

## MODELLAZIONE NUMERICA DI SCAVI SOSTENUTI DA PARATIE A T A SBALZO

Antonello Di Sotto, Salvatore Miliziano  
Sapienza Università di Roma

[antonello.disotto@uniroma1.it](mailto:antonello.disotto@uniroma1.it), [salvatore.miliziano@uniroma1.it](mailto:salvatore.miliziano@uniroma1.it)

### Sommario

Le paratie a T sono delle strutture che per la loro forma hanno un funzionamento tipicamente tridimensionale. Nello studio del comportamento di queste opere spesso si ricorre ad analisi numeriche piane in cui l'elemento strutturale è modellato come privo di spessore. Con riferimento ad un caso di studio, nell'articolo sono discussi alcuni aspetti del comportamento di paratie a T desunti da analisi numeriche tridimensionali nelle quali anche l'elemento strutturale è modellato come continuo con la sua reale forma e dimensione, e dal confronto con analoghi risultati ottenuti con analisi 2D convenzionali. L'analisi dello stato tensionale conseguente all'interazione terreno-struttura indotto dallo scavo ha consentito di mettere in evidenza l'importante ruolo svolto dalle tensioni tangenziali all'interfaccia paratia-terreno nel modificare in modo quantitativamente rilevante la risposta tensionale e deformativa del sistema.

### Introduzione

Al fine di limitare gli spostamenti indotti dalla realizzazione di scavi sostenuti da paratie si può ricorrere all'irrigidimento dell'opera di sostegno. Si tratta dell'unico modo di operare nei casi in cui non è possibile contrastare l'opera mediante l'impiego di tiranti o puntoni. Oltre che modificare le dimensioni della sezione resistente della paratia, un importante effetto irrigidente può essere ottenuto modificando la geometria; in questo senso, particolarmente efficiente è la forma a T, per l'ottimo rapporto tra il momento d'inerzia e l'area della sezione di calcestruzzo. Nell'approccio progettuale convenzionale la simulazione del comportamento di queste opere viene perseguita mediante analisi numeriche piane modellando l'elemento strutturale come un elemento monodimensionale privo di spessore (*beam*) al quale sono assegnate le caratteristiche inerziali della reale sezione a T; operando in questo modo, pertanto, si trascura l'intrinseca tridimensionalità del problema derivante alla forma della sezione trasversale dell'elemento strutturale. Il comportamento degli scavi sostenuti da paratie a T e più in generale dei muri con contrafforti non è ancora completamente compreso, soprattutto per mancanza di studi sistematici nei quali si tenga esplicitamente in conto l'effettiva forma dell'elemento strutturale e per la mancanza di accurati dati monitoraggio (OU et al. 2007). Con riferimento ad un caso di studio di paratia a sbalzo, nell'articolo sono illustrati e confrontati i risultati ottenuti mediante analisi numeriche tridimensionali nelle quali anche l'elemento strutturale è modellato come continuo e con analisi 2D convenzionali. L'analisi dello stato tensionale conseguente all'interazione terreno-struttura indotto dallo scavo ha consentito di confermare la rilevanza degli effetti delle tensioni tangenziali agenti sulla superficie laterale dell'elemento strutturale (Ou et al. 2006, Buselli et al. 2011), legata alla presenza di un braccio che invece è nullo nella modellazione semplificata (Fig. 1), permettendo di quantificarne gli effetti stabilizzanti.

### **Modello geotecnico e geometrico**

Per il terreno è stato assunto un semplice legame costitutivo elasto-plastico perfetto con criterio di resistenza di Mohr Coulomb con angolo di attrito  $38^\circ$ , coesione e dilatanza nulli e modulo di Young,  $E$ , crescente con la profondità da un valore iniziale a piano di campagna di 30 MPa con un gradiente di 1MPa/m (Fig. 2). La paratia a forma di T ha una lunghezza complessiva di 30 m e sostiene un'altezza di scavo pari a 16 m. Il dimensionamento della paratia (profondità del tratto immerso) è stato eseguito mediante i metodi classici dell'equilibrio limite ipotizzando un meccanismo di rottura che prevede una rotazione dell'opera di sostegno rispetto al piede della paratia secondo le indicazioni del metodo di Blum. La geometria della paratia è riportata in figura 3.

