

# LA VALIDAZIONE DEL CODICE DI CALCOLO DEL SOFTWARE PER LE PARATIE BULK

## ANALISI LINEARE

La validazione del codice di calcolo è avvenuta facendo riferimento all'esempio 13.3 del Libro Fondazioni - Progetto e Analisi [Bowles, 1991, McGraw Hill Education].

Una paratia di acciaio, lunga 15 metri, sorregge un terrapieno di sabbia, il cui spessore è pari a 5 metri, sovrastante uno strato di argilla. La profondità d'infissione è assunta pari a 11 metri e sono presenti due barre di ancoraggio: la prima orizzontale, a quota pari a 2 metri, disposta sopra il livello dell'acqua e la seconda inclinata di  $20^\circ$  rispetto all'orizzontale, disposta a quota 5,5 metri rispetto al piano campagna. Il piano di falda coincide con l'inizio dello strato di argilla. Si assume che, a monte della paratia, agisca un carico distribuito nastriforme pari a 20 kPa.

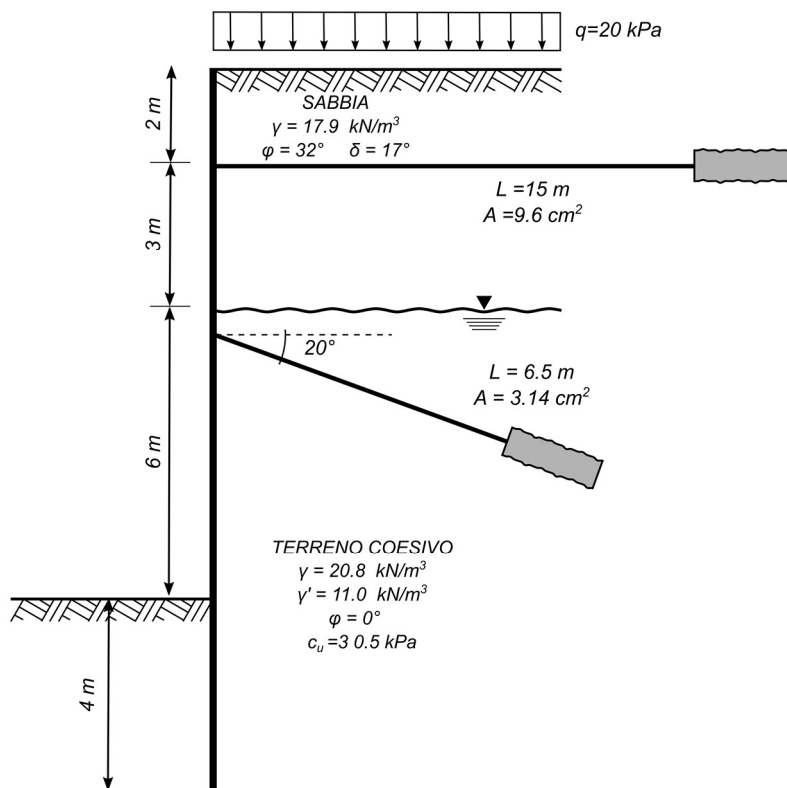


Figura 1. Schematizzazione del sistema terreno-struttura

La procedura di calcolo agli elementi finiti consiste nel modellare il terreno in corrispondenza della linea di fondo scavo come una serie di molle, di rigidezza  $k_s$  applicate alla paratia, che contribuiscono alla resistenza allo spostamento; la spinta attiva del terreno, calcolata attraverso il coefficiente di spinta  $K_a$ , le eventuali spinte idrostatiche e quelle dovute ai carichi esterni, si considerano applicate fino alla linea di fondo scavo.

Per l'applicazione del metodo proposto da Bowles è necessario, preliminarmente:

- discretizzare la paratia, stabilendo la posizione dei nodi di analisi. I parametri necessari al calcolo sono solo il momento d'inerzia e il modulo di elasticità;
- diagrammare le spinte a tergo della paratia e valutarne la risultante, in corrispondenza di ogni nodo;
- assegnare ai nodi in corrispondenza del terreno, all'interno del quale la paratia è infissa, la relativa rigidezza calcolata sulla base dello spostamento di plasticizzazione  $\Delta$ , attraverso la relazione:

$$k_s = \frac{q_{lim}}{\Delta}$$

- assegnare la rigidezza ai nodi in corrispondenza degli ancoraggi.

