

COMMITTENTE



COMUNE DI PALERMO
AREA INFRASTRUTTURE E TERRITORIO

PROGETTISTA

ATI:



(Capogruppo Mandataria)



DOMINIQUE PERRAULT
ARCHITECTE

METROPOLITANA AUTOMATICA LEGGERA DELLA CITTA' DI
PALERMO
PRIMA LINEA
TRATTA FUNZIONALE ORETO/NOTARBARTOLO

PROGETTO PRELIMINARE

CONSOLIDAMENTO
RELAZIONE TECNICA DEI CEDIMENTI LUNGO LA LINEA

COMMESSA	FASE	COMPARTO	DOCUMENTO	REV	SCALA	NOME FILE
MPA1	PP	CSD	INRC04	2	-	CSD_INRC04_2.doc

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	AUTORIZZATO	PROGETTISTA
2	SETT. 2006	REVISIONE GENERALE	Silvestri	Pedrazzi	Cecchi/Di Nicola	Piscitelli	
1	AGOSTO 2006	AGGIORNAMENTO DATA DI CONSEGNA E REVISIONE GENERALE	Silvestri	Pedrazzi	Cecchi/Di Nicola	Piscitelli	
0	MAGGIO 2006	EMISSIONE ELABORATI OPERE CIVILI	Silvestri	Pedrazzi	Cecchi/Di Nicola	Piscitelli	



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea - Tratta funzionale Oreto/Notarbartolo.

Relazione tecnica dei cedimenti lungo la linea

1 GENERALITÀ

Uno dei principali obiettivi del progetto della Metropolitana Leggera Automatica di Palermo è la costruzione delle gallerie di linea con modalità tali da preservare le condizioni di stabilità degli edifici esistenti in superficie, in particolare nella zona del centro storico della città e in corrispondenza degli edifici di particolare interesse storico-monumentale.

Per raggiungere tale scopo è stata prevista l'adozione dei migliori metodi costruttivi disponibili (scavo meccanizzato con TBM con fronte in contropressione), in modo da ridurre al minimo i movimenti del terreno intorno alle gallerie che saranno scavate. La scelta progettuale di due gallerie a singolo binario opportunamente distanziate invece di un'unica galleria a due binari, comporta nel caso in esame il vantaggio di ridurre sensibilmente le deformazioni attese in superficie. Anche la scelta di un tracciato più profondo rispetto a quello previsto nello studio di fattibilità va nella direzione di limitare gli effetti indotti in superficie dallo scavo delle gallerie di linea.


Nella presente relazione sono riportati i risultati di uno studio preliminare sui movimenti del terreno e sulla valutazione degli effetti indotti dallo scavo delle gallerie di linea sugli edifici in superficie. La valutazione degli effetti dei cedimenti sugli edifici è stata impostata, nell'ambito del grado di approfondimento richiesto dal livello della progettazione, con metodi sperimentati e impiegati per i maggiori progetti recentemente sviluppati in campo internazionale. I metodi illustrati nel seguito sono da considerarsi come linee guida per lo sviluppo delle analisi di dettaglio che dovranno essere sviluppate nelle prossime fasi progettuali.

Lo scavo interamente meccanizzato delle gallerie di linea dà luogo a cedimenti modesti, generalmente inferiori a 10÷15 mm. Il metodo costruttivo proposto per lo scavo delle gallerie è stato infatti scelto al fine di limitare le deformazioni nelle strutture in superficie.

Per controllare la bontà dei metodi di scavo previsti dovrà essere effettuato un attento monitoraggio durante le fasi dello scavo delle gallerie, l'attività di monitoraggio dovrà comprendere:

- il monitoraggio diretto degli edifici vicini al tracciato e delle altre aree interessate dagli scavi,
- il monitoraggio dei parametri di scavo e di controllo all'interno della TBM (in particolare la pressione al fronte),
- la predisposizione di sezioni strumentate per il controllo dello stato tenso-deformativo nel sottosuolo.

Il monitoraggio fornirà quindi informazioni sulle "performances" delle tecniche di scavo da utilizzare per la taratura definitiva dei modelli di calcolo adottati.

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Relazione tecnica dei cedimenti lungo la linea

2 APPROCCIO METODOLOGICO

La presente relazione illustra i risultati di uno studio preliminare sull'entità delle deformazioni indotte sui fabbricati della città di Palermo dallo scavo delle gallerie di linea della Metropolitana Leggera Automatica.

L'approccio metodologico dello studio deve essere articolato in due fasi principali:

- nella prima fase vanno valutati i cedimenti verticali e gli spostamenti orizzontali in superficie, e determinate le curve di subsidenza; tali analisi consentono la valutazione dei principali parametri che regolano il fenomeno, dando importanti indicazioni di riferimento per i successivi approfondimenti progettuali;
- nella seconda fase, sulla base dei cedimenti e degli spostamenti orizzontali del piano campagna stimati nella fase precedente, vengono individuate alcune situazioni tipiche, per le quali vanno calcolate le deformazioni indotte negli edifici in superficie e conseguentemente si definiscono le situazioni più critiche.

Nell'ambito di questo progetto preliminare l'attenzione è stata concentrata principalmente sulla prima fase dello studio (v. cap. 3 e 4), analizzando in dettaglio una serie di situazioni tipiche e determinando i profili di subsidenza indotti in superficie nel caso dello scavo di una galleria singola e di due gallerie affiancate. Per quanto riguarda la seconda fase dello studio, nel cap. 5 sono riportati i criteri concettuali e teorici sulla base dei quali tale analisi dovrà essere sviluppata nelle successive fasi progettuali.

Va evidenziato che lo studio svolto è basato sui dati disponibili ad oggi, sia in termini di caratterizzazione geotecnica dei terreni che in termini di censimento delle opere interferenti. Le analisi preliminari eseguite e illustrate in questa relazione sono basate sulle informazioni ad oggi disponibili sui terreni in sito, ottenute in seguito al completamento della campagna d'indagini geognostiche. Per quanto riguarda il censimento dei fabbricati esistenti, in questa fase progettuale sono stati raccolti i dati relativi a tutti i fabbricati limitrofi al tracciato delle gallerie; le schede redatte saranno la base indispensabile per la seconda fase dello studio, al fine di analizzare le situazioni potenzialmente critiche.

Un'ulteriore fase di analisi, nella quale potranno essere presi in esame singolarmente alcuni edifici di particolare importanza o con elevata categoria di danno potenziale, potrà essere oggetto di studi di dettaglio nell'ambito delle successive fasi di progettazione. Le analisi di terza fase potranno tener conto dell'effetto benefico di riduzione dei cedimenti apportato dalle strutture di fondazione degli edifici nell'interazione con il terreno sottostante. Lo studio di tale interazione, di cui conservativamente non sono stati considerati gli effetti durante le analisi di prima e seconda fase, potrà essere affrontato seguendo un approccio di tipo numerico agli elementi finiti.



3 ANALISI DEGLI SPOSTAMENTI

3.1 OBIETTIVI

La prima fase del processo di analisi richiede il calcolo dei cedimenti di superficie dovuti allo scavo delle gallerie di linea.

I valori dei cedimenti attesi in superficie sono stati stimati per mezzo di metodi semiempirici in condizioni di campo libero (green field), in altre parole in assenza di strutture in superficie. In questa maniera sono stati trascurati gli effetti dovuti ai fenomeni d'interazione terreno-struttura, peraltro generalmente positivi in quanto la rigidità delle strutture in superficie tende a ridurre la curvatura dei profili di subsidenza, e quindi a ridurre le massime distorsioni angolari indotte alle fondazioni degli edifici.

3.2 METODO DI CALCOLO

In questo paragrafo sono illustrati i modelli matematici utilizzati per il calcolo degli spostamenti del terreno nel caso dello scavo delle gallerie con il metodo dello scavo meccanizzato.

L'esperienza ha mostrato che l'entità e la distribuzione degli spostamenti sono influenzate da numerosi fattori: i più influenti sono gli elementi geometrici quali la profondità e il diametro del tunnel; le caratteristiche geotecniche dei terreni attraversati, lo stato tensionale iniziale, il regime delle acque sotterranee; le metodologie di scavo impiegate, la successione delle lavorazioni, i rivestimenti impiegati, ecc.. La previsione dei cedimenti a mezzo di modellazioni numeriche (ad es. il metodo agli elementi finiti), seppur utilizzando modelli matematici anche avanzati, risulta ancora oggi molto problematica. Si preferisce quindi ricorrere a metodi semiempirici, sviluppati elaborando una notevole quantità di dati osservati su opere in vera grandezza realizzate negli ultimi decenni.

Il calcolo degli spostamenti indotti dallo scavo delle gallerie è stato condotto in questo caso seguendo il metodo proposto da J.B. Burland et Al. (v. rif. bib. [2]); metodo ampiamente sperimentato ed impiegato per diversi progetti di livello internazionale analoghi a quello in esame.

3.2.1 Calcolo degli spostamenti verticali

Facendo riferimento alle notazioni di figura 3.1, gli spostamenti verticali S_v dei punti del piano campagna disposti lungo una generica sezione trasversale ortogonale all'asse della galleria, vengono calcolati attraverso la seguente espressione di derivazione empirica:

$$S_v = S_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot i^2}\right)$$

dove:

- S_{\max} è il cedimento massimo in corrispondenza dell'asse verticale della galleria;
- y è la distanza orizzontale dall'asse galleria del generico punto del piano campagna;
- i è la distanza orizzontale dall'asse galleria del punto di flesso della curva dei cedimenti.

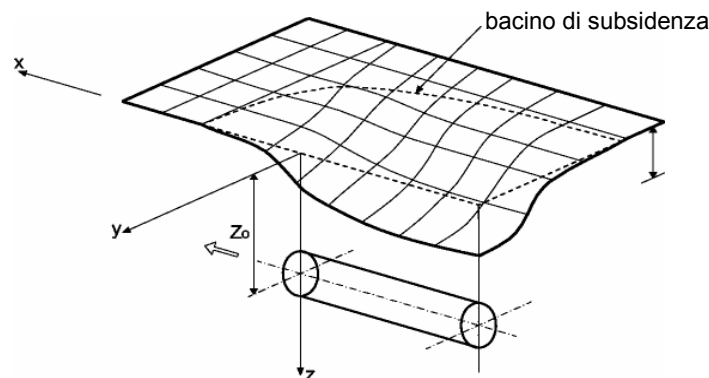


Figura 3.1: Cedimenti del piano campagna e bacino di subsidenza

La struttura analitica dell'espressione sopra riportata è quella di una curva di distribuzione di Gauss ed il suo andamento tipico (normalizzato rispetto ai suoi due parametri S_{max} e i) è rappresentato nella figura 3.2.

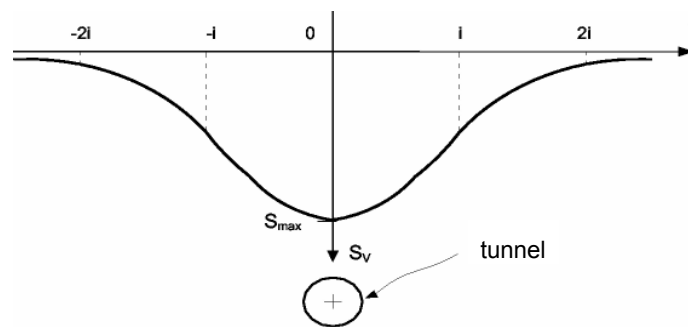


Figura 3.2: Curva dei cedimenti normalizzata

Per il parametro i si assume che esso vari linearmente con la profondità Z_0 dell'asse della galleria, per cui:

$$i = K \cdot Z_0$$

Tale espressione, suggerita da O'Reilly e New per valori di $H/D > 1$ (v. rif. bib. [3]), è stata confermata sperimentalmente da Rankin (v. rif. bib. [4]) durante l'esecuzione di gallerie sia nel Regno Unito che in altri paesi del mondo.

Il valore da attribuire alla costante K dipende dalle caratteristiche dei terreni interessati dalle operazioni di scavo. Orientativamente possono assumersi valori variabili da 0.20 e 0.40 nelle sabbie, valori compresi tra 0.40 e 0.60 in terreni argillosi consistenti, fino a valori compresi tra 0.60 e 0.75 in terreni argillosi teneri.

Dal valore di K , come è facile verificare, dipende l'ampiezza del bacino di subsidenza, che risulterà tanto più esteso quanto maggiore sarà il valore attribuito al parametro K .

Il valore del cedimento massimo in asse alla galleria S_{max} può essere espresso in funzione del diametro della galleria (o del diametro equivalente), dell'ascissa del punto d'inflessione della curva dei cedimenti i e della perdita di volume V_p :



$$S_{\max} = \frac{\pi}{4\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{V_p D^2}{K \cdot Z_0}$$

La perdita di volume viene a sua volta definita come il rapporto tra il volume del bacino di subsidenza misurato in superficie ed il volume teorico di scavo della galleria, misurati su una distanza unitaria.

I valori della perdita di volume sono generalmente scelti sulla base dell'esperienza per ogni tipo di metodo di scavo e per ogni condizione di terreno. Nei casi in cui sono state usate macchine di scavo con fronte a contropressione di terreno, perdite di volume dell'ordine dello 0.5÷1.0 % sono stati dei valori tipici.

Tutti i valori adottati presumono infine che le condizioni del terreno sovrastante la galleria siano pressoché uniformi, e quindi che non esistano cavità non bonificate. Si assume, infatti, che le cavità lungo le gallerie siano state individuate e preventivamente bonificate al fine di evitare ulteriori cedimenti.

3.2.2 Calcolo degli spostamenti orizzontali

La determinazione della deformazione di trazione negli edifici comporta la conoscenza dei movimenti orizzontali S_H del piano campagna, per cui vengono forniti qui di seguito alcuni strumenti necessari al loro calcolo.

Ipotizzando che il vettore spostamento di un generico punto della superficie del terreno posto all'ascissa y abbia direzione definita dalla congiungente il punto stesso col centro della galleria, semplici considerazioni geometriche consentono di scrivere:

$$S_H = \frac{y}{Z_0} \cdot S_V$$

dalla quale per derivazione è possibile ottenere la conseguente deformazione del terreno.

In figura 3.3 è rappresentato il tipico andamento di S_H posto a confronto con le curve che definiscono gli spostamenti verticali S_V e le deformazioni del terreno ε_{gH} . La figura evidenzia inoltre la fascia di terreno compresa tra i due punti di flesso della curva dei cedimenti entro cui le deformazioni risultano essere di compressione (ε_{gH} negativi). L'individuazione di tali punti sarà pertanto di cruciale importanza nel momento in cui dovranno essere determinate le deformazioni risultanti negli edifici, poiché al di fuori di tale regione queste deformazioni si sommeranno a quelle sempre di trazione che scaturiscono dai cedimenti, con un conseguente aggravio nel regime tenso-deformativo della struttura.

