

Analisi numeriche 2D e 3D per la progettazione di una caverna atta allo smantellamento di una TBM in un'area urbanizzata

J.P. Janin

Terrasol, 42-52 quai de la Râpée, 75583 Paris Cedex 12, France

O. Gastebled & A. Martin

EX Systra, 72 rue Henry Farman, 75015 Paris, France

SOMMARIO: Nella pratica progettuale di opere in sotterraneo, la modellazione numerica bidimensionale viene spesso impiegata grazie alla sua relativa semplicità e per i tempi di calcolo ridotti. Tuttavia, in alcuni casi l'approccio tridimensionale è necessario per ottimizzare e verificare la geometria e i metodi di costruzione, in particolare per opere sotterranee da realizzare in ambiente urbano, dove esistono vincoli restrittivi per evitare il danneggiamento delle strutture in superficie. Questo studio presenta il caso di una caverna atta allo smantellamento di una TBM nel progetto dell'estensione della linea 14 della metropolitana di Parigi. Il progetto si situa in un'area fortemente urbanizzata, caratterizzata da edifici residenziali risalenti all'epoca Haussmann, particolarmente sensibili ai cedimenti superficiali del piano campagna (subsidenza). Un modello numerico 2D in deformazioni piane, agli elementi finiti, è stato inizialmente utilizzato per valutare gli effetti causati dallo scavo della caverna. Le fasi di costruzione sono state simulate utilizzando il metodo di convergenza-confinamento per ogni sezione di scavo. Questo primo approccio ha portato a previsioni di cedimenti superiori alle soglie ammissibili. Di conseguenza, sono stati ridefiniti le dimensioni e la forma della caverna e il processo di scavo. Un modello 3D ad elementi finiti è stato quindi utilizzato per verificare l'efficacia delle scelte progettuali nel ridurre le subsidenze provocate dallo scavo dell'opera. Ciò ha permesso di tenere conto degli effetti volta 3D ed evitare le approssimazioni solitamente introdotte nella determinazione del coefficiente di rilascio delle tensioni nel metodo di convergenza-confinamento, utilizzato nei modelli 2D.

1 INTRODUZIONE

Lo scavo di una galleria rappresenta un problema tridimensionale. Ciò è stato chiaramente dimostrato da Barla (2004) sulla base dell'analisi del percorso delle tensioni nel suolo attorno al fronte di scavo. Tuttavia, il metodo di modellazione bidimensionale, con i suoi tempi di calcolo ridotti e la relativa semplicità, è ancora lo strumento più comune nella pratica corrente per le analisi progettuali di gallerie. Tra i vari metodi disponibili di modellazione 2D, l'analisi in deformazioni piane, combinata con il metodo di convergenza-confinamento (Panet, 1995), è la più utilizzata.

Tuttavia, questo approccio presenta diversi limiti. Innanzitutto, quando si considerano gallerie di lunghezza finita, l'approccio non è in grado di prendere in considerazione gli effetti di volta longitudinale 3D. Inoltre, è necessario adottare due diversi valori del coefficiente di rilascio delle tensioni nel suolo se si vuole stimare le subsidenze e gli sforzi nel supporto (Möller & Vermeer, 2008). In più, per gallerie scavate con pre-sostegni in avanzamento al fronte, solo un modello 3D può simulare correttamente il comportamento delle inclusioni con un approccio in discretizzazione (Volkman et al, 2006; Eclaircy-Caudron et al, 2006; Dias, 2002; Janin, 2012; Janin, 2015). Infine, con una simulazione 3D, non è necessario stimare a priori la variabile del coefficiente di rilascio delle tensioni (λ) - aspetto cruciale e sensibile nel caso di metodi di scavo fasati e complessi.

Questo articolo presenta lo studio di una caverna di smantellamento di una TBM, nell'ambito dell'estensione di una linea esistente della metropolitana di Parigi. Questa struttura sotterranea si posiziona sotto degli edifici di epoca Haussmann, i quali, essendo classificati come particolarmente sensibili, richiedono il rispetto di valori soglia dei cedimenti molto limitati.