La sostanziale differenza tra la procedura proposta da Bowles e quella implementata in Bulk è che la spinta del terreno, la rigidezza delle molle e dei tiranti non sono implementate dall'utente, ma calcolate in automatico a partire dalle geometrie degli elementi e dalle caratteristiche meccaniche e fisiche dei terreni.

Pertanto, al fine di confrontare i risultati ottenuti dalla modellazione del problema attraverso Bulk con quelli ricavati da Bowles, è necessario adottare le stesse ipotesi semplificative utilizzate da quest'ultimo:

1. La rigidezza  $k_s$  delle molle al di sotto della linea di fondo scavo è considerata costante lungo l'altezza e pari al valore assunto in corrispondenza del piano campagna. Tale assunzione è ragionevole poiché, per argille normal-consolidate ( $\varphi \approx 0$ ), l'aliquota del carico limite dovuta alla coesione risulta essere preponderante rispetto agli altri termini. Si trascura, quindi, l'incremento di  $k_s$  con l'aumentare della profondità.

$$k_s = \frac{q_{lim}}{\Delta} = 7320 \frac{kN}{m^3}$$

essendo:

$$q_{lim} = N_q \cdot \gamma \cdot z + N_c \cdot c$$

Poiché Bulk calcola la rigidezza delle molle a partire dai dati relativi alle caratteristiche fisiche e meccaniche del terreno ( $\gamma$  e  $\varphi$ ), è necessario considerare il terreno al di sotto della linea di fondo scavo senza peso, ma resistente. Ciò si traduce nell'assegnare al peso specifico un valore tendente a zero (nel caso in esame  $0,0001 \text{ kN/m}^3$ ). Risulta, quindi:

$$q_{lim} = N_c \cdot c$$

Esplicitando l'espressione di  $K_s$  e assumendo lo spostamento di plasticizzazione pari a 2,54 cm, si ottiene il valore da assegnare alla coesione del terreno:

$$k_s = \frac{N_c \cdot c}{\Delta} = 7320 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad \rightarrow \quad c = \frac{k_s \cdot \delta}{N_c} = \frac{7320 \cdot 2.54 \cdot 10^{-2}}{5.14} = 36.17 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

- Si trascura l'effetto della spinta dell'acqua; pertanto, la modellazione è avvenuta escludendo la falda. Ciò significa che il peso dell'unità di volume da utilizzare non è quello saturo, pari a  $20.8 \text{ kN/m}^3$ , ma quello efficace:

$$\gamma' = \gamma_{SAT} - \gamma_W = 11 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

- Il calcolo è effettuato considerando un tratto di paratia di lunghezza unitaria. A partire dal valore noto dell'inerzia, posta la larghezza della paratia  $B$  pari a 1 metro, si calcola il valore da assegnare all'altezza come segue:

$$I = \frac{B \cdot H^3}{12} = 670 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4 \quad \rightarrow \quad H = \sqrt[3]{\frac{12 I}{B}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 670 \cdot 10^{-6}}{1}} = 0.2 \text{ m}$$

La paratia è in acciaio, pertanto si assegna  $E=2 \cdot 10^9 \text{ kPa}$ .

- Per i tiranti disposti all'interno del terreno con una certa inclinazione, la componente dell'azione interna che interessa è solo quella orizzontale. Poiché Bulk tiene conto anche degli effetti della componente verticale, è opportuno modellare il tirante come orizzontale. Noti i valori di input della rigidezza assiale in corrispondenza dei tiranti, si calcolano i valori da assegnare al modulo di elasticità:

$$K_1 = \frac{A \cdot E}{L} = 4300 \frac{kN}{m} \quad \rightarrow \quad E_1 = \frac{K \cdot L}{A} = \frac{4300 \cdot 15}{9.6 \cdot 10^{-4}} = 67.19 \cdot 10^6 \text{ kPA}$$

$$K_2 = \frac{A \cdot E}{L} = 3030 \frac{kN}{m} \quad \rightarrow \quad E_2 = \frac{K \cdot L}{A} = \frac{3030 \cdot 6.5}{3.14 \cdot 10^{-4}} = 62.19 \cdot 10^6 \text{ kPA}$$

