

**MINISTERO
DELLE INFRASTRUTTURE E DELLA MOBILITÀ SOSTENIBILI
STRUTTURA TECNICA DI MISSIONE**



COMUNE DI TORINO



**METROPOLITANA AUTOMATICA DI TORINO
LINEA 2 – TRATTA POLITECNICO – REBAUDENGO**

**PROGETTAZIONE DEFINITIVA
Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico**


PROGETTO DEFINITIVO		 INFRATRASPORTI.TO S.r.l.												
DIRETTORE PROGETTAZIONE Responsabile integrazione discipline specialistiche	IL PROGETTISTA													
Ing. R. Crova Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 6038S	Ing. F. Rizzo Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 9337K	SUBSIDENZE, PRESIDIO E MONITORAGGI												
		BACINO SUBSIDENZA E IMPATTO SULLE PRE-ESISTENZE												
		STAZIONE PASTRENGO												
		ELABORATO								REV.		SCALA	DATA	
											Int.	Est.		
BIM MANAGER Geom. L. D'Accardi		MT	L2	T1	A2	D	PRC	SPA	R	001	0	0	-	25/11/2022

AGGIORNAMENTI

Fg. 1 di 1

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	VISTO
0	EMISSIONE	25/11/22	VFI	PDm	FRi	RCr
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-

<table border="1"> <tr> <td>LOTTO 2</td> <td>CARTELLA</td> <td>10</td> <td>95</td> <td>MTL2T1A2D</td> <td>PRCSPAR001</td> </tr> </table>						LOTTO 2	CARTELLA	10	95	MTL2T1A2D	PRCSPAR001	STAZIONE APPALTANTE DIRETTORE DI DIVISIONE INFRASTRUTTURE E MOBILITÀ Ing. R. Bertasio RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. A. Strozziro						
LOTTO 2	CARTELLA	10	95	MTL2T1A2D	PRCSPAR001													

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 2: Bologna-Politecnico
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A2DPRCSPAR001-0-0

INDICE

1	PREMESSA	3
1.1	SCOPO	3
1.2	CARATTERISTICHE GENERALI DELLA STAZIONE	4
2	DEFORMAZIONI E CEDIMENTI INDOTTI DAGLI SCAVI	5
2.1	MODELLAZIONE NUMERICA E METODOLOGIA DI CALCOLO	5
2.1.1	CALCOLO DELLE DEFORMAZIONI PER C&C	6
2.1.2	CALCOLO DELLE DEFORMAZIONI PER LE GALLERIE DI BANCHINA	7
2.2	EFFETTI INDOTTI SUGLI EDIFICI	8
2.2.1	CLASSIFICAZIONI DI DANNO E CONCETTO DI RISCHIO	10
2.2.2	INDICE DI VULNERABILITÀ	11
2.3	SEZIONI DI STUDIO	13
2.4	CONTESTO GEOLOGICO/GEOTECNICO	15
3	DEFORMAZIONI E CEDIMENTI INDOTTI DAGLI SCAVI	16
3.1	DEFORMAZIONI INDOTTE DALLO SCAVO C&C DEL CORPO STAZIONE	16
3.2	DEFORMAZIONI INDOTTE DALLO SCAVO DEGLI ACCESSI DI STAZIONE	17
3.3	DEFORMAZIONI INDOTTE DALLO SCAVO DELLE GALLERIE DI BANCHINA	19
3.4	EFFETTI SUGLI EDIFICI	22
4	INDICAZIONI SULLE OPERE DI PRESIDIO E SUL SISTEMA DI MONITORAGGIO DURANTE LE FASI COSTRUTTIVE	26
4.1	OPERE DI PRESIDIO DEGLI EDIFICI	26
4.2	MONITORAGGIO CORPO DI STAZIONE E ACCESSI	27
4.3	MONITORAGGIO EDIFICI	31

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.	Key-plan della linea 2 – lotto funzionale 2 (Stazione Pastrengo)	3
Figura 2.	Modello 3d – Stazione Pastrengo	4

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 2: Bologna-Politecnico
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A2DPRCSPAR001-0-0

Figura 3.	Modello costitutivo Hardening Soil	5
Figura 4.	Modello geometrico corpo stazione (Cut&Cover)	6
Figura 5.	Zona di influenza minima per scavi in C&C	6
Figura 6.	Modello geometrico galleria di banchina	7
Figura 7.	Esempio di output degli spostamenti indotti dallo scavo della galleria di banchina	8
Figura 8.	Principali parametri per la valutazione del danneggiamento degli edifici	9
Figura 9.	Sezioni di analisi della stazione	14
Figura 10.	Tipologici delle sezioni di scavo degli accessi (MTL2T1A2DSTRSMOT020.1)	14
Figura 11.	Spostamenti verticali	16
Figura 12.	Spostamenti orizzontali	17
Figura 13.	Subsidenza dovuta alla realizzazione dei micropali degli accessi – Schema A	17
Figura 14.	Subsidenza dovuta alla realizzazione dei micropali degli accessi – Schema B	18
Figura 15.	Subsidenza dovuta alla realizzazione dei micropali degli accessi – Schema C	18
Figura 16.	Subsidenza dovuta alla realizzazione dei micropali degli accessi – Schema D	19
Figura 17.	Sezione Galleria Banchina: s_{xx} , a fase 8	19
Figura 18.	Sezione Galleria Banchina: s_{yy} a fase 8	20
Figura 19.	Sezione Galleria Banchina: Spostamenti verticali u_Y a fase 8	20
Figura 20.	Sezione Galleria Banchina: Spostamenti totali $ u $ a fase 8	21
Figura 21.	Sezione Galleria Banchina: Profilo di subsidenza per fasi	21
Figura 22.	Edifici in prossimità dell'opera in oggetto e relativi Indici di Vulnerabilità' (01.MTL2T1A0D_FABGENT002)	22
Figura 23.	Consolidamento previsto per lo scavo delle gallerie di linea (MTL2T1A2DSTRSMOT002.2, sinistra), e cortina di micropali in acciaio in adiacenza di edifici.	27
Figura 24.	Diagramma di flusso relativo alla metodologia di progettazione flessibile	28
Figura 25.	Schema di monitoraggio (MTL2T1A2DPRCSPAT001) – Planimetria. Per le rimanenti sezioni, vedasi la tavola di riferimento	29
Figura 26.	Schema di monitoraggio – Sezione 2-2 (MTL2T1A2DPRCSPAT001). Per le rimanenti sezioni, vedasi la tavola di riferimento.	30

1 PREMESSA

1.1 Scopo

La presente relazione si inserisce nell'ambito della progettazione definitiva della Metropolitana Automatica di Torino – Linea 2, con lo scopo di valutare le subsidenze dovute alla realizzazione della **Stazione Pastrengo**, degli accessi e dei vani di ventilazione e di eventuali danni provocati sugli edifici limitrofi.

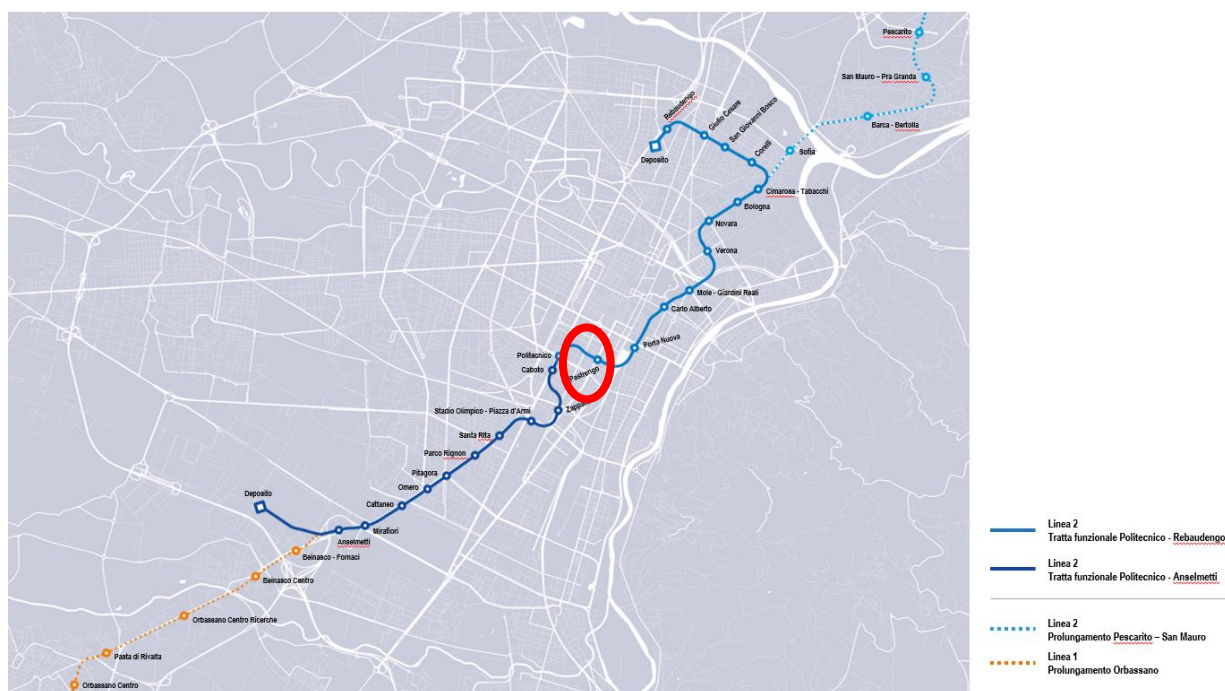


Figura 1. Key-plan della linea 2 – lotto funzionale 2 (Stazione Pastrengo)

Lo scavo all'interno di opere di sostegno, quali diaframmi o paratie, genera a tergo degli stessi un disturbo nel terreno che potrebbe comportare cedimenti in corrispondenza dei fabbricati. Tali effetti devono essere valutati e, ove necessario, mitigati in maniera preventiva, operando, quindi, prima dell'effettuarsi degli scavi e mantenendo sotto osservazione il loro evolversi attraverso un accurato monitoraggio dei fenomeni tensio-deformativi sul terreno e sulle strutture, ponendo eventualmente in opera le contromisure per ricondurre le varie situazioni entro i limiti previsti. Tutte le deformazioni delle strutture, compresi i cedimenti delle fondazioni, sono state considerate non solo per il loro effetto sul comportamento strutturale, ma anche per l'impatto sulle preesistenze. Il controllo delle deformazioni attraverso la corretta progettazione strutturale è di fondamentale importanza per ottenere la qualità del sistema.



1.2 Caratteristiche generali della stazione

La **Stazione Pastrengo** fa parte del Lotto 2 ed è una stazione a quattro livelli interrati con fondo scavo posto alla profondità di -31.85 m rispetto al piano di campagna. La stazione Pastrengo è collegata con una galleria di banchina che si unisce alla stazione con la galleria di linea. La galleria di banchina è di grandi dimensioni in condizioni di terreno prevalentemente soffice sotto falda freatica, di conseguenza questo tunnel sarà costruito sotto un terreno consolidato con colonne jet-grout, seguite da un rivestimento permanente in cemento armato gettato in opera per garantire la stabilità a lungo termine durante fase di servizio della stazione.

