

**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**

<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		 <b>INFRA.TO</b> <i>infrastrutture per la mobilità</i>												<b>INFRATRASPORTI.TO S.r.l.</b>	
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	<b>SUBSIDENZE, PRESIDIO E MONITORAGGI</b> BACINO SUBSIDENZA E IMPATTO SULLE PRE-ESISTENZE STAZIONE BOLOGNA													
BIM MANAGER Geom. L. D'Accardi		ELABORATO						REV.		SCALA	DATA				
		MT	L2	T1	A1	D	PRC	SBO	R				001	Int.	Est.
										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>20</td> <td>MTL2T1A1D</td> <td>PRCSBOR001</td> </tr> </table>						LOTTO 2	CARTELLA	10	20	MTL2T1A1D	PRCSBOR001	<b>STAZIONE APPALTANTE</b>  DIRETTORE DI DIVISIONE INFRASTRUTTURE E MOBILITÀ Ing. R. Bertasio  RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. A. Strozziro						
LOTTO 2	CARTELLA	10	20	MTL2T1A1D	PRCSBOR001													

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico - Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo - Bologna</b>
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A1DPRCSBOR001-0-0

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>3</b>
<b>1.1</b>	<b>SCOPO</b>	<b>3</b>
<b>1.2</b>	<b>CARATTERISTICHE GENERALI DELLA STAZIONE</b>	<b>4</b>
<b>1.3</b>	<b>METODOLOGIA DI CALCOLO DELLE DEFORMAZIONI</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>CONTESTO GEOLOGICO/GEOTECNICO E ANALISI NUMERICHE</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>DEFORMAZIONI E CEDIMENTI INDOTTI DAGLI SCAVI</b>	<b>7</b>
<b>3.1</b>	<b>EFFETTI INDOTTI SUGLI EDIFICI</b>	<b>7</b>
3.1.1	CLASSIFICAZIONI DI DANNO E CONCETTO DI RISCHIO	9
3.1.2	INDICE DI VULNERABILITÀ	10
<b>3.2</b>	<b>SEZIONI DI ANALISI</b>	<b>12</b>
3.2.1	DEFORMAZIONI DEL CORPO CENTRALE DI STAZIONE	15
3.2.2	DEFORMAZIONI DEGLI ACCESSI DI STAZIONE	16
3.2.3	DEFORMAZIONI SCAVO AREA 1	17
3.2.4	DEFORMAZIONI SCAVO AREA 2	18
<b>4</b>	<b>INDICAZIONI SUL SISTEMA DI MONITORAGGIO DURANTE LE FASI COSTRUTTIVE</b>	<b>19</b>
<b>4.1</b>	<b>MONITORAGGIO CORPO DI STAZIONE E ACCESSI</b>	<b>19</b>
<b>4.2</b>	<b>MONITORAGGIO EDIFICI</b>	<b>23</b>

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.	Key-plan della linea 2 – tratta funzionale Politecnico-Rebaudengo (Stazione Bologna)	3
Figura 2.	Modello 3d – Stazione Bologna	4
Figura 3.	Zona di influenza minima per scavi in C&C	5
Figura 4.	Modello costitutivo Hardening Soil	5
Figura 5.	Principali parametri per la valutazione del danneggiamento degli edifici	8
Figura 6.	Schema di applicazione sezioni oggetto di analisi	13
Figura 7.	Indicazione sezioni di approfondimento analisi cedimenti	14
Figura 8.	Spostamenti verticali	15

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana automatica di Torino Linea 2 - Tratta Politecnico – Rebaudengo Progettazione definitiva Lotto funzionale 1: Rebaudengo - Bologna</b>
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A1DPRCSBOR001-0-0

Figura 9. Spostamenti orizzontali	15
Figura 10. Subsidenza dovuta alla realizzazione dei micropali degli accessi – Schema A	16
Figura 11. Subsidenza dovuta alla realizzazione dei micropali degli accessi – Schema B	16
Figura 12. Subsidenza dovuta alla realizzazione dei micropali degli accessi – Schema C	17
Figura 13. Area 1 – Cedimenti verticali ad di sotto del fabbricato	18
Figura 14. Area 2 – Cedimenti verticali al di sotto del fabbricato	18
Figura 15. Diagramma di flusso relativo alla metodologia di progettazione flessibile	20
Figura 16. Schema preliminare di monitoraggio – Planimetria tipo	21
Figura 17. Schema preliminare di monitoraggio – Sezione tipo	22



## 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 Bologna, degli accessi e dei vani di ventilazione.



**Figura 1. Key-plan della linea 2 – tratta funzionale Politecnico-Rebaudengo (Stazione Bologna)**

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 tenso-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 Bologna fa parte del Lotto 1 ed è una stazione di tipo standard a due livelli interrati. Presenta due accessi posti in modo speculare rispetto all'asse longitudinale, mentre la vasca antincendio risulta inserita all'interno dell'opera.

