

ANALISI NUMERICHE PER LO STUDIO DI STABILITÀ DI VOLTE ROCCIOSE NATURALI ALL'INTERNO DELLA GROTTA DI BOSSEA

Chrystel Chandiou¹ (chrystel.chandiou@gmail.com)

¹Ingegnere libero professionista

Daniele Martinelli² (daniele.martinelli@polito.it), Bartolomeo Vigna²
(bartolomeo.vigna@formerfaculty.polito.it), Nives Grasso² (nives.grasso@polito.it), Glenda Taddia²
(glenda.taddia@polito.it), Gianluca Bella³ (gianluca.bella@pini.group)

²Politecnico di Torino, Torino, Italia

³Pini Group SA, Lugano, Svizzera

ABSTRACT. Il presente articolo espone i risultati preliminari di analisi numeriche di stabilità effettuate nella grotta di Bossea, una cavità carsica turistica sita nel Piemonte meridionale. Al suo interno è possibile osservare grandi ambienti e differenti concrezioni, alcune delle quali soggette nel tempo a fenomeni deformativi. Un rilievo topografico sia all'interno che all'esterno della cavità ha consentito di ottenere la geometria del luogo di interesse, mentre le proprietà geo-meccaniche dell'ammasso roccioso sono state valutate tramite letteratura e prove in laboratorio eseguite presso il Politecnico di Torino. Dai risultati delle analisi numeriche bidimensionali e tridimensionali si evidenzia una deformazione della volta della cavità, ed uno stato tensionale tale da non pregiudicare la stabilità della struttura.

1. INTRODUZIONE

La cavità naturale oggetto di studio è la grotta di Bossea, sita in Piemonte meridionale sul versante occidentale della Val Corsaglia, Alpi Liguri (Fig.1a). La cavità, presenta uno sviluppo di circa 3 km con una serie di grandi saloni di crollo nella prima parte aperta alle visite turistiche ed una forra orizzontale che termina su gallerie allagate sifonanti. La prima parte di questi grandi ambienti è impostata lungo un complesso contatto tettonico tra vulcaniti profondamente fratturate e marmi dolomitici triassici (Antonellini *et al.*, 2019; Civita e Vigna, 1985, Civita *et al.*, 1990). La cavità risulta inoltre di particolare interesse in quanto sono stati installati al suo interno tre laboratori di ricerca finalizzati al monitoraggio dei flussi idrici, della meteorologia ipogea e della radioattività naturale. Alla base del presente studio vi è l'osservazione di una serie di concrezioni che appaiono profondamente deformate e fratturate ai bordi dei grandi saloni di crollo (Fig.1b-c).

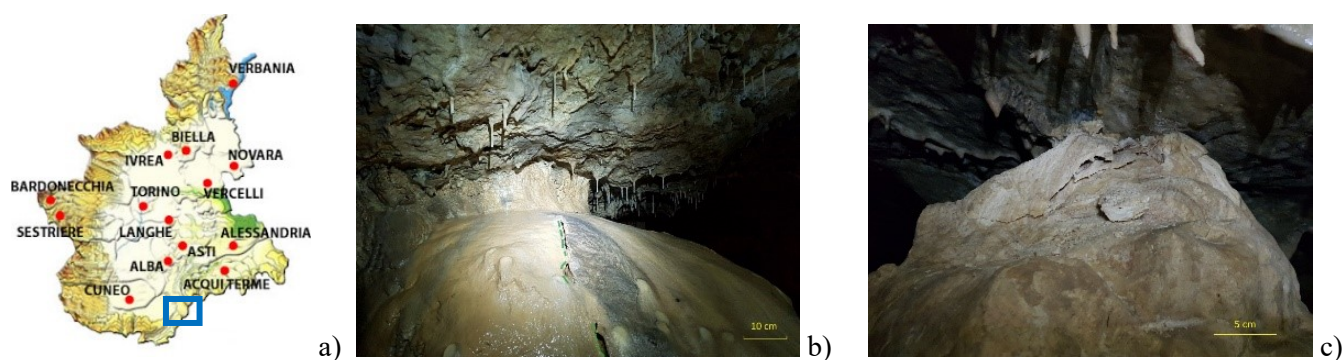


Figura 1 – a) Localizzazione geografica della grotta di Bossea; b-c) concrezioni deformati (Chandiou, 2021).