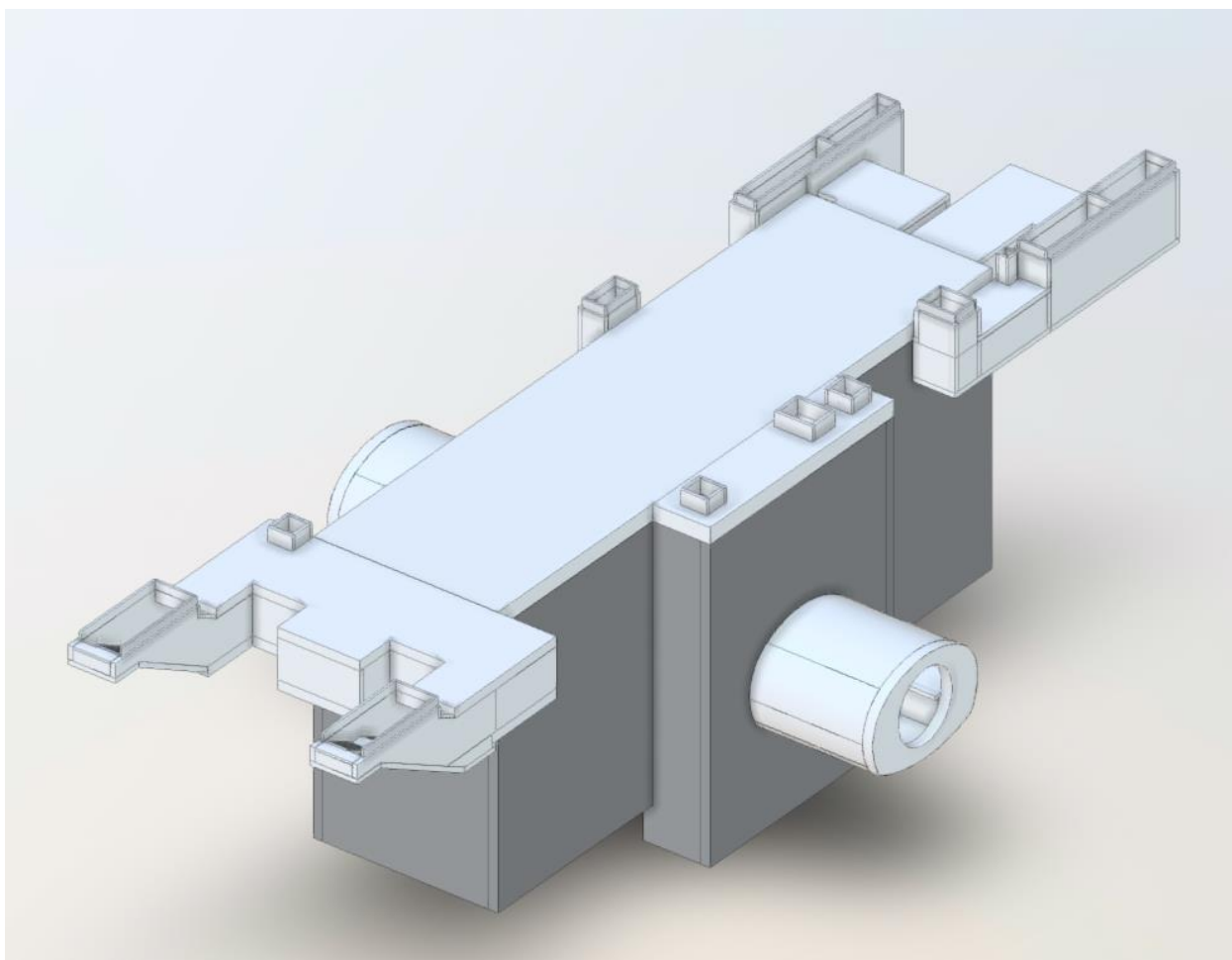


Figura 2. Modello 3d – Stazione Pastrengo



La stazione verrà realizzata attraverso la tecnologia esecutiva di tipo top-down caratterizzata da uno scavo sostenuto da diaframmi contrastati da solai permanenti e puntoni temporanei. In un secondo tempo verranno realizzate le gallerie a foro cieco di banchina e infine le opere legate alla ventilazione, la vasca antincendio e gli accessi.

2 DEFORMAZIONI E CEDIMENTI INDOTTI DAGLI SCAVI

2.1 Modellazione numerica e metodologia di calcolo

Il metodo di calcolo impiegato per valutare l'interazione terreno-struttura ed ottenere le sollecitazioni agenti sui rivestimenti primari e definitivi della galleria è quello degli elementi finiti (FEM) implementato tramite il codice commerciale Plaxis2D. Le condizioni al contorno ed iniziali sono realizzate tramite una maglia di elementi triangolari i cui confini sono stati collocati ad una distanza dalla sezione della galleria tale da non risentire degli effetti di bordo; il bordo superiore del modello coincide con il profilo topografico del terreno.

Per la stazione in oggetto le deformazioni sono state ottenute mediante modellazioni FEM *ad hoc*, modellando il suolo interferente con le strutture di stazione con modello di comportamento avanzato (Hardening soil). In tale modello, esattamente come in quello di Mohr Coulomb, la legge di resistenza è di tipo attritivo scandita dalla coesione c' e dall'angolo di attrito ϕ' . L'angolo di dilatanza ψ è posto uguale 0° . Attraverso il modello "Hardening Soil" è possibile descrivere con maggiore dettaglio il comportamento del terreno lontano dalle condizioni di rottura attraverso l'impostazione di tre parametri: E_{50} , modulo di deformabilità secante al 50% del carico di rottura, modulo edometrico E_{oed} e modulo di scarico e ricarico E_{ur} . Questo consente di avere dei riscontri in termini di cedimento più realistici, evitando gli effetti di sollevamento derivanti da analisi effettuate con il modello elastoplastico di Mohr Coulomb.

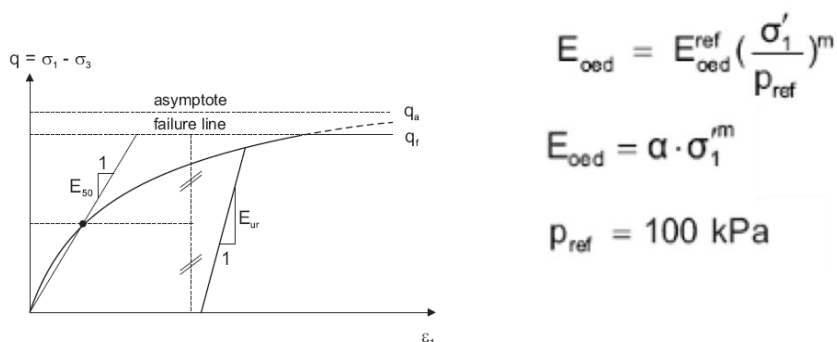


Figura 3. Modello costitutivo Hardening Soil



Per maggiori dettagli sulle modellazioni numeriche effettuate si rimanda ai report MTL2T1A2DSTRSPAR001 e MTL2T1A2DSTRSPAR004.

2.1.1 Calcolo delle deformazioni per C&C

Il modello geometrico è mostrato nella figura seguente e definisce la geometria della sezione considerata sia delle strutture che delle unità geotecniche considerate.

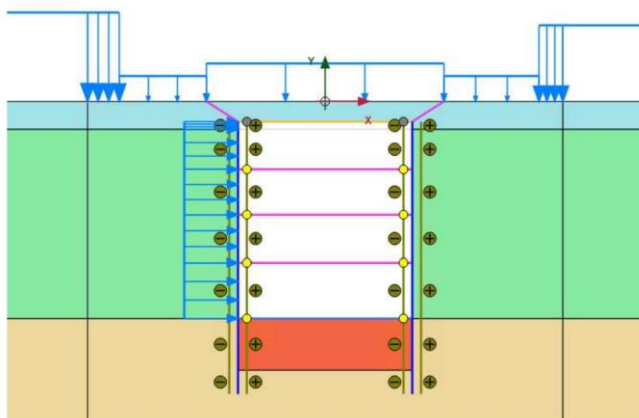


Figura 4. Modello geometrico corpo stazione (Cut&Cover)

La zona di influenza minima per una struttura scavata in Cut&Cover è rappresentata da un trapezio come illustrato nella figura seguente.

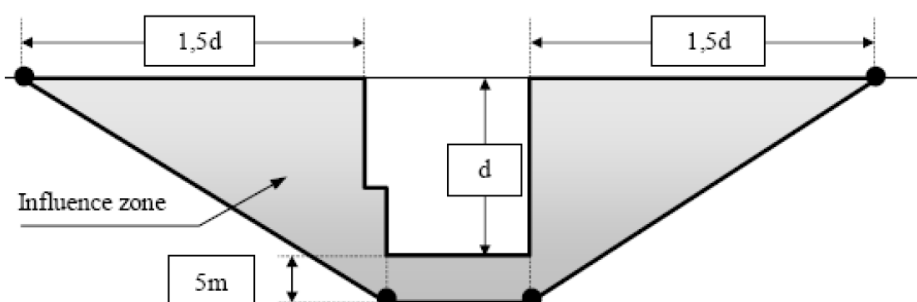


Figura 5. Zona di influenza minima per scavi in C&C

Le fasi di calcolo considerate per le sue sezioni di calcolo sono riportate nel report MTL2T1A2DSTRSPAR001.



2.1.2 Calcolo delle deformazioni per le gallerie di banchina

Il modello geometrico è mostrato nella figura seguente e definisce la geometria della sezione considerata sia delle strutture che delle unità geotecniche considerate.

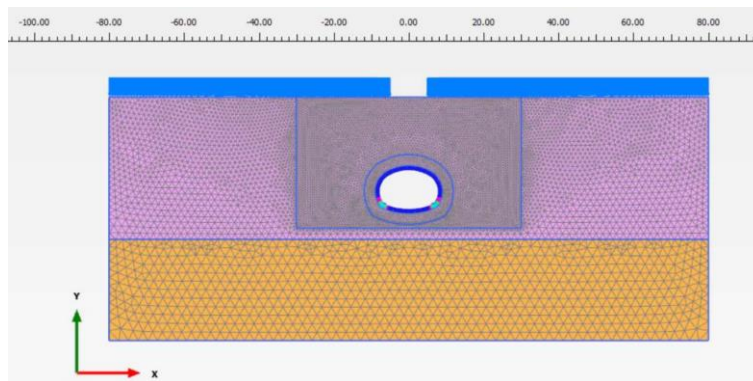


Figura 6. Modello geometrico galleria di banchina

Le fasi modellate nella simulazione sono le seguenti:

- I. Fase 0: condizione geostatica;
- II. Fase 1: attivazione del carico superficiale;
- III. Fase 2: attivazione del consolidamento;
- IV. Fase 3: situazione al fronte di scavo al scavo calotta ($\lambda=0.3$);
- V. Fase 4: situazione a 1m dal fronte con installazione del sostegno di prima fase – cls giovane ($\lambda=1.0$ al scavo calotta);
- VI. Fase 5: situazione al fronte di scavo al ribassamento ($\lambda=0.7$);
- VII. Fase 6: situazione a 1m dal fronte con installazione del sostegno di prima fase – cls giovane ($\lambda=1.0$ al ribassamento);
- VIII. Fase 7: getto in opera del rivestimento definitivo e disattivazione del consolidamento e sostegno prima fase per la condizione di lungo termine;
- IX. Fase 8: riduzione dei parametri di resistenza del terreno fino al 20% per tenere conto dell'effetto a lungo termine.

Per il dettaglio dei modelli numerici e delle fasi di calcolo si rimanda alle relative relazioni di calcolo delle gallerie banchine delle stazioni.

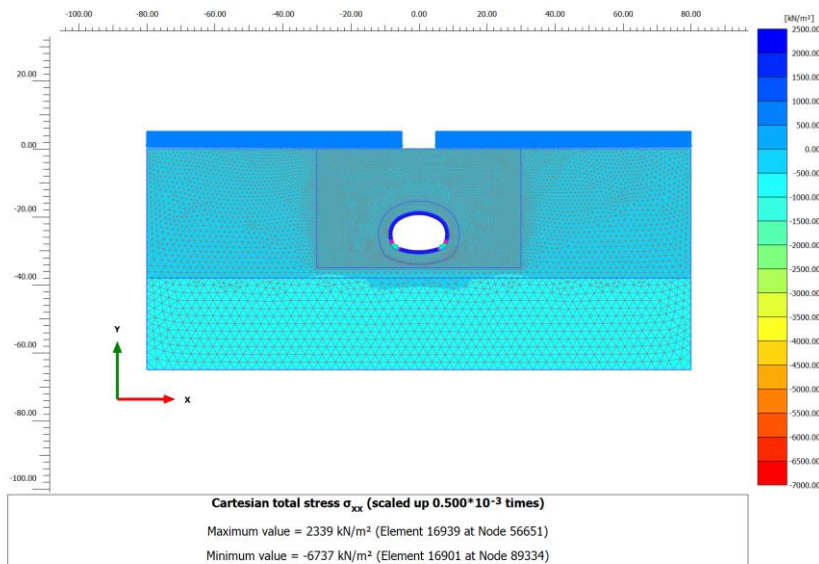


Figura 7. Esempio di output degli spostamenti indotti dallo scavo della galleria di banchina

2.2 Effetti indotti sugli edifici

La previsione degli effetti deformativi indotti dallo scavo con paratie o diaframmi, si basa sui risultati delle analisi numeriche.

