

Meccanismi di collasso nelle Latomie di Siracusa

Davide Vitali,* Margherita Zimbardo,* Alessandra Nocilla,** Laura Ercoli,* Nicola Nocilla

Sommario

Il presente lavoro si propone di corroborare le ipotesi accreditate presso gli archeologi, secondo i quali l'attuale conformazione delle Latomie di Siracusa, cave greche risalenti al VII- V sec. a.C., e in particolare della Latomia del Paradiso, sia imputabile a crolli che hanno interessato un imprecisato numero di ambienti ipogei oggi scomparsi. Attraverso una modellazione numerica, in cui i dati di input sono stati desunti dalla ricostruzione delle vicende geologiche dell'area di Siracusa, da ricerche bibliografiche e d'archivio relative alla storia delle latomie e dei manufatti presenti nel sito, dalla caratterizzazione geomeccanica della roccia e dell'ammasso, sono stati messi in luce gli eventi che possono avere determinato l'attuale configurazione delle cave storiche e l'insorgenza di fenomeni di instabilità.

Introduzione

Le Latomie di Siracusa, famose cave di roccia della Magna Grecia celebrate nei resoconti sia scritti che illustrati dei grandi viaggiatori dei secoli XVIII e XIX [BRYDONE, 1776; SAINT-NON, 1786; HOUEL, 1787; GOETHE, 1817] costituiscono un interessante caso-studio sul contributo che i metodi di analisi geotecnica possono fornire per dirimere alcuni quesiti di carattere storico-archeologico su eventi scarsamente o per nulla descritti nella storiografia ufficiale. Non esistono di fatto fonti documentali né evidenze archeologiche che permettano di ricostruire lo sviluppo planimetrico ed altimetrico nel tempo delle cave, sia in fase di coltivazione che nelle epoche successive. Tali lacune riguardano sia i manufatti sia gli eventi che hanno portato all'attuale configurazione delle latomie, che attualmente si presentano in parte come cave a cielo aperto e in parte come cave in sotterraneo (Fig. 1). Questo sito monumentale si presta particolarmente a tale approccio di studio grazie al fatto che in tale sito coesistono opere civili antiche di diversa natura, alcune delle quali hanno condizionato la "storia geotecnica" dei luoghi e contribuiscono tuttora allo sviluppo di processi di alterazione che possono generare un ulteriore decadimento delle condizioni di stabilità del sito, minacciandone la sicurezza e la conservazione. Lo studio si è articolato in tre fasi: 1) reperimento delle fonti bibliografiche e analisi delle notizie necessarie ad inquadrare

dal punto di vista geotettonico e storico l'area su cui si sviluppa la Latomia del Paradiso; 2) caratterizzazione geomeccanica della roccia e dell'ammasso mediante una rielaborazione e una sintesi dei dati della letteratura tecnica e di ulteriori sperimentazioni in sito e in laboratorio; 3) modellazione agli elementi finiti di un ambiente ipogeo al fine di simulare le condizioni in cui i fenomeni di collasso possono essere insorti ed i relativi meccanismi.

Inquadramento geologico e tettonico

La roccia che affiora nelle latomie è ascrivibile al Membro dei Calcari di Siracusa (Miocene inferiore-medio) che, assieme al membro di Melilli ap-



Fig. 1 – La Grotta dei Cordari in una foto degli anni '30.
Fig. 1 – The Grotta dei Cordari in a photo of the 30's.

* Università di Palermo

** Università di Brescia

partiene alla Formazione dei Monti Climiti. Nella sequenza stratigrafica i calcari di Siracusa giacciono su un livello di vulcanoclastiti pre-mioceniche e sono sormontati da depositi di mare basso e continentali di età Plio-pleistocenica; questi ultimi sono disposti in sei ordini di elementi paleomorfologici generati dalle mutazioni della linea di costa e consistono in spianate di abrasione, scarpate morfologiche e depositi terrazzati [DI GRANDE *et al.*, 1982]. La Latomia del Paradiso si colloca nel gradino morfologico delimitato a monte dalle paleo-falesie e a valle dal terrazzo marino del V ordine, dove affiorano le calcareniti pleistoceniche di Targia. Il dominio tettonico in cui si colloca la Formazione dei Monti Climiti è il margine orientale del Plateau ibleo che, secondo studi recenti [PALANO *et al.*, 2012], appartiene alla micro-placca ibleo-sicula, a cui si deve l'intensa attività sismotettonica dell'area [TORTORICI, 2000; SENO *et al.*, 2010]. Risale al terzo ventinovenno del I secolo d. C. [CROUCH, 2004] la prima segnalazione della sismicità dell'area. VOZA [2008] cita due edifici templari le cui strutture precipitarono, in conseguenza di terremoti di età medioevale, davanti all'Orecchio di Dionigi. Una delle più violente espressioni di tale attività sismotettonica è stato il terremoto del 1693, che comportò la quasi totale distruzione della città di Siracusa e degli insediamenti abitati della Val di Noto; i resoconti storici riportano notizie sul frastuono, sulle fratture nel suolo, sui danni subiti dai centri abitati e sul numero di vittime.

Nell'opinione degli storici è radicata la convinzione che anche i crolli nelle latomie possano essere attribuiti soprattutto all'attività sismica. La modellazione qui proposta si pone appunto lo scopo di verificare se il collasso delle coperture degli ambienti ipogeici possa essere imputabile ad altri fattori non così drammaticamente catastrofici o potesse insorgere solo in presenza di sisma.

Inquadramento storico del sito

Il termine di latomia etimologicamente deriva dalla composizione dei vocaboli greci *λαα*σ (pietra) e *τεμν* (tagliare). La datazione dell'inizio della coltivazione e la durata dell'estrazione sono molto incerte per il fatto che, fino alla meccanizzazione introdotta nel corso del diciannovesimo secolo, l'attività estrattiva è stata effettuata con metodologie ed utensili da scavo che sono rimasti sostanzialmente immutati sin dall'antichità, e dunque le tracce lasciate dai cavatori risultano difficilmente databili [ORLANDOS, 1968]. Lo sfruttamento viene fatto risalire alla metà del VII sec. a.C. ed è certo che già nel V sec. a.C. le latomie si estendevano su una vasta area, con un considerevole sviluppo in sotterraneo [VOZA, 2008]. Nel suo insieme il complesso

delle latomie è costituito da numerosi siti estrattivi localizzati a Nord e a Nord Ovest della città di Siracusa.

Tra le latomie più importanti CAVALLARI [1883] segnala la Latomia del Paradiso, le adiacenti Latomie di Santa Venera e dell'Intagliatella, quelle di Broggi e del Casale e quella dei Cappuccini. Di tutte queste latomie, ricche di ambienti sotterranei molto articolati e di dimensioni considerevoli, solo una parte della Latomia del Paradiso è aperta al pubblico e in particolare, l'unico ambiente ipogeo visitabile è l'Orecchio di Dionigi. La chiusura di tutte le altre Latomie e delle Grotte dei Cordari e del Salnitro, nella Latomia del Paradiso, si protrae da diversi decenni per problemi di sicurezza.