Di seguito vengono descritti il contesto geologico del progetto, i risultati di un'analisi preliminare 2D e, infine, vengono presentate in dettaglio le scelte progettuali e i risultati del modello 3D.

Tabella 1. Ipotesi geotecniche

Stratigrafia	Comportamento	γh kN/m ³	E MPa	E_{50}^{ref} MPa	$E_{oed}^{ref} = E_{ur}^{ref}$ MPa	m	c kPa	φ °	Ψ °	v
Suolo copertura	Elastico lineare	20	60	-	-	-	-	-	-	0.3
Marne di Saint Ouen	“Mohr Coulomb“	19	120	-	-	-	65	17	0	0.3
Sabbie di Beauchamp	Hardening soil model	21	-	200	600	0	40	22	0	-
Marne Luteziane alterate	Hardening soil model	20	-	160	480	0	30	27	0	-
Marne Luteziane trattate	Hardening soil model	20	-	200	600	0	30	27	0	-
Marne Lutezian sane	Hardening soil model	21	400	1200	0	130	32	2	-	-
Calcare	Hardening soil model	22	1000	3000	0	100	40	10	-	-

2 CONTESTO GEOLOGICO E GEOTECNICO

2.1 Contesto geologico e idrogeologico

Gli strati interessati dallo scavo della caverna corrispondono ad un profilo geologico “standard” parigino (Figura 1):

- Sabbie di Beauchamp (SB): sabbie fini limose / argillose, di colore verdastro, di ottima compattazione e cementate localmente (blocchi di arenaria);
- Marne Luteziane (MC): alternanza di marne calcaree e strati calcarei potenzialmente molto resistenti. La parte superiore è alterata a causa della dissoluzione del gesso. Intrusioni di sabbie di Beauchamp possono essere incontrate ugualmente nella parte superiore;
- Calcare (CG): calcare con buone proprietà meccaniche.

La Figura 1 presenta le sezioni trasversali della caverna, che sono principalmente scavata nelle Marne Luteziane alterate.

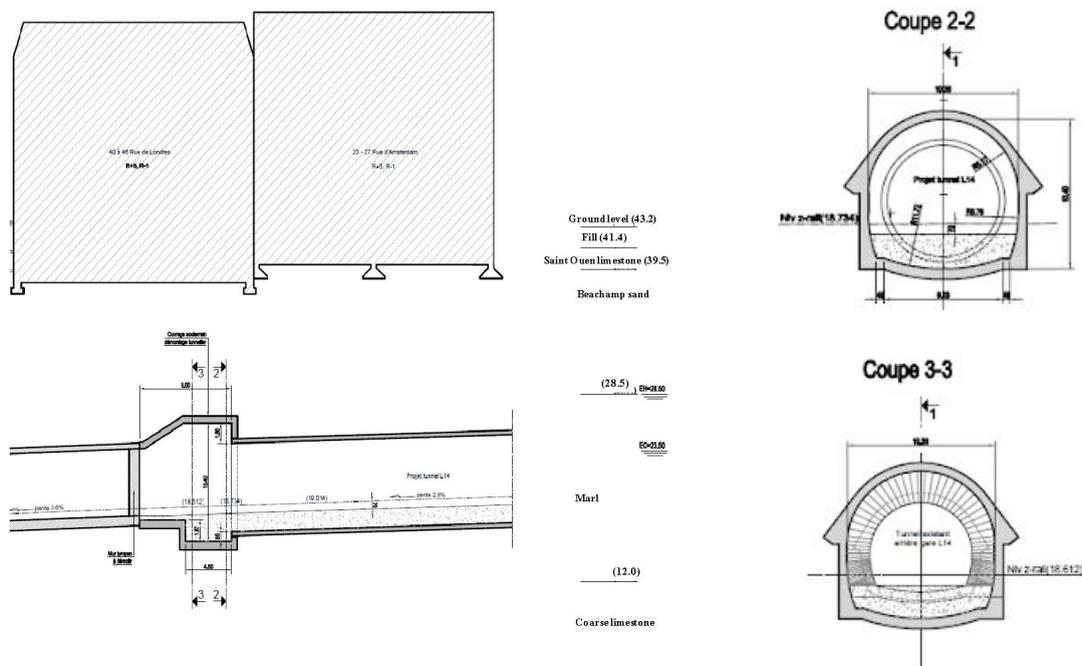


Fig. 1 - Profilo geologico longitudinale e sezioni trasversali della caverna

2.2 Caratterizzazione geotecnica

Le caratteristiche geotecniche sono state dedotte da:

- prove pressiometriche in situ;
- prove triassiali in laboratorio;
- feedback della costruzione della galleria della metro esistente

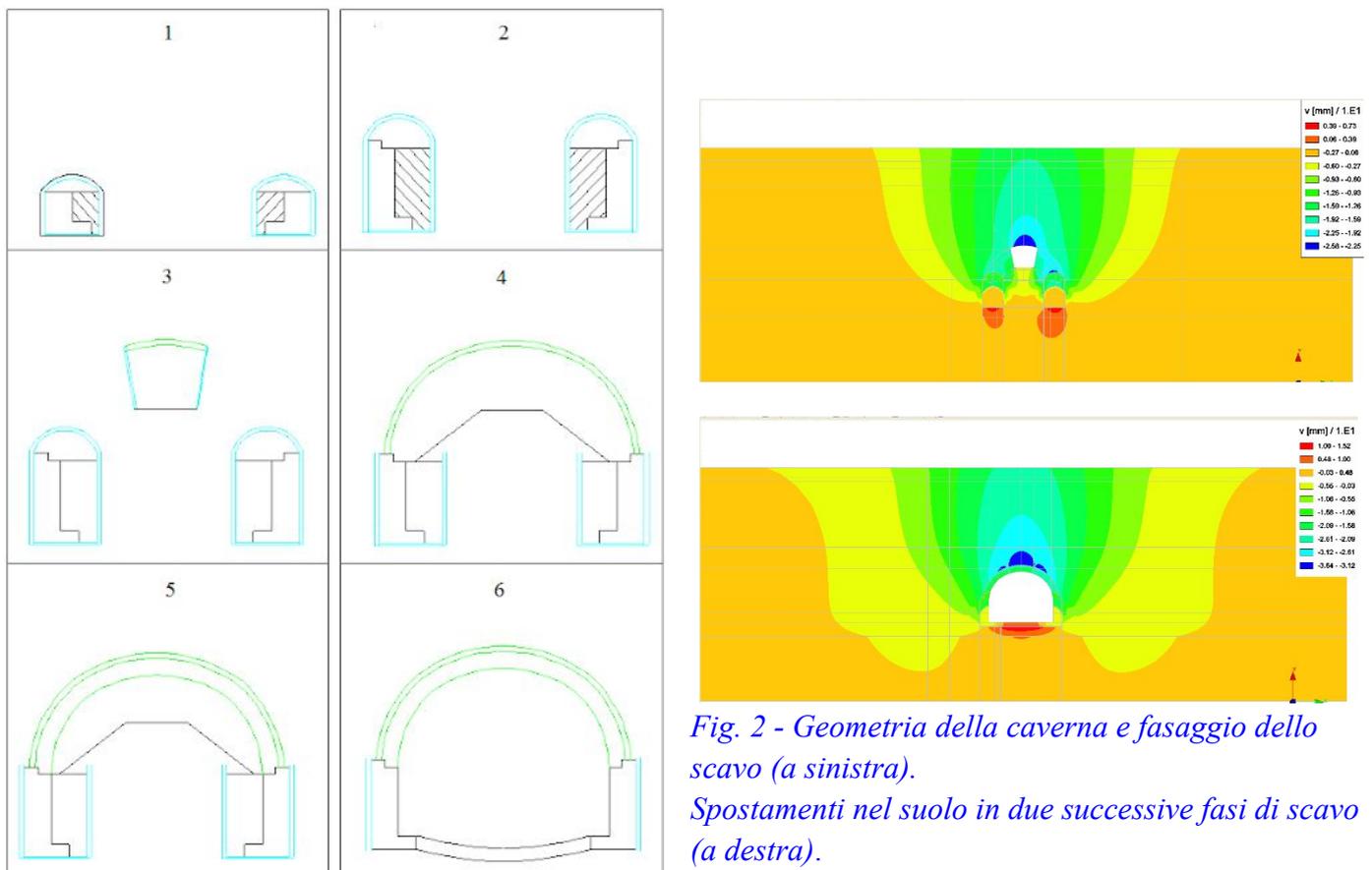
e sono riportate nella Tabella 1

3 MODELLAZIONE 2D PRELIMINARE

3.1 Geometria e fasaggio dello scavo

Nella fase iniziale della progettazione, le subsidenze indotte dallo scavo della caverna sono state stimate mediante una analisi numerica agli elementi finiti 2D, utilizzando il software CESAR LCPC. In questa fase, la caverna presentava una sezione trasversale di 148 m² e una lunghezza di 20 m. Vista la poca copertura tra la caverna e gli edifici (< diametro di scavo), le deboli caratteristiche delle marne alterate nella zona di scavo della calotta e i vincoli restrittivi da rispettare, è stato scelto un metodo di scavo a sezioni multiple. Questo metodo, tradizionalmente utilizzato per le stazioni della metropolitana di Parigi, presenta il seguente fasaggio (Figura 2): scavo di due gallerie inferiori laterali per la realizzazione dei piedritti, scavo di una galleria in calotta per installare il rivestimento superiore e infine scavo della parte restante della caverna.