### **Modello numerico**

Il comportamento del sistema opera-terreno è stato studiato mediante analisi numeriche eseguite con il metodo delle differenze finite, utilizzando i codici di calcolo FLAC3D v.3.1 (Itasca, 2006) e FLAC2D v.5.00 (Itasca, 2005). Le dimensioni trasversali dei reticoli di discretizzazione utilizzati, riportate in figura 2, sono state scelte in modo da minimizzare gli effetti di bordo. Nelle analisi 3D, la simmetria del problema consente di modellare solamente mezzo pannello (Fig.3). Le condizioni di vincolo assegnate al modello prevedono che i punti sui contorni verticali siano impediti di spostarsi fuori piano, mentre i punti sul contorno inferiore non possano spostarsi in nessuna delle tre direzioni. La paratia è connessa al terreno mediante interfacce puramente attritive avente le medesime caratteristiche meccaniche del terreno. Non sono state simulate le fasi costruttive (scavo, getto e maturazione del calcestruzzo).

I risultati delle analisi numeriche riportati nella nota fanno riferimento ad una *mesh* abbastanza fitta caratterizzata da dimensioni degli elementi di 25 cm di lato in adiacenza all'opera di sostegno; allontanandosi dalla paratia la dimensione degli elementi cresce sino a raggiungere valori di 1 m in prossimità dei bordi (Fig. 5). La soluzione numerica è accurata in quanto ulteriori infittimenti della *mesh* e riduzioni della forza sbilanciata non producono apprezzabili differenze delle grandezze rilevanti nel descrivere il comportamento del sistema. Ciascun valore di spostamento e momento flettente riportato in figura 4 è associato al raggiungimento di condizioni di stazionarietà della soluzione numerica (il risultato non varia all'aumentare del numero degli *step* di calcolo e al conseguente ridursi della forza sbilanciata). Nella analisi 3D in cui anche la paratia è modellata come continuo, i momenti flettenti sono stati calcolati integrando le tensioni normali agenti sulla generica sezione dell'elemento strutturale; la correttezza dei valori del momento flettente in ciascuna sezione di interesse è stata verificata eseguendo il calcolo anche a partire dalle tensioni normali e tangenziali agenti sul contorno dell'elemento strutturale.

### **Illustrazione e commento dei risultati**

Nelle figure 6 e 7 sono posti a confronto i risultati ottenuti nella analisi 3D e nelle analisi 2D semplificate in termini di spostamenti e momenti flettenti dell'elemento strutturale, rispettivamente. In conseguenza dell'elevata rigidità strutturale e delle distribuzioni delle tensioni lungo la paratia, l'inflessione è appena accennata e, pertanto, le deformate sono caratterizzate da semplici roto-traslazioni. La deformata dell'elemento *beam* è caratterizzata da una rotazione rigida attorno al piede della paratia e presenta uno spostamento massimo pari a circa 11.2 cm. Gli spostamenti restituiti dall'analisi 3D evidenziano una rotazione sensibilmente più contenuta, e benché sia presente un apprezzabile spostamento al piede (circa 1.5 cm), lo spostamento in testa pari a 3.9 cm, risulta sensibilmente inferiore rispetto a quanto ottenuto nel modello 2D semplificato. Notevolmente più bassi risultano anche i

momenti flettenti ottenuti nel modello numerico 3D (2910 KNm piuttosto che 4160 KNm per metro di paratia); si nota anche che la dimensione finita con la quale si è modellato l'elemento strutturale comporta un momento non nullo al piede della paratia stessa, sia pure di valore relativamente modesto. In definitiva, tenendo esplicitamente in conto la geometria della paratia, si ottiene un momento più basso di circa il 40 % e soprattutto gli spostamenti sono ridotti a circa un terzo rispetto a quanto ottenuto nelle analisi 2D semplificate.

