

VALUTAZIONE DEGLI SPOSTAMENTI E DELLE DEFORMAZIONI SUL RIVESTIMENTO DEFINITIVO DI UNA GALLERIA IN RISPOSTA ALLA DEFORMAZIONE DEL TERRENO CIRCOSTANTE GENERATA DALL'ESECUZIONE DI UNO SCAVO PROFONDO:

IL METODO GRAFICO SEMPLIFICATO *smartGDE*

Massimo Chiarelli

Esperto in tecniche avanzate di scavo in sotterraneo

www.chiarellimassimo.it info@chiarellimassimo.it

Introduzione

L'esecuzione di scavi profondi adiacenti a strutture esistenti come gallerie, fondazioni a platea, fondazioni su pali, ecc., genera un'interazione tra terreno e strutture molto complesso e dipendente fortemente dai processi costruttivi posti in essere.

Il meccanismo di deformazione del terreno intorno allo scavo, così come intorno alle strutture esistenti, è molto complesso da modellare e, quindi, avere a disposizione stime delle deformazioni, preliminari all'esecuzione di un'analisi approfondita, è di valido supporto per tutte le fasi iniziali di progettazione e/o di verifica.

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*

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 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.

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.

Allo scopo sono stati identificati i parametri fondamentali rappresentativi e che caratterizzano la deformazione del rivestimento di una galleria e, quindi, i grafici sono stati formulati in termini di 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 come segue:

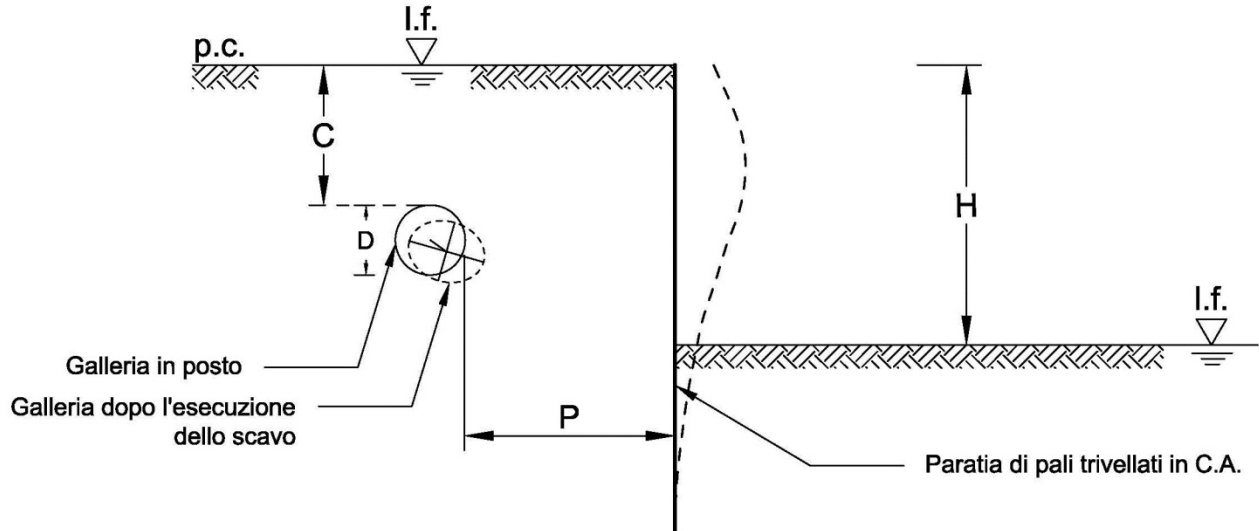


Figura 1 - Schematizzazione semplificata della situazione analizzata

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

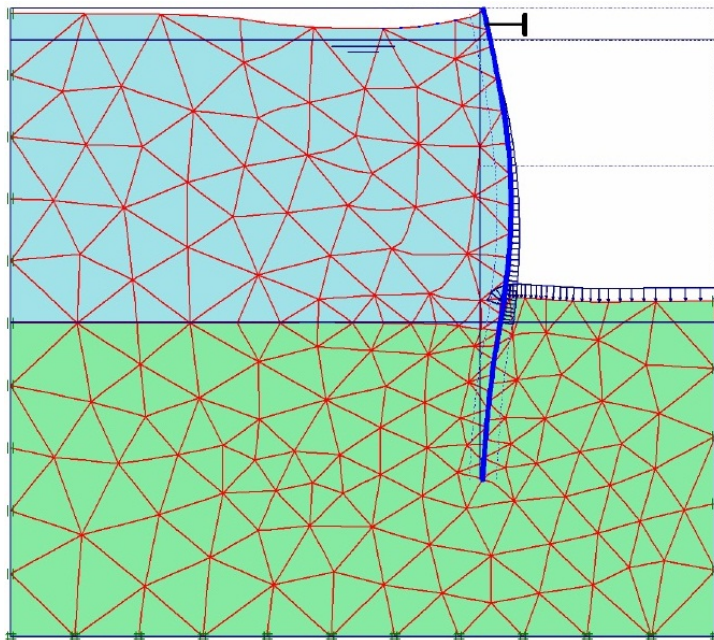


Figura 2 - Stato deformativo dopo l'esecuzione dello scavo in assenza di galleria

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 C al di sopra della galleria è tale da consentire la creazione del cosiddetto “*effetto arco*” e la conseguenziale ridistribuzione 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 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 effetto dello scavo, la situazione reale vede un tratto di galleria interessato da uno spostamento orizzontale più un'inflexione: ambedue verso lo scavo stesso.

