



Interazione tra gallerie metrò e scavi profondi: il metodo smartGDE



L'ESECUZIONE DI SCAVI PROFONDI ADIACENTI A STRUTTURE ESISTENTI COME LE GALLERIE IN AREE URBANE, GENERANO UN'INTERAZIONE TRA TERRENO E STRUTTURE MOLTO COMPLESSO E DIPENDENTE FORTEMENTE DAI PROCESSI COSTRUTTIVI POSTI IN ESSERE

1. Lo scavo a cielo aperto per l'esecuzione della metro M4 Milano Linate

Massimo Chiarelli *

Effettuare un'analisi agli elementi finiti FEM è il modo corretto di approcciare il problema. Essa è in grado di fornire tutti quegli elementi indispensabili e verosimilmente vicini a quello che sarà il comportamento reale d'interazione tra scavo profondo e strutture esistenti.

La creazione di un modello valido e la sua successiva implementazione agli elementi finiti non è cosa semplice ed è sicuramente influenzata anche dall'esperienza che il Progettista riversa "nell'immaginare" il modello stesso, ovvero il comportamento del materiale suolo.

Poter disporre di informazioni e/o parametri preliminari in grado di indirizzare il Progettista nelle assunzioni/ipotesi progettuali, diventa di grandissimo aiuto e permette di concentrare sforzi e risorse nella giusta direzione.

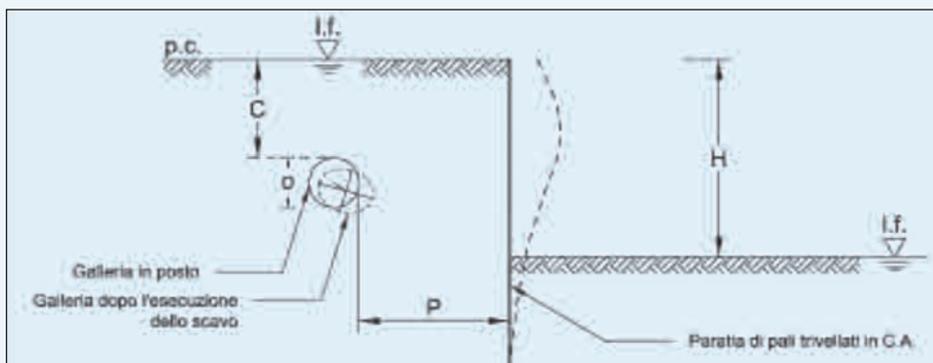
Lo scopo di questo lavoro è quello di dare un contributo in tal senso mediante la proposta di specifici grafici ottenuti da analisi FEM condotte su una geometria di modellazione scavo-strutture semplificata, nonché su ipotesi comportamentali del terreno basate su osservazioni frutto dell'esperienza.

I grafici presentati consentono una stima preliminare degli spostamenti, delle deformazioni e delle sollecitazioni massime agenti su una sezione piana del rivestimento definitivo di una galleria esistente, in risposta all'esecuzione di uno scavo profondo ad essa vicino.

Il metodo grafico semplificato smartGDE

Dover calcolare quali sono gli effetti sul rivestimento di una galleria per effetto della realizzazione di uno scavo, è una situazione che si riscontra frequentemente in aree urbane fortemente antropizzate dove la presenza della rete metropolitana sotterranea è spesso interessata da scavi realizzati, ad esempio, per la costruzione delle fondazioni di edifici e/o stazioni della metro stessa.

Il metodo grafico di seguito proposto può essere impiegato per ottenere una stima delle deformazioni/sollecitazioni indotte sul rivestimento di una galleria esistente per effetto di uno scavo profondo realizzato nelle vicinanze della galleria stessa. Il metodo è stato elaborato partendo da un'analisi FEM di due casi-tipo per i quali sono state fatte delle ipotesi semplificative delle condizioni del terreno, ovvero della geometria del problema.