I coefficienti di rilascio delle tensioni sono stati valutati inizialmente utilizzando il metodo convergenza-confinamento e sono stati poi corretti in base all'esperienza, per tenere in conto gli effetti del fasaggio dello scavo sullo stato di rilascio tensionale progressivo nel terreno.



*Fig. 2 - Geometria della caverna e fasaggio dello scavo (a sinistra).
Spostamenti nel suolo in due successive fasi di scavo (a destra).*

3.2 *Analisi dei risultati 2D*

Nonostante il metodo di scavo sequenziale, i cedimenti calcolati erano ben al di sopra dei valori fissati: 25 mm rispetto ad una soglia massima di 10 mm (Figura 4). L'analisi ha mostrato che lo scavo delle gallerie laterali e della galleria della calotta avrebbe già indotto delle subsidenze superiori a 10 mm, Figura 2.

3.3 *Modifiche nel design della caverna*

In seguito a questi risultati, un'analisi dei rischi ha mostrato che la soluzione più sicura per controllare le subsidenze era quella di modificare la procedura di smantellamento della TBM, consentendo così una significativa riduzione sia dell'area della sezione trasversale che della lunghezza della caverna. L'efficacia della nuova soluzione e, in particolare, degli effetti volta 3D nella riduzione delle subsidenze doveva quindi necessariamente essere confermata tramite un'analisi numerica tridimensionale.

4 MODELLAZIONE 3D

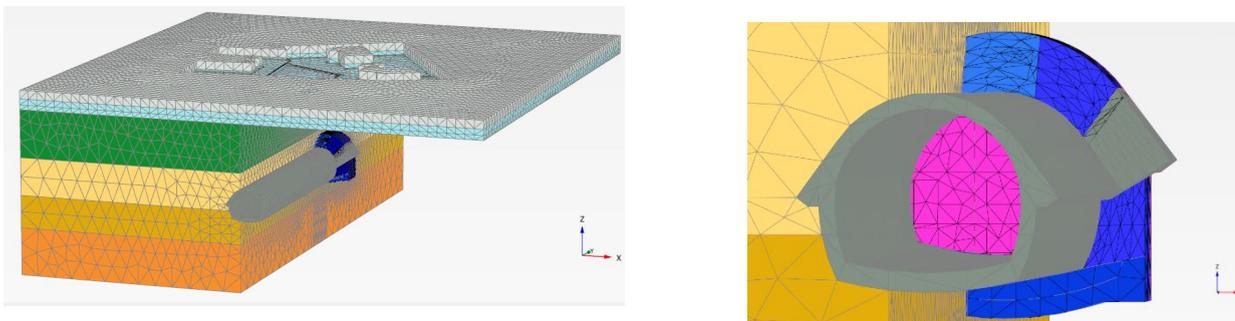


Fig. 3 - Modello 3D (Plaxis 3D)

