

Interazione tra opere attraverso il terreno

L'importanza della forma planimetrica di un'opera di sostegno e le modifiche al suo comportamento quando le si costruisce davanti, in fase successiva, un manufatto pesante.

Diego Valusso², Dario Fedrigo², Federica Pedrini², Eros Michielin², Francesco Alessandrini¹,

¹ [ALPE PROGETTI SRL SOCIETA' DI INGEGNERIA](#) - Udine

² ALPE ENGINEERING SRL - Udine

ABSTRACT

I muri di sostegno sono spesso progettati con modelli semplificati, assumendo un comportamento a corpo rigido su suolo elastico lineare omogeneo. Non è possibile quindi analizzare problemi di interazione tra questi manufatti e quelli realizzati in adiacenza (esistenti o di futura costruzione), così come non è possibile tener conto degli effetti legati ad uno sviluppo non indefinitamente lineare. Il caso presentato riguarda lo studio di un muro di sostegno a sviluppo per lo più circolare, di dimensioni significative (circa 10m di altezza dallo spiccato fondazionale), in prossimità del quale sarà costruito un manufatto pesante, circolare, con funzione di vasca di raccolta liquidi. Le analisi sono condotte in un dominio 3D al fine di tener conto degli effetti della geometria e delle fasi costruttive, ed i risultati sono confrontati con quelli ottenuti dalle più classiche analisi semplificate 2D.

IL CASO STUDIATO

Il caso in esame riguarda un muro di sostegno da costruire per la successiva formazione di un piazzale all'interno dell'area di uno stabilimento industriale: l'intervento puntuale si inserisce all'interno di un più ampio progetto di riqualificazione dell'area contermina allo stabilimento [1] sulla base del quale sono stati ricavati i dati di input geometrici e prestazionali dell'opera. La collaborazione tra le società di ingegneria coinvolte nel progetto ha permesso non solo la progettazione strutturale e geotecnica dell'opera, ma anche la redazione di uno specifico modello BIM, sfruttando così questo strumento informatico per validare il corretto inserimento del manufatto nel complesso insieme di opere da realizzare.

Allo stato di fatto iniziale l'area era occupata da un pendio naturale, con pendenza variabile. L'opera, realizzata previo sbancamento in scarpata fino a 45°, si inserisce ai piedi del pendio stesso e determina un salto di quota di circa 6m tra il piano finito di valle e la superficie del terreno retrostante il muro. Lo sviluppo dei muri è, nel complesso, tendenzialmente rettilineo: fa eccezione la zona in esame, in cui il manufatto segue una semicirconferenza con raggio interno di circa 15.5m misurato al piede della parete, con piano di posa delle fondazioni a -3.2m dal piano finito di progetto. Nella zona racchiusa dalla parete sarà costruita, in seconda fase, una vasca a pianta circolare per l'accumulo liquidi, con altezza massima del tirante idraulico di 8.5m e franco di 1.5m dalla sommità delle pareti (peso totale distribuito in fondazione pari a circa 120 kPa).

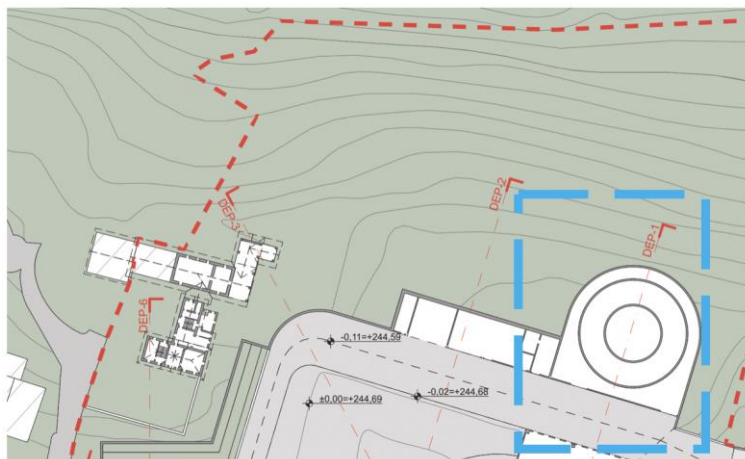


Figura 1 - Planimetria generale dell'area di intervento. Evidenziata la zona in esame, dove è presente il muro di sostegno in c.a. "a ferro di cavallo" – estratto da [1].

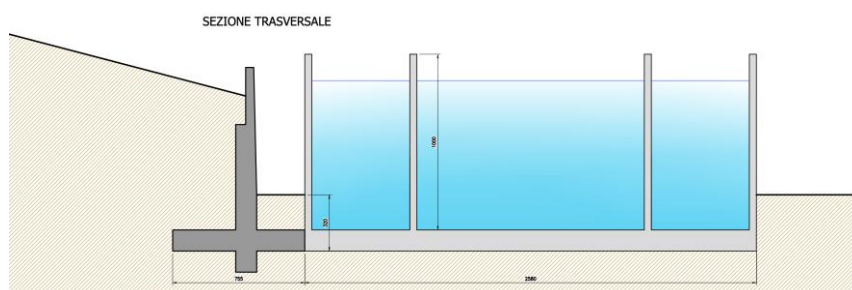


Figura 2 - Sezione trasversale tipo in corrispondenza del manufatto in esame.

Geometria e carichi di progetto

La sezione tipologica del muro di sostegno in c.a. ha una geometria articolata, rappresentata in Figura 3.

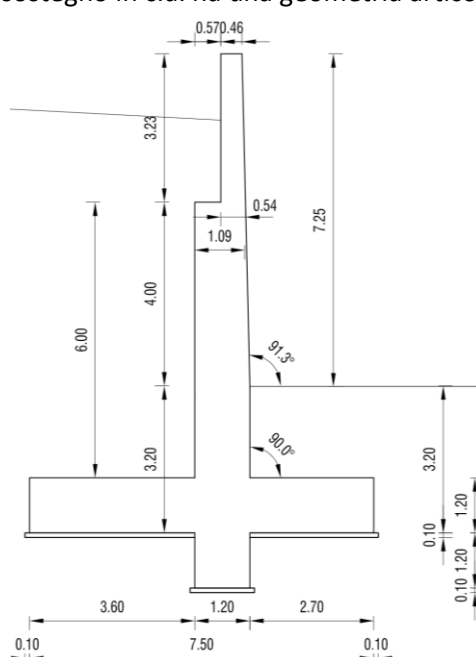


Figura 3 - Sezione tipo del muro di sostegno in c.a. con terrapieno a monte e rinterro di valle alla quota di progetto.