L'obiettivo dello studio è stato quello di effettuare alcune analisi semplificate per valutare in via preliminare la stabilità della volta di uno di questi grandi ambienti (il Salone dell'Orso). Al contrario dei vuoti sotterranei artificiali, sono pochi gli studi geotecnici che riguardano la stabilità dei grandi ambienti naturali sotterranei (De Waele e Piccini, 2008). In generale, tali ambienti presentano numerose peculiarità quali geometrie con forme complesse, difficoltà d'accesso, rendendo talvolta difficoltoso effettuare accurati rilievi topografici e strutturali al fine di valutare il reale comportamento di questi grandi saloni. Inoltre, a causa della conformazione della volta di questi grandi ambienti risulta difficile reperire campioni "non disturbati" sui quali effettuare la caratterizzazione geo-meccanica quale base di partenza per i modelli numerici.

2. CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE E MODELLAZIONE NUMERICA

Al fine di poter ricostruire la geometria 3D della Sala dell'Orso è stato eseguito un rilievo topografico tramite l'utilizzo di una stazione totale e di un laser scanner terrestre in modalità statica, ottenendo una nuvola di circa 170 milioni di punti geo-localizzati della porzione di cavità interessata dallo studio, di dimensione di circa 200 m x 600 m. Il modello di superficie del terreno del versante soprastante la grotta è stato realizzato con l'ausilio di un veicolo aereo senza equipaggio (UAV) ottenendo una nuvola densa della superficie, composta da circa 12 milioni di punti. In seguito, sono state definite le caratteristiche geo-meccaniche delle diverse rocce presenti (marmi, metavulcaniti e concrezioni) all'interno della cavità. Tuttavia, a causa della conformazione di questi ambienti non è stato possibile prelevare campioni di roccia direttamente dalle pareti tramite carotaggi in situ. Pertanto, sono stati raccolti grossi blocchi di roccia, successivamente tagliati tramite una sega circolare per ottenere campioni a forma di parallelepipedo. Differenti prove per determinare le proprietà della roccia sono state eseguite presso il laboratorio del DIATI del Politecnico di Torino. Le caratteristiche di deformabilità (modulo elastico, coefficiente di Poisson) del marmo e delle concrezioni sono state valutate mediante 40 prove geofisiche considerando, per ogni direzione, la trasmissione delle onde di compressione e delle onde trasversali. La resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta (UCS) è stata valutata mediante prove a compressione uniassiale, condotta senza tenere conto della pressione dei pori. I parametri geomeccanici delle metavulcaniti (roccia intatta) presenti alla base dei grandi saloni sono determinati tramite letteratura. I valori di resistenza e deformabilità alla scala dell'ammasso sono ottenuti a partire da quelli della roccia intatta tramite l'indice GSI, mentre il criterio di rottura adottato è quello di Hoek & Brown, con modello costitutivo elasto-plastico (Tab.1). Lo stato tensionale imposto è pari a $k_0=1$.

Tabella 1. Caratteristiche roccia intatta e ammasso roccioso (Chandiou, 2021)

	Roccia Intatta						Ammasso Roccioso				
	γ (kg/m ³)	UCS (MPa)	E (GPa)	ν (-)	m_i (-)	s (-)	GSI (-)	E_{rm} (GPa)	$m_{b,picco}$ (-)	$m_{b,residuo}$ (-)	s (-)
Metavulcaniti	2800	140	60	0.30	17	$3.6 \cdot 10^{-2}$	70	44	5.82	1.99	$6.7 \cdot 10^{-3}$
Marmo	2700	45	70	0.30	9	$3.6 \cdot 10^{-2}$	70	51	3.08	1.06	$6.7 \cdot 10^{-3}$
Concrezioni	2700	15	35	0.30	8	$3.6 \cdot 10^{-2}$	70	26	2.74	0.94	$6.7 \cdot 10^{-3}$