Nelle sezioni d'inflexione 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 interventi 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 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 che si potrebbero presentare 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. Dall'esame dei risultati delle analisi FEM eseguite, si è visto che

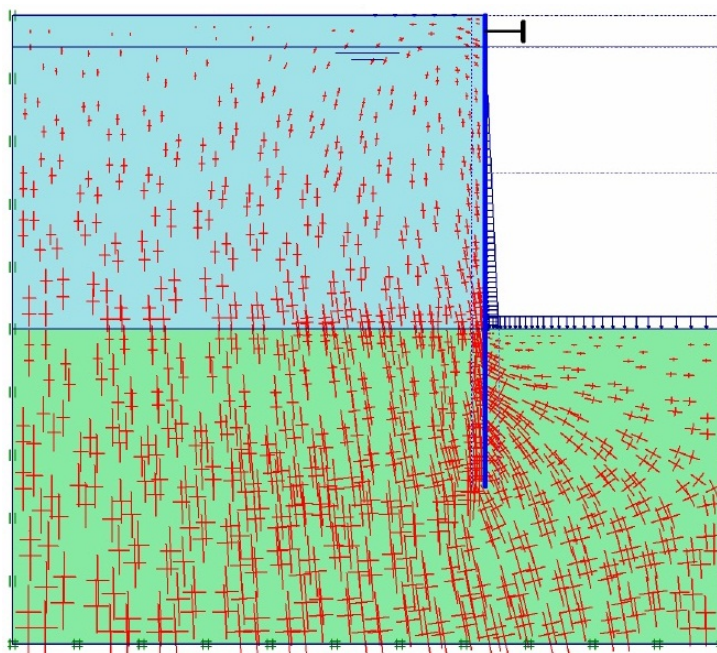


Figura 3 – Rappresentazione degli stati tensionali dopo l'esecuzione dello scavo

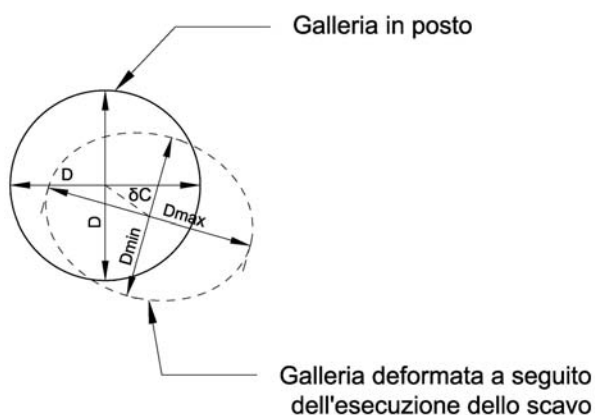


Figura 4 - Schematizzazione dello spostamento e della deformazione nel piano del rivestimento della galleria

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 nostre 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 maniera da renderli adimensionali.

È stata eseguita un'analisi analitica agli elementi finiti dei due casi 1 e 2 aventi una configurazione geometrica di partenza legata tra loro da un fattore di scala di tipo lineare avendo cura di ripetere l'analisi sia in presenza di una galleria a sezione circolare che in assenza utilizzando, appunto, le variabili sopra individuate.

Ovviamente, l'analisi è stata condotta facendo delle ipotesi semplificative circa la schematizzazione/caratteristiche del terreno ovvero, della galleria stessa.

Con l'elaborazione FEM si sono calcolati gli spostamenti orizzontali, momenti e sforzo di taglio rilevando che i valori differivano, a meno di ragionevoli approssimazioni, proprio di quel fattore di scala geometrico utilizzato per costruire i due casi studio.

Quanto fatto ed ottenuto ci ha confortato circa la bontà della configurazione geometrica scelta ovvero, dei parametri e le variabili individuate per la formulazione dell'analisi.

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.

Sono state ipotizzate anche le medesime caratteristiche del suolo e considerato 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. la quale è stata modellata con comportamento a piastra elastica. Analogamente per il rivestimento della galleria che è stato ipotizzato anch'esso con un comportamento a piastra elastica.

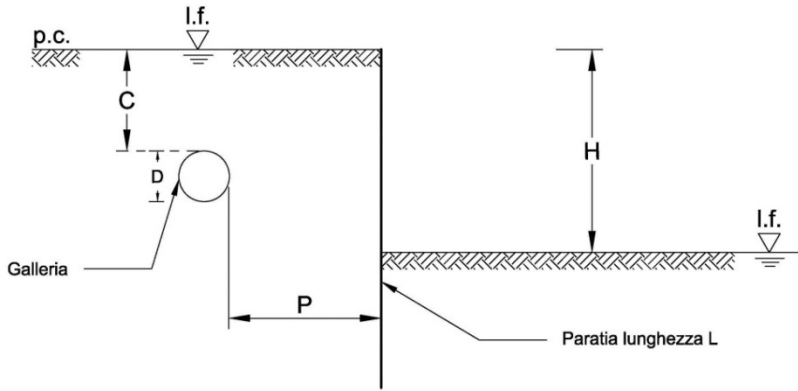


Figura 5 – Schematizzazione e individuazione dei parametri utilizzati nell'analisi FEM

profondità nel terreno. Per quanto concerne le strutture in C.A., lo spessore del rivestimento definitivo della galleria è stato fissato pari a 0,35 m mentre, lo spessore della paratia di pali, è stato considerato di 0,80 m.

