

since 1990

HARPACEAS

Your digital partner

Il calcolo delle opere di sostegno flessibili: confronto tra approccio a trave su suolo elasto-plastico e modellazione al continuo

Autore: **Ing. Ada Zirpoli**

Technical Manager

Structural and Geotechnical Engineering Department, Harpaceas

La progettazione di opere di sostegno flessibili richiede un'analisi accurata dell'interazione tra struttura e terreno. Due metodi principali si distinguono in questo contesto: l'approccio a trave su suolo elasto-plastico, implementato ad esempio in Paratie Plus, e l'approccio al continuo come quello offerto da Flac. Ognuno di essi presenta caratteristiche peculiari che lo rendono idoneo a specifici contesti progettuali.

L'approccio al continuo offre un livello di dettaglio superiore grazie all'uso di modelli numerici avanzati che permettono di ricavare lo stato tenso-deformativo del terreno in modo quasi continuativo, anche lontano dalla paratia, garantendo una rappresentazione più accurata delle interazioni tra i diversi elementi, geotecnici e strutturali, che compongono il sistema.

L'approccio a trave su suolo elasto-plastico, invece, schematizza il terreno mediante un sistema di molle non lineari distribuite lungo la struttura. Questa semplificazione, pur essendo efficace e di largo impiego, potrebbe presentare alcune limitazioni a seconda delle implementazioni.

Nessuna delle due metodologie è di per sé completa, bensì esse sono complementari; la strategia migliore per l'ingegnere geotecnico, che volesse risolvere al meglio tutti gli aspetti progettuali, sarebbe quella di operare un dimensionamento con un codice di tipo trave su suolo alla Winkler, verificare o approfondire alcuni aspetti con un codice al continuo *general purpose*, ed infine tornare indietro per sfruttare l'impianto normativo e i wizard di relazione e disegno che generalmente il primo tipo di applicazioni possiede. Da queste considerazioni è nata l'idea di sviluppare il link automatico tra Paratie Plus e Flac, che esite dalla fine del 2023 e che si è recentemente arricchito con nuove funzionalità.

Volendo approfondire vantaggi e svantaggi delle due tecniche di simulazione, possiamo proporre le seguenti considerazioni.

Cominciamo dalla rappresentazione degli sforzi. Nell'ambito di un approccio "trave su letto di molle", gli sforzi verticali nel terreno potrebbero non essere influenzati dal comportamento deformativo orizzontale, ma semplicemente derivare da calcoli geostatici indipendenti che non considerano l'interazione tra le due componenti.

Oppure, gli sforzi verticali e quelli orizzontali potrebbero essere considerati sempre principali. Questo aspetto, sebbene generalmente non impattante in questa tipologia di opere, diventa più evidente in presenza di attrito terra-muro, che introduce una complessità aggiuntiva nelle interazioni terreno-struttura. Questo attrito genera forze tangenziali lungo il contatto terra-muro, influenzando il comportamento globale della struttura e del terreno circostante. Sebbene questi effetti siano spesso marginali in molti contesti pratici, in situazioni particolari come terreni a bassa coesione o con muri inclinati, possono avere un impatto significativo sulla distribuzione delle pressioni e sulla stabilità complessiva.

In generale, il comportamento laterale del terreno (in un contesto in cui, di fatto, il terreno non esiste!) è essenzialmente disaccoppiato dal comportamento verticale.

Negli schemi a trave, inoltre, il terreno viene rappresentato come un insieme di molle indipendenti, ciascuna delle quali si comporta in modo autonomo rispetto alle porzioni adiacenti. Questo implica che i movimenti di una porzione di terreno non influiscono direttamente sulle aree circostanti.

since 1990

HARPACEAS
Your digital partner

L'interazione tra queste regioni viene affidata esclusivamente alla rigidità flessionale della parete. In condizioni reali, invece, il terreno risponde agli sforzi applicati con un comportamento che implica un trasferimento di sforzi e deformazioni attraverso l'intero volume. L'approccio a molle, ignorando questa interazione, può sottostimare l'effetto di consolidamento o sovrastimare la capacità portante locale, portando a una valutazione meno accurata della sicurezza e delle prestazioni della struttura. Per questo motivo è importante recuperare, almeno in parte, l'accuratezza del calcolo con legami costitutivi delle molle che siano quanto più raffinati possibili. Ad esempio, Paratie Plus implementa legami elastico-plastici incrudenti, con variazione della risposta in termini di rigidità in condizioni vergini o di scarico-ricarico e la sovraconsolidazione automatica a seconda delle condizioni di carico che si susseguono lungo le fasi.

