

ASPETTI METODOLOGICI DI ANALISI NUMERICA 3D RELATIVA AD UN COMPLESSO DI CAVERNE IN CONDIZIONI DIFFICILI

Cristiano Bertello (cbe@geodata.it)
Geodata Engineering S.p.A.

ABSTRACT. Negli ultimi anni si è assistito a un notevole sviluppo di metodologie e strumenti di calcolo atti ad assistere i progettisti di opere sotterranee a adottare soluzioni più efficaci e consapevoli. Grandi opere come gli impianti idroelettrici, soprattutto per via della loro rilevanza strategica, rientrano certamente nello spettro di applicazione di tali strumenti. In questo articolo si intende presentare gli aspetti più rilevanti nell'analisi geomeccanica di un complesso di caverne appartenente ad un impianto idroelettrico di pompaggio di potenza pari a 344 MW. Le criticità relative a tale progetto sono principalmente date dall'anisotropia dello stato tensionale in cui si trova il complesso di caverne, dalle complesse condizioni geologiche e dalle grandi dimensioni delle opere. Dopo un'introduzione sulle caratteristiche delle opere e un inquadramento del contesto geologico e geomeccanico, si illustrano le soluzioni adottate per il predimensionamento dei sistemi di supporto, nonché i risultati di calcolo ottenuti con un'attenta e comprensiva modellazione numerica.

1. INTRODUZIONE ED ASPETTI GENERALI

Il complesso di opere che costituiscono la parte centrale del circuito di generazione (Figura 1) è costituito da due elementi principali: 1. Powerhouse (PH, caverna delle turbine, di altezza $h \approx 50\text{m}$ e larghezza $b \approx 18\text{m}$ in cui l'acqua viene convogliata in turbine per convertire l'energia cinetica in energia elettrica); 2. Caverna dei trasformatori (TFH, $h \approx 20\text{m}$ e $b \approx 15\text{m}$ nella quale tensione ed intensità di corrente vengono variate). Il sistema prevede tunnel di collegamento tra le caverne, e tunnel di accesso/costruzione, tra questi: 1. Busbar tunnel 1 e 2 (BST1 e BST2); 2. Tunnel di accesso principale (MAT); 3. Tunnel pilota 1 e 2 (rispettivamente collegati alla parete Nord della Powerhouse (PT1) e della Caverna dei trasformatori (PT2)); 4. Tunnel di accesso secondari (Adits). Inoltre, in fase di scavo dei tunnel pilota è stato individuato un importante sistema di faglie sul lato Nord del complesso, che ha comportato in fase progettuale una rotazione delle caverne di circa 30° . In quella fase era già stato realizzato lo scavo del tunnel di accesso principale, che è quindi stato poi successivamente ritombato tramite getto di calcestruzzo (OLD MAT).

