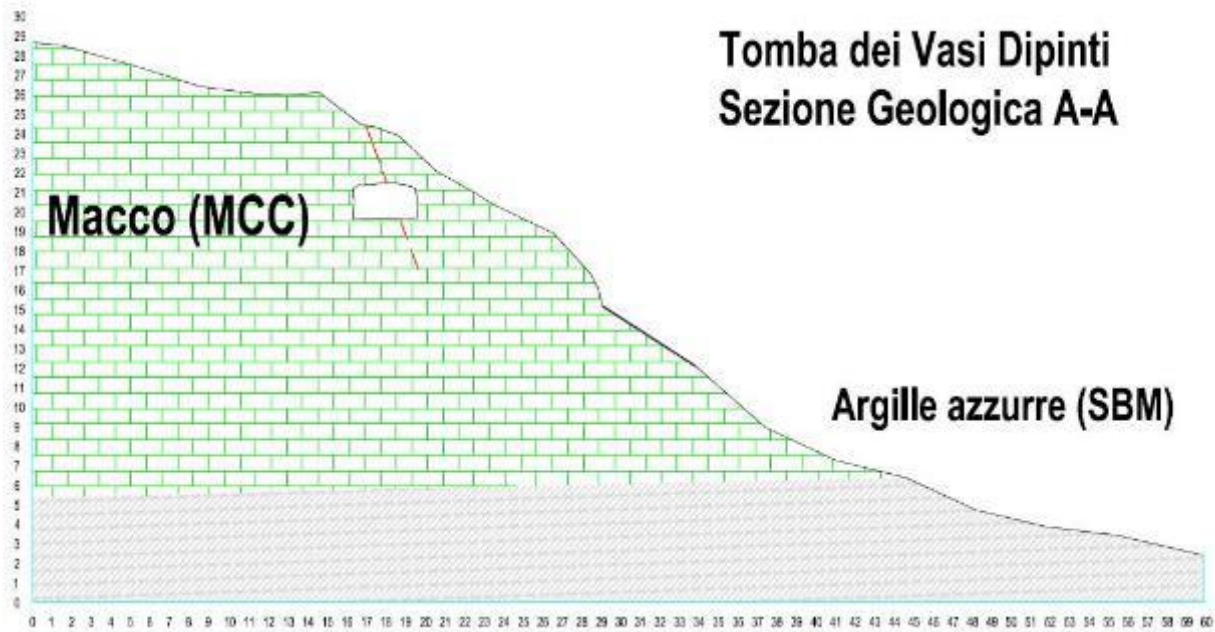


Figura 69: Sezione geologica adottata per il modello geotecnico con discontinuità

I criteri di resistenza sono stati già esposti nel capitolo precedente. In tabella 26 vengono illustrati i parametri utilizzati per i vari materiali in condizioni asciutte e saturate per i criteri loro associati.

Molti dei dati presentati in tabella 26 sono già stati discussi, gli altri vengono ora brevemente esposti.

Il coefficiente di Poisson è pari a 0,3 per tutti i materiali, non avendo infatti modo di ricavarlo diversamente si è deciso di adottare un coefficiente medio.

Per il materiale roccioso e per la discontinuità il modulo di Young è stato ricavato considerando la relazione proposta da Deere-Miller (figura 70), che associa la resistenza a compressione uniassiale al modulo elastico e mostra come questi siano legati dal rapporto di modulo. Nel caso in esame a partire dalla resistenza a compressione uniassiale media (4 MPa) ottenuta dai campioni utilizzati per la costruzione dei criteri e considerando un rapporto di modulo medio valido per le calcareniti pari a 350, è stato ottenuto un modulo di Young di 1,5 GPa. Mentre per l'argilla il valore adottato è di 100 MPa, che è stato considerato valido per un'argilla leggermente sovra consolidata.

materiale roccioso (Mohr-Coulomb)				
c (MPa)	ϕ (gradi)	σ_t (MPa) (cut-off)	E (GPa)	ν
0,776	36,760	0,388	1,5	0,3

materiale roccioso saturo (Mohr-Coulomb)				
c (MPa)	ϕ (gradi)	σ_t (MPa) (cut-off)	E (GPa)	ν
0,543	36,760	0,271	1,5	0,3

discontinuità (Mohr-Coulomb)				
c (MPa)	ϕ (gradi)	σ_t (MPa)	E (GPa)	ν
0,784	18,727	0	1,5	0,3

ammasso roccioso (Mohr-Coulomb)				
c (MPa)	ϕ (gradi)	σ_t (MPa) (cut-off)	E (GPa)	ν
0,164	38,45	0,082	3	0,3

ammasso roccioso saturo (Mohr-Coulomb)				
c (MPa)	ϕ (gradi)	σ_t (MPa) (cut-off)	E (GPa)	ν
0,115	38,45	0,057	3	0,3

argilla (modello lineare elastico)	
E (MPa)	ν
100	0,3

Tabella 26: Parametri adottati per i materiali

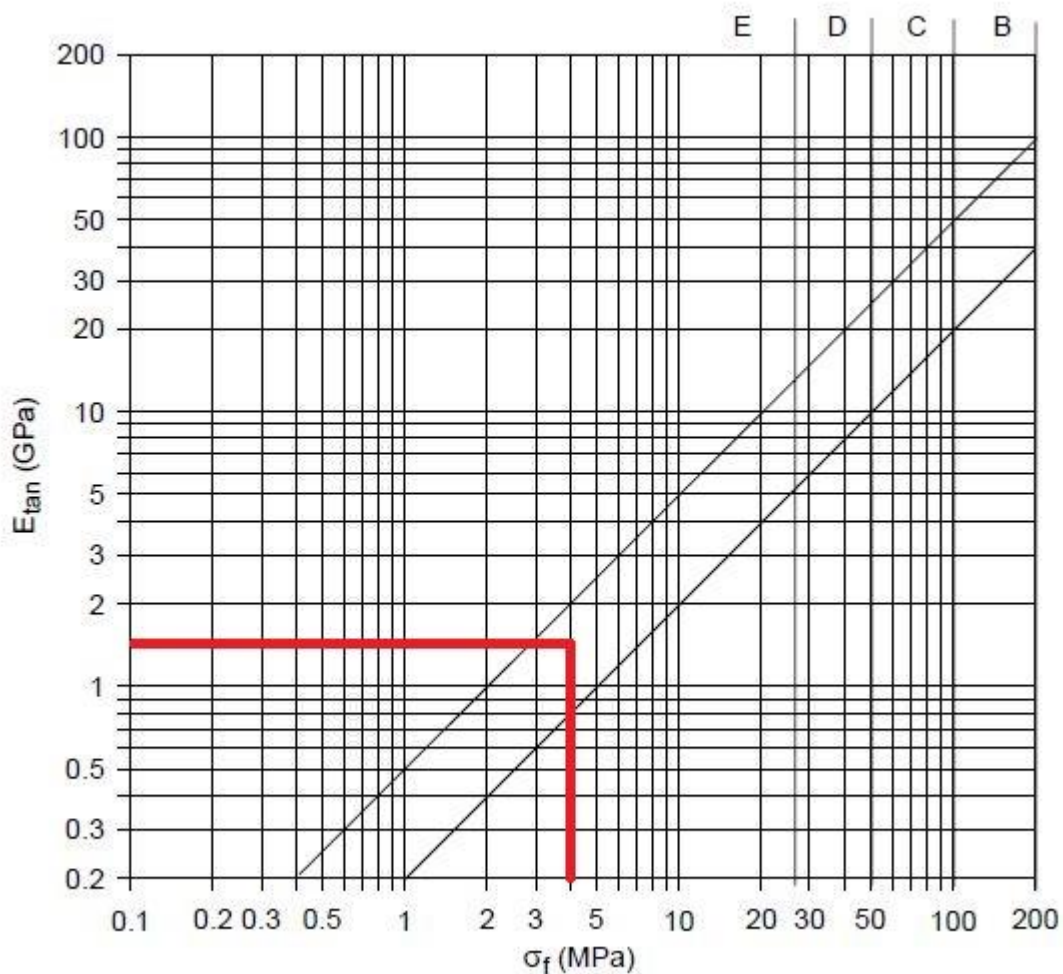


Figura 70: Determinazione del modulo di Young attraverso il grafico di Deere-Miller

I criteri di resistenza per i materiali saturi, in mancanza di prove triassiali in condizioni sature, sono stati ricavati tramite la riduzione della coesione in condizioni asciutte del 30%. Un valore pari al 30% è stato ricavato dal rapporto tra i dati di resistenza a trazione in condizioni sature e quelli in condizioni asciutte.

I parametri di resistenza per la discontinuità sono stati ricavati tramite la linearizzazione del criterio di Barton, valido per le discontinuità, attraverso un criterio di Mohr-Coulomb. L'approssimazione è stata fatta nell'intervallo tensionale 0-40 kPa (figura 71). Il criterio di Barton è descritto dalla (5.1):

$$\tau = \sigma_n * \tan[\phi_r + JRC * \log_{10}(\frac{JCS}{\sigma_n})] \quad (5.1)$$

dove come JCS (Joint Coefficient Strenght) è stata assunta la resistenza a compressione valida per il materiale asciutto, pari a 3,095 MPa, e dove ϕ_r è l'angolo di attrito residuo, per il quale è stato scelto un valore pari al 20% dell'angolo di attrito per il materiale asciutto.

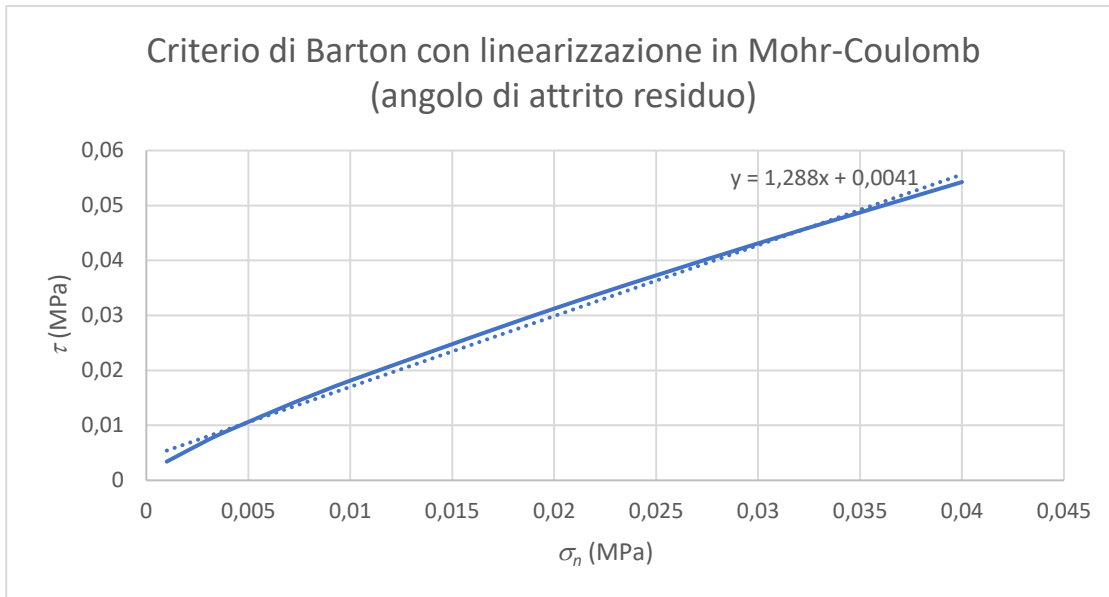


Figura 71: Criterio di Barton e relativa approssimazione nel criterio di Mohr-Coulomb

5.3 Simulazione in Plaxis

Plaxis2D, in dotazione del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali dell'università di Bologna, è stato il programma utilizzato per effettuare la simulazione numerica. Esso permette una simulazione agli elementi finiti per tipici problemi geotecnici.

Come condizioni al contorno si sono bloccati gli spostamenti alla base della sezione e nella parte sinistra della sezione che taglia il versante si sono bloccati gli spostamenti orizzontali. Il reticolo di calcolo è stato creato nel programma impostando una discretizzazione fitta (figure 72 e 73).