Per quanto riguarda lo scavo del corpo stazione realizzato fra diaframmi in calcestruzzo e ciò che riguarda lo scavo degli accessi realizzato fra paratie di micropali, l'andamento dei cedimenti del terreno a tergo dell'elemento di confinamento dello scavo dipende essenzialmente dalla rigidezza dell'elemento strutturale stesso. Le deformazioni attese si ripercuotono sul terreno, corrispondendo ad una diminuzione del volume di terreno a tergo della paratia o del diaframma legato a quello teoricamente richiamato nell'area di scavo. Definite tutte le caratteristiche di forma e ampiezza del bacino di subsidenza, è necessario analizzare il fenomeno di interferenza tra i movimenti subiti dal terreno e le strutture in superficie.

Nella metodologia di analisi agli stati limite di esercizio, al fine di stabilire il potenziale danneggiamento cui è sottoposto un manufatto, le norme propongono dei valori ammissibili dei più comuni parametri d'identificazione dello stato deformativo di un edificio soggetto a cedimenti differenziali in fondazione. Parimenti è disponibile un'ampia documentazione bibliografica sull'argomento che permette di determinare, sulla base di osservazioni sperimentali ed esperienze condotte sul campo, delle categorie di danno delimitate da valori caratteristici dei parametri identificativi dello stato deformativo indotto. Per definire in maniera più precisa il comportamento degli edifici nei confronti della subsidenza e, quindi, per individuare i parametri che maggiormente



inducono il danneggiamento delle strutture, è necessario effettuare una prima distinzione sulla base della tipologia delle fondazioni:

- **fondazioni continue:** in questa categoria ricadono tutti gli edifici fondati su platea, su plinti in pietra, su palificate in legno e, in qualche caso, su palificate in calcestruzzo armato;
- **fondazioni isolate:** in questa categoria ricadono tutti gli edifici fondati su plinti in calcestruzzo armato, e, in qualche caso, su palificate in calcestruzzo armato.

È quindi necessario dapprima individuare i parametri identificativi dello stato deformativo indotto in funzione della tipologia strutturale e delle fondazioni, e associare a questi delle "categorie di rischio" delimitate da valori caratteristici. In sintesi, questi parametri identificativi possono essere identificati secondo i seguenti punti:

- per strutture caratterizzate da *fondazioni continue*, il parametro di valutazione del danno è dato dalla **deformazione massima di trazione** subita dall'edificio (ϵ_{max}), che è funzione dell'inflessione relativa massima (Δ_{max}) subita dall'edificio. La deformazione massima di trazione deve essere confrontata con la deformazione limite (ϵ_{lim}) di trazione fornita dalle classificazioni.
- per strutture su *fondazioni isolate* il danneggiamento è causato principalmente dal cedimento differenziale fra i plinti. I parametri più importanti, in questo caso, sono la **distorsione angolare massima** β_{max} e il cedimento massimo S_{max} subito dall'edificio

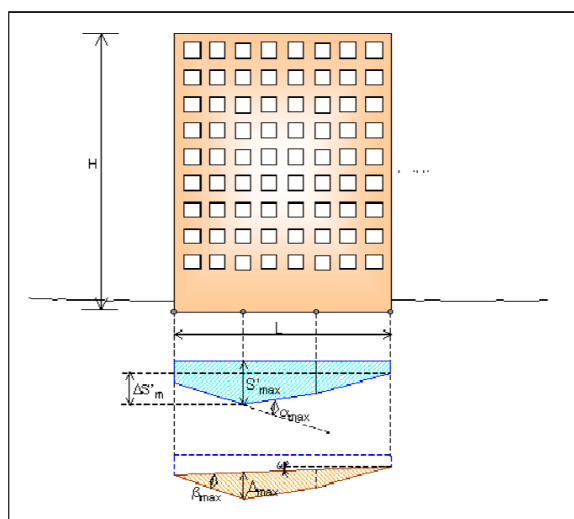


Figura 8. Principali parametri per la valutazione del danneggiamento degli edifici

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 2: Bologna-Politecnico
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A2DPRCSPAR001-0-0

Per ciò che riguarda l'entità del danneggiamento, i danni indotti possono essere classificati secondo le seguenti categorie:

- *danni estetici*: riguardano lievi fessurazioni o dislocamenti in tamponamenti, pareti divisorie, pavimentazioni, e finiture in genere. Questi effetti possono essere tollerati in quanto eventualmente facilmente riparabili, soprattutto per fabbricati ordinari;
- *danni funzionali*: riguardano la perdita di funzionalità di alcune parti della struttura o di strumentazioni in essa alloggiate, senza che sia messa in pericolo l'integrità o la sicurezza della struttura stessa. L'interruzione di funzionalità può, però, avere gravi conseguenze commerciali sulla vita dell'immobile;
- *danni strutturali*: riguardano la fessurazione (strutture in c.a.) o l'eccessiva deformazione (strutture in muratura portante) di elementi strutturali. L'entità delle deformazioni subite dall'edificio o parte di esso può portare al collasso di singoli elementi strutturali, alla connessione di questi e, al limite, al collasso dell'intero edificio.

2.2.1 Classificazioni di danno e concetto di rischio

Per le strutture aventi tipologia di *fondazione* definita come *continua*, i valori di riferimento per il parametro di valutazione del possibile danneggiamento (la deformazione limite di trazione) sono forniti dalla classificazione di Burland (classificazione di rischio 1, 1977), che individua diverse categorie di rischio, in funzione dello stato fessurativo della struttura. La seguente tabella associa ad ogni categoria di rischio una descrizione visiva del potenziale danno alla struttura.

Tabella 1. Classificazione del danno secondo Burland

CATEGORIA DI RISCHIO	TIPO DI DANNO	DESCRIZIONE DEL DANNO
0 (estetico)	Irrilevante, non visibile	Crepe a "corda di crine".
1 (estetico)	Molto lieve	Crepe leggere. Eventuali fessurazioni isolate all'interno degli edifici. Crepe nei tavolati in laterizio osservabili con attente ispezioni.
2 (estetico)	Lieve	Molte fessurazioni all'interno dell'edificio: crepe visibili, possibili infiltrazioni dovute all'umidità. Le porte e le finestre possono svergolarsi.
3 (estetico/funzionale)	Medio	Danni a porte e finestre. Danni da infiltrazioni di umidità. Possibili danneggiamenti alle tubature.
4 (funzionale)	Elevato	Onde e rigonfiamenti sulle pavimentazioni e sui muri. Perdita della capacità portante delle travature.
5 (strutturale)	Molto elevato	Notevole perdita della capacità portante delle travature. Pericolo d'instabilità strutturali.

Per gli edifici caratterizzati da *fondazioni isolate*, è la classificazione di Rankine (classificazione di rischio 2, 1988) che stabilisce i limiti base in funzione dei parametri di riferimento cedimento e

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 2: Bologna-Politecnico
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A2DPRCSPAR001-0-0

deformazione angolare e quindi permette l'individuazione delle diverse categorie di rischio. In tabella è presentata la descrizione del danno per tale classificazione.

Tabella 2. Classificazione del danno secondo Rankine

CATEGORIA DI RISCHIO	TIPO DI DANNO	DESCRIZIONE DEL DANNO
1 (estetico)	Irrilevante, non visibile	Improbabile danno superficiale.
2 (estetico)	Lieve	Possibile danno superficiale senza conseguenze strutturali
3 (funzionale)	Medio	Probabile danno superficiale e possibile danno strutturale ed alle tubature
4 (strutturale)	Elevato	Probabile danno strutturale ed alle tubature

Le classificazioni utilizzate per la valutazione del rischio di danneggiamento potenziale (sia quella di Burland che quella di Rankine), si riferiscono agli effetti provocati dalla subsidenza su edifici in buone condizioni. Le modifiche ai valori di riferimento in funzione delle condizioni degli edifici sono apportate sulla base del parametro Indice di Vulnerabilità dell'edificio. Nel seguito sono riportate le classificazioni di rischio con i relativi valori dei parametri limiti di riferimento per le varie categorie, integrate in funzione della vulnerabilità caratteristica degli edifici.

2.2.2 Indice di vulnerabilità

La realizzazione di strutture sotterranee può causare nell'edificio modi di deformazione differenti da quelli che esso più comunemente sperimenta e che sono relazionabili ai cedimenti del terreno di fondazione indotti dal peso proprio della struttura e dall'imposizione dei carichi strutturali.

Pertanto, le nuove deformazioni potenzialmente indotte dalla realizzazione degli scavi vanno a sommarsi alle deformazioni preesistenti, tanto che una piccola deformazione addizionale può provocare effetti critici non proporzionali alla sua entità se le deformazioni preesistenti hanno già raggiunto un livello molto prossimo alla soglia critica.

Risulta quindi indispensabile disporre di una quantificazione, sebbene approssimata ed empirica, delle condizioni preesistenti dell'immobile. A tale scopo si definisce vulnerabilità una caratteristica intrinseca dell'edificio (dipendente dalla sua storia ma indipendente dai fattori esterni che possono indurre cedimenti differenziali a quota delle sue fondazioni), che esprime di quanto l'edificio si allontana dalle condizioni di perfetta conservazione e, quindi, quanto è vulnerabile. Maggiore risulta la vulnerabilità dell'edificio, minore è la sua capacità di tollerare ulteriori deformazioni indotte da eventi esterni.

La vulnerabilità viene espressa attraverso un indice, che prende appunto il nome di indice di vulnerabilità IV.


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 2: Bologna-Politecnico
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A2DPRCSPAR001-0-0

Tabella 3. Indice di vulnerabilità

INDICE DI VULNERABILITÀ	GRADO DI VULNERABILITÀ
0-20	trascurabile
20-40	basso
40-60	lieve
60-80	moderato
80-100	alto

L'indice di vulnerabilità viene utilizzato per stabilire un fattore riduttivo dei valori limite dei parametri di controllo che compaiono nelle classificazioni di rischio, le quali sono generalmente riferite a fabbricati in buono stato di conservazione, proprio per tenere in conto la particolarità della storia di ogni edificio che, nel corso del tempo, ne può ridurre la capacità di risposta. In funzione della classe di appartenenza di I_v , si stabilisce un coefficiente riduttivo (FR) dei valori limite dei parametri di controllo (ε_{lim} , Δ_{max} , β_{max} , S_{max}) variabile da 1.0 a 2.0.

Al fine della definizione del livello soglia si stabilisce che tale danno non possa essere di natura strutturale o che non possa in qualche modo ledere la funzionalità degli impianti presenti, ovvero si accetta che l'edificio subisca al massimo un livello di danno definito 'lieve' (Categoria 2).