Per entrambi i casi è stato considerato un peso specifico del terreno drenato e saturo rispettivamente di $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$ e $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ kN/m}^3$, modulo di Poisson $\mu = 0,3$ e un modulo di Young $E_1 = 10000 \text{ kPa}$ per il primo caso e, per il secondo caso, un modulo di Young moltiplicato per il fattore di scala $f_{\text{scala}} = 1,5$, quindi, $E_2 = 15000 \text{ kPa}$. Si è ipotizzato, inoltre, l'incremento del modulo di Young di 2500 kPa/m man mano che si scende in

Tabella 1: Variabili della configurazione geometrica relativa ai due casi studio analizzati

	D (m)	H (m)	P (m)	C (m)	L (Lunghezza paratia in metri)
Caso 1	6	6	6	6	12
Caso 2	9	9	9	9	18

Tabella 2: Parametri strutturali di input all'analisi FEM

Parametri	Simbolo	Unità di misura	Rivestimento galleria	Paratia di pali in C.A.
Modellazione	-	-	Piastra elastica	Piastra elastica
Rigidezza normale	EA	kN/m	$1,4 \times 10^7$	$2,4 \times 10^7$
Rigidezza flessionale	EI	kNm^2/m	$1,43 \times 10^5$	$2,4 \times 10^6$
Spessore	d	m	0.35	0.8
Peso	w	kN/m	8.4	19.2
Modulo di Poisson	μ	-	0.15	0.15

Con le ipotesi di cui sopra, abbiamo eseguito un'analisi agli elementi finiti con il software PLAXIS calcolando lo spostamento orizzontale massimo δD_{max} , il momento flettente M_{max} ed il taglio massimo T_{max} agenti sulla paratia sia in presenza della galleria che senza ottenendo valori proprio differenti del fattore di scala usato per variare la configurazione mentre, per il momento massimo e il taglio, sempre sulla paratia, si sono calcolati dei valori che presentano delle piccole differenze superando, seppur di poco, il fattore di scala.

Tabella 3: Risultati dell'analisi FEM con calcolo del fattore di scala

Parametri	Unità di misura	Con presenza della galleria			Senza presenza della galleria		
		Caso 1	Caso 2	Fattore di scala	Caso 1	Caso 2	Fattore di scala
Spostamento orizzontale paratia	mm	20.6	30.7	1.49	21.2	31.6	1.49
Momento flettente massimo paratia	kNm/m	56.5	101.7	1.80	61.8	105.06	1.7
Sforzo di taglio massimo paratia	kN/m	72.9	98.4	1.35	77.2	118.89	1.54

Questa analisi preliminare FEM dei due casi sopra descritti, ci dà conforto circa l'attendibilità e, quindi, l'applicabilità del metodo semplificato di modellazione formulato usando i parametri e le variabili scelte per le differenti configurazioni geometriche sebbene simili.

Avendo stabilito che è possibile usare parametri adimensionali e, quindi, condurre l'analisi FEM con il modello precedentemente descritto, elenchiamo di seguito le semplificazioni fatte per condurre tale analisi ovvero, per la costruzione dei grafici proprio in funzione di questi parametri.

- La superficie del terreno (p.c.) è stata ipotizzata piana e senza sovraccarichi agenti su di essa;
- Il livello di falda è stato ipotizzato coincidente con il piano campagna;
- È stato considerato un unico strato di terreno saturo di profondità infinita;
- Il criterio di rottura del terreno ipotizzato è stato quello di Mohr-Coulomb in condizioni non drenate;
- pressione dell'acqua di falda agente a tergo della paratia ma, considerando che lo scavo venisse eseguito senza la presenza di acqua (acqua drenata nell'area di scavo);
- Presenza di una galleria del diametro di 6 metri a ridosso dello scavo;
- Paratia di pali ipotizzata della lunghezza di 40 metri avente uno spessore di 1 metro;
- Il terreno a tergo della paratia ed intorno al rivestimento della galleria è stato considerato rigido e, quindi, senza possibilità che si verifichino fenomeni di slittamento con gli elementi strutturali;
- Resistenza a taglio del terreno in condizioni non drenate assunte pari a 40 kPa in superficie con un incremento lineare di 4kPa/m man mano che si scende in profondità nello strato di terreno stesso;
- Abbiamo ipotizzato una paratia non tirantata (vista la presenza della galleria quasi a ridosso), ma che durante l'esecuzione dello scavo, essa venga puntellata con la parete opposta mediante dei puntoni posti ad un interasse di 3 metri man mano che si approfondisce lo scavo (ovviamente consideriamo un'analisi in 2D).

Nella figura seguente 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.

