

ANALISI NUMERICHE 3D PER LA STIMA DEL BACINO DI SUBSIDENZA E DEL VOLUME D'ACQUA ESONDABILE IN CASO DI CROLLO DI UNA MINIERA DI GESSO ABBANDONATA

Riccardo Castellanza

DISAT – Università di Milano Bicocca

riccardo.castellanza@unimib.it

Marco D'Alesio

Settore LLPP - Comune di San Lazzaro di Savena

marco.dalesio@comune.sanlazzaro.bo.it

Gian Marco Orlandi

Studio Associato di Geologia Spada

info@studiogeospada.it

Claudio di Prisco, Gabriele Frigerio, Luca Flessati

DICA – Politecnico di Milano

claudio.diprisco@polimi.it

Josè Antonio Fernandez Merodo

Universidad Politécnica de Madrid – IGME Madrid

jose.fernandez@igme.es

Sommario

In questa memoria vengono presentati i risultati di analisi numeriche 3D, finalizzate alla verifica delle condizioni di stabilità della ex cava di gesso Prete Santo presso il Comune di San Lazzaro di Savena (BO). In seguito all'abbandono avvenuto negli anni '70, il sistema minerario, coltivato su 3 livelli con il metodo camere e pilastri, è interessato da significativi processi di degradazione conseguenti all'allagamento dei livelli profondi. Essendo interagente con un'area urbanizzata si è deciso di modellare con analisi numeriche i possibili fenomeni di subsidenza e la conseguente esondazione dell'acqua presente all'interno della cava adottando degli scenari di crollo progressivo dei pilastri e delle calotte più critiche. I risultati delle analisi hanno consentito di valutare le condizioni di pericolosità delle differenti aree ed effettuare delle scelte progettuali specifiche, mirate a risolvere situazioni di provata criticità (interferenza potenziale con persone, edifici ed infrastrutture).

1. Inquadramento delle problematiche

L'ex-cava Prete Santo è ubicata nel comune di S.Lazzaro di Savena (Bo); si tratta di una ex cava di gesso, coltivata con il metodo a camere e pilastri fino alla fine degli anni '70. Essa è posta all'interno di un potente orizzonte evaporitico, al cui interno è sviluppata un'intensa circolazione idrica per l'intercettazione di un corso d'acqua carsico. Come mostrato in Figura 1 il sistema minerario si sviluppa su 3 livelli; i due più superficiali (L1 ed L2) sono parzialmente sovrastati da un insediamento residenziale. A seguito dell'abbandono la parte inferiore della miniera è stata invasa dall'acqua ed è attualmente completamente allagata (livello inferiore L3 e parte del livello intermedio L2). Da vari sopralluoghi effettuati si è potuto riscontrare situazioni differenti di criticità a carattere locale (singoli pilastri in condizioni critiche, crolli localizzati in calotta e formazione di alcuni camini).

Il gesso, nel tempo, sia per l'azione dell'umidità atmosferica che, in maniera maggiormente rilevante,

per effetto dell'acqua che ne allaga il livello inferiore, si degrada con un processo di dissoluzione. Di conseguenza i pilastri, lasciati in posto dall'attività estrattiva, tendono a diminuire nel tempo il loro carico limite, con il rischio, nel medio termine, di crolli più o meno ampi.