La Latomia del Paradiso si presenta oggi come un sito archeologico di circa tre ettari, sviluppato quasi interamente all'aperto, circondato da pareti di roccia verticali o strapiombanti alte da 10 a 40 m. La morfologia dello scavo suggerisce che il settore settentrionale e nordorientale della cava sia stato coltivato principalmente in sotterraneo, mentre non si può escludere che l'estremo settore meridionale, dove le pareti sono digradanti, potesse inizialmente presentarsi come una cava a mezzacosta che sfruttava la configurazione geomorfologica dovuta alle paleofalesie interposte tra le spianate di abrasione su cui sorsero i quartieri di Acradina a valle (VII sec. a. C.) e, a monte, quello di Neapolis (V sec. a.C.). I sondaggi effettuati nella campagna d'indagine degli anni '80 [ERCOLI *et al.*, 1988], hanno evidenziato un potente strato (> 9 m) di terreno vegetale e di blocchi ammassati sul fondo; inoltre la posizione della superficie di calpestio della grotta dei Cordari è più bassa rispetto all'esterno. Da ciò si può ipotizzare che la superficie di fondo scavo fosse irregolare e ben più profonda (Fig. 2). Al centro e presso le pareti nord-est e nord-ovest della Latomia si ergono enormi blocchi isolati, alti anche più di 10 metri, con superfici in parte lavorate e in parte grezze, provenienti dal crollo della copertura (Fig. 3). Sulla parete Nord si aprono gli accessi all'Orecchio di Dionigi e al complesso formato dalla Grotta dei Cordari e dalla Grotta del Salnitro.

L'Orecchio di Dionigi è l'unico ambiente che ha una pianta a forma di S stretta (da 5 a 11 m) in rapporto alla sua estensione longitudinale ed alla sua altezza. Le pareti che hanno una sagoma curvilinea e strapiombante convergono in forma di V rovesciata alla sommità.

Le altre cavità, alcune delle quali molto vaste, altre più piccole, presentano invece una pianta irregolare con pareti piane, strapiombanti o "a tenda". Tra queste le più grandiose sono la Grotta dei Cordari e quella del Salnitro, che devono il loro nome al tipo di lavoro svolto dagli artigiani che le occupavano fino agli anni sessanta del XX secolo. I fabbrica-



Fig. 2 – Inclinazione del fondo scavo nelle cavità ipogeiche.
Fig. 2 – *Sloping at the bottom of the excavation in hypogeic cavities.*

tori di corde di canapa (Fig. 4) utilizzavano le polle d'acqua accumulata sul fondo per la follazione delle fibre, mentre nella Grotta del Salnitro venivano asportate dalle pareti le concrezioni di sali solubili per la loro commercializzazione. Queste attività denotano cospicue perdite dagli acquedotti ed intensi processi di degrado della roccia (efflorescenze e subflorescenze).

Le coperture sono sorrette da pilastri di roccia alti circa 17 m, dalla sezione approssimativamente rettangolare e da setti lastriformi. La presenza di diverse porzioni di roccia squadrate pendenti dalla volta fa supporre che in passato gli elementi di sostegno della copertura fossero più numerosi. Contrariamente alle loro superfici laterali, che presentano le tracce degli utensili da scavo, la superficie suborizzontale che ne delimita il margine inferiore si presenta scabra ovvero associabile ad un distacco in corrispondenza di un giunto di strato. Pare quindi lecito supporre che la loro incompletezza sia riconducibile a fenomeni di crollo.

La presenza della Latomia del Paradiso ha interferito con lo sviluppo planimetrico dei sistemi infrastrutturali ed urbani esistenti nell'antichità, concentrati sul setto di roccia che la separa ad est dalla contigua Latomia di Santa Venera e rappresentati



Fig. 3 – I blocchi crollati di fronte all'ingresso della Grotta del Salnitro.
Fig. 3 – *Fallen blocks near the entrance of the Grotta del Salnitro.*

nella mappa di Fig. 5. Negli anni '80 si è osservato che il setto era percorso, a partire da C. Greco fin quasi alla Chiesa – cisterna di S. Nicolò, e per l'intera altezza della parete, da una frattura verticale persistente che di fatto, divideva il setto in due sottili lame di roccia, sulle quali sono stati attuati interventi di ancoraggio nei decenni passati. L'acquedotto del Paradiso si sviluppa da Nord a Sud lungo la parete orientale del setto con due tracciati, presumibilmente non coevi. Il primo tracciato, in galleria, visibile sul fronte est della Latomia del Paradiso, è stato tranciato longitudinalmente dal crollo della copertura, l'altro, probabilmente successivo, è parallelo a quello tranciato ed è parzialmente un canale a cielo aperto, inciso profondamente sulla sommità del setto e coperto da possenti lastre di pietra. Decorre dal Mulino Spagnolo fino alla cisterna sotto la chiesa di San Nicolò. Come gli altri acquedotti greci (Galermi e Ninfeo), l'Acquedotto del Paradiso, nella sua configurazione originaria, era costituito da due gallerie sovrapposte a sezione quadrangolare, collegate attraverso frequenti pozzi verticali. Il con-



Fig. 4 – Grotta del Cordari. Lavorazione corde di canapa.
Fig. 4 – *Grotta dei Cordari. Hemp ropes manufacturing.*

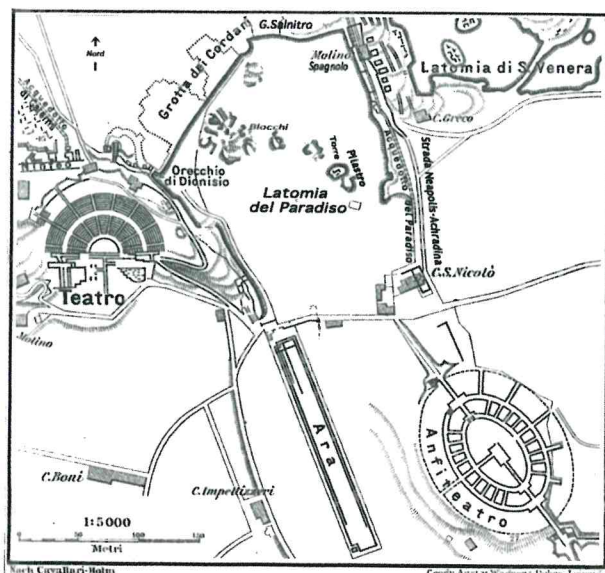


Fig. 5 - Mappa delle infrastrutture antiche nell'area della Latomia del Paradiso (da CAVALLARI, 1883).

Fig. 5 - Map of the ancient structures close to the Latomia del Paradiso (from CAVALLARI, 1883).

vogliamento di acqua nelle gallerie perdura tutt'ora stabilmente nell'acquedotto di Galermi, mentre si concentra nella stagione piovosa nell'acquedotto del Paradiso.