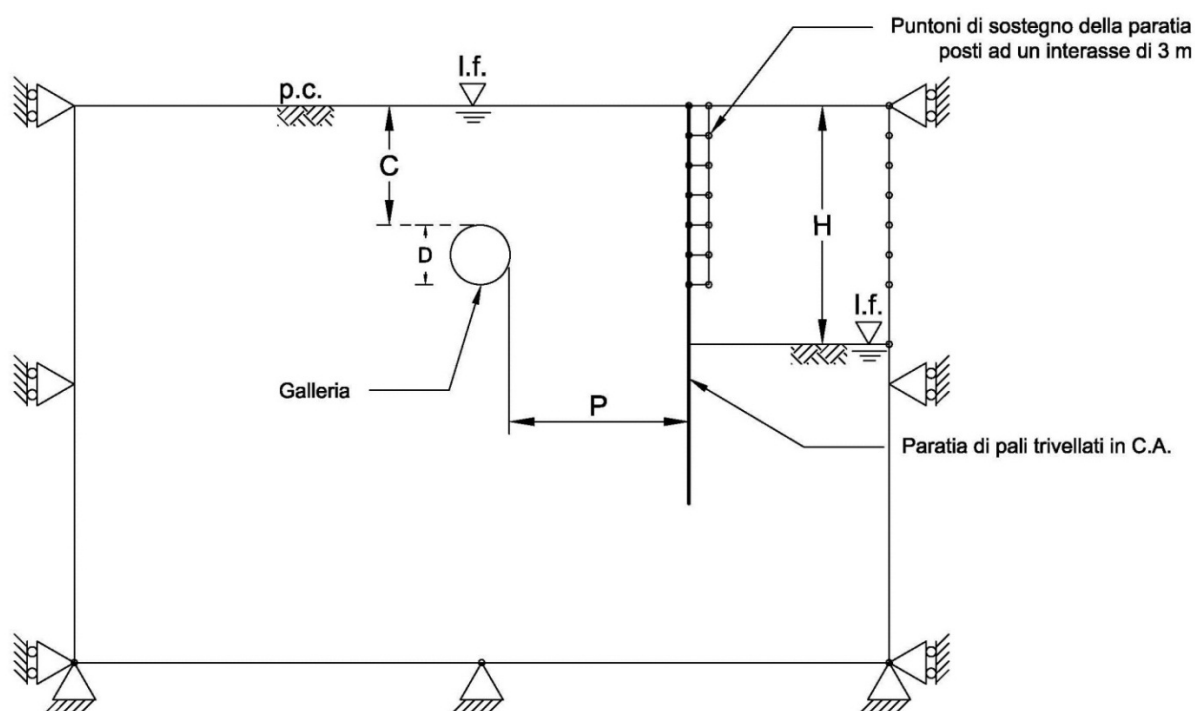


Figura 6 - Modello impiegato nell'analisi FEM

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 .

Spostamento nel piano del rivestimento della galleria

Lo spostamento nel piano del rivestimento è individuato dalla minima distanza δC 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 è la 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 rigidezza 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 e, 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, si sarebbe giunti ad una determinazione più accurata degli spostamenti della galleria verso lo scavo; considerato 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 $1/1000$ è stato inserito in quanto i valori desumibili dai grafici corrispondenti riportati nell'allegato A, risultano moltiplicati per 1000.

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:

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

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} è il peso specifico del terreno saturo, D il diametro netto della galleria in metri, S lo spessore del rivestimento in metri ed H la 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.

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 accinge ad eseguire uno scavo profondo nelle sue vicinanze, la stima delle sollecitazioni agenti sul rivestimento ci consente 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.

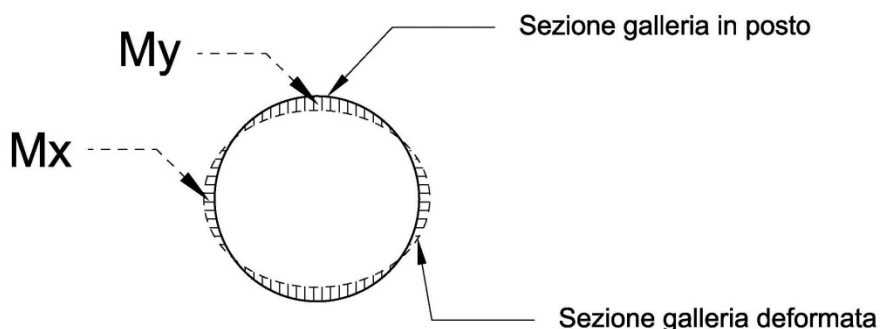


Figura 7 - Momenti flettenti massimi agenti sul rivestimento della galleria

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.

Elaborazione dei grafici del metodo *smartGDE*

Nella tabella 4 e tabella 5 sono riportati i parametri di terreno ed i parametri degli elementi strutturali utilizzati come dati di input per l'elaborazione numerica FEM.

In figura 8 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.

Tabella 4: Parametri del terreno utilizzati per l'elaborazione 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	∇S_u	kPa/m	4

Tabella 5: Parametri degli elementi strutturali utilizzati per l'elaborazione FEM

Parametri	Simbolo	Unità di misura	Rivestimento galleria	Paratia di pali in C.A.	Puntoni paratia
Modellazione	-	-	Piastra elastica	Piastra elastica	Fissi/elastici
Rigidità normale	EA	kN/m	variabile	4.0x10 ⁷	6.75x10 ⁶
Rigidità 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	I_p	m	-	-	3

A ogni singola configurazione desumibile dalla figura 8, è stato applicato il modello di analisi FEM illustrato in figura 6, facendo variare di volta in volta il range dei valori riportati nella tabella 6.

