

ANALISI NUMERICA 2D E 3D DI UN MURO IN TERRA RINFORZATA

Eleonora Violetta

Università di Catania – Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura
eleonora.violetta@phd.unict.it

Piera Paola Capilleri

Università di Pisa – Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale
piera.capilleri@unipi.it

Maria Todaro

Università di Catania – Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura
mtodaro@dica.unict.it

Ernesto Motta

Università di Catania – Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura
emotta@dica.unict.it

Sommario

Da diversi anni, la tecnologia della terra armata è in continua evoluzione. Il suo utilizzo ricopre varie opere: muri di sostegno, spalle di un ponte, argini. Questo tipo di intervento strutturale prevede l'inserimento di elementi resistenti a trazione all'interno del terreno, al fine di ottenere una struttura terreno-rinforzi con caratteristiche geo-meccaniche notevolmente migliori.

Nello specifico, lo studio è rivolto a muri in terra armata con rinforzi nastriformi flessibili e rigidi. Poiché tali tipologie di rinforzo, sono di larghezza assai ridotta, l'interazione con il terreno va studiata tenendo conto degli effetti tridimensionali del problema. In particolare l'effetto arco tra rinforzo e terreno può portare a valori di tensione verticale sul rinforzo stesso, sensibilmente diversi dal valore tipico geostatico. Si è pertanto affrontato lo studio attraverso una modellazione 2D e 3D agli elementi finiti. È stato altresì esaminato il valore dei massimi sforzi di trazione e la posizione di tali massimi valori, entrambi utili per eseguire le verifiche al pull-out.

1. Introduzione

La Terra Armata è una tecnologia di rinforzo antichissima, che permette di migliorare le caratteristiche meccaniche del terreno. Casagrande propose un concetto teorico moderno di terre rinforzate, ipotizzando attraverso un modello del tutto teorico, il rinforzo dei terreni a scarsa consistenza, utilizzando disposizioni orizzontali di membrane ad elevata resistenza. La concretizzazione di questo modello si deve all'ingegnere francese Henry Vidal, il quale lo perfezionò, definendolo appunto

“Terra Armata”. L’aderenza tra rinforzo e terreno dovuto all’attrito di interfaccia limita le deformazioni orizzontali e conferisce una sorta di “coesione” al sistema. Nelle terre rinforzate con pannello di facciata, il terreno è sostenuto sulla faccia esterna da un paramento verticale di calcestruzzo; esso ha una funzione di sostegno locale del terreno ma non interviene sulla stabilità globale del blocco di terreno. L’esecuzione di quest’opera di rinforzo avviene per strati: si inserisce lo strato di terreno, quindi l’armatura scelta e opportunamente progettata, e si ricopre con altro terreno; si prosegue per strati successivi, sino ad arrivare all’altezza del muro progettata. Le armature all’interno possono essere di vari materiali, nello specifico si sono modellati rinforzi polimerici e metallici.

Lo studio agli elementi finiti è stato condotto sia in campo tridimensionale che in condizioni piane. Il muro in esame è alto 6 m ed ha un fronte di 3.75 m. I rinforzi, in numero di cinque colonne e disposti ad interasse verticale e orizzontale di 0.75 m, presentano caratteristiche meccaniche e geometriche variabili. Questa scelta risiede nel fatto di voler valutare l’interazione rinforzo-terreno variando il tipo stesso di rinforzo.

2. Caso Studio 2D

Il muro in terra armata, oggetto del presente studio, è costituito come descritto di seguito:

- Paramenti verticali esterni in calcestruzzo, modellati come un unico pannello;
- Terreno di riempimento con un valore nullo di coesione, modellato con un legame Mohr-Coulomb. Per il terreno si è assunto un peso dell’unità di volume $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$, un modulo elastico normale E pari a 13 Mpa, desunto da prove di colonna risonante. Lo studio si è eseguito per tre valori di angoli di attrito del terreno: 30° , 35° , 40° , per valutare l’incidenza delle proprietà meccaniche del terreno, e in particolare dell’angolo di resistenza al taglio, sull’entità dell’effetto arco che si viene a sviluppare nel terreno tra due rinforzi limitrofi.
- Rinforzi flessibili, quali geostrips o geonastri, di larghezza variabile tra i 5 e 10 cm, realizzati con tessuti in multifilamento di poliestere ad alta resistenza o nastri raggruppati, costituiti da filamenti di poliestere ad alta resistenza. In alcuni casi, i nastri sono collegati trasversalmente da strisce polimeriche, che non presentano nessuna valenza strutturale.