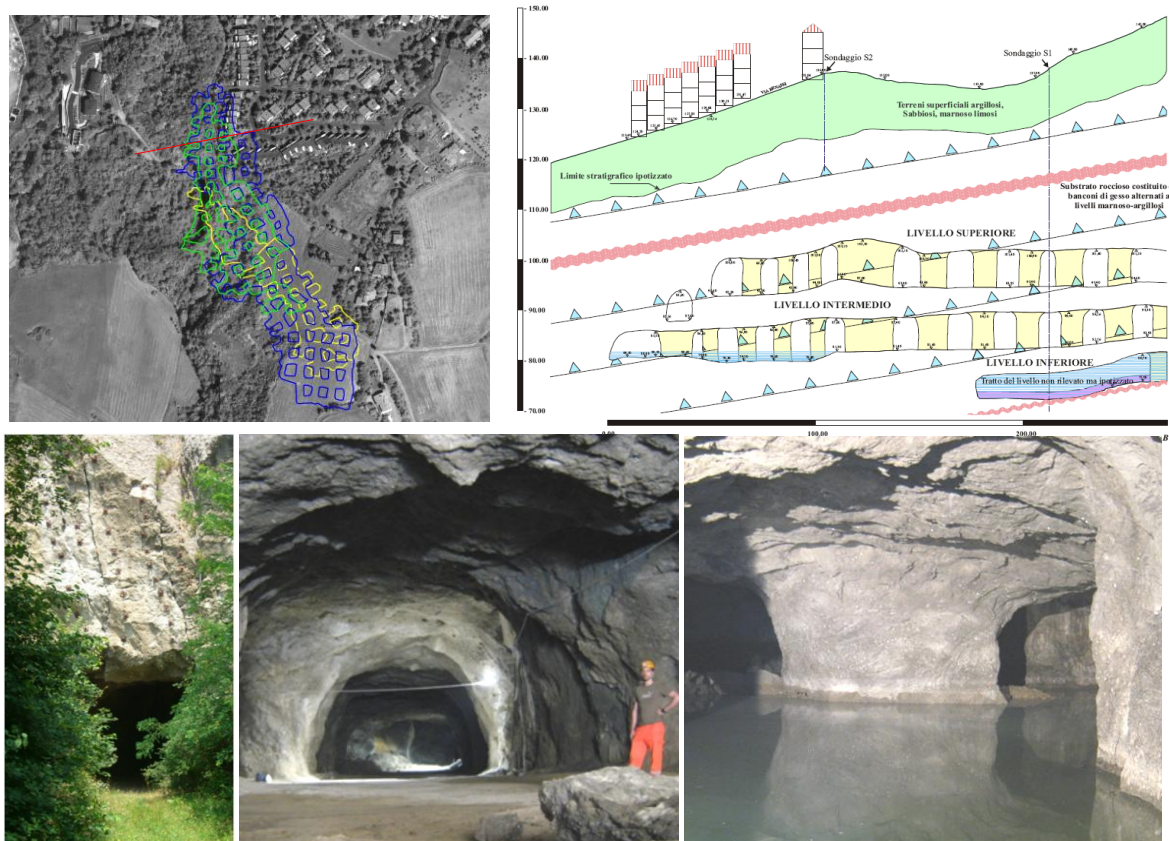


Fig 1. Viste esterne ed interne della cava di gesso abbandonata e sezione geologica schematica

2. Caratterizzazione geomeccanica del gesso e dei fenomeni di degrado

Per poter valutare gli effetti dei fenomeni degradativi indotti dall'acqua sul comportamento meccanico del gesso è stata predisposta una apposita campagna sperimentale. Dai carotaggi effettuati è stato possibile dapprima osservare le condizioni del materiale estratto e successivamente progettare una serie di prove di laboratorio finalizzate alla stima delle proprietà meccaniche del materiale al crescere della profondità. Eseguendo una serie di prove di compressione monoassiali al crescere della profondità è stato possibile misurare un valore della resistenza a compressione (UCS) di circa 12 MPa per il materiale in condizioni asciutte che si riduce a 7 MPa per il materiale prelevato nelle calotte dei livelli L1 ed L2 interessati da condizioni di aria umida saturata ($H_r \cong 100\%$) e a 5 MPa per il materiale prelevato nei livelli immersi (L3 e parte inferiore del livello L2).

Inoltre la campagna sperimentale di laboratorio ha previsto, oltre alle prove monoassiali, l'esecuzione di prove brasiliane e triassiali per la definizione dei principali parametri geomeccanici nelle differenti condizioni in sito e successivamente una serie di prove sperimentali su pilastri cilindrici in piccola scala soggetti alle condizioni tensione di sito e contemporaneamente immersi in un flusso d'acqua. In Figura 2, analogamente a quanto mostrato in Castellanza et al. (2010) viene riportata una prova effettuata su di un provino caricato con un carico assiale di 4 MPa rappresentativo delle condizioni di sito di pilastri allagati che raggiunge la rottura dopo 9 giorni dall'immersione in un flusso d'acqua.