La portata nell'acquedotto di Galermi è stata valutata tra 500 l/min e 180 l/min. Esso fu sabotato durante l'assedio romano della città nel 212 a.C. e la

sua funzionalità fu ripristinata soltanto nel 1579 dal marchese di Sortino, il quale sfruttò la forza motrice delle sue acque per alimentare quattro mulini nel suo feudo [VOZA, 2008]. A tal proposito un Anonimo viaggiatore francese del XVI sec. scrisse che *Les aqueducts antiques y amènent encore un volume d'eau qui fait tourner un moulin, et qui en feroit tourner quatre. Celle qui s'échappe de toutes parts, forme autant de cascades, arrose des plantes du plus beau verd, et fait croître des peupliers magnifiques.*

In questo tratto una serie di tombe a fossa sono sovrapposte al tracciato dell'acquedotto, e pertanto sono riferibili a un'epoca successiva alla sua dismissione. In età presumibilmente postmedievale la funzionalità dell'acquedotto fu probabilmente ripresa: infatti esso alimentava il Mulino Spagnolo, i cui ruderi sono ben visibili nell'angolo tra le pareti nord ed est della Latomia. Lo stesso setto ospita i resti della strada incassata nella roccia che in epoca greca conduceva da Acradina a Neapolis e sulle cui trincee si apre una serie di camere sepolcrali a grotticella. Di fronte a questa parete si scorgono, in cima ad un pilastro di roccia isolato, i ruderi di una torre. La tipologia di muratura è eterogenea: alcune pareti sono realizzate con blocchi di pietra isodomi di epoca greca, forse di riuso, altre con blocchi irregolari che ricordano le murature medievali. Sulle pareti del pilastro non sono presenti tracce di gradini di accesso, il che fa supporre che, quando l'edificio era in uso, la sommità del pilastro si trovasse allo stesso livello del terreno e quindi in con-

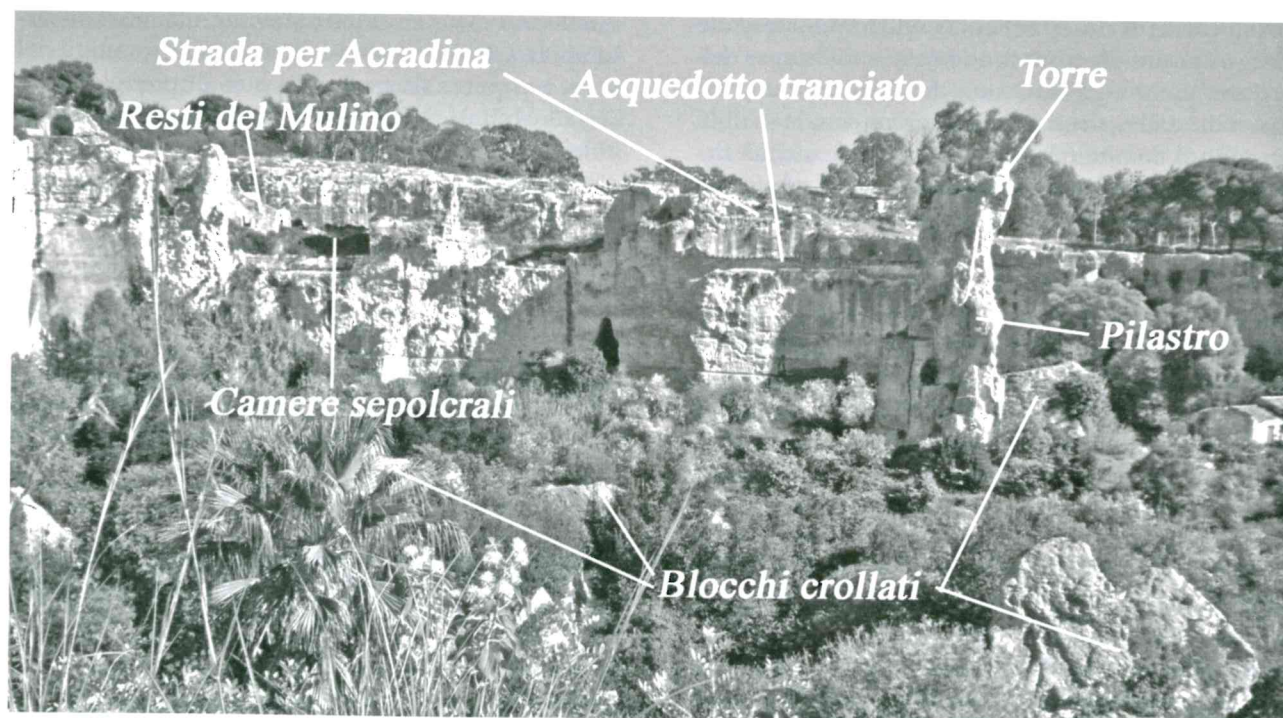


Fig. 6 - Il pilastro isolato con le rovine della torre, in primo piano i blocchi crollati, sullo sfondo la parete est della Latomia del Paradiso con la traccia della galleria crollata dell'acquedotto omonimo.

Fig. 6 - The pillar with the tower, fallen blocks, easter wall with the traces of the fallen Paradiso aqueduct.

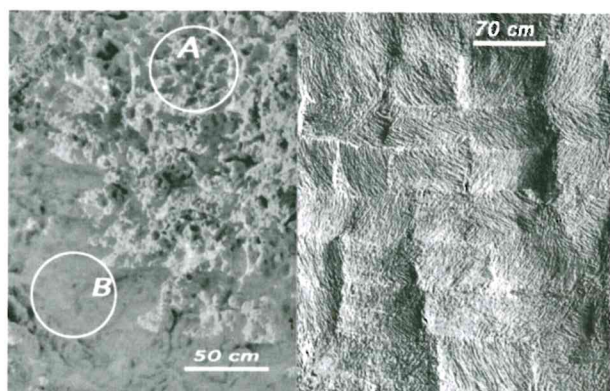


Fig. 7 – A sinistra: Processi di degrado sulle superfici grezze delle pareti da crollo (A alveolizzazione ; B disgregazione e distacco di scaglie). A destra: le tracce degli utensili da scavo perfettamente conservate sulle pareti lavorate.

Fig. 7 – Left: decay of the rough rock surfaces (A: honeycomb surfaces; B: dusty rock and scales detachment). Right: tracks of tools used for extraction.

tinuità con la copertura oggi crollata della Latomia. Nella fotografia commentata di figura 6 si scorgono gli elementi poc'anzi descritti dettagliatamente: è infatti questa la zona che è stata prescelta per la modellazione.