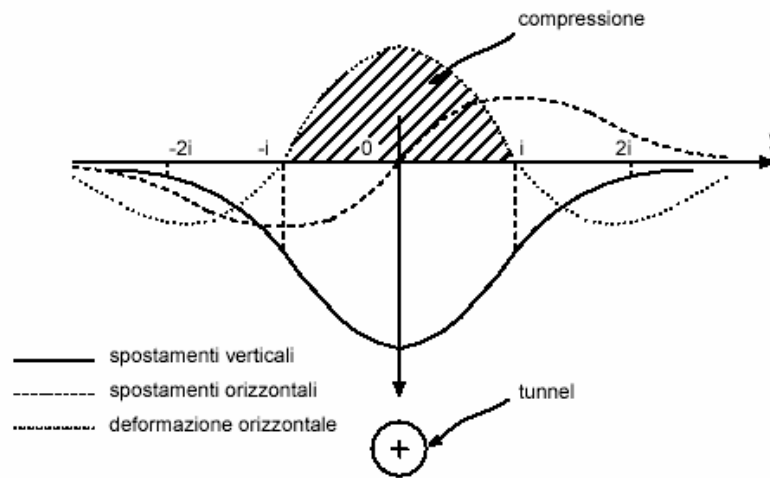


Figura 3.3: Andamento degli spostamenti e delle deformazioni orizzontali.


Nella figura 3.3 è evidente come la curva dei cedimenti possa essere suddivisa in tre zone distinte :

Due zone con concavità verso il basso (*hogging zone*) comprese negli intervalli:

$$y \leq -i \quad \text{e} \quad y \geq +i;$$

Una zona con concavità verso l'alto (*sagging zone*) compresa nell'intervallo:

$$-i \leq y \leq i.$$

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.
	Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Relazione tecnica dei cedimenti lungo la linea

3.3 CASI ANALIZZATI E PARAMETRI DI INPUT

Per ciascuna delle tratte comprese tra due stazioni successive, sono state prese in considerazione n. 2 sezioni tipiche rappresentative, i cui principali dati geometrici e parametri di calcolo sono sintetizzati nella seguente tabella 3.1.

Tratta	Progr.	Z ₀ [m]	d [m]	V _p [%]	K [-]
<i>Svincolo Oreto</i>	0+220	15.0	14.0	0.65	0.40
<i>Oreto Sud</i>	0+450	18.0	14.0	0.50	0.40
<i>Oreto Sud</i>	0+800	25.0	25.0	0.50	0.40
<i>Oreto Nord</i>	1+350	20.0	25.0	0.75	0.60
<i>Oreto Nord</i>	1+700	20.0	30.0	0.50	0.40
<i>Giulio Cesare</i>	1+900	25.0	23.0	0.50	0.40
<i>Giulio Cesare</i>	2+450	17.0	15.0	0.50	0.40
<i>Borsa</i>	2+800	17.0	20.0	0.75	0.60
<i>Borsa</i>	3+100	15.0	14.0	0.75	0.60
<i>Massimo</i>	3+600	17.0	19.0	0.50	0.40
<i>Massimo</i>	3+900	18.0	17.0	0.50	0.40
<i>Politeama</i>	4+300	18.0	20.0	0.50	0.60
<i>Politeama</i>	4+400	18.0	20.0	0.50	0.60
<i>Archimede</i>	4+800	16.0	-	0.50	0.40
<i>Archimede</i>	5+350	18.0	14.0	0.50	0.40
<i>Notarbartolo</i>	5+800	17.0	19.0	0.50	0.40

Tabella 3.1: Casi analizzati: parametri geometrici e di calcolo

dove:

Progr. progressiva della sezione,

Z₀ profondità delle gallerie dal p.c. (in asse tunnel),


d interasse tra le due canne (in asse tunnel),

K parametro adimensionale dipendente dalla natura dei terreni attraversati,

V_p volume perso (rapporto tra l'area della curva dei cedimenti e l'area di scavo).

Si è assunto generalmente un valore del parametro K pari a 0.40, in considerazione della granulometria delle calcareniti e del loro livello di cementazione. Valori più elevati (K=0.60) sono stati considerati in corrispondenza delle alluvioni del fiume Oreto, dei paleoalvei del Kemonia e Papireto (Stazione Borsa) e per il Flysch Numidico affiorante in corrispondenza della Stazione Politeama.

In questa fase di progetto, i cedimenti dovuti allo scavo delle gallerie di linea sono stati valutati con un valore di calcolo della perdita di volume generalmente pari a 0.5%, che rappresenta la condizione attesa per il normale e corretto funzionamento delle procedure di scavo e di controllo della pressione sul fronte della TBM. A titolo cautelativo è stato preso in

 CITTÀ DI PALERMO	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Relazione tecnica dei cedimenti lungo la linea

considerazione anche un valore di $V_p=0.75\%$ in corrispondenza dell'attraversamento del fiume Oreto e in prossimità della Stazione Borsa, in quanto si tratta di due situazioni geotecniche particolarmente difficili. Anche nel primo tratto dello scavo in corrispondenza della stazione Svincolo Oreto si è considerato un valore di V_p più elevato ($V_p=0.65\%$), ipotizzando una maggiore perdita di volume nelle prime fasi di scavo, quando il sistema di controllo delle pressioni al fronte dovrà essere tarato per lavorare poi nelle migliori condizioni possibili.

La seconda delle sezioni nella tratta Politeama-Archimede si riferisce ad una situazione in prossimità del manufatto di scambio in cui le due gallerie di linea risultano sovrapposte l'una all'altra.



4 RISULTATI DELLE ANALISI

4.1 SUBSIDENZE INDOTTE DALLO SCAVO DI UNA SINGOLA GALLERIA

Con riferimento alle situazioni tipiche identificate in ciascuna tratta della linea ed evidenziate nella tabella 3.1 del capitolo precedente, sono stati definiti innanzi tutto i profili di subsidenza relativi allo scavo di una singola canna della metropolitana, con diametro di scavo $D=6.00$ m.

I principali risultati delle analisi (in termini di S_{max} e i) sono riassunti nella tabella 4.1, mentre nelle figure da 4.1 a 4.8 sono riportati i due profili di subsidenza relativi alle sezioni identificate per ciascuna tratta.

Tratta	Progr.	Z_0 [m]	V_p [%]	K [-]	S_{max} [mm]	i [m]
<i>Svincolo Oreto</i>	0+220	15.0	0.65	0.40	12.22	6.00
<i>Oreto Sud</i>	0+450	18.0	0.50	0.40	7.83	7.20
<i>Oreto Sud</i>	0+800	25.0	0.50	0.40	5.64	10.00
<i>Oreto Nord</i>	1+350	20.0	0.75	0.60	7.05	12.00
<i>Oreto Nord</i>	1+700	20.0	0.50	0.40	7.05	8.00
<i>Giulio Cesare</i>	1+900	25.0	0.50	0.40	5.64	10.00
<i>Giulio Cesare</i>	2+450	17.0	0.50	0.40	8.29	6.80
<i>Borsa</i>	2+800	17.0	0.75	0.60	8.29	10.20
<i>Borsa</i>	3+100	15.0	0.75	0.60	9.40	9.00
<i>Massimo</i>	3+600	17.0	0.50	0.40	8.29	6.80
<i>Massimo</i>	3+900	18.0	0.50	0.40	7.83	7.20
<i>Politeama</i>	4+300	18.0	0.50	0.60	5.22	10.80
<i>Politeama</i>	4+400	18.0	0.50	0.60	5.22	10.80
<i>Archimede</i>	4+800	16.0	0.50	0.40	8.81	6.40
<i>Archimede</i>	5+350	18.0	0.50	0.40	7.83	7.20
<i>Notarbartolo</i>	5+800	17.0	0.50	0.40	8.29	6.80

Tabella 4.1: Principali risultati di calcolo (una galleria)

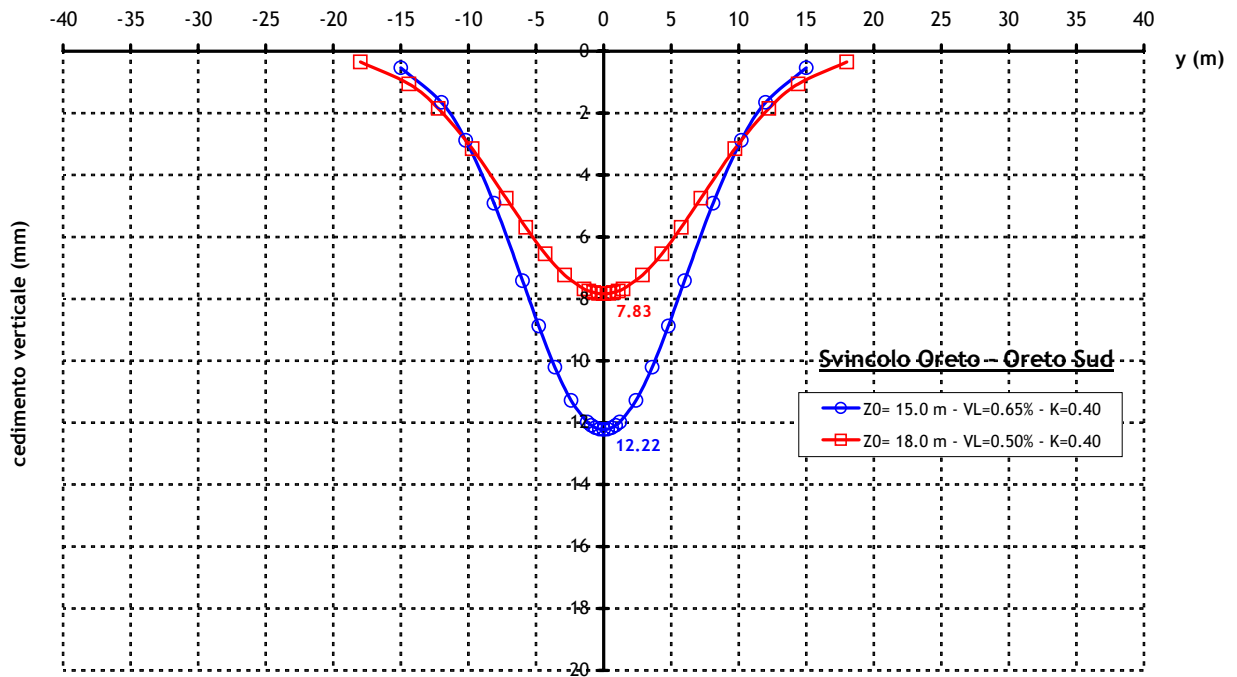


Figura 4.1: Profili di subsidenza (Tratta Svincolo Oreto - Oreto Sud)

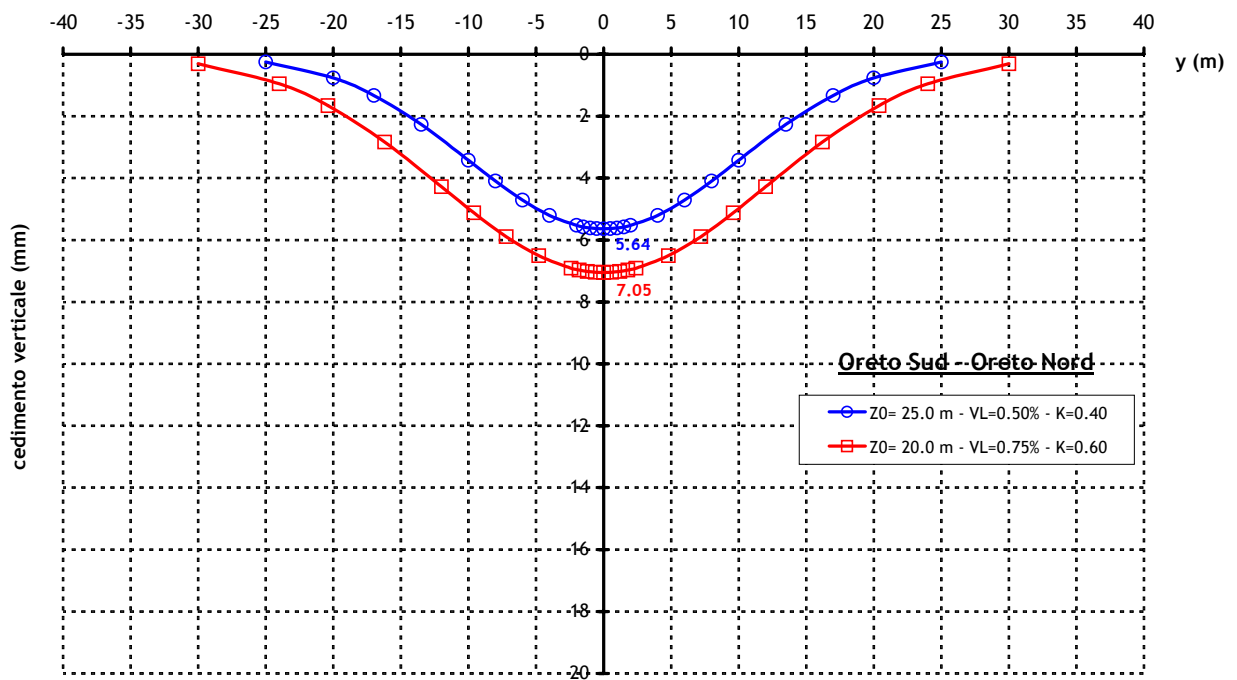


Figura 4.2: Profili di subsidenza (Tratta Oreto Sud - Oreto Nord)