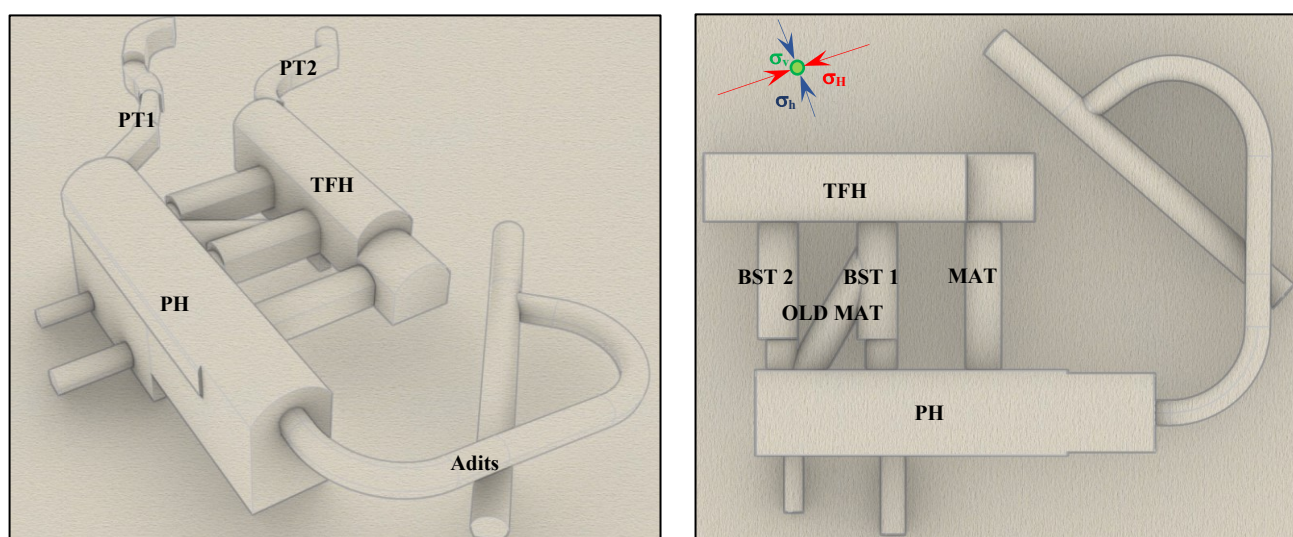


Figura 1. Vista in prospettiva (sx) e dall'alto (dx) del complesso di opere.

Lo scavo delle caverne è realizzato con ribassi successivi di altezza variabile (da 4 a 8 m) a seconda delle condizioni dell'ammasso roccioso e prevalentemente con il metodo del *Drill&Blast* (quando le condizioni non permettono l'utilizzo di questa tecnica si ricorre a escavatori tradizionali). La forma adottata per la PH e la TFH è convenzionale a ferro di cavallo con piedritti verticali, per cui la forma della calotta aiuta a ridistribuire in modo ottimale le tensioni agenti.

2. CONTESTO GEOLOGICO E GEOMECCANICO

Il contesto geologico è caratterizzato da una matrice basaltica competente (*Bs-strong*), fratturata (*Bs-weak*), strati di materiale piroclastico (*Pyr*) inclinati e sistemi di faglie. A partire dai dati derivanti dalle perforazioni di sondaggio e dai rilievi in fase di avanzamento si è generato, attraverso il software dedicato *Leapfrog Works®*, un modello geologico tridimensionale (Figura 2). Questo tipo di software utilizza un metodo di modellazione geologica implicito generato da algoritmi a partire da diverse combinazioni di differenti tipologie di dati.

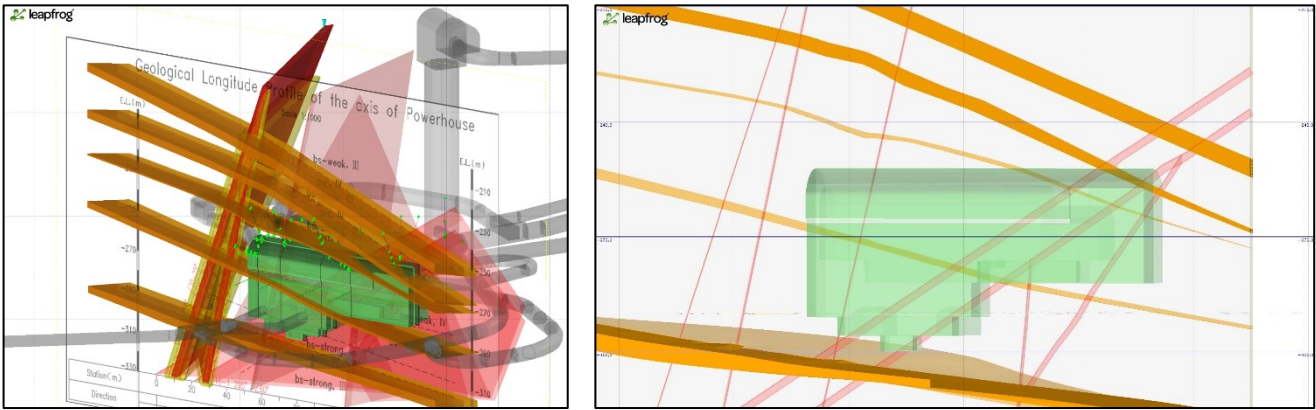


Figura 2. Risultati della modellazione geologica 3D del complesso (sx) e particolare sulla PH (dx).