Tramite la tipologia di paramento verticale si decide l’interasse di disposizione dei geostrips: dal lato interno del pannello in calcestruzzo sono installati dei ganci che permettono l’ancoraggio a tali rinforzi, definendo la loro spaziatura orizzontale e verticale. Si è scelto di modellare un unico geostrip per pannello, di larghezza 10 cm, calcolando una rigidità assiale EA equivalente, al metro lineare, di 1000 kN/m (Capilleri et al., 2016, 2018, 2019).

L’analisi in condizioni piane è stata eseguita ricostruendo una sorta di tridimensionalità attraverso l’analisi comparata di due sezioni: una parallela longitudinalmente ai rinforzi, definita come *Vista Laterale*; un’altra ortogonale a questi, definita *Vista Frontale*. Dalla vista laterale si sono registrati gli

abbassamenti verticali della sezione di mezzeria, ovvero ad una distanza dal paramento pari a circa 1.5 m. Questi abbassamenti sono quelli che si sono imposti ai rinforzi nella vista frontale.

Per tarare gli abbassamenti in quest'ultima sezione e renderli simili ai cedimenti osservati nella vista laterale, ad ogni quota dei geostrips, si è utilizzato un opportuno sistema di vincolo: *Fixed end Anchors*, presente nel codice PLAXIS (Brinkgreve et al., 2002). Tale vincolo, posto alle estremità di ogni rinforzo, si può intendere come una molla, che permette un abbassamento graduale, incastrata alla base e incernierata all'estremità superiore, che funge da appoggio al rinforzo. Tarate le molle e ottenuti gli stessi abbassamenti, sia nella sezione frontale che in quella laterale, si sono determinate le tensioni verticali su ogni rinforzo. Per valutare l'incremento di tensione efficace verticali indotta dall'effetto arco si è calcolato un "rapporto di sovratensione" α tra la tensione determinata attraverso l'analisi numerica e quella geostatica, alle varie quote di posizionamento dei rinforzi:

$$\alpha = \frac{\sigma'_{num}}{\gamma(H - Y)} \quad (1)$$

Tale valore è stato diagrammato in funzione della profondità adimensionale Y/H , in cui Y indica la quota a cui si valuta l'effetto arco corrispondente alla posizione dei rinforzi e H è l'altezza del muro. Ogni curva rappresenta una colonna di geostrips.