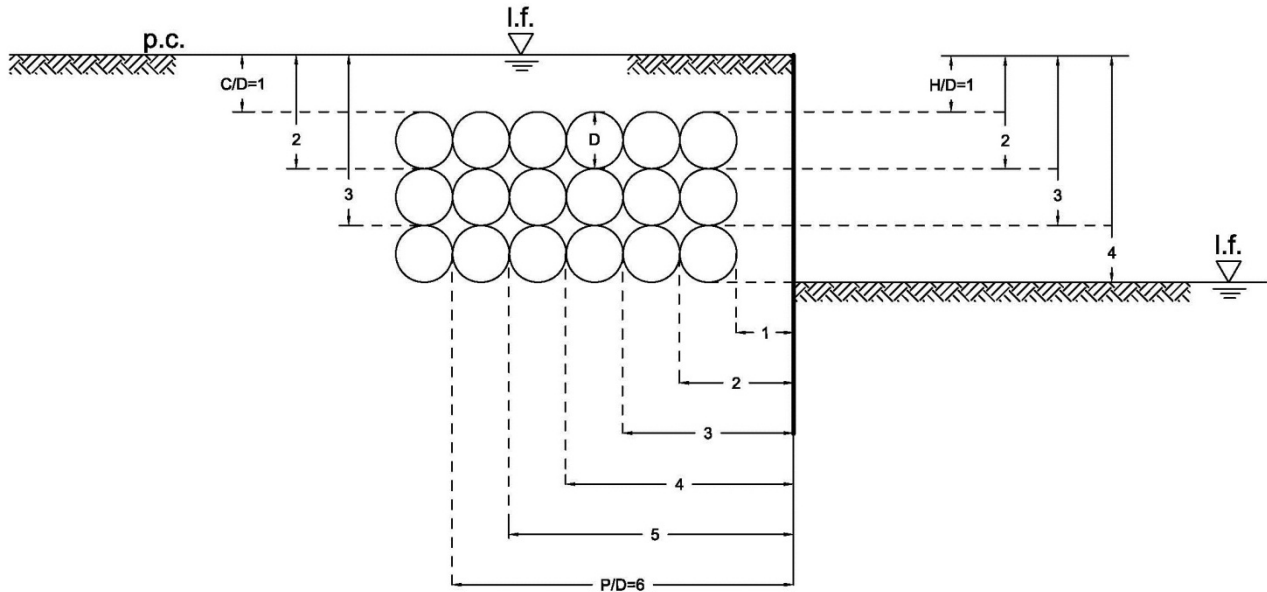


Figura 8 – Le diverse configurazioni geometriche utilizzate per le simulazioni FEM

Tabella 6: Range dei valori delle variabili utilizzate per l'elaborazione FEM

Variabile	Simbolo	Valori utilizzati per l'analisi FEM
Modulo di Young sulla superficie del terreno	E	20000 kPa – 40000 kPa – 60000 kPa - 80000 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

Conclusioni

I grafici proposti nell'allegato A per la determinazione dello spostamento, 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, sono stati ottenuti mediante un'analisi FEM in cui si sono fatte delle ipotesi semplificative delle condizioni del terreno ovvero, della geometria del problema.

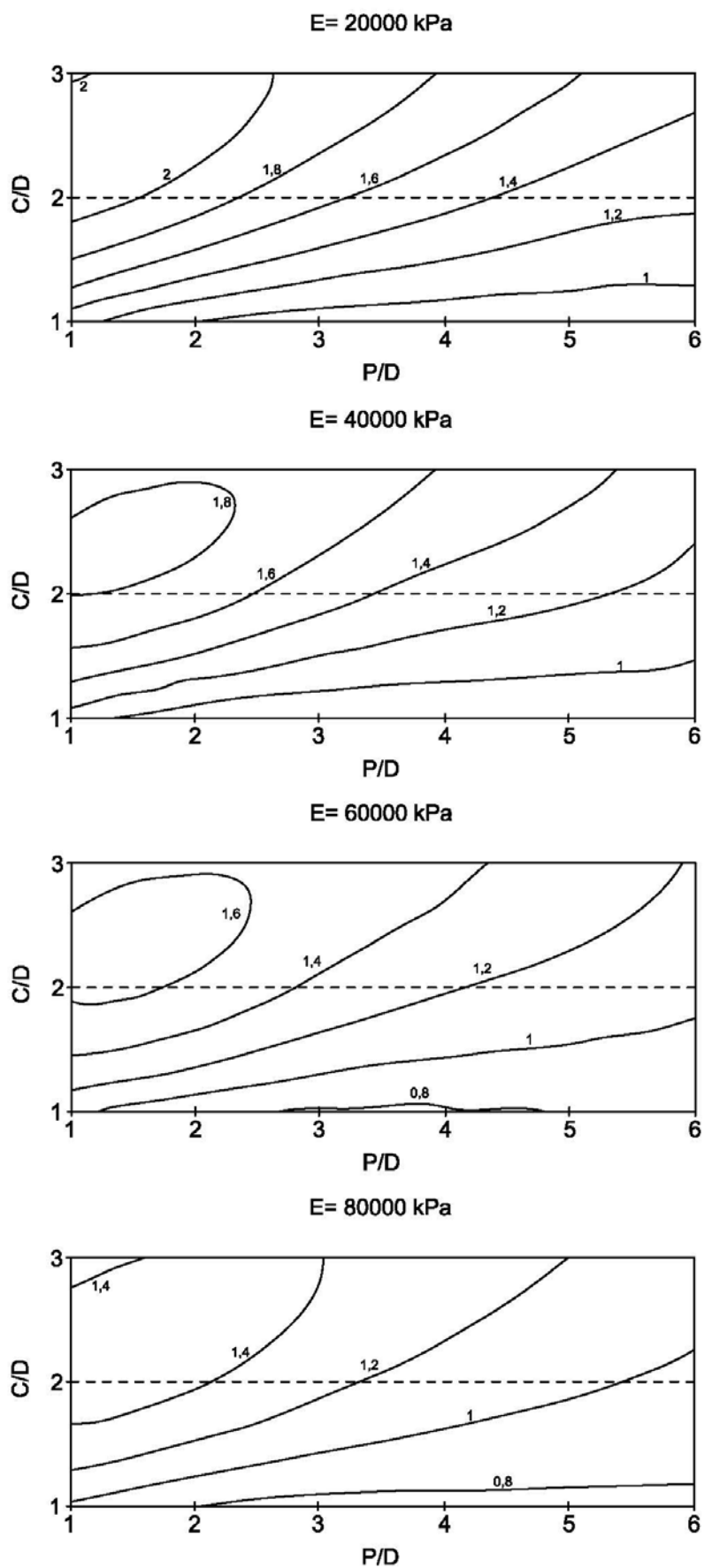
Le variabili utilizzate per la redazione di detti grafici sono il modulo di Young E del terreno, lo spessore S del rivestimento della galleria, la copertura di terreno C al di sopra della galleria rispetto al piano campagna, la distanza orizzontale P tra la galleria e la parete dello scavo ed infine, 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.