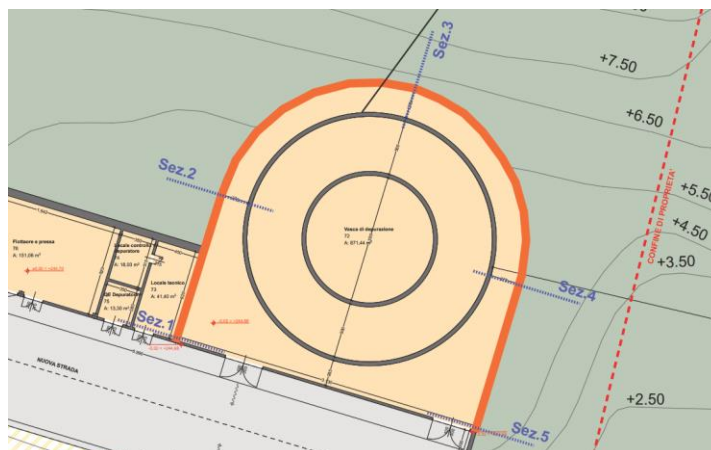


Figura 4 - Planimetria del muro di sostegno a “ferro di cavallo” (in arancio), con indicate le sezioni principali richiamate nella successiva analisi – estratto da [1].

L’opera si sviluppa lungo una semicirconferenza, con raggio di curvatura di 15.5m, e due tratti rettilinei paralleli e affacciati di estremità, di lunghezza circa pari a 20m, a definire una forma complessiva “a ferro di cavallo”.

L’area delimitata dal muro è interessata dalla costruzione di un manufatto in c.a. per il contenimento e il trattamento di liquidi: la soletta di fondazione è assunta di spessore 1.2m, allineata a quella del muro, da cui spiccano i muri della vasca a pianta circolare, coassiali, di raggio interno di 6.5m e 12.5m, ed altezza complessiva di 10.0m. Lo spazio compreso tra le pareti del muro e quelle della vasca sarà riempito con terreno fino a raggiungere la quota del p.c. di progetto.

In fase finale è applicato il peso proprio dell’acqua invasata nella vasca del depuratore, al massimo tirante di esercizio (8.50m).

Preliminarmente al rinterro a tergo del muro di sostegno, si realizza un sistema di drenaggio a tutta altezza che permette da un lato di raccogliere le acque di ruscellamento tramite una canaletta superficiale e dall’altro di captare l’acqua di infiltrazione del pendio, annullando le potenziali sovrappressioni idrauliche.

Proprietà dei materiali e caratterizzazione geotecnica-stratigrafica

Sulla base dei sondaggi geognostici eseguiti, il suolo su cui insiste l’opera è caratterizzato da una coltre superficiale di terreno vegetale/coesivo, di spessore minore di 3.0m, al di sotto del quale è presente uno strato sostanzialmente omogeneo di sabbia e ghiaia limosa, di buone caratteristiche meccaniche, che si estende oltre i 15.0m di profondità (fondo foro).

Indagini geofisiche (MASW) hanno evidenziato la presenza di depositi con velocità delle onde di taglio V_s crescenti con la profondità. Il substrato più rigido ($V_s \geq 800\text{m/s}$) è riconosciuto a quota -17.0m rispetto al p.c. Il riempimento del volume di scavo iniziale retrostante i muri e della zona interna (lato valle) è eseguito con materiale drenante di buone caratteristiche deformative e di resistenza.

Le caratteristiche meccanico-deformative dei terreni sono riassunte in Tabella 1, dove si riporta anche la potenza assunta per gli strati.

Gli elementi strutturali sono tutti realizzati in calcestruzzo armato ordinario, gettato in opera.

Tabella 1 - Caratteristiche meccaniche e/o geotecniche dei terreni e dei materiali.

Material	Quota da p.c.		Spessore [m]	Elastic Modulus E [kPa]	Unit weight γ [kN/mc]	Cohesion C [kPa]	Frictional angle ϕ [°]	Note
	da [m]	a [m]						
Ricoprimento vegetale	-	-	< 0.5	-	-	-	-	trascurato
Argilla limosa sabbiosa	0	-3.0	3.0	4600	20	15	25	terreno laterale al muro oltre il piano di fondazione
Sabbia e ghiaia limosa	-3		> 12.0	7100	24	10	34	
Sabbia e ghiaia limosa				50000	24	10	34	
Rinterro				15000	20	0	34	
Calcestruzzo				34000000	25	-	-	

MODELLO FEM

L'analisi è stata condotta col programma MIDAS GTS NX 2019 (v1.1) [2,3], software specifico per l'analisi di problemi che coinvolgono l'interazione terreno-struttura.

Dal punto di vista della modellazione numerica, i volumi solidi sono stati discretizzati con elementi finiti 3D a 6/8 nodi (*hybrid mesh*), a cui è associato un meccanismo di rottura alla Mohr-Coulomb per i terreni ed un comportamento lineare elastico per le strutture in calcestruzzo (solette e pareti).

Ai fini del presente studio, il reale sviluppo delle opere in progetto è stato semplificato focalizzando l'attenzione alla struttura di sostegno nella zona della vasca, ovvero trascurando la presenza delle strutture adiacenti.

La morfologia del p.c. è stata ricostruita utilizzando le curve di livello rilevate allo stato di fatto: l'orografia del terreno non è simmetrica rispetto al sistema strutturale, perciò nemmeno il comportamento tenso-deformativo atteso per l'opera sarà simmetrico.

Particolare attenzione è stata posta all'interfaccia tra la fondazione del muro e quella della vasca (manufatto pesante interno realizzato in fase successiva), con l'obiettivo di valutare gli effetti di interazione tra le fondazioni dei 2 corpi. In un primo modello (A) è mantenuta la congruenza nodale tra le due solette, mentre in un secondo modello (B), le stesse sono state separate mediante il comando di *split node connection* all'interfaccia.