Caratterizzazione petrografica e tipologia del degrado

Sulle pareti delle latomie affiora un calcare tenero, con tessitura detritico-organogena a grana variabile da fine a grossa che macroscopicamente gli conferisce un aspetto di tipo arenitico e talvolta di tipo rudinitico. Le dimensioni dei grani sono comprese fra 40 μm e 1,7 mm, ad esclusione dei macrofossili che possono avere dimensioni centimetriche. All'esame con microscopio petrografico in sezione sottile si osserva che il calcare è costituito da prevalenti bioclasti tra cui frammenti di alghe rosse micritiche (lithothamnium) e fossili (briozoi, coralli, gusci di foraminiferi). La frazione litoclastica è costituita da grani di calcare microsparitico e micrite. Il contatto tra i grani è tangente o completo, prevalentemente dovuto alla concrescenza di organismi di scogliera. Il cemento è microsparitico con distribuzione uniforme. La porosità prevalente è di tipo intragranulare e dipendente dalla struttura dei fossili o

dei bioclasti; la macroporosità, di tipo infragranulare è distribuita irregolarmente. Le dimensioni dei pori variano da 70 μm a 3,5 mm. Sia in superficie che in profondità, nelle zone sottostanti l'acquedotto, la roccia è, a tratti, disgregata e assume una consistenza pulverulenta. Molto diffusi sono i fenomeni di alveolizzazione, che hanno prodotto cavità centimetriche (*honeycomb like*) (Fig. 7). La migrazione capillare e successiva evaporazione dell'acqua produce la formazione di una crosta superficiale dura che distaccandosi espone la roccia sottostante ad ulteriori fenomeni di erosione meteorica ed eolica. Molto più ridotto, e talora nullo, è invece il degrado della roccia in corrispondenza delle superfici di scavo, ad esclusione dei tratti in cui si è sviluppata una vegetazione spontanea.

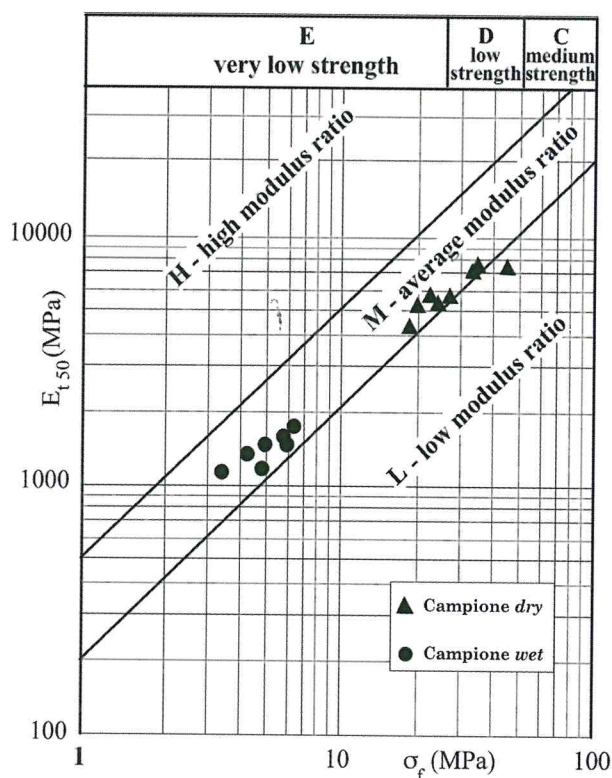
Stillicidi e percolazioni sono frequenti in corrispondenza delle discontinuità; tali fenomeni, evidenziati anche dalle rigogliose colonizzazioni algali e di piante igrofile interessano indistintamente sia le pareti a cielo aperto sia gli ambienti ipogeici, dove si manifestano marcati fenomeni di disgregazione che si spingono talora fino ad una profondità anche di alcuni centimetri.

Negli anni '80 in un settore ampio circa 300 m², presso l'estremo meridionale della parete orientale è stata effettuata con l'ausilio di un ponteggio, la zonazione geotecnica mediante misure col martello di Schmidt. È emerso che le superfici irregolari originate da crolli presentavano caratteristiche geomeccaniche più scadenti rispetto alle aree regolarizzate dall'attività estrattiva e che intensità ancora maggiori di degrado si registravano nelle aree, investite da processi di dissoluzione, come al di sotto dello sbocco del canale dell'acquedotto del Paradiso [ERCOLI *et al.*, 1988]. Altri studi condotti mediante rilievi *laser scanner* su calcareniti e calcari nodulari, hanno permesso di correlare i valori di riflettanza con quelli ottenuti con il martello di Schmidt; tale strumento può quindi essere utilizzato per ricavare dati relativi allo stato di alterazione della roccia [ZIMBARDO, 2011; ZIMBARDO *et al.*, 2012; ERCOLI *et al.*, 2013]. Sulla scorta di questi risultati il metodo di rilievo *laser scanner* è stato utilizzato nell'area inaccessibile limitrofa a quella indagata negli anni '80. I valori di riflettanza sono compresi fra 37% e 58%. Anche in questo caso i valori più bassi, inerenti alla roccia più intensamente alterata, sono stati rilevati nella parte sommitale della parete corrispondente alle superfici irregolari createsi in seguito ai crolli, mentre i valori

	n [%]		σ_c [MPa]		σ_t	GSI	
	Min	Max	Min	Max		Min	Max
Dry	12	32	18	45	2,2	55	65
Wet	12	32	3,4	6,3	0,73	35	50

Fig. 8 – Parametri geomeccanici roccia dry e wet.

Fig. 8 – Geomechanical parameters for the dry rock and the wet rock.

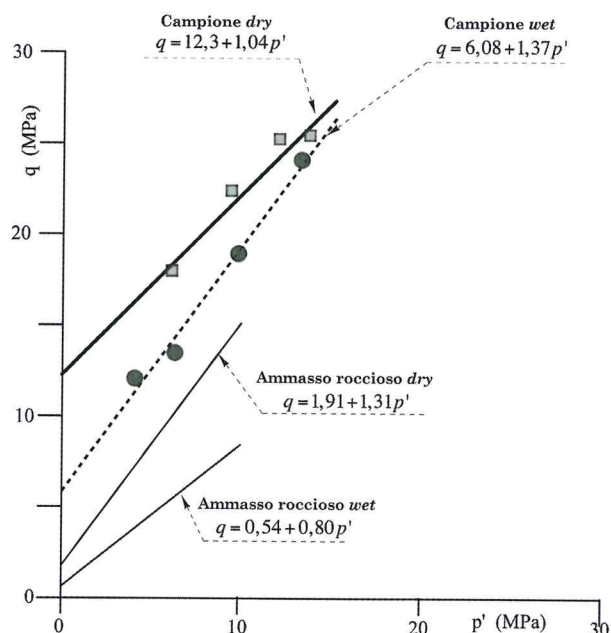
Fig. 9 – Diagramma di Miller [ERCOLI *et al.*, 2014].Fig. 9 – Miller diagram [ERCOLI *et al.*, 2014].

più elevati sono relativi alle pareti regolarizzate caratterizzate quindi da una minore superficie specifica esposta ai deterioteni [MASTELLONI *et al.*, 2014].