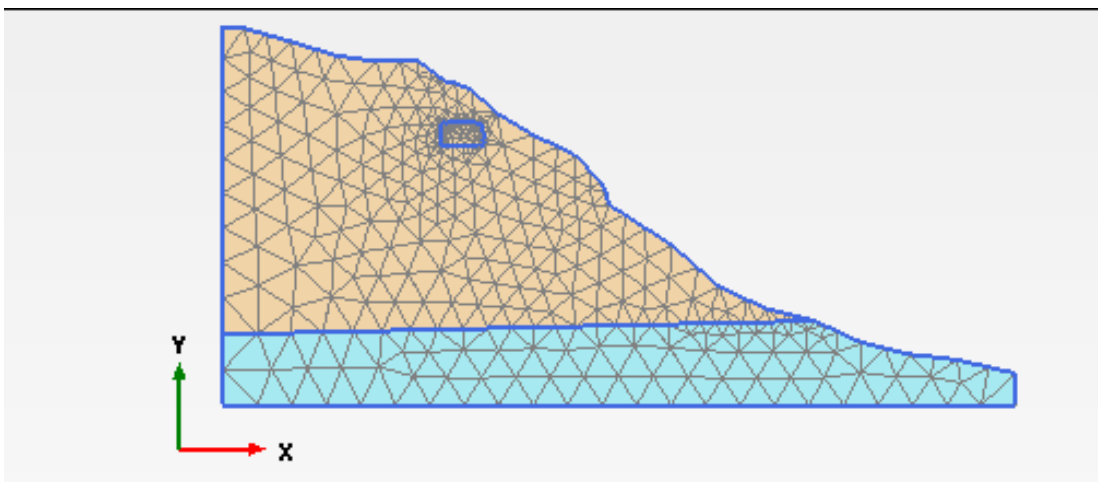


Figura 72: Visualizzazione della mesh creta

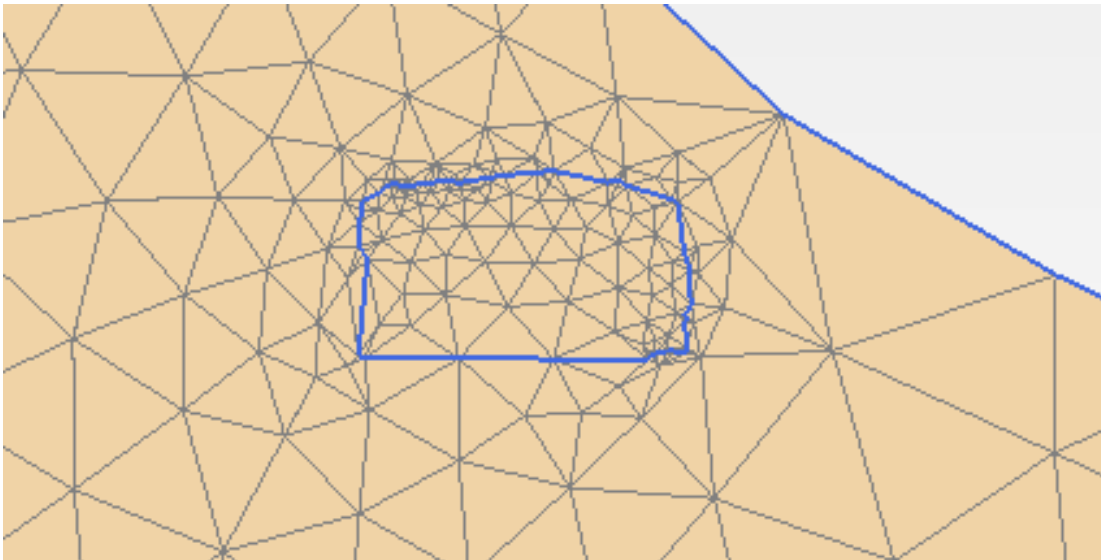


Figura 73: Dettaglio mesh nell'intorno della tomba

Di seguito vengono riportate le simulazioni effettuate ed i relativi risultati.

Prima simulazione

Per la prima simulazione viene utilizzato il modello in figura 69, cioè quello privo di discontinuità. Il materiale utilizzato per descrivere il comportamento del Macco è il materiale roccioso in condizione asciutte.

- Fase iniziale: per simulare il peso del terreno è stato impostato come tipo di calcolo il gravity loading (con successivo reset degli spostamenti a 0).
- Fase 1: viene simulato lo scavo della tomba andando a togliere il terreno all'interno della stessa.

La “fase iniziale” e la “fase 1” sono le stesse per tutte le simulazioni, quindi non verranno più riportate.

La prima simulazione va a buon fine, cioè non vengono superati i limiti di resistenza dei criteri ed il versante risulta stabile.

Si riportano in figura 74 la deformata della maglia, in figura 75 le deformazioni di taglio, in figura 76 le curve di isolivello degli spostamenti ed in figura 77 i vettori di spostamento. Le immagini sono tutte incentrate nell'intorno dell'ipogeo della tomba per poter apprezzare meglio i particolari e perché per il resto non si hanno risultati interessanti.