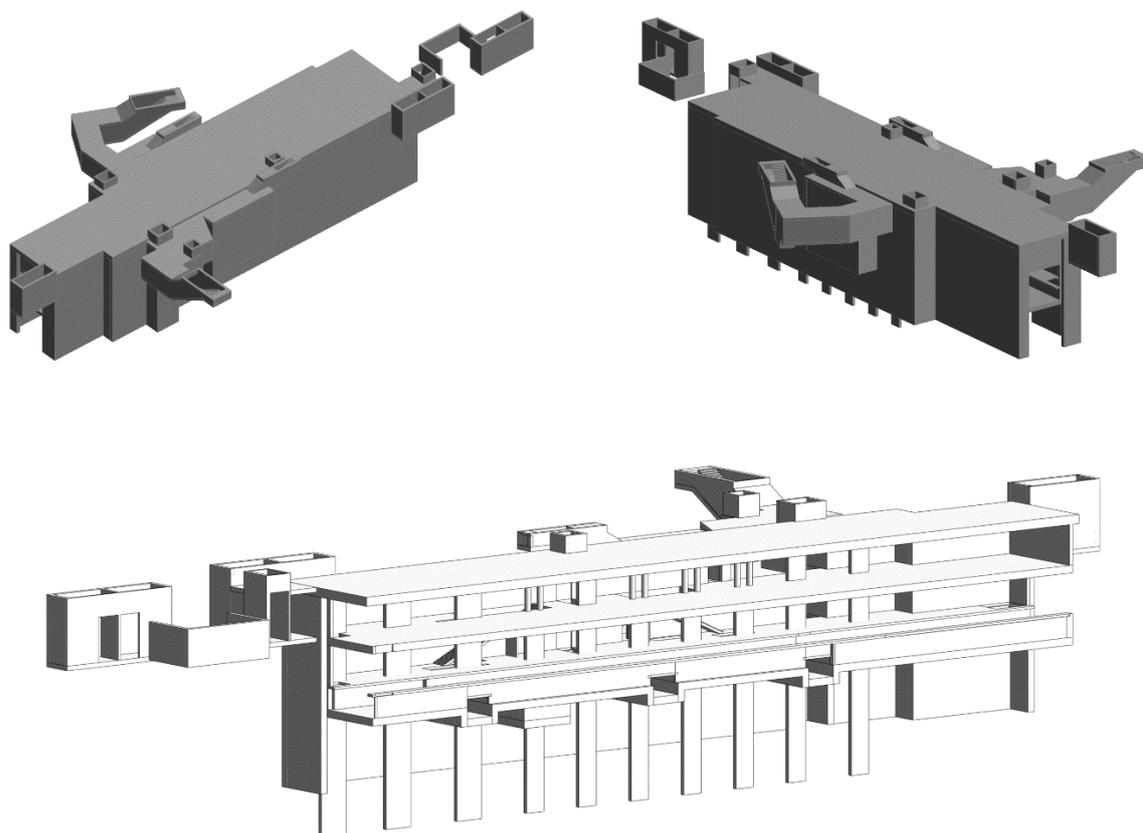


Figura 2. Modello 3d – Stazione Bologna

La stazione verrà realizzata attraverso la tecnologia esecutiva di tipo top-down caratterizzata da uno scavo sostenuto da diaframmi contrastati da solai permanenti. In un secondo tempo verranno realizzati gli accessi e le opere legate alla ventilazione. Lo scavo verrà eseguito mediante l'utilizzo di micropali e puntoni, necessari a garantire la stabilità fino al raggiungimento del fondo scavo.



### 1.3 Metodologia di calcolo delle deformazioni

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

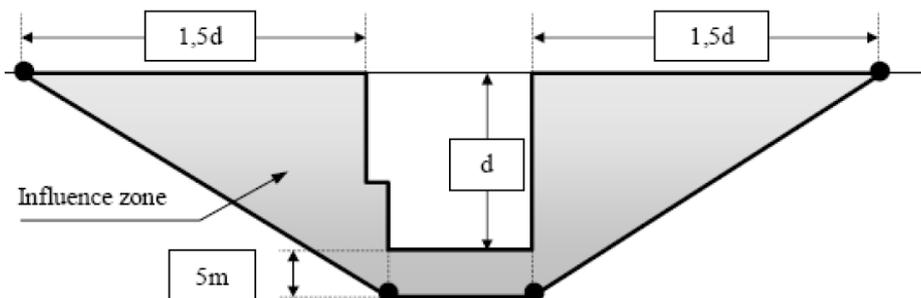


Figura 3. Zona di influenza minima per scavi in C&C

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  $\phi'$ . L'angolo di dilatanza  $\psi$  è posto uguale  $0^\circ$ . 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.

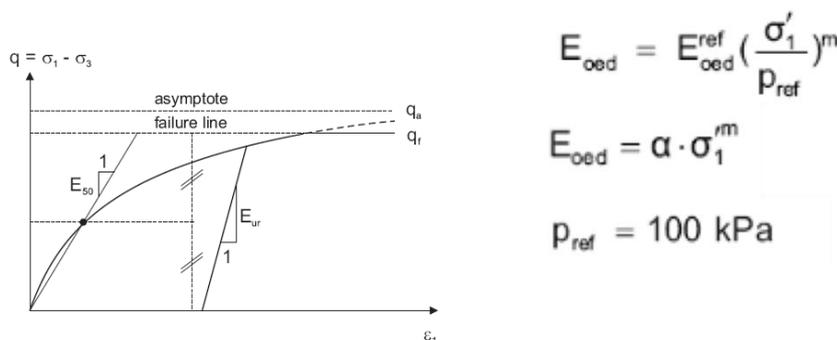


Figura 4. Modello costitutivo Hardening Soil

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana automatica di Torino Linea 2 - Tratta Politecnico – Rebaudengo Progettazione definitiva Lotto funzionale 1: Rebaudengo - Bologna</b>
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A1DPRCSBOR001-0-0

L'obiettivo è quindi quello di definire l'impatto degli scavi sugli edifici e sulle preesistenze. Analogamente si è proceduto per gli accessi.

## 2 CONTESTO GEOLOGICO/GEOTECNICO E ANALISI NUMERICHE

Il contesto e la caratterizzazione idrogeologica della stazione sono stati descritti nel report MTL2T1A1DSTRSBOR001, dove si evince che lo scavo è interessato da una coltre superiore di circa 2 m di terreno superficiale denominato Unità 1. Mentre a livelli più profondi, fino ad una estensione da piano campagna di 30 m, è presente un materiale ghiaioso sabbioso denominato Unità 2.