Da ultimo sono state eseguite delle serie di prove di compressione monoassiale su provini precedente degradati per tempi di immersione crescenti sia in laboratorio che in sito. In Figura 3 si riporta la

riduzione della resistenza UCS per provini immersi in situ nel acqua presente nel livello L3 per tempi superiori a 300 giorni.

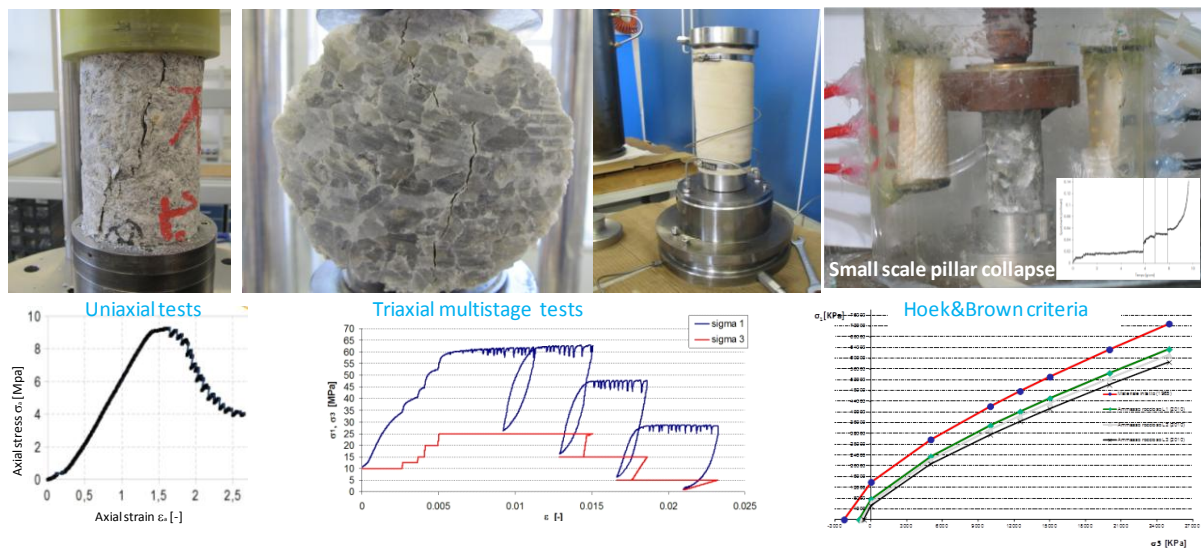


Fig 2. Caratterizzazione geomeccanica in laboratorio: prove standard e simulazione in piccola scala del collasso di un pilastro immerso in un flusso d'acqua.

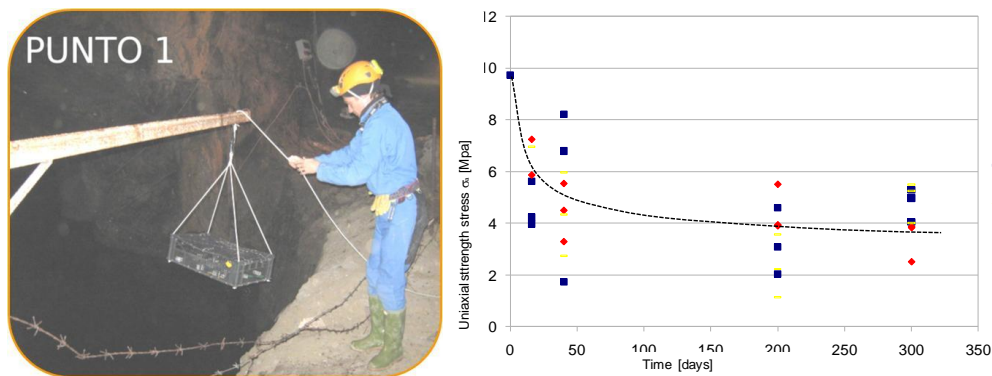


Fig 3. Decadimento della resistenza monoassiale per provini immersi in situ (parte allagata della cava)