Tabella 4. Correzione degli intervalli di valori del parametro di controllo della Classificazione di Rischio attraverso la vulnerabilità I_v caratteristica dell'edificio



Indice di Vulnerabilità dell'edificio

		IRRILEVANTE 0<lv<2 Fr=1.0	BASSO 2<lv<4 Fr=1.25	MEDIO 4<lv<6 Fr=1.5	ALTO 6<lv<8 Fr=1.75	ELEVATO 8<lv<10 Fr=2.0
		Parametri di controllo				
Categorie di Rischio	1	S _{max} [mm] β _{lim} [%] <10 <1/500	S _{max} [mm] β _{lim} [%] <8 <1/625	S _{max} [mm] β _{lim} [%] <6.7 <1/750	S _{max} [mm] β _{lim} [%] <5.7 1/875	S _{max} [mm] β _{lim} [%] <5 <1/1000
		ε _{lim} [%] min max 0,000 0,050 0,050 0,075	ε _{lim} [%] min max 0,000 0,040 0,040 0,060	ε _{lim} [%] min max 0,000 0,033 0,033 0,050	ε _{lim} [%] min max 0,000 0,029 0,029 0,043	ε _{lim} [%] min max 0,000 0,025 0,025 0,038
	2	S _{max} [mm] β _{lim} [%] 10-50 1/200	S _{max} [mm] β _{lim} [%] 8-40 1/250	S _{max} [mm] β _{lim} [%] 6.7-33.3 1/300	S _{max} [mm] β _{lim} [%] 5.7-28.6 1/350	S _{max} [mm] β _{lim} [%] 5-25 1/400
		ε _{lim} [%] min max 0,075 0,150	ε _{lim} [%] min max 0,060 0,120	ε _{lim} [%] min max 0,050 0,100	ε _{lim} [%] min max 0,043 0,086	ε _{lim} [%] min max 0,038 0,075
	3	S _{max} [mm] β _{lim} [%] 50-75 1/50	S _{max} [mm] β _{lim} [%] 40-60 1/62.5	S _{max} [mm] β _{lim} [%] 33.3-50 1/75	S _{max} [mm] β _{lim} [%] 28.6-42.9 1/87.5	S _{max} [mm] β _{lim} [%] 25-37.5 1/100
		ε _{lim} [%] min max 0,150 0,300	ε _{lim} [%] min max 0,120 0,240	ε _{lim} [%] min max 0,100 0,200	ε _{lim} [%] min max 0,086 0,171	ε _{lim} [%] min max 0,075 0,150
	4	S _{max} [mm] β _{lim} [%] >75 >1/50	S _{max} [mm] β _{lim} [%] >60 >1/62.5	S _{max} [mm] β _{lim} [%] >50 >1/75	S _{max} [mm] β _{lim} [%] >42.9 >1/87.5	S _{max} [mm] β _{lim} [%] >37.5 >1/100
		ε _{lim} [%] min >0.300	ε _{lim} [%] min >0.240	ε _{lim} [%] min >0.200	ε _{lim} [%] min >0.171	ε _{lim} [%] min >0.150

2.3 Sezioni di studio

La stazione è interessata dalla presenza di edifici posti a differente distanza rispetto alle opere di contenimento. Di seguito è indicata la sezione critica oggetto dello studio numerico. L'andamento degli spostamenti indotti in superficie dal corpo stazione e dagli accessi tipologici, sono mostrati e descritti nel capitolo 3.



CITTA' DI TORINO

Metropolitana di Torino - Linea 2
Tratta: Politecnico-Rebaudengo
Lotto Costruttivo 2: Bologna-Politecnico

Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi,
opere di presidio e sistemi di monitoraggio

MTL2T1A2DPRCSPAR001-0-0

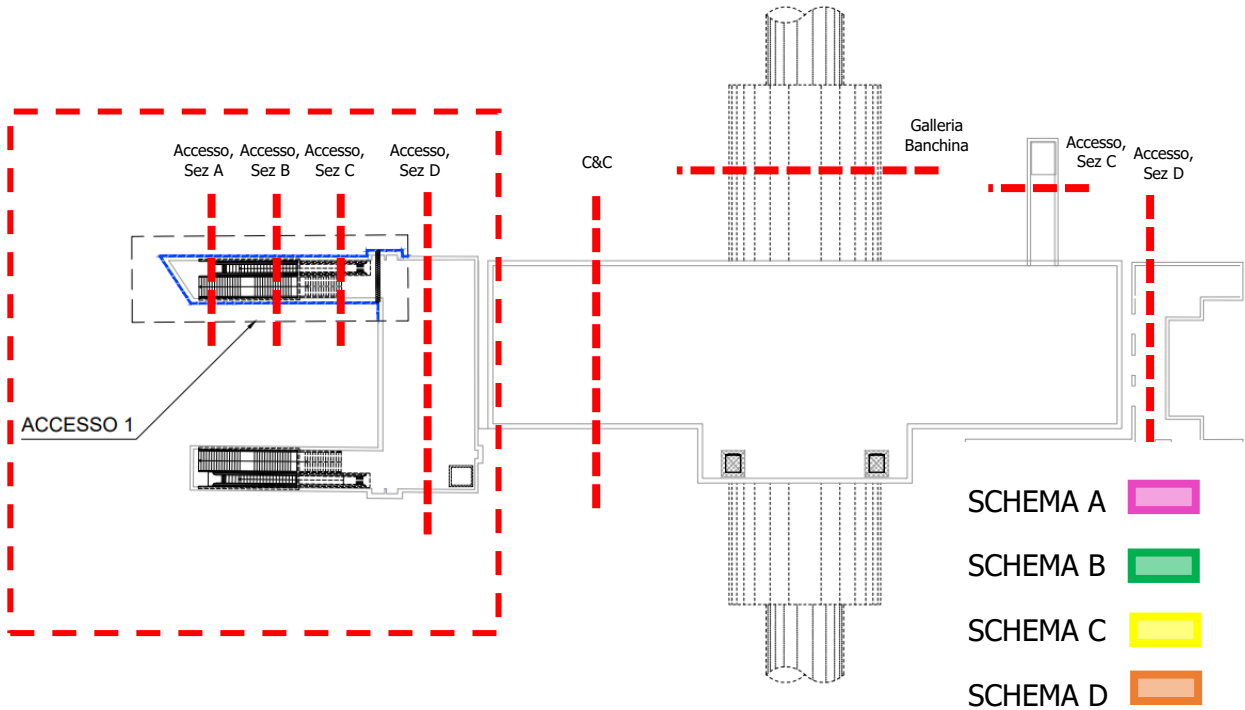


Figura 9. Sezioni di analisi della stazione

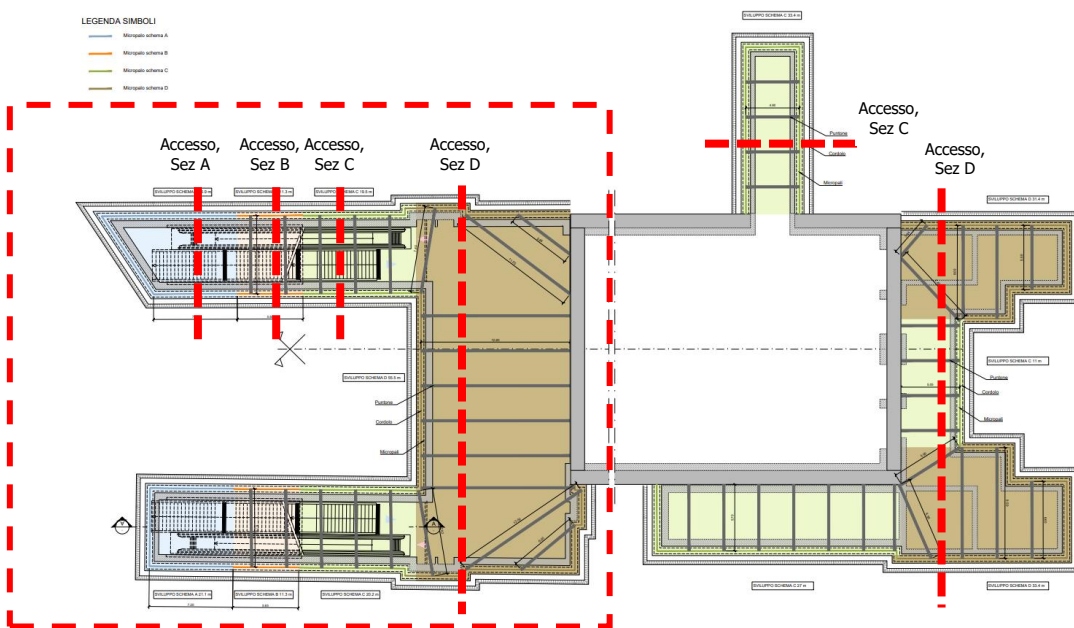


Figura 10. Tipologici delle sezioni di scavo degli accessi



2.4 Contesto geologico/geotecnico

Il modello numerico della sezione di studio relativa al corpo stazione, le fasi di scavo e supporto, le caratteristiche geometriche e meccaniche e le condizioni di carico sono state dettagliatamente descritte nei report MTL2T1A2DSTRSPAR001 e MTL2T1A2DSTRSPAR004.

Il deposito di terreno è caratterizzato da una coltre superficiale di 1.5 metri denominata *Unità 1* posta al di sopra di un materiale ghiaioso sabbioso denominato *Unità 2*.

Il livello di falda considerato per le fasi di scavo a breve termine è di -15.0 m dal piano campagna. I parametri meccanici utilizzati per definire il legame costitutivo delle due unità sono riportati di seguito:

Tabella 5. Parametri Hardening-Soil

	γ	φ	c	ν_{ur}	E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}	m
	[kN/m ³]	[°]	[kPa]	[-]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	
U1	19	29	0	0.3	15	15	45	0.5
U2	19	36	10	0.3	150	150	450	0.5

Vale la pena evidenziare che per tenere in conto degli effetti di *fluage* a lungo termine, a favore di sicurezza, il modulo di Young del cls è stato assunto 2.75 volte inferiore del valore originale durante tutte le operazioni di scavo. Nella tabella seguente vengono riassunti i carichi applicati al modello.

Tabella 6. Carichi assunti per il modello numerico.

Tipologia carico	Valore	
Peso strutture in calcestruzzo	25	kN/m ³
Sovraccarico superficiale	20	kPa
Carico edifici	10	kPa/piano



3 DEFORMAZIONI E CEDIMENTI INDOTTI DAGLI SCAVI

3.1 Deformazioni indotte dallo scavo C&C del corpo stazione

Di seguito sono stati riportati gli spostamenti superficiali in direzione verticale e orizzontale ottenuti per la sezione di studio del corpo stazione.

I risultati dello studio numerico mostrano che gli spostamenti verticali a tergo delle paratie di micropali raggiungono valori di 20 mm mentre quelli orizzontali fino a 12 mm.

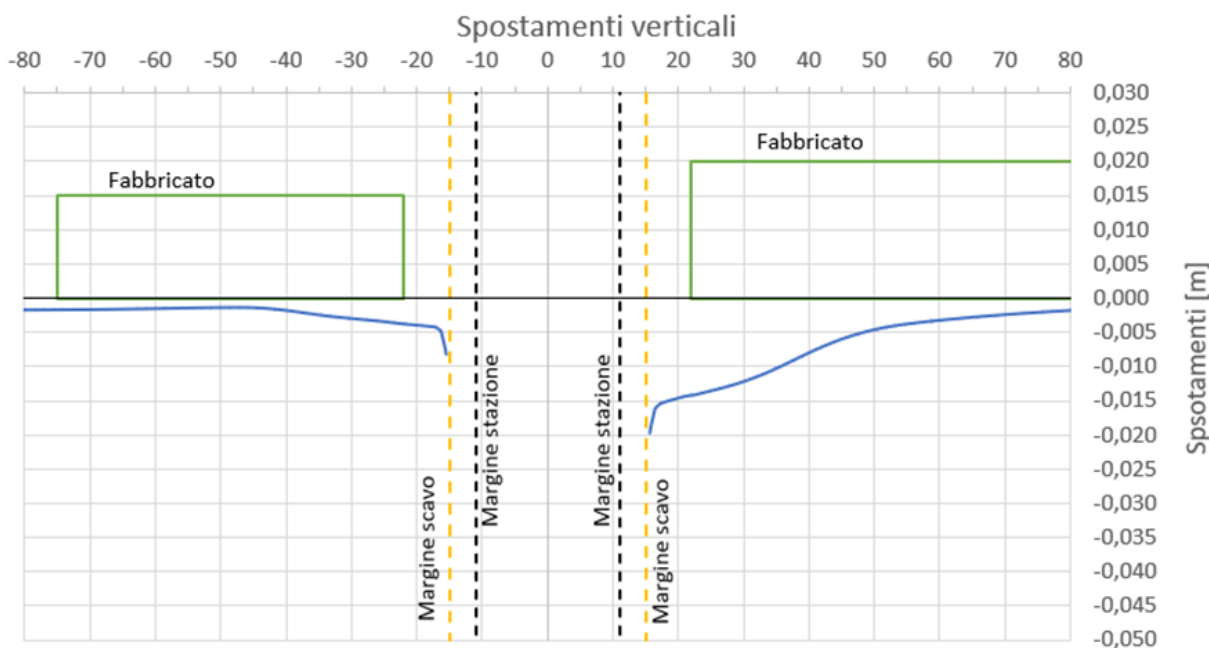


Figura 11. Spostamenti verticali

I risultati si riferiscono al caso di sbancamento del terreno per la realizzazione delle paratie del corpo stazione in coerenza con la modellazione numerica (si veda Figura 4). Nel caso di realizzazione di micropali dietro ai diaframmi si considerano i medesimi risultati in via cautelativa.