Il livello di falda considerato per le fasi di scavo a breve termine è – 10.5m da piano campagna. I parametri meccanici utilizzati per definire il legame costitutivo delle due unità sono riportati di seguito:

**Tabella 1 Parametri Hardening-Soil**

	$\gamma$	$\varphi$	c	$\nu_{ur}$	$E_{50}^{ref}$	$E_{oed}^{ref}$	$E_{ur}^{ref}$	m
	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[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 2 Carichi assunti per il modello numerico.**

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

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana automatica di Torino</b> <b>Linea 2 - Tratta Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Progettazione definitiva</b> <b>Lotto funzionale 1: Rebaudengo - Bologna</b>
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A1DPRCSBOR001-0-0

### 3 DEFORMAZIONI E CEDIMENTI INDOTTI DAGLI SCAVI

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 rigidità 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.

#### 3.1 Effetti indotti sugli edifici

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 ( $\epsilon_{max}$ ), che è funzione dell'inflessione relativa massima ( $\Delta_{max}$ ) subita dall'edificio. La deformazione



massima di trazione deve essere confrontata con la deformazione limite ( $\epsilon_{lim}$ ) 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**  $\beta_{max}$  e il cedimento massimo  $S_{max}$  subito dall'edificio

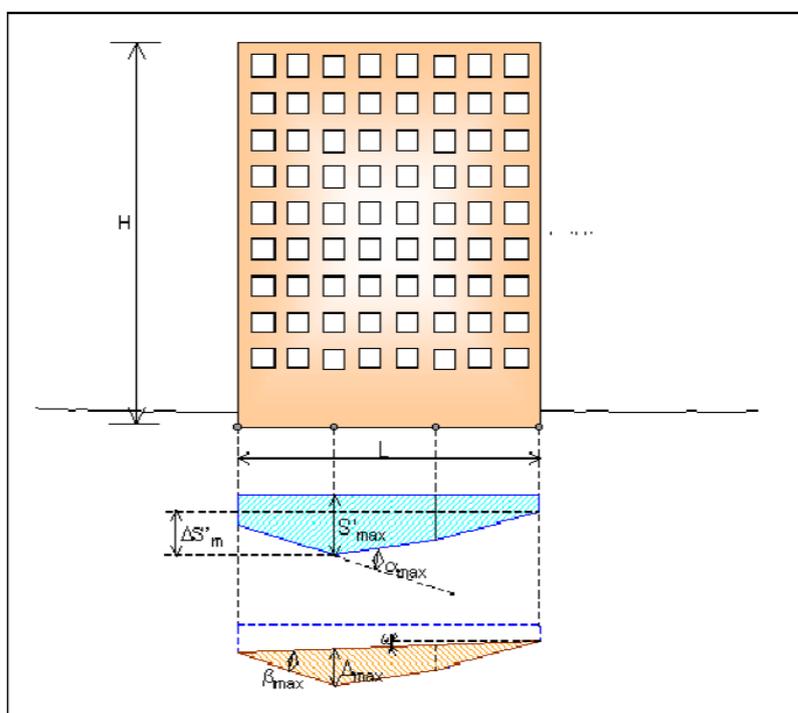


Figura 5. Principali parametri per la valutazione del danneggiamento degli edifici

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

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana automatica di Torino Linea 2 - Tratta Politecnico – Rebaudengo Progettazione definitiva Lotto funzionale 1: Rebaudengo - Bologna</b>
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A1DPRCSBOR001-0-0

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.

### 3.1.1 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 3 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 deformazione angolare e quindi permette l'individuazione delle diverse categorie di rischio. In tabella è presentata la descrizione del danno per tale classificazione.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana automatica di Torino Linea 2 - Tratta Politecnico – Rebaudengo Progettazione definitiva Lotto funzionale 1: Rebaudengo - Bologna</b>
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A1DPRCSBOR001-0-0

**Tabella 4. 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.

### 3.1.2 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.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana automatica di Torino Linea 2 - Tratta Politecnico – Rebaudengo Progettazione definitiva Lotto funzionale 1: Rebaudengo - Bologna</b>
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A1DPRCSBOR001-0-0

**Tabella 5. Indice di vulnerabilità**

INDICE DI VULNERABILITÀ	CLASSE DELL'EDIFICIO
0-20	Irrilevante
20-40	Basso
40-60	Medio
60-80	Alto
80-100	Elevato

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 ( $\varepsilon_{lim}$ ,  $\Delta_{max}$ ,  $\beta_{max}$ ,  $S_{max}$ ) variabile da 1.0 a 2.0.

Al fine della definizione del livello soglia si esclude a tutti gli effetti che tale danno possa essere di natura strutturale o che 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).