Caratterizzazione geomeccanica della roccia intatta e dell'ammasso

La caratterizzazione geomeccanica dei campioni asciutti e dei campioni saturi di roccia è sintetizzata nella tabella di figura 8 [FRASSONI *et al.*, 1981; ERCOLI *et al.*, 2014]. La porosità n è compresa tra il 12% ed il 32%. La resistenza a compressione semplice σ_c varia tra 18 MPa e 45 MPa per i campioni a contenuto d'acqua di laboratorio ($w < 10\%$) indicati con la sigla *dry* e tra 3,4 MPa e 6,3 MPa per i campioni con $w > 80\%$, indicati con la sigla *wet*. La resistenza a trazione σ_t è pari a 0,73 MPa (campioni *wet*) e a 2,2 MPa (campioni *dry*). I valori del rapporto tra i moduli E_{t50} e σ_f (Fig. 9), collocano i calcari di Siracusa nel range dei materiali a resistenza molto bassa/ bassa e di elevata deformabilità. In figura 10 si riportano le prove di compressione triassiale condotte con una tensione di cella massima pari a 7,5 MPa. I valori della resistenza di picco nel piano p', q sono interpolabili con le seguenti equazioni associabili rispettivamente alla roccia *dry* ed alla roccia *wet*:

$$q = 6,08 + p' \tan (54^\circ) \quad (wet) \quad (1)$$

Fig. 10 – Involuppi di rottura relativi alla roccia intatta ed all'ammasso roccioso in condizioni wet e dry [ERCOLI *et al.*, 2014].Fig. 10 – Rock and rock mass failure envelopes in dry and in wet conditions [ERCOLI *et al.*, 2014].

$$q = 12,30 + p' \tan (46^\circ) \quad (dry) \quad (2)$$

cui corrispondono i seguenti valori dei parametri della resistenza a taglio della roccia intatta:

$$c' = 3.23 \text{ MPa}, \phi' = 27^\circ$$

$$c' = 6.72 \text{ MPa}, \phi' = 19^\circ.$$

Nella medesima immagine (Fig. 10) vengono riportati anche gli involuppi di resistenza al taglio relativi all'ammasso asciutto ed all'ammasso saturo ottenuti applicando le relazioni empiriche proposte da Hoek [HOEK, 1983]. Per la valutazione della resistenza a taglio dell'ammasso si è fatto riferimento al Geological Strength Index GSI, considerando di tipo *poor* ($35 < \text{GSI} < 50$) le porzioni di ammasso più alterate a causa della saturazione e *fair* ($55 < \text{GSI} < 65$) quelle in condizioni *dry*. Si ottengono le seguenti equazioni relative all'ammasso:

$$q = 0.54 + p' \tan (39^\circ) \quad (\text{poor-wet}) \quad (3)$$

$$q = 1.91 + p' \tan (53^\circ) \quad (\text{fair-dry}) \quad (4)$$

I parametri di resistenza a taglio dell'ammasso risultano quindi pari a:

$$c' = 0.25 \text{ MPa}, \phi' = 21^\circ \quad (\text{poor-wet})$$

$$c' = 0.93 \text{ MPa}, \phi' = 33^\circ \quad (\text{fair-dry}).$$

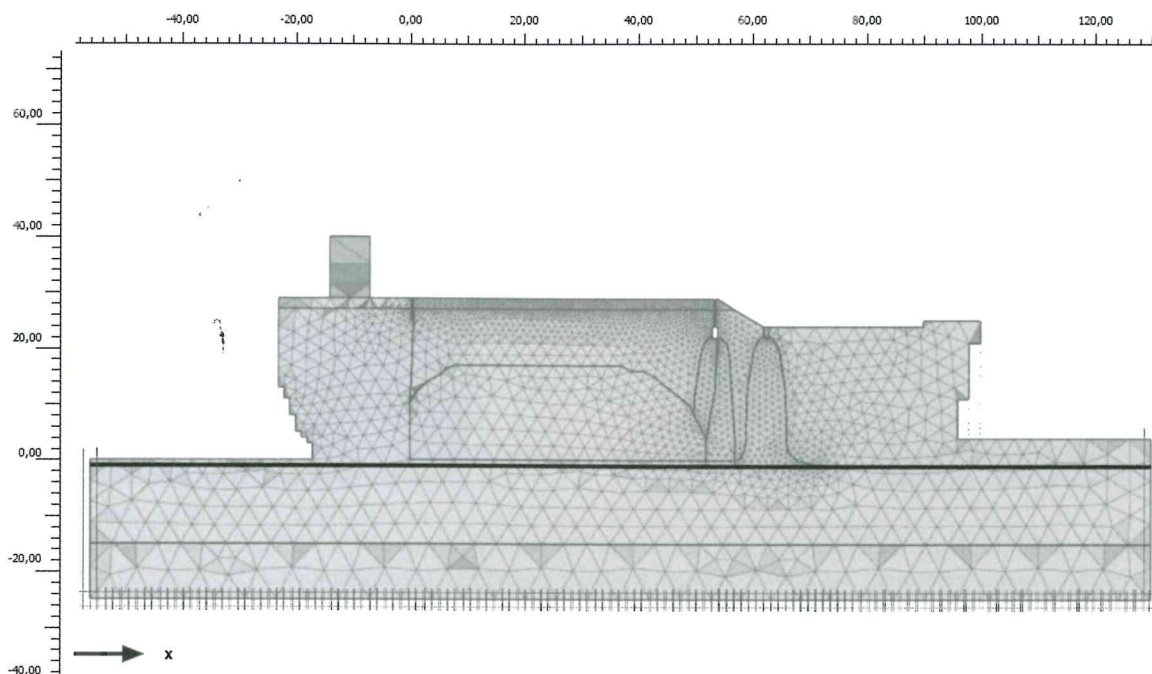


Fig. 11 – Mesh utilizzata per lo sviluppo dei calcoli con Plaxis 2D.

Fig. 11 – Mesh used for the Plaxis 2D calculations.

Per la valutazione delle caratteristiche di permeabilità si è fatto riferimento a prove di laboratorio su campioni di roccia intatta e a prove in sito lungo fori ortogonali alle famiglie di discontinuità sub verticali. Il coefficiente di permeabilità misurato in laboratorio su campioni di roccia è risultato variabile tra 10^{-7} e 10^{-6} m/s; la permeabilità dell'ammasso misurata in fori orizzontali è pari a 2×10^{-5} m/s.

Modellazione agli elementi finiti di un ambiente ipogeo

La zona prescelta per la modellazione geotecnica agli elementi finiti è il settore sud-orientale dove i numerosi manufatti antichi, il pilastro isolato ed un coacervo di grandi blocchi sul fondo consentono di ipotizzare il collasso di una vasta cavità ipogea. I calcoli sono stati sviluppati con il programma Plaxis 2D, simulando due differenti condizioni limite: 1) prima dell'inizio della coltivazione, con la presenza del solo acquedotto e di perdite lungo il suo tracciato, e 2) alla massima estensione raggiunta dalla coltivazione in sotterraneo. In figura 11 si riporta la mesh utilizzata per le varie simulazioni sopra elencate con la delimitazione delle zone a cui verranno attribuite di volta in volta caratteristiche meccaniche ed idrauliche differenti. Vengono altresì delineate le superfici di scavo e le superfici di rottura.

Per la configurazione a) finalizzata alla delimitazione della zona *wet* nell'ammasso roccioso sono state considerate:

- presenza, nella parte sommitale dell'ammasso, di perdite dalla galleria dell'acquedotto del Paradiso non impermeabilizzato;
- assenza iniziale di discontinuità o fratture localizzate lungo il percorso dell'acquedotto sotterraneo;
- assunzione del valore minimo della permeabilità della roccia, determinato con prove di laboratorio, pari a 10^{-7} m/sec con una portata filtrante di 10^{-3} m³/giorno per m² di sezione filtrante.