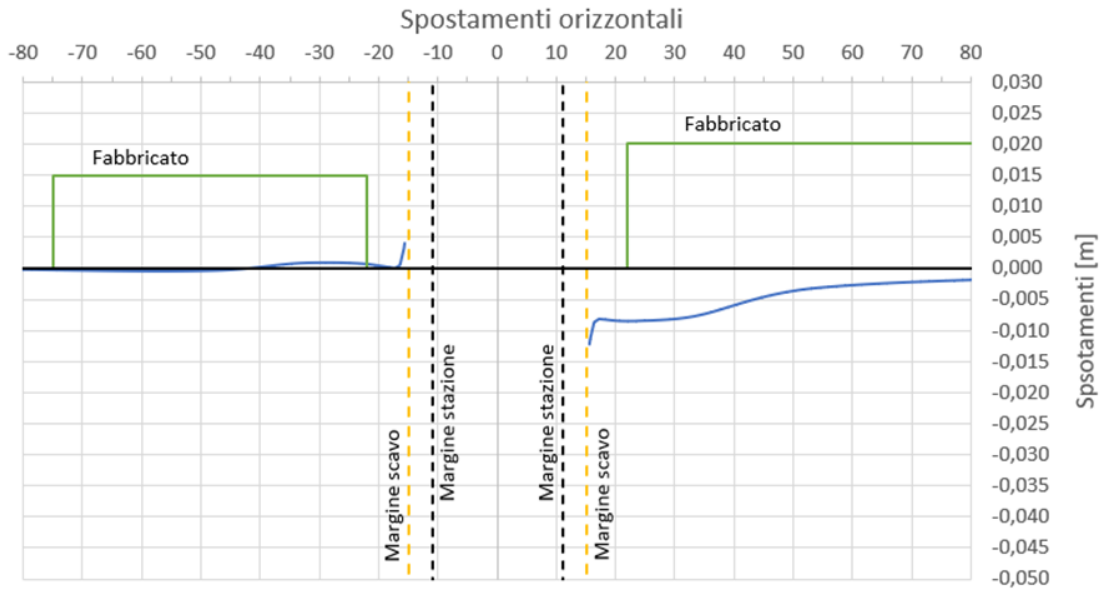


Figura 12. Spostamenti orizzontali

3.2 Deformazioni indotte dallo scavo degli accessi di stazione

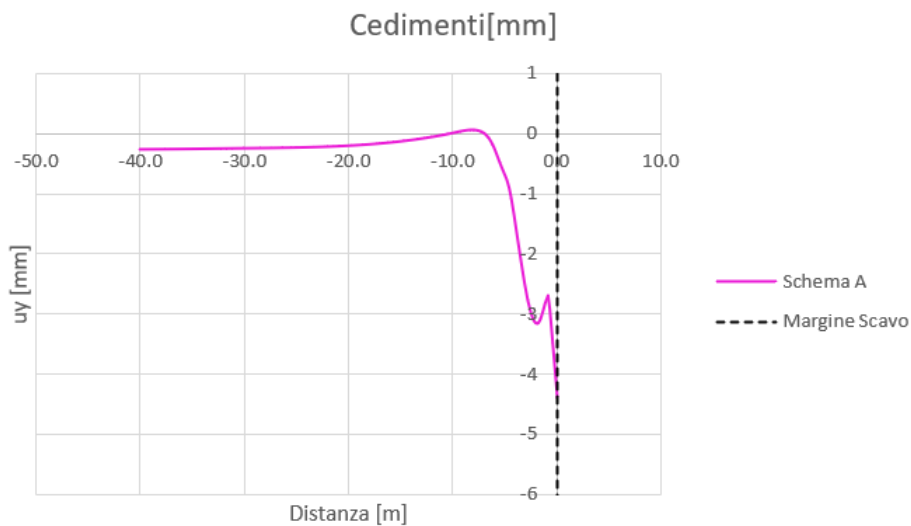


Figura 13. Subsidenza dovuta alla realizzazione dei micropali degli accessi – Schema A

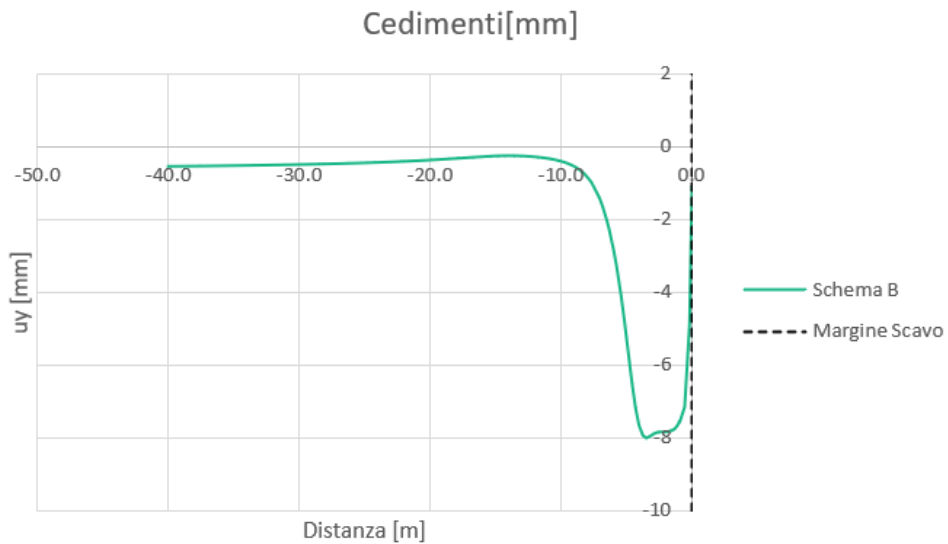


Figura 14. Subsidenza dovuta alla realizzazione dei micropali degli accessi – Schema B

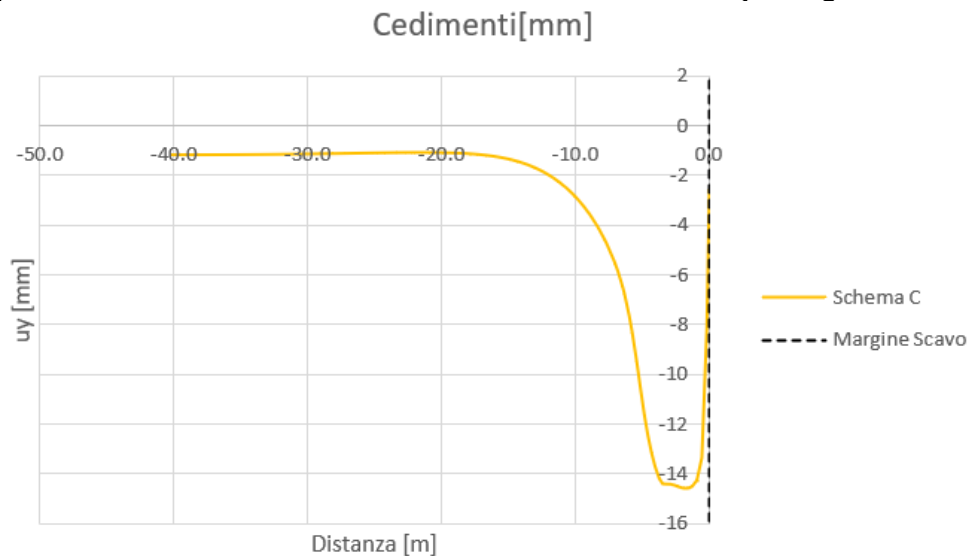


Figura 15. Subsidenza dovuta alla realizzazione dei micropali degli accessi – Schema C

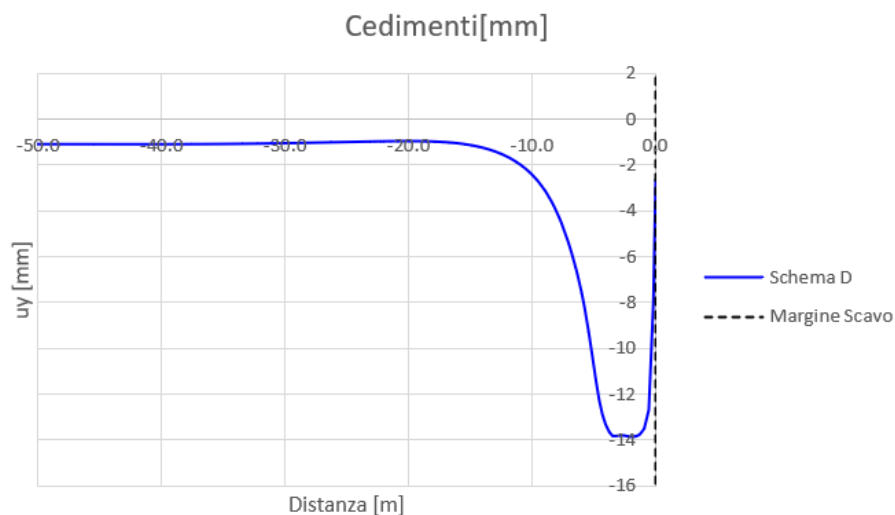


Figura 16. Subsidenza dovuta alla realizzazione dei micropali degli accessi – Schema D

3.3 Deformazioni indotte dallo scavo delle gallerie di banchina

Nelle figure seguenti sono rappresentate lo stato tensionale verticali e orizzontali e anche gli spostamenti del terreno derivanti da scavi sequenziale.