Le informazioni geologiche derivanti dall'analisi geologica tridimensionale vengono successivamente gestite dal punto di vista geometrico da un programma di modellazione 3D (Figura 3-sx), per poi poter essere correttamente importate in un software di analisi agli elementi finiti (FEM - Figura 3-centro). Nello stesso ambiente si definiscono le fasi di scavo da simulare (attraverso rimozione di gruppi di elementi preventivamente definiti): dopo l'inizializzazione dello stato tensionale costante rappresentativo delle condizioni profonde, si simula inizialmente lo scavo dei PT e dell'OLD MAT, quindi si procede con la TFH in 3 fasi, i primi due ribassi della PH in 3 fasi, i tunnel di collegamento in un'unica fase ed infine l'ultimo ribasso della PH in 3 fasi come riportato schematicamente in Figura 3-dx.

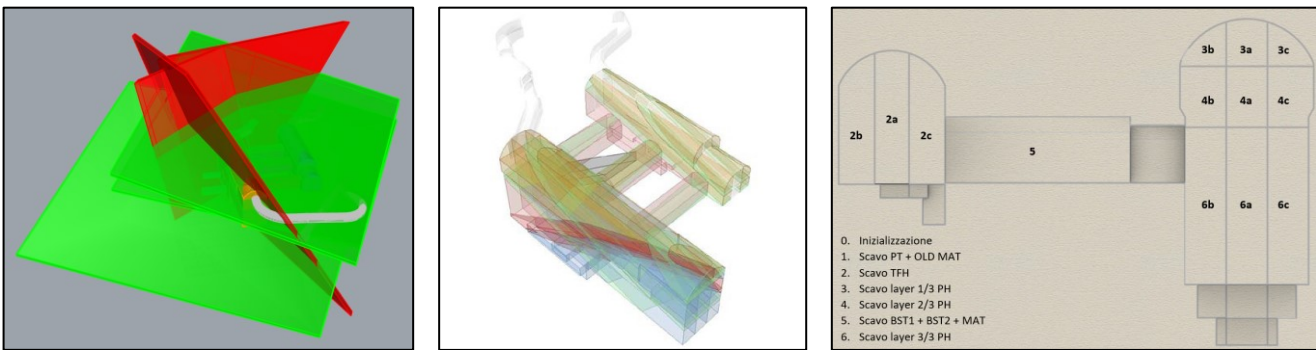


Figura 3. Rappresentazione 3D di sistemi di faglia (in rosso) e strati di piroclastite (in verde) attorno al complesso di caverne (sx), litologie (centro) e fasi di scavo (dx).

I sistemi di faglia sono caratterizzati attraverso i parametri riportati in Tabella 1. Tali parametri risultano in linea con i suggerimenti riportati in letteratura (Hoek et al., 1998 – Carter et al., 2008).

Tabella 1. Parametri geomeccanici di progetto per i sistemi di faglia: E (Modulo di deformazione); ν (Coefficiente di Poisson); UCS (Resistenza a compressione uniassiale); GSI ("Geological Strength Index"); m_i (Parametro di Hoek&Brown).

	Tipo	E [MPa]	ν [-]	UCS [MPa]	GSI [-]	m_i [-]
Sistemi di faglia	Elast. Perf. Plast.	500	0.2	20	25	10

Attraverso test in sito e prove di laboratorio le diverse litologie sono state invece caratterizzate con i parametri riportati nella seguente Tabella 2.

Tabella 2. Parametri geomeccanici di progetto per le diverse litologie (Basalto_c=competente, Basalto_f=fratturato): E (Modulo di deformazione); ν (Coefficiente di Poisson); c (Coesione); ϕ (angolo di attrito); Ψ (Angolo di dilatanza).