In genere nei metodi a molle, nei casi di doppia paratia con uno scavo intermedio, le pareti interagiscono tra loro unicamente attraverso eventuali elementi di collegamento come puntoni o solette, mentre l'interazione attraverso il terreno interposto non viene considerata. Questo approccio ignora la trasmissione degli sforzi e delle deformazioni tra le due paratie attraverso il terreno, che in realtà può giocare un ruolo cruciale nella redistribuzione delle sollecitazioni e nel controllo dei movimenti laterali. La mancanza di interazione attraverso il terreno, comunque, porta a una progettazione più conservativa in quanto le paratie risentono di un vincolo in meno (l'altra paratia). Negli approcci a molle, per ovvie ragioni, anche la distribuzione dei carichi superficiali in profondità segue modelli semplificati, non esistendo un continuo lungo il quale gli sforzi possono essere trasferiti. Uno dei metodi più diffusi è quello del semispazio elastico alla Boussinesq. Questo significa che la propagazione degli sforzi nel terreno viene calcolata attraverso ipotesi teoriche che, pur essendo valide in condizioni ideali, non tengono conto delle variazioni locali delle caratteristiche geotecniche o della presenza di discontinuità nel terreno. In particolare, il metodo non considera l'interazione tra diversi carichi, che potrebbe influenzare la ripartizione reale degli sforzi e delle deformazioni, specialmente in presenza di carichi non uniformi o geometrie complesse.

Un'altra caratteristica dell'approccio a molle riguarda la valutazione della stabilità di un eventuale versante a monte della paratia. Essa, infatti, viene stimata in genere con i metodi dell'Equilibrio Limite, che prevedono superfici di scorrimento predefinite. Con le moderne tecnologie è possibile analizzare molte superfici, soprattutto quando i software offrono diverse tecniche per la loro individuazione (tipicamente griglia di centri + range di raggi, oppure range di ingresso e uscita); tuttavia, finché si parte da ipotesi sulla posizione e, soprattutto, sulla forma delle superfici di rottura (in genere si tratta di superfici circolari), persisterà un limite sull'identificazione delle condizioni più critiche. Inoltre, nei codici non al continuo, proprio perché il continuo non esiste, è semplificata l'interazione tra il volume di terreno in frana e la paratia, che al massimo può offrire una resistenza limite...del resto, si sta svolgendo un calcolo all'equilibrio limite. In realtà, anche la rigidità della paratia può influire sul comportamento del terreno, alterando la posizione e l'estensione delle superfici di scorrimento; solo un calcolo che segue lo scivolamento progressivo del volume di terreno, modellato al continuo, può valutare l'effetto della rigidità dell'opera, oltre ad individuare in modo più accurato la superficie di rottura grazie ad analisi numeriche più avanzate. Ad esempio, Flac implementa il metodo del *c- ϕ reduction*, con cui è possibile identificare automaticamente le superfici di scorrimento più critiche, tenendo conto della rigidità della paratia e delle interazioni con il terreno. Il metodo consiste nel ridurre progressivamente in tutto il dominio le proprietà meccaniche dei terreni, lanciando ogni volta delle iterazioni di equilibrio. A causa dei carichi in gioco (peso proprio del terreno, eventuale spinta dell'acqua ed eventuali carichi esterni), il versante tenderà a scivolare secondo un percorso preferenziale che rappresenterà la superficie di scivolamento. Questa caratteristica rende l'approccio al continuo particolarmente adatto per situazioni complesse, in cui la superficie critica si discosta dalla forma circolare, o per analisi di dettaglio.