La sintesi delle prove sperimentali effettuate ha consentito la classificazione dell'ammasso gessoso secondo il criterio di rottura proposto da Hoek e Brown (1997), discriminando differenti facies di gesso in relazione al livello di degrado da parte delle acque (fig. 2).

3. Stima del bacino di subsidenza con analisi non lineari FEM 3D in seguito a crolli parziali.

Il passaggio successivo è stato quello di realizzare un modello tridimensionale di dettaglio dell'intero sistema, comprensivo degli elementi geometrici (topografia esterna, localizzazione edifici ed infrastrutture, planimetria dei livelli minerari) e di quelli relativi alla caratterizzazione geomeccanica dei materiali ed alla loro distribuzione (fig. 4).

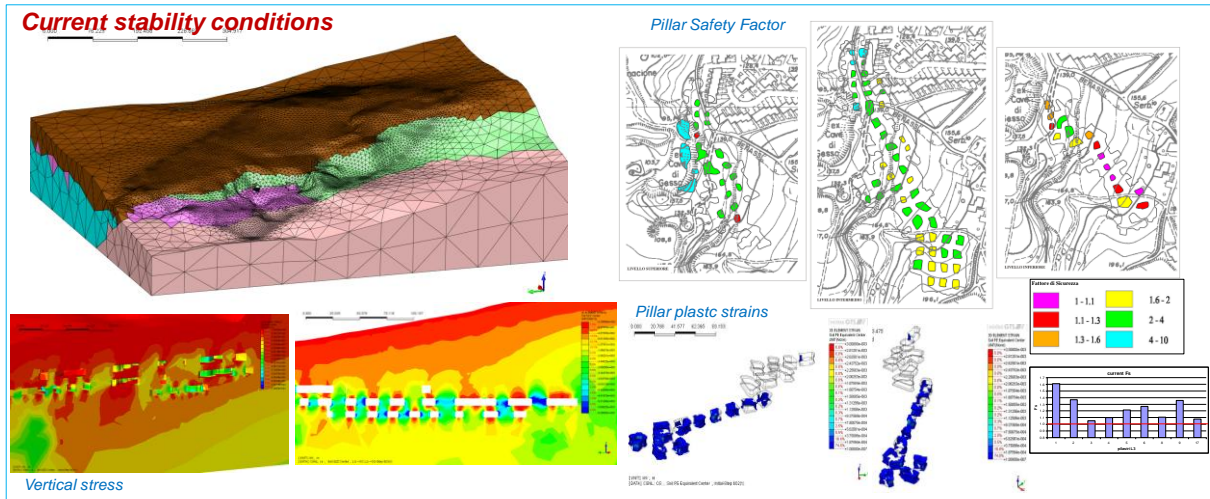


Fig 4 Valutazione delle condizioni attuali di stabilità dei pilastri con il metodo di Obert e Duvall e con analisi non lineari FEM

La modellazione numerica è stata sviluppata con analisi non lineari FEM 3D con l'utilizzo del codice di calcolo Midas-GTS. Inizialmente sono state condotte una serie di analisi e di valutazioni preliminari per la verifica delle condizioni di stabilità dei pilastri del sistema minerario. Le analisi sono state condotte sia utilizzando il metodo di Obert&Duvall (1967) utilizzando gli sforzi agenti sui pilastri, come desunti dal modello 3D, con le caratteristiche di resistenza dell'ammasso. Queste analisi hanno consentito di evidenziare le situazioni di maggiore criticità, che nel caso specifico sono rappresentate da una serie di pilastri nel livello inferiore L3, con valori del fattore di sicurezza prossimi all'unità (fig. 4) caratterizzati anche da significative deformazioni plastiche.