2. La schematizzazione semplificata della situazione analizzata

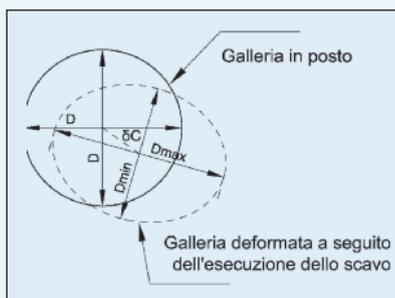


Allo scopo sono stati identificati i parametri fondamentali rappresentativi che caratterizzano la deformazione del rivestimento di una galleria e, successivamente, formulando i grafici con tali parametri. Lo schema concettuale semplice di partenza relativo alla deformazione del rivestimento della galleria in risposta alla deformazione del terreno nell'intorno di uno scavo profondo, è rappresentato in Figura 2.

In fase d'esecuzione dello scavo la paratia si deforma con uno spostamento laterale verso l'area di scavo stessa. Ciò determina uno scarico del terreno a tergo della paratia facendo risentire l'influenza del movimento anche sul rivestimento della galleria; ciò causa uno spostamento della galleria verso lo scavo. Inoltre, a seguito dello scarico del terreno in direzione orizzontale, la componente verticale del peso di terreno di copertura al di sopra della galleria aumenta generando una deformazione del rivestimento stesso chiamata anche ovalizzazione.

In particolare, se la copertura di terreno al di sopra della galleria è tale da consentire la creazione del cosiddetto "effetto arco" e la conseguenziale redistribuzione dei carichi sovrastanti al terreno intorno al rivestimento, nel momento in cui vi è uno scarico di terreno in risposta all'esecuzione di uno scavo l'effetto arco cessa di esistere ed il terreno di copertura graverà interamente sul rivestimento generando un aumento delle sollecitazioni su di esso. Infatti, la deformazione del rivestimento della galleria presenta due componenti, ovvero uno spostamento nel piano orizzontale verso lo scavo e una deformazione nel piano della sezione del rivestimento principalmente lungo l'asse orizzontale la quale genera un'ovalizzazione con un diametro minimo D_{min} lungo l'asse verticale e un D_{max} , appunto, lungo l'asse orizzontale.

Nel piano del rivestimento, lo spostamento può essere rappresentato dalla minima distanza tra il centro della galleria nello



3. La schematizzazione dello spostamento e della deformazione nel piano del rivestimento della galleria

stato iniziale o in posto ed il centro della galleria post deformazione δC . La sezione della galleria post esecuzione dello scavo è ipotizzata ellittica con un diametro minimo e uno massimo. La deformazione della sezione del rivestimento δD è data dalla differenza tra il

D_{max} e il D_{min} , ovvero $\delta D = D_{max} - D_{min}$.

Riepilogando, per ef-

fetto dello scavo la situazione reale vede un tratto di galleria interessato da uno spostamento orizzontale più un'inflessione: ambedue verso lo scavo stesso. Nelle sezioni d'inflessione si avranno nel rivestimento un aumento del momento flettente e dello sforzo di taglio. Da ciò l'importanza di avere stime preliminari ad un'analisi FEM dettagliata degli spostamenti nel piano della galleria al fine di valutare, appunto in via preliminare, quali saranno gli ordini di grandezza delle sollecitazioni massime che agiranno sul rivestimento e se esse saranno compatibili con l'opera stessa a meno di inter-

venti strutturali da porre in atto prima dell'esecuzione dello scavo per mitigare o addirittura annullarne gli effetti.

Per l'elaborazione dei grafici è stato necessario fare delle ipotesi di base e creare una configurazione geometrica di partenza sulla quale basare tutte le analisi. Ovviamente, tale configurazione è stata pensata tenendo conto di determinati parametri e variabili che potevano influenzare il comportamento deformativo del terreno e della galleria a seguito della realizzazione dello scavo profondo.