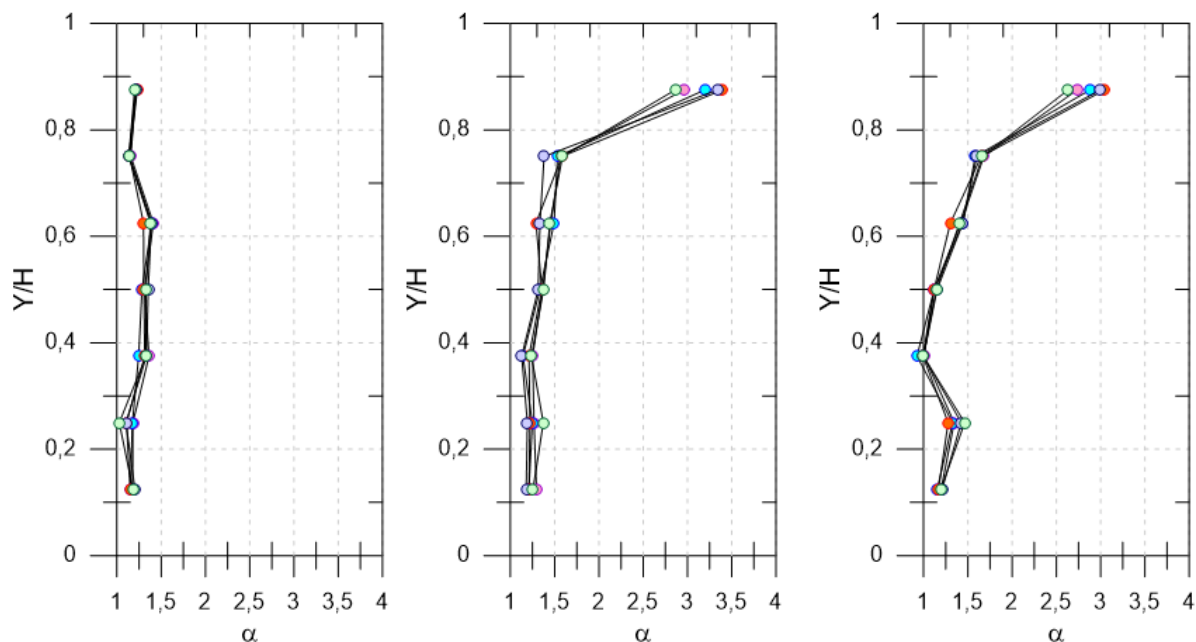


Fig 1. Effetto arco dei Geostrips al variare dell'angolo di attrito: a) $\phi'=30^\circ$; b) $\phi'=35^\circ$; c) $\phi'=40^\circ$.

In Figura 1 è possibile osservare la variazione di α in funzione degli angoli di attrito utilizzati nell'analisi. Per un valore di angolo di attrito $\phi=30^\circ$, non si ha un andamento uniforme di α con la profondità: i valori massimi sono a profondità di 2.25 m, cioè ad una elevazione di 3.75 m ($Y/H=0.60$); invece, si è riscontrato che per angoli di attrito $\phi=30^\circ$ e $\phi=40^\circ$ i rapporti di sovratensione sono notevolmente più elevati. Ne segue una dipendenza tra tali rapporti e l'angolo di resistenza al taglio del terreno, facendo notare che tale l'analisi è condotta in termini piani e quindi non coglie

fenomeni tridimensionali. Tale aspetto, infatti, richiede ulteriori studi. Si può osservare come i valori del rapporto di sovratensione siano generalmente maggiori di 1 e quindi la tensione agente sul rinforzo, determinata con l'analisi agli elementi finiti, è maggiore di quella geostatica. In pratica, il terreno contenuto tra due rinforzi limitrofi si “appende” in parte ai rinforzi, a causa della minore rigidità che tenderebbe a farlo cedere in misura maggiore rispetto al rinforzo. Questo comportamento è pertanto maggiormente esaltato laddove le condizioni di vincolo del rinforzo sono più significative, per esempio in prossimità dei pannelli di facciata. È appena il caso di osservare che in generale il rapporto di sovratensione aumenta all'aumentare dell'angolo di attrito.

3. Caso Studio 3D

La modellazione PLAXIS 3D (Brinkgreve et al., 2019) si è eseguita al fine di valutare, oltre l'effetto arco, il valore di massima trazione nei rinforzi ed il punto dove tale valore si trova. Per maggiormente esaltare gli effetti della sovratensione in questo caso sono stati utilizzati rinforzi metallici, aventi quindi maggiore rigidità. Si sono effettuate due modellazioni di muri in terra armata, modellando il terreno con legame Mohr-Coulomb e specificando di seguito gli ulteriori parametri usati nell'analisi:

- Nella prima modellazione si è ipotizzato un terreno di riempimento incoerente con un angolo di attrito interno pari a 30° . I rinforzi sono metallici, modellati come *plates*, con spessore 1 cm, larghezza 10 cm e lunghezza 3 m; il modulo elastico normale E_{plates} è pari a 210×10^6 kN/m².