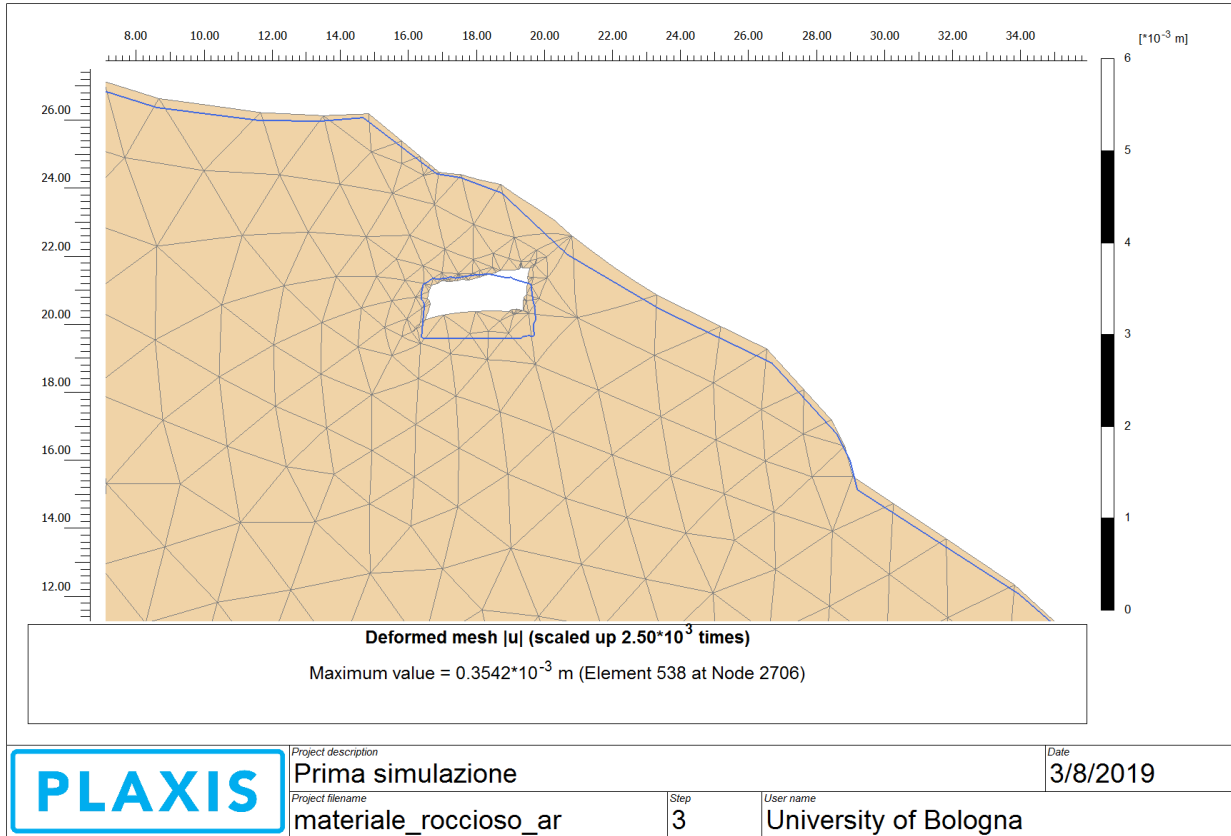


Figura 74: Mesh deformata

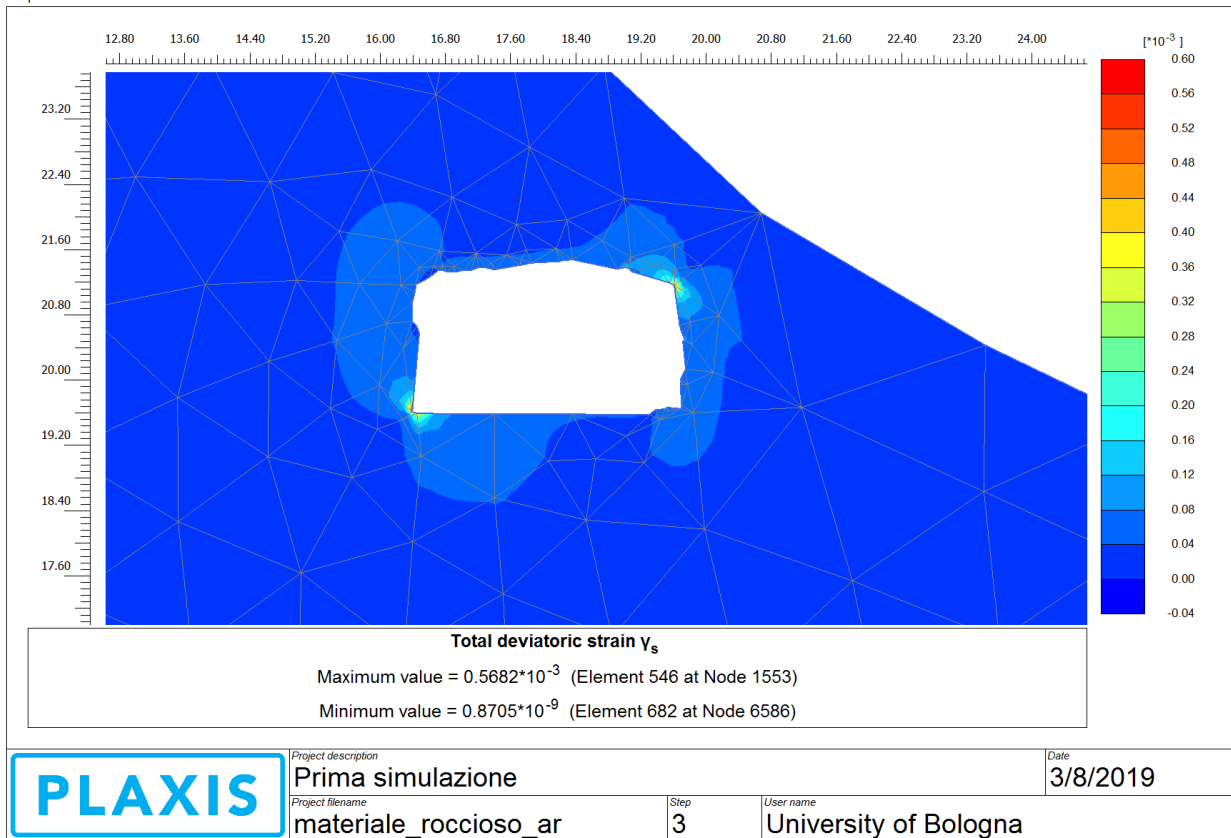


Figura 75: Deformazioni di taglio

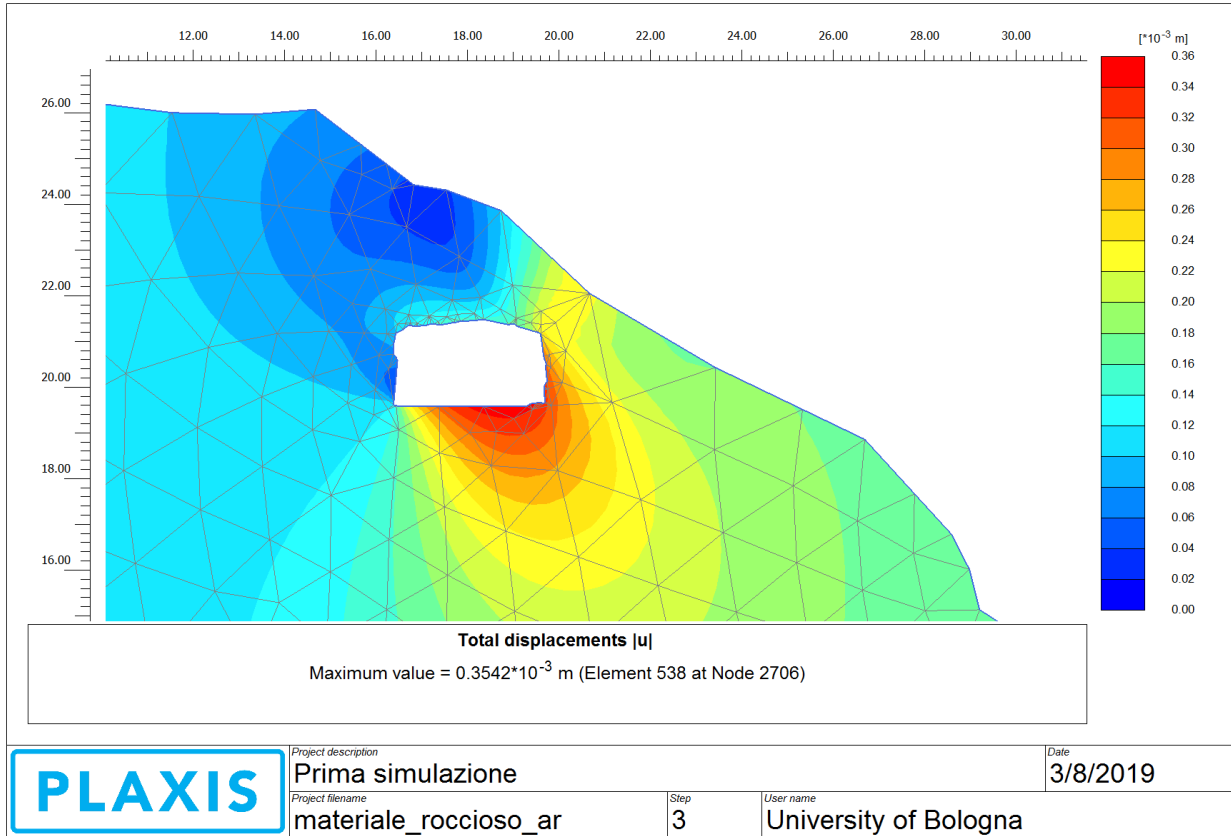


Figura 76: Curve di isolivello degli spostamenti

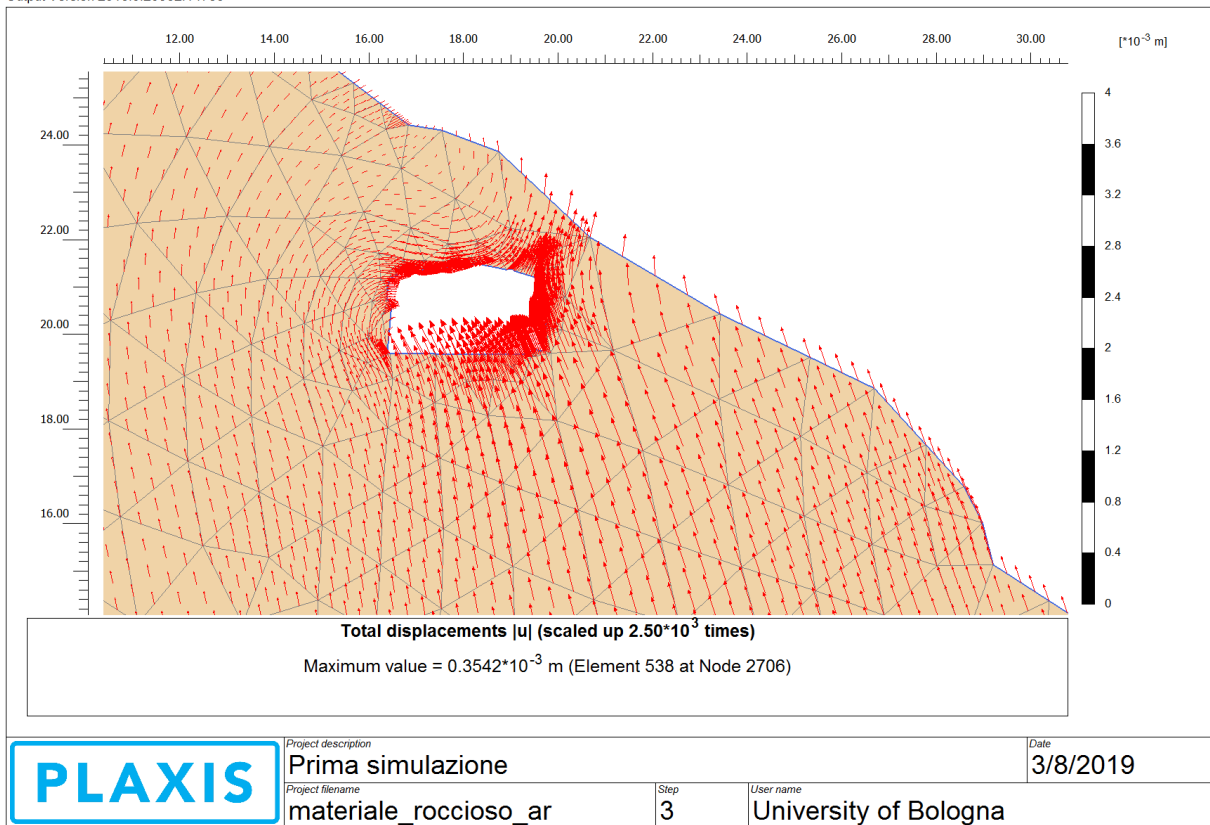


Figura 77: Vettori di spostamento

Lo spostamento massimo è di 0,35 mm e non si riscontrano punti di plasticizzazione. Tuttavia, si può osservare una concentrazione, anche se modesta, delle deformazioni di taglio in corrispondenza degli spigoli della tomba.

Seconda simulazione

La seconda simulazione è esattamente uguale alla prima, ma il criterio utilizzato per il macco è quello del materiale roccioso in condizioni sature.

La simulazione raggiunge condizioni di equilibrio.

I risultati sono riassunti in figura 78 con riferimento alla deformata della maglia, in figura 79 alle deformazioni di taglio, in figura 80 alle curve di isolivello degli spostamenti ed in figura 81 ai vettori di spostamento.