Da premettere che se elaborassimo dei grafici utilizzando la configurazione geometrica base e i parametri/variabili in termini dimensionali, si avrebbero non pochi problemi ad applicare, di volta in volta allo specifico caso reale, il metodo grafico proposto. In altre parole, si avrebbe una certa difficoltà nell'applicazione del metodo in quanto il numero dei casi reali, ovvero il campo di definizione delle variabili d'ingresso ai grafici, risulterebbe vastissimo e non sempre riconducibile alla configurazione geometrica di base ipotizzata. Se al contrario, una volta stabilita la configurazione geometrica di partenza, elaborassimo dei grafici in termini adimensionali, il tutto sarebbe di più facile applicabilità e, soprattutto, idoneo per una casistica reale molto più ampia.

Il problema è quindi, la costruzione della configurazione geometrica sulla quale basare le nostre analisi numeriche, ovvero la creazione del modello di analisi FEM.

Nello specifico, per far ciò, ipotizzata una configurazione geometrica base da utilizzare, sono state eseguite due analisi FEM semplicemente variando tale configurazione per i due casi analizzati secondo un fattore di scala lineare. Sono state ipotizzate anche le medesime caratteristiche del suolo considerando nel calcolo il criterio di rottura del terreno di Mohr-Coulomb in condizioni non drenate. L'esecuzione dello scavo infatti, è un'attività relativamente veloce ed è ragionevole ipotizzare che il terreno circostante possa essere modellato in condizioni non drenate sempreché la permeabilità media sia sufficientemente bassa.

A sostegno della parete dello scavo eseguito in prossimità della canna della galleria, si è ipotizzata la realizzazione di una paratia di pali trivellati in c.a. modellata con comportamento a piastra elastica. Analogamente, per il rivestimento della galleria è stato ipotizzato con un comportamento a piastra elastica.

Dall'esame dei risultati delle analisi FEM eseguite, si è visto che essi differivano proprio dello stesso fattore di scala lineare utilizzato per variare la configurazione geometrica tra il Caso 1 e il Caso 2 (a meno di ragionevoli approssimazioni dovute alle semplificazioni fin qui poste in essere). Ciò ci ha dato conforto circa la strada intrapresa per la formulazione del metodo in quanto, stabilita la configurazione e visto che esisteva un legame lineare tra le due diverse configurazioni, è bastato strutturare un modello adimensionale sul quale eseguire le analisi FEM e, successivamente, costruire i grafici proprio con le risultanze di tali analisi.

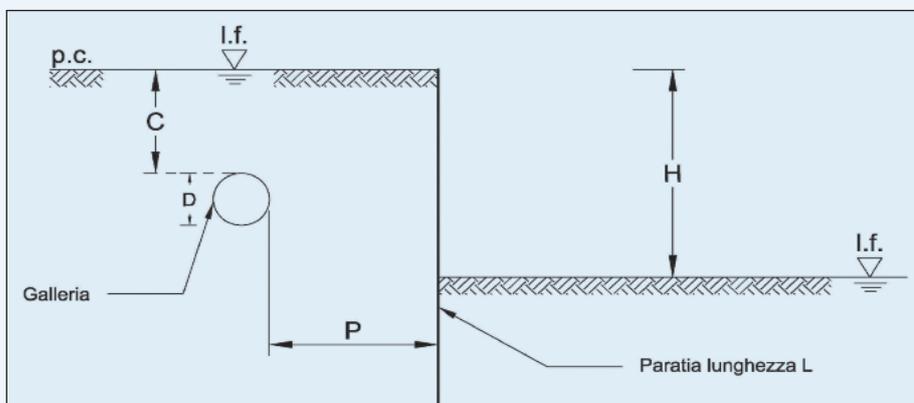
Come fin qui detto, per poter sviluppare il metodo smartGDE per la stima delle deformazioni e delle sollecitazioni agenti sul rivestimento di una galleria, si è reso necessario identificare i parametri chiave e le variabili che influenzano il comportamento deformativo del terreno e della galleria.