Come per l'analisi 2D anche in questo caso è stata rivolta l'attenzione ai valori delle tensioni verticali agenti sui rinforzi alle varie quote. Si sono valutate le tensioni normali verticali sui plates, osservando forti valori di sovratensione. A titolo di esempio, alla prima quota sono stati trovati valori di tensione verticale media di circa 120 kN/m² contro i 12,75 kN/m², secondo la formula geostatica. La Figura 2a mostra le tensioni verticali in shading.

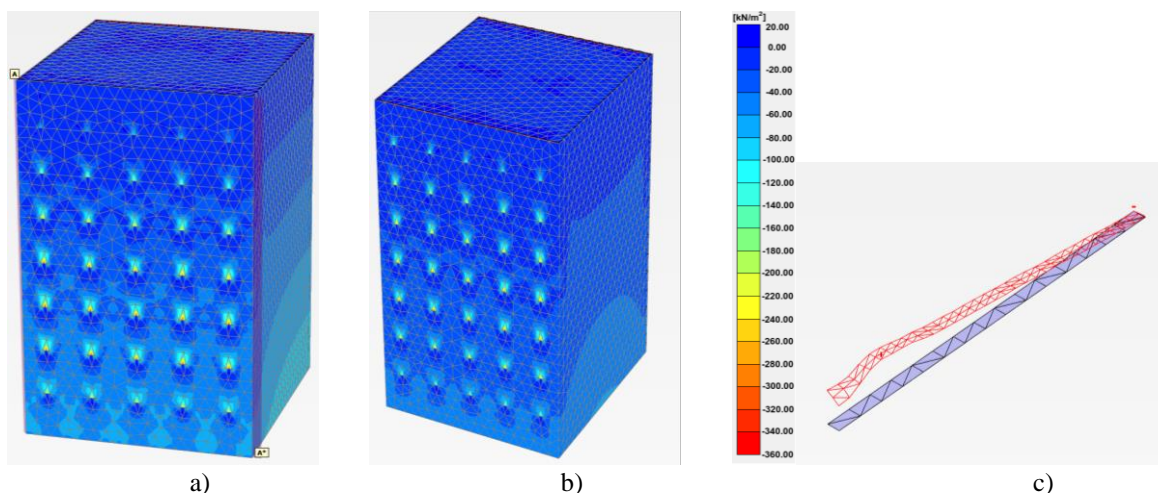


Fig 2. Tensioni normali verticali retrostanti il paramento: a) prima modellazione; b) seconda modellazione; c) andamento della trazione sul rinforzo della colonna centrale a profondità 0.75 dal p.c. (T_{max} a 0.6 m).

Proseguendo longitudinalmente sui rinforzi, l'effetto arco diminuisce gradualmente, diventando trascurabile ad una distanza pari a 0.6 m dal paramento verticale. Per quanto riguarda il punto di massima trazione sui rinforzi, che notoriamente è previsto ad una distanza dal paramento esterno pari a 0.3 di H, come suggerito dal Coherent Gravity Method (Juran&Schlosser, 1978). Nell'ambito del presente studio si è trovato un valore di massima trazione ad una distanza dal pannello di facciata pari a 0.60 m che corrisponde a 0.1 H, (Figura 2c). La ricerca è tuttavia nella sua fase iniziale e tale aspetto necessita di ulteriori studi.

- Il secondo modello analizzato nasce dall'esigenza di voler verificare in che misura l'effetto arco fosse influenzato dalle condizioni di vincolo imposte al contorno, oltre che dall'angolo di attrito. Il muro presenta le stesse caratteristiche geometriche; anche in questo caso sono stati ipotizzati rinforzi metallici, con una lunghezza degli stessi pari a 4 metri, ciò per permettere una condizione di vincolo alla fine del rinforzo. E' stato quindi introdotto un paramento verticale anche nella parte posteriore del muro, permettendo l'incernieramento finale dei plates sul retro. Infine, si è utilizzato un angolo di attrito per il terreno di riempimento $\phi' = 40^\circ$. I risultati hanno mostrato una significativa interazione rinforzo-terreno con evidente formazione di un effetto arco, come evidenziato in Figura 2b, con valori medi della tensione verticale alla prima quota pari a 135 kN/m² contro i 12,75 kN/m² ottenuto dalla formula geostatica. L'effetto della sovratensione si riscontra in modo speculare nella parte anteriore e posteriore dei pannelli esterni in calcestruzzo, come d'altra parte atteso, considerata la simmetria del sistema. La presenza del vincolo posteriore aumenta l'effetto arco che si osserva sui rinforzi e quindi la tensione verticale sugli stessi.