In figura 8 sono poste a confronto le tensioni normali e tangenziali agenti sulla paratia a T e sull'elemento *beam*. Le distribuzioni delle tensioni normali nella parte alta della paratia, a monte, sono sostanzialmente coincidenti; benché quantitativamente molto diversi, gli spostamenti sono comunque sufficienti a mobilitare in entrambi i casi studiati le condizioni di equilibrio limite attivo sino a profondità elevate (circa 25 m); fanno eccezione gli ultimi 4 metri di paratia in corrispondenza dei quali le tensioni orizzontali ottenute nelle analisi semplificata risultano più alte. A valle si osserva una apprezzabile differenza tra le tensioni orizzontali agenti. Analogamente a quanto osservato per le tensioni orizzontali, a tergo della paratia, al di sopra del piano di scavo si ha una sostanziale coincidenza degli andamenti delle tensioni tangenziali ottenute nei due modelli mentre differenze apprezzabili si riscontrano in profondità. A valle si osserva ancora per tutta l'altezza una sostanziale coincidenza tra la distribuzione delle  $\tau$  ottenuta con le analisi 2D e quanto ottenuto nel modello 3D in corrispondenza del bordo controterra dello sperone. Fatta eccezione per i primi 3 m al di sotto del fondo scavo le tensioni tangenziali agenti sul setto principale sono nulle. Infine, sulle superfici dello sperone ortogonali alla paratia, modeste sono le componenti medie orizzontali delle  $\tau$  ( $\tau_x$ ) mentre valori medi più elevati assumono le componenti verticali ( $\tau_z$ ).

La differenza di comportamento osservato nei due modelli, stante la sostanziale coincidenza delle tensioni normali di contatto terreno-struttura derivanti dall'interazione, almeno fino ad una profondità di 17 m, è legata esclusivamente al differente ruolo giocato dalle tensioni tangenziali agenti sulla superficie laterale della paratia. Nel caso in cui la paratia è modellata con la sua effettiva geometria, infatti, le tensioni tangenziali esercitano una coppia stabilizzante che si oppone a quella generata dalle tensioni normali in grado di ridurre la rotazione della paratia e i momenti flettenti che la sollecitano.

### **Conclusioni e futuri sviluppi**

Con riferimento al caso specifico studiato, l'analisi dei risultati ottenuti ha consentito di evidenziare come il comportamento tensionale e deformativo del complesso opera-terreno risulta quantitativamente modificato quando si tiene in conto esplicitamente la forma e le dimensioni dell'elemento strutturale mediante lo sviluppo di analisi numeriche tridimensionali. Il momento stabilizzante associato allo sviluppo di tensioni tangenziali lungo la superficie laterale della paratia, trascurato modellando la paratia mediante elemento *beam* privo di spessore, infatti, gioca un ruolo rilevante. In definitiva, tenendo esplicitamente in conto la geometria della paratia si è ottenuto un momento più basso di circa il 40 % e soprattutto gli spostamenti si sono ridotti a circa un terzo.

Coerentemente con l'interpretazione delle risposte numeriche ottenute, le analisi che si stanno sviluppando per indagare i principali fattori da cui il problema dipende (dimensioni della paratia, contesti geotecnici, resistenza all'interfaccia, ecc.) evidenziano che un ruolo importante è svolto dalla resistenza assegnata all'interfaccia paratia-terreno. Benché lo studio sia attualmente ancora in corso si può anticipare che ad eccezione dei casi in cui la resistenza di interfaccia è assunta particolarmente bassa, per una corretta valutazione del comportamento di paratie a sbalzo a forma di T è necessario ricorrere a modelli 3D simulando la dimensione finita dell'elemento strutturale.

Va infine osservato che, grazie alla simmetria che presentano le geometrie generalmente

adottate e le densità non particolarmente fitte che i reticoli di calcolo devono avere per garantire soluzioni accurate, il numero di elementi da impiegare nella discretizzazione del problema al finito e conseguentemente i tempi di calcolo, sono relativamente contenuti. E' auspicabile che nella pratica professionale corrente la progettazione di questa specifica tipologia di opera di sostegno possa avvalersi dell'ausilio dell'analisi numerica 3D, benché risulti ancora laborioso il calcolo delle caratteristiche delle sollecitazioni lungo l'elemento strutturale simulato come continuo; in questi casi, infatti, poiché i codici commerciali attualmente disponibili non le restituiscono automaticamente, devono essere calcolate a partire dalle tensioni normali e tangenziali agenti su ciascuna sezione o per integrazione delle tensioni agenti sul contorno dell'elemento strutturale.