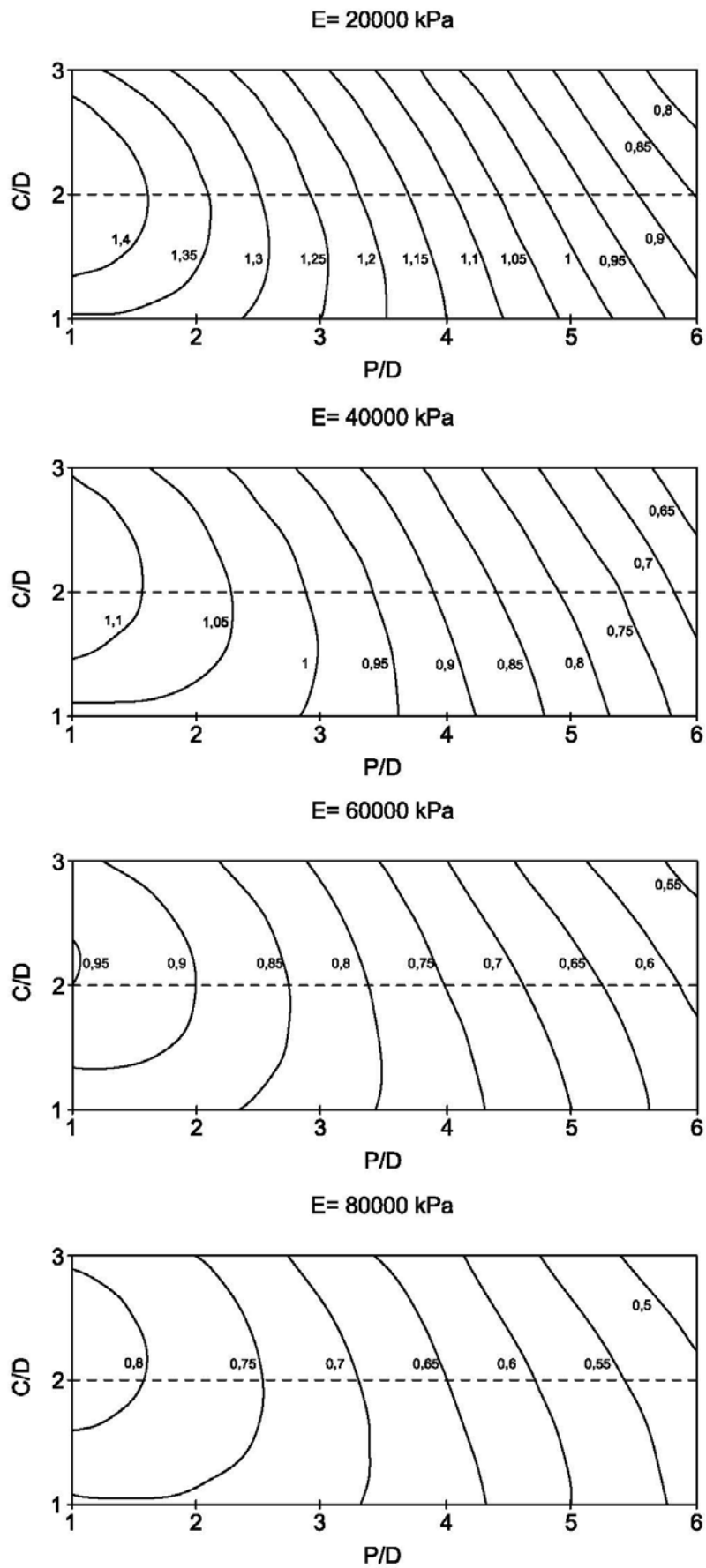
Il carattere adimensionale dei grafici, li rende particolarmente adatti e utilizzabili per la stima delle deformazioni/sollecitazioni in diversi casi di profondità di scavo, per vari diametri della sezione della galleria, per varie coperture di terreno e per diverse distanza tra galleria e fronte di scavo.