L'analisi bidimensionale agli elementi finiti (FEM) ha fatto ricorso ad un modello geotecnico continuo equivalente, condizioni di deformazione piana ed il software utilizzato è RS2 vers.9.0 (RocScience). Viceversa, il modello tridimensionale è stato realizzato basandosi sul metodo degli elementi al contorno (BEM) ed utilizzando il codice di calcolo EX3 (RocScience). Per lo studio bidimensionale sono state realizzate quindici sezioni nel salone dell'Orso poste ad una distanza di 10 m l'una dall'altra, mentre per l'analisi numerica tridimensionale è stato preso in considerazione un modello ricavato dalla nuvola di punti. Inoltre, per le analisi bidimensionali sono state adottate mesh triangolari a sei nodi, raffittite nelle zone d'interesse ed imposte opportune condizioni al contorno sui lati verticali (carrelli), orizzontale inferiore (cerniera), con superficie superiore libera. Entrambi i modelli 2D e 3D si compongono di due fasi: la prima in cui si considera la situazione originale senza il vuoto ipogeo; la seconda nella quale viene aggiunta l'esportazione del materiale nella cavità (stato attuale).

3. RISULTATI

I risultati numerici illustrati nel seguente capitolo riguardano la condizione finale, proponendo inoltre un confronto in termini tensionali e deformativi tra analisi bidimensionali e tridimensionali.

3.1 Analisi bidimensionali RS2

Nella Figura 2a è possibile osservare la deformata della cavità e il dettaglio degli spostamenti verticali della concrezione in corrispondenza di una sezione rappresentativa "6bis" (Fig.2b-c-d). In alcune porzioni della struttura lo spostamento ottenuto in volta è pari a -2 mm, mentre lo spostamento relativo alla pavimentazione è circa +1 mm, ossia una riduzione dell'altezza della cavità. Vengono inoltre riportate anche le tensioni principali massima e minima, rispettivamente nei range -2.34÷14.47 MPa e -7.94÷2.72 MPa. Dalla Figura 2d si osserva che la cavità è soggetta ad instabilità localizzate, in particolare come la concrezione sia soggetta a fessurazione. Questo è in accordo con quanto si osserva all'interno della grotta nella quale si nota una stabilità generale della

struttura, con fratture locali di dimensioni contenute dell'ammasso roccioso o con regioni caratterizzate da un maggiore grado di fratturazione. Le tensioni vengono scaricate dal tetto con l'apertura di strati orizzontali di allettamento dovuto alle forze sulla copertura. I risultati numerici relativi alle altre 14 sezioni evidenziano spostamenti massimi dell'ordine di grandezza millimetrico e plasticizzazioni dei marmi e delle concrezioni. Le analisi numeriche evidenziano inoltre che, eccetto puntuali ed isolate instabilità, la volta risulta globalmente stabile, come confermato dall'osservazione in situ (Fig.3).

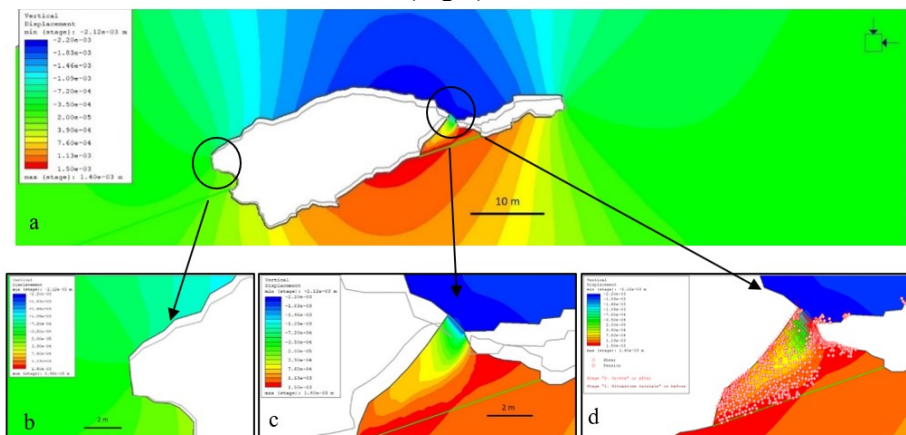


Figura 2. Analisi 2D, sezione 6bis: a) spostamenti verticali della struttura, amplificazione x500; b-c) dettaglio spostamenti verticali; d) zone di plasticizzazione (Chandiou, 2021).