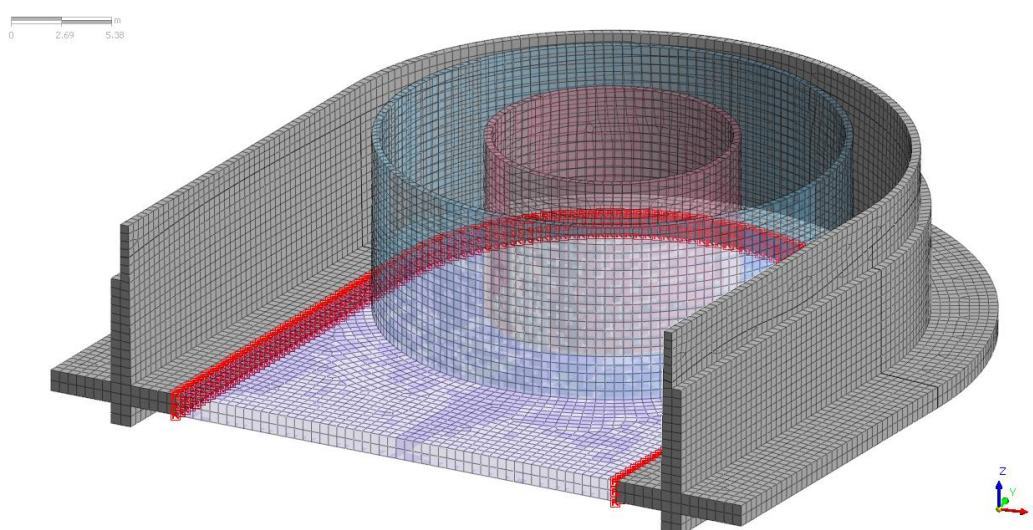


Figura 5 - Split node connection all'interfaccia tra le solette di fondazione del muro di sostegno e della vasca interna (in rosso).

L'analisi numerica considera le seguenti fasi costruttive (*stress analysis – construction stage*):

Fase 0: INIZIALE	Stato di fatto ante-opera
Fase 1: SCAVO	Esecuzione dello scavo in scarpata (imposto l'azzeramento finale degli spostamenti)
Fase 2: MURO	Realizzazione dell'opera in c.a.
Fase 3: RINTERRO	Rinterro a tergo del muro con materiale incoerente
Fase 4: VASCA	Realizzazione della fondazione e delle pareti in c.a. del manufatto interno (<i>Split node connection</i> all'interfaccia tra le fondazioni nel modello B).
Fase 5: FINALE	Rinterro finale lato valle a raggiungere il p.c. di progetto
Fase 6: INVASO	Massimo invaso di esercizio nella vasca

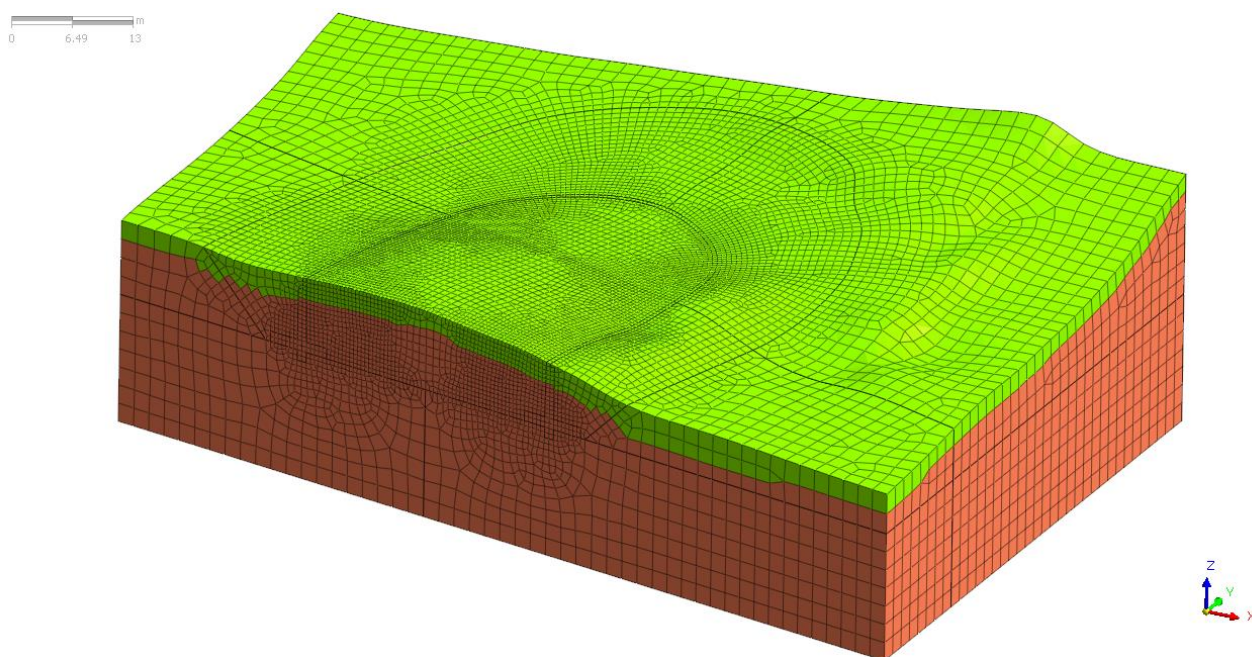


Figura 6 - Fase 0 (INIZIALE): i colori distinguono l'argilla limosa superiore (verde), dalle sabbie e ghiaie più profonde (marrone).

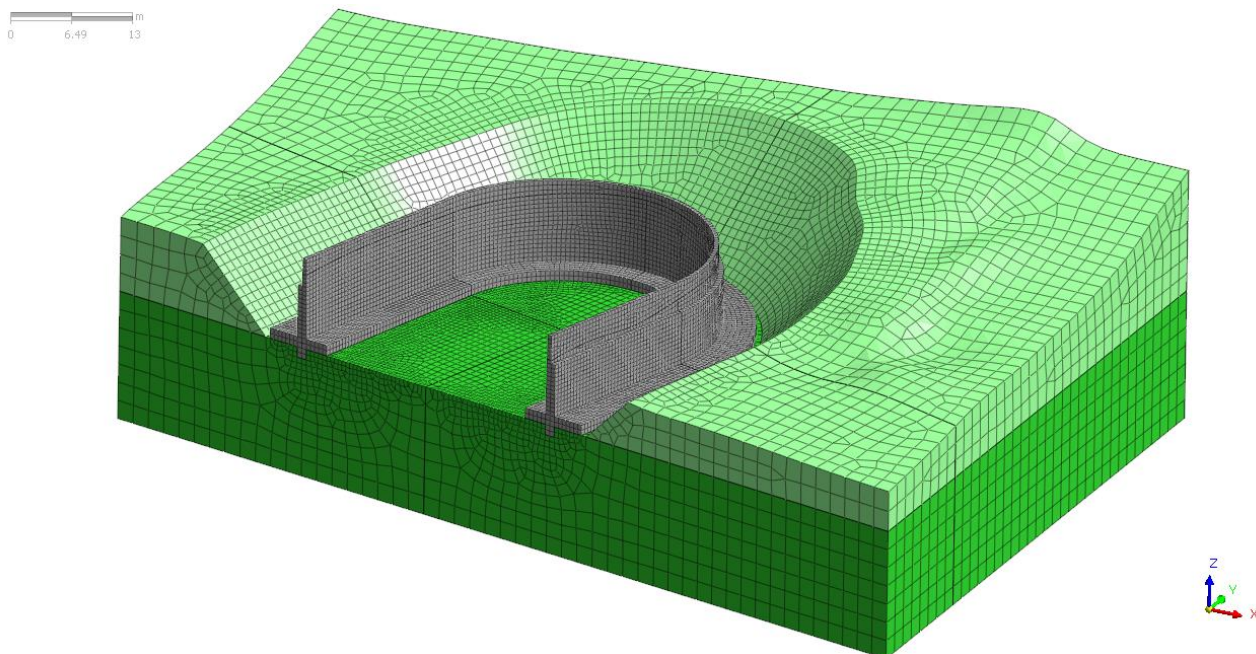


Figura 7 - Fase 2 (MURO): i colori distinguono il terreno nello spessore di scarpata (verde chiaro), da quello al di sotto del piano di fondazione (verde scuro).