I calcoli hanno evidenziato, nella zona sottostante alla galleria dell'acquedotto, un'area con grado di saturazione compreso fra 0,6 e 0,8. Considerato che il grado di saturazione $0,6 < S < 0,8$ consente in genere la trasmissione nel mezzo delle pressioni neutre conseguenti al moto di filtrazione, a tale zona verranno attribuite nel seguito le caratteristiche meccaniche valide per la roccia *wet*. La sagoma è all'incirca ogivale. La sua estensione appare poco variabile col tempo, anche simulando una variazione delle caratteristiche idrauliche e la presenza della cavità (Fig. 12). Viene evidenziata anche una zona di parziale saturazione, con S inferiore o ampiamente inferiore al 60%, delimitata inferiormente dalla superficie libera della falda e superiormente da una forma a campana tipica della distribuzione gaussiana (Fig. 12a). I risultati del calcolo, per la configurazione 1), indicano una resistenza al taglio mobilitata sempre inferiore alla resistenza disponibile (Fig. 13). Come si è detto, la configurazione 2) è inerente alla coltivazione in sotterraneo nella sua probabile massima estensione. Per la modellazione sono state considerate:

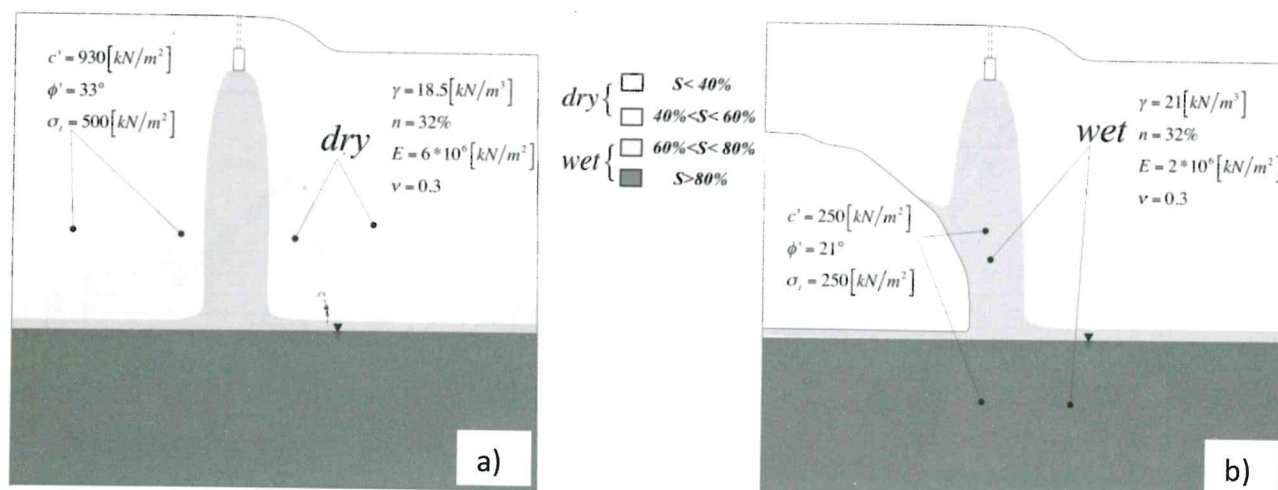


Fig. 12 – Caratterizzazione meccanica e grado di saturazione S: a) configurazione 1); b) configurazione 2.

Fig. 12 – Mechanical characterization and saturation degree S: a) configuration 1); b) configuration 2.

- caratteristiche idrauliche immutate rispetto alla ipotesi precedente,
- perduranti perdite dalla galleria dell'acquedotto,
- cavità ipogee di dimensioni comparabili a quelle degli ipogei ancora esistenti (ampiezza 52 m, altezza 17 m), comprendenti parte della zona *wet* e della *dry* (Fig. 11).

Lungo le verticali immediatamente sottostanti la galleria dell'acquedotto i valori di pressione neutra sono pressoché nulli; nelle altre zone, caratterizzate da S inferiore al 60% (Fig. 12b), insorgono pressioni neutre negative, o più correttamente, valori di suzione di entità pari al più alla decina di kN/m². Il rapporto tra la resistenza mobilitata e

quella disponibile raggiunge valori prossimi o superiori al 90% in un'area piuttosto ampia contigua alla parete dello scavo nella porzione *wet* dell'ammasso (Fig. 14). Nella zona *wet* sottostante la galleria dell'acquedotto si sviluppano deformazioni di rilevanti entità ad andamento subverticale, ad andamento subverticale ed estesa dal fondo della galleria dell'acquedotto fino alla base della parete di scavo. Nella zona sottostante il rudere della torre si generano, soprattutto, punti di plasticizzazione per trazione (Fig. 14). Le variazioni della sagoma della cavità sono caratterizzate da spostamenti con valori massimi (8,4 cm) nella zona sottostante l'acquedotto (Fig. 15). L'entità degli spostamenti è co-

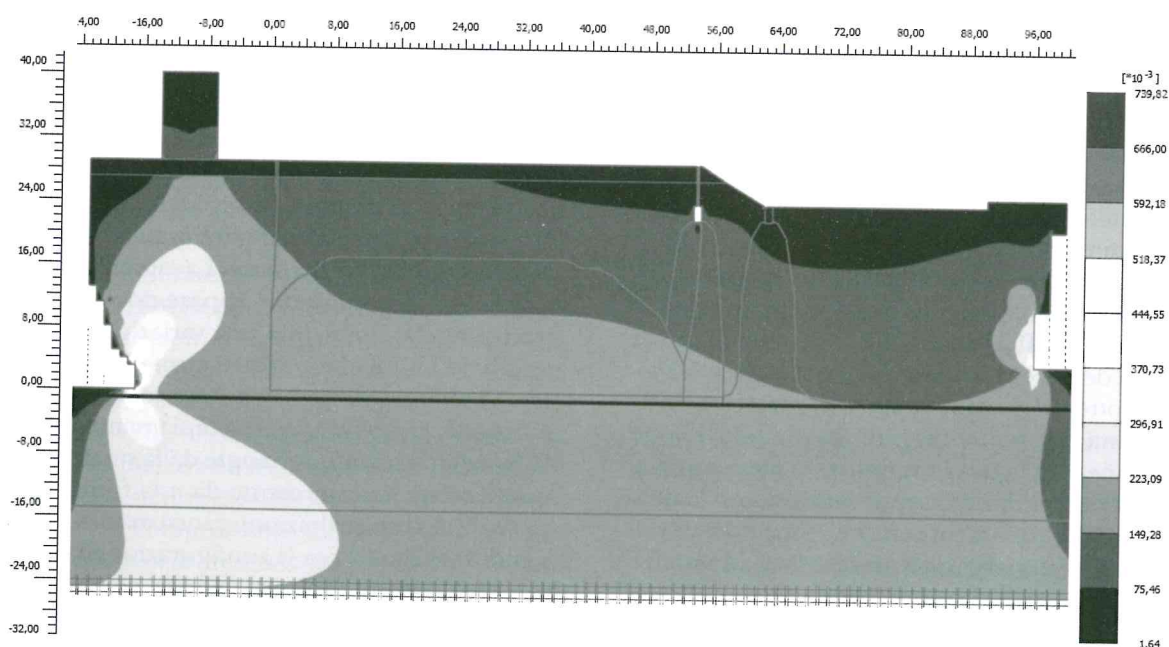


Fig. 13 – Configurazione 1): aliquota della resistenza a taglio mobilitata.