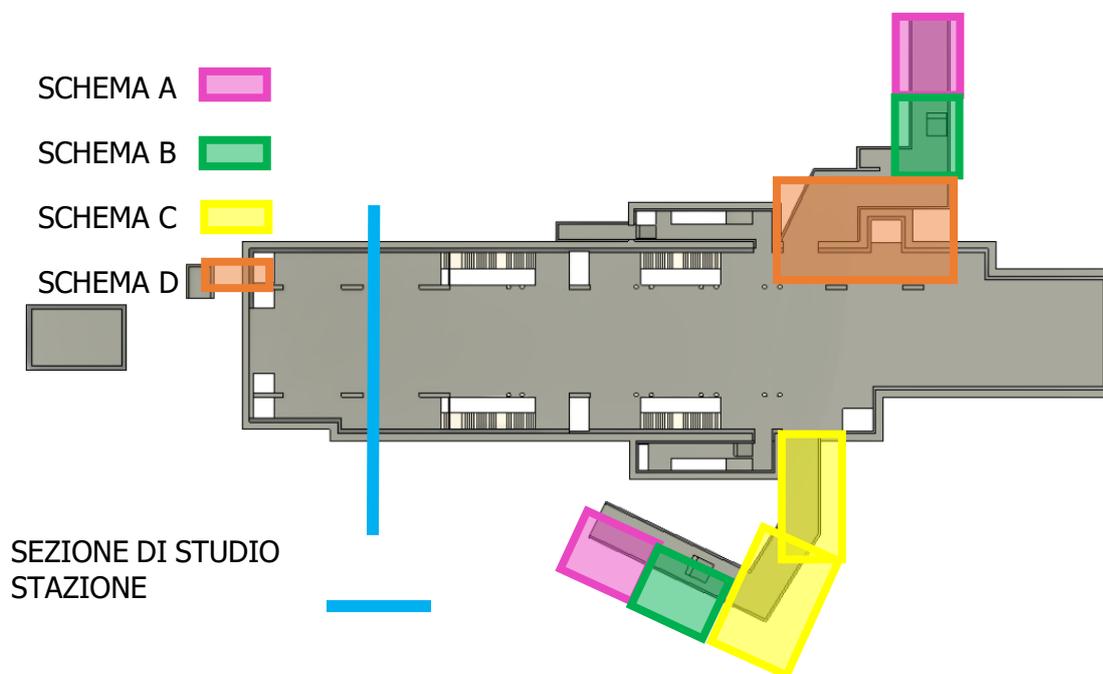


**Tabella 6. Correzione degli intervalli di valori del parametro di controllo della Classificazione di Rischio attraverso la vulnerabilità Iv caratteristica dell'edificio**

		Indice di Vulnerabilità dell'edificio									
		IRRILEVANTE 0<Iv<2 Fr=1.0		BASSO 2<Iv<4 Fr=1.25		MEDIO 4<Iv<6 Fr=1.5		ALTO 6<Iv<8 Fr=1.75		ELEVATO 8<Iv<10 Fr=2.0	
Categorie di Rischio		Parametri di controllo									
		S <sub>max</sub> [mm] <10	β <sub>lim</sub> [%] <1/500	S <sub>max</sub> [mm] <8	β <sub>lim</sub> [%] <1/625	S <sub>max</sub> [mm] <6.7	β <sub>lim</sub> [%] <1/750	S <sub>max</sub> [mm] <5.7	β <sub>lim</sub> [%] 1/875	S <sub>max</sub> [mm] <5	β <sub>lim</sub> [%] <1/1000
1	ε <sub>lim</sub> [%]	ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]	
	min 0,000 0,050	max 0,050 0,075	min 0,000 0,040	max 0,040 0,060	min 0,000 0,033	max 0,033 0,050	min 0,000 0,029	max 0,029 0,043	min 0,000 0,025	max 0,025 0,038	
2	S <sub>max</sub> [mm]	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 <sub>lim</sub> [%]	ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]	
3	S <sub>max</sub> [mm]	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 <sub>lim</sub> [%]	ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]	
4	S <sub>max</sub> [mm]	>75	>1/50	>60	>1/62.5	>50	>1/75	>42.9	>1/87.5	>37.5	>1/100
	ε <sub>lim</sub> [%]	ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]		ε <sub>lim</sub> [%]	
	min	min		min		min		min		min	
	>0.300	>0.240		>0.200		>0.171		>0.150		>0.150	

### 3.2 Sezioni di analisi

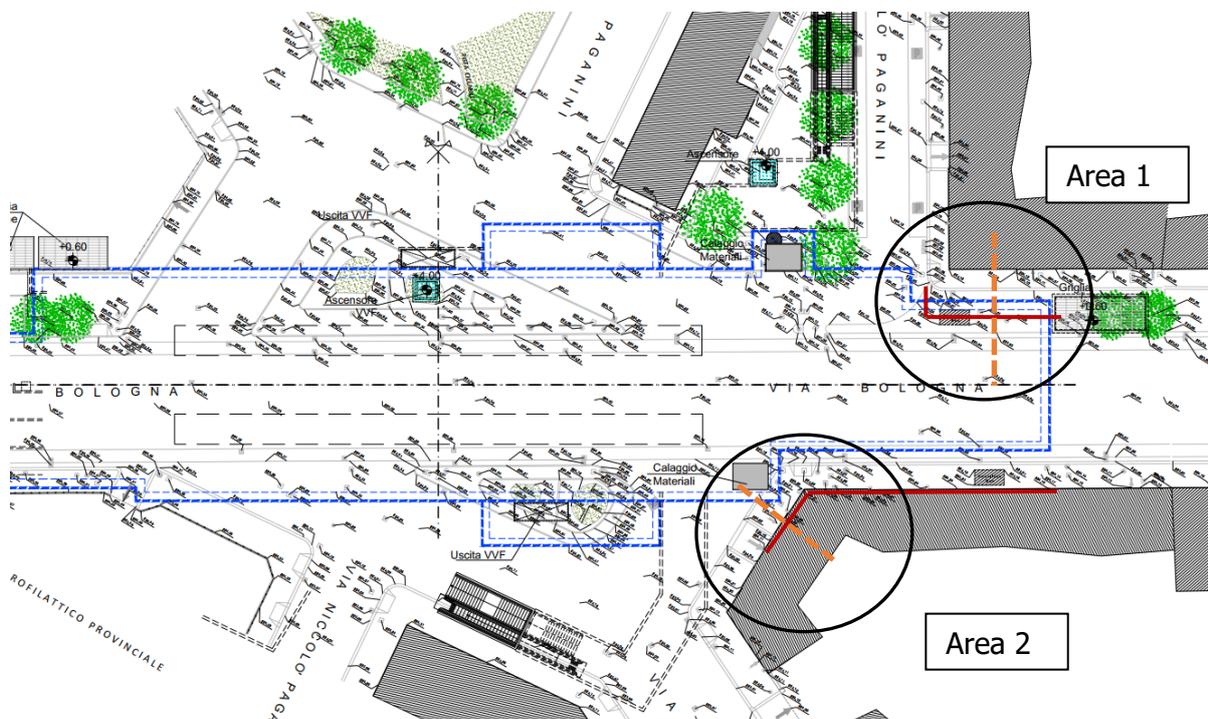
In relazione alla planimetria della stazione le sezioni oggetto di studio e per le quali sono state effettuate le analisi sono le seguenti:



**Figura 6. Schema di applicazione sezioni oggetto di analisi**

Per le sezioni sopraindicate, valutate in assenza di interferenze con edifici o manufatti, si riporteranno nel seguito i profili dei cedimenti superficiali.

In aggiunta alle sezioni indicate precedentemente verranno valutati i cedimenti in corrispondenza di particolari sezioni di scavo in prossimità di fabbricati valutandone il potenziale impatto alla luce dell'indice di vulnerabilità dell'edificio. La tecnica di scavo utilizzata in tali zone sarà quella della paratia di micropali.



**Figura 7. Indicazione sezioni di approfondimento analisi cedimenti**

Le aree oggetto di particolari analisi saranno:

- Area 1 in prossimità dell'edificio denominato BOCI09 in cui la paratia di micropali è posta a 2,5 m di distanza dal fabbricato.
- Area 2 in prossimità dell'edificio denominato BOCI07 in cui la paratia di micropali è posta a 0,75 m di distanza dal fabbricato



### 3.2.1 Deformazioni del corpo centrale di stazione

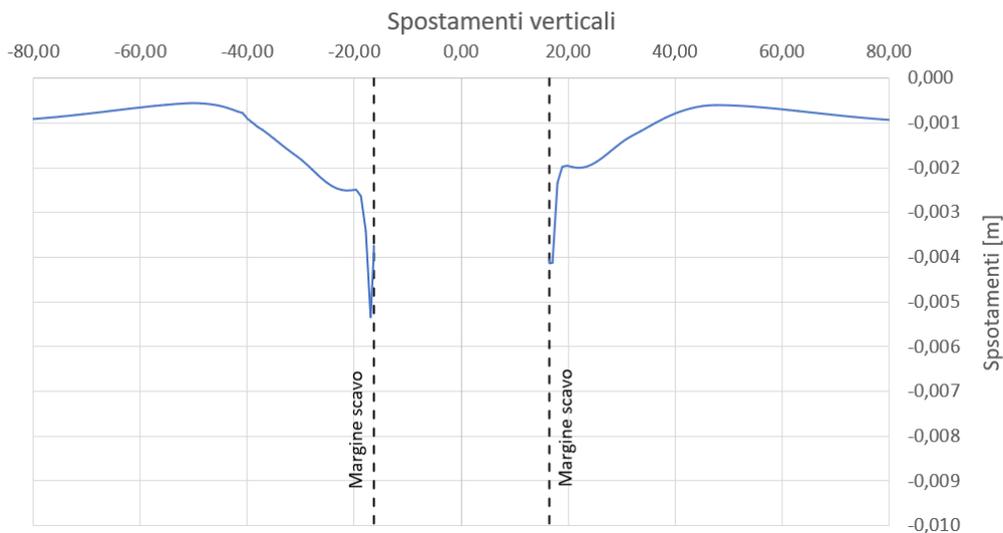


Figura 8. Spostamenti verticali

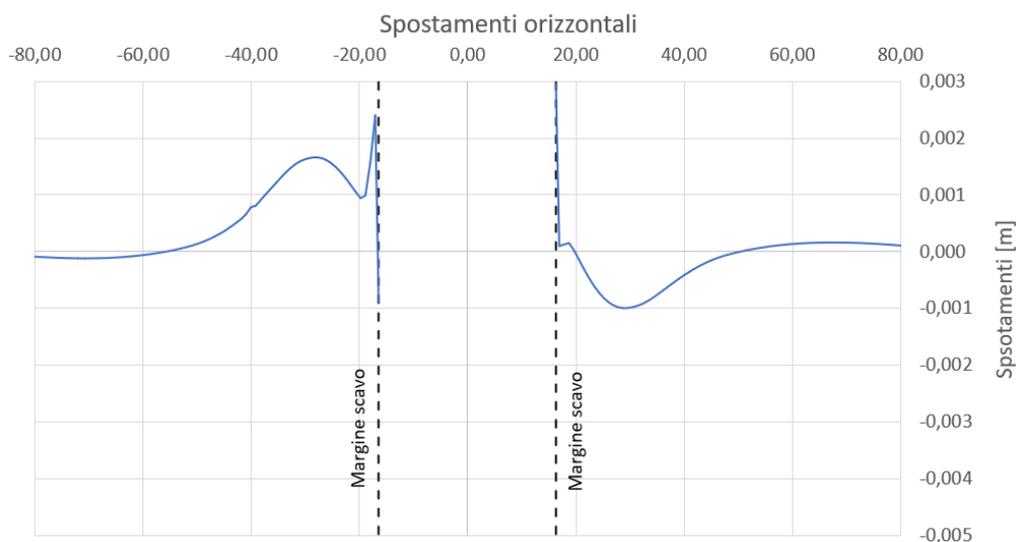


Figura 9. Spostamenti orizzontali

I cedimenti verticali e orizzontali di interesse per la valutazione dell'influenza che lo scavo ha sulle aree limitrofe sono quelli localizzati ai margini della zona di scavo e nella sua zona di influenza. Tali cedimenti, come riscontrabili dalle analisi numeriche, risultano di entità limitata e contenute entro i 5 mm.