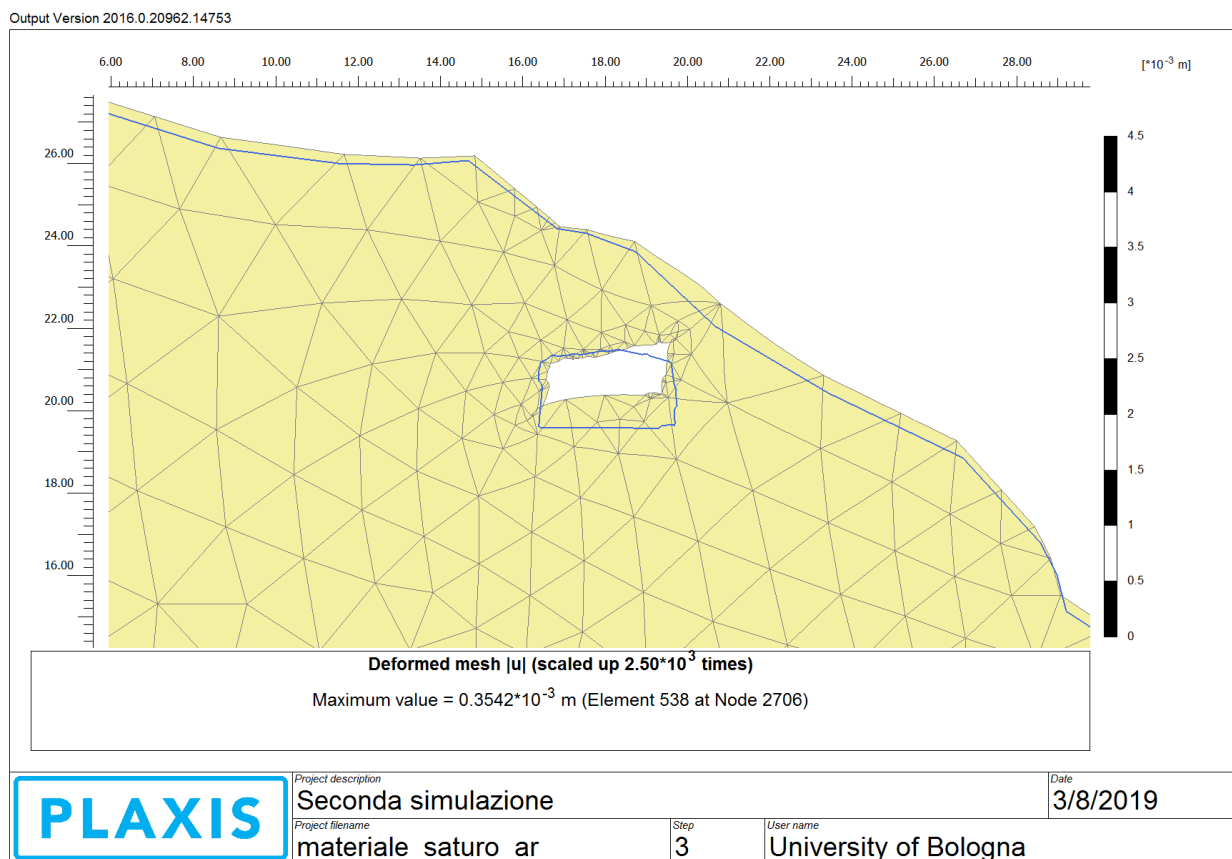


Figura 78: Mesh deformata

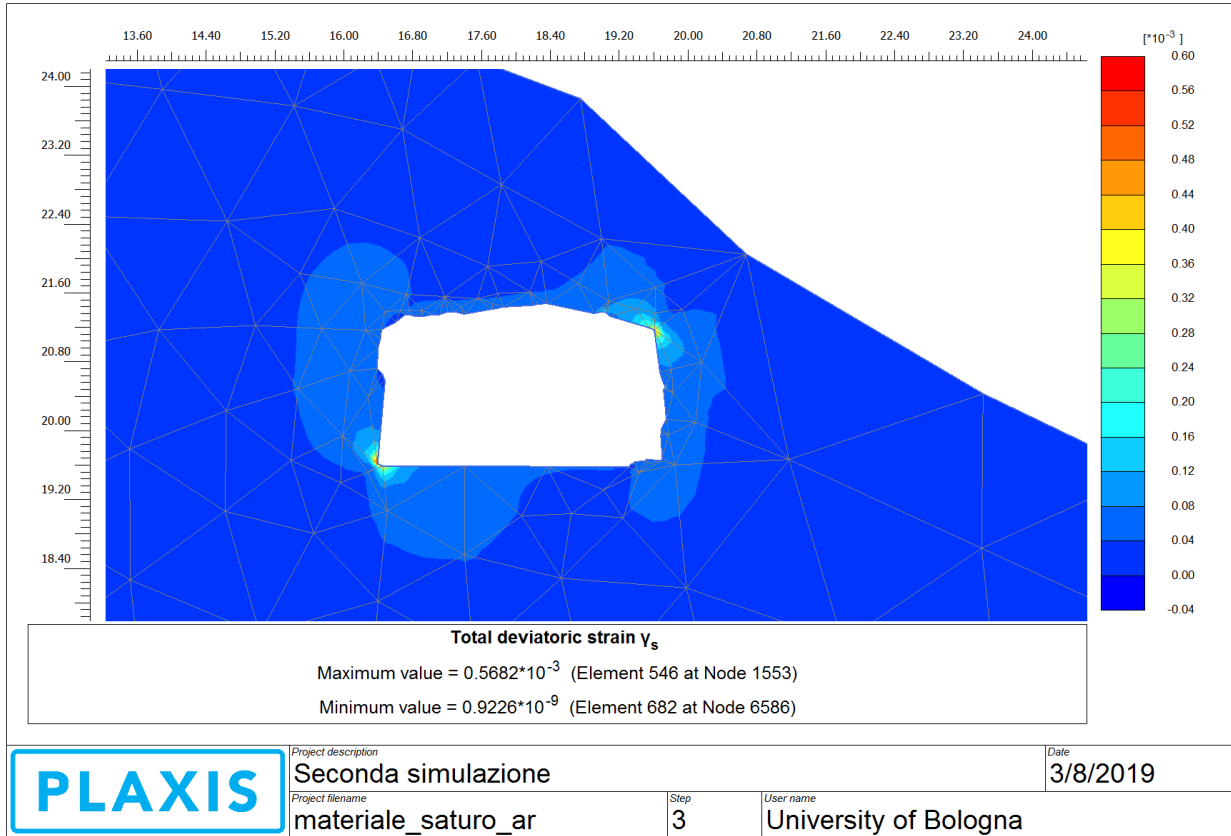


Figura 79: Deformazioni di taglio

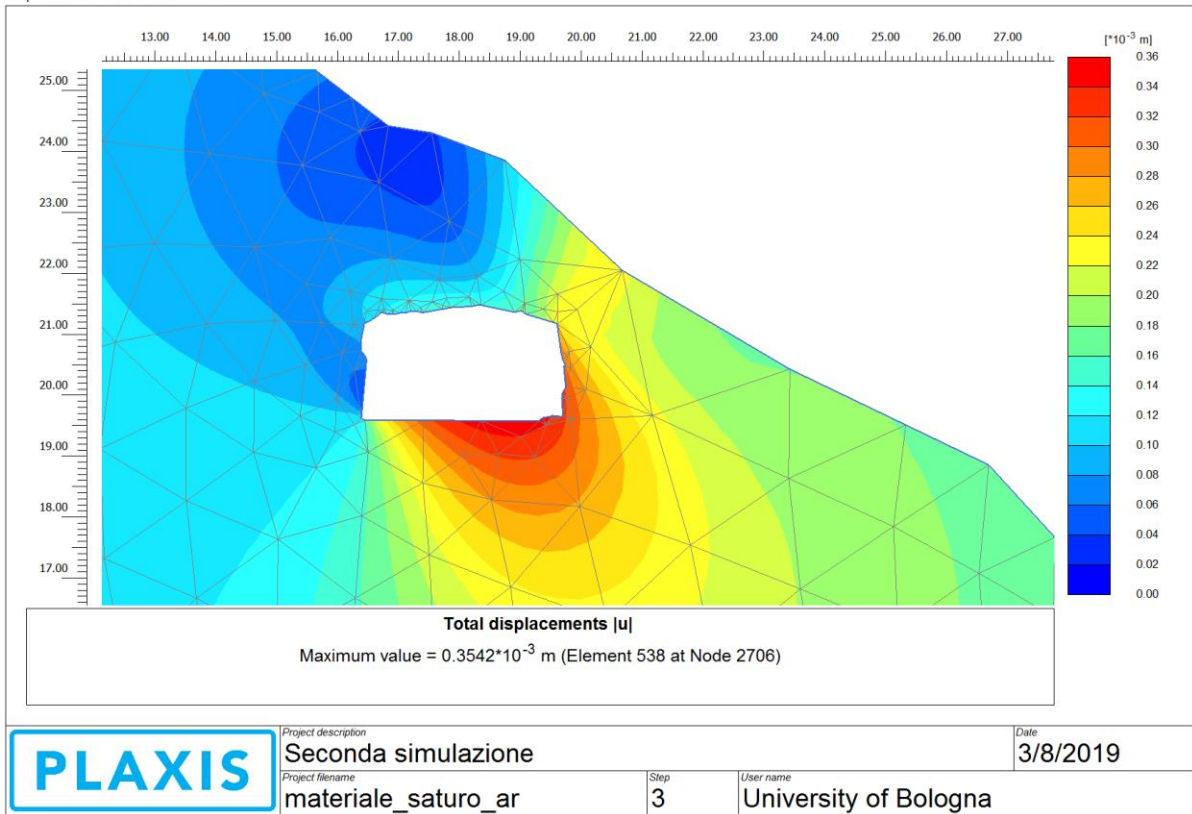


Figura 80: Curve di isolivello degli spostamenti

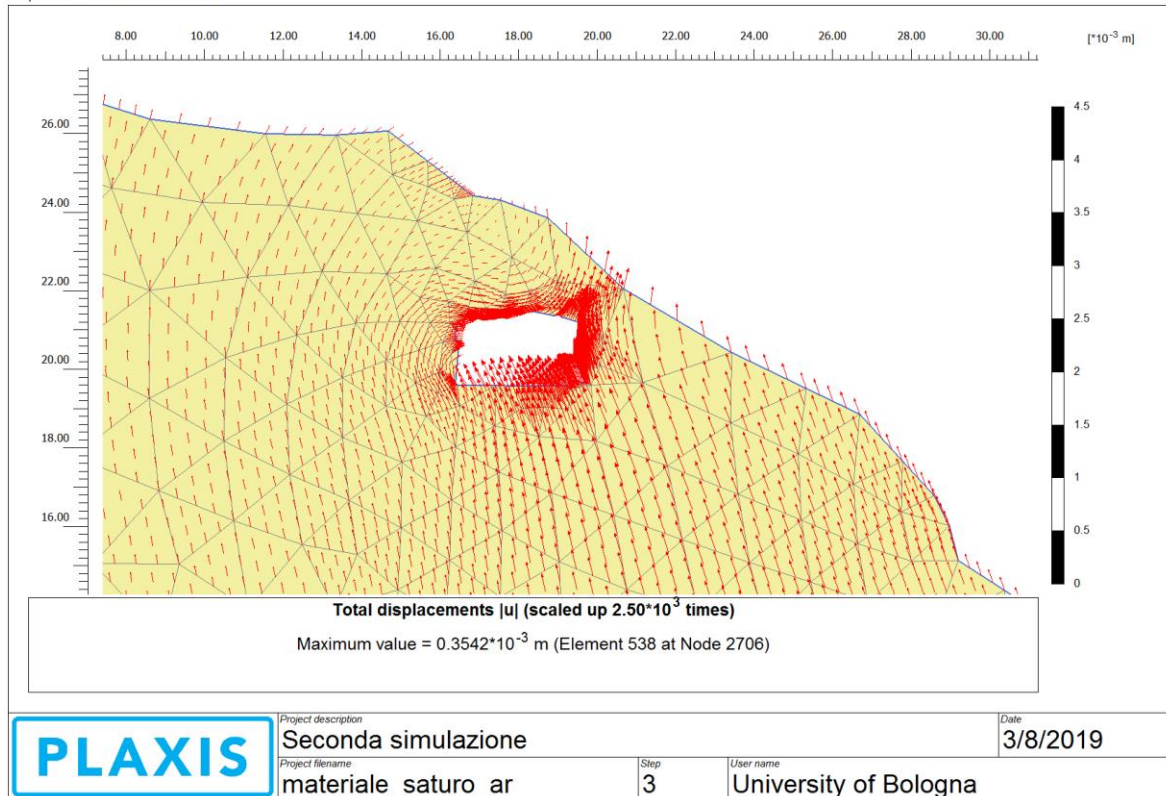


Figura 81: Vettori di spostamento

Lo spostamento massimo è di 0,35 mm e non si riscontrano punti di plasticizzazione. In generale i risultati ottenuti sono molto simili a quelli della prima simulazione.

Terza simulazione

La terza simulazione è di nuovo come la prima, ma il criterio di resistenza utilizzato per il Macco è quello dell'ammasso roccioso in condizioni asciutte.

Di nuovo, la simulazione ha portata ad un risultato positivo.

Si riportano in figura 82 la deformata della maglia, in figura 83 le deformazioni di taglio, in figura 84 le curve di isolivello degli spostamenti, in figura 85 i vettori di spostamento ed in figura 86 i punti di plasticizzazione.