Tutti gli accorgimenti sopra esposti risultano necessari affinché il modello di calcolo da realizzare in Bulk corrisponda a quello riportato dall'esempio proposto da Bowles. Si tenga presente, infine, che l'analisi deve essere condotta in ipotesi di linearità del comportamento delle molle e ponendo pari all'unità tutti i coefficienti parziali di sicurezza.

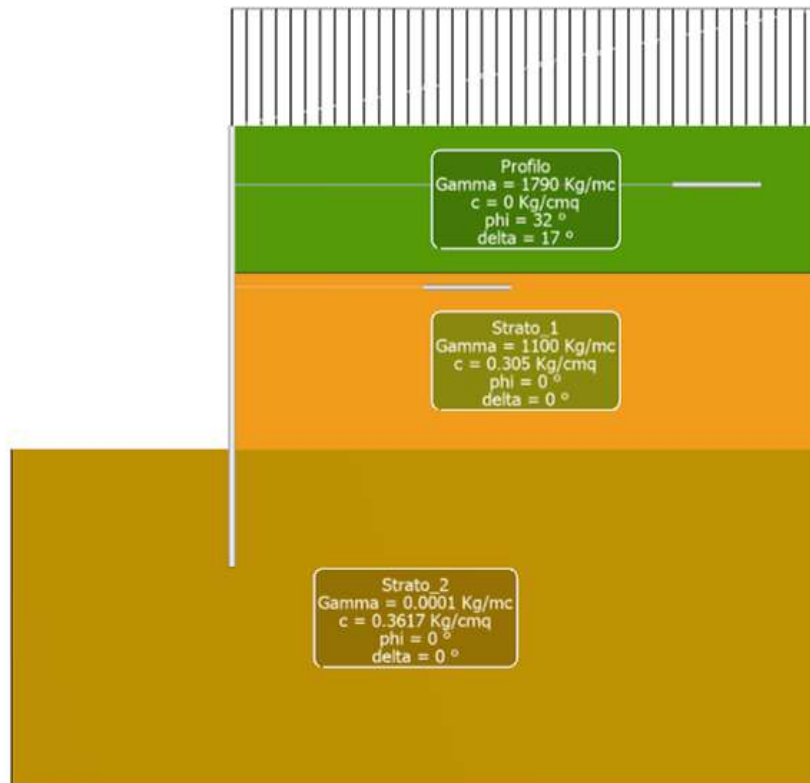


Figura 2. Modellazione della paratia in Bulk

Dall'analisi dei risultati ottenuti (Figura 3), si può notare che i risultati ottenuti dal software coincidono con quelli di Bowles (*Fondazioni, progetto e analisi - Figura 13.12d*), a meno di piccole variazioni dovute ad una discretizzazione della paratia più fitta (77 elementi con un passo massimo di discretizzazione pari a 20 cm in Bulk, a fronte dei 13 elementi dell'esempio).

In corrispondenza della linea di fondo, lo spostamento calcolato dal software è pari a 32,8 mm, con una differenza di 0,8 mm (differenza del 2%) rispetto a quello riportato da Bowles. Il massimo valore del momento sulla struttura è pari a 499,7 kNm e si attinge ad una distanza dalla testa della paratia pari a 8,25 metri. Poiché l'esempio effettua una discretizzazione della paratia più grossolana il massimo momento, pari a 477,96 kNm si verifica ad una distanza dalla testa pari a 7,25 m.