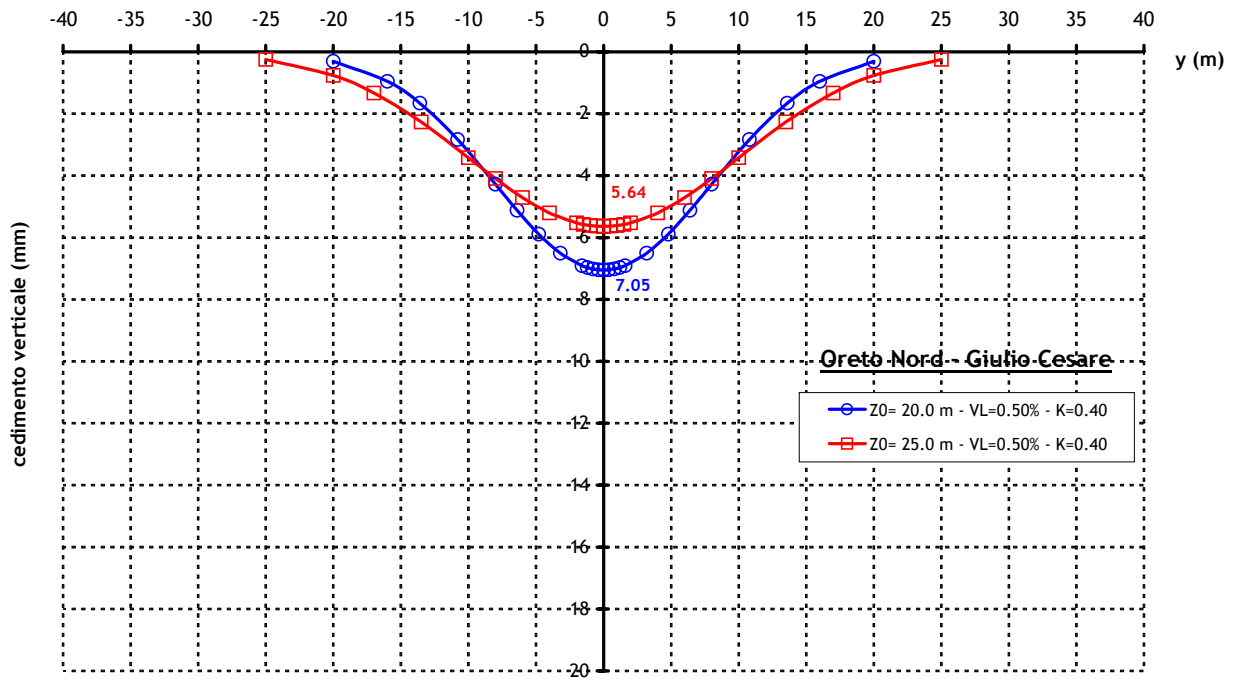


Figura 4.3: Profili di subsidenza (Tratta Oreto Nord – Giulio Cesare)

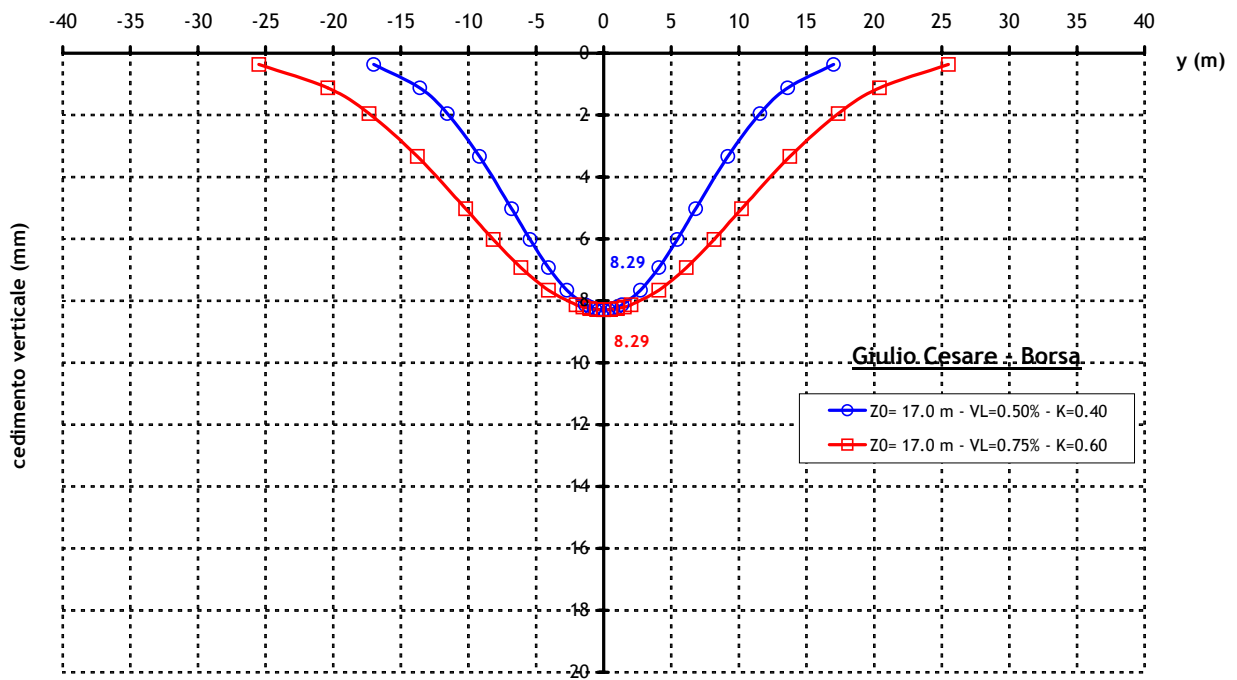


Figura 4.4: Profili di subsidenza (Tratta Giulio Cesare – Borsa)

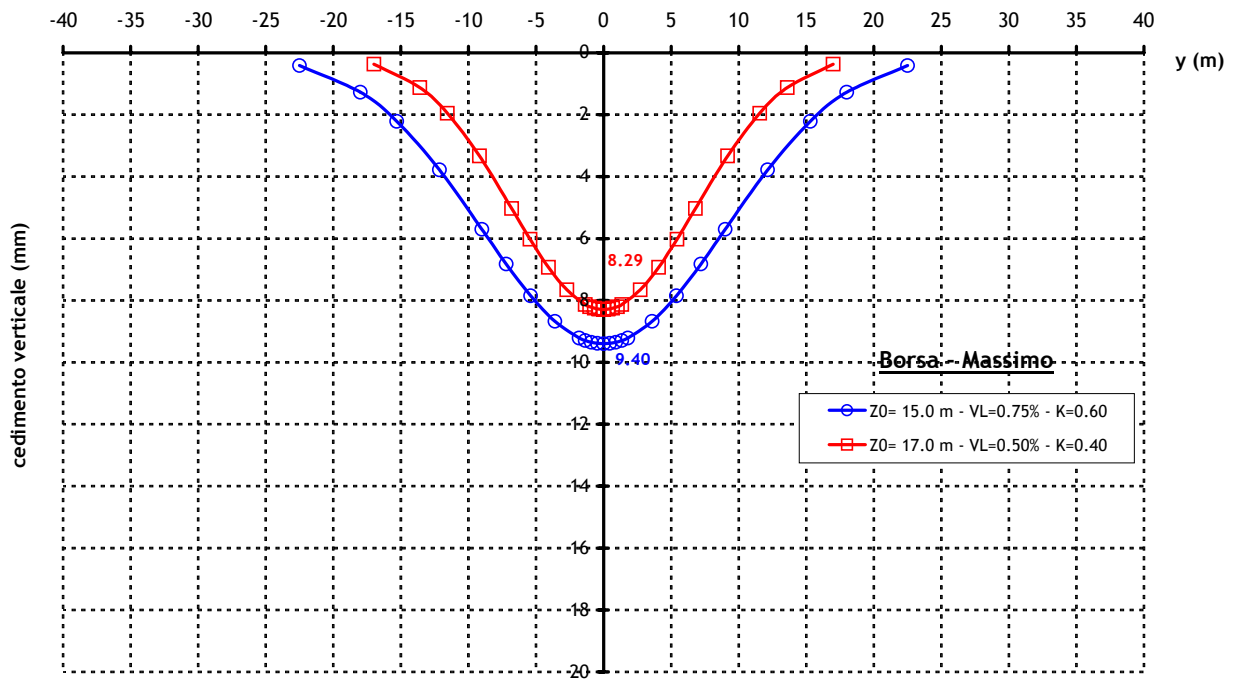


Figura 4.5: Profili di subsidenza (Tratta Borsa – Massimo)

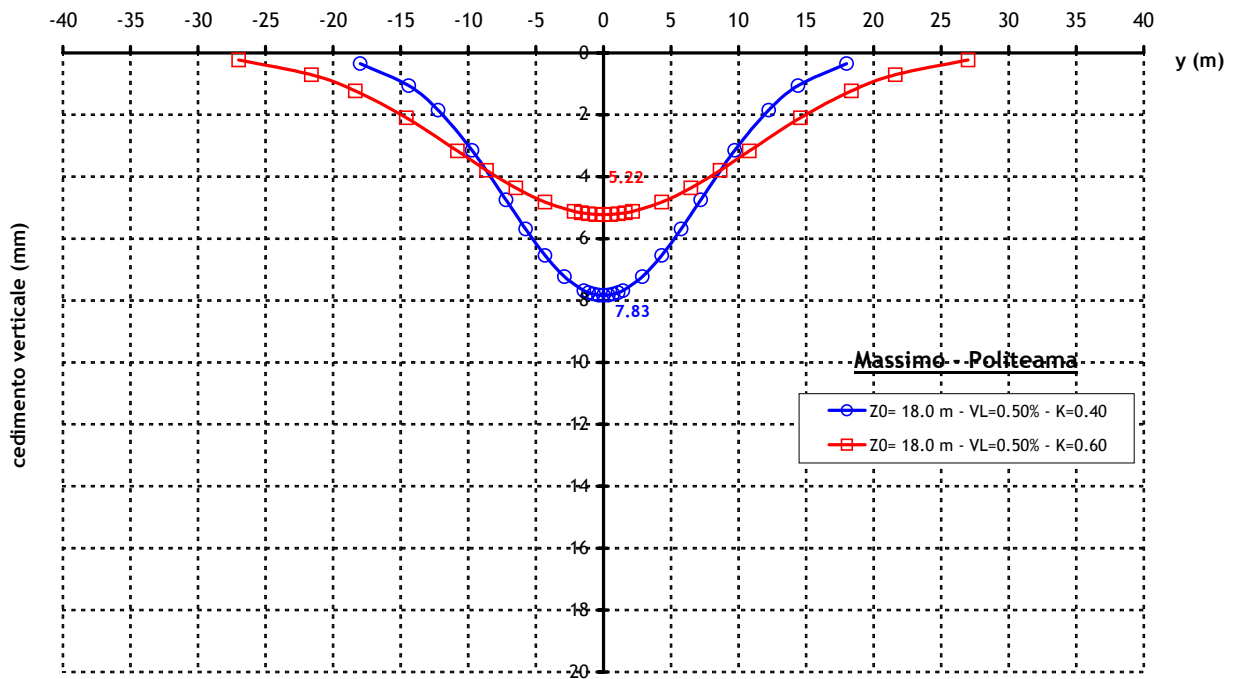


Figura 4.6: Profili di subsidenza (Tratta Massimo – Politeama)

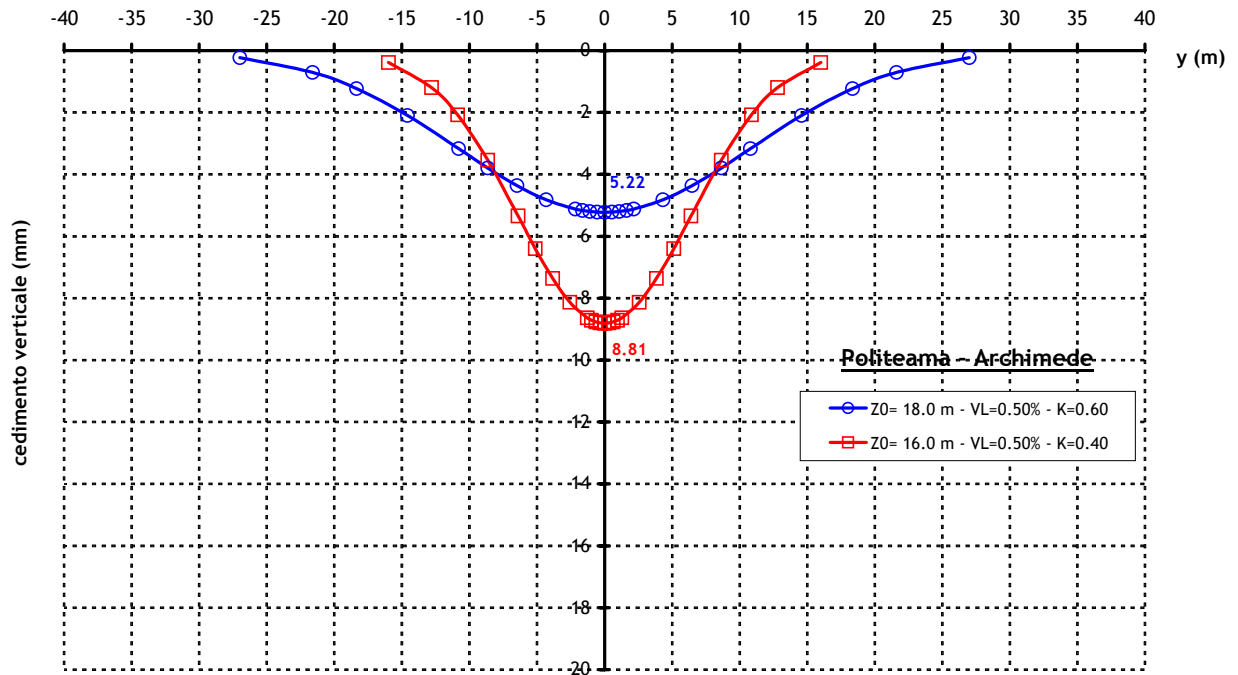


Figura 4.7: Profili di subsidenza (Tratta Politeama – Archimede)

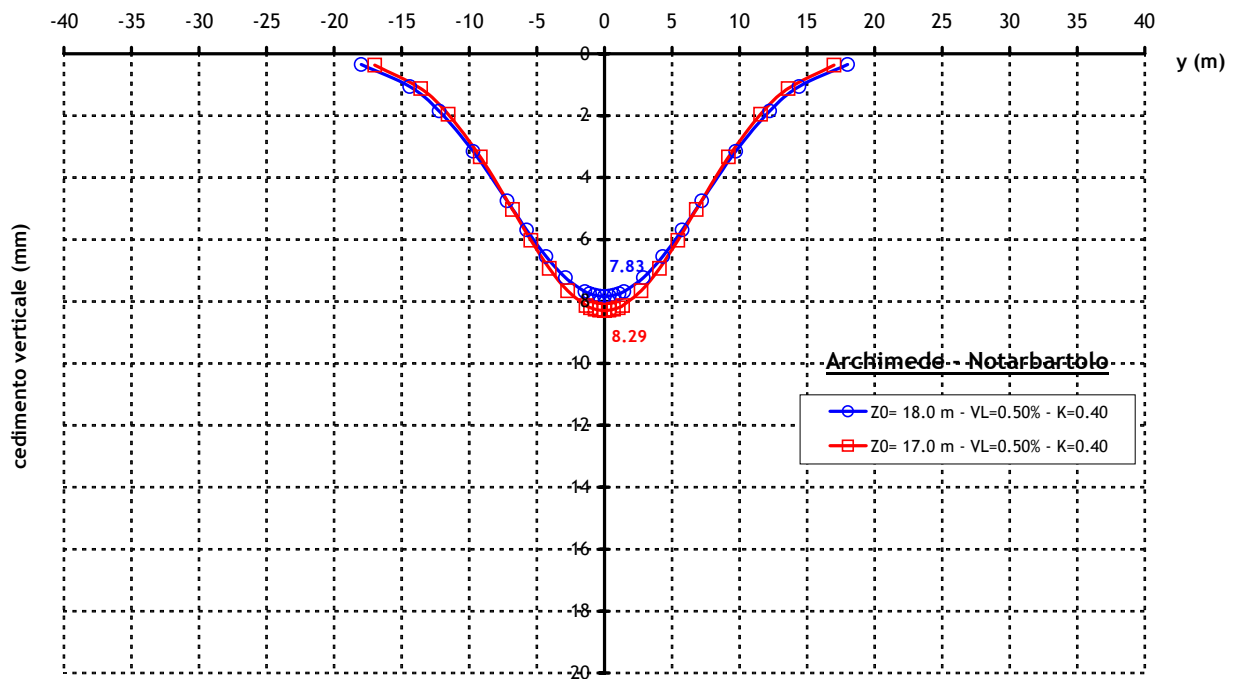



Figura 4.8: Profili di subsidenza (Tratta Archimede – Notarbartolo)

