

ANALISI DI STABILITÀ DI GRANDI CAVITÀ SOTTERRANEE CON MODELLAZIONE AL CONTINUO E AL DISCONTINUO

Andrea Perino

*Dipartimento di ingegneria strutturale e geotecnica, Politecnico di Torino
andrea.perino@polito.it*

Qingrui Lu

*Dipartimento di ingegneria strutturale e geotecnica, Politecnico di Torino
qingrui.lu@polito.it*

Giovanni Barla

*Dipartimento di ingegneria strutturale e geotecnica, Politecnico di Torino
giovanni.barla@polito.it*

Sommario

La stabilità di grandi cavità sotterranee riveste un ruolo di grande interesse nella meccanica e nell'ingegneria delle rocce. Questo articolo tratta la modellazione tridimensionale al continuo e al discontinuo di due grandi cavità sotterranee: la caverna di Venaus, facente parte dell'impianto idroelettrico di Pont Ventoux in Val di Susa, in provincia di Torino, e la caverna di Tel Beer Sheva in Israele. Dopo un breve richiamo ai principali approcci di modellazione si passa all'analisi di stabilità della caverna di Venaus attraverso un modello continuo FEM. La stabilità della caverna di Tel Beer Sheva viene invece analizzata costruendo un modello discontinuo DEM. Dal confronto dei risultati ottenuti dalle analisi numeriche con le grandezze misurate in sito si è verificata l'attendibilità di questi due differenti approcci di modellazione di una grande opera sotterranea scavata all'interno di un ammasso roccioso.

Introduzione

L'analisi della stabilità di grandi cavità sotterranee è un problema complesso e di particolare interesse ingegneristico. I passi fondamentali da seguire sono la definizione delle fasi di scavo, la valutazione della stabilità della cavità in condizioni "intrinseche" (cioè in assenza di interventi di stabilizzazione) e infine la scelta di adeguati sistemi di rinforzo atti a garantire la stabilità dell'opera.

In letteratura sono disponibili pochi esempi di analisi di stabilità di grandi cavità sotterranee. Di particolare interesse è il lavoro pubblicato da Barton (1994) riguardante la valutazione della stabilità di una grande caverna avente luce massima di 62m. L'analisi di queste opere richiede l'utilizzo di codici di calcolo in grado di rappresentare in maniera accurata la geometria della cavità e l'ammasso roccioso. A tale proposito la scelta dell'approccio di modellazione dell'ammasso roccioso è il punto fondamentale. Gli approcci che possono essere adottati sono essenzialmente due (Barla & Barla 2000).:

- L'approccio continuo equivalente: l'ammasso roccioso è trattato come un mezzo continuo avente proprietà iniziali di deformabilità e resistenza uguali in tutte le direzioni, che definiscono una legge costitutiva data per il mezzo (elastico, elasto-plastico, ecc.)
- L'approccio discontinuo: l'ammasso roccioso è rappresentato come un mezzo discontinuo. Molta attenzione deve essere rivolta alla definizione delle proprietà caratteristiche della roccia intatta e dei giunti. L'ammasso roccioso è rappresentato come un insieme di blocchi che interagiscono tra loro in corrispondenza dei giunti. I

giunti o le discontinuità svolgono un ruolo molto importante e quindi diventano importanti anche le loro caratteristiche geometriche come l'orientamento e la spaziatura.

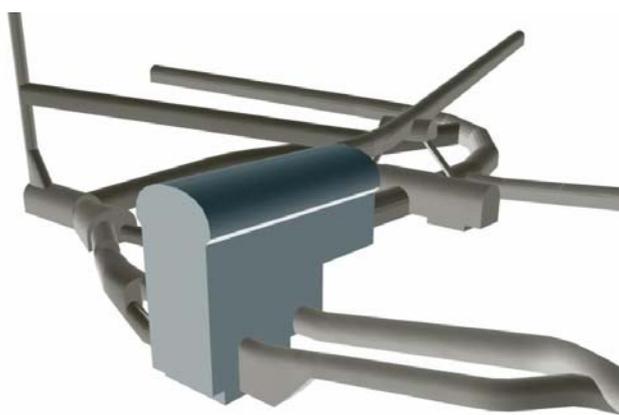
In questo articolo si porrà l'attenzione sull'analisi di stabilità di due grandi caverne attraverso una modellazione al continuo ed una al discontinuo. Le analisi sono state condotte in due e in tre dimensioni utilizzando un codice agli elementi finiti (Midas/gts) e un codice agli elementi distinti (3DEC). Particolare attenzione sarà riservata alla descrizione dell'importanza della modellazione tridimensionale di questo tipo di opere. Saranno infine descritti alcuni risultati ottenuti dalle analisi di tipo statico mentre non saranno trattate per motivi di brevità le analisi di tipo dinamico.