	Tipo	E [MPa]	ν [-]	c [MPa]	ϕ [°]	Ψ [°]
Basalto_c (classe III)	Elast. Perf. Plast.	7500	0.20	2.17	41.1	0
Basalto_f (classe IV)	Elast. Perf. Plast.	3060	0.20	1.18	28.0	0
Basalto_f (classe III)	Elast. Perf. Plast.	4760	0.20	1.64	34.7	0
Piroclastite (classe IV)	Elast. Perf. Plast.	710	0.20	0.71	19.7	0
Old MAT (CLS)	Elastico	10000	0.25	2.00	40.0	0

Diverse prove di idrofratturazione sono state eseguite a profondità tali da coprire l'intero settore del complesso di caverne (da circa -290m fino a -520m approssimativamente), per mezzo delle quali è stato possibile determinare lo stato tensionale di progetto. La tensione verticale σ_v risulta pari a 10 MPa, mentre i coefficienti di spinta a riposo massimo e minimo (dai quali è possibile ottenere le tensioni orizzontali massima σ_H e minima σ_h) sono riportati in (1). L'orientazione di tali tensioni rispetto al complesso di caverne è riportata in Figura 1 (dx).

$$K_H = \sigma_H / \sigma_v = 1.5 \qquad K_h = \sigma_h / \sigma_v = 0.7 \qquad (1)$$

3. ANALISI FEM 3D E VERIFICA DEI SISTEMI DI SUPPORTO

3.1 Sistemi di supporto

I supporti agli scavi considerati nella modellazione sono, oltre ad uno strato di calcestruzzo proiettato di classe C28/35 (spessore 35cm), quelli riportati in Tabella 3. Essi risultano in accordo con le indicazioni di Hudson & Feng, 2015 ipotizzando che il complesso di caverne si trovi in una tipologia di roccia IV.

Tabella 3. Prospetto dei sistemi di supporto previsti nella modellazione

	Tipo	Maglia	Φ [mm]	Lunghezza [m]	F_{yk} [MPa]
Bulloni $\phi 25$	Barre di acciaio corrugate e iniettate		25		
Bulloni $\phi 28$			28		
Bulloni $\phi 32$			32		
Tiranti a 10 trefoli	Tiranti a 10 trefoli pretensionati		50	35 (di cui 8 iniettati)	

3.2 Risultati delle analisi

I risultati mostrano innanzitutto l'estensione della fascia plastica sia tra le caverne che tra i BST (Figura 4), che raggiunge valori fino a 20m (si noti lo sviluppo soprattutto in faglia e piroclastiti in corrispondenza degli scavi).

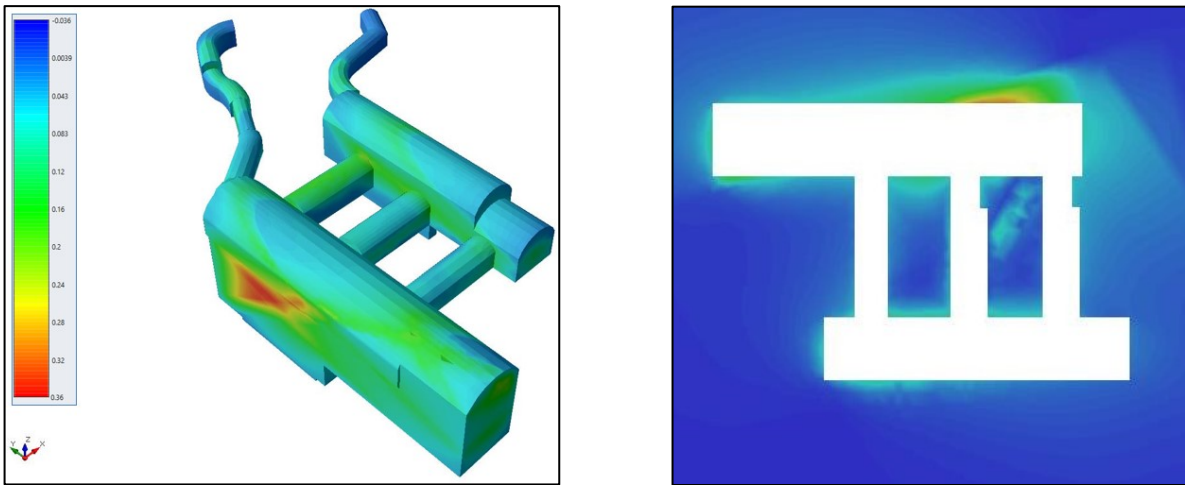
Figura 4. Zone plastiche in corrispondenza degli scavi.