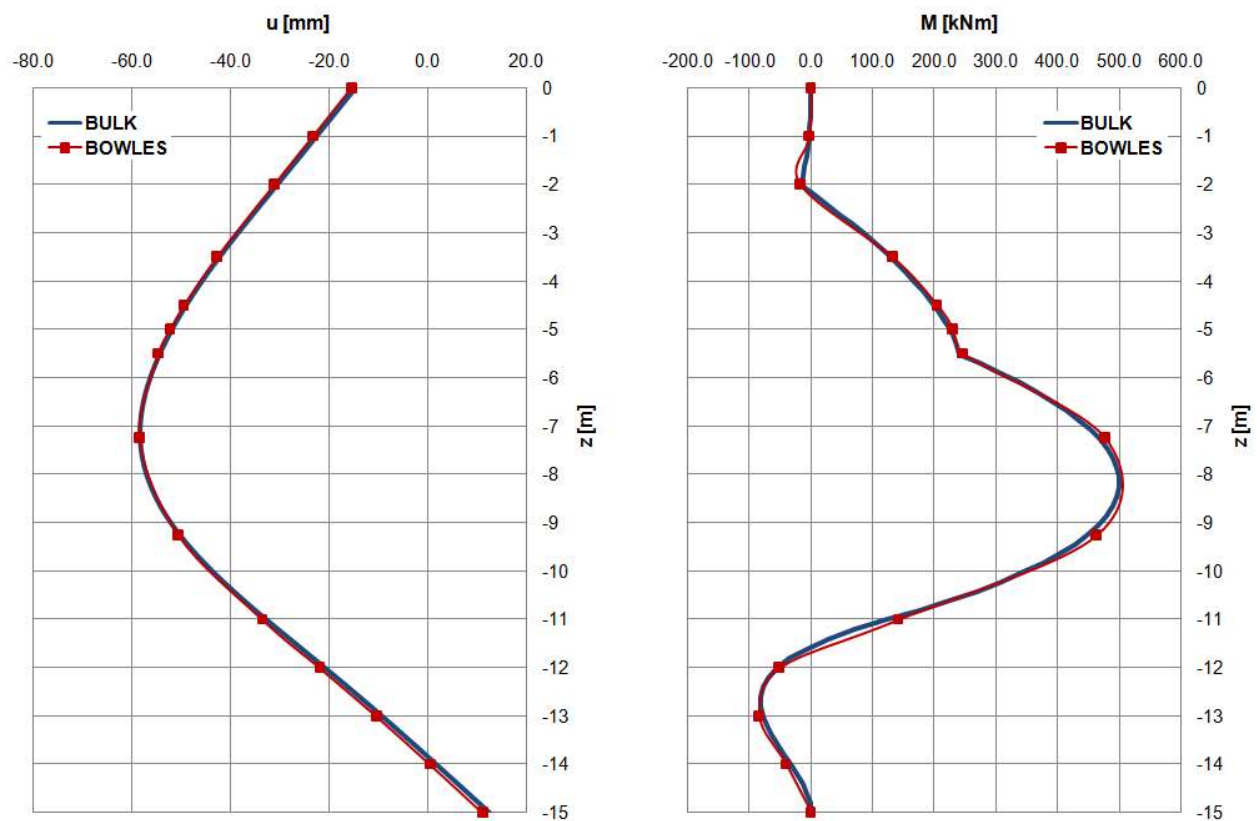


Figura 3. Confronto dei risultati ottenuti

È da osservare che molte delle ipotesi effettuate si sono rese necessarie affinché i dati di input tra i due modelli corrispondessero: l'esempio ha il solo scopo di effettuare un confronto tra i risultati ottenuti dal software.

L'analisi lineare è, infatti, una forzatura del reale comportamento del terreno in quanto spostamenti di 60 mm sono ben lontani dal comportamento elastico. La spinta idrostatica andrebbe considerata al fine di effettuare una modellazione più aderente alla realtà; così come gli ancoraggi, molto probabilmente, sono sotto-dimensionati.

## ANALISI NON LINEARE

La validazione del codice di calcolo è avvenuta facendo riferimento all'esempio 13.1 del Libro Fondazioni - Progetto e Analisi [Bowles, 1991, McGraw Hill Education].