Arriviamo ad un aspetto fondamentale in geotecnica: l'interazione tra terreno e acqua di falda. Anche se gli strumenti software a disposizione, basati sul metodo a molle, implementano un calcolo di

since 1990

HARPACEAS
Your digital partner

filtrazione, esso è finalizzato ad una valutazione delle pressioni sull'intera sezione di terreno in esame e non può essere accoppiato con il calcolo meccanico, concentrato nelle molle connesse alla paratia. Alcuni strumenti, come il già citato Paratie Plus, effettuano analisi di filtrazione avanzate discretizzando il dominio 2D con mesh ad elementi finiti triangolari dotati di un grado di libertà (nel centroide di ogni elemento) a cui corrisponde la grandezza incognita della pressione dell'acqua; il calcolo svolto è di tipo non lineare e permette di ricavare, una volta fornite le condizioni al contorno idrauliche, il profilo piezometrico e le pressioni in ogni punto del dominio, utili per una valutazione più accurata del coefficiente di sicurezza allo scivolamento delle superfici scelte. È anche possibile progettare pompe idrauliche, trincee drenanti e pozzi, grazie alla conoscenza delle portate che transitano in ogni volume finito scelto dall'Utente; tuttavia, lo stato tenso-deformativo del terreno non interviene in questa analisi, né ne risente, poiché il calcolo meccanico resta disaccoppiato da quello idraulico. L'approccio al continuo consentirebbe di integrare gli effetti idraulici e meccanici, simulando fenomeni complessi come la variazione delle pressioni interstiziali durante uno scavo. L'analisi accoppiata di questi fenomeni consente di ottenere una rappresentazione più realistica del comportamento del sistema terreno/acqua, ma si rendono necessari codici 2D (o 3D), che portano con sé tempi di calcolo molto maggiori.

Per quanto riguarda l'analisi sismica, infine, l'approccio a molle utilizza metodi pseudostatici che rappresentano le forze sismiche attraverso un incremento del carico statico, trascurando aspetti come la propagazione delle onde sismiche, le variazioni di accelerazione lungo il profilo del terreno e la risposta dinamica non lineare del sistema. In alcune situazioni, come nel caso di terreni a grana fine e/o stratigrafie complesse o opere di sostegno critiche in zone ad alta sismicità, è necessario descrivere il carico sismico e il comportamento dinamico del sistema in modo più accurato, includendo effetti come l'attenuazione delle onde e la risposta non lineare del terreno. Questo implica l'utilizzo di un accelerogramma al bedrock, ossia un segnale sismico registrato o simulato che rappresenta l'evoluzione temporale delle accelerazioni alla base del modello geotecnico. L'uso di un accelerogramma è essenziale per analisi dinamiche avanzate, poiché consente di valutare effetti come l'amplificazione sismica locale, le interazioni tra terreno e struttura e l'eventuale sviluppo di condizioni di liquefazione. Ad esempio, nelle opere di sostegno situate in aree soggette a terremoti di elevata magnitudo, o quando sono presenti stratificazioni geotecniche irregolari, l'analisi dinamica con accelerogrammi permette di individuare comportamenti non attesi che potrebbero compromettere la stabilità del sistema. Basti ricordare, ad esempio, che in un approccio a molle con doppia paratia, i due elementi strutturali non comunicano attraverso il terreno; se quel terreno ha iniziato un processo di liquefazione o semplicemente si muove in fase col terreno di monte, allontanandosi dalla paratia, questa perde il suo sostegno. In un modello a molle, a meno di non introdurre degli "escamotage" numerici, non posso cogliere questo aspetto. Ciò non significa che, pur rimanendo nell'ambito delle analisi pseudostatiche, non possano esistere algoritmi in grado di cogliere aspetti avanzati. In Paratie Plus è da qualche anno implementata la cosiddetta Sismica Automatica, che valuta il reale incremento di carico in caso di paratie mediamente rigide/flessibili, per le quali non sono adatti né il metodo di Mononobe-Okabe, né Wood.

Ultimo tema importante, soprattutto quando si parla di scavi in ambito urbano, riguarda i cedimenti verticali alle spalle della paratia; essi, infatti, sono strettamente correlati ad eventuali danneggiamenti che si possono sviluppare negli edifici adiacenti lo scavo. Come già ripetuto più volte, non esistendo un continuo bidimensionale, nei codici a trave su suolo elastico, questi cedimenti vengono stimati tramite formule empiriche che correlano il volume di terreno che fluisce orizzontalmente a seguito dei movimenti della paratia con l'abbassamento verticale. Tuttavia, queste formule rappresentano una semplificazione che non tiene conto delle condizioni locali specifiche o delle variazioni tridimensionali dell'intero sistema. I risultati possono essere utilizzati come una stima dell'ordine di grandezza di quello che potrebbe accadere, mentre il calcolo corretto, che integra le reali condizioni del sito e il comportamento complesso del terreno, può essere

effettuato solo utilizzando un software al continuo, capace di simulare accuratamente la relazione sforzo-deformazione in ogni elemento in cui è discretizzata la fondazione.