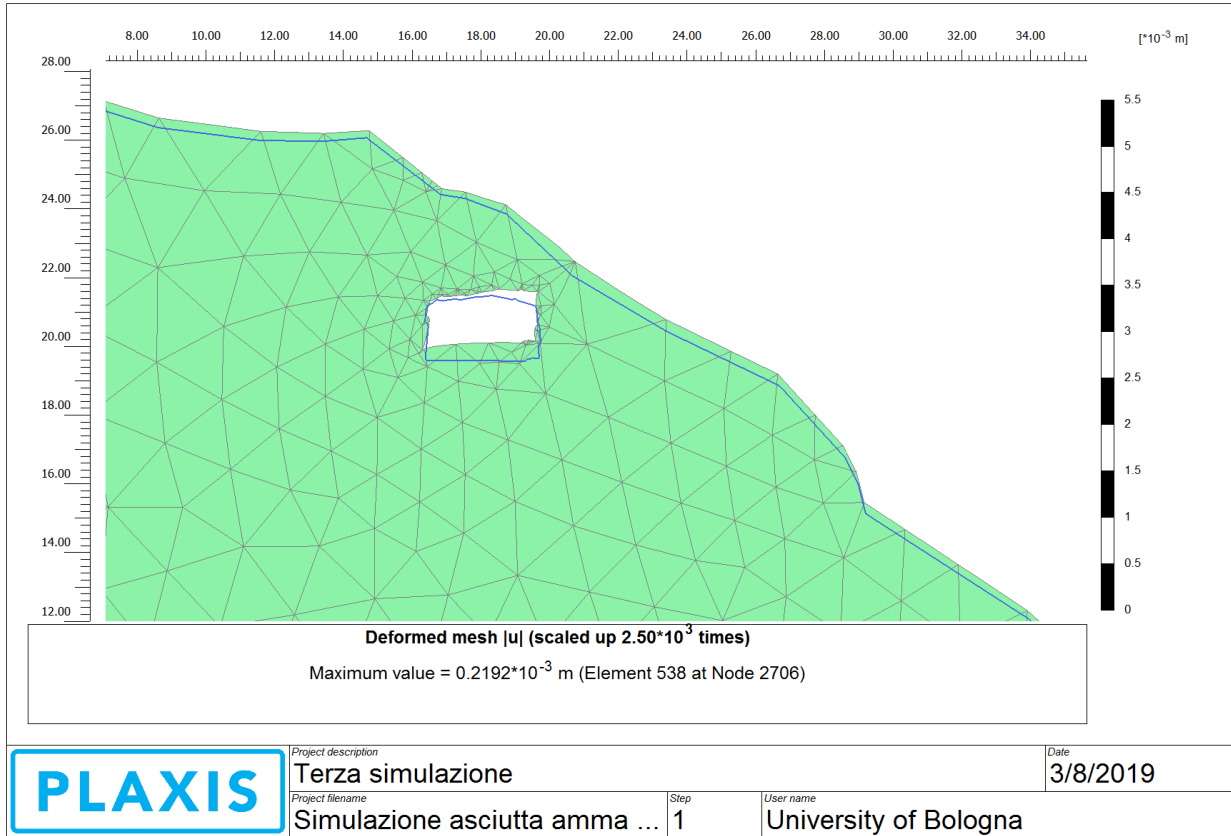


Figura 82: Mesh deformata

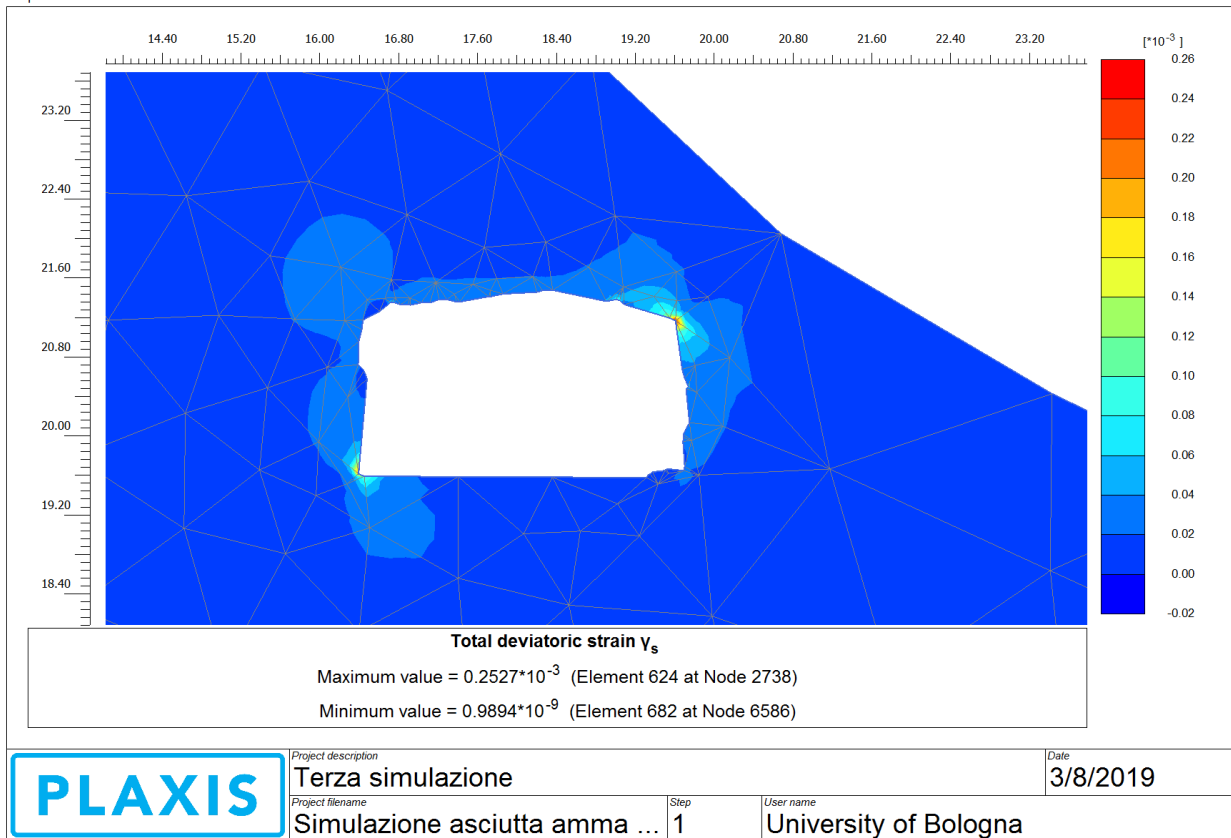


Figura 83: Deformazioni di taglio

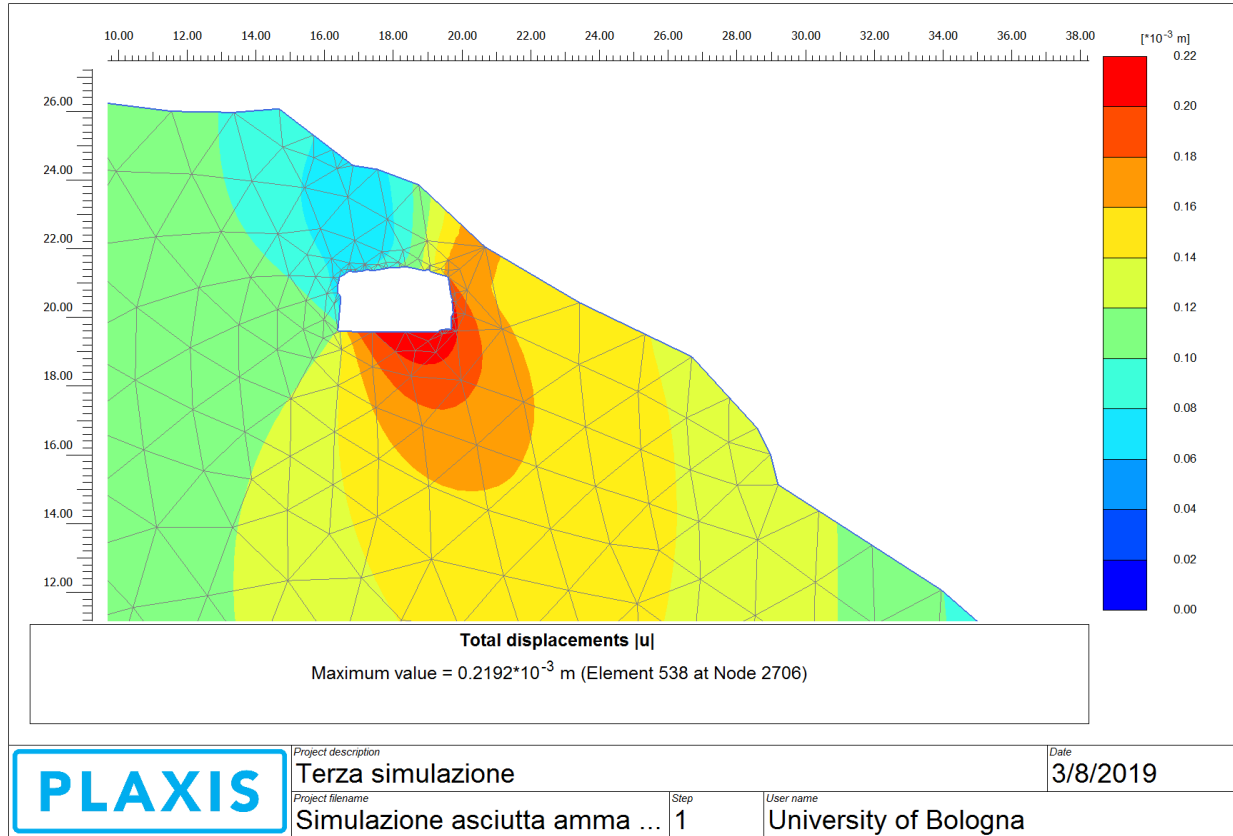


Figura 84: Curve di isolivello degli spostamenti

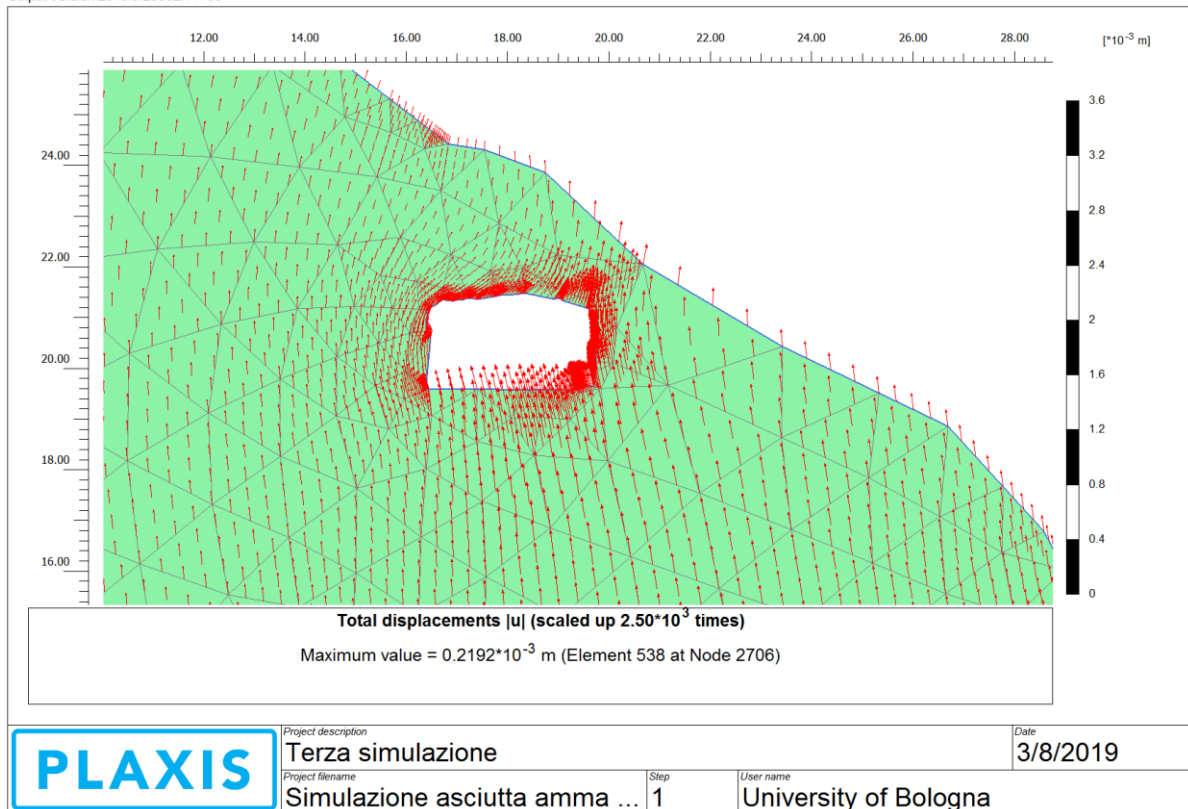


Figura 85: Vettori di spostamento

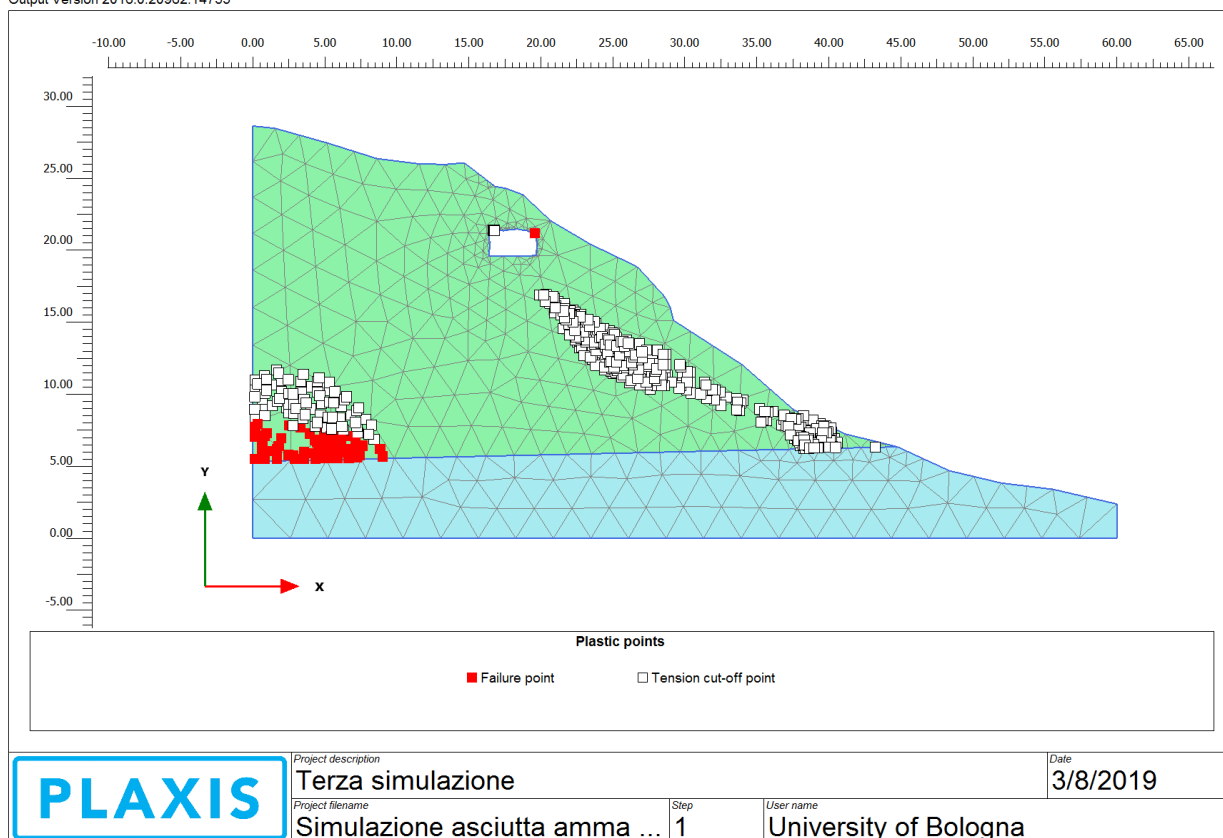


Figura 86: Punti di plasticizzazione

In questo caso sono stati riscontrati diversi punti di plasticizzazione e diversi punti in cui si raggiunge la resistenza a trazione, di particolare interesse sono quelli che si concentrano lungo la scarpata e che potrebbero portare allo sviluppo di fratture con una giacitura tipica delle discontinuità della famiglia 1.

Lo spostamento massimo è di 0,22 mm.

Quarta simulazione

La quarta simulazione è come le precedenti, ma il criterio di resistenza utilizzato per il macco è quello dell'ammasso roccioso in condizioni sature.

La simulazione raggiunge senza problemi le condizioni di equilibrio.

Come nelle precedenti simulazioni si riportano i risultati nello stesso ordine: in figura 87 la deformata della maglia, in figura 88 le deformazioni di taglio, in figura 89 le curve di isolivello degli spostamenti, in figura 90 i vettori di spostamento ed in figura 91 i punti di plasticizzazione. Le immagini, ad esclusione di quella riguardante la plasticizzazione, sono tutte incentrate nell'intorno dell'ipogeo della tomba per poter apprezzare meglio i particolari e perché per il resto non si hanno risultati di particolare interesse.