Modellazione al continuo: la centrale idroelettrica di Venaus

Descrizione del sito e del modello

La centrale in caverna di Venaus è la componente più importante del complesso schema dell'impianto idroelettrico di Pont Ventoux in Val di Susa, Torino (Figura 1). L'accesso alla caverna è garantito da una galleria lunga circa 1170m con imbocco presso la strada Venaus-Susa. La caverna è stata scavata all'interno di un ammasso roccioso costituito da calcescisti carbonatici fino alla profondità di circa 250m dalla superficie. Dai rilievi effettuati in sito si sono individuate essenzialmente due famiglie di discontinuità sub-orizzontali di cui uno è rappresentativo della scistosità e due famiglie sub-verticali tra loro perpendicolari.

La caverna ha un'altezza massima di circa 49m, una lunghezza di 50m e una luce massima di 23m. Lo scavo della caverna è stato eseguito per fasi successive mediante abbattimento con esplosivo. Il sistema di rinforzo adottato è costituito da barre passive iniettate con resina, poste in opera immediatamente dopo ogni singola fase di avanzamento di scavo (rinforzo di prima fase) e da tiranti di ancoraggio a barra di tipo permanente, iniettati con malta cementizia, posti in opera al termine di ogni fase di scavo (rinforzo di seconda fase) e pretesi a 2/3 del valore nominale di resistenza. Il rinforzo di prima fase è stato completato da uno strato di calcestruzzo spruzzato di 10cm di spessore, armato con rete elettrosaldata. Il rinforzo di seconda fase è invece stato completato con uno strato di calcestruzzo spruzzato di 15cm di spessore, fibrorinforzato (Barla et al., 2008).



*Figura 1. Il nodo della Centrale in caverna di Venaus del nuovo impianto idroelettrico Pont Ventoux – Susa
(Immagine 3D di Alpina S.p.A. modificata)*

Grazie alla simmetria della caverna si è potuto mettere a punto (per le sole analisi statiche), nel codice agli elementi finiti Midas/gts, un modello tridimensionale costituito da una sola metà della caverna in modo da ridurre significativamente i tempi di calcolo. La caverna avendo un'elevata copertura può essere considerata come profonda. Le dimensioni del

modello numerico sono rispettivamente di $230 \times 115 \times 230m$ (Figura 2a). Lo scavo della caverna è stato simulato in 12 fasi aventi ciascuna uno spessore di $2m$. I sistemi di rinforzo di prima e di seconda fase sono stati anche essi simulati in modo tale da rappresentare fedelmente le varie fasi di scavo (Figura 2b).

Le fasi di modellazione della caverna possono essere sinteticamente riassunte nei seguenti punti:

- Inizializzazione del modello privo della galleria allo stato tensionale in-situ.
- Simulazione dello scavo di metà della calotta e riduzione delle proprietà meccaniche degli elementi posti nella zona rilassata attorno allo scavo.
- Installazione del sistema di rinforzo di prima fase.
- Scavo della parte laterale dell'arco posto in sommità alla caverna con la simulazione della zona disturbata e l'installazione di barre passive. Allo stesso tempo si attiva il rinforzo di seconda fase per la zona scavata in precedenza in calotta.
- Esecuzione delle altre fasi di scavo con le stesse modalità descritte ai punti precedenti.

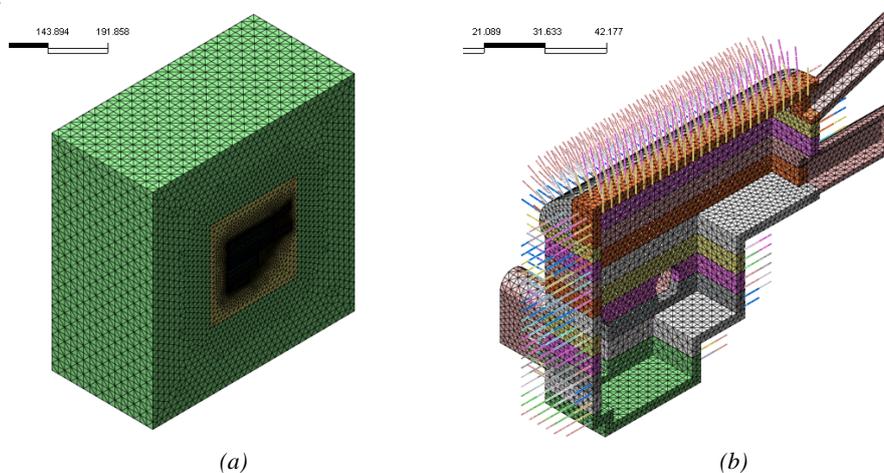


Figura 2. Modello 3D implementato in Midas/gts (a) e la zona disturbata con gli interventi di rinforzo (b)