Avvalendoci degli studi condotti da altri Autori [...], i fattori sono stati individuati come segue:

- ◆ modulo di Young (E);
- ◆ spessore del rivestimento definitivo della galleria (S);
- ◆ profondità dello scavo (H);
- ◆ posizione della galleria, in termini di distanza orizzontale, rispetto alla parete dello scavo (P);
- ◆ diametro della galleria (D);
- ◆ copertura di terreno al di sopra della galleria (C).

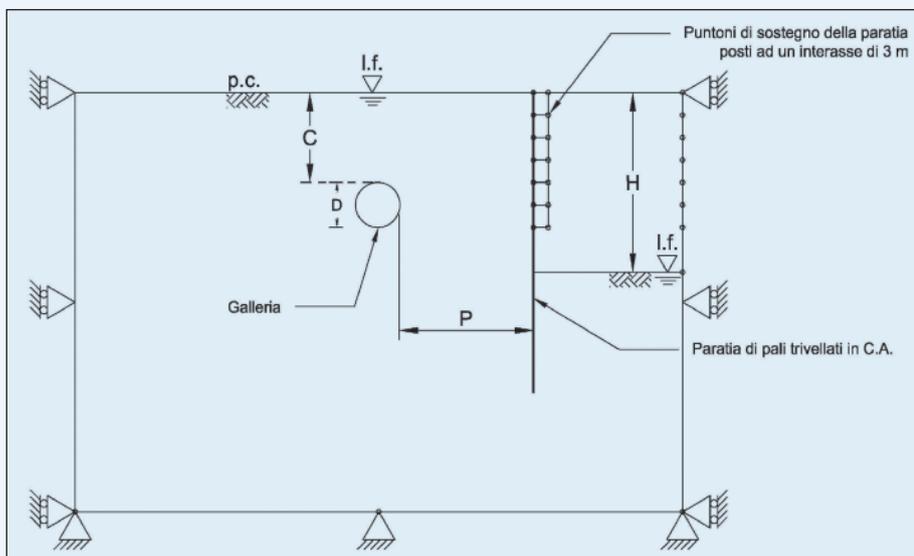
Avendo individuato i parametri chiave e le variabili principali che interagiscono ed influenzano le deformazioni nel rivestimento di una galleria, il metodo smartGDE è stato elaborato considerando proprio questi fattori mettendoli in relazione tra di loro in termini adimensionali.



4. La schematizzazione e l'individuazione dei parametri utilizzati nell'analisi FEM

L'individuazione del modello di analisi FEM

Come già detto in precedenza, è stata effettuata un'analisi FEM su due casi simili sia in presenza di galleria che senza, i quali differivano tra loro soltanto di un fattore di scala lineare $f_{scala} = 1,5$ in merito alle dimensioni ed al posizionamento delle strutture/scavo profondo.



5. Il modello impiegato nell'analisi FEM

Nella Figura 5 si illustra la modellazione eseguita con il software PLAXIS per condurre l'analisi FEM, ovvero i dettagli di configurazione geometrica utilizzati per i casi analizzati.

Abbiamo indicato con δD la deformazione nel piano della sezione del rivestimento definitivo della galleria. Nello specifico, $\delta D = D_{max} - D_{min}$. In termini adimensionali si può scrivere:

$$\delta D_{adim} = \frac{\delta D}{D} \times \frac{S}{H}$$

Da cui si ricava lo spostamento:

$$\delta D = \frac{\delta D_{adim} \cdot D \cdot H}{S} \cdot \frac{1}{10^5}$$

Come si può osservare, il δD_{adim} è stato messo in relazione con lo spessore S del rivestimento definitivo e con H che è l'altezza dello scavo. Ciò perché, all'aumentare dello spessore del rivestimento diminuisce la deformazione, mentre aumenta all'aumentare dell'altezza di scavo.

Il valore $1/10^5$ è stato inserito in quanto i valori desumibili dai grafici corrispondenti riportati nell'allegato A risultano moltiplicati per 10^5 .