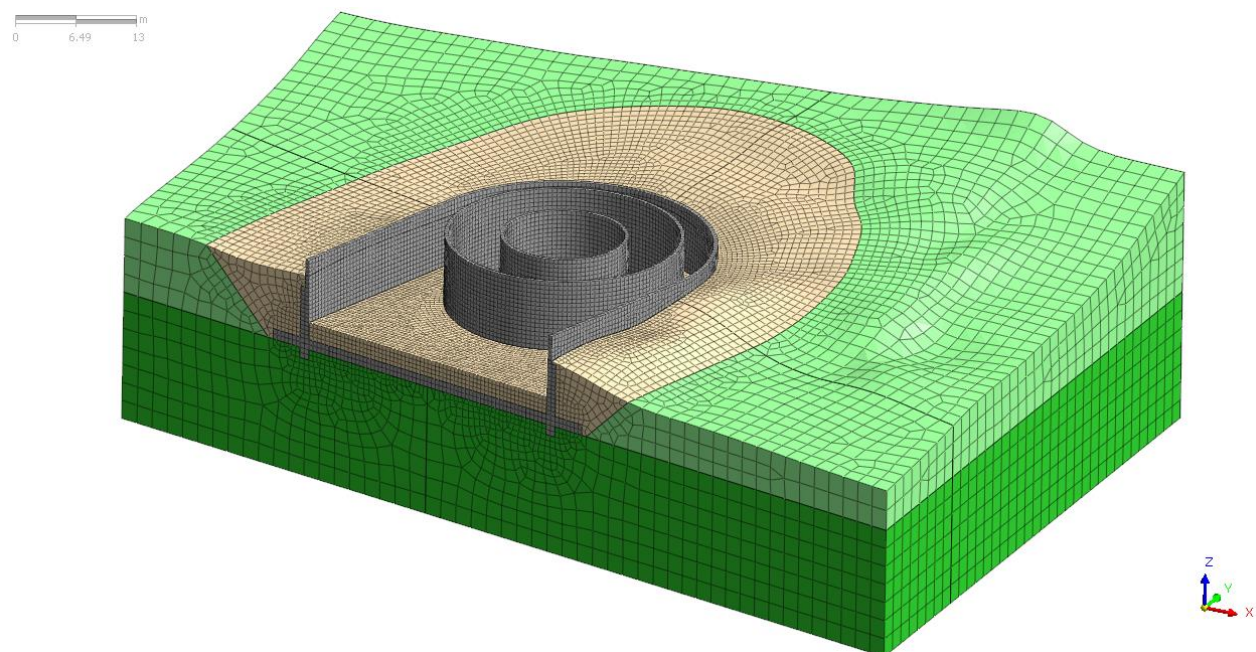


Figura 8 - Fase 5 (FINALE): è presente la vasca interna in c.a., il volume di rinterro a monte e a valle del muro (color nocciola).

RISULTATI - SOLLECITAZIONI

I risultati sono stati estratti nei diversi tratti del paramento mediante il comando *LDF sum*, integrando le tensioni su piani orizzontali, dalla base del paramento verticale del muro in c.a. per i primi 5.0m di sviluppo in altezza, con passo minimo di 1.0m.

Si focalizza l'attenzione sul tratto rettilineo iniziale (sviluppo di 23.1m tra le sezioni n.1 e n.2) e sul tratto in mezzzeria alla semicirconferenza (sviluppo di 5.0m in asse alla sezione n.3).

Modello A – Solette di fondazione collegate

Le Figure 9 e 10 riportano le sollecitazioni per metro lineare nelle sezioni di controllo del modello A; valori negativi del momento flettente tendono le fibre contro terra del paramento.

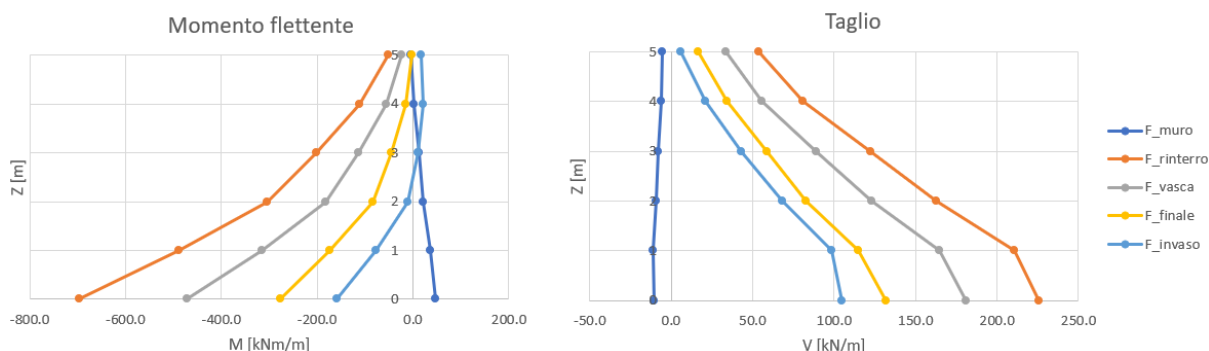


Figura 9 - Modello A - Diagramma del momento e taglio nel tratto rettilineo iniziale.