Fig. 13 – Configuration 1): rate of mobilized shear strength.

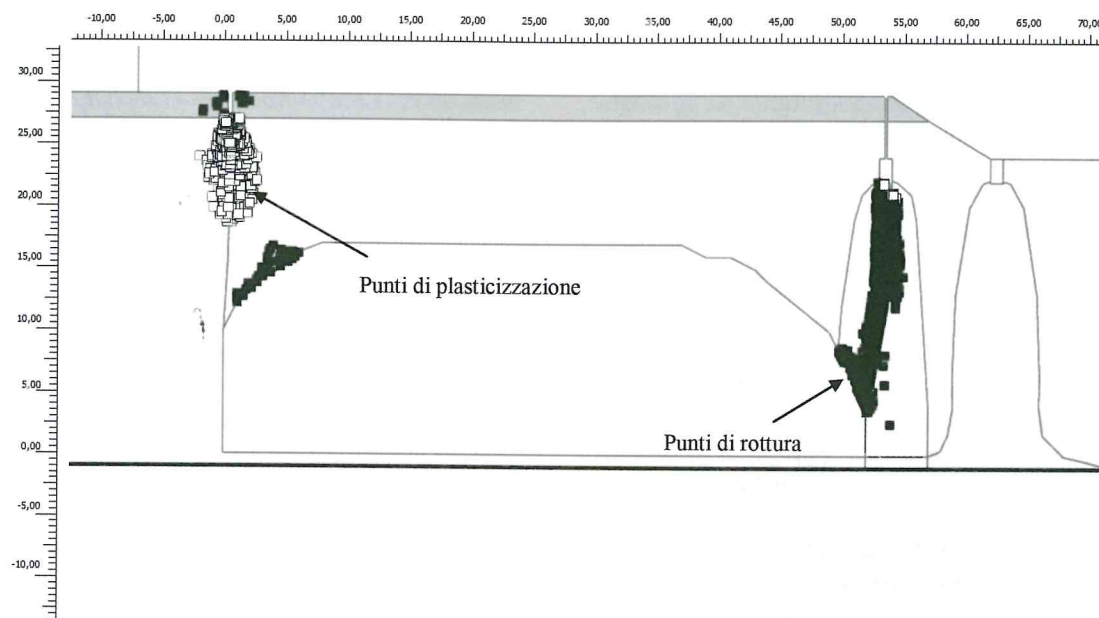


Fig. 14 – Configurazione 2): zone di plasticizzazione per trazione e zone di rottura.

Fig. 14 – Configuration 2): tension cut-off point and failure point.

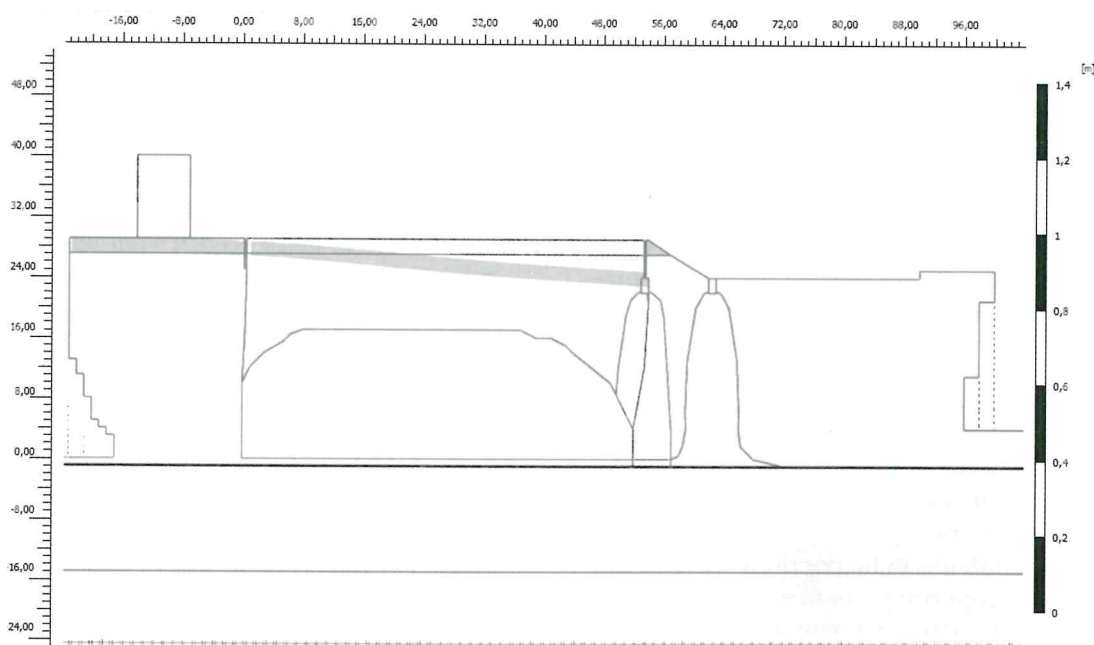


Fig. 15 – Configurazione 2): spostamenti totali.

Fig. 15 – Configuration 2): total displacements.

erente con il crollo della copertura così come osservato nella realtà. La superficie di distacco coincide con l'attuale superficie del fronte orientale della Latomia, dove la parte sommitale della parete est è irregolare e l'acquedotto è tranciato longitudinalmente. L'ampiezza della *shear band* giustifica inoltre l'esistenza della lunga frattura che decorre lungo il setto descritta nel paragrafo 3. Si suppone quindi che il canale dell'acquedotto del Paradiso che de-

corre lungo la strada Acradina-Neapolis sulla sommità del setto possa essere stata realizzata successivamente al crollo del primo tracciato. Il canale determina una nuova zona di saturazione del materiale sempre con un andamento ogivale, il quale, non essendo contiguo ad alcuna cavità, ma solo a pareti sub verticali, non compromette le condizioni di stabilità globale; la resistenza a taglio mobilitata risulta sempre inferiore a quella disponibile.