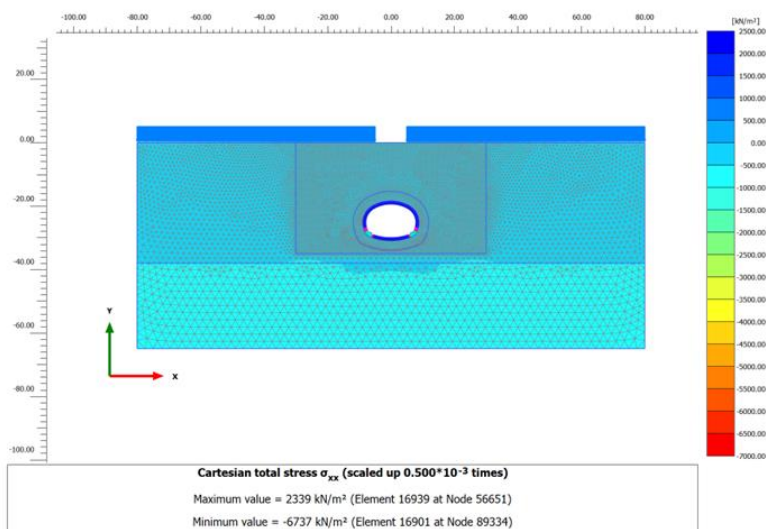


Figura 17. Sezione Galleria Banchina: s_{xx} , a fase 8

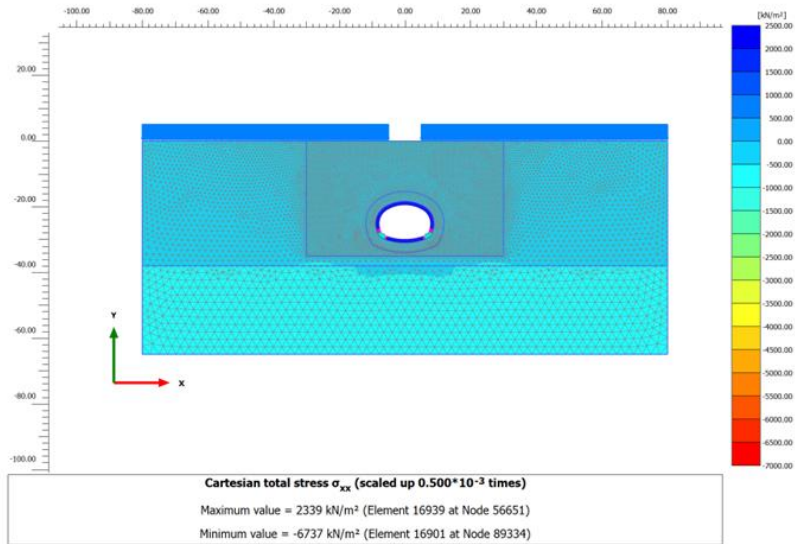


Figura 18. Sezione Galleria Banchina: σ_{yy} a fase 8

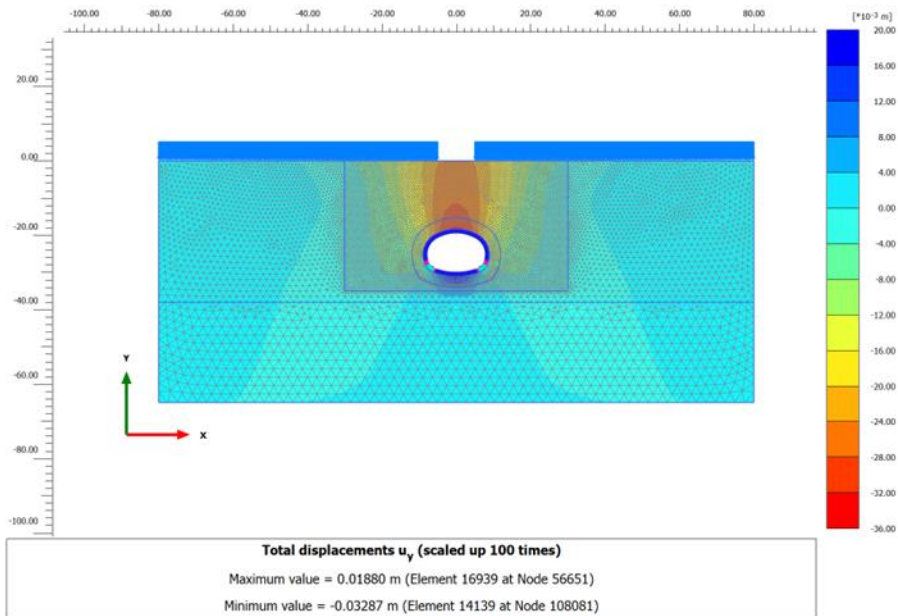


Figura 19. Sezione Galleria Banchina: Spostamenti verticali u_y a fase 8

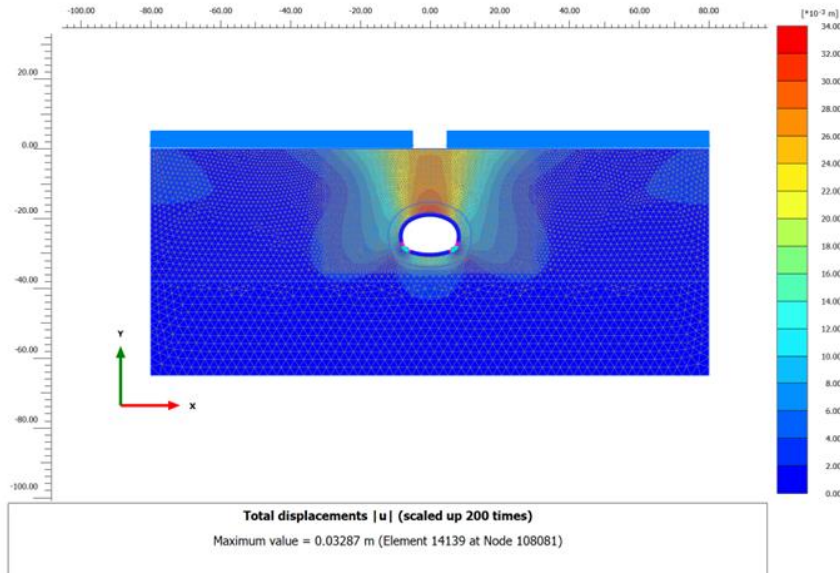


Figura 20. Sezione Galleria Banchina: Spostamenti totali $|u|$ a fase 8

Ground Settlement Profile - Analysis Sec: Stazione Pastrengo

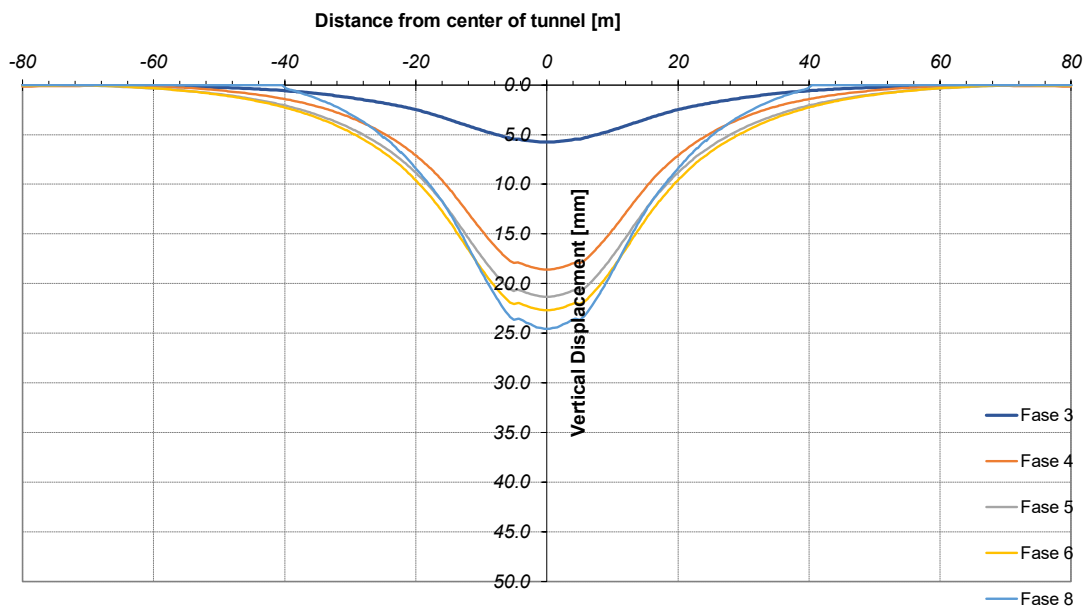


Figura 21. Sezione Galleria Banchina: Profilo di subsidenza per fasi



3.4 Effetti sugli edifici

Di seguito sono riportati i risultati in termini di effetti sugli edifici limitrofi allo scavo della stazione. Gli edifici di maggiore attenzione per la prossimità agli scavi sono i seguenti: PAPAN02, PAPAN03, POPA24, POPA25. Tutti essi si trovano in condizioni di Vulnerabilità Lieve (colore giallo).

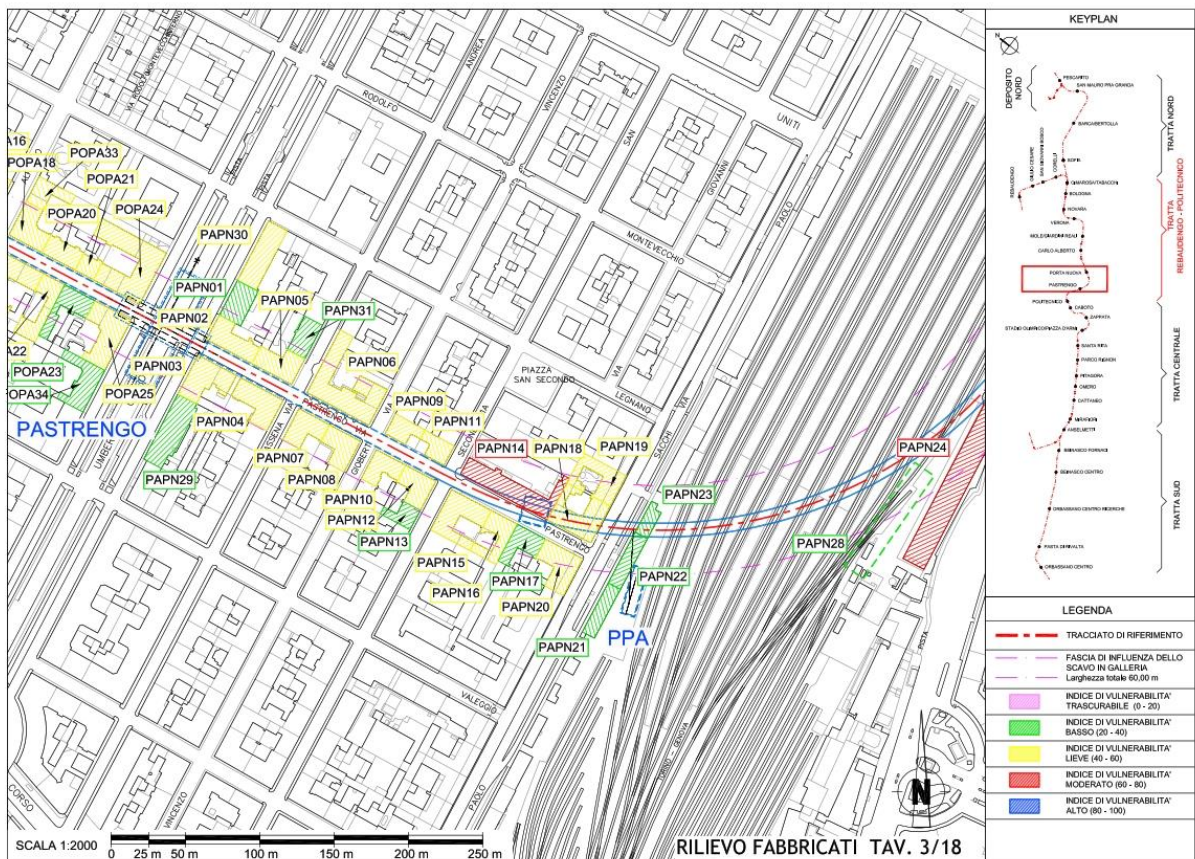
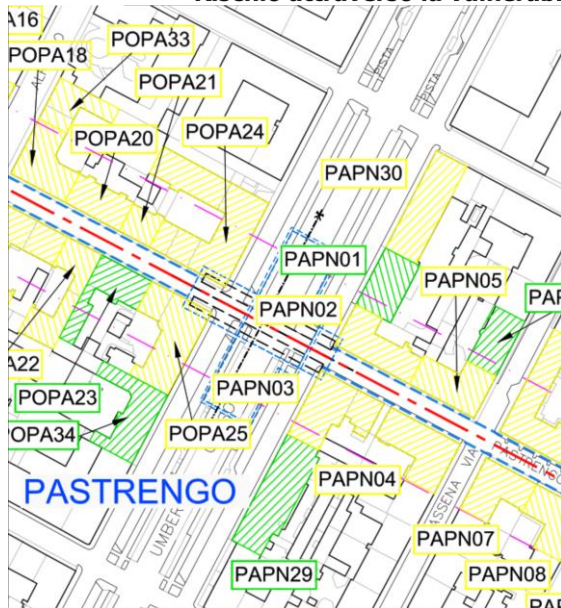


Figura 22. Edifici in prossimita' dell'opera in oggetto e relativi Indici di Vulnerabilita' (01.MTL2T1A0D_FABGENT002)



Tabella 7. Correzione degli intervalli di valori del parametro di controllo della Classificazione di Rischio attraverso la vulnerabilità I_v caratteristica dell'edificio