### 3.2.2 Deformazioni degli accessi di stazione

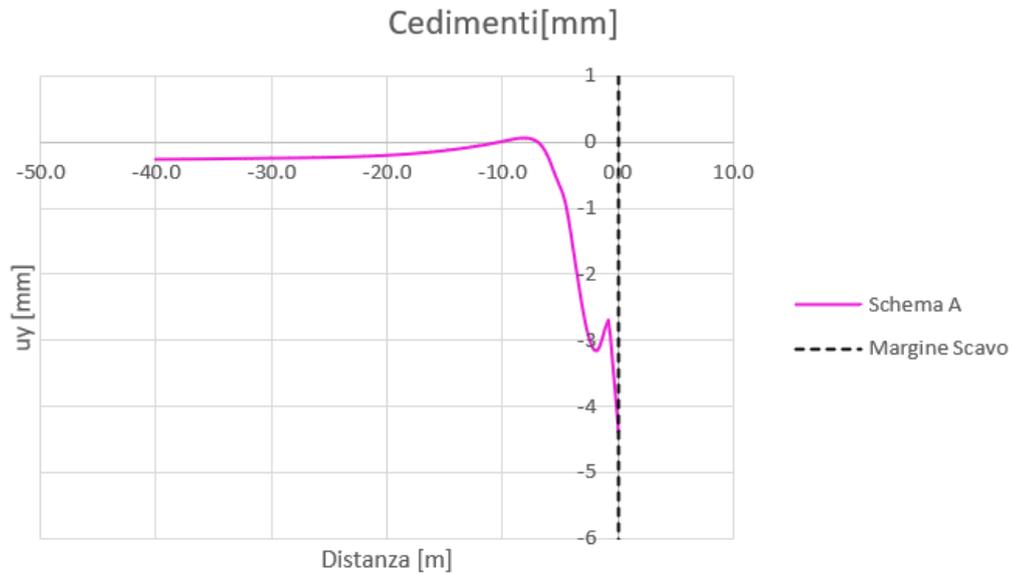


Figura 10. Subsidenza dovuta alla realizzazione dei micropali degli accessi – Schema A

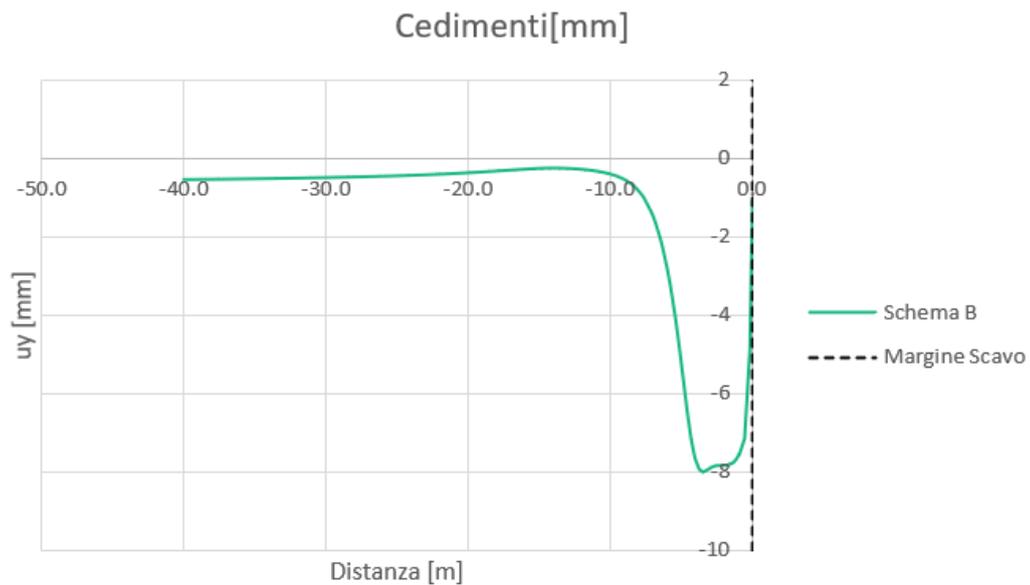


Figura 11. Subsidenza dovuta alla realizzazione dei micropali degli accessi – Schema B