Ma c'è un aspetto decisamente importante nell'approccio a molle che non si ritrova nei software general purpose 2D/3D: questi software integrano combinazioni di carico e verifiche strutturali/geotecniche che rispondono alle richieste normative. Questo vantaggio rende spesso necessario tornare all'approccio a molle anche dopo un'analisi dettagliata con software al continuo. Infatti, molti software general purpose utilizzati per modellazioni al continuo, pur eccellendo nell'analisi dettagliata, non offrono strumenti integrati per la verifica strutturale secondo normative. Il passaggio delle azioni calcolate da modelli al continuo a software a molle permette di completare il progetto con un quadro verificato e conforme. Consideriamo che spesso gli strumenti più semplici dal punto di vista degli algoritmi di calcolo, sono poi più nutriti di strumenti quali wizard per la generazione di report di calcolo e tool per la produzione di disegni.

Concludiamo questa breve trattazione con un esempio.

Per situazioni che non presentino le specificità sopra descritte, un modello a molle sufficientemente raffinato deve poter fornire risultati comparabili con quello di un modello al continuo. Si prende in esame, in figura seguente, il diaframma multi-ancorato descritto da Schweiger (2002).

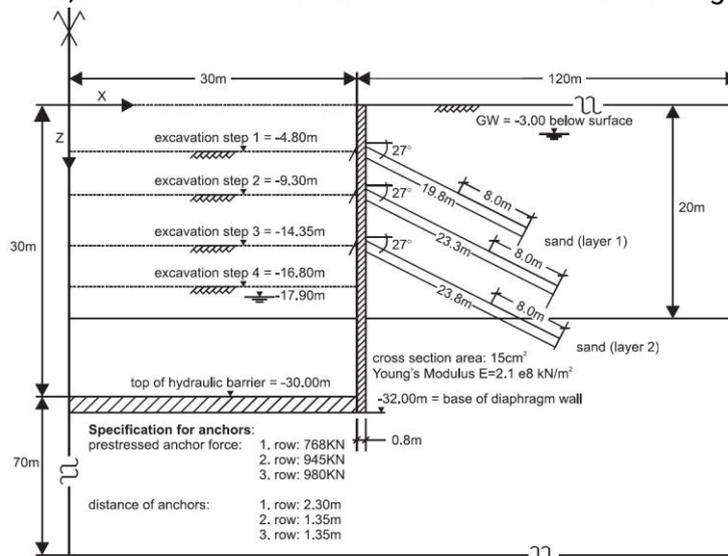


Figura 1: Benchmark relativo a un caso reale (adattato da Schweiger (2002)).

L'esempio di riferisce ad uno scavo profondo realizzato a Berlino, per il quale è disponibile una serie di misure. Per realizzare uno scavo piuttosto profondo nelle formazioni sabbiose che contraddistinguono il sottosuolo di Berlino, con la presenza di una falda freatica molto superficiale, fu adottato il seguente procedimento di costruzione.

Si realizzò, inizialmente, da piano campagna, una barriera idraulica spessa 2 m, al piede muro: tale barriera può essere assimilata ad un tampone in jet-grouting che forma un livello abbastanza impervio in modo tale da limitare il flusso di filtrazione all'interno dello scavo. La falda all'interno dello scavo fu quindi depressa alla quota dello scavo finale. Lo sbancamento venne quindi eseguito con progressiva installazione di ancoraggi intermedi come mostrato in Figura 1, fino al raggiungimento della quota finale prevista.

In accordo con i riferimenti citati, le proprietà del terreno fornite in input a Paratie Plus sono le seguenti:

$$E_{vc} \text{ (kPa)} \approx 15000 \cdot \sqrt{z[\text{m}]} \quad z \leq 20\text{m}$$

$$E_{vc} \text{ (kPa)} \approx 50000 \cdot \sqrt{z[\text{m}]} \quad z > 20\text{m}$$