Una paratia di acciaio, lunga 12 metri, è disposta in un terreno incoerente. Il piano di falda è posto a quota 2,40 m; si stima  $\gamma = 16,49 \text{ kN/m}^3$  al di sopra della superficie dell'acqua e  $\gamma = 10,37 \text{ kN/m}^3$ , l'angolo di attrito interno si assume pari a  $30^\circ$ .

La profondità di infissione è pari a 9 metri ed è presente una barra di ancoraggio orizzontale a 1,20 m dalla testa dell'opera. Si assume che, a monte della paratia, agisca un carico distribuito nastriforme pari a 23,94 kPa. Poiché il livello dell'acqua è lo stesso da entrambi i lati della paratia, la quale si considera permeabile in corrispondenza dei giunti, la sua presenza verrà ignorata nel calcolo della pressione attiva del terreno.

Si conduce un'analisi di tipo non lineare, assumendo come spostamento di plasticizzazione delle molle il valore 1,5 cm. Il calcolo è effettuato considerando una paratia di larghezza unitaria.

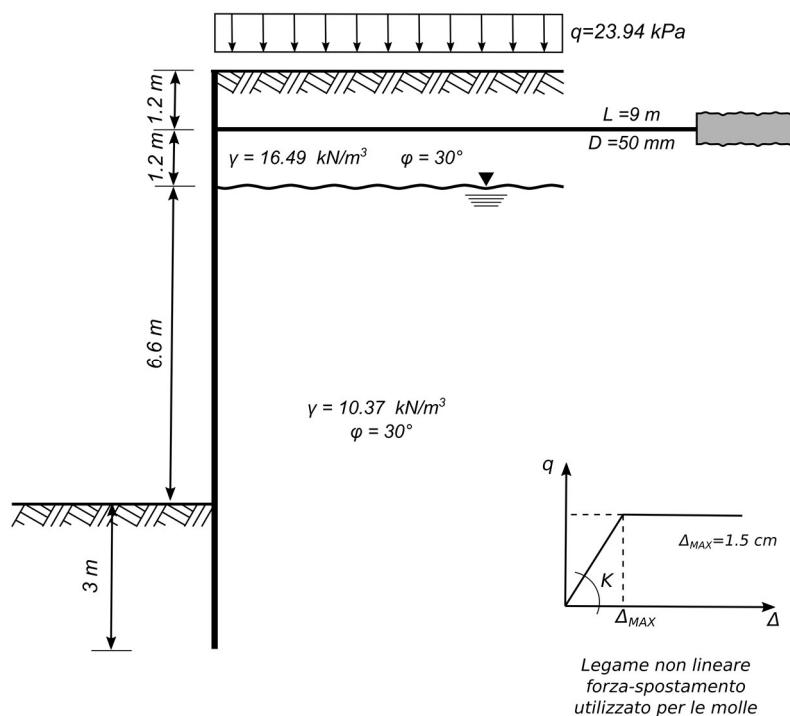


Figura 4. Schematizzazione del sistema terreno-struttura

L'esempio proposto stima per il calcolo della spinta attiva il coefficiente  $K_a$  pari a 0,30 poiché il range di variabilità, in funzione di ogni ragionevole valore dell'angolo di attrito paratia-terreno  $\delta$  è estremamente ridotto.



Tale valore di  $K_a = 0,30$  si ottiene adottando la formulazione di Coulomb per il calcolo dei coefficienti di spinta, per un angolo di attrito  $\delta$  pari a  $0,16$ ; pertanto, al fine di poter confrontare i risultati, la modellazione dei terreni in Bulk avviene considerando tale valore. Poiché la spinta dell'acqua nel calcolo è ignorata, si omette l'inserimento della falda.

Le dimensioni della paratia sono state scelte in modo tale che l'inerzia coincida con quella utilizzata all'interno dell'esempio.

$$I = \frac{B \cdot H^3}{12} = 255.56 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4 \quad \rightarrow \quad H = \sqrt[3]{\frac{12 I}{B}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 255.56 \cdot 10^{-6}}{1}} = 0.145 \text{ m}$$

Analoga considerazione è stata effettuata per la determinazione del modulo di elasticità dell'acciaio del tirante.

$$K = \frac{A \cdot E}{L} = 24240 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \rightarrow \quad E = \frac{K \cdot L}{A} = \frac{24240 \cdot 9}{\pi \left(\frac{0.05}{2}\right)^2} = 1.11 \cdot 10^8 \text{ kPA}$$

Un confronto fra i risultati ottenuti è riportato di seguito.