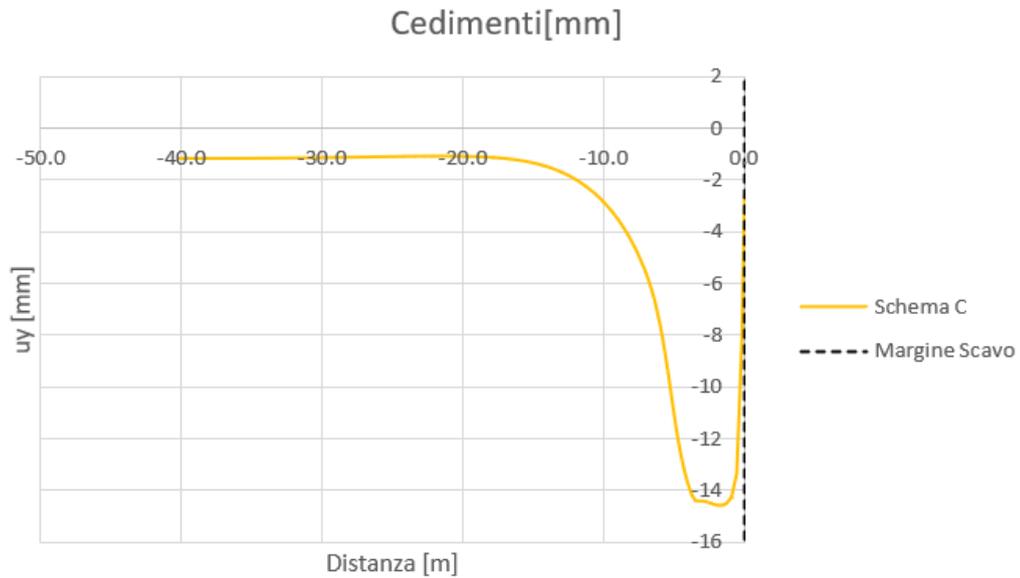
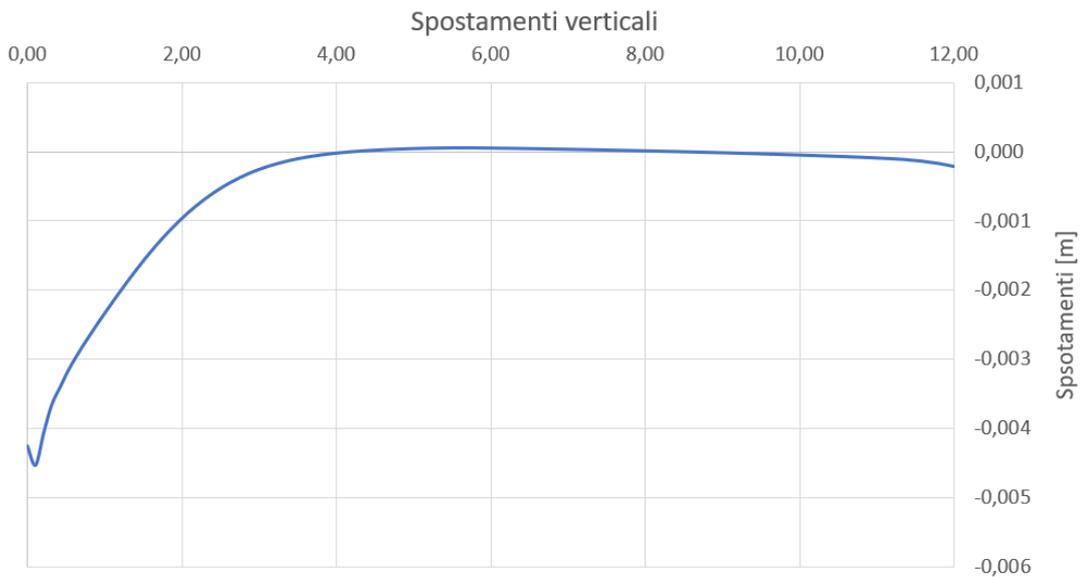


Figura 12. Subsidenza dovuta alla realizzazione dei micropali degli accessi – Schema C

### 3.2.3 Deformazioni scavo Area 1

Il grafico di seguito mostra i cedimenti verticali al di sotto dell'edificio indotti dallo scavo.



 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana automatica di Torino Linea 2 - Tratta Politecnico – Rebaudengo Progettazione definitiva Lotto funzionale 1: Rebaudengo - Bologna</b>
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A1DPRCSBOR001-0-0

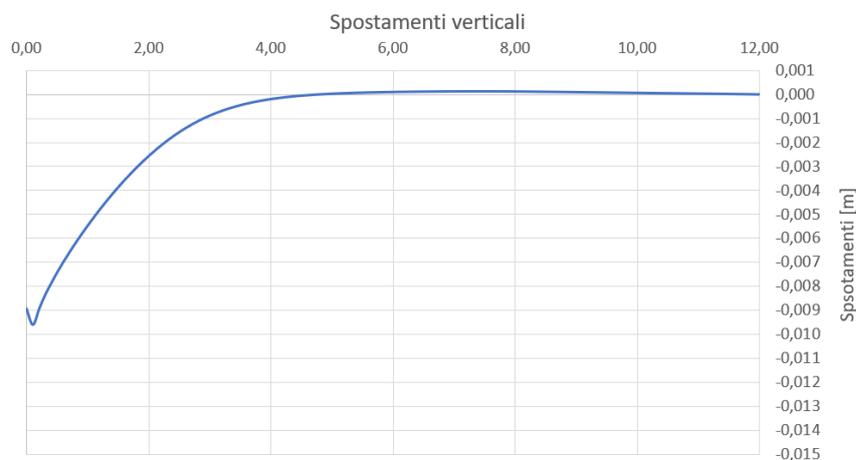
**Figura 13. Area 1 – Cedimenti verticali ad di sotto del fabbricato**

Considerando un indice di vulnerabilità del fabbricato pari a 45 e la categoria di rischio 2, si ottengono i seguenti valori limite che devono essere confrontati con quelli provenienti dagli studi numerici.

$S_{max\ lim} [mm]$	$\beta_{max\ lim}$	$S_{max} [mm]$	$\beta_{max}$
33,3	1/300	4,53	1/1100

### 3.2.4 Deformazioni scavo Area 2

Il grafico di seguito mostra i cedimenti verticali indotti dallo scavo al di sotto dell'edificio.



**Figura 14. Area 2 – Cedimenti verticali al di sotto del fabbricato**

Considerando un indice di vulnerabilità del fabbricato pari a 45 e la categoria di rischio 2, si ottengono i seguenti valori limite che devono essere confrontati con quelli provenienti dagli studi numerici.