$$E_{UR}/E_{vc} = 1.5 \quad \phi = 35^\circ \quad \delta = 0.7\phi$$

Il coefficiente di spinta a riposo, così come K_A e K_P sono calcolati automaticamente in accordo alla formula di Rankine, essendo il profilo superficiale orizzontale ed essendo trascurato l'angolo d'attrito terra-muro. I tiranti sono modellati come molle lineari la cui rigidità assiale è data da EA del fusto in acciaio divisa per la lunghezza deformabile, assunta pari alla lunghezza libera più il 50% della lunghezza del bulbo di fondazione. In Paratie Plus, la barriera idraulica è modellata semplicemente assegnando una permeabilità ridotta a quella zona: si è assunto $k_{plug} \approx k_{nat}/100$. Una volta che il tampone è stato attivato, le pressioni dell'acqua su entrambi i lati delle pareti sono determinate sulla base di uno schema di filtrazione mono-dimensionale, che considera la sola linea di flusso a ridosso della paratia. In questo caso nessun altro parametro è stato modificato, mentre usualmente, per la simulazione di tamponi, vengono assegnati diversi valori di rigidità e resistenza.

In Figura 2 è rappresentato il modello di Paratie Plus nella fase di scavo finale: la zona di terreno in cui è assegnata una permeabilità modificata è evidenziata da un tratteggio.

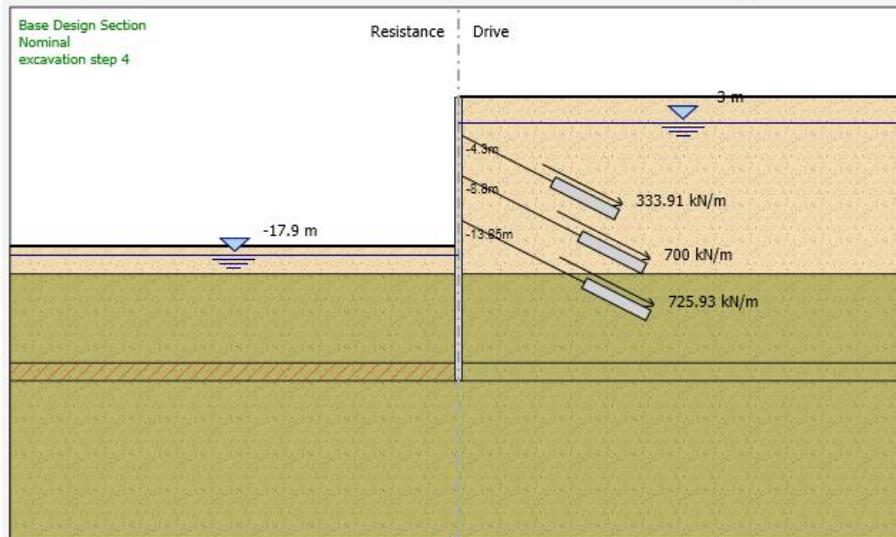


Figura 2: Modello di Paratie Plus del caso in esame.

Nelle figure seguenti sono riassunti i principali risultati nella fase di scavo finale. Essi mostrano uno spostamento massimo di 22.6 mm a quota -15.45 m, un momento massimo di 427.78 kNm/m che tende le fibre di monte a quota -8.8 m e un momento massimo di 843.35 kNm/m che tende le fibre di valle a quota -16.45.