Lo spostamento nel piano del rivestimento della galleria

Lo spostamento nel piano del rivestimento è individuato dalla minima distanza intercorrente tra il centro della sezione della galleria in posto (prima dell'esecuzione dello scavo) ed il centro della sezione che ha subito lo spostamento a seguito dello scavo.

In termini adimensionali si può scrivere:

$$\delta C_{adim} = \frac{\delta C}{H}$$

Da cui si ricava:

$$\delta C = \delta C_{adim} \cdot H \cdot \frac{1}{1000}$$

Dove:

H = profondità dello scavo.

Infatti, nella pratica operativa, si osserva che maggiore è la profondità dello scavo maggiore sarà lo spostamento della sezione della galleria verso lo scavo stesso. In realtà, lo spostamento della sezione della galleria interessata verso lo scavo dipende anche dallo spessore del rivestimento stesso. Infatti, maggiore è lo spessore del rivestimento maggiore sarà la rigidità flessionale della galleria. Ovviamente per tener conto anche di ciò, occorrerebbe eseguire un'analisi tridimensionale di interazione scavo-canna della



galleria il tutto molto più complesso e dettagliato. Nel nostro caso specifico, abbiamo eseguito un'analisi bidimensionale, quindi, lo spessore del rivestimento non gioca alcun ruolo se consideriamo lo spostamento nel piano della sezione.

Sicuramente se avessimo tenuto conto dello spessore del rivestimento e condotto un'analisi tridimensionale agli elementi finiti saremmo giunti ad una determinazione più accurata degli spostamenti della galleria verso lo scavo; si consideri anche che maggiore è la rigidezza flessionale minori saranno gli spostamenti. C'è da dire che la nostra analisi bidimensionale e le semplificazioni fatte conducono a dei valori di spostamenti sovrastimati ma comunque validi per una stima di prima analisi condotta con il qui proposto metodo grafico.

Il valore 1/1.000 è stato inserito in quanto i valori desumibili dai grafici corrispondenti riportati nell'Allegato A risultano moltiplicati per 1.000.

La valutazione della sollecitazione di taglio massimo

Stimare il massimo sforzo di taglio indotto nella sezione del rivestimento a seguito dello scavo è altrettanto importante per la sicurezza strutturale del rivestimento stesso. Infatti, valori molto alti del taglio possono sottoporre la struttura ad elevato stress strutturale. Come già detto, questa stima di prima analisi non sostituisce il calcolo di progetto ai fini della determinazione delle armature del rivestimento definitivo. In termini adimensionali, lo sforzo di taglio massimo è dato dalla seguente equazione:

$$T_{max,adim} = \frac{T_{max}}{\gamma_{sat} \cdot D \cdot H \cdot S}$$

Da cui si ricava:

$$T_{max} = T_{max,adim} \cdot \gamma_{sat} \cdot D \cdot H \cdot S \cdot \frac{1}{100}$$

Dove:

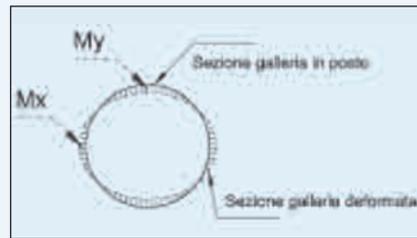
- γ_{sat} = peso specifico del terreno saturo;
- D = diametro netto della galleria in metri;
- S = spessore del rivestimento in metri;
- H = profondità dello scavo sempre espressa in metri.

La formula è stata scritta considerando le osservazioni sperimentali, ovvero che lo sforzo di taglio aumenta all'aumentare di H, S e del γ_{sat} . Al denominatore è stato posto anche il diametro D della galleria al solo scopo di rendere adimensionale la formula di calcolo.

Il valore 1/100 è stato inserito in quanto i valori desumibili dai grafici corrispondenti riportati nell'Allegato A risultano moltiplicati per 100.