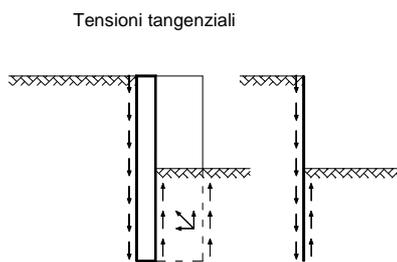


Figura 1. Distribuzione delle  $\tau$  nei modelli 3D/2D.

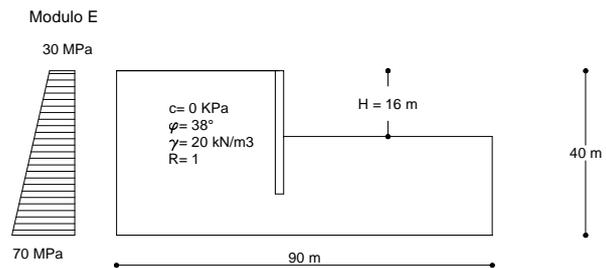


Figura 2. Modello geometrico e geotecnico utilizzato.

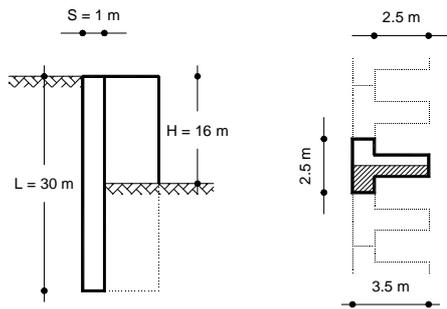


Figura 3. Geometria della paratia a T.

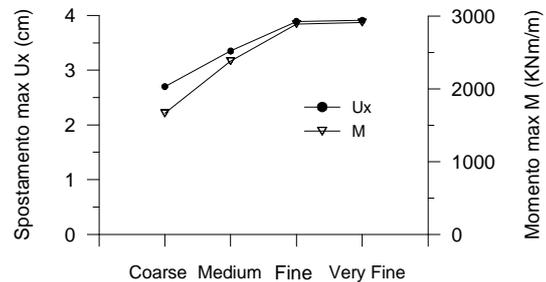


Figura 4. Influenza della densità della mesh (altezza di scavo  $H=16$  m).

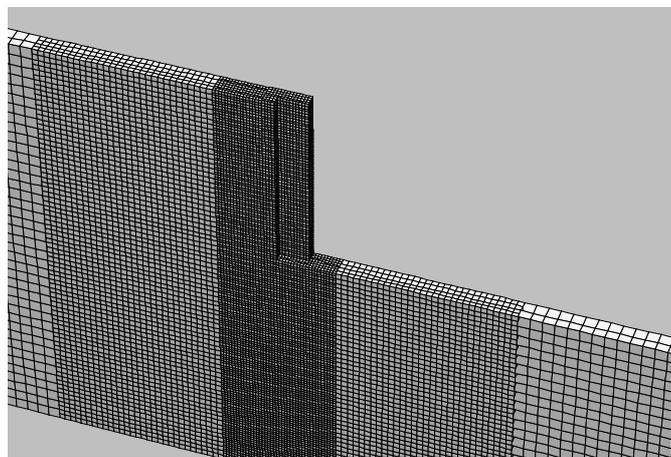


Figura 5. Mesh utilizzata.