Bibliografia

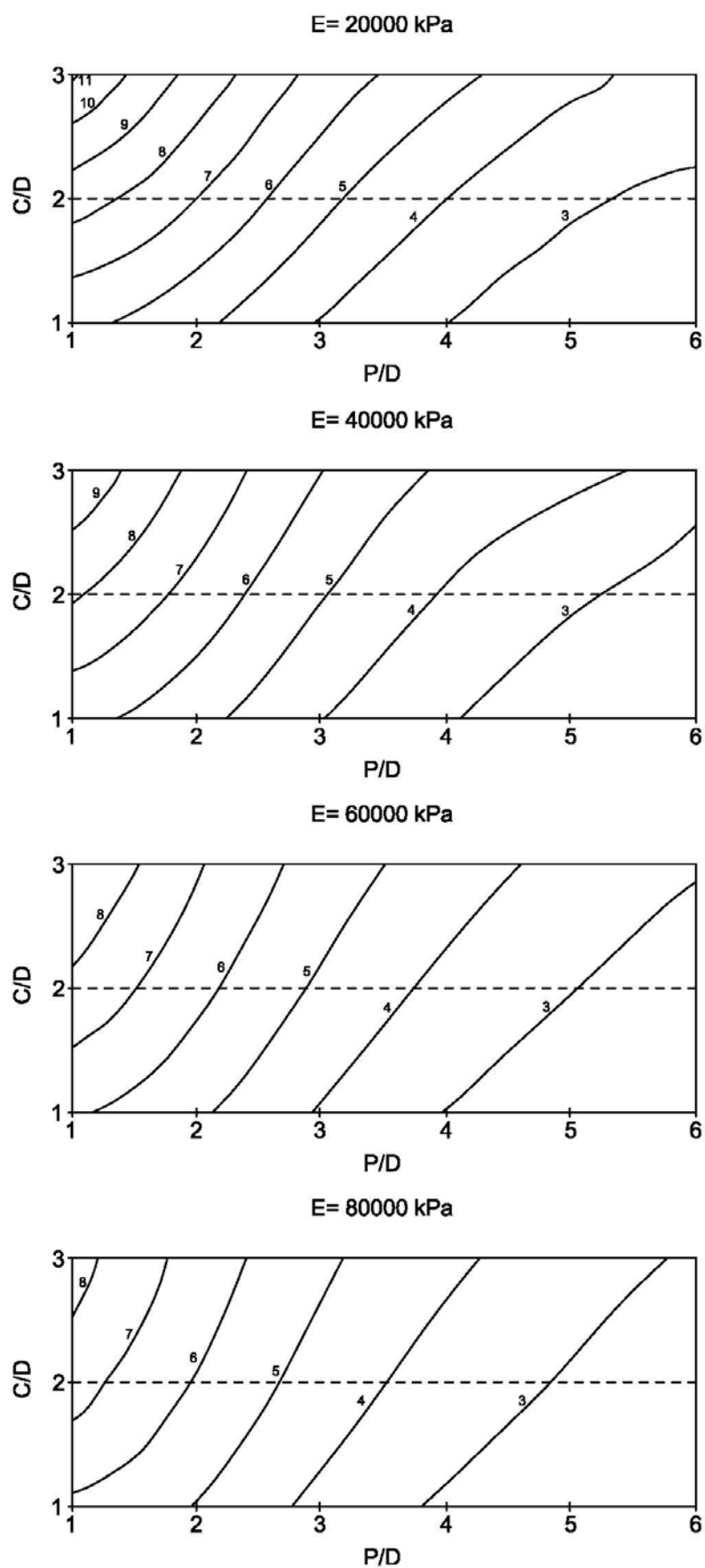
- [1]. M. Chiarelli – “Tecniche avanzate di scavo in sotterraneo mediante TBM, Microtunnelling e Horizontal Directional Drilling” - “INGENIO” n°17, Imready Srl, RSM.
- [2]. M. Chiarelli – “L’Arte del costruire gallerie” – Editrice | Uni Service, Trento, 2009.
- [3]. M. Chiarelli - “Lo scavo meccanizzato TBM nella realizzazione di Tunnel”, Atti del convegno - Fiera Internazionale del Libro - Lingotto Fiere, Torino, 2009.
- [4]. M. Chiarelli – “Le vibrazioni degli edifici indotte dalle ferrovie sotterranee” - “Strade & Autostrade” n°44, EDI-CEM Srl, Milano.
- [5]. M. Chiarelli – “La tecnologia TOC per tubazioni in polietilene” - “Strade & Autostrade” n°101, EDI-CEM Srl, Milano.
- [6]. M. Chiarelli – “Horizontal Directional Drilling: ingegneria dei fluidi di perforazione” - “Strade & Autostrade” n°104, EDI-CEM Srl, Milano.
- [7]. M. Chiarelli – “L’attraversamento di aree in frana con rilevati stradali e ferroviari super leggeri” - “Strade & Autostrade” n°78, EDI-CEM Srl, Milano.
- [8]. M. Chiarelli – “Le argille espanse nella costruzione di rilevati artificiali” - Atti del convegno “Manutenzione Ordinaria e Straordinaria della rete viaria” – Ente Provincia di Macerata (settore viabilità) ed ANAS, Macerata, Gennaio 2004.