4.1 *Nuova geometria della caverna*

A seguito della differente procedura adottata per lo smantellamento della TBM, la geometria della caverna ottimizzata consiste in (Figura 1):

- una sezione trasversale (90 m^2), lunga 5,4 m, che consente lo smontaggio della testa fresante;
- una porzione conica, lunga 4,25 m, che crea la giunzione tra la sezione del tunnel esistente e la sezione di smantellamento.

4.2 *Modello numerico 3D*

Lo scavo è stato simulato attraverso un'analisi 3D ad elementi finiti usando il software Plaxis 3D. Il modello include:

- la caverna di smantellamento;
- una porzione lunga 50 m del tunnel esistente;
- la modellazione semplificata dei sottosuoli degli edifici nella zona di influenza dell'opera;
- i carichi applicati dal peso proprio degli edifici (media di 120 kPa).

Il modello completo si estende orizzontalmente per 110 m x 110 m ed è costituito da 330 000 tetraedri (Figura 3).

4.3 Parametri geotecnici e strutturali

I parametri geotecnici utilizzati sono elencati nella Tabella 1. La falda freatica è stata posta a 23.5 slm. Nelle fasi di costruzione dopo le iniezioni nel terreno, le aree di suolo trattate sono considerate "a secco" (dry) in Plaxis. Il rivestimento del tunnel esistente e il rivestimento della caverna di smantellamento finale sono stati modellati da elementi volumetrici (con modulo $E = 10$ GPa). Il supporto temporaneo della caverna smantellata consiste principalmente in centine e calcestruzzo proiettato, modellati con elementi strutturali di tipo "plates" con rigidità globale ottenuta per omogeneizzazione.

La Tabella 2 presenta le principali caratteristiche adottate per il supporto temporaneo.

Table 2. Parametri meccanici del supporto

Tipo di supporto	d m	γ kN/m ³	E_1 (direzione centina) MPa	E_2 MPa	ν_{12} -
Centine HEB 180 + 180 cm calcestruzzo	0.18	26.8	16.8	10	0
Centine HEB 180	0.18	2.7	7.2	7.2	0
Timpano finale	0.6	25	10	10	0

4.4 Fasi di calcolo 3D

Il calcolo 3D simula le diverse fasi della costruzione della caverna. I principali step di calcolo sono i seguenti:

- inizializzazione dello stato tensionale nel terreno;
- modellizzazione delle fondazioni degli edifici e dei carichi corrispondenti;
- costruzione del tunnel esistente avente una lunghezza di 50 m;
- trattamento del suolo tramite iniezioni e scavo della prima galleria in calotta con messa in opera del sostegno provvisorio con passo di scavo di 1 m (9 steps di calcolo);
- scavo delle gallerie laterali superiori con messa in opera del sostegno provvisorio (passo di scavo di 1 m). Il calcestruzzo proiettato è demolito tra le centine della galleria centrale;
- costruzione del rivestimento della calotta;
- scavo della parte centrale della caverna;
- scavo della metà della sezione inferiore con un passo di 1 m ed installazione del supporto fino alla fine della porzione conica (4 steps di calcolo);
- finalizzazione del rivestimento della parte conica;
- scavo della metà inferiore finale della caverna con un passo di 1 m (5 steps di calcolo);
- completamento del rivestimento della caverna.