INDICE DI VULNERABILITÀ	GRADO DI VULNERABILITÀ
0-20	trascurabile
20-40	basso
40-60	lieve
60-80	moderato
80-100	alto

Indice di Vulnerabilità dell'edificio

Categorie di Rischio	IRRILEVANTE	BASSO	MEDIO	ALTO	ELEVATO
	$0 < I_v < 2$	$2 < I_v < 4$	$4 < I_v < 6$	$6 < I_v < 8$	$8 < I_v < 10$
	Fr=1.0	Fr=1.25	Fr=1.5	Fr=1.75	Fr=2.0
	Parametri di controllo				
	S_{max} [mm] β_{lim} [%]	S_{max} [mm] β_{lim} [%]	S_{max} [mm] β_{lim} [%]	S_{max} [mm] β_{lim} [%]	S_{max} [mm] β_{lim} [%]
1	< 10 $< 1/500$	< 8 $< 1/625$	< 6.7 $< 1/750$	< 5.7 $1/875$	< 5 $< 1/1000$
	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]
	min max	min max	min max	min max	min max
	0,000 0,050	0,000 0,040	0,000 0,033	0,000 0,029	0,000 0,025
	0,050 0,075	0,040 0,060	0,033 0,050	0,029 0,043	0,025 0,038
2	$10-50$ $1/200$	$8-40$ $1/250$	$6.7-33.3$ $1/300$	$5.7-28.6$ $1/350$	$5-25$ $1/400$
	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]
	min max	min max	min max	min max	min max
	0,075 0,150	0,060 0,120	0,050 0,100	0,043 0,086	0,038 0,075
3	$50-75$ $1/50$	$40-60$ $1/62.5$	$33.3-50$ $1/75$	$28.6-42.9$ $1/87.5$	$25-37.5$ $1/100$
	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]
	min max	min max	min max	min max	min max
	0,150 0,300	0,120 0,240	0,100 0,200	0,086 0,171	0,075 0,150
4	> 75 $> 1/50$	> 60 $> 1/62.5$	> 50 $> 1/75$	> 42.9 $> 1/87.5$	> 37.5 $> 1/100$
	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]	ϵ_{lim} [%]
	min	min	min	min	min
	> 0.300	> 0.240	> 0.200	> 0.171	> 0.150



CITTA' DI TORINO

Metropolitana di Torino - Linea 2
Tratta: Politecnico-Rebaudengo
Lotto Costruttivo 2: Bologna-Politecnico

Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi,
opere di presidio e sistemi di monitoraggio

MTL2T1A2DPRCSPAR001-0-0

**Tabella 8. Classificazione di Rischio attraverso la vulnerabilità Iv caratteristica dell'edificio
(06_MTL2T1A0DFABGENK001.1 a 06_MTL2T1A0DFABGENK001.4)**



PAPN02: I.V.=45 (LIEVE)



PAPN03: I.V.=44 (LIEVE)



POPA24: I.V.=52 (LIEVE)

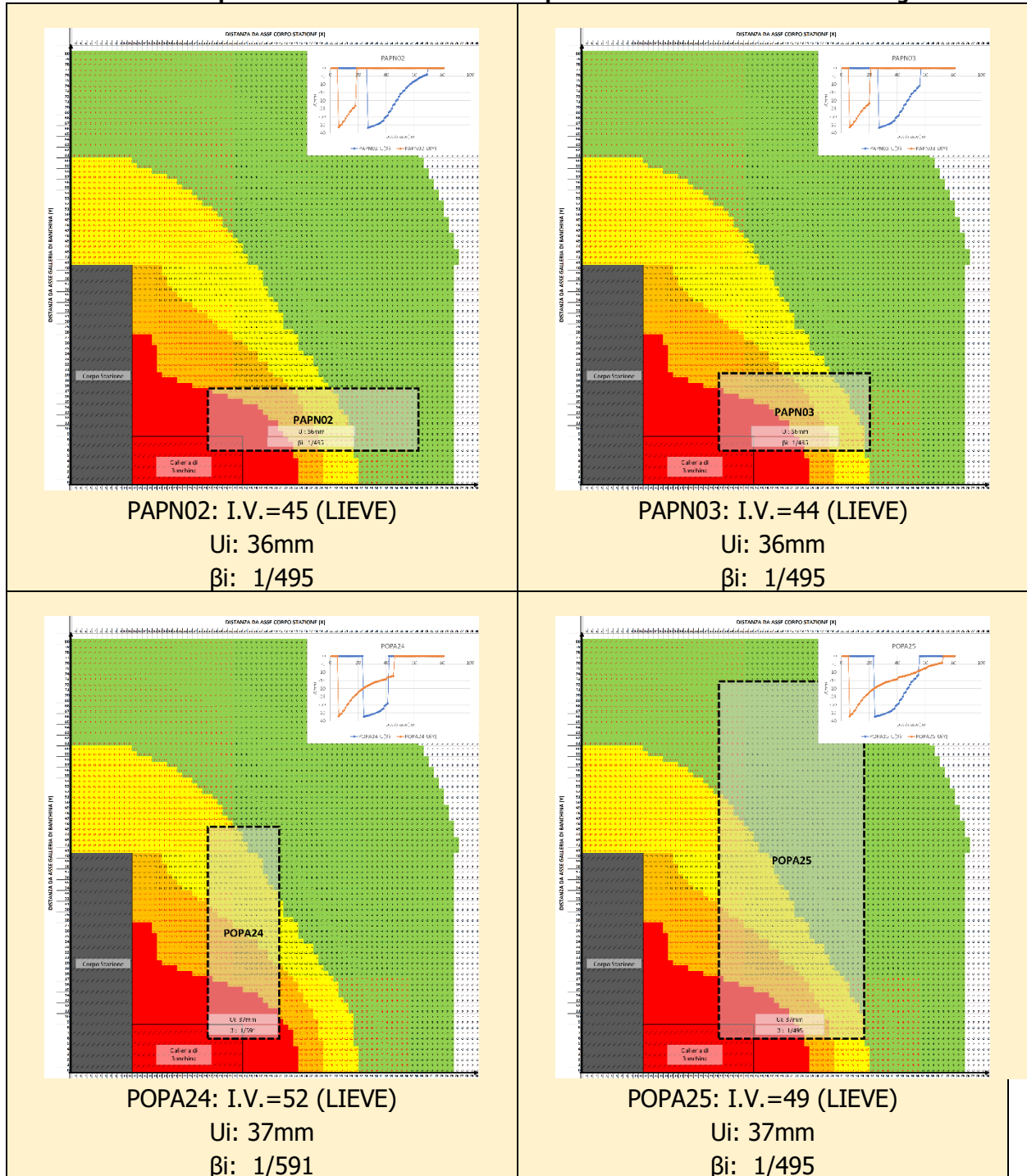


POPA25: I.V.=49 (LIEVE)

Al fine di stabilire il potenziale danno a cui sono sottoposti i manufatti gli spostamenti verticali massimi del piano di fondazione e le distorsioni degli edifici sono stati confrontati con i valori limite. La combinazione degli effetti dello scavo del corpo stazione (in C&C) e delle gallerie di banchina (in scavo convenzionale e foro cieco) suppone la condizione di maggior criticità per gli edifici in prossimità. Gli effetti della costruzione degli accessi sono risultati tutti trascurabili rispetto ai restanti cedimenti.



Tabella 9. Spostamenti verticali massimi del piano di fondazione e distorsioni degli edifici



 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 2: Bologna-Politecnico
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A2DPRCSPAR001-0-0

Tabella 10. Spostamenti verticali massimi del piano di fondazione e distorsioni degli edifici e confronto con i valori limite

Edificio	S_{max}	β_{max}	S_i	β_i	Note
PAPN02	33.3 mm	1/300	36 mm	$\approx 1/500$	Considerati gli effetti dello scavo della stazione C&C e della galleria di banchina. Trascurati gli altri effetti.
PAPN03	33.3 mm	1/300	36 mm	$\approx 1/500$	Considerati gli effetti dello scavo della stazione C&C e della galleria di banchina. Trascurati gli altri effetti.
POPA24	33.3 mm	1/300	37 mm	$< 1/500$	Considerati gli effetti dello scavo della stazione C&C e della galleria di banchina. Trascurati gli altri effetti.
POPA25	33.3 mm	1/300	37 mm	$\approx 1/500$	Considerati gli effetti dello scavo della stazione C&C e della galleria di banchina. Trascurati gli altri effetti.
<p>S_{max}, β_{max}: valori limite dei parametri di controllo (cedimenti, distorsioni) in funzione dell'indice di vulnerabilità I_v e della Categoria di danno ammissibile.</p> <p>S_i, β_i: valori massimi dei parametri di controllo (cedimenti, distorsioni) in corrispondenza di detti edifici</p>					

Combinando in modo conservativo i differenti contributi di cedimento e con le assunzioni relative agli indici di vulnerabilità degli edifici, si superano (circa 3-4 mm) i limiti ammessi (Max: Categoria 2) negli edifici analizzati. Pertanto, si raccomanda l'adozione di opere di presidio.

4 INDICAZIONI SULLE OPERE DI PRESIDIO E SUL SISTEMA DI MONITORAGGIO DURANTE LE FASI COSTRUTTIVE

4.1 Opere di presidio degli edifici

Come misura di mitigazione a presidio dei fabbricati PAPN03, PAPN04, POPA24 e POPA25 si raccomanda la realizzazione delle colonne jet-grouting non interferenti con lo scavo (n.2 per ogni lato) armate con tubi metallici.

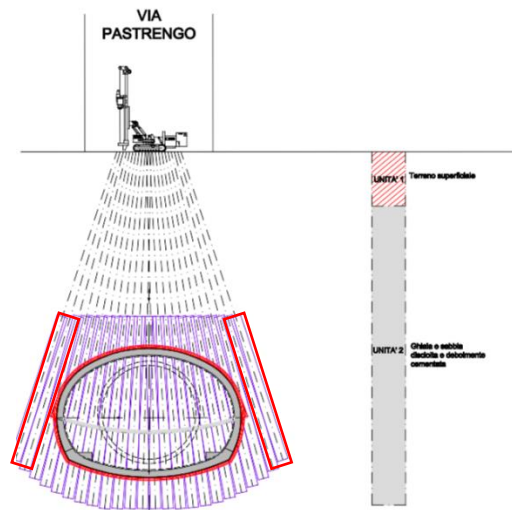


Figura 23. Consolidamento previsto per lo scavo delle gallerie di linea

4.2 Monitoraggio corpo di stazione e accessi


L'entità reale dei fenomeni deformativi che si possono verificare durante la realizzazione dell'opera dipende in maniera considerevole dalle variabilità locali della situazione geologico-geotecnica e, soprattutto, dalle reali modalità esecutive adottate. Per tale ragione deve essere messo in opera un adeguato sistema di monitoraggio, che permetta il confronto della situazione teorica progettuale con le reali situazioni che possono instaurarsi sia durante le operazioni di scavo che sul medio termine.

Il monitoraggio delle opere in progetto dovrà permettere:

- la verifica dell'efficacia delle soluzioni progettuali prescelte in ragione della variabilità locale della geologia, attuando misure sullo stato deformativo e tensionale delle strutture;
- la misura della situazione deformativa del terreno determinata a tergo delle paratie e dei diaframmi, per le zone di influenza degli scavi delle stazioni e degli accessi;

Le operazioni di monitoraggio dovranno poi permettere la validazione dei parametri utilizzati per la definizione dei metodi di stabilizzazione degli scavi, al fine di avallare le scelte effettuate oppure effettuare le necessarie modifiche. Questo metodo permette quindi di garantire la gestione degli imprevisti legati allo scavo. La metodologia adottata segue il principio di progettazione secondo la "filosofia di progetto flessibile", correntemente applicata nel campo dell'ingegneria geotecnica e per le opere in sotterraneo (vedi Figura 24).