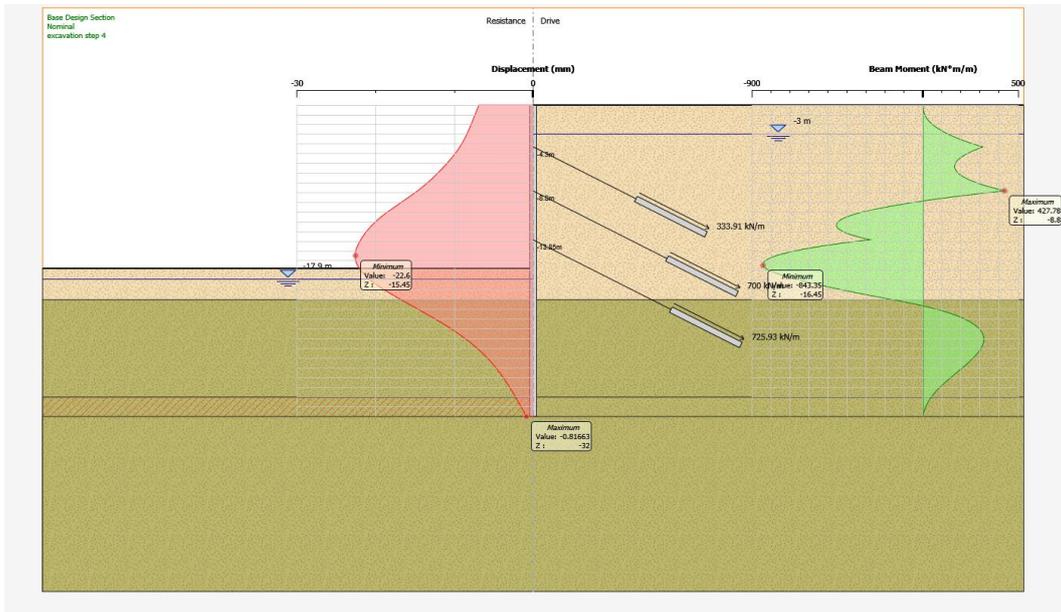


Figura 3: Deformata e momenti flettenti forniti da Paratie Plus.

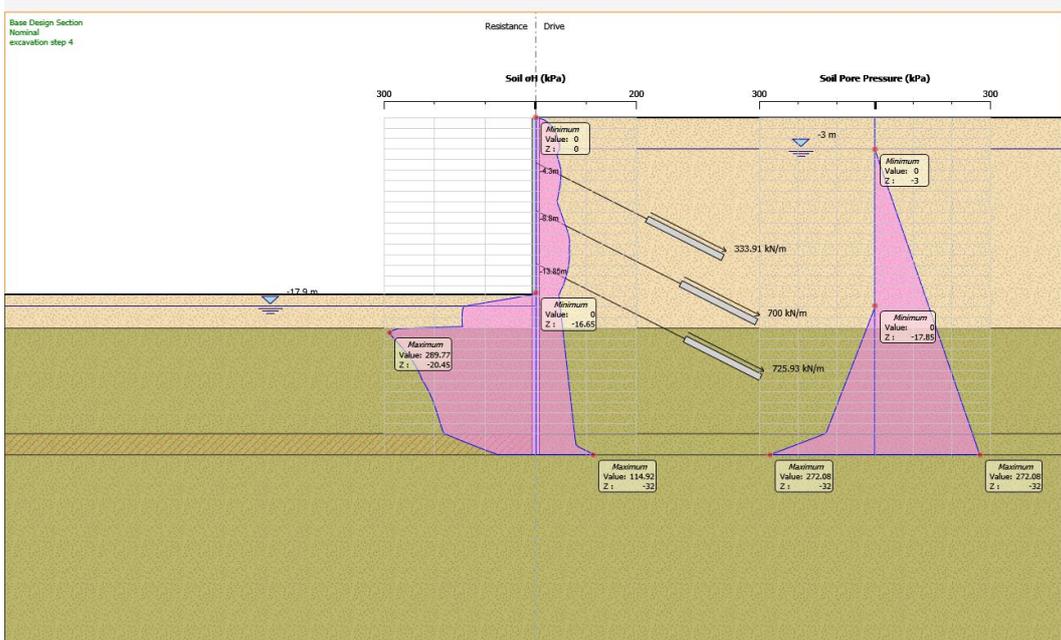


Figura 4: Pressioni laterali efficaci e pressioni dell'acqua fornite da Paratie Plus.

In Figura 5, i momenti flettenti sono confrontati con i valori riportati nel riferimento citato. Sia i valori assoluti sia l'andamento sono abbastanza in accordo, e forniscono una stima conservativa rispetto al benchmark. Nella stessa figura, le deformate calcolate vengono poste a confronto con quelle misurate (come spiegato da Schweiger (2002): il modello numerico riproduce abbastanza bene il comportamento osservato, ad eccezione del tratto superiore dove, con tutta evidenza, in base alle misure, alcuni tiranti mostrano una rigidità ridotta.

Questo effetto è verosimilmente legato ad una limitata lunghezza dei tiranti superiori, la cui fondazione risente dei movimenti del cuneo di terreno alle spalle della parete (i risultati di FLAC

riprodotti in Figura 6 confermano questa osservazione); tale aspetto può essere evidenziato solo da un modello al continuo, in quanto in un modello a molle il tirante è esso stesso una molla incastrata a terra. Analogamente, un eventuale sfilamento del bulbo è colto solo dai controlli successivi di post-processing e non impatta sui risultati dell'analisi. Con la versione 2025 di Paratie Plus, si è arginata questa limitazione intrinseca, introducendo la possibilità di tenere conto in fase di analisi del movimento del bulbo del tirante, associando ad esso una percentuale dello spostamento della parete alla profondità del bulbo stesso.