La caverna che presenta le maggiori criticità, anche data la modesta distanza con i sistemi di faglia, è la PH. In particolare, in corrispondenza del muro a monte, come evidenziato in Figura 5, sono calcolati spostamenti pari

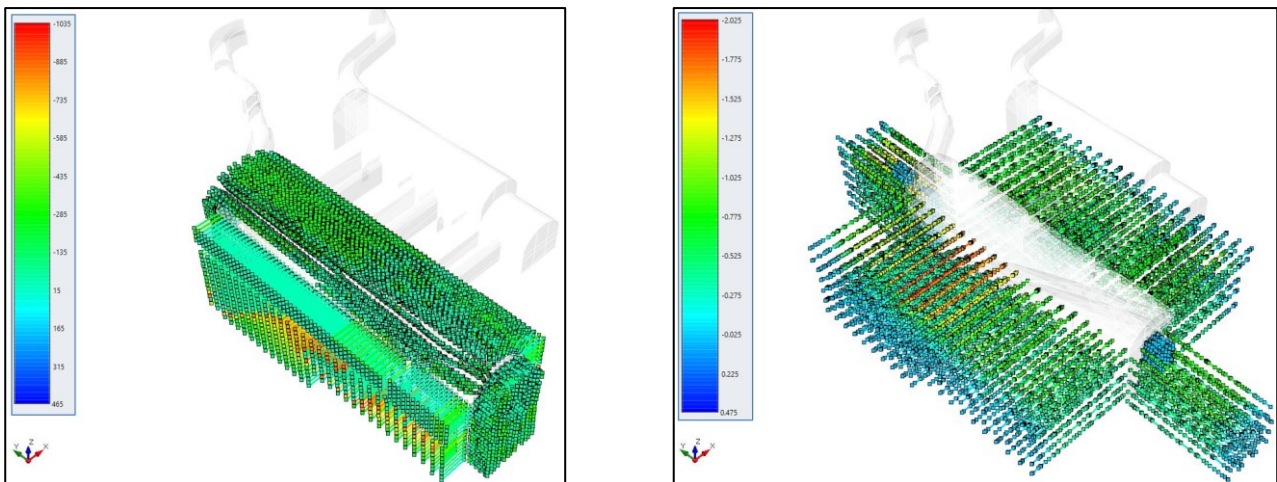
a 35 cm. In corrispondenza di tale zona vanno quindi adottati speciali interventi di mitigazione del rischio di collasso, anche in previsione dell'installazione delle unità tecnologiche di generazione.

Figura 5. Valori di spostamento totale (espressi in m), vista prospettica (sx) e in pianta (dx).



Il prospetto degli sforzi assiali nei bulloni (Figura 6-sx) mostra che mediamente il valore si aggira attorno ai 400 MPa, fino a salire ad 850 MPa nella zona critica della caverna (non verificato quindi). I tiranti seguono anch'essi questo andamento, mostrando in media 1100 kN con picchi nelle zone critiche di 2025 kN (Figura 6-dx).

Figura 6. Sforzi assiali (in MPa) nei bulloni da roccia (sx) e forze assiali (in MN) nei tiranti (dx).



4. CONCLUSIONI

In conclusione, si è mostrato come le analisi agli elementi finiti 3D possano rappresentare un valido strumento per la determinazione accurata delle zone critiche del progetto e l'adeguata scelta dei sistemi di supporto. Fondamentale risulta il lavoro in fase di impostazione del modello, in particolare per quanto concerne la corretta generazione delle litologie. In definitiva, la qualità ed i costi derivanti dall'utilizzo di sistemi di analisi avanzata devono essere coerenti con il livello di incertezza appartenente a tutti gli stadi di progettazione.

5. BIBLIOGRAFIA

- Hoek, E., Marinos, P., & Benissi, M. (1998). Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses.
- Carter, T. G., Diederichs, M. S., & Carvalho, J. L. (2008). Application of modified Hoek-Brown transition relationships for assessing strength and post yield behaviour at both ends of the rock competence scale.
- Hudson, J. A., & Feng, X. T. (2015). Rock engineering risk (Vol. 1). CRC Press.