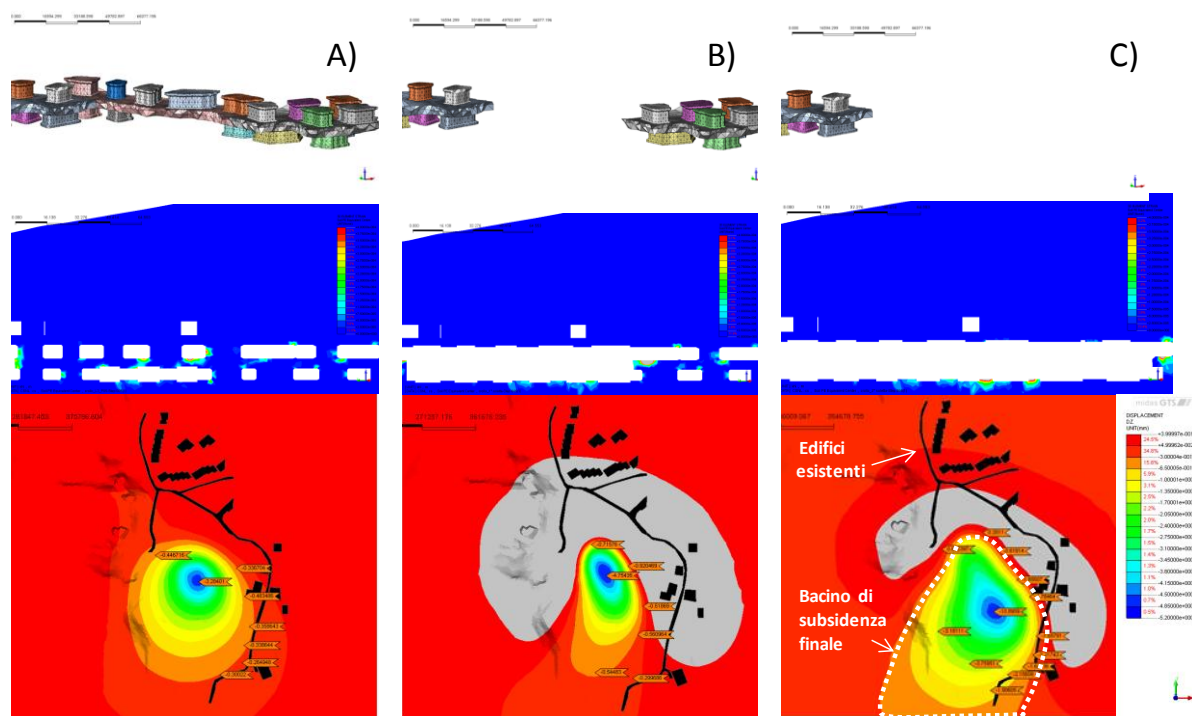


Fig 5. Simulazione del crollo progressivo (a,b,c) dei pilastri del livello inferiore allagato (L3) e dei corrispondenti del livello intermedio (L2) con previsione della subsidenza indotta in superficie in relazione agli edifici esistenti

Successivamente, utilizzando una procedura di scavo per fasi dei pilastri e della volta del livello L3 e dei corrispondenti del livello intermedio L2, il modello numerico è stato utilizzato per stimare il bacino di subsidenza in superficie (fig. 5). Le analisi hanno messo in luce che anche in caso di collasso dei pilastri più critici, il sistema è in grado di raggiungere un nuovo equilibrio, senza che si arrivi alla rottura in superficie formando una sorta di camerone avente un diametro dell'ordine di una ventina di metri. A tale scenario di crollo ottenuto con rimozione progressiva di pilastri e porzioni di calotta si predice un bacino di subsidenza con cedimenti verticali significativi (superiori a 2mm) concentrati in una zona relativamente circoscritta che solo marginalmente coinvolgerebbe gli edifici e le infrastrutture esistenti (fig. 5c).