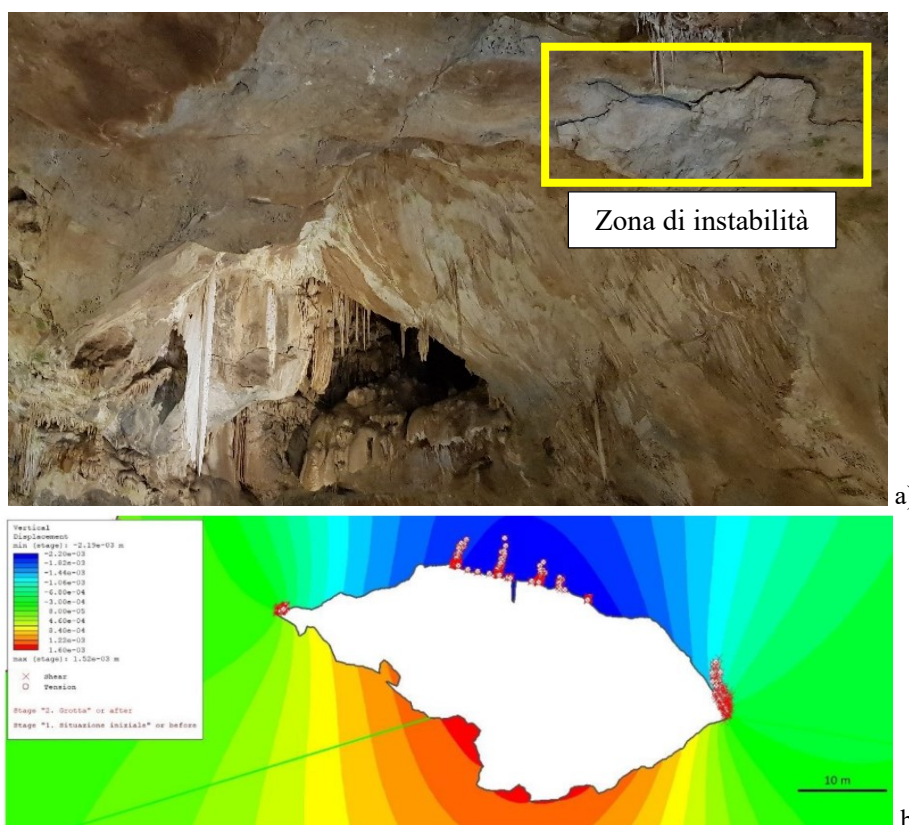


Figura 3. Sezione 11: a) Zona di instabilità locali individuate in situ; b) spostamenti verticali e zone di plasticizzazione da analisi numerica bidimensionale (Chandiou, 2021).

3.2 Analisi tridimensionali EX3

Dal modello tridimensionale non è possibile riprodurre il dettaglio delle concrezioni a motivo della geometria complessa e delle dimensioni notevoli della porzione da analizzare. Il metodo utilizzato presenta dunque delle limitazioni di scala, consentendo la valutazione approssimata della deformazione a scala globale della cavità, ma non la deformazione puntuale sulle stalattiti e sulle stalagmiti. L'analisi tensionale consente di ricavare le tensioni principali massime e minime, entro i range $-0.02 \div 19.81$ MPa e $-2.82 \div 5.59$ MPa (Fig.4).