ALLEGATO A - IL METODO GRAFICO SEMPLIFICATO *smartGDE*Grafici dei valori del δD_{adim} 

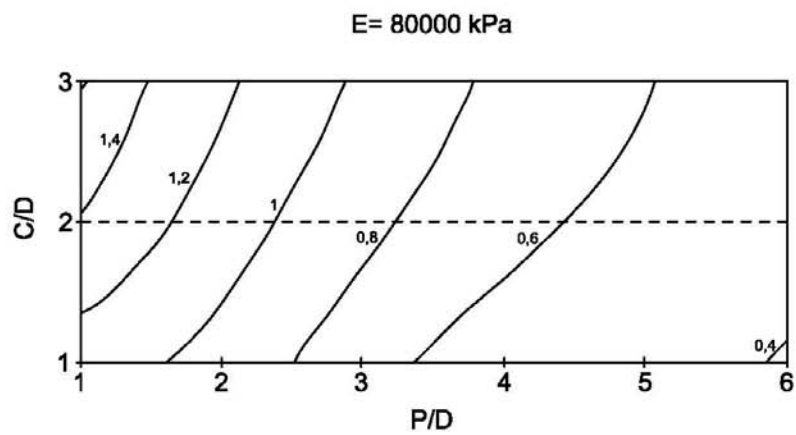
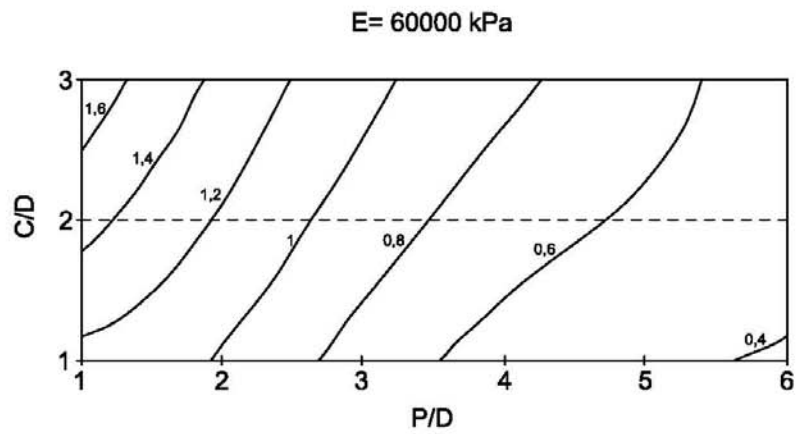
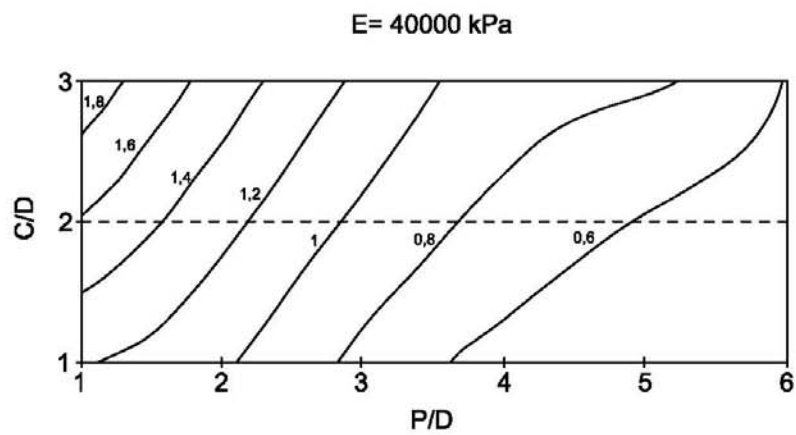
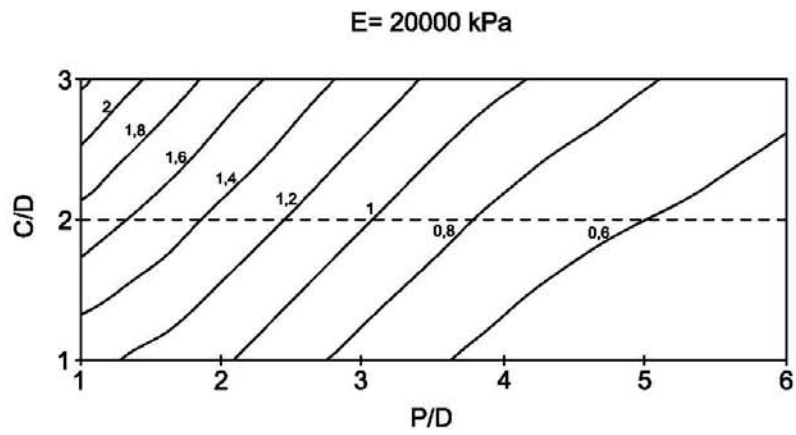
Grafici dei valori del δC_{adim}



Grafici dei valori del $T_{max,adim}$



Grafici dei valori del $Mx_{max,adim}$



Grafici dei valori del $My_{max,adim}$