Le proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso risultano le seguenti: modulo di deformabilità per la fascia indisturbata = $22GPa$ e per la fascia disturbata = $14GPa$, coefficiente di Poisson = 0.25, costanti di Hoek-Brown per la fascia indisturbata $m = 1.18$, $s = 0.012$ e per la fascia disturbata $m = 0.28$, $s = 0.002$. Si è assunta una tensione verticale geostatica in-situ pari a $10.8MPa$ e un coefficiente di spinta a riposo K_0 pari a 0.56.

Analisi dei risultati

Il confronto della distribuzione delle tensioni principali della caverna in condizioni intrinseche e in presenza dei sistemi di rinforzo, ottenute dalla modellazione FEM, evidenzia che la zona tesa in corrispondenza delle pareti laterali della cavità si riduce decisamente in seguito all'installazione dei sistemi di rinforzo. Questa consente di escludere la possibilità di rotture per trazione.

Per misurare gli spostamenti indotti nell'ammasso roccioso durante lo scavo è stato posto in opera, in più sezioni, un sistema di monitoraggio. La Figura 3 presenta il confronto tra la distribuzione degli spostamenti misurati dovuti allo scavo della calotta e quelli ottenuti dall'analisi numerica FEM in condizioni intrinseche e in presenza dei sistemi di rinforzo. Gli spostamenti ottenuti dalle analisi FEM risultano essere inferiori a quelli misurati fino a una distanza di $8m$ dall'intradosso della calotta mentre oltre diventano maggiori di quelli rilevati. Comunque si può ritenere che la modellazione FEM di tipo tridimensionale consenta di calcolare spostamenti molto prossimi quelli misurati in sito.

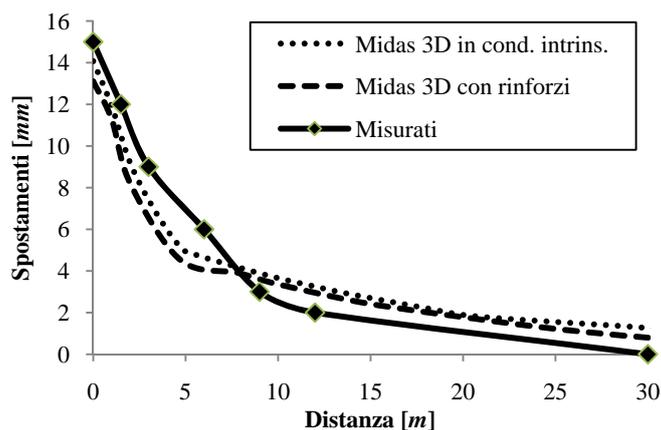


Figura 3. Distribuzione degli spostamenti dovuti allo scavo della calotta: confronto tra i valori ottenuti dalla modellazione FEM e quelli misurati

Modellazione al discontinuo: la caverna di Tel Beer Sheva

Descrizione del sito e del modello

La caverna di Tel Beer Sheva sorge all'interno di un sito di particolare interesse archeologico nel deserto del Negev, in Israele. Studi archeologici hanno messo in luce che la cavità è stata scavata 3000 anni fa con l'obiettivo di realizzare un grande serbatoio per la raccolta delle acque. La caverna ha una forma abbastanza complessa (Figura 4) ed è stata scavata all'interno di un ammasso roccioso costituito da un calcare tenero molto fratturato. Si possono individuare principalmente una famiglia di discontinuità orizzontali costituita dai piani di strato (spaziatura media 50cm) e due famiglie di discontinuità sub-verticali, tra loro perpendicolari, aventi rispettivamente una spaziatura media di 20 e 25cm. La caverna, durante le fasi di scavo, subì il collasso di parte del tetto. Successivamente, fu eretta al suo centro una grande colonna in modo da garantirne la stabilità. La caverna ha poi subito nel corso dei secoli numerosi eventi sismici che però non hanno comportato alcun danno rilevante.