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Relazione tecnica dei cedimenti lungo la linea

4.1.1 Osservazioni e commenti

- Dall'analisi dei cedimenti indotti dallo scavo di una singola canna si evince che gli spostamenti massimi in superficie calcolati in condizioni "green field" risultano di entità generalmente inferiore a 10 mm. I valori massimi registrati in asse galleria vanno poi diminuendo all'allontanarsi dall'asse, generalmente ad una distanza di ca. 10 m dall'asse della galleria i cedimenti sono inferiori ai 5 mm.
- In generale il parametro più influente sull'entità dei cedimenti indotti in superficie è il valore del volume perso V_P . Ad esempio i risultati relativi al primo tratto della linea, in cui si sono ipotizzati volumi persi più elevati per tener conto di un primo periodo di "taratura" del processo di scavo meccanizzato, mostrano cedimenti più elevati anche in presenza di terreni di buone caratteristiche geotecniche. Di fatto il primo tratto delle gallerie scavato con le TBM a partire dalla stazione Svincolo Oreto corre lungo il tratto periferico di via Oreto, in condizioni in cui la strada soprastante si presenta molto ampia, e le facciate degli edifici sono relativamente distanti dall'asse delle gallerie. In questa prima parte dei lavori si dovrà quindi procedere con gran cura al monitoraggio dei cedimenti superficiali del p.c., in modo da poter tarare al meglio i parametri operativi della TBM, in particolare il controllo della pressione sul fronte di scavo. Nel proseguimento dello scavo, sarà assolutamente necessario controllare il parametro volume perso V_P al di sotto del valore di 0.5 %, valore che si ritiene comunque generalmente gestibile senza particolari difficoltà, viste le caratteristiche geotecniche delle calcareniti in sito, e del loro grado di cementazione.
- Gli spostamenti stimati sono stati calcolati cautelativamente in condizioni di "green field". In tale ipotesi la rigidità degli edifici in superficie è stata trascurata; nella realtà la presenza degli edifici in superficie tende a ridurre sia il valore del cedimento massimo che la curvatura dei bacini di subsidenza calcolati, con un benefico effetto risultante per quanto concerne le deformazioni indotte nelle fondazioni degli edifici stessi.
- Il cedimento generato dall'abbassamento della superficie piezometrica indotto dagli scavi, per quanto sia da attendersi molto limitato per la particolare tecnologia realizzativa prevista, è stato incluso nei valori delle perdite di volume utilizzati nei calcoli sopra descritti.



4.2 SUBSIDENZE INDOTTE DALLO SCAVO DI DUE GALLERIE AFFIANCATE

La valutazione dei cedimenti indotti dallo scavo di due gallerie affiancate è stata condotta nell'ipotesi semplificata di sovrapposizione degli effetti, ossia sommando i profili di subsidenza di due gallerie aventi lo stesso diametro D , e poste ad interasse pari a d .

I casi analizzati sono gli stessi evidenziati nel paragrafo precedente, i principali dati di input sono riportati nuovamente nella tabella 4.2 insieme al valore calcolato del cedimento verticale massimo $S_{max,2}$, che per maggiore chiarezza è stato messo a confronto con il cedimento calcolato nell'ipotesi di galleria singola ($S_{max,1}$).

Tratta	Progr.	Z_0 [m]	d [m]	V_p [%]	K [-]	$S_{max,1}$ [mm]	$S_{max,2}$ [mm]
Svincolo Oreto Oreto Sud	0+220	15.0	14.0	0.65	0.40	12.22	13.22
	0+450	18.0	14.0	0.50	0.40	7.83	9.77
Oreto Sud Oreto Nord	0+800	25.0	25.0	0.50	0.40	5.64	5.92
	1+350	20.0	25.0	0.75	0.60	7.05	8.23
Oreto Nord Giulio Cesare	1+700	20.0	30.0	0.50	0.40	7.05	7.05
	1+900	25.0	23.0	0.50	0.40	5.64	6.15
Giulio Cesare Borsa	2+450	17.0	15.0	0.50	0.40	8.29	9.28
	2+800	17.0	20.0	0.75	0.60	8.29	10.26
Borsa Massimo	3+100	15.0	14.0	0.75	0.60	9.40	13.89
	3+600	17.0	19.0	0.50	0.40	8.29	8.48
Massimo Politeama	3+900	18.0	17.0	0.50	0.40	7.83	8.43
	4+300	18.0	20.0	0.50	0.60	5.22	6.80
Politeama Archimede	4+400	18.0	20.0	0.50	0.60	5.22	6.80
	4+800	16.0	--	0.50	0.40	8.81	--
Archimede Notarbartolo	5+350	18.0	14.0	0.50	0.40	7.83	9.77
	5+800	17.0	19.0	0.50	0.40	8.29	8.48

Tabella 4.2: Principali risultati di calcolo (due gallerie affiancate)

Nelle figure da 4.9 a 4.23 sono riportati i profili di subsidenza relativi a ciascuna delle analisi svolte, nelle figure sono riportati i diagrammi relativi sia alla singola canna sia alle due canne affiancate.

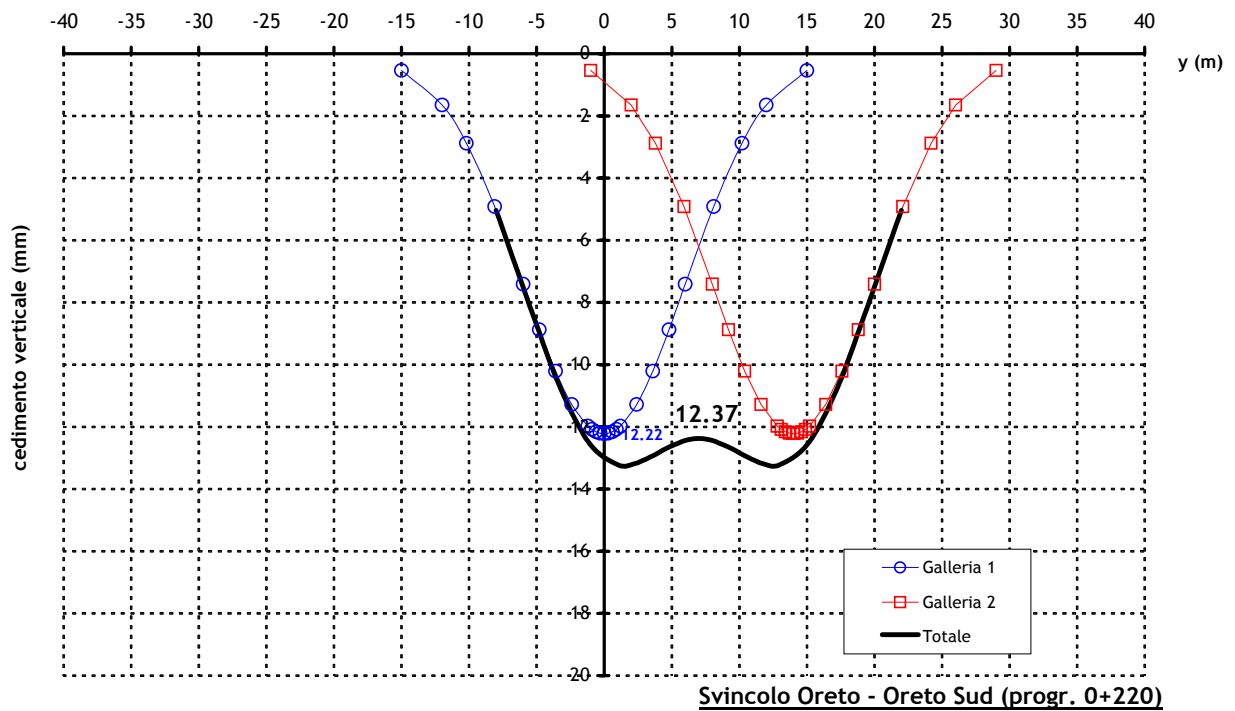


Figura 4.9: Profili di subsidenza (Tratta Svincolo Oreto – Oreto Sud – Progr. 0+220)

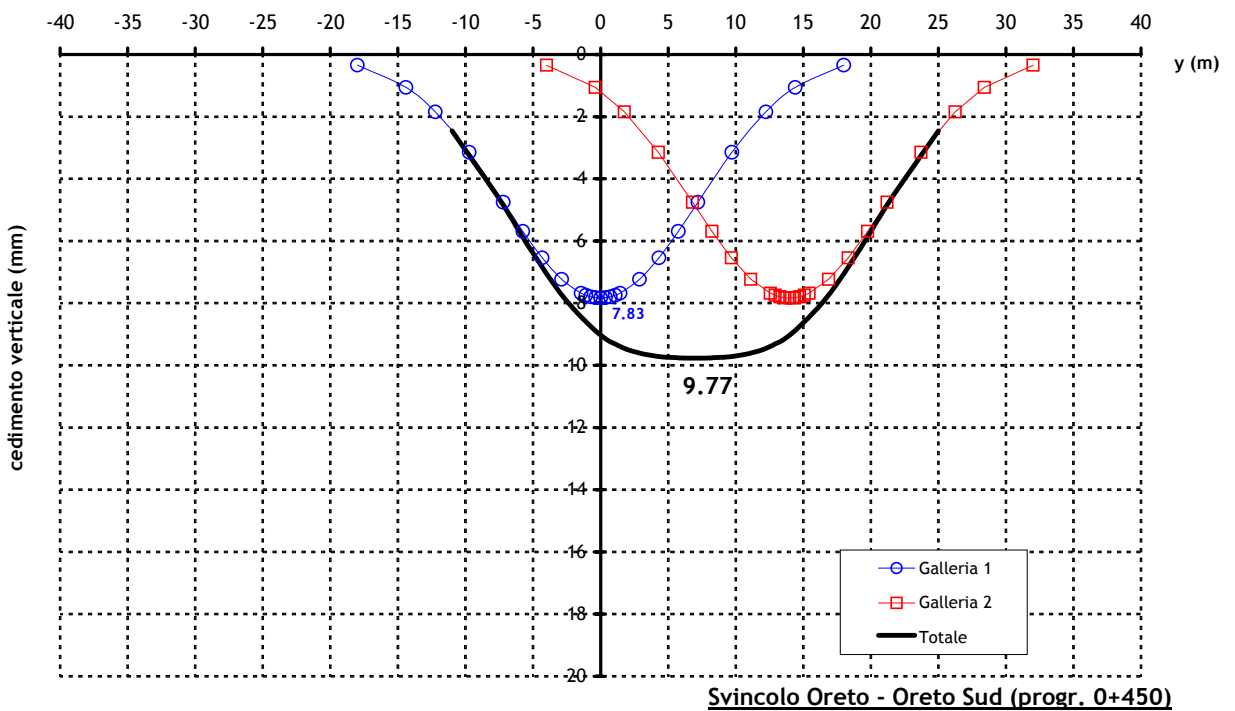


Figura 4.10: Profili di subsidenza (Tratta Svincolo Oreto – Oreto Sud – Progr. 0+450)

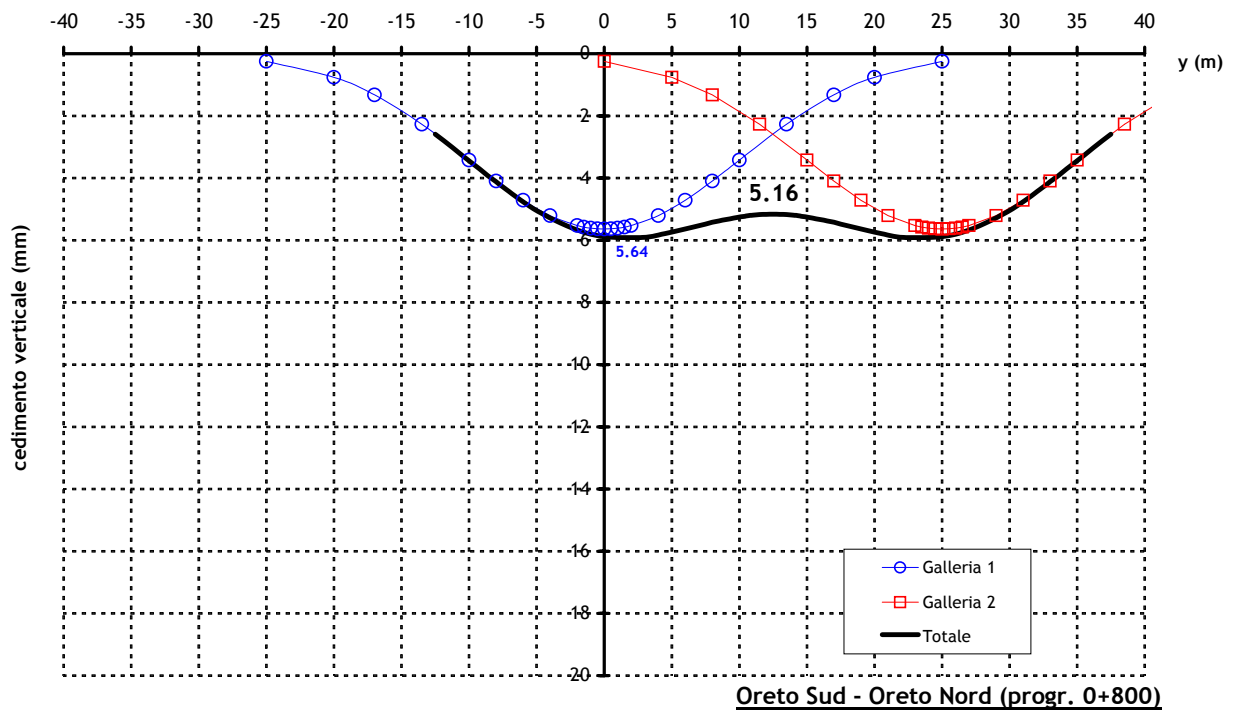


Figura 4.11: Profili di subsidenza (Tratta Oreto Sud – Oreto Nord - Progr. 0+800)