4. Modellazione numerica 3D per la verifica del volume di acqua esondabile in caso di crollo

La modellazione numerica a carattere idraulico ha preso in considerazione l'effetto del collasso delle stesse porzioni critiche sulle acque presenti internamente nei livelli L3 e L2 (stimate in oltre 80.000mc, tra il livello inferiore L2 ed intermedio L3), con particolare riferimento ai possibili fenomeni esondativi. Tali analisi sono state effettuate con il codice numerico FLOW-3D che utilizza un approccio CFD (Computational Fluid Dynamic) basato sul metodo delle differenze finite e degli elementi finiti.

La modellazione del comportamento idraulico di un volume di fluido (volume d'acqua immagazzinata all'interno del livello inferiore della cava) assoggettato da una pressione (derivata dal crollo di una determinata porzione del sistema minerario) è stata schematizzata ed inizialmente validata attraverso semplici modelli bidimensionali e tridimensionali (fig. 6). In un dominio finito, un volume di fluido incompressibile viene a trovarsi al di sotto di un solido caratterizzato da una determinata densità, inizialmente vincolato (in equilibrio). Lasciando il solido libero dai vincoli, esso tende a muoversi in caduta libera per effetto della gravità, determinando un aumento di pressione nel volume fluido, che a sua volta ha la possibilità muoversi grazie alla presenza di collegamenti con camere di espansione (discenderie e pozzi che collegano il livello minerario allagato con il livello soprastante, non allagato).

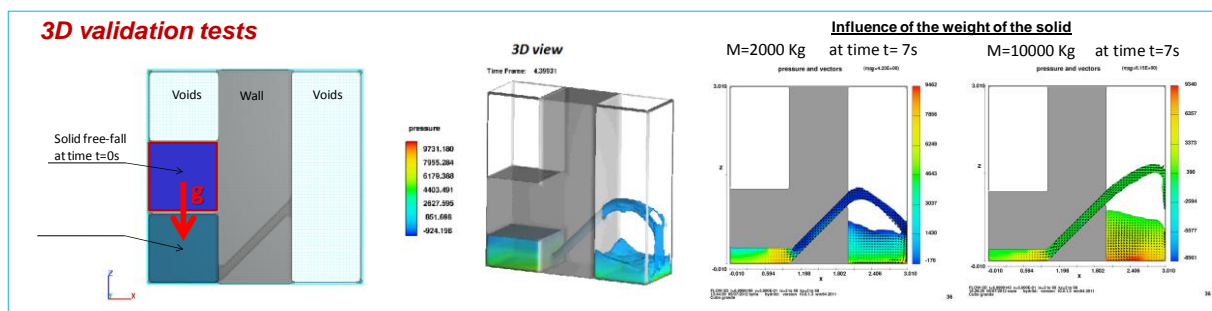


Fig 6. Prove preliminari per la validazione dello schema concettuale per la valutazione del flusso esondabile

Per l'esecuzione delle analisi relative alla risposta idraulica dell'acqua presente all'interno del sistema minerario, si è deciso di considerare una condizione ulteriormente sfavorevole consistente nel crollo dell'intera volta posta tra livello intermedio e livello inferiore in modo tale da massimizzare l'impatto dovuto alla movimentazione dell'intero volume d'acqua attualmente presente nel livello inferiore. Le analisi hanno evidenziato la notevole capacità di laminazione interna del sistema, per effetto principalmente della porzione non interessata dai crolli del livello intermedio (fig. 7).