$S_{max\ lim} [mm]$	$\beta_{max\ lim}$	$S_{max} [mm]$	$\beta_{max}$
33,3	1/300	9,61	1/520

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana automatica di Torino Linea 2 - Tratta Politecnico – Rebaudengo Progettazione definitiva Lotto funzionale 1: Rebaudengo - Bologna</b>
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A1DPRCSBOR001-0-0

## 4 INDICAZIONI SUL SISTEMA DI MONITORAGGIO DURANTE LE FASI COSTRUTTIVE

### 4.1 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:

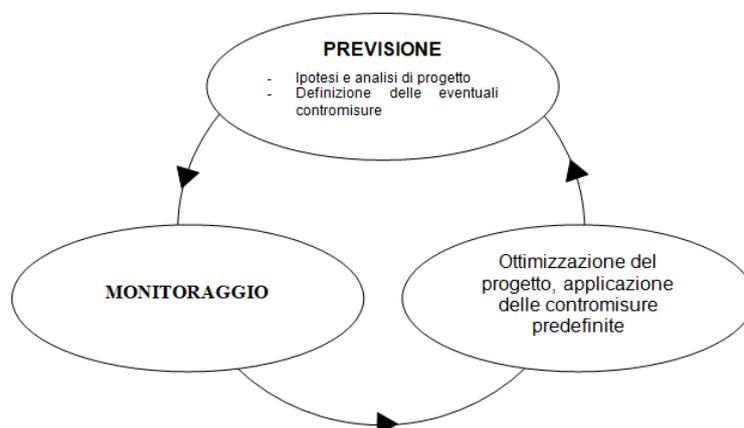
- la verifica dell'efficacia delle soluzioni progettuali prescelte in ragione della variabilità locale della geologia, attuando misure sullo stato deformativo e tensionale delle strutture;
- la misura della situazione deformativa del terreno determinata a tergo delle paratie e dei diaframmi, per le zone 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 15).

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

- 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.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana automatica di Torino</b> <b>Linea 2 - Tratta Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Progettazione definitiva</b> <b>Lotto funzionale 1: Rebaudengo - Bologna</b>
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A1DPRCSBOR001-0-0



**Figura 15. 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.



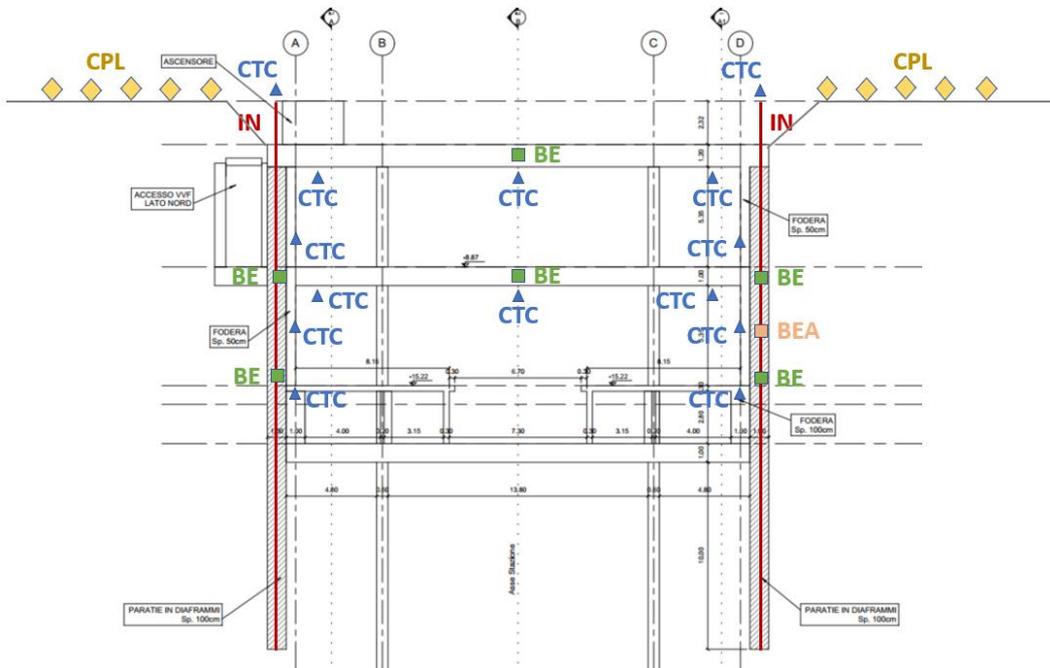


Figura 17. Schema preliminare di monitoraggio – Sezione tipo

Strumento	Sigla	Applicazione	Misurazione	Num.
Punti di livellazione superficiale	CPL	Piano campagna (distanza 4m)	Subsidenza	30
Mire ottiche	CTC	Diaframmi e solette	Misurazione delle deformazioni	42
Barrette estensimetriche	BE	Rivestimento definitivo e diaframmi	Stato tensionale	46
Barrette estensimetriche di riferimento	BEA	Rivestimento definitivo e diaframmi	Stato tensionale	7

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana automatica di Torino Linea 2 - Tratta Politecnico – Rebaudengo Progettazione definitiva Lotto funzionale 1: Rebaudengo - Bologna</b>
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A1DPRCSBOR001-0-0

Inclinometri	IN	Diaframmi	Misurazione inclinazione	6
--------------	----	-----------	--------------------------	---

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.

## 4.2 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, 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.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana automatica di Torino Linea 2 - Tratta Politecnico – Rebaudengo Progettazione definitiva Lotto funzionale 1: Rebaudengo - Bologna</b>
Relazione di calcolo effetti indotti dagli scavi, opere di presidio e sistemi di monitoraggio	MTL2T1A1DPRCSBOR001-0-0

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.