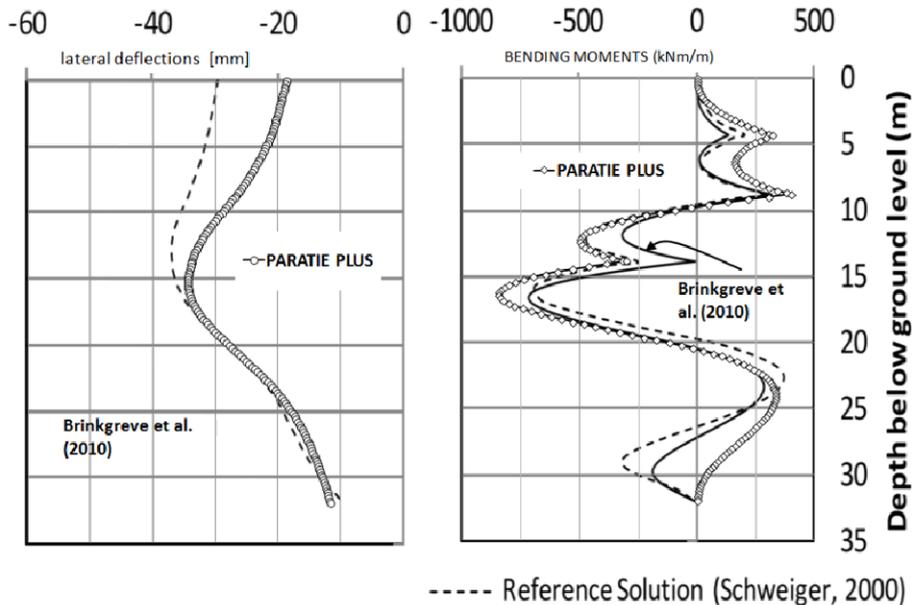


Figura 5: Confronto con i risultati di riferimento.

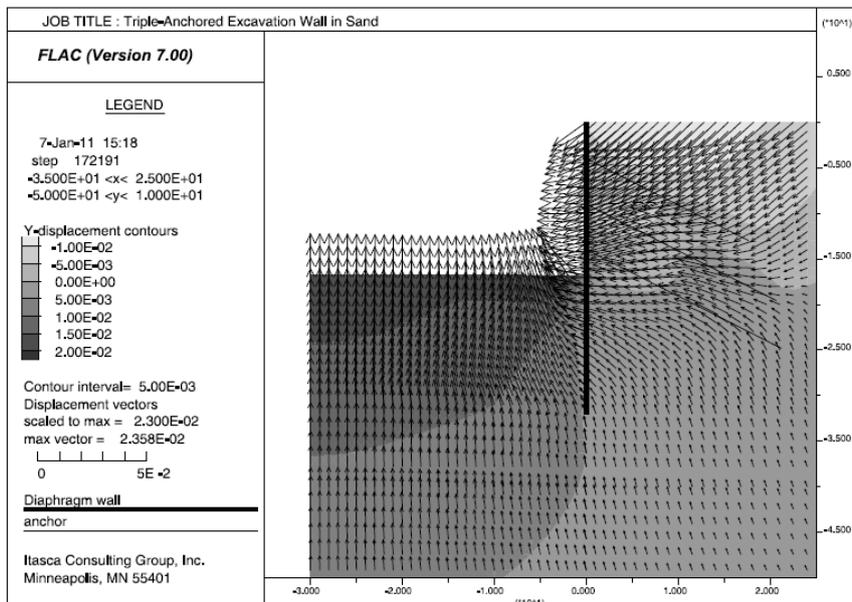


Figura 6: Risultati analisi FLAC (fase finale).

In conclusione, sebbene l'approccio a molle sia largamente utilizzato e offra risultati affidabili in molti contesti progettuali, l'approccio al continuo si dimostra fondamentale per analisi più dettagliate e situazioni complesse. La possibilità di combinare i due metodi, passando da un

since 1990

HARPACEAS

Your digital partner

modello all'altro, permette di sfruttare i vantaggi di entrambi: rapidità e semplicità dell'approccio a molle per la progettazione preliminare, e precisione dell'approccio al continuo per l'analisi avanzata.