$$M_{i,max}^A = -696 \text{ kNm/m}$$

$$V_{i,max}^A = 226 \text{ kN/m}$$

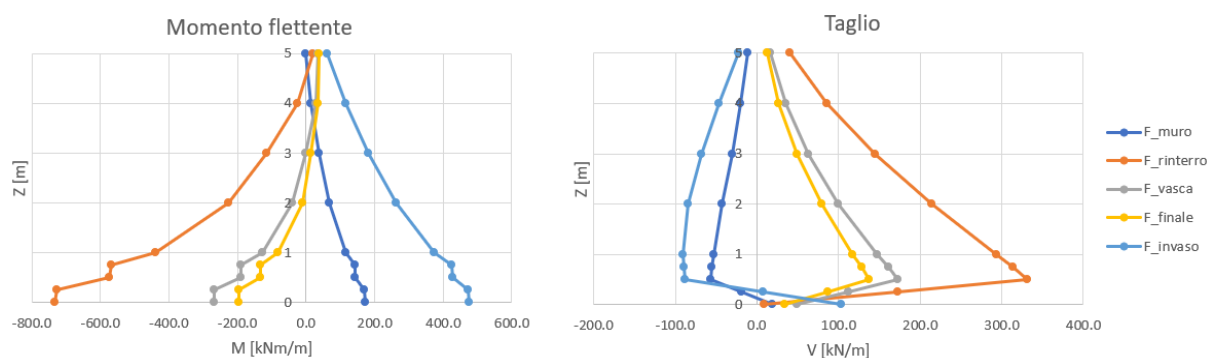


Figura 10 - Modello A - Diagramma del momento e taglio nel tratto in mezzzeria alla semicirconferenza.

$$M_{c,max}^A = -732 \text{ kNm/m} \quad (477 \text{ kNm/m})$$

$$V_{c,max}^A = 332 \text{ kN/m}$$

Osservazioni

- Le massime sollecitazioni flessionali e di taglio si ottengono alla sezione di incastro del paramento verticale con la soletta di fondazione nella fase 3 (RINTERRO);
- Le fasi successive determinano una generale riduzione delle sollecitazioni massime.

- La particolare geometria planimetrica semicircolare dell'opera determina un andamento significativamente diverso delle sollecitazioni tra la sezione rettilinea iniziale (schema statico a mensola con fibre tese sempre contro-terra) e quella di mezzeria della semicirconferenza (schema statico a mensola con inversione del momento nella fase 6 (INVASO)).
- Nella fase 3 (RINTERRO) il momento flettente nella sezione di mezzeria della semicirconferenza è di poco superiore al momento nel tratto rettilineo iniziale (+5%).

Modello B – Solette di fondazione non collegate

Le Figure 11 e 12 riportano le sollecitazioni per metro lineare nelle sezioni di controllo del modello B; valori negativi del momento flettente tendono le fibre contro terra del paramento.

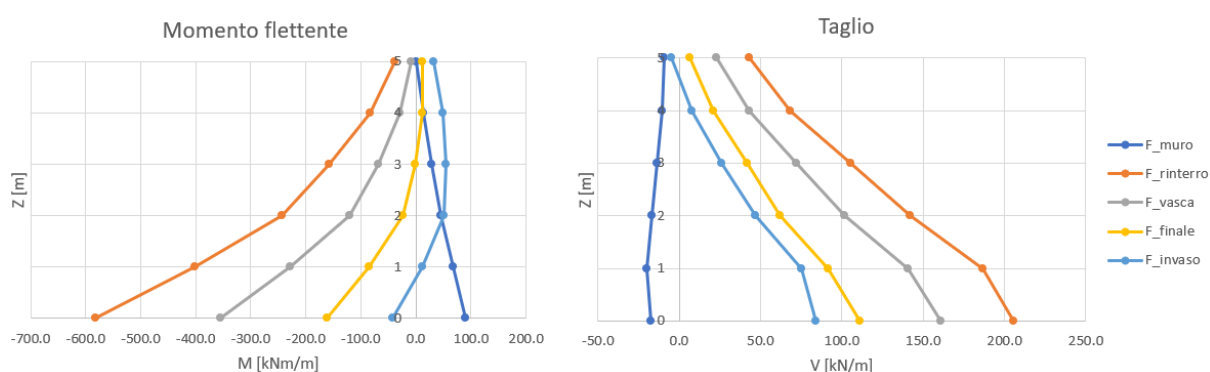


Figura 11 - Modello B - Diagramma del momento e taglio nel tratto rettilineo iniziale.

$$M_{i,max}^B = -582 \text{ kNm/m}$$

$$V_{i,max}^B = 206 \text{ kN/m}$$

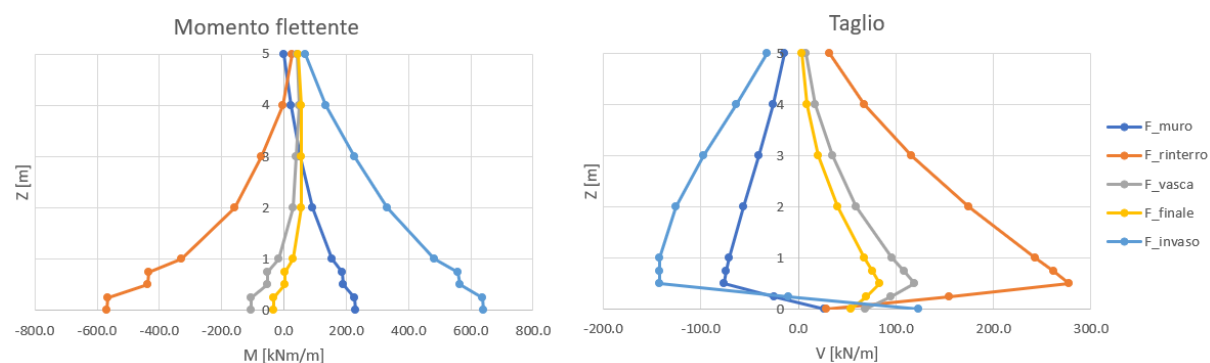


Figura 12 - Modello B - Diagramma del momento e taglio nel tratto in mezzeria alla semicirconferenza.

$$M_{c,max}^B = -569 \text{ kNm/m} \quad (641 \text{ kNm/m})$$

$$V_{c,max}^B = 277 \text{ kN/m}$$

Osservazioni

- Le massime sollecitazioni flessionali e di taglio nella fase 3 (RINTERRO) sono inferiori rispetto a quelle ottenute dal Modello A (momento $M_{i,max}$ -16%, $M_{c,max}$ -22%, taglio $V_{i,max}$ -9%, $V_{c,max}$ -17%). Il carico permanente e variabile afferente alla soletta del depuratore non è trasmesso direttamente all'adiacente

- muro di sostegno, ma solo per effetto della deformabilità del terreno di fondazione (effetto indiretto).
- Nella fase 3 (RINTERRO) il momento flettente nella sezione di mezzeria della semicirconferenza è di poco inferiore al momento nel tratto rettilineo iniziale (-2%).
- Nella fase 6 (INVASO). sul tratto in mezzeria alla semicirconferenza, l'inversione del momento flettente determina lo stato di sollecitazione più gravoso per la sezione alla base del paramento verticale.