La valutazione del momento flettente massimo

Altrettanto importante è avere una stima del momento flettente massimo agente sul rivestimento della galleria. Ovviamente, come per lo sforzo di taglio massimo, occorre eseguire sempre un calcolo e una progettazione di dettaglio al fine di dimensionare correttamente le armature del rivestimento definitivo. Nel caso in cui la galleria fosse già esistente e ci si accingesse ad eseguire uno scavo profondo nelle sue vicinanze, la stima delle sollecitazioni agenti



6. Momenti flettenti massimi agenti sul rivestimento della galleria

sul rivestimento consentirebbe di verificare se dette sollecitazioni potrebbero essere dannose per il rivestimento stesso. Occorre precisare che si hanno due diverse posizioni in cui il momento flettente è massimo. Infatti,

considerata una sezione circolare, si può avere un momento flettente massimo nella parte alta e bassa della sezione, ovvero lateralmente.

Se ipotizziamo la sezione deformata di forma ellittica con un D_{max} e un D_{min} , i momenti flettenti massimi si hanno proprio in corrispondenza dei due diametri della sezione deformata.

Se consideriamo il piano della sezione avremo un momento massimo agente nel piano verticale ed uno su quello orizzontale o, meglio, un momento massimo lungo l'asse delle ordinate ed uno lungo le ascisse. In termini adimensionali si ha:

$$Mx_{max,adim} = \frac{Mx_{max}}{\gamma_{sat} \cdot D^2 \cdot H \cdot S}$$

$$My_{max,adim} = \frac{My_{max}}{\gamma_{sat} \cdot D^2 \cdot H \cdot S}$$

Dalle quali si ricava:

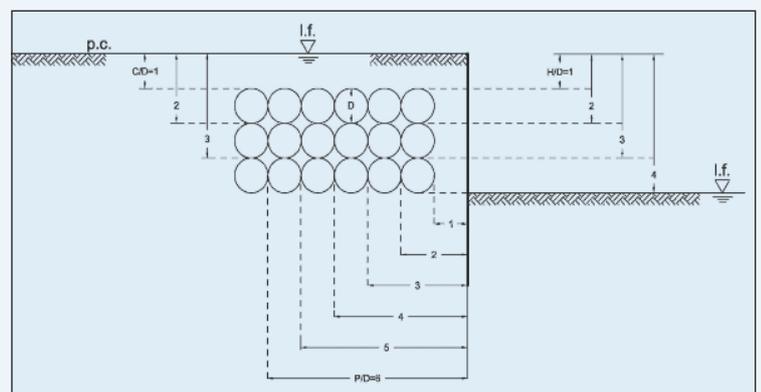
$$Mx_{max} = Mx_{max,adim} \cdot \gamma_{sat} \cdot D^2 \cdot H \cdot S \cdot \frac{1}{100}$$

$$My_{max} = My_{max,adim} \cdot \gamma_{sat} \cdot D^2 \cdot H \cdot S \cdot \frac{1}{100}$$

Il valore 1/100 è stato inserito in quanto i valori desumibili dai grafici corrispondenti riportati nell'Allegato A risultano moltiplicati per 100.

L'elaborazione dei grafici del metodo smartGDE

Nelle Figure 8 e 9 sono riportati i parametri del terreno ed i parametri degli elementi strutturali utilizzati come dati di input per l'elaborazione numerica FEM.



7. Le diverse configurazioni geometriche utilizzate per le simulazioni FEM



Parametri	Simbolo	Unità di misura	Valore
Peso specifico del terreno	γ	kN/m ³	18
Peso specifico del terreno saturo	γ_{sat}	kN/m ³	20
Permeabilità orizzontale	k_h	cm/giorno	0,01
Permeabilità verticale	k_v	cm/giorno	0,01
Resistenza a taglio non drenata	S_u	KPa	40
Incremento con la profondità della resistenza a taglio non drenata	Δs_u	KPa/m	4