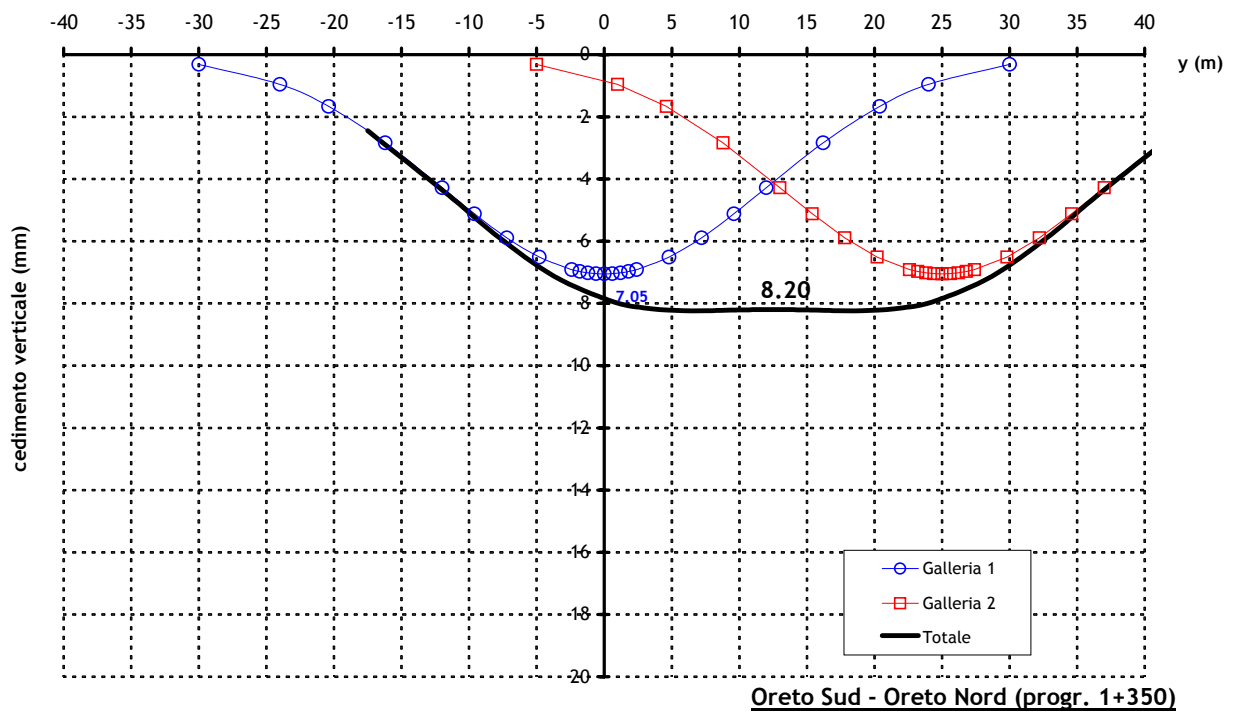


Figura 4.12: Profili di subsidenza (Tratta Oreto Sud – Oreto Nord - Progr. 1+350)

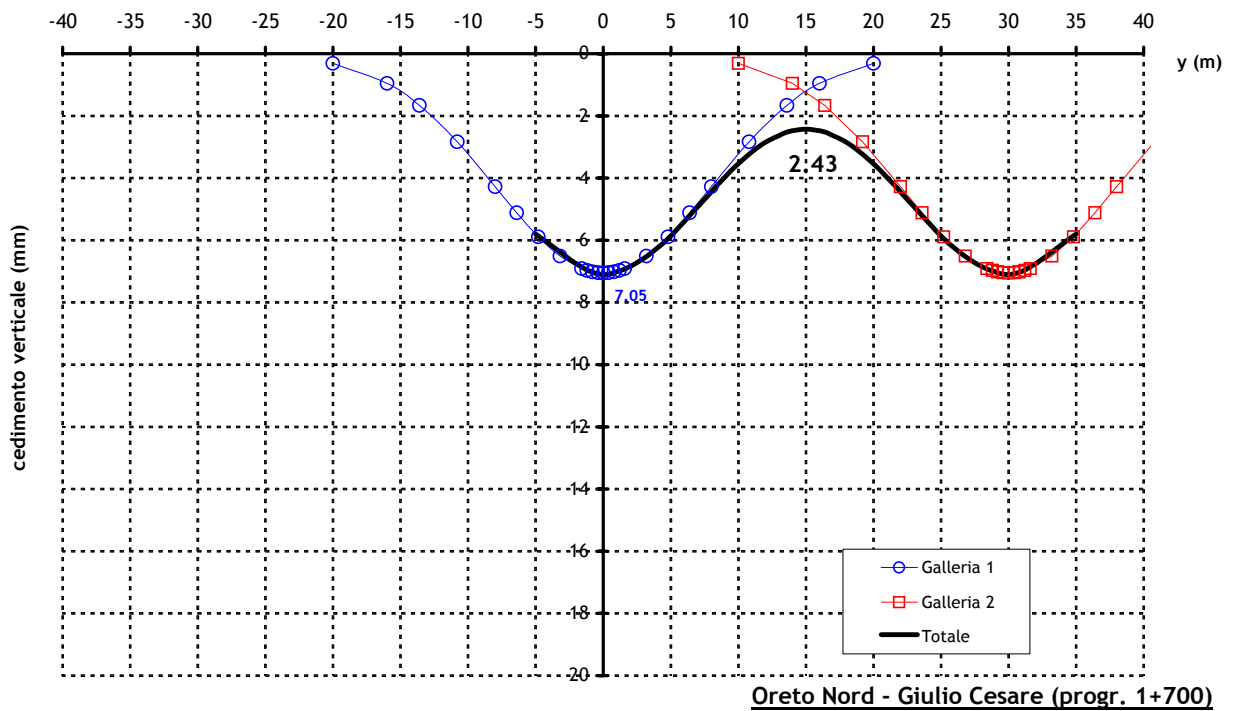


Figura 4.13: Profili di subsidenza (Tratta Oreto Nord – Giulio Cesare – Progr. 1+700)

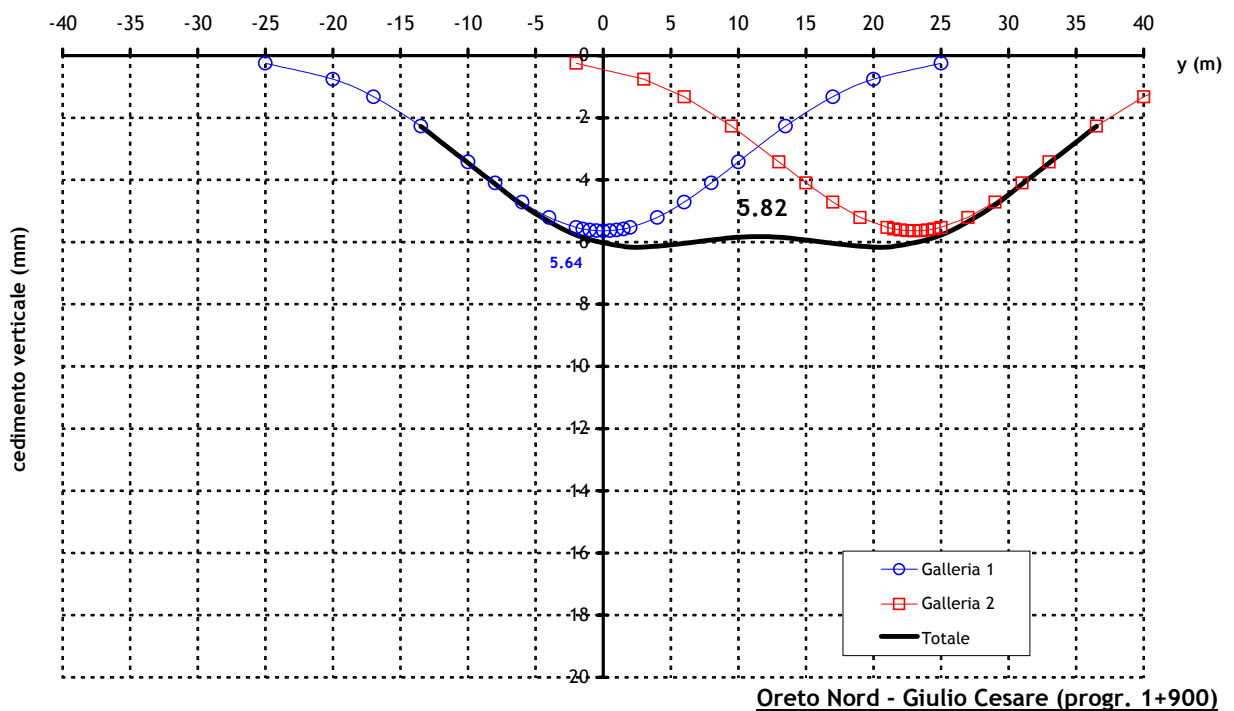


Figura 4.14: Profili di subsidenza (Tratta Oreto Nord – Giulio Cesare – Progr. 1+900)

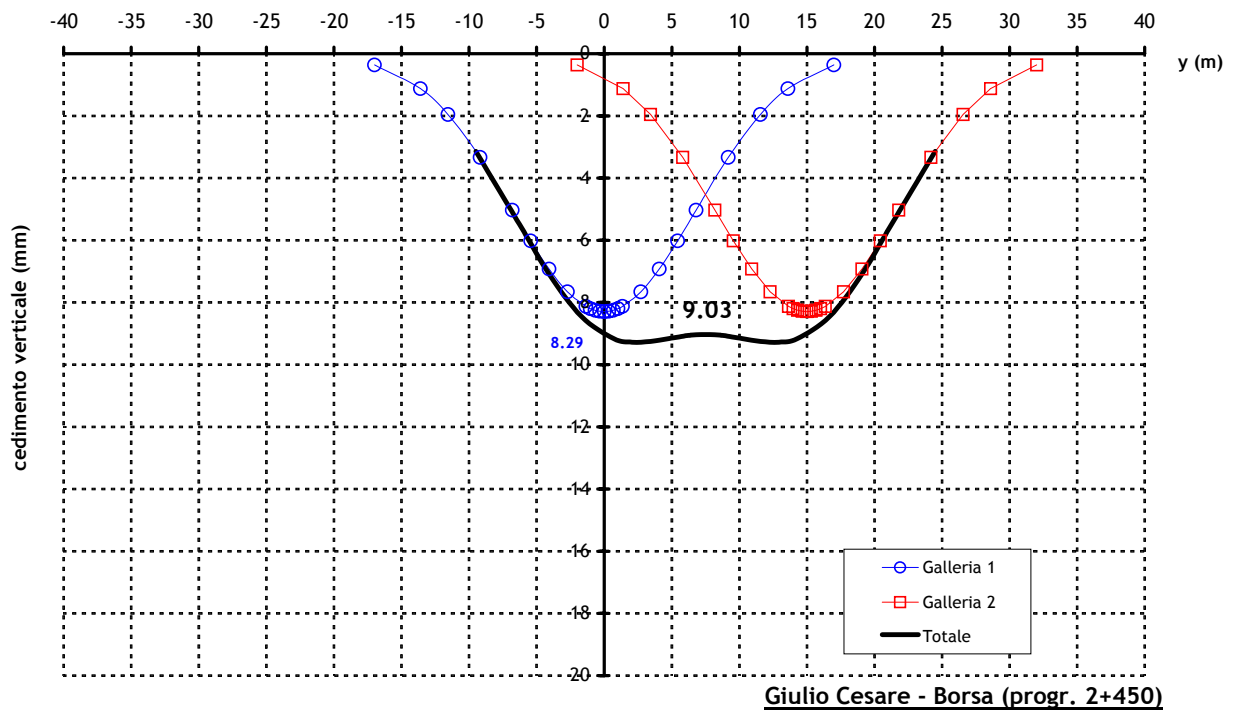


Figura 4.15: Profili di subsidenza (Tratta Giulio Cesare – Borsa – Progr. 2+450)

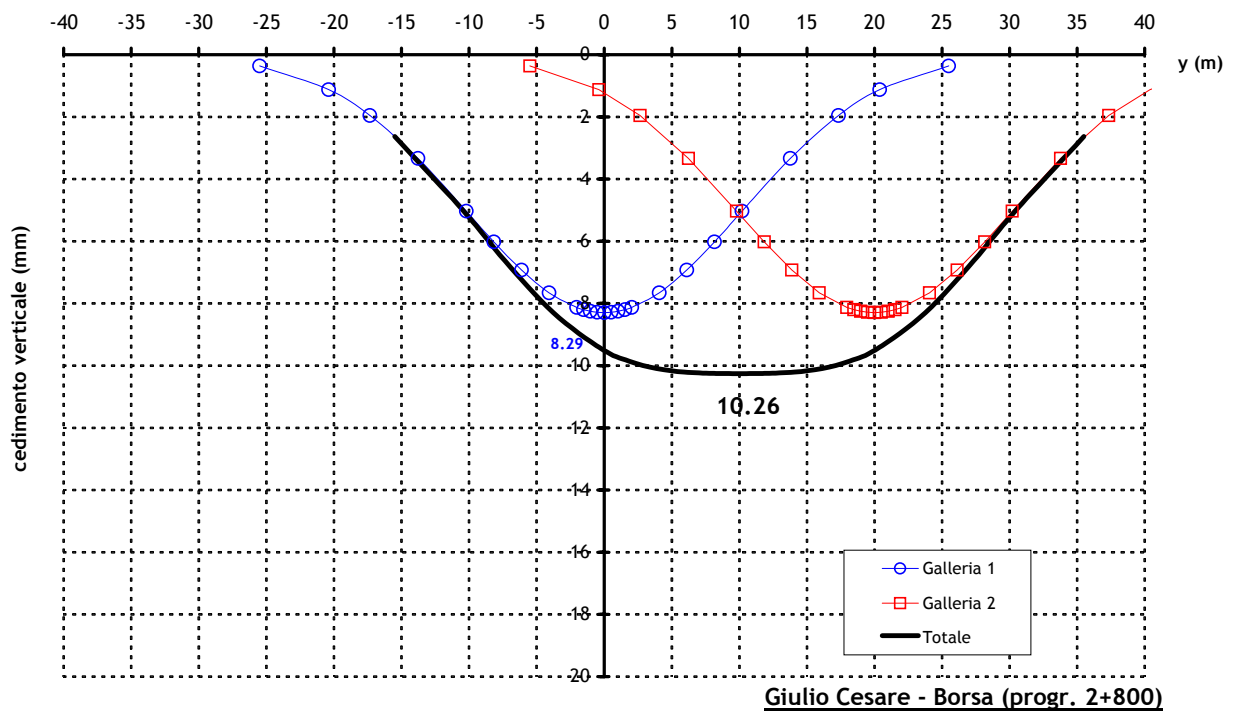


Figura 4.16: Profili di subsidenza (Tratta Giulio Cesare – Borsa – Progr. 2+800)