Conclusioni

In carenza di notizie storiografiche, la geologia e la geotecnica possono contribuire alla ricostruzione cronologica di eventi che hanno investito il patrimonio storico-architettonico integrando i dati di archivio, i dati geomorfologici e la conoscenza del comportamento meccanico dei materiali. L'attuale configurazione della Latomia del Paradiso è stata finora attribuita a crolli dovuti allo scuotimento sismico piuttosto che al collasso strutturale conseguente all'ampliamento delle cavità sotterranee ed a decadimenti localizzati delle caratteristiche meccaniche. In questo lavoro ci si è proposti di percorrere questa linea di indagine sul settore sud orientale che gli indizi morfologici e storiografici, unitamente alla presenza di grandi blocchi accumulati sul fondo, inducono a ritenere fosse coltivato in sotterraneo. I risultati della modellazione numerica consentono una radicale rilettura degli eventi e della cronologia relativa dei manufatti. Dall'Acquedotto del Paradiso, nel suo tracciato originario, che attualmente appare tranciato longitudinalmente sulla parete orientale e che non era impermeabilizzato, si innescavano moti di filtrazione derivanti da perdite localizzate o da semplici infiltrazioni. Questa dispersione nei secoli ha determinato un intenso e progressivo degrado della roccia, come suggerisce anche la toponomastica (Grotta del Salnitro), più marcato lungo le superfici di discontinuità mesostrutturali e ha provocato la neoformazione di ulteriori fratture. Il comportamento meccanico profondamente diverso della roccia *wet* e di quella *dry* è stato accertato con prove di laboratorio. La modellazione numerica ha evidenziato la particolare configurazione geometrica che nell'ammasso assume la zona satura al di sotto della galleria dell'acquedotto e ha messo in luce che, in tali condizioni, la presenza delle vaste cavità ipogeiche determina l'insorgere di punti di plasticizzazione e di *shear band* in corrispondenza delle porzioni "chiave" per la stabilità delle coperture, come gli spigoli che esse formano con le pareti, e come il setto di roccia, dove si assiste alla formazione di fratture verticali molto persistenti. L'acquedotto originario è stato coinvolto nel crollo imponendo la costruzione di una nuova condotta contigua al precedente tracciato sul setto tra la parete della Latomia del Paradiso e Santa Venera, in efficienza fino alla dismissione del Mulino Spagnolo in un'imprecisata epoca post-medievale, le cui perdite però non hanno avuto effetto sulle condizioni di stabilità. I risultati di questo studio evidenziano quindi che non è necessario invocare eventi catastrofici, come i terremoti, per giustificare il crollo delle volte delle latomie e forniscono una chiave interpretativa della presenza dei due tracciati paralleli dell'Acquedotto del Paradiso.

Bibliografia

- BRYDONE P. (1776) – *Voyage en Sicile et à Malthe*. A Londres, Et se trouve a Neuchâtel, au magasin de la Société typographique.
- CAVALLARI F.S. (1883) – *Topografia archeologica di Siracusa*. Palermo.
- CROUCH D. P. (2004) – *Geology and settlements*. Greco-roman patterns, Oxford UP.
- DI GRANDE A., RAIMONDO W. (1982) – *Linee di costa plio-pleistoceniche e schema litostratigrafico del Quaternario siracusano*. *Geologica romana*, 21, pp. 279-309.
- ERCOLI L., SPECIALE G. (1988) – *Rock weathering and failure processes in the 'Latomia del Paradiso' (Syracuse, Italy)*. "The engineering geology of ancient works, monuments and historical sites: preservation and protection". Proceedings of the Symposium of the IAEG, Athens. Rotterdam, A.A. Balkema, pp. 771-778.
- ERCOLI L., MEGNA B., NOCILLA A., ZIMBARDO M. (2013) – *Measure of a Limestone Weathering Degree Using Laser Scanner*. *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*, 7, n.5, pp. 591-607.
- ERCOLI L., ZIMBARDO M., NOCILLA A. (2014) – *Rock decay phenomena and collapse in the "Latomiae del Paradiso" in Syracuse (Sicily)*. *Engineering Geology*, 178, pp. 155-165.
- FRASSONI A., ROSSI P.P., MORO T., NOCILLA N. (1981) – *Physical and mechanical characterization of a weak rock involved in the excavation of an underground power house*. *Int. Symp. on Weak Rock*, Tokyo, pp. 567-571.
- GOETHE J.W. (1817) – *Italianische reise*.
- HOEK E. (1983) – *Strength of jointed rock masses*. *Géotechnique*, 23, n. 3, pp. 187-223.
- HOUEL J. (1782-1787) – *Voyage pittoresque des isles de Sicile, de Malte et de Lipari, ou l'on traite des antiquités qui s'y trouvent encore; des principaux phénomènes que la nature y offre; du costume des habitants, & de quelques usages*. Per Jean Houel, Peintre du Roi, Parigi.
- MASTELLONI M.A., ERCOLI L., NOCILLA A., NOCILLA N., SCIORTINO R., ZIMBARDO M. (2014) – *The Latomiae of Syracuse: a geotechnical mapping through rock reflectivity*. *Engineering Geology for Society and Territory*, vol. XVIII, 2015, pp. 409-413, Springer International Publishing.
- ORLANDOS A.K. (1968) – *Les matériaux de construction et la technique architecturale des anciens grecs*, E. de Boccard, Paris.
- PALANO M., FERRANTI L., MONACO C., MATTIA M., ALIOISI M., BRUNO V., CANNAVÒ F., SILIGATO G. (2012) – *GPS velocity and strain fields in Sicily and southern Calabria, Italy: Updated geodetic constraints on tectonic block interaction in the central Mediterranean*. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth* (1978-2012), 117 (B7).
- SAINT NON R. (1781) – *Voyage pittoresque ou Description*

- des Royaumes de Naples et de Sicile, 1781-1786, Paris.*
- SENO S., CANOVA F., TOLOMEI C., SALVIO S., DI BUCCIA D., BURRATO P., TOSCANI G. (2010) – *Current deformation in South-Eastern Sicily from SBAS technique: insights on the active tectonics of the Hyblean foreland.* OGS, Trieste, Presentato al 29° convegno nazionale GNGTS.
- TORTORICI L. (2000) – *Geologia delle aree urbane della Sicilia orientale.* Decanini e Panza, Scenari di pericolosità sismica ad Augusta, Siracusa e Noto, CNR-GNDT, pp. 43-54.
- VOZA G. (2008) – *Siracusa – Teatro greco: l'eccezionalità.* Numero Unico XLIV Ciclo Spettacoli Classici, Fondazione INDA Ed., Siracusa.
- ZIMBARDO M. (2011) – *Valutazione dell'alterazione con laser scanner negli ammassi a struttura orientata e nella diagnostica dei beni monumentali.* Meccanica dei Materiali e delle Strutture, 2, n.1, pp. 41-51 ISSN: 2035-679X - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale - DICA
- ZIMBARDO M., NOCILLA N., ERCOLI L., SCIORTINO R. (2012) – *Valutazione dei parametri della resistenza al taglio delle discontinuità con l'ausilio del laser scanner.*

In: Nuovi Metodi di indagine, monitoraggio e modellazione degli ammassi rocciosi, CELID, Torino, pp. 49-66.

Collapse mechanisms in the Latomie of Syracuse (Sicily)

Summary

The aim of this work is to support, through geomechanical methods, the historical hypothesis proposed by the archaeologists according to which the Latomiae of Syracuse, ancient Greek quarries, were originally mainly developed underground. In order to reach this objective, the finite elements numerical modelling was applied. The input data were inferred from the geologic history, from different archaeological reports and from the geomechanical characterization both of the intact rock and of the rock mass. The study highlighted the geotechnical events which modified the shape and the safety conditions of these amazing ancient quarries over the centuries.