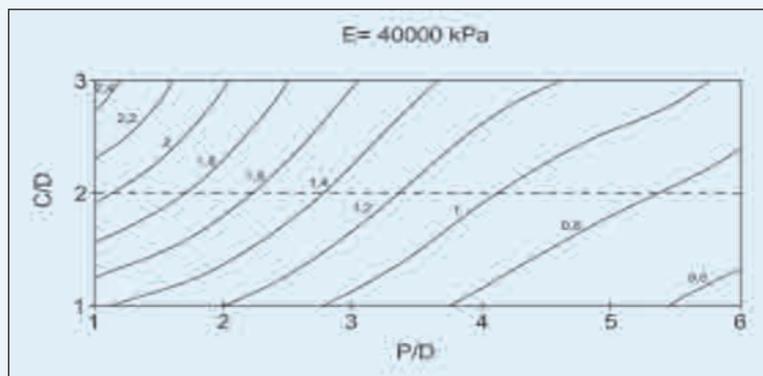
8. I parametri del terreno utilizzati per l'elaborazione FEM

Parametri	Simbolo	Unità di misura	Rivestimento galleria	Paratia di pall in c.a.	Puntoni paratia
Modellazione	-	-	Piastra elastica	Piastra elastica	Fissi/elastici
Rigidezza normale	EA	kN/m	Variabile	4,0x10 ⁷	6,75x10 ⁶
Rigidezza flessionale	EI	kNm ² /m	Variabile	2,4x10 ⁶	-
Spessore	d	m	Variabile	1	-
Peso	w	kN/m	Variabile	24	-
Modulo di Poisson	μ	-	0,15	0,15	-
Lunghezza puntoni	L_p	m	-	-	6
Interasse puntoni in verticale	l_p	m	-	-	3

9. I parametri degli elementi strutturali utilizzati per l'elaborazione FEM

Variable	Simbolo	Valori utilizzati per l'analisi FEM
Modulo di Young sulla superficie del terreno	E	20.000 kPa - 40.000 kPa - 60.000 kPa - 80.000 kPa
Spessore galleria	S	0,30 m - 0,35 m - 0,40 m
H/D	-	1, 2, 3, 4
C/D	-	1, 2, 3
P/D	-	1, 2, 3, 4, 5, 6

10. Il range dei valori delle variabili utilizzate per l'elaborazione FEM



11. Un esempio di grafico per la valutazione del momento $M_{y,max}$ agente sul rivestimento della galleria

In Figura 7 sono riportate le diverse configurazioni per le quali è stata eseguita l'analisi agli elementi finiti ovvero, le analisi condotte sia al variare della posizione della galleria che al variare della profondità di scavo. A ogni singola configurazione desumibile dalla figura 7, è stato applicato il modello di analisi FEM illustrato in figura 5, facendo variare di volta in volta il range dei valori riportati nella Figura 10.

Conclusioni

I grafici proposti per la determinazione dello spostamento (Allegato A), deformazione, sforzo di taglio e momenti flettenti massimi nelle direzioni x e y, in una sezione piana di una galleria in risposta all'esecuzione di uno scavo profondo ad essa adiacente, possono essere consultati o scaricati direttamente dal sito www.chiarellimassimo.it dal quale è possibile visionare anche maggiori dettagli di calcolo circa l'analisi FEM eseguita che per ovvi motivi editoriali non è stato possibile riportare in questa sede. Le variabili utilizzate per la redazione di detti grafici sono il modulo di Young E del terreno, lo spessore S del rivestimento della galleria, la copertura di terreno C al di sopra della galleria rispetto al piano campagna, la distanza orizzontale P tra la galleria e la

parete dello scavo ed infine, l'altezza H dello scavo. I grafici sono stati redatti in termini adimensionali. Essi vengono utilizzati per ottenere una stima delle deformazioni/sollecitazioni sul rivestimento di una galleria di sezione circolare. Il carattere adimensionale dei grafici, li rende particolarmente adatti e utilizzabili per la stima delle deformazioni/sollecitazioni in diversi casi di profondità di scavo, per vari diametri della sezione della galleria, per varie coperture di terreno e per diverse distanza tra galleria e fronte di scavo. ■

* *Ingegnere Progettista esperto in tecniche avanzate di scavo in sotterraneo*