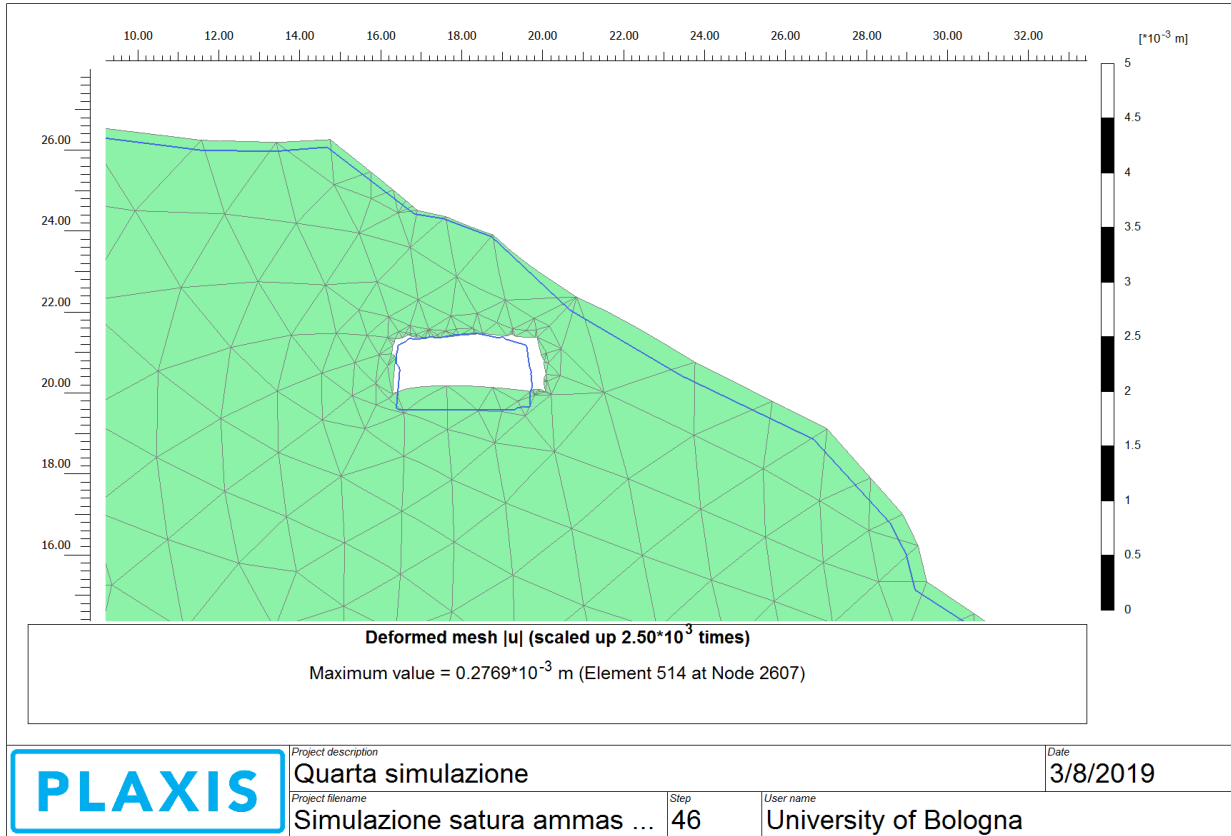


Figura 87: Mesh deformata

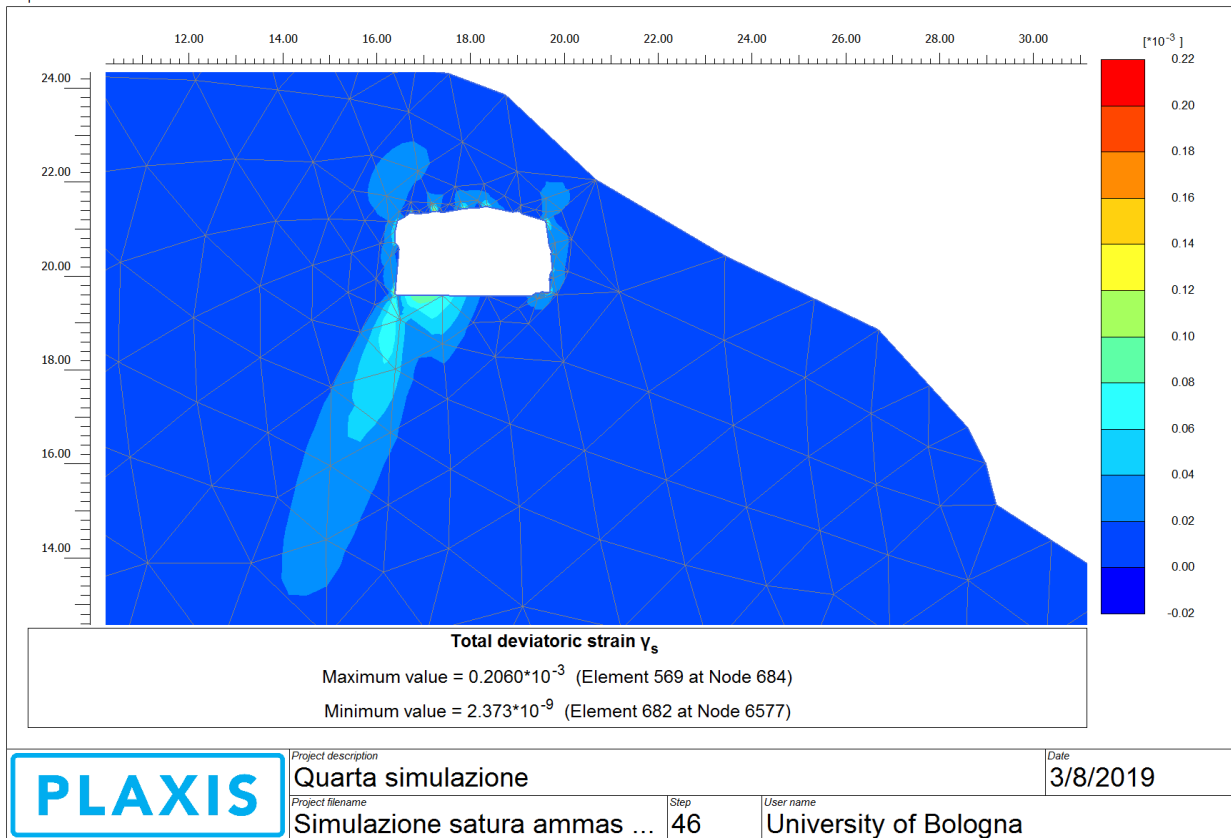


Figura 88: Deformazioni di taglio

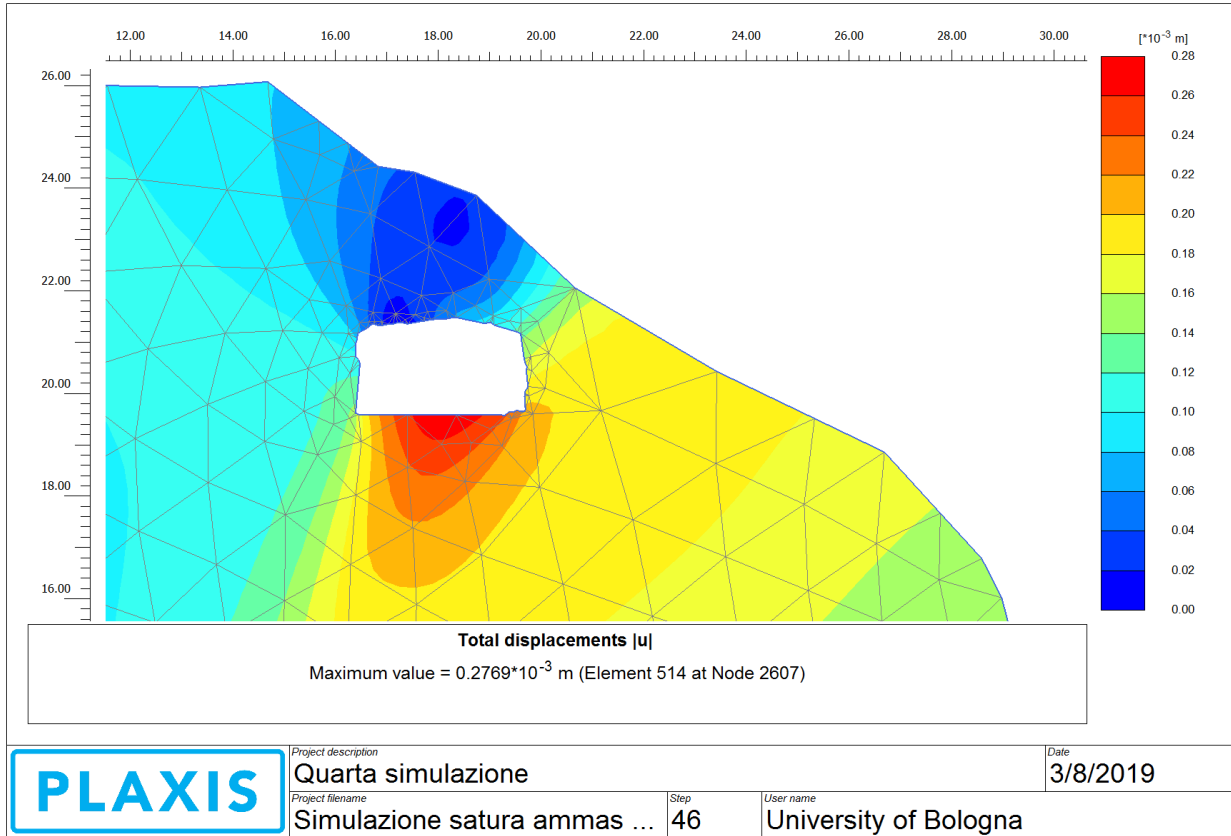


Figura 89: Curve di isolivello degli spostamenti

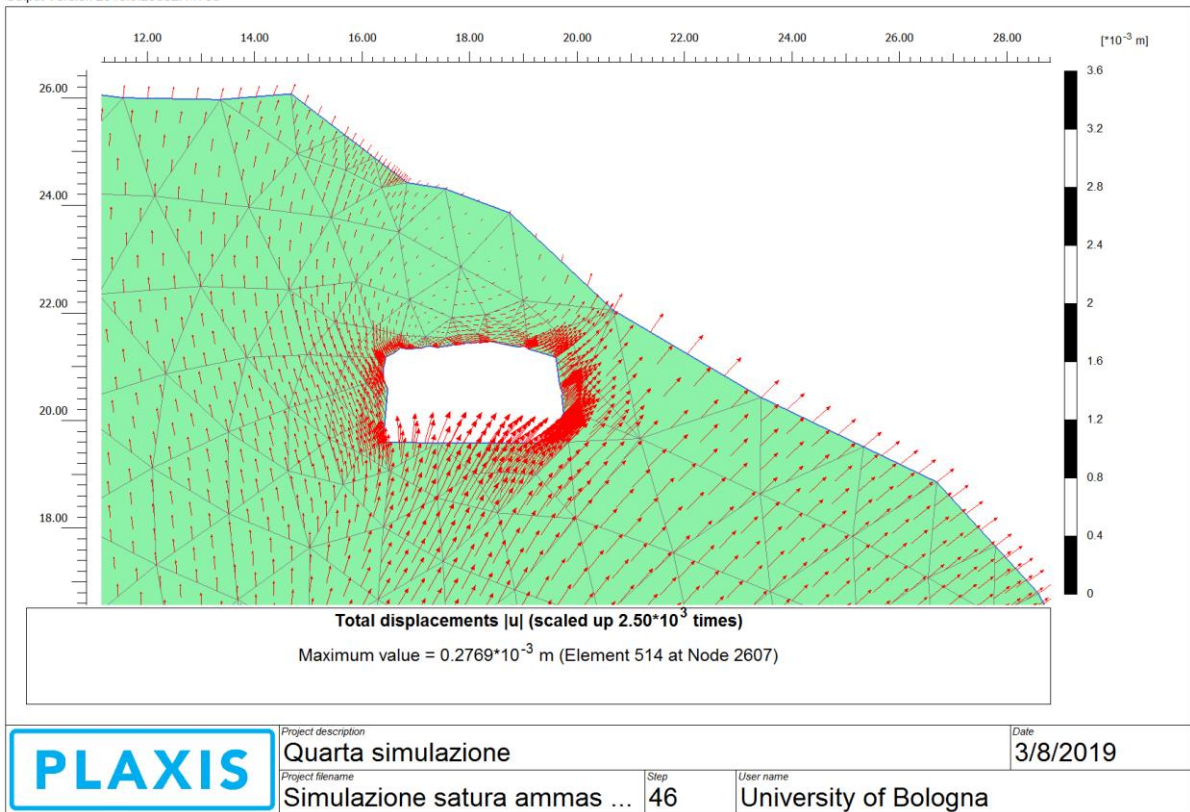


Figura 90: Vettori di spostamento

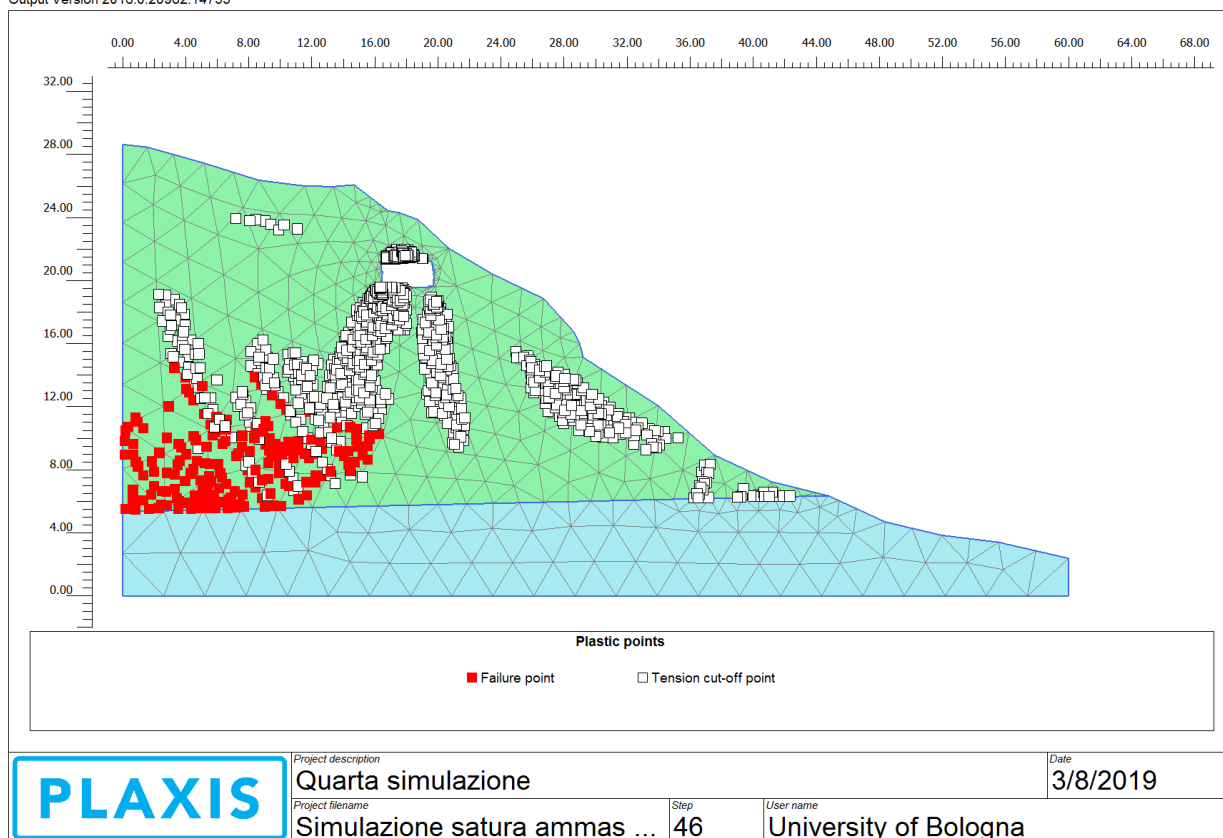


Figura 91: Punti di plasticizzazione

Anche in questo caso si sono riscontrati molti punti di plasticizzazione e altri in cui viene raggiunta la resistenza a trazione, questi ultimi si concentrano principalmente sotto la cavità della tomba zona in cui si concentrano anche le deformazioni di taglio.