RISULTATI - SPOSTAMENTI

Gli spostamenti dell'opera di sostegno sono estrapolati dal modello fem. I risultati sono riportati per le 5 sezioni principali, schematizzando in forma semplificata il muro con due corpi rigidi di fondazione ed elevazione, separati tra loro, che possono traslare e ruotare rispettivamente rispetto ai punti O e O' (vedi Figura 13).

Per i tre punti di riferimento si estrapolano perciò i seguenti valori:

- Punto A (sommità del paramento verticale) → spostamento orizzontale ortogonale al paramento
- Punto B (estremità a monte della fondazione, intradosso soletta) → spostamento verticale
- Punto C (estremità a valle della fondazione, estradosso soletta) → spostamento verticale

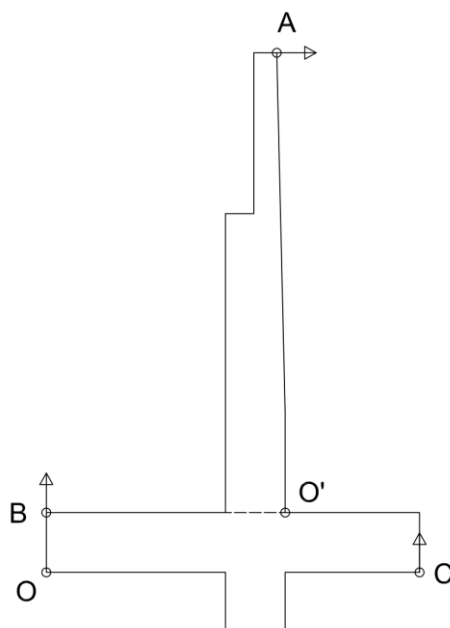


Figura 13 - Sezione tipo con i punti di riferimento scelti per l'analisi degli spostamenti (le frecce indicano il verso con segno positivo).

Tabella 2 - Modello A - Spostamenti [mm].

FASE	MURO			RINTERRO			VASCA			FINALE			INVASO		
PUNTO	A (orizz.)	B (vert.)	C (vert.)	A (orizz.)	B (vert.)	C (vert.)	A (orizz.)	B (vert.)	C (vert.)	A (orizz.)	B (vert.)	C (vert.)	A (orizz.)	B (vert.)	C (vert.)
Sez.1	-0.1	-7.6	-8.3	0.6	-25.8	-22.9	1.8	-27.0	-26.6	1.0	-29.4	-30.8	3.7	-29.8	-32.9
Sez.2	0.2	-7.6	-8.4	0.4	-27.6	-24.6	1.7	-29.3	-29.1	2.0	-31.1	-31.6	3.6	-32.7	-36.9
Sez.3	-0.1	-7.6	-8.3	-2.2	-32.4	-27.6	-2.5	-34.7	-31.5	-2.3	-35.7	-33.0	-3.0	-39.0	-38.5
Sez.4	0.9	-7.4	-8.4	-2.7	-26.2	-22.3	0.2	-27.5	-26.7	2.1	-28.7	-29.1	4.4	-30.3	-34.4
Sez.5	1.1	-8.0	-8.8	-8.3	-21.8	-14.1	-5.0	-24.7	-20.0	-1.0	-27.3	-25.5	-0.4	-29.9	-29.2

Tabella 3 - Modello B - Spostamenti [mm].

FASE	MURO			RINTERRO			VASCA			FINALE			INVASO		
PUNTO	A (orizz.)	B (vert.)	C (vert.)	A (orizz.)	B (vert.)	C (vert.)	A (orizz.)	B (vert.)	C (vert.)	A (orizz.)	B (vert.)	C (vert.)	A (orizz.)	B (vert.)	C (vert.)
Sez.1	0.2	-7.6	-8.8	1.2	-25.9	-24.3	2.5	-27.2	-28.0	1.7	-29.5	-32.1	4.4	-29.9	-34.3
Sez.2	0.5	-7.6	-8.9	1.2	-27.9	-26.0	2.5	-29.6	-30.6	2.8	-31.3	-33.0	4.4	-32.9	-38.3
Sez.3	-0.2	-7.7	-8.6	-2.5	-32.9	-28.6	-2.8	-35.2	-32.6	-2.6	-36.2	-34.0	-3.4	-39.5	-39.6
Sez.4	1.7	-7.3	-8.9	-1.2	-26.1	-23.4	1.7	-27.4	-27.9	3.6	-28.6	-30.3	5.9	-30.2	-35.6
Sez.5	2.3	-8.3	-10.0	-6.5	-22.4	-16.2	-3.2	-25.3	-22.1	0.8	-28.0	-27.6	1.4	-30.5	-31.4

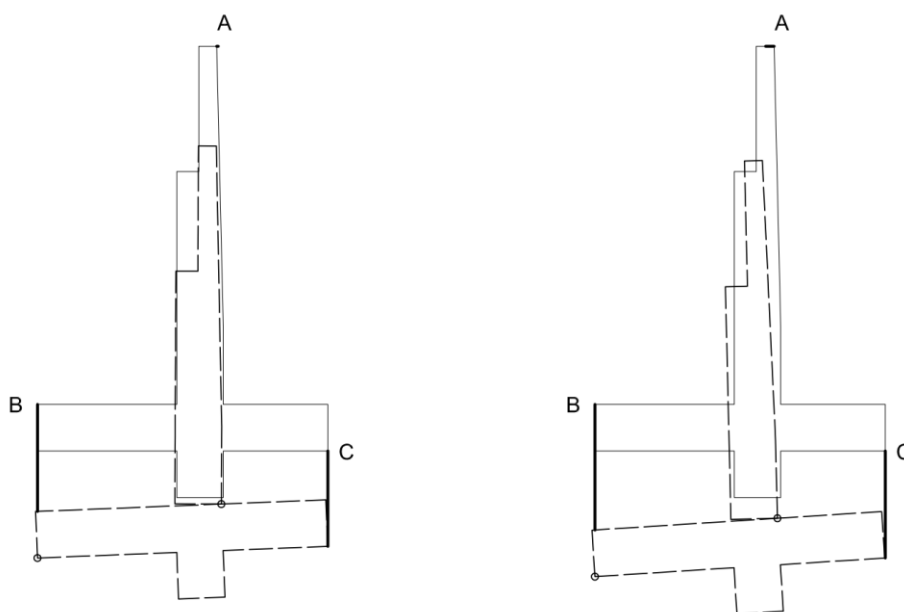


Figura 14 - Modello A - Schematizzazione semplificata degli spostamenti (x100) per le sez. 2 e 3, rispettivamente a sinistra e destra - Fase 2 (RINTERRO).