Il progetto specifico del sistema di monitoraggio comprende i seguenti elementi:

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 2: Bologna-Politecnico
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A2DPRCSPAR001-0-0

- definizione dei parametri chiave del monitoraggio;
- definizione delle sezioni tipo di monitoraggio e della tipologia di strumentazione da mettere in opera, sia per le strutture che per i manufatti preesistenti;
- localizzazione delle sezioni tipo e dei manufatti cui applicare le strumentazioni;
- definizione della frequenza delle letture;
- definizione dei valori (limiti) di attenzione e allarme per le grandezze monitorate;
- definizione delle contromisure da attuare in caso di superamento dei valori di allarme definiti.

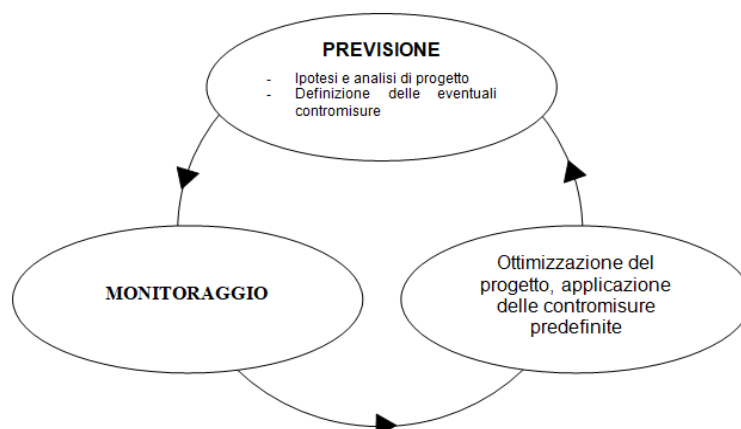


Figura 24. Diagramma di flusso relativo alla metodologia di progettazione flessibile

Il sistema di monitoraggio della stazione in progetto prevede in generale delle sezioni di monitoraggio che possono comprendere tutte o in parte le seguenti strumentazioni:

- tubi inclinometrici (IN) su pannelli di diaframmi o all'interno dei pali, di lunghezza pari alla profondità dell'elemento, al fine di controllare con precisione l'evoluzione della deformata e confrontarla con i risultati delle analisi progettuali nelle varie fasi di scavo;
- punti di controllo topografico di precisione posizionati in prossimità della testa del tubo inclinometrico (CTC);
- riscontri in acciaio predisposti per l'attacco di mire per letture di convergenza 3D (CTC), ancorati sul pannello e disposti sui pannelli a diverse altezze dello scavo;
- coppie di barrette estensimetriche BE (lato intradosso e lato estradosso) fissate sulle gabbie d'armatura del diaframma, sugli elementi orizzontali per il controllo dello stato di sollecitazione dell'elemento strutturale ed il controllo delle tensioni dell'acciaio e del calcestruzzo, poste in posizioni rappresentative;



- estensimetri elettrici BEA dotati di sistema di controllo delle temperature fissate sulle gabbie d'armatura del diaframma, sugli elementi orizzontali, al fine di controllare lo stato tensionale e deformativo degli elementi;
- punti di livellazione superficiale per il controllo dei cedimenti del terreno a tergo dei diaframmi CPL allo scopo di definire il quadro deformativo generale a tergo del diaframma, ed in particolare la tipologia del profilo di subsidenza indotto dagli scavi.

La possibilità di controllo della situazione reale si basa principalmente sulla definizione di soglie aventi lo scopo di segnalare l'instaurarsi di una particolare situazione tensio-deformativa. Sulla base di queste soglie è messa in opera tutta una serie di azioni e contromisure.

Lo schema preliminare della posizione della strumentazione è indicato nelle seguenti immagini.

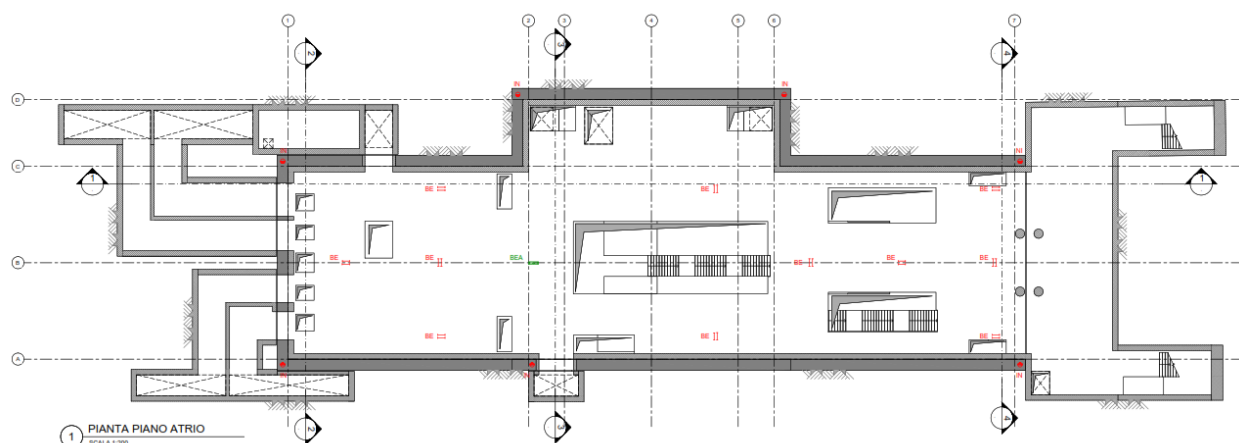


Figura 25. Schema di monitoraggio (MTL2T1A2DPRCSPAT001) – Planimetria. Per le rimanenti sezioni, vedasi la tavola di riferimento

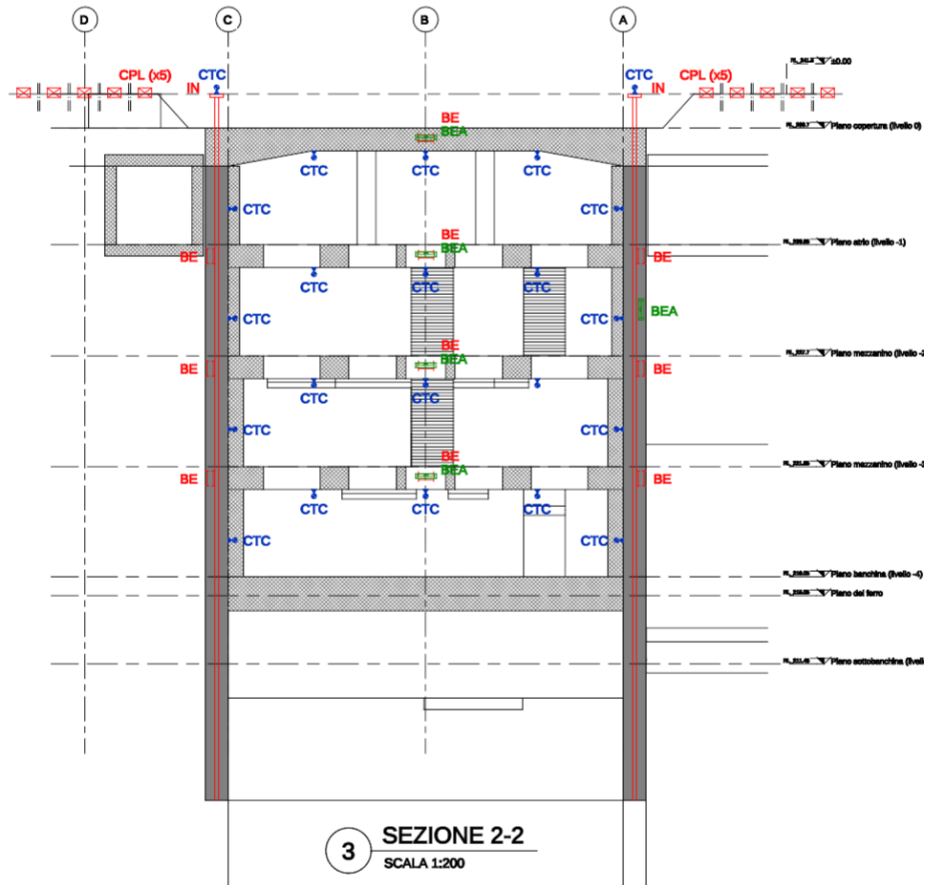



Figura 26. Schema di monitoraggio – Sezione 2-2 (MTL2T1A2DPRCSPAT001). Per le rimanenti sezioni, vedasi la tavola di riferimento.

Strumento	Sigla	Applicazione	Misurazione	Num.
Punti di livellazione superficiale	CPL	Piano campagna (distanza 2m)	Subsidenza	40
Mire ottiche	CTC	Diaframmi e solette	Misurazione delle deformazioni	66

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 2: Bologna-Politecnico
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A2DPRCSPAR001-0-0

Barrette estensimetriche	BE	Rivestimento definitivo e diaframmi	Stato tensionale	64
Barrette estensimetriche di riferimento	BEA	Rivestimento definitivo e diaframmi	Stato tensionale	7
Inclinometri	IN	Diaframmi	Misurazione inclinazione	7

I valori di soglia fissati sono funzione dei risultati previsti (in termini di spostamento, deformazione, tensioni, ecc.) in fase progettuale.

Questi limiti sono definiti come:

- **limite di attenzione:** è definito come una quota parte delle risultanze dei calcoli in progetto. Il superamento di questo limite implica l'incremento della frequenza delle misure, allo scopo di stabilire e monitorare la velocità con la quale il fenomeno si evolve in modo da valutare il potenziale instaurarsi di fenomeni ad evoluzione rapida che potrebbero, in particolari situazioni, divenire potenzialmente incontrollabili;
- **limite di allarme:** è definito in funzione del livello deformativo più gravoso per una determinata situazione di scavo.


Al raggiungimento della soglia di allarme sarà necessaria la valutazione dell'attuazione di opportune contromisure, che hanno lo scopo di riportare la situazione reale entro i limiti previsti in progetto.

4.3 Monitoraggio edifici

Obiettivo del monitoraggio sugli edifici e i manufatti esistenti è il controllo e la salvaguardia delle stesse durante l'esecuzione dei lavori.

Il piano di monitoraggio prevede il controllo del comportamento deformativo dei fabbricati. In accoppiamento con le sezioni di livellazione superficiale previste per le stazioni, la strumentazione in opera dovrà permettere la definizione del quadro deformativo generale nell'intorno degli scavi, ed in particolare la zona di influenza degli scavi e la tipologia del profilo di subsidenza indotto.

Nel caso di edifici di altezza superiore a 5 piani fuori terra, edifici sensibili, edifici con un quadro fessurativo importante o vincolati dalla Soprintendenza ai beni culturali ai sensi del D.Lgs 42/2004,

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 2: Bologna-Politecnico
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A2DPRCSPAR001-0-0

è necessaria una applicazione del sistema di monitoraggio molto "pesante", in modo da poter valutare tempestivamente qualsiasi condizione critica per l'edificio.

Essenzialmente si andranno a misurare:

- Le deformazioni;
- La variazione nell'apertura delle fessure se già presenti;
- Le rotazioni della facciata nel proprio asse o nel piano ad essa perpendicolare;
- Le vibrazioni.

Per ogni tipo di misurazione andranno fissati dei valori limite in funzione dei risultati previsti (in termini di spostamento, deformazione, tensioni, ecc.) dai calcoli di progetto.

Questi limiti sono definiti, per ogni grandezza monitorata, come:

- limite di attenzione: una quota parte delle risultanze dei calcoli in progetto. Il superamento di questo limite implica l'incremento della frequenza delle misure, allo scopo di stabilire e monitorare la velocità con la quale il fenomeno si evolve, in modo da valutare la tendenza ad instaurarsi di fenomeni ad evoluzione rapida che potrebbero, in particolari situazioni, divenire potenzialmente incontrollabili;
- limite di allarme: funzione del livello deformativo, tensionale, ecc. più gravoso per una determinata situazione di scavo. Il suo superamento implica la valutazione dell'attuazione di opportune contromisure.

Le contromisure da adottare in caso di superamento dei limiti di allarme hanno lo scopo di riportare la situazione reale entro i limiti previsti in progetto, ovvero rinforzare le strutture perché possano risultare comunque stabili.