4. Conclusioni

Nell'analisi delle terre armate con rinforzi discontinui, giocano un ruolo importante gli effetti tridimensionali del problema. Il presente lavoro pertanto è stato svolto con lo scopo principale di studiare l'effetto arco nei rinforzi delle terre armate, che si mobilita grazie alla maggior rigidità che presenta il rinforzo, metallico o geosintetico, rispetto al terreno. In pratica, il terreno contenuto tra due rinforzi si appende a questi, con il risultato che la tensione verticale sui rinforzi risulta maggiore di quella geostatica.

Nell'analisi 2D si è osservato un effetto arco di notevole entità, al variare dell'angolo di attrito del terreno, con valori di tensione verticale sui rinforzi fino a 3 volte maggiori rispetto a quelli geostatici. In questa modellazione sono stati usati rinforzi in poliestere di elevata deformabilità, si è “modellata” la tridimensionalità del fenomeno, calibrando gli abbassamenti verticali sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi numerica della sezione longitudinale. Nell'analisi condotta con PLAXIS in campo 3D, si è voluta porre l'attenzione all'utilizzo di rinforzi rigidi, riscontrando risultati sensibilmente differenti rispetto alla modellazione 2D. Nella prima modellazione, è stato osservato un significativo effetto arco

fino ad una distanza dal paramento esterno di 0.6 m e in quello stesso punto si attesta il valore di massima trazione sul rinforzo, in contrasto con il valore $0,3 H$ (1.8 m in questo caso) suggerito dal Coherent Gravity Method (Juran&Schlosser, 1978). È vero anche che si è cercato di confrontare valori di calcolo tridimensionali con teorie assunte nel campo piano. Non sorprende comunque che l'effetto arco alle basse quote risulti trascurabile considerato che, per la condizione al contorno imposta, (cedimenti nulli alla base) le differenze tra terreno e rinforzo in termini di cedimenti sono assai modeste. Nella seconda modellazione agli elementi finiti 3D, si è voluto analizzare l'effetto che comportava un'ulteriore condizione di vincolo posto sul retro del muro, realizzata estendendo i rinforzi fino alla estremità posteriore del muro stesso e vincolandoli con cerniere. Come era intuitivo attendersi, l'analisi ha mostrato che un'ulteriore condizione di vincolo produce un ulteriore significativo effetto di sovratensione.

Bibliografia

- Brinkgreve, R. B. J., AL-Khoury, Bakker K. J., Bonnier P. G., Brand P.J. W., Broere, W. (2002). Plaxis 2D – version 8 general information. Delft University of Technology & PLAXIS bv, Olanda.
- Brinkgreve R. B. J., Zampich L.M., Ragi Manoj N., Waterman D., Chesaru A., Bonnier P.G. (2019). PLAXIS CONNECT Edition V20.
- Capilleri P.P., Ferraiolo F., Massimino M.R., Motta E., Raciti E., Scotto M., Todaro M., Bortolussi A., da Silva Duran J. (2016). Numerical analysis of a full scale earth reinforced wall: static and seismic behavior.
- Capilleri P.P., Ferraiolo F., Motta E., Scotto M., Todaro M., (2018). Static and dynamic analysis of two mechanically stabilized earth walls.
- Capilleri P.P., Motta E., Todaro M., (2019). Investigation on the locus of maximum axial force in polyester strap reinforced MSE walls under seismic loading.
- Juran I., Schlosser, F., (1978). Theoretical analysis of failure in reinforced earth structures.