Le analisi sono state condotte in due e in tre dimensioni utilizzando il codice 3DEC (Itasca Consulting Group) agli elementi distinti. Lo studio si può suddividere in tre fasi: analisi a ritroso del collasso del tetto della caverna in assenza della colonna centrale, analisi statica in presenza della colonna centrale e infine analisi dinamica. Per motivi di brevità si descriverà solo l'analisi a ritroso statica. Il modello tridimensionale della cavità ha dimensioni 45x45x23m. Nelle Figura 5a-b sono riportate le immagini della parte scavata della caverna con e senza colonna centrale. La copertura della cavità è di circa 13m. Per la roccia intatta si è assunto un modulo di Young di 2GPa, un coefficiente di Poisson di 0.1 e una densità di 19kN/m³ invece per le discontinuità si sono adottati i parametri meccanici riassunti in Tabella 1. Il modello numerico è costituito da blocchi di roccia di dimensioni 50x25x20m pari cioè ai valori medi di spaziatura delle tre famiglie di giunti. Ai giunti è stato assegnato un comportamento elasto-plastico del tipo Mohr-Coulomb.

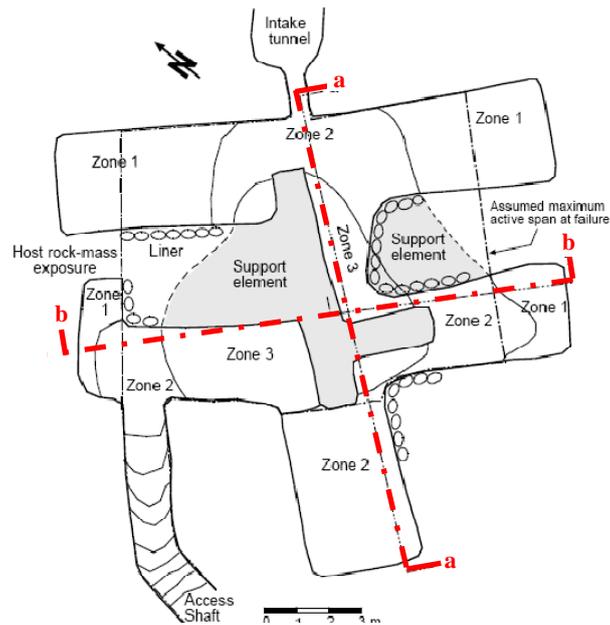


Figura 4. Vista in pianta della caverna (Hatzor & Benary, 1998)

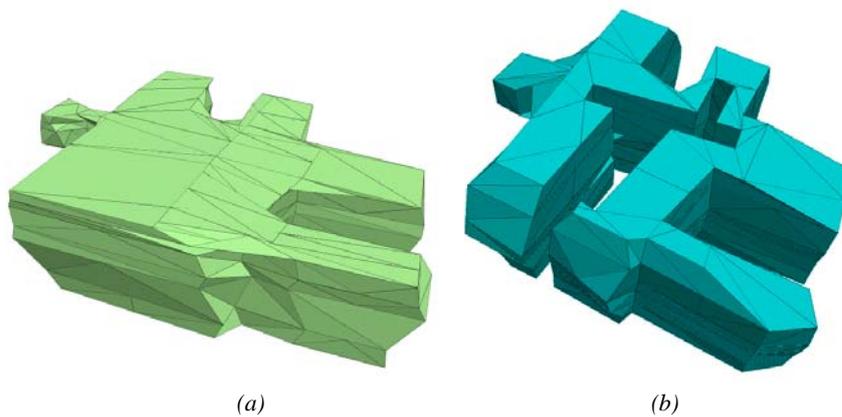


Figura 5. Modello 3D della caverna senza (a) e con (b) il pilastro centrale

Tabella 1. Parametri meccanici delle famiglie di giunti

	φ [°]	k_m [GPa/m]	k_{ss} [GPa/m]	c [MPa]	σ_t [kPa]
Bedding planes	38	3.0	1.5	2.0	1.0
Vertical joints	42	3.0	1.5	0.1	0.001

Analisi dei risultati

In Figura 6 sono riportati i risultati delle analisi a ritroso, condotte con il modello della caverna privo della colonna centrale, valutati in corrispondenza delle due principali sezioni trasversali (Figura 4). La caverna nelle sezioni considerate ha una luce massima di 12.8m e di 15.0m. È inoltre illustrato il confronto tra le forme del tetto collassato ottenute con il modello 3D con quelle dedotte dalle analisi 2D (Barla et al., 2010) e dai rilievi in sito. L'analisi numerica a ritroso ha permesso di tarare il modello numerico e di ricavare le proprietà meccaniche delle discontinuità. Il collasso simulato con il modello 2D è stato ottenuto per un valore di coefficiente di spinta K_0 pari a 0.5, mentre per simulare il collasso nel modello 3D è stato necessario ridurre K_0 a 0.3. Questa riduzione evidenzia il fatto che le analisi bidimensionali, condotte in condizioni di deformazioni piane, sono molto più cautelative di quelle tridimensionali, visto che con le prime si trascura anche l'effetto arco che si ha nella

direzione fuori piano. Dall'analisi delle traiettorie delle tensioni principali si è potuto notare la formazione dell'arco compresso al di sopra della cavità. I blocchi posti al di sotto di tale arco hanno subito, nel corso dell'analisi numerica di stabilità, una riduzione progressiva dello sforzo di compressione fino ad arrivare alla caduta e quindi al collasso del tetto.