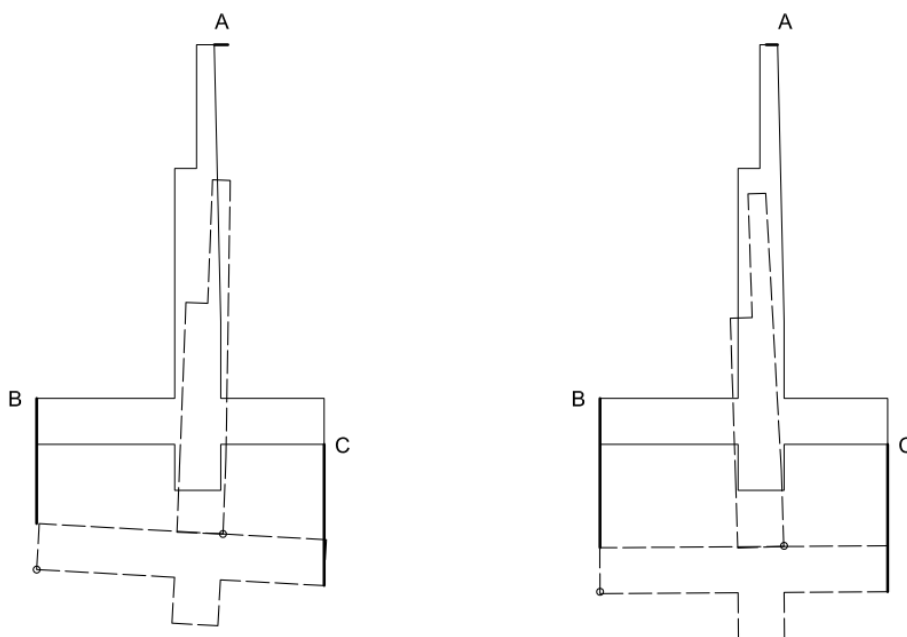


Figura 15 - Modello A - Schematizzazione semplificata degli spostamenti (x100) per le sez. 2 e 3, rispettivamente a sinistra e destra - Fase 6 (INVASO).

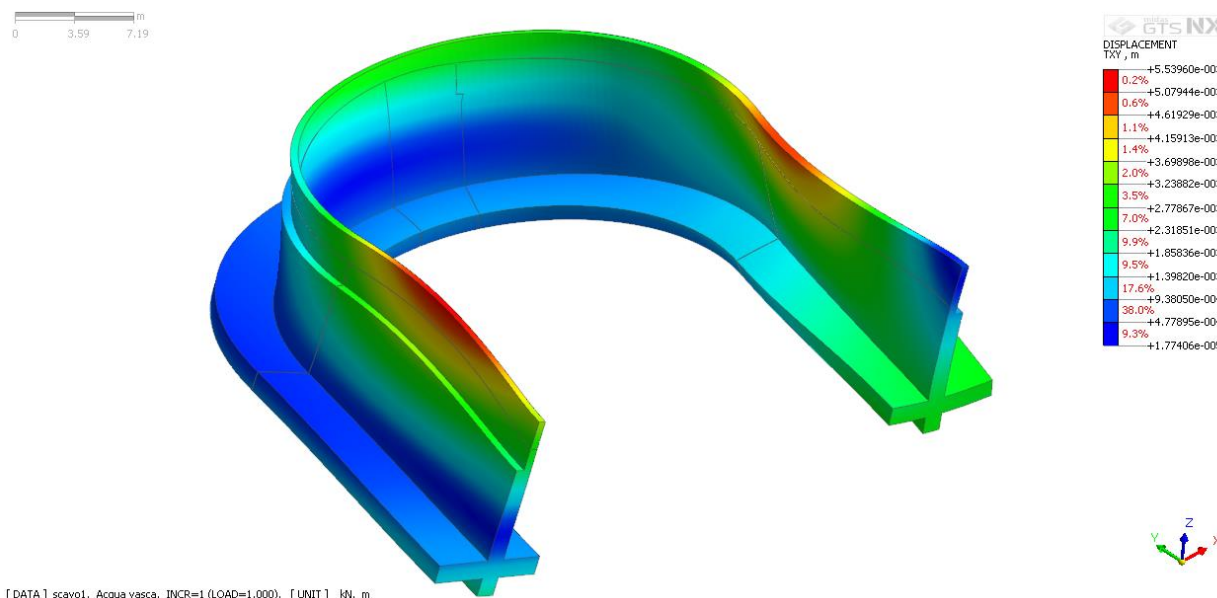


Figura 16 - Modello A, fase 6 (INVASO) - Deformata XYZ (x10) con scala di colore relativa alla componente XY: si osserva l'effetto di "ovalizzazione" planimetrica del muro.

Osservazioni

- La risposta globale dell'opera di sostegno non è simmetrica a causa della diversa condizione di carico esterno (l'orografia del versante determina una spinta del terreno minore alle estremità rettilinee del muro (rif. sez. 1 e sez. 4 e 5).
- Dalla schematizzazione semplificata per le sez. 2 e 3 si osserva che in fase 2 (RINTERRO) l'azione combinata di spinta orizzontale e del peso proprio del rinterro a tergo del muro determina in ogni caso la trazione delle fibre contro terra al nodo di incastro alla base del paramento verticale in c.a.
- Nella fase 6 (INVASO) il massimo sovraccarico a valle induce la generale rotazione della fondazione verso valle.
- In sez. 2 la sommità del paramento trasla contestualmente verso valle riducendo l'azione di spinta e di conseguenza le sollecitazioni alla base del paramento.
- In sez. 3 il medesimo effetto è contrastato dalla "ovalizzazione" della geometria ad arco, da cui la sommità del paramento trasla verso monte generando l'inversione del momento flettente alla base.
- Nel Modello B (solette di fondazione non collegate) il comportamento generale del manufatto è analogo a quello rilevato per il Modello A. I cedimenti verticali della fondazione del muro sono leggermente superiori (+3% medio) e sono maggiori anche gli spostamenti assoluti orizzontali alla sommità del paramento (in fase 6 - INVASO, +22% per la sez. 2 e +13% per la sez. 3).

CONFRONTO CON RISULTATI DA ANALISI SEMPLIFICATE

A titolo di confronto, l'analisi del muro di sostegno viene condotta anche con l'ausilio di un programma di calcolo commerciale [4] specifico per lo studio 2D di opere di sostegno. In modo semplificato, il software analizza una striscia di muro di larghezza unitaria, assumendo quindi implicitamente che gli effetti delle condizioni al contorno siano trascurabili.