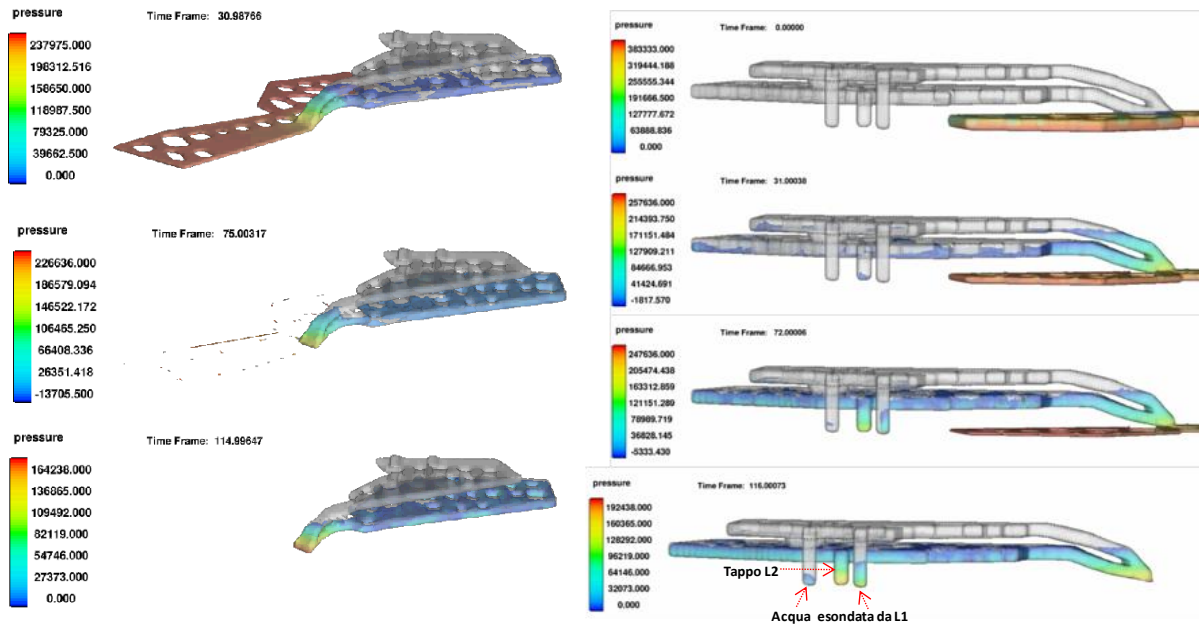


Fig 7. Previsione del volume esondabile in caso di crollo istantaneo(scenario catastrofico) dell'intero livello L3 e L2 sovrastante

Inoltre le analisi hanno consentito di valutare l'entità dell'acqua potenzialmente esondabile dal sistema, sia in termini di volumetria complessiva che di portata di picco (fig. 7 – acque esondabili). I valori sono risultati compatibili con la possibilità di incanalare tali acque ed addurle, con normali opere idrauliche, fino al vicino torrente Savena. È stato anche possibile definire la pressione dell'acqua agente su un setto di terreno particolarmente sottile e critico, ai fini di un suo rinforzo, per evitare un suo cedimento in caso di allagamento del livello intermedio, con conseguenti fenomeni esondativi incontrollati verso le abitazioni poste a valle.

5. Considerazioni conclusive

Le analisi numeriche effettuate, caratterizzate da un'accurata modellazione tridimensionale, hanno consentito di valutare gli effetti del crollo del livello L3 e del sovrastante livello L2 sia in termini di bacino di subsidenza che di volume d'acqua esondabile. Tali effetti sono stati giudicati trascurabili in termini di interazione con le aree urbane sovrastanti e poste a valle della cava considerata. Pertanto tali risultati sono stati utilizzati per una più corretta progettazione degli interventi di consolidamento che hanno visto una concentrazione degli interventi nelle zone dei livelli L1 ed L2 sottostanti gli edifici e sostanzialmente un'assenza di significativi interventi per il livello L3. Infatti anche in caso di scenari estremamente critici per il livello L3 non si registrano significative criticità per gli insediamenti abitativi.

Bibliografia

- Castellanza R., Nova R., Orlandi G. (2010), Flooded gypsum mine remedial by chamber filling, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* Vol. 136(4), pp. 629-639, DOI: 10.1061• ASCE GT.1943-5606.0000249.
- Hoek, E., and E. T. Brown (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 34.8: 1165-1186.
- Obert L, Duvall W.I. (1967). *Rocks mechanics and design of structures in rocks*, Wiley, New York