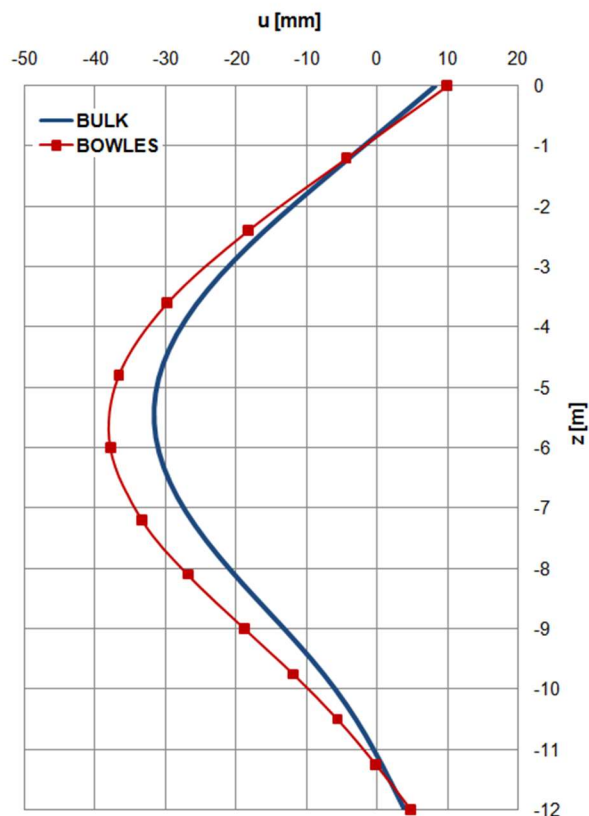


Figura 5. Confronto dei risultati ottenuti

Come si può notare dal grafico di Figura 5, la paratia modellata in Bulk risulta essere più rigida rispetto a quella analizzata da Bowles. La principale motivazione è da ricercarsi all'interno dell'espressione utilizzata per la determinazione della rigidezza delle molle.

$$k_s = \frac{q_{lim}}{\Delta} = \frac{1}{\Delta} \left[ N_q \cdot \gamma \cdot z + N_c \cdot c + N_\gamma \cdot \gamma \cdot \frac{B}{2} \right]$$

L'espressione implementata all'interno di Bulk per la determinazione del coefficiente  $N_\gamma$  è quella proposta da Vesic (1973)

$$N_\gamma = 2 (N_q + 1) \tan \varphi$$

che fornisce valori più elevati del 25% rispetto a quella proposta da Hansen (1970) e utilizzata all'interno dell'esempio di Bowles.

Un valore più elevato di  $N_\gamma$  fornisce valori più elevati del carico limite e, di conseguenza una maggiore rigidezza delle molle, cui corrisponde una minore deformabilità della paratia.

Inoltre, esplicitando l'espressione per il calcolo della rigidezza si ha:

$$k_s = \frac{N_q \cdot \gamma}{\Delta} \cdot z + \frac{N_\gamma \cdot \gamma \cdot \frac{B}{2}}{\Delta} = \frac{18.4 \cdot 10.37}{0.015} z + \frac{22.4 \cdot 10.37 \cdot 0.5}{0.015} = 7740 z + 12721$$

valori molto più elevati rispetto a quelli dell'esempio originale, che utilizza:

$$k_s = 7740 z + 11000$$

Tali valori sono stati arrotondati nella versione italiana del libro al fine di renderli compatibili con quelli usati da Bowles nella versione originale che contenevano un errore di calcolo.

Tale discordanza di risultati, pertanto è dovuta a una differente valutazione della rigidezza delle molle.