La spinta delle terre è valutata con il metodo generale di Culmann, nelle due ipotesi di spinta attiva e a riposo per il terrapieno a monte. La resistenza passiva al dente di fondazione è considerata al 50%.

Il confronto è eseguito nella fase 3 (RINTERRO).

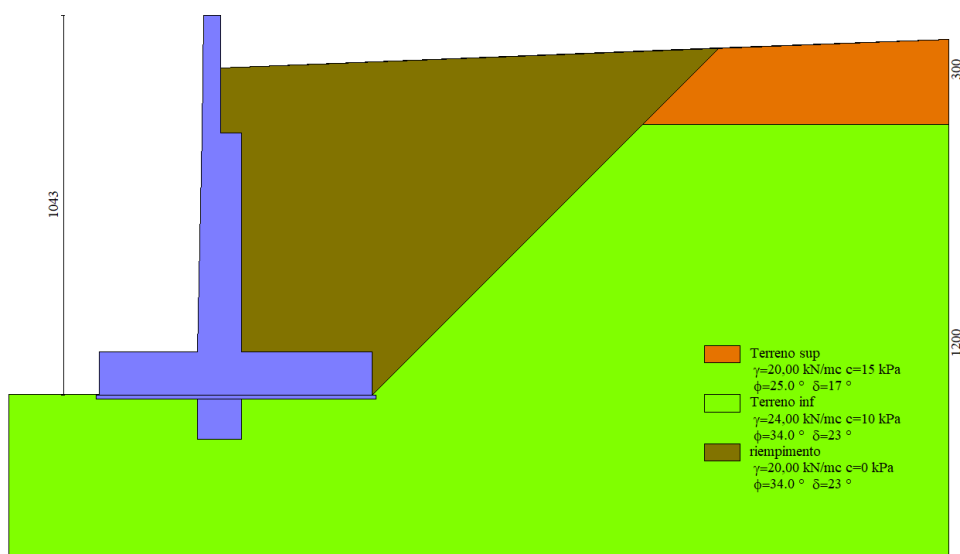


Figura 17 - Analisi di confronto 2D - Sezione tipo del muro in fase 3 (RINTERRO).

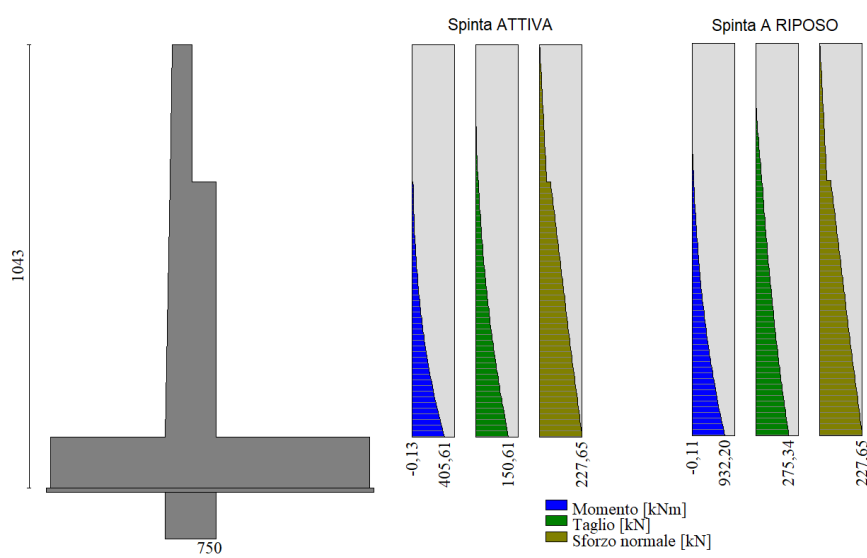


Figura 18 - Risultati dell'analisi semplificata 2D – Sollecitazioni sul paramento verticale.

Tabella 4 - Confronto risultati di sollecitazione.

	Analisi 2D		Analisi 3D (fem)	
	Spinta attiva	Spinta a riposo	Tratto rettilineo	Mezzeria semicirc
M [kNm/m]	406	932	582	569
V [kN/m]	151	275	206	277

Osservazioni

- In generale si osserva che l'ipotesi di spinta attiva del terreno nell'analisi semplificata 2D non è mai a favore di sicurezza. L'ipotesi di spinta a riposo è congrua nel confronto dei valori di massimo taglio, mentre conduce a valori di massimo momento flettente ben superiori a quelli ottenuti dall'analisi fem

(+60% circa).

- L'analisi 2D non considera l'effetto della geometria dell'opera, ovvero non distingue i risultati per la sezione nel tratto curvilineo rispetto ai tratti rettilinei iniziale e finale.
- Le fasi successive a quella di rinterro non sono direttamente confrontabili con risultati semplificati, in quanto l'analisi 2D non coglie gli effetti indotti dei carichi applicati al terreno a valle (peso proprio della vasca e dell'acqua invasata), così come non può essere modellato il collegamento con la soletta di fondazione del manufatto.

CONCLUSIONI

Le analisi tridimensionali condotte hanno messo in evidenza come **le opere di sostegno**, per quanto semplici nella loro sezione trasversale, **possono manifestare dei comportamenti non uniformi nel momento in cui l'effetto forma assume rilievo**. In tali casi la classica modellazione bidimensionale che fa riferimento ad una sezione tipo costante, rappresentante un manufatto indefinitamente esteso, può non cogliere il reale comportamento strutturale e geotecnico del sistema.

Anche **l'intensità della spinta esercitata dal terreno sull'opera di sostegno risente dell'effetto forma** e, in termini generali, raggiunge valori intermedi tra le condizioni convenzionali di spinta attiva e quella di spinta a riposo: il livello di attivazione di uno o dell'altro stato limite non è facilmente stimabile e definibile utilizzando un semplice modello 2D.

L'effetto di un manufatto pesante posto subito a valle di un'opera di sostegno può modificare in modo significativo il comportamento di quest'ultima, sia in termini di sollecitazione che di deformazione: in generale ad una riduzione delle sollecitazioni nel paramento si accompagna un incremento degli spostamenti nel piano orizzontale e una traslazione da monte verso valle del punto di massima pressione al suolo.

RIFERIMENTI

- [1] [STI Engineering srl](http://STI-Engineering.srl) – San Daniele del Friuli - *Progetto di ampliamento di un sito industriale* - 2020
 [2] MIDAS GTS-NX, “*Analysis reference*”
 [3] MIDAS GTS-NX, “*User manual*”
 [4] AZTEC Informatica, “*MAX-Analisi e calcolo dei muri di sostegno*” - Manuale d'uso