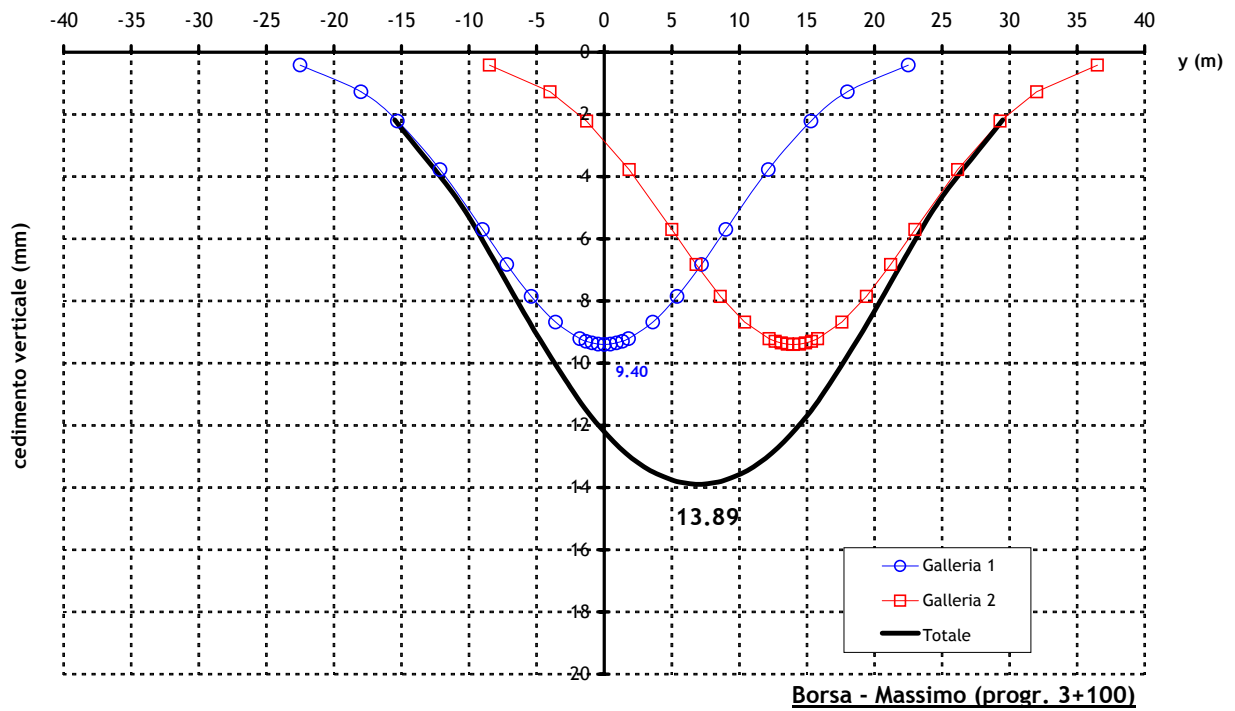


Figura 4.17: Profili di subsidenza (Tratta Borsa – Massimo – Progr. 3+100)

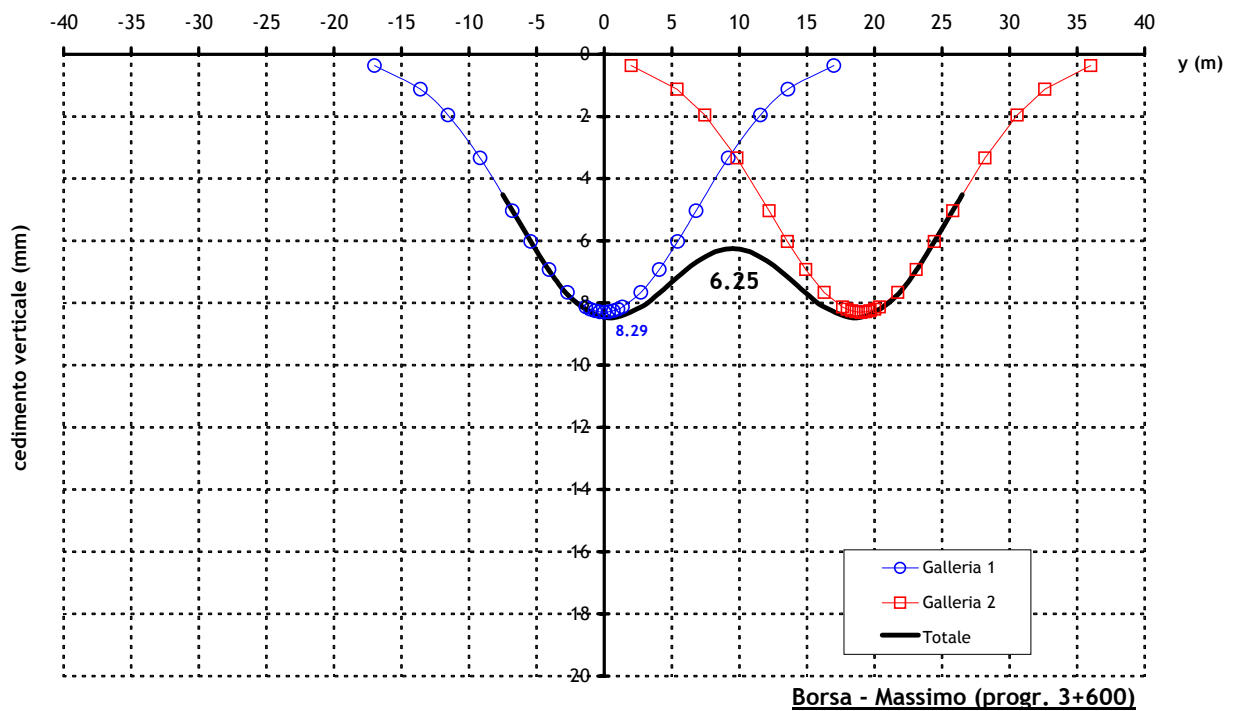


Figura 4.18: Profili di subsidenza (Tratta Borsa – Massimo – Progr. 3+600)

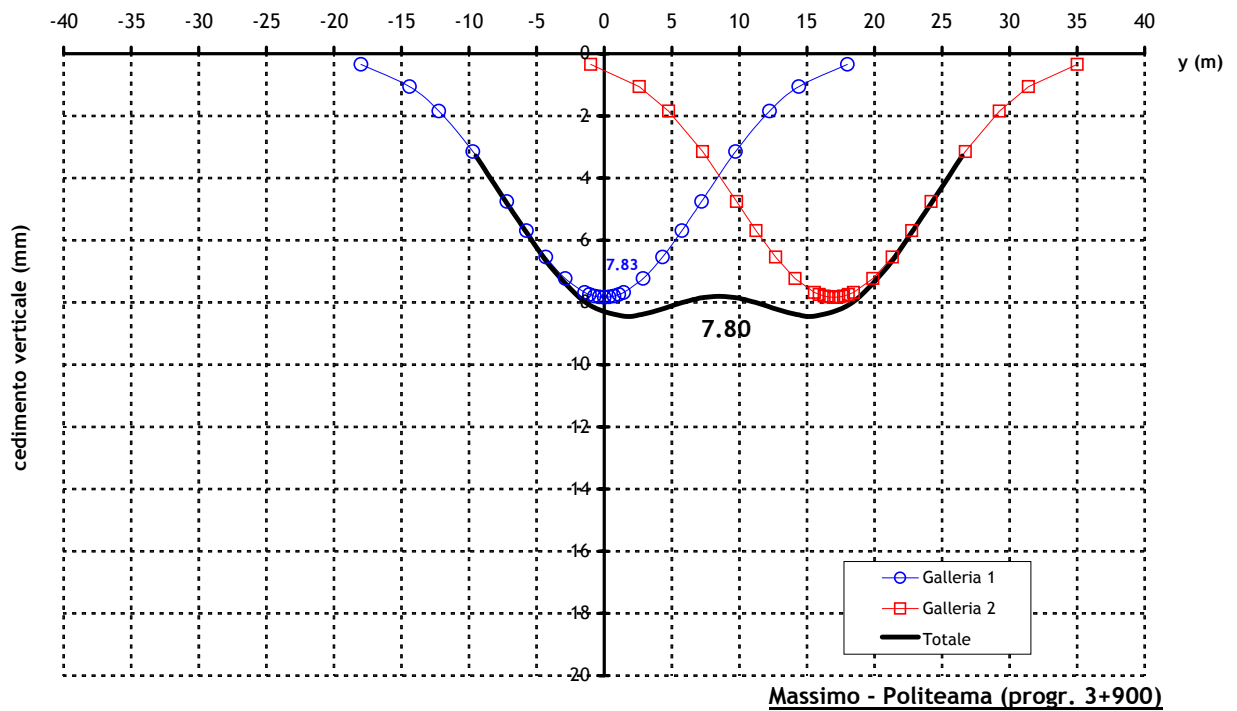


Figura 4.19: Profili di subsidenza (Tratta Massimo - Politeama – Progr. 3+900)

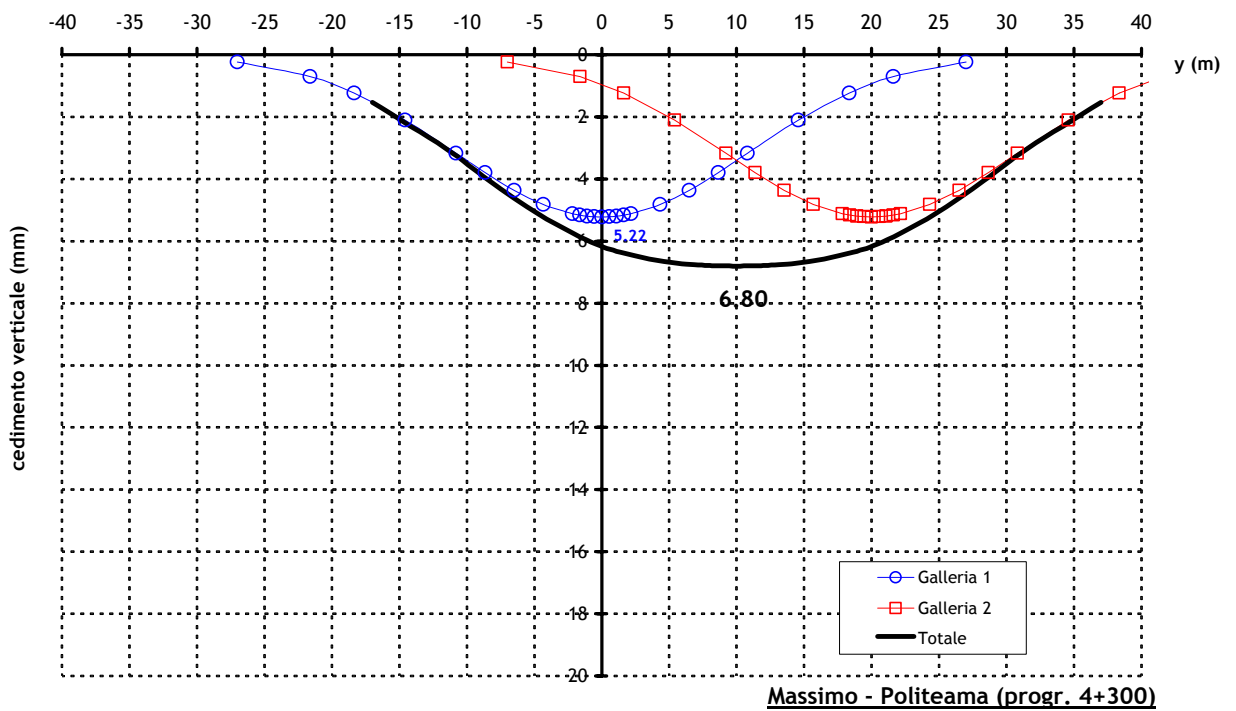


Figura 4.20: Profili di subsidenza (Tratta Massimo - Politeama – Progr. 4+300)

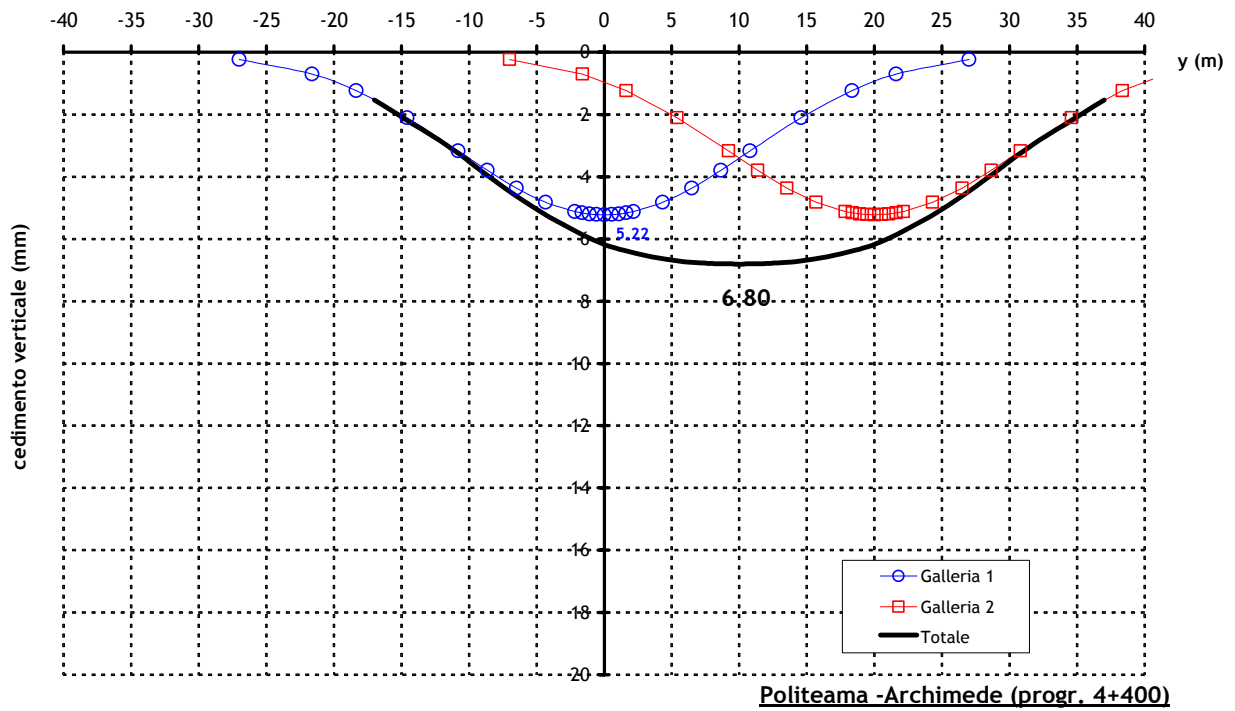


Figura 4.21: Profili di subsidenza (Tratta Politeama – Archimede – Progr. 4+400)