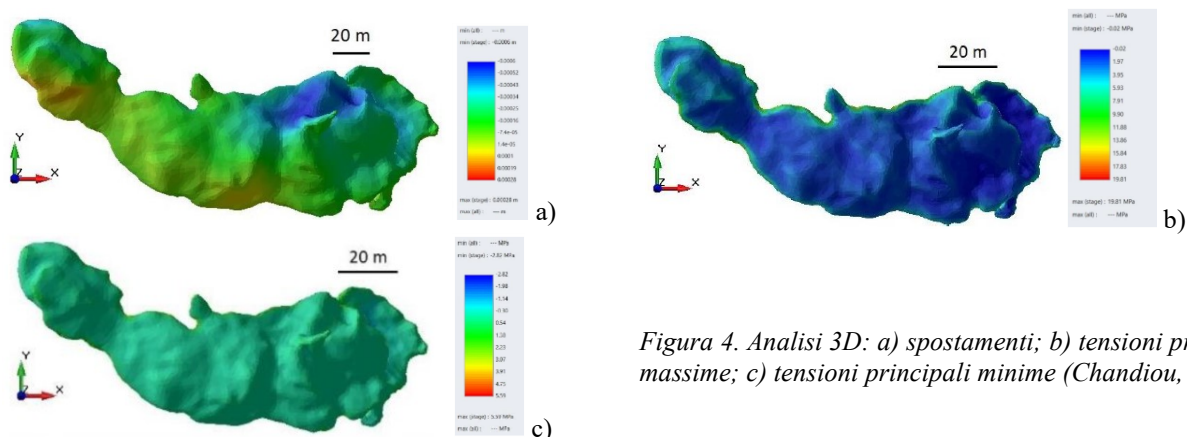


Figura 4. Analisi 3D: a) spostamenti; b) tensioni principali massime; c) tensioni principali minime (Chandiou, 2021).

3.3 Confronto analisi 2D e 3D

Dal confronto tra i risultati delle analisi bidimensionali e tridimensionali si osserva che la prima fornisce informazioni di un ordine di grandezza superiore per ciò che concerne gli spostamenti a motivo del maggior dettaglio geometrico che con essa è possibile rappresentare. Il confronto delle tensioni mostra tuttavia una discreta corrispondenza tra i due approcci. I dettagli sono riportati in Tabella 2.

Tabella 2. Confronto dei risultati dell'analisi bidimensionali e tridimensionali (Chandiou, 2021).

	Spostamenti [m]		σ_1 [MPa]		σ_3 [MPa]	
	min	max	min	max	min	max
Analisi 2D	-0.00215	0.00151	-3.04	32.57	-7.84	8.33
Analisi 3D	-0.00060	0.00028	-0.02	19.81	-2.82	5.59

4. CONCLUSIONI

Il presente articolo ha esposto i risultati preliminari delle analisi numeriche semplificate volte per valutare la stabilità di un grande salone all'interno delle grotte di Bossea. Data la complessità geometrica e le peculiari condizioni ambientali, l'esecuzione di rilievi di dettaglio risulta complessa così come la parametrizzazione dei materiali. Le analisi bidimensionali e tridimensionali forniscono stati tensionali comparabili ed assenza di plasticizzazioni significative in volta che, compatibilmente con l'involuppo di rottura scelto, risulta generalmente stabile. Il risultato trova conferma nel fatto che una cavità naturale carsica si genera cercando l'equilibrio della struttura senza portarla al collasso. Le analisi mostrano tuttavia alcune instabilità localizzate in corrispondenza delle concrezioni che risultano infatti profondamente fessurate, portando a supporre che il soffitto della cavità sia ancora in fase evolutiva. Lo studio presentato pone le basi per ulteriori analisi di dettaglio che richiedono una valutazione maggiormente approfondita ad esempio dello stato tensionale in sito o delle discontinuità al fine di condurre appropriate analisi di caduta blocchi. Infine, la presente analisi trova la propria applicazione pratica della valutazione della sicurezza delle cavità naturali turistiche di origine carsica di cui la letteratura geotecnica trova ancora pochi esempi.

5. BIBLIOGRAFIA

- Civita M., Vigna B. (1985). Analysis of Bossea cave hydrogeological system (Maritime Alps-Italy). *Proceedings of the Ankara-Antalaya Symposium* 101-14.
- Civita M., Gregoretti F., Morisi A., Olivero G., Peano G., Vigna B., Villavecchia E., Vittone F. (1990). Atti della stazione scientifica della grotta di Bossea. Torino: Politecnico di Torino e CAI Cuneo.
- Antonellini M., Nannoni A., Vigna B., De Waele J. (2019). Structural control on karst water circulation and speleogenesis in a lithological contact zone: The Bossea cave system (Western Alps, Italy). *Geomorphology* vol. 345.
- Chandiou C. (2021). Studio di stabilità di volte rocciose naturali nella grotta di Bossea. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino.
- De Waele J., Piccini L., (2008). Speleogenesi e morfologia dei sistemi carsici in rocce carbonatiche. Atti del 45° Corso CNSS-SSI di III livello "Geomorfologia Carsica".