La modellazione 3D è quindi indispensabile per valutare in maniera più attendibile la stabilità di una grande cavità. Infine si può concludere che i parametri fondamentali che influenzano la stabilità di una caverna di grande luce sono il coefficiente di spinta K_0 , l'effetto arco nella direzione fuori piano, la giacitura e la spaziatura delle discontinuità. Si è in particolare verificato che nelle analisi 3D la riduzione dell'attrito, assunto lungo i giunti verticali, a quello minimo ($= 38.6^\circ$) rilevato da Hatzor & Benary (1998) non comporta significativi effetti sulla stabilità, ma evidenzia il fatto che il fenomeno è dominato dal K_0 e dall'effetto arco in tutte direzioni spaziali.

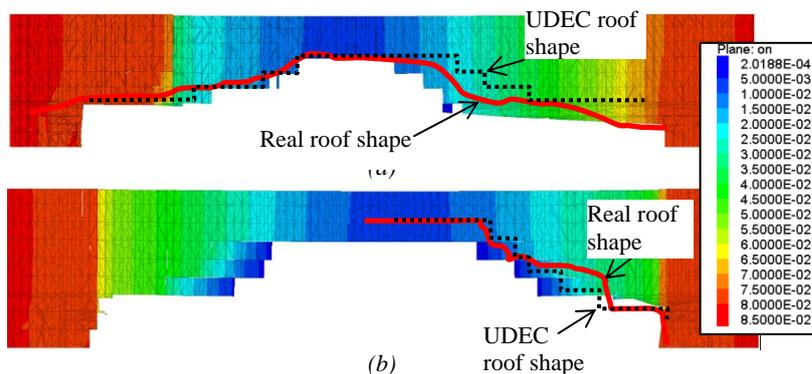


Figura 6. Confronto tra le forme di collasso del tetto della caverna ottenute dalla modellazione 2D e 3D e dal rilievo in sito per la sezione trasversale a-a (a) e b-b (b)

Conclusioni

Il confronto tra le grandezze misurate in sito e i risultati dedotti dalle analisi numeriche condotte con modellazione al continuo e al discontinuo ha permesso di verificare l'attendibilità di questi due differenti approcci di modellazione. In particolare la modellazione al continuo di tipo 3D della centrale idroelettrica di Venaus ha consentito di simulare in modo molto fedele alla realtà le varie fasi di scavo e di ottenere degli spostamenti, dovuti allo scavo in corrispondenza della calotta, molto vicini a quelli misurati. La modellazione di tipo discontinuo della caverna di Beer Sheva ha permesso di riprodurre, attraverso un'analisi a ritroso, il collasso del tetto della caverna. In conclusione si può affermare che la scelta dell'approccio di modellazione dipende dalle caratteristiche dell'ammasso roccioso e dal problema che si vuole analizzare.

Bibliografia

- Barla G. Monacis, G. Perino, A. Hatzor, Y. H. (2010). *Distinct Element Modelling in Static and Dynamic Conditions with Application to an Underground Archaeological Site*, Rock Mechanics and Rock Engineering, pp. 14, 2010, Vol. 43, pp: 877-890.
- Barla, G. Fava, A. Peri, G. (2008). *Design and construction of the Venaus powerhouse cavern in calcschists*, FELSBAU, pp: 399-406.
- Barla, G. & Barla, M. (2000). *Continuum and discontinuum modelling in tunnel engineering*, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, Vol. 61, pp: 15-35.
- Barton, N. By, T.L. Chryssanthakis, P. Tunbridge, L. Kristiansen, J. Løset, F. Bhasin, R.K. Westerdahl, H. and Vik, G. (1994). *Predicted and measured performance of the 62 m span Norwegian olympic ice Hockey Cavern at Gjøvik*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, Vol. 31, Issue 6, pp: 617-641.
- Hatzor Y. H. & Benary R., (1998). "The Stability of a Laminated Voussoir Beam: Back Analysis of a Historic Roof Collapse Using DDA". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 35, No. 2, pp. 165-181.