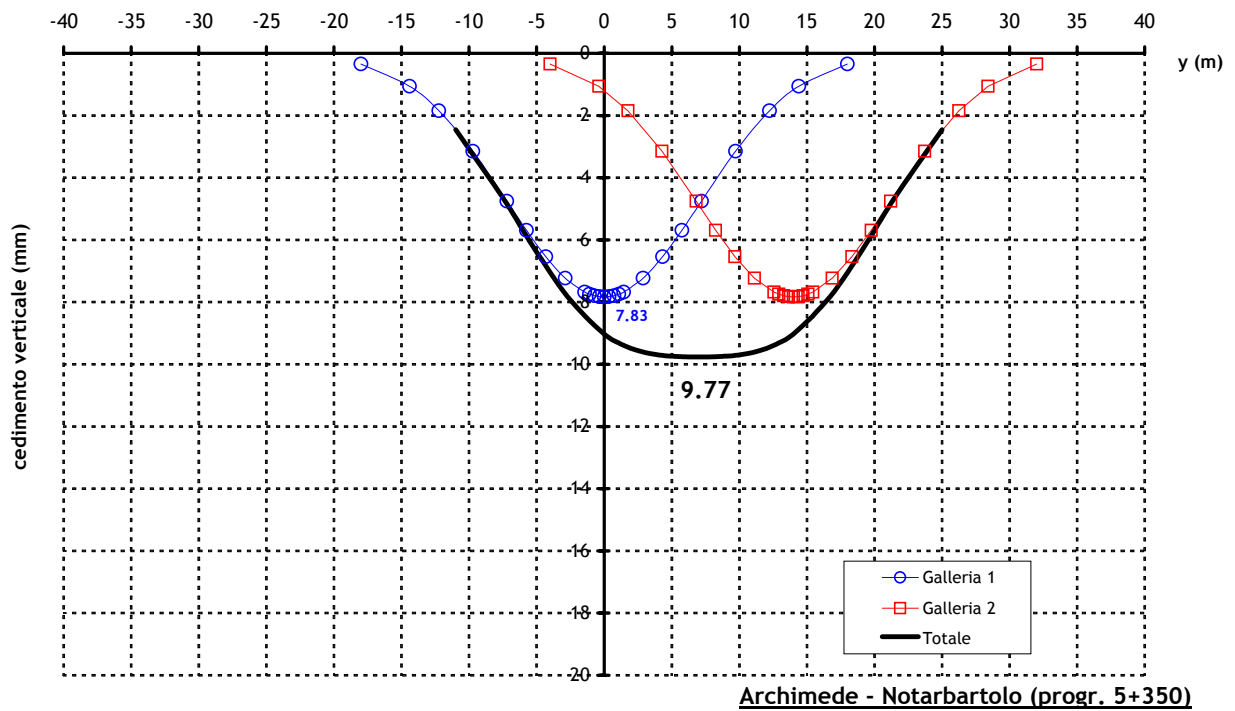


Figura 4.22: Profili di subsidenza (Tratta Archimede – Notarbartolo – Progr. 5+350)

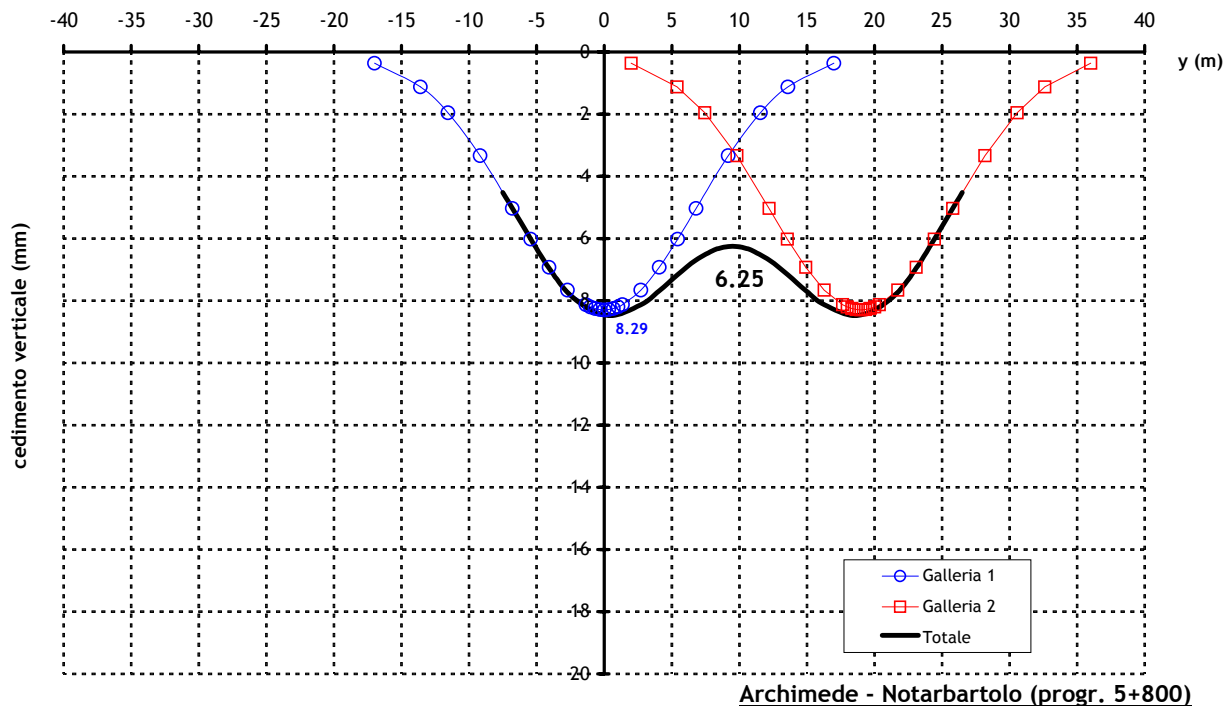


Figura 4.23: Profili di subsidenza (Tratta Archimede – Notarbartolo – Progr. 5+800)

4.2.1 Osservazioni e commenti

- Dall'analisi dei cedimenti indotti dallo scavo delle due canne affiancate si evince che gli spostamenti massimi in superficie calcolati in condizioni "green field" risultano generalmente di entità inferiore a 13 mm. I massimi cedimenti calcolati sono da ritenersi ammissibili, in considerazione del fatto che lo scavo delle due canne avverrà non contemporaneamente e con le due TBM opportunamente sfalsate, e che non si è tenuto conto del benefico effetto dovuto alla presenza degli edifici.
- Quando l'interasse d tra le due gallerie è superiore a 15÷20 m e in condizioni geotecniche e di operatività della TBM "normali" ($V_P=0.50\%$ e $K=0.40$), l'incremento dello spostamento verticale massimo dovuto alla sovrapposizione degli effetti è molto contenuto (ca. 10%).
- Il profilo di subsidenza risultante dalla somma dei profili delle singole canne restituisce invece cedimenti maggiori laddove le due canne sono più ravvicinate ($d < 15$ m), laddove il volume perso V_P è stato ipotizzato maggiore dello 0.50%, e in quei casi in cui si è considerato un bacino di subsidenza di maggiore estensione ($K=0.60$). In particolare i massimi incrementi di spostamento verticale si sono registrati in prossimità della Stazione Borsa, laddove sono state ipotizzate condizioni geotecniche particolarmente difficili.
- In generale in prossimità delle stazioni le due canne della galleria tendono ad avvicinarsi; in tali condizioni teoricamente le subsidenze indotte in superficie tendono ad aumentare. Va però ricordato che in prossimità delle stazioni è stato previsto sistematicamente (all'attacco tra la galleria di linea e le gallerie di banchina) un intervento di consolidamento e impermeabilizzazione del terreno circostante le gallerie, che sicuramente contribuirà efficacemente a ridurre l'entità dei cedimenti in superficie.



5 VALUTAZIONE DEL DANNO POTENZIALE SUGLI EDIFICI

5.1 OBIETTIVI

La seconda fase dello studio riguarda il calcolo delle deformazioni e la stima delle categorie potenziali di danno per gli edifici, in particolare per quei fabbricati ritenuti particolarmente sensibili nei confronti delle deformazioni stesse.

I risultati acquisiti nelle analisi di cedimento in condizioni green field (v. cap. 3 e 4) rappresentano l'indispensabile punto di partenza per la conduzione della seconda fase di studio, per la quale si rende inoltre necessaria la conoscenza dei parametri atti alla caratterizzazione geometrica e meccanica degli edifici oggetto d'indagine. Nel capitolo precedente gli spostamenti del piano campagna sono stati calcolati senza tenere in conto l'interazione terreno-struttura. In tal modo, la stima che ne deriva è, come si è già detto, certamente cautelativa.

La valutazione dei danni potenziali sui fabbricati e il riconoscimento delle possibili situazioni critiche (fabbricati "sensibili") dovranno essere condotti secondo le seguenti fasi successive:

1. definizione della curva di subsidenza in assenza di edifici (green field);
2. schematizzazione dei fabbricati interferiti;
3. calcolo delle deformazioni indotte sui fabbricati,
4. individuazione delle categorie di danno.

Per tutti gli edifici con elevata categoria di danno si dovrà prevedere uno studio di dettaglio che includa, laddove appropriato, anche calcoli d'interazione terreno-struttura. La categoria di danno così individuata forma la base per la scelta delle eventuali misure di mitigazione del danno per ciascun edificio sensibile individuato.

Nei seguenti paragrafi sono riportati in dettaglio il metodo di calcolo delle deformazioni indotte sui fabbricati, e i criteri per l'individuazione delle categorie di danno.

5.2 METODO DI CALCOLO DELLE DEFORMAZIONI INDOTTE SUI FABBRICATI

Il comportamento di un edificio nei riguardi della deformazione è diverso a seconda che esso ricada in una zona in cui la curva di cedimento rivolge la concavità verso l'alto ("*sagging zone*") o verso il basso ("*hogging zone*"). Nel caso in cui esso ricada a cavallo delle due zone dette, ai fini del calcolo, lo stesso viene idealmente scomposto in corrispondenza del punto di inflessione (o dei punti di inflessione), considerando ciascuna sua parte come un edificio indipendente e valutando per ciascuno di essi la deformazione che gli compete.

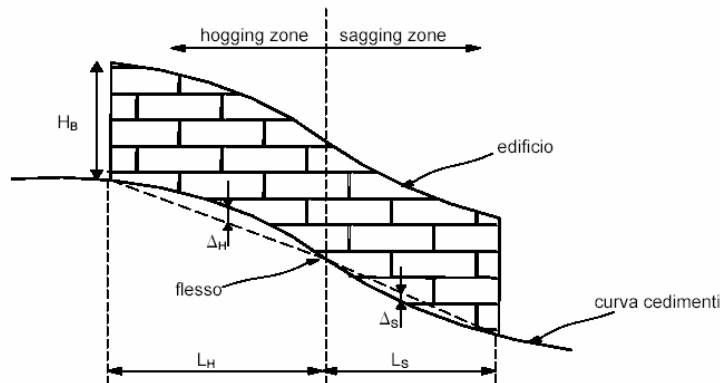


Figura 5.1: Hogging zone e sagging zone

La figura 5.1 mostra un esempio di tale scomposizione nel caso in cui il punto d'inflessione ricadente all'interno della pianta dell'edificio sia solo uno.

Il regime deformativo nell'edificio è il risultato di due contributi: uno apportato dagli spostamenti verticali del terreno S_{VT} e l'altro dovuto agli spostamenti orizzontali S_{HT} . Quest'ultimo contributo, indicato con ε_H , viene valutato con la seguente espressione:

$$\varepsilon_H = \frac{\Delta S_{HT}}{L}$$

dove il termine a numeratore rappresenta la differenza, in valore assoluto, di spostamento orizzontale agli estremi (disposti a distanze L_H o L_S) della costruzione, ed L la distanza tra i punti considerati. Il significato fisico di ε_H è pertanto quello di una deformazione orizzontale media, ed assume valore positivo (trazione) nella "hogging zone" e valore negativo (compressione) nella "sagging zone".

Gli spostamenti verticali, invece, inducono nella costruzione due tipi di deformazione: una di tipo flessionale, indicata con ε_B ; e l'altra di tipo tagliante, indicata con ε_D . La determinazione di queste ultime due è eseguita seguendo l'approccio proposto da Burland e Wroth (v. rif. bib. [5]). Assimilando l'edificio ad una trave di Timoshenko, tale cioè da manifestare anche deformazioni di tipo tagliante, è possibile mettere in relazione le quantità ε_B ed ε_D alle caratteristiche geometriche, meccaniche ed al massimo abbassamento della trave equivalente di altezza e lunghezza pari a quelle dell'edificio stesso:

$$\varepsilon_B = \frac{\Delta_{max} / L}{\left[\frac{L}{12t} + \frac{3J}{2tLH_B} \cdot \frac{E}{G} \right]}$$

$$\varepsilon_D = \frac{\Delta_{max} / L}{\left[1 + \frac{H_B L^2}{18J} \cdot \frac{G}{E} \right]}$$

dove:

ε_B deformazione flessionale dell'edificio,

ε_D deformazione di taglio dell'edificio,

Δ_{max} massima distanza, in valore assoluto, tra la curva dei cedimenti e la retta passante per i due

- punti estremi della stessa curva (v. fig. 5.2),
- L lunghezza della trave equivalente (corrisponde alla dimensione dell'edificio o di una sua parte se al suo interno ricade un flesso: L_H o L_S),
- t maggiore tra le distanze dell'asse neutro dai due lembi della sezione trasversale,
- J momento d'inerzia della sezione trasversale rettangolare di larghezza unitaria e altezza H_B ,
- H_B altezza della trave equivalente (va intesa come altezza dell'edificio, valutata tra il piano di posa delle fondazioni e il piano di gronda),
- E/G rapporto tra i moduli d'elasticità longitudinale e tangenziale (assume i valori 2.6 e 12.5 rispettivamente per strutture in muratura e strutture intelaiate in c.a.).