Se si vuole fare in modo che le rigidezze combacino, che si ricorda sono inserite come valori di input all'interno dell'esempio, è necessario modificare i parametri di resistenza del terreno sotto la linea di fondo scavo.

Utilizzando, a tal proposito,  $\gamma = 104,39 \text{ kN/m}^3$  e  $\varphi = 5,09^\circ$  si ottiene la medesima espressione di  $K_s$  e, come si può notare dall'esame dei grafici di Figura 6, i risultati combaciano perfettamente.



È giusto ribadire, ancora una volta, che un terreno con tali caratteristiche è poco realistico; tale assunzione ha il solo scopo di poter effettuare un confronto e validare il codice di calcolo.

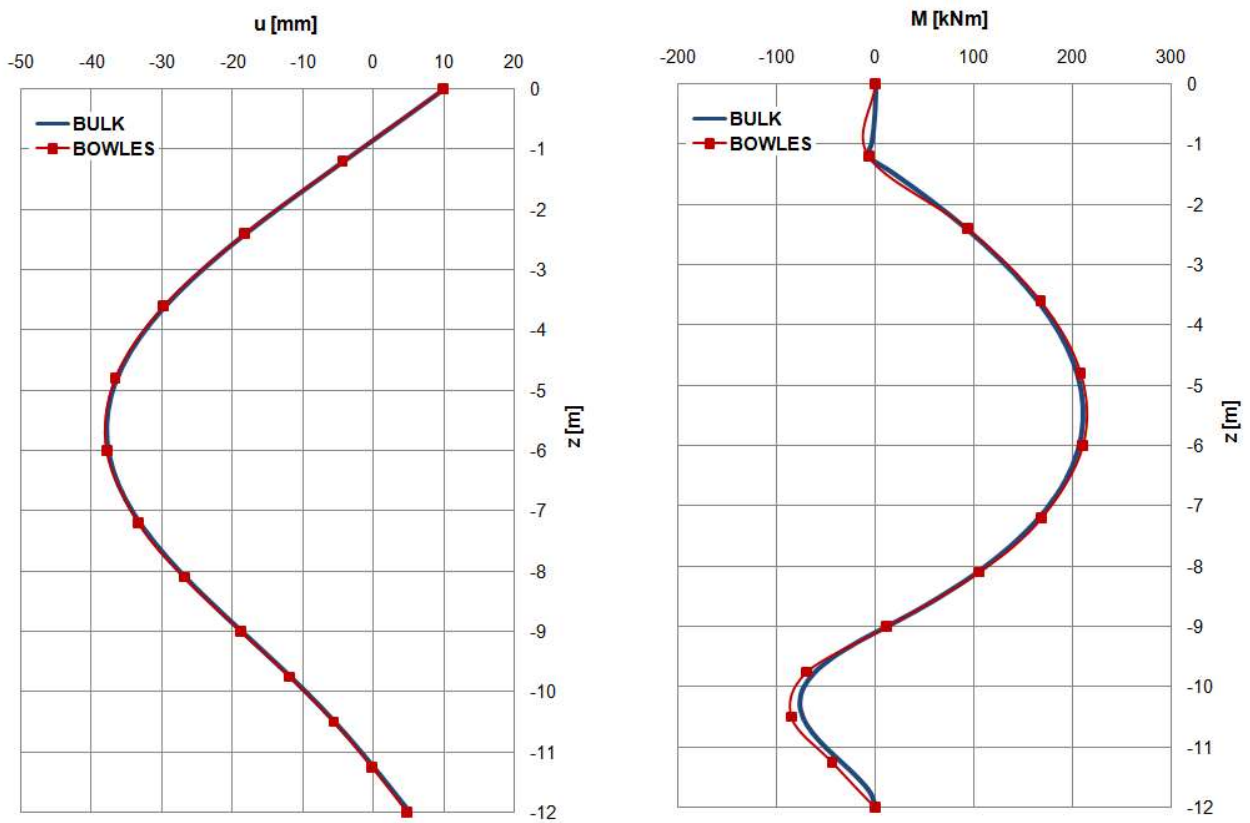


Figura 6. Confronto dei risultati ottenuti - spostamenti e momento