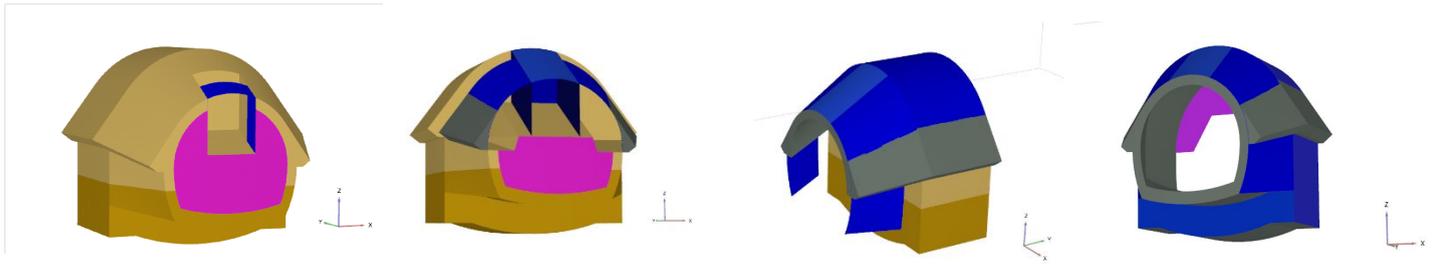


Fig. 4 - Immagini delle principali fasi di scavo della caverna simulate con Plaxis 3D

4.5 *Analisi dei risultati 3D*

La modellazione tridimensionale ha permesso di analizzare vari risultati: i cedimenti indotti agli edifici, i movimenti del terreno, la convergenza e gli sforzi nei supporti.

4.5.1 *Cedimenti indotti agli edifici*

Alla fine della costruzione della caverna, il cedimento massimo calcolato per gli edifici è di 5 mm circa (Figura 5). Pertanto, l'ottimizzazione della geometria della caverna e le fasi di scavo hanno consentito di rispettare la soglia massima di cedimento di 10 mm. Analizzando l'evoluzione del cedimento, l'incremento maggiore (circa 2,5 mm) si ottiene durante lo scavo delle parti laterali superiori della caverna. Infine, i cedimenti differenziali riscontrati rientrano all'interno della soglia ammissibile (meno di 0,5 ‰).

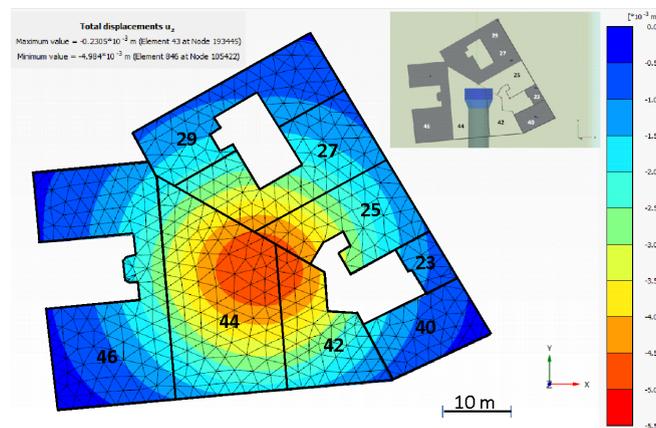


Fig. 5 - Cedimenti finali degli edifici calcolati con il modello 3D

4.6 *Movimenti nel terreno*

Il movimento verticale massimo nel suolo (circa 8 mm) si verifica sopra la parte della caverna avente la sezione più ampia. L'influenza dello scavo è visibile fino a circa 30 m dalla caverna (Figura 6).

Analizzando l'evoluzione dell'estrusione nel timpano verticale finale, si può osservare che il 40% dell'estrusione finale, di circa 7 mm, è dovuta allo scavo della parte superiore centrale della caverna. Lo scavo della metà inferiore provoca quindi un aumento dell'estrusione di circa 3 mm.