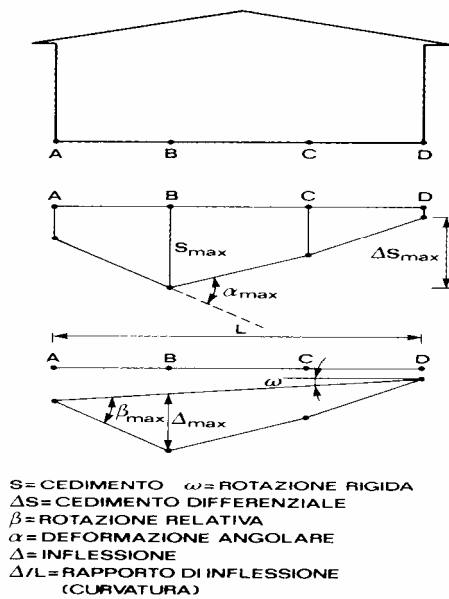


Figura 5.2: Criterio per l'individuazione di Δ_{max}

Nella figura 5.3 sono mostrati i quadri fessurativi tipici delle due deformazioni: con fessure inclinate di 45° per deformazioni di taglio e fessure verticali per deformazioni di tipo flettente.

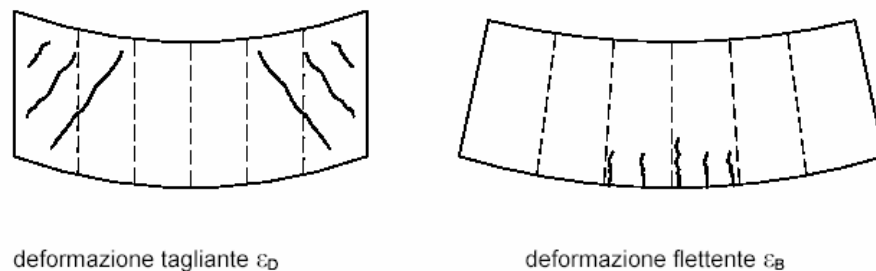


Figura 5.3: Quadri fessurativi tipici per deformazioni di taglio e flettenti

Diverso è il valore da attribuire ai parametri t e J in funzione del segno della concavità della curva di cedimento. Gli Autori già citati (v. rif. Bib. [5]) ritengono, infatti, che sia ragionevole ipotizzare che nella "hogging zone", grazie al contributo delle strutture di fondazione, l'asse neutro sia molto prossimo o coincidente col lembo inferiore della trave, mentre nella "sagging zone", essendo meno sentito tale contributo, l'asse neutro si mantenga baricentrico.



Pertanto si ha:

$$J_H = \frac{H_B^3}{3}, \quad t = H_B \quad \text{nella "hogging zone"}$$

$$J_H = \frac{H_B^3}{12}, \quad t = \frac{H_B}{2} \quad \text{nella "sagging zone".}$$

Le deformazioni risultanti di tipo tagliante e flettente vengono calcolate apportando il contributo della deformazione ε_H indotta dagli spostamenti orizzontali.

La ε_B e la ε_H , avendo entrambe direzione orizzontale, vengono combinate semplicemente sommandole algebricamente:

$$\varepsilon_{BT} = \varepsilon_B + \varepsilon_H$$

In zona di "hogging" le deformazioni indotte dai cedimenti verticali (trazione) si sommano a quelle indotte dagli spostamenti orizzontali (pure di trazione). In zona di "sagging" alle deformazioni indotte dai cedimenti verticali (trazione) si sottraggono le deformazioni indotte dagli spostamenti orizzontali (compressione).

Le direzioni della ε_H e della ε_D invece non sono coincidenti, difatti la seconda è inclinata di 45° , per cui vengono combinate facendo uso dei cerchi di Mohr e ipotizzando un valore di $\nu = 0.30$:

$$\varepsilon_{DT} = 0.35\varepsilon_H + \sqrt{(0.65\varepsilon_H)^2 + \varepsilon_D^2}$$

La più grande tra la ε_{BT} e la ε_{DT} viene definita deformazione limite di trazione ε_{lim} , e rappresenta il parametro attraverso cui a ciascun edificio viene attribuita la categoria di danno relativa. Si ha quindi:

$$\varepsilon_{lim} = \max \{ \varepsilon_{BT}, \varepsilon_{DT} \}.$$


5.3 DEFINIZIONE ED INDIVIDUAZIONE DELLE CATEGORIE DI DANNO

Una definizione rigorosa e oggettiva della categoria del danno subito da un fabbricato a causa dello scavo di una galleria nel sottosuolo non è indubbiamente cosa semplice, in quanto la classificazione deve necessariamente tenere conto del contesto socio-economico e storico-monumentale in cui essa viene ad essere applicata.

Nel presente lavoro si può fare riferimento ad una delle più note classificazioni del danno, proposta da Burland ed oggi largamente adottata in Gran Bretagna con riferimento agli edifici in muratura, che è basata essenzialmente sui costi di riparazione del danno stesso. Eventuali adattamenti del criterio di classificazione per edifici di particolare interesse storico-monumentale saranno specificati nei prossimi approfondimenti progettuali.

La seguente tabella 5.1 riporta le categorie di danno definite da Burland (v. rif. bib. [2]), con i relativi valori limite di deformazione a trazione riportati nello studio di Boscardin e Cording (v. [1]).

Le categorie di danno da 0 a 2 sono normalmente associate ad un danno di tipo estetico, la categoria 3 ad un danno di tipo funzionale, le categorie 4 e 5 ad un vero e proprio danno


	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Relazione tecnica dei cedimenti lungo la linea

strutturale. La descrizione della tipologia dei danni è in parte di tipo fenomenologico (descrizione qualitativa del danno), in parte di tipo oggettivo (ampiezza delle lesioni).

Categoria di danno	Grado di intensità	Deformazione limite di trazione [%]	Descrizione della tipologia dei danni
0	Trascurabile	0.00 ÷ 0.05	Fessure capillari con apertura ≤ 0.1 mm
1	Molto lieve	0.05 ÷ 0.075	Fessure sottili cui si rimedia facilmente con interventi d'ordinaria manutenzione (tinteggiatura). Il danno in genere è limitato agli intonaci delle pareti interne. Fessure alle pareti esterne rilevabili con attento esame. Tipica apertura delle lesioni ≤ 1 mm
2	Lieve	0.075 ÷ 0.15	Fessure facilmente stuccabili, tinteggiatura necessaria. Le fessure ricorrenti possono essere mascherate con opportuni rivestimenti. Fessure visibili anche all'esterno: può essere necessaria qualche ripresa della stilatura per garantire l'impermeabilità. Possibili difficoltà nell'apertura di porte e finestre. Tipica apertura delle lesioni ≤ 5 mm
3	Moderata	0.15 ÷ 0.30	Le fessure richiedono un intervento di cucì e scuci della muratura. Anche all'esterno sono necessari interventi sulla muratura. Possibile blocco di porte e finestre. Rottura di tubazioni. Spesso l'impermeabilità non è garantita. Tipica apertura delle lesioni 5÷15 mm , oppure numero elevato di lesioni con apertura ≤ 3 mm
4	Forte	> 0.30	Necessarie importanti riparazioni, compresa demolizione e ricostruzione di parti di muri, specialmente al di sopra di porte e finestre. I telai di porte e finestre si distorcono, percepibile pendenza dei pavimenti. Muri inclinati o spanciati, qualche perdita d'appoggio di travi. Tubazioni spaccate. Tipica apertura delle lesioni 15÷25 mm , dipendente anche dal numero delle lesioni.
5	Molto forte	> 0.30	Richiesti importanti lavori con parziale o totale demolizione e ricostruzione. Le travi perdono l'appoggio, i muri si inclinano fortemente e richiedono puntellatura. Pericolo di instabilità. Tipica apertura delle lesioni ≥ 25 mm, ma dipende anche dal numero delle lesioni.

Tabella 5.1: Sistema di classificazione del danno (Burland 1977, Boscardin & Cording 1989)

In definitiva per ogni edificio potenzialmente "sensibile" occorrerà valutare dapprima il valore della deformazione di trazione secondo i metodi illustrati nel par. 5.2 in base all'altezza e alla tipologia costruttiva di ogni edificio all'interno dell'area di influenza, e successivamente

 CITTÀ DI PALERMO	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Relazione tecnica dei cedimenti lungo la linea

procedere alla valutazione della categoria del danno secondo i valori di riferimento riportati in tabella 5.1.

In tutti quei casi dove l'ispezione visiva sui fabbricati, descritta nelle schede di censimento, dovesse indicare casi di danno preesistente con fessurazioni diffuse e comunque importanti, la categoria di danno risultante dalle valutazioni sopra illustrate potrà essere incrementata tramite un coefficiente amplificativo.

Le categorie di danno che non richiedono particolari misure di consolidamento o di mitigazione degli effetti dello scavo sono le categorie da 0 a 2 della tabella 5.1.

Nei casi in cui la valutazione del danno porti a classificare l'edificio in una categoria uguale o superiore a 3, occorrerà invece passare a valutazioni di dettaglio con analisi di calcolo più approfondite, ed eventualmente prevedere opportuni interventi di mitigazione e di consolidamento del terreno da eseguire dalla superficie (jet-grouting, palificate di micropali, iniezioni) o dall'interno delle gallerie (iniezioni cementizie o chimiche nell'intorno del volume di terreno che sarà scavato).



6 CONCLUSIONI

Il presente studio illustra i criteri di valutazione dei cedimenti del terreno e degli effetti indotti dallo scavo delle gallerie di linea della Metropolitana sugli edifici presenti in superficie.

L'approccio metodologico dello studio è articolato in due fasi principali:

1. calcolo dei cedimenti verticali e degli spostamenti orizzontali della superficie, con determinazione dei profili di subsidenza;
2. valutazione delle deformazioni indotte negli edifici in superficie, e conseguentemente definizione delle categorie di danno.


Nell'ambito di questo progetto preliminare l'attenzione è stata concentrata principalmente sulla prima fase dello studio (v. cap. 3 e 4), analizzando in dettaglio una serie di situazioni tipiche e determinando i profili di subsidenza indotti in superficie nel caso dello scavo di una galleria singola e di due gallerie affiancate. Tali analisi consentono la valutazione dei principali parametri che regolano il fenomeno, dando importanti indicazioni di riferimento per i successivi approfondimenti progettuali.

Per quanto riguarda la seconda fase dello studio, in questa relazione sono riportate le linee guida sulla base delle quali tale analisi dovrà essere sviluppata nelle successive fasi progettuali, sulla base anche dei risultati delle indagini sui fabbricati. La valutazione degli effetti dei cedimenti sugli edifici deve essere condotta con metodi sperimentati, il metodo qui proposto è stato scelto tra quelli impiegati per i più importanti progetti di linee metropolitane recentemente sviluppati in campo internazionale.

Secondo le analisi svolte lo scavo delle gallerie di linea dà luogo a cedimenti modesti, generalmente inferiori a 10÷15 mm. Sia i metodi costruttivi prescelti (scavo meccanizzato con TBM a contropressione sul fronte di scavo), che le sezioni tipo adottate (due gallerie a singolo binario invece di un'unica galleria a due binari), sia il relativo approfondimento della livelletta di progetto rispetto allo Studio di Fattibilità sono state tutte scelte progettuali improntate tra l'altro sulla necessità di limitare le deformazioni e i danni potenziali nelle strutture in superficie, in un contesto urbano così complesso quale quello della città di Palermo. Le analisi condotte hanno infatti mostrato che gli spostamenti attesi in superficie sono di entità contenuta, e pertanto si prevedono al momento danni agli edifici in superficie molto ridotti.

I risultati ottenuti in termini di cedimenti in superficie sono da intendersi come indicativi, in quanto in via preliminare sono state analizzate alcune situazioni tipiche, prendendo in esame due sezioni caratteristiche per ciascuna tratta compresa tra due stazioni successive. Al momento sono state previste perdite di volume limitate ma certamente plausibili se la costruzione delle gallerie di linea avviene con scudi a contropressione sul fronte (EPB o Hydroshield), se il fronte di scavo è situato in un terreno omogeneo e se la pressione di bilanciamento è accuratamente controllata in fase esecutiva. Laddove lo scudo della TBM incontra terreni eterogenei sul fronte si possono verificare, localmente, cedimenti in superficie superiori a quelli previsti. Non è in ogni caso possibile definire misure mitigatrici per un simile evento, in quanto l'ubicazione delle zone di passaggio tra due formazioni di terreno differenti non è prevedibile esattamente a priori, ma solo ipotizzabile con una certa approssimazione. Al fine quindi di minimizzare i rischi del caso, è ancora una volta opportuno enfatizzare la necessità di un sistema di controllo molto accurato delle pressioni sul fronte di scavo.

Nelle successive fasi progettuali si procederà infine alla valutazione delle categorie di danno dei fabbricati, sulla base delle informazioni desunte dalle schede di censimento dei fabbricati stessi. In termini di categoria di danno limite, si è stabilito che non è necessario proporre

 CITTÀ DI PALERMO	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Relazione tecnica dei cedimenti lungo la linea

alcun intervento di difesa dei fabbricati per le categorie di danno da 0 a 2 (v. tabella 5.1). I risultati preliminari finora ottenuti, con valori assoluti dei cedimenti molto limitati ($S_{max} < 15$ mm), fanno ritenere al momento che nessun particolare intervento di difesa dei fabbricati sia da mettere in conto. Non è da escludere tuttavia la necessità di un certo numero di interventi su edifici che si trovano in condizioni statiche particolarmente precarie, o di interventi minori, essenzialmente di tipo cosmetico, su alcuni manufatti interessati dallo scavo.



7 BIBLIOGRAFIA

- [1] Boscardin M.D., Cording E.J. (1989): "Building response to excavation-induced settlement". ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115, No. 1, pp.1-21.
- [2] Mair R.J., Taylor R.N., Burland J.B. (1996): "Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling". Proc. Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London (eds R J. Mair and R. N. Taylor), Balkema, pp. 713-718.
- [3] New B.M, O'Reilly M.P. (1991): "Tunnelling induced ground movements: predicting their magnitude and effects". 4th International Conference on Ground Movements and Structures, Cardiff, invited review paper, pp. 691-697.
- [4] Rankin W.J. (1992): "Prediction and effects of ground movements caused by tunnelling in soft ground beneath urban areas". Pub. CIRIA, London.
- [5] Viggiani C. (1999): "Fondazioni". Ed. Hevelius.
- [6] Wroth C. P., Burland J. B. (1974): "Settlement of building and associated damage". SOA Review, Conf. Settlement of structures, Cambridge. pp. 651-654.