Lo spostamento massimo è di circa 0,28 mm.

Quinta simulazione

Per la quinta simulazione viene utilizzato il modello geometrico in figura 69, quello che considera anche la discontinuità passante per la tomba. Il criterio di resistenza utilizzato per il Macco è inizialmente quello del materiale roccioso in condizioni asciutte. Le prime due fasi non vengono riportate perché uguali alle precedenti. Si hanno a seguire:

- Fase 2: viene attivata la discontinuità con il relativo criterio di resistenza.
- Fase 3: il criterio di resistenza del macco viene cambiato da asciutto a quello valido in condizioni sature.

La simulazione raggiunge le condizioni di equilibrio.

Si riportano in figura 92 la deformata della maglia, in figura 93 le deformazioni di taglio, in figura 94 le curve di isolivello degli spostamenti, in figura 95 i vettori di spostamento.

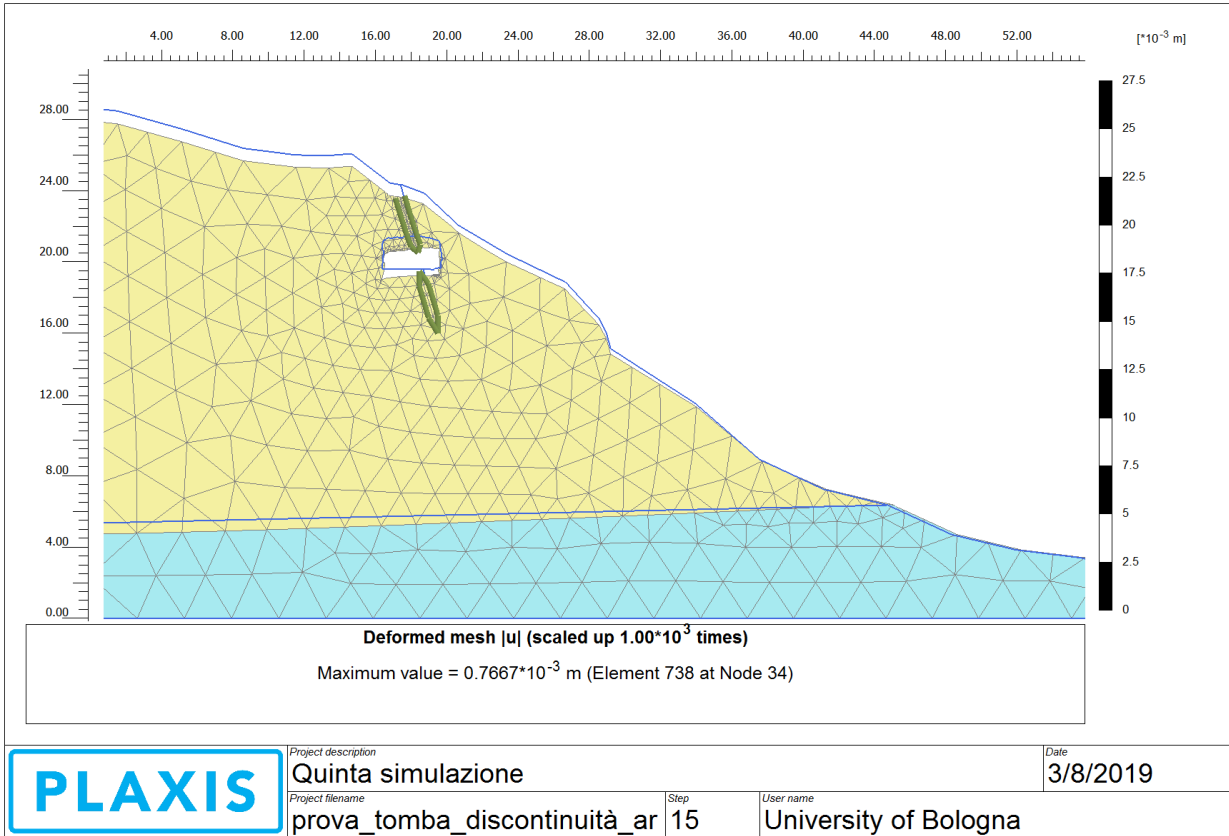


Figura 92: Mesh deformata

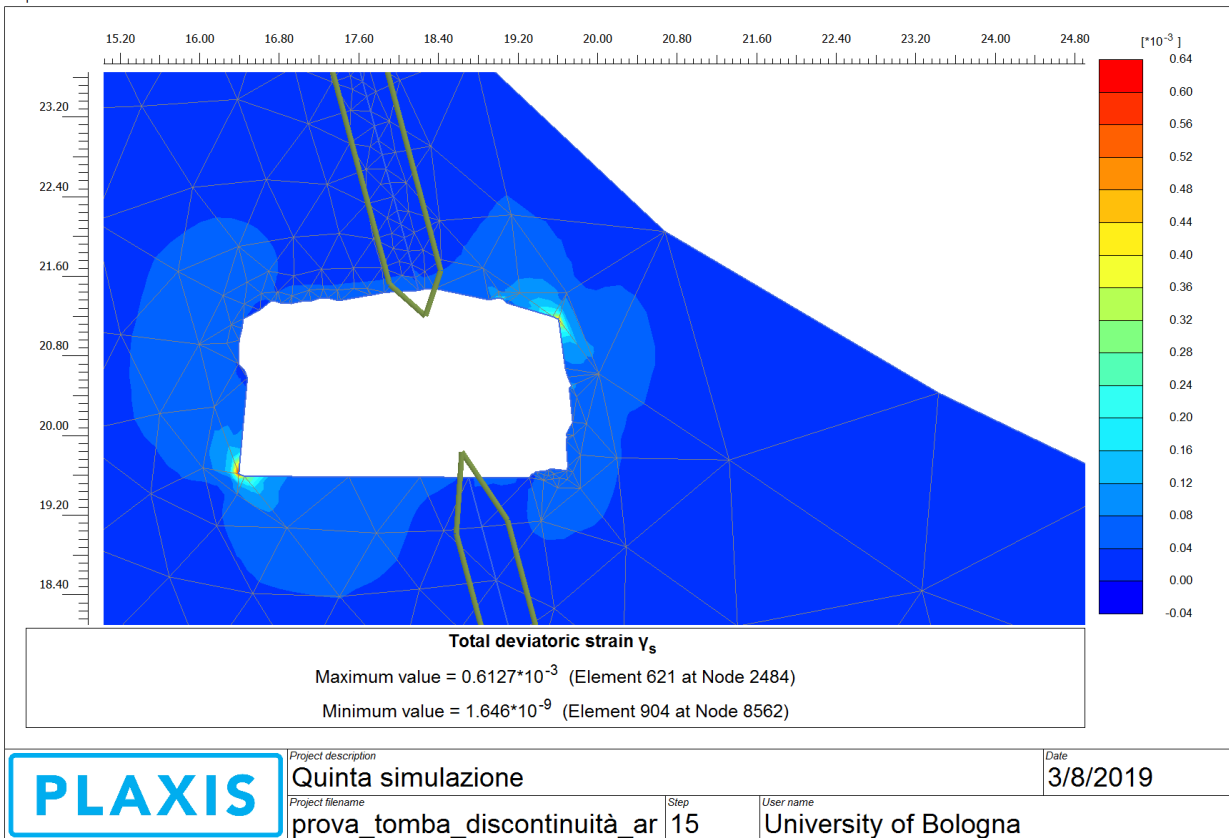


Figura 93: Deformazioni di taglio

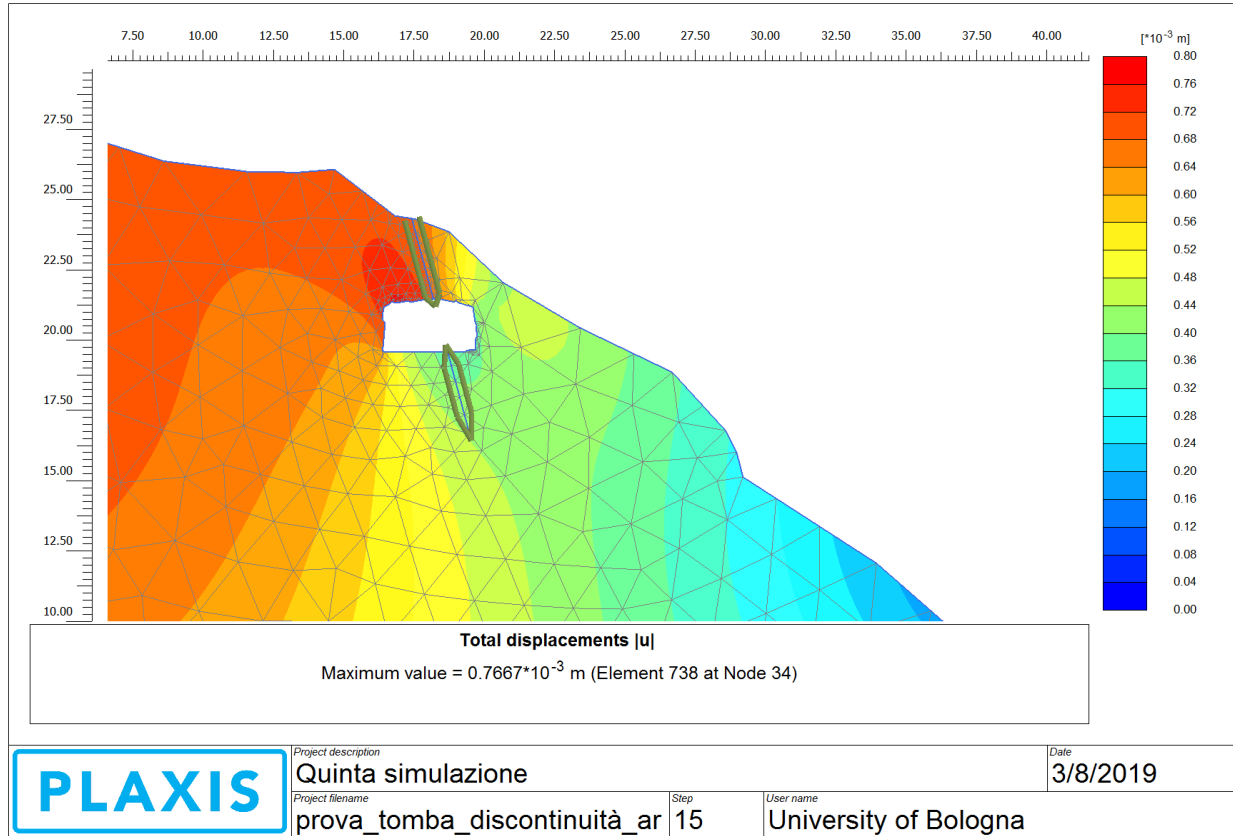


Figura 94: Curve di isolivello degli spostamenti

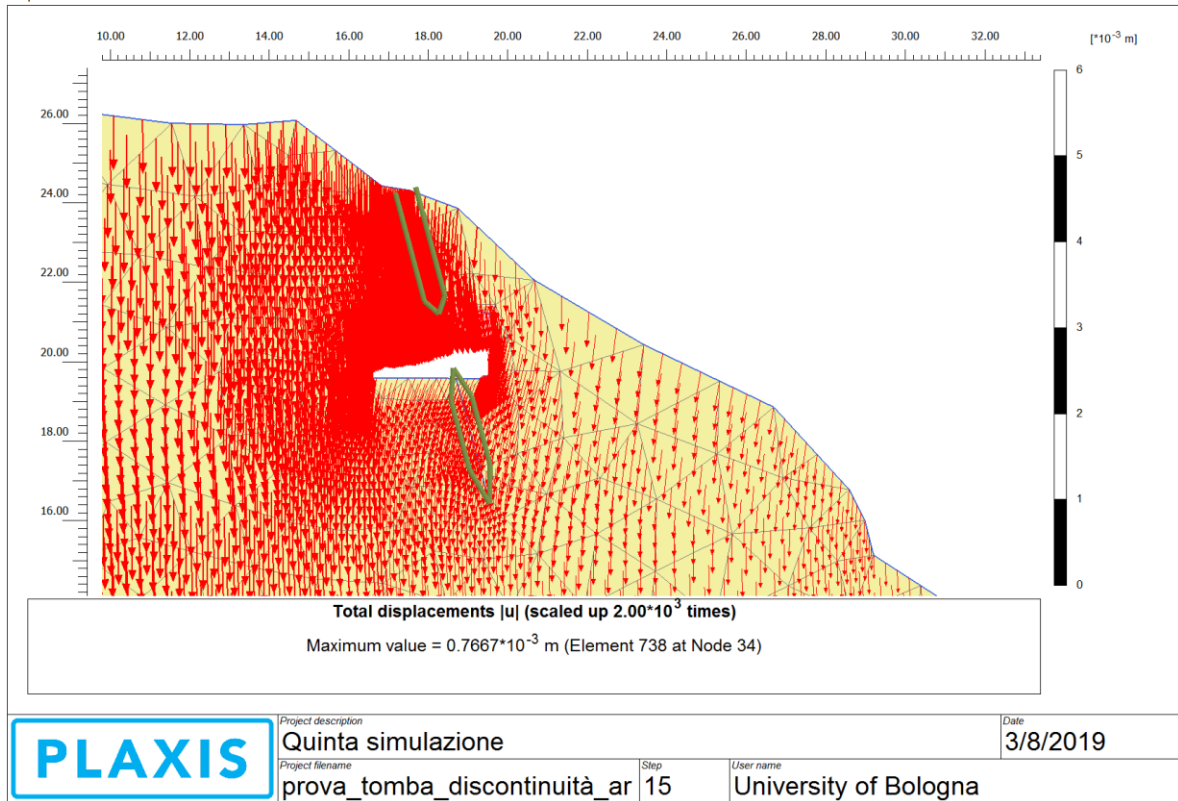


Figura 95: Vettori di spostamento

Non sono stati riscontrati in questo caso particolari punti di plasticizzazione o di raggiungimento della resistenza a trazione, ma si hanno degli spostamenti maggiori rispetto agli altri casi, con uno spostamento massimo pari a 0,77 mm.