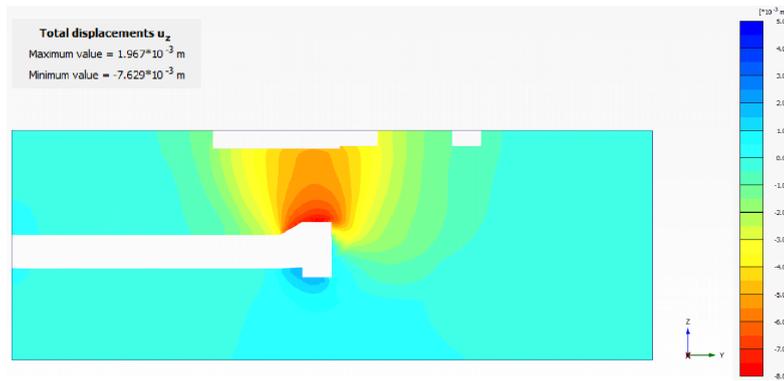


Fig. 6 - Movimenti verticali del terreno

4.7 Convergenze del supporto temporaneo

Anche la convergenza del supporto temporaneo è stata analizzata. La figura 7 mostra l'evoluzione della deformazione del supporto installato durante la prima fase di scavo della parte superiore della grande sezione della caverna. Alla fine dello scavo della metà superiore della caverna, la convergenza massima è di 3 mm.

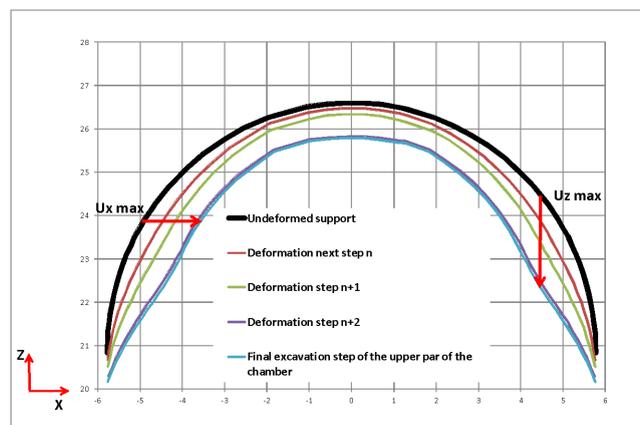


Fig. 7 - Evoluzione della deformazione del supporto temporaneo (scala deformata *500)

4.8 Sforzi nel supporto provvisorio

Gli sforzi nel supporto temporaneo sono stati ugualmente verificati. Nel caso di supporto composto da centine e calcestruzzo proiettato, i valori delle sollecitazioni N e M sono stati ripartiti tra il calcestruzzo proiettato e le centine proporzionalmente alle rispettive rigidità e inerzie. Sono stati quindi calcolate le tensioni minime e massime nel calcestruzzo e nelle centine. Per quanto riguarda le centine della parte superiore centrale della caverna, il calcolo ha dimostrato che è necessario utilizzare un acciaio di alta qualità (S355).

Table 3. Sollecitazioni e tensioni nel supporto temporaneo (segno positivo = compressione)

	Calcestruzzo			Centine			σ
	N kN	M KN.m	σ MPa	N kN	M KN.m	σ MPa	
Max	397	7	4	289	10	76	
Min	2	-9	-0.5	1.5	-14	-10	

4.9 Influenza della bullonatura al fronte

Sono stati poi realizzati due ulteriori calcoli numerici per analizzare gli effetti di un'eventuale bullonatura del fronte o di un timpano verticale in calcestruzzo sugli spostamenti nel terreno e sui cedimenti indotti agli

edifici. Gli elementi strutturali "embedded pile" sono stati utilizzati per simulare i bulloni in fibra di vetro, che possono essere installati per rafforzare il nucleo davanti alla fronte della caverna prima dello scavo della metà inferiore (Figura 8). Il primo calcolo ha mostrato che il bullonaggio riduce l'estrusione massima di circa il 7% e ha un'influenza minima sul cedimento. Al contrario, il secondo studio ha mostrato che il timpano finale verticale ha un ruolo significativo nell'estrusione del fronte (40% in più senza parete verticale) e in parte minore sui cedimenti (circa 10 % di riduzione).