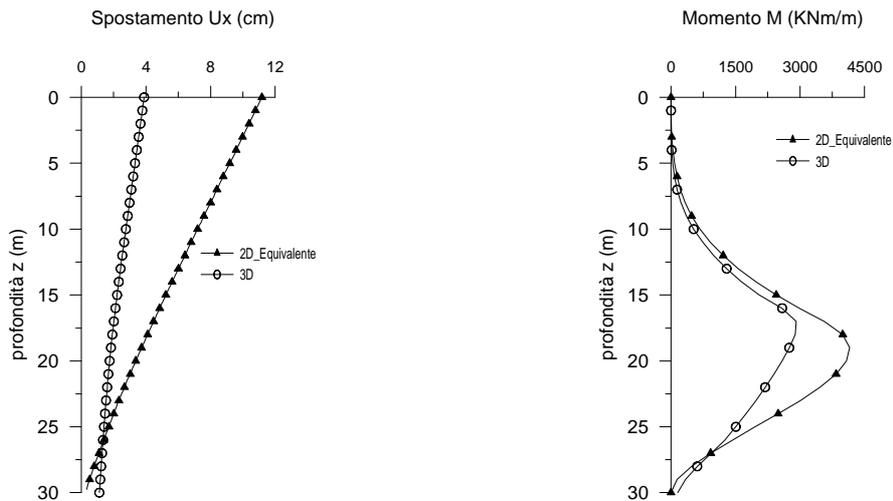


Figura 6. Momenti: differenza tra 2D e 3D. Scavo 16 m. Figura 7. Spostamenti: differenza tra 2D e 3D. Scavo 16 m.

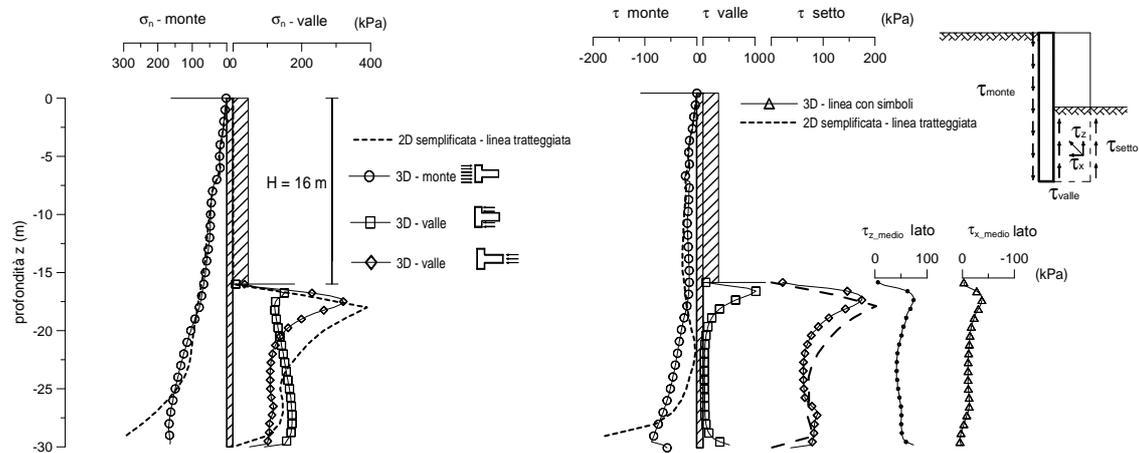


Figura 8. Tensioni normali ( $\sigma_n$ ) e tensioni tangenziali ( $\tau$ ): confronto analisi semplificata 2D e analisi 3D.

## Bibliografia

- Buselli F., Di Sotto A., Miliziano S., (2011). Different solutions of retaining structures in stiff clay. *Proceedings of XV European conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (in print)*.
- Ou, C.Y, Teng, F.C., Seed, R.B. and Wang, L.W. (2007). Using buttress walls to reduce excavation induced movements. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical engineering 1*, 159 – 177.
- Ou, C.Y., Lin, Y.L. and Hsieh P.G. (2006). Case record of an excavation with cross walls and buttress walls. *Journal of GeoEngineering*, 1(2): 79-86.
- Itasca (2005). *FLAC2D v.5.0 - Fast Lagrangian Analysis of Continua in two dimension. User Manual*. Itasca Consulting Group: Minneapolis, USA.
- Itasca (2006). *FLAC3D v.3.1- Fast Lagrangian Analysis of Continua in three dimension. User Manual*. Itasca Consulting Group: Minneapolis, USA.