5.4 Conclusioni

Dalle simulazioni effettuate è stata constatata la stabilità del versante che include la tomba dei Vasi Dipinti. Inoltre non sono stati riscontrati pericoli immediati per la tomba stessa: infatti, gli spostamenti non sono elevati (sempre inferiori al mm). Le immagini, specialmente quelle rappresentanti i vettori di spostamento, mostrano che la cavità della tomba tende a schiacciarsi spingendo la parete destra verso l'esterno del versante e favorendo quindi i cinematismi sopracitati, quali lo scivolamento piano e lo scivolamento di blocchi.

Conclusioni

In questo capitolo vengono riassunte le informazioni e i risultati principali ottenuti durante il lavoro di tesi, utili alla determinazione delle condizioni di stabilità del versante roccioso nel quale è ubicata la tomba dei Vasi Dipinti oggetto di studio.

La Necropoli dei Monterozzi è un altopiano formato da una calcarenite (Macco di Tarquinia), con un alto grado di fratturazione ed un'elevata permeabilità, poggiante su un substrato costituito da un'argilla sovraconsolidata con uno strato di alterazione di circa un metro. Come descritto e trattato nell'inquadramento geomorfologico, questa condizione ha portato e potrà in futuro favorire lo sviluppo di fenomeni di crollo, ribaltamento e colamenti lenti (*lateral spreading*). Tale fenomeno è stato confermato in zone adiacenti, tramite un'osservazione diretta in situ di massi caduti, ribaltati o semplicemente scivolati dal Macco. Un'ulteriore conferma dei meccanismi di dissesto prevalenti nell'area, è arrivata dall'analisi cinematica del versante effettuata tramite il programma Dips[®], portando in conto le informazioni sulle giaciture delle discontinuità ottenute dal rilievo strutturale. L'analisi ha infatti evidenziato le possibilità di accadimento degli stessi fenomeni ed i cinematismi più ricorrenti, quali lo scivolamento in condizioni piane e lo scivolamento di blocchi.

L'estesa campagna di prove di laboratorio, effettuate sui campioni di roccia, è stata fondamentale per caratterizzare il Macco a livello fisico e meccanico. I risultati delle prove di rottura hanno evidenziato la bassa resistenza della roccia in esame, con valori di resistenza a compressione uniassiale raramente superiori ai 10 MPa (inferiori ai 5 MPa per i blocchi 6, 7 ed 8, più prossimi alla tomba dei Vasi Dipinti). La media dei valori di resistenza a trazione è risultata inferiore ad 1 MPa. In condizioni sature si è osservato un netto peggioramento della resistenza a compressione, che diventa pari a circa un quinto di quella ottenuta in condizioni asciutte. Unendo i dati di resistenza a compressione uniassiale con quelli delle prove triassiali è stato possibile definire il criterio di resistenza del materiale roccioso. Considerando il criterio di Mohr-Coulomb, la coesione è di poco inferiore a 0,8 MPa e l'angolo di attrito è di circa 37°.

Le discontinuità, invece, sono state caratterizzate mediante rilievi in sito della giacitura e della scabrezza. Nello specifico, si sono indagate tre famiglie di discontinuità, tra le quali la famiglia 1 è risultata dare i maggiori problemi di stabilità ed è caratterizzata da immersione e inclinazione medie rispettivamente di 46° e 75° e da un *JRC* medio di 12,5. Ricavando e linearizzando il criterio di Barton valido per le discontinuità si è ottenuto un criterio di Mohr-Coulomb equivalente con coesione pari a 0,8 MPa ed angolo di attrito di 19° circa.

Per l'ammasso roccioso la linearizzazione del modello di Hoek-Brown ha portato ad ottenere un criterio di Mohr-Coulomb con coesione pari a 0,1 MPa ed angolo di attrito 45° circa. Mentre i risultati ottenuti dagli indici di qualità dell'ammasso (*GSI* pari a 64) hanno evidenziato un ammasso con discrete qualità.

Il monitoraggio manuale, effettuato a partire da Gennaio 2018, non ha evidenziato tendenze deformative in atto per quanto riguarda l'apertura delle discontinuità indagate; anzi, ne è stata osservata la sostanziale stabilità nel tempo anche per l'intero ciclo stagionale. I risultati

del monitoraggio manuale confermano l'ipotesi di un quadro fessurativo che si è attivato in concomitanza di particolari condizioni ambientali (estate del 2017) e che attualmente è in quiescenza.

Da quanto premesso si è inizialmente formulata l'ipotesi di un versante stabile nel breve-medio termine. L'ipotesi è stata quindi verificata e confermata dai risultati delle simulazioni numeriche: queste infatti mostrano la generale stabilità del versante, le cui deformazioni non superano il mm (spostamento massimo pari a 0,34 mm).

Dai risultati preliminari, non risultano dunque necessari urgenti interventi di consolidamento cosiddetti strutturali, quali l'applicazione di ancoraggi o barre passive, la realizzazione di diaframmi o paratie di contenimento della parete, per garantire la stabilità del versante e quindi della tomba.

Dovrà invece essere maggiormente indagato il meccanismo di formazione delle discontinuità presenti nel Macco (formazione attraverso un lento processo o derivazione da fenomeni isolati, quali periodi di siccità seguiti da intense piogge), e le cause di possibile riattivazione (es. variazione dei regimi piezometrici nell'area circostante, regimazione e percolazione delle acque meteoriche, infiltrazioni e fenomeni di dissoluzione della matrice). Lo studio di tutte le caratteristiche dell'area e la loro evoluzione hanno permesso di comprendere i meccanismi (potenziali o in atto) ed elencare alcuni interventi a basso impatto (cosiddetti non strutturali), idonei al rallentamento di tali processi morfologici e alla mitigazione del rischio di perdita di stabilità (interventi in parte simili a quelli proposti da Cattuto et Al. nel 2006 nell'analisi dell'acropoli etrusca di Tarquinia Vecchia). Essi consistono nel:

- continuare il monitoraggio (con frequenza inferiore) per controllare la quiescenza del cinematismo);
- rallentare il ruscellamento disordinato riducendo sia il dilavamento che l'infiltrazione (opere di raccolta/drenaggio delle acque meteoriche);
- raccogliere e canalizzare le acque emergenti al piede della cornice calcarea per evitare la saturazione e la plasticizzazione delle argille di base;
- vietare nella fascia di terreno prossima al piede dei calcari le pratiche agricole, in particolare l'aratura pesante.
- controllare la vegetazione infestante e lo sviluppo di apparati radicali fittonanti che determinano instabilità e allargamento delle fratture.

Lo studio svolto nella presente tesi è sicuramente un modello prototipale sia dal punto di vista teorico che metodologico da poter essere replicato in situazioni analoghe. Le analisi svolte, in particolare l'analisi numerica, hanno permesso di scongiurare fenomeni di instabilità del versante nelle condizioni attuali e, in una ottica di conservazione preventiva, di effettuare scelte di gestione del sito che evitassero interventi più impattanti quelli della rimozione e delocalizzazione delle pitture murali, proponendo interventi a basso impatto.

Bibliografia

Cataldi M., 1993. *Tarquinia*, Regione Lazio.

Cataldi M., 2001. *Tarquinia: Guida breve*. Museo Archeologico Nazionale, Roma.

Pallottino M., 1984. *Etruscologia*, Hoepli, Milano.

Cattuto C., Gregori L., Milano M., Rapicetta S., 2007. *Condizioni Geomorfologiche e Stabilità dell'Acropoli di Tarquinia Vecchia*. Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Scienze della Terra, Perugia.

BONGHI J.M., 1986. *Testimonianze archeologiche e ricostruzione storica, scavi sistematici nell'abitato*. Gruppo Archeologico Romano, Roma.

Ribacchi R., Rotonda T., Graziani A., Boldini D., Tommasi P., Lembo Fazio A., 2018. *Meccanica delle Rocce, Teoria e Applicazioni nell'Ingegneria*. Edizioni Efesto, Hevelius Edizioni, Roma.

ISRM, 1994. *Raccomandazioni per determinare la resistenza a compressione monoassiale e la deformabilità dei materiali rocciosi*.

ISRM, 1997. *Metodologie di prova suggerite per la determinazione della resistenza a trazione di materiali rocciosi*.

ISRM, 1995. *Raccomandazioni sulla determinazione della resistenza a compressione triassiale di materiali rocciosi*.

Boldini D., Guido G. L., Margottini C., Spizzichino D., 2017. *Stability analysis of a large-volume block in the historical rock-cut city of Vardzia (Georgia)*. ©Springer-Verlag GmbH, Austria.

Hoek, Brown, 2002. *Hoek-Brown Failure Criterion*.

Plaxis2D, 2015. *Reference Manual*.

Sitografia

http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/354_TARQUINIA/Foglio.html

<http://www.progettoiffi.isprambiente.it>

<https://www.portaleabruzzo.com>

<http://esse1-gis.mi.ingv.it>

<http://www.regione.lazio.it>

<http://www.arsial.it>

www.stagesrl.com

<http://www.stonex.it/it/project/x300-laser-scanner/>

<https://leica-geosystems.com/it-it>

http://it.smartnet-eu.com/italpos_146.htm

<https://it.wikipedia.org/wiki/Fessurimetro>

<https://it.wikipedia.org/wiki/Crepometro>

<https://it.wikipedia.org/wiki/Estensimetro>

http://www.afs.enea.it/protprev/www/lineguida4/fascicolo4_4.htm#6

https://www.rocscience.com/help/rocdata/rocdata/Barton-Bandis_Criterion.htm

Ringraziamenti

Vorrei a questo punto ringraziare tutti coloro senza i quali non sarei riuscito a portare a termine questo lavoro.

Vorrei ringraziare la Prof. Ing. Daniela Boldini, relattrice della tesi, che non solo mi ha accettato come tesista, ma mi ha concesso l'opportunità di svolgere un interessantissimo tirocinio e mi ha seguito con costanza e con dedizione guidandomi e responsabilizzandomi.

Un grazie va all'Ing. Daniele Spizzichino, correlatore della tesi, che mi ha mostrato come affrontare il lavoro con dedizione e passione, potendolo così vivere in maniera serena, e mi ha a sua volta guidato nell'affrontare questa esperienza.

L'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) ha accettato la mia richiesta di tirocinio, per questo va ringraziato. Così come va ringraziato il Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia, all'interno del quale ho svolto il lavoro di tirocinio, nelle persone che lo compongono che mi hanno accolto e fatto sentire parte di loro.

Un ulteriore ringraziamento va alle persone che hanno dato un contributo pratico al lavoro di tesi. Il geologo Gabriele Leoni di ISPRA, per il sostegno costante e le elaborazioni in gis. Il geologo Paolo Maria Guarino, per i consigli e le elaborazioni dei modelli bidimensionali e tridimensionali. Il geologo Ermanno Marino di Stage SRL, per l'eccellente lavoro svolto riguardante il rilievo topografico. Il dott. Fausto Peddis per la disponibilità e per le analisi sui campioni svolte in laboratorio.

Vorrei inoltre ringraziare la "Soprintendenza Archeologica, Belle arti e Paesaggio per l'area metropolitana di Roma, la provincia di Viterbo e l'Etruria Meridionale" e archeologi dell'associazione "Amici Tombe dipinte di Tarquinia" che si occupano attivamente della necropoli etrusca di Tarquinia e che hanno richiesto ed incentivato il lavoro.

Vorrei ringraziare i miei genitori, che non solo mi hanno supportato economicamente, ma anche e soprattutto moralmente. Un grazie va a mia sorella e mio fratello che mi sono stati d'esempio percorrendo con successo molte strade prima che lo facessi io.

Un grazie va a Ludovica, che mi ha sempre sostenuto e spronato a dare il meglio e che mi ha insegnato a lottare per ottenere il massimo da me stesso.

Un ultimo ringraziamento va ai miei coinquilini degli anni universitari, ai miei compagni di corso ed ai miei amici, che non solo mi hanno aiutato ad affrontare con leggerezza tutti i momenti, ma mi hanno anche aiutato a superare i miei limiti quando non lo ritenevo possibile.