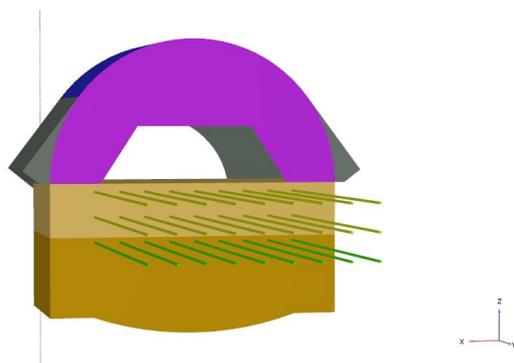


Fig. 8 - Modello numerico con bullonatura al fronte

5 CONCLUSIONI

Nel caso di opere sotterranee con geometrie complesse, le analisi numeriche 2D e 3D possono essere utilizzate in modo complementare. Come mostrato nel caso di progettazione riportato, una valutazione iniziale dei cedimenti indotti può essere ottenuta utilizzando l'analisi 2D con una scelta di tipo ingegneristico dei coefficienti di rilascio tensionale. Sulla base di questi primi risultati, la geometria e i metodi costruttivi possono essere adattati e ottimizzati. Queste scelte devono poi quindi essere convalidate utilizzando l'analisi 3D (Janin, 2016), che è in grado di simulare meglio la complessità globale del problema (geometrie complesse, effetti di arco 3D, interazione tra le diverse fasi di costruzione, descrizione accurata delle strutture esistenti ...).

Nell'esempio riportato, l'analisi 3D con il codice Plaxis è stata utilizzata per verificare i criteri di cedimenti imposti e la progettazione dei supporti. L'approccio tridimensionale ha permesso di analizzare anche l'evoluzione degli spostamenti del terreno e delle convergenze del supporto in funzione delle diverse fasi di scavo. Questi dati sono essenziali per poter applicare il metodo osservazionale durante la costruzione dell'opera.

6 REFERENZE BIBLIOGRAFICHE

- Barla, G., Barla, M. 2004. Discussion on the Full Face Method. *FELSBAU* 22 (4): 26-30.
- Dias, D., Kastner, R., Jassionnesse, C. 2002. Sols renforcés par boulonnage, Etude numérique et application au front de taille d'un tunnel profond. *Geotechnique*, n. 01, vol. GE52: 15-27.
- Eclaircy-Caudron, S., Dias, D., Chantron, L., Kastner, R. 2006. Numerical modeling of a reinforcement process by umbrella arch. In: International Conference on Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment (NSC06), Bochum (Germany).
- Galli, G., Grimaldi, A., Leonardi, A. 2004. Three-dimensional modelling of tunnel excavation and lining, *Computers and Geotechnics*, vol. 31: 171-183.
- Janin, JP. 2012. Tunnels en milieu urbain : Prévisions des tassements avec prise en compte des effets de pré-soutènements (renforcement du front de taille et voûte-parapluie). Thèse Doc. Lyon : INSA de Lyon, Lyon (France).
- Janin, JP., Dias, D., Emeriault, F., Kastner, R., Le Bissonnais, H. & Guilloux, A. 2015. Numerical back-analysis of the southern Toulon tunnel measurements: a comparison of 3D and 2D approaches. *Eng Geol*, 195: 42-52.

- Janin, JP. 2016. Apports de la simulation numérique tridimensionnelle dans les études de tunnels. *Rev. Fr. Geotech.*150, 3.
- Möller, S.C., Vermeer, P.A. 2008. On numerical simulation of tunnel installation. *Tunneling and Underground Space Technology*, vol. 23: 461-475.
- Panet, M. 1995. *Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement*. Paris: Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Volkman, G.M., Button, E.A., Schubert, W. A., 2006. Contribution to the Design of Tunnels Supported by a Pipe Roof. In: Proc. 41st U.S. Rock Mechanics Symp., American Rock Mech. Assoc., Golden, CO.
- Yeo, C.H., Lee, F.H., Tan, S.C., 2009. Three dimensional numerical modelling of a NATM tunnel. *International Journal of the JCRM*, vol. 5, n° 1: 33-38.