

**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: Rebaudengo - Bologna**


PROGETTO DEFINITIVO												INFRATRASPORTI 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 INTERVENTI DI MONITORAGGIO - STAZIONE POLITECNICO										RELAZIONE DI CALCOLO SUGLI EFFETTI INDOTTI DAGLI SCAVI		
		ELABORATO								REV.		SCALA	DATA	
											Int.	Est.		
BIM MANAGER Geom. L. D'Accardi		MT	L2	T1	A2	D	PRC	SPO	R	001	0	0	-	30/11/2022


AGGIORNAMENTI

Fg. 1 di 1

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	VISTO
0	EMISSIONE	30/11/22	MSA	ECA	FRI	RCR
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-

<table border="1"> <tr> <td>LOTTO 2</td> <td>CARTELLA</td> <td>10</td> <td>96</td> <td>MTL2T1A2D</td> <td>PRCSPOR001</td> </tr> </table>						LOTTO 2	CARTELLA	10	96	MTL2T1A2D	PRCSPOR001	STAZIONE APPALTANTE						
LOTTO 2	CARTELLA	10	96	MTL2T1A2D	PRCSPOR001													
						DIRETTORE DI DIVISIONE INFRASTRUTTURE E MOBILITÀ Ing. R. Bertasio												
						RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. A. Strozziro												

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna
Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi	96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna
Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi	96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

INDICE

1.	PREMESSA	5
1.1	SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE	5
1.2	DESCRIZIONE DELLE OPERE	7
2.	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA E ANALISI NUMERICHE	9
2.1	PARAMETRI GEOTECNICI DI RIFERIMENTO	9
3.	ISOCEDIMENTI	12
3.1	CEDIMENTI DOVUTI ALLO SCAVO DELLA STAZIONE	12
3.2	EFFETTI INDOTTI SUGLI EDIFICI	14
3.2.1	CLASSIFICAZIONI DI DANNO E CONCETTO DI RISCHIO	16
3.2.2	INDICE DI VULNERABILITÀ	17
3.1	CALCOLO DEI CEDIMENTI	21
3.1.1	CEDIMENTI DOVUTI AL CALCOLO DELLA STAZIONE – BREVE TERMINE	21
3.1.2	CEDIMENTI DOVUTI AL CALCOLO DELLA STAZIONE – LUNGO TERMINE	22
4.	INDICAZIONI SUL SISTEMA DI MONITORAGGIO DURANTE LE FASI COSTRUTTIVE	24
4.1	MONITORAGGIO CORPO DI STAZIONE E ACCESSI	24
4.2	MONITORAGGIO EDIFICI	28

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.	Key-plan della linea 2 – tratta funzionale Politecnico-Rebaudengo	6
Figura 2.	Estratto Google Maps stazione Politecnico	7
Figura 3.	Modello 3d – Stazione Politecnico	7
Figura 4.	Stralcio stratigrafia stazione Politecnico	10
Figura 5.	Dimostrazione della previsione dei cedimenti del sottosuolo dai valori di deflessione del diaframma	13
Figura 6.	Dimostrazione della previsione del movimento orizzontale del sottosuolo dai valori di deflessione della parete del diaframma	14
Figura 7.	Principali parametri per la valutazione del danneggiamento degli edifici	15
Figura 8.	Diagramma cedimenti verticali	21



 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna
Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi	96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

Figura 9. Diagramma spostamenti orizzontali	22
Figura 10. Diagramma cedimenti verticali	23
Figura 11. Diagramma spostamenti orizzontali	23
Figura 12. Diagramma di flusso relativo alla metodologia di progettazione flessibile	25
Figura 13. Schema preliminare di monitoraggio – Planimetria tipo	26
Figura 14. Schema preliminare di monitoraggio – Sezione tipo	27

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna
Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi	96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

1. PREMESSA

1.1 Scopo e campo di applicazione

La presente relazione si inserisce nell'ambito dell'affidamento dei servizi di ingegneria relativi alla Progettazione Definitiva della Tratta Politecnico-Rebaudengo della Linea 2 della Metropolitana, disciplinato dal Contratto tra la Città di Torino e la società Infratrasporti.TO s.r.l., ed ha per oggetto la progettazione e la verifica delle seguenti opere previste per la stazione Politecnico:

- opere di sostegno provvisorie
- diaframmi laterali e relativo calcolo degli iscedimenti dovuti allo scavo della stazione a seguito della deformazione degli stessi.

Il 1° lotto funzionale della Linea 2 della Metropolitana di Torino, incluso tra le stazioni Rebaudengo e Politecnico, si colloca interamente nel territorio comunale di Torino, presenta una lunghezza di circa 9,7 km, e, procedendo da nord verso sud, si sviluppa a partire dalla stazione di corrispondenza con la stazione F.S. Rebaudengo-Fossata, proseguendo poi lungo la ex trincea ferroviaria posta tra via Gottardo e via Sempione. Il tracciato, a partire dalla fermata Corelli, passa lungo via Bologna, al fine di servire meglio gli insediamenti dell'area interessata esistenti e futuri con le fermate intermedie Cimarosa-Tabacchi, Bologna e Novara. Dopo la fermata Novara, il tracciato si allontana dall'asse di Via Bologna mediante una curva in direzione sud-est e si immette sotto l'asse di Corso Verona fino alla Stazione Verona ubicata in Largo Verona. Dopo la fermata Verona, sotto attraversato il fiume Dora e Corso Regina Margherita, la linea entra nel centro storico della città con le fermate Mole/Giardini Reali e Carlo Alberto, portandosi poi in corrispondenza di via Lagrange, sino ad arrivare alla stazione Porta Nuova, posta lungo via Nizza, che sarà di corrispondenza sia con la linea F.S. che con la Linea 1 della metropolitana di Torino.

Dalla fermata Porta Nuova il tracciato prosegue lungo l'allineamento di via Pastrengo, per poi portarsi su corso Duca degli Abruzzi fino alla fermata Politecnico.

Il 1° lotto funzionale è costituito dalle seguenti opere:

- 13 stazioni sotterranee
- 12 pozzi intertratta aventi funzione di ventilazione, uscita di emergenza ed accesso dei soccorsi
- La galleria di linea costituita da:
 - Un tratto in galleria naturale realizzato con scavo tradizionale per una lunghezza di 135m circa, che va dal manufatto di retrostazione Rebaudengo alla Stazione Rebaudengo;
 - Un tratto in galleria artificiale in Cut&Cover ad uno o due livelli, per una lunghezza complessiva di circa 3,0km che collega le stazioni Rebaudengo, Giulio Cesare, San



- Giovanni Bosco, Corelli, Cimarosa/Tabacchi, Bologna fino al manufatto in retrostazione Bologna che include anche il pozzo Novara;
- Un tratto in galleria naturale realizzato con scavo meccanizzato mediante una TBM (Tunnel Borin Machine) avente diametro di circa 10,00m, che scaverà la galleria di linea dal manufatto in retrostazione Bologna fino al tronchino in retrostazione Politecnico per una lunghezza complessiva di circa 5,6km;
 - Un pozzo terminale di fine tratta funzionale per l'estrazione della TBM, posto all'estremità del tronchino in retrostazione Politecnico;
 - il manufatto in retrostazione Rebaudengo, avente la funzione di deposito-officina, per la manutenzione ordinaria programmata sui treni, oltre che il parcheggio di 7 treni in stalli predisposti e complessivamente di 10 treni a fine servizio;
 - la predisposizione per la realizzazione del manufatto di bivio nella diramazione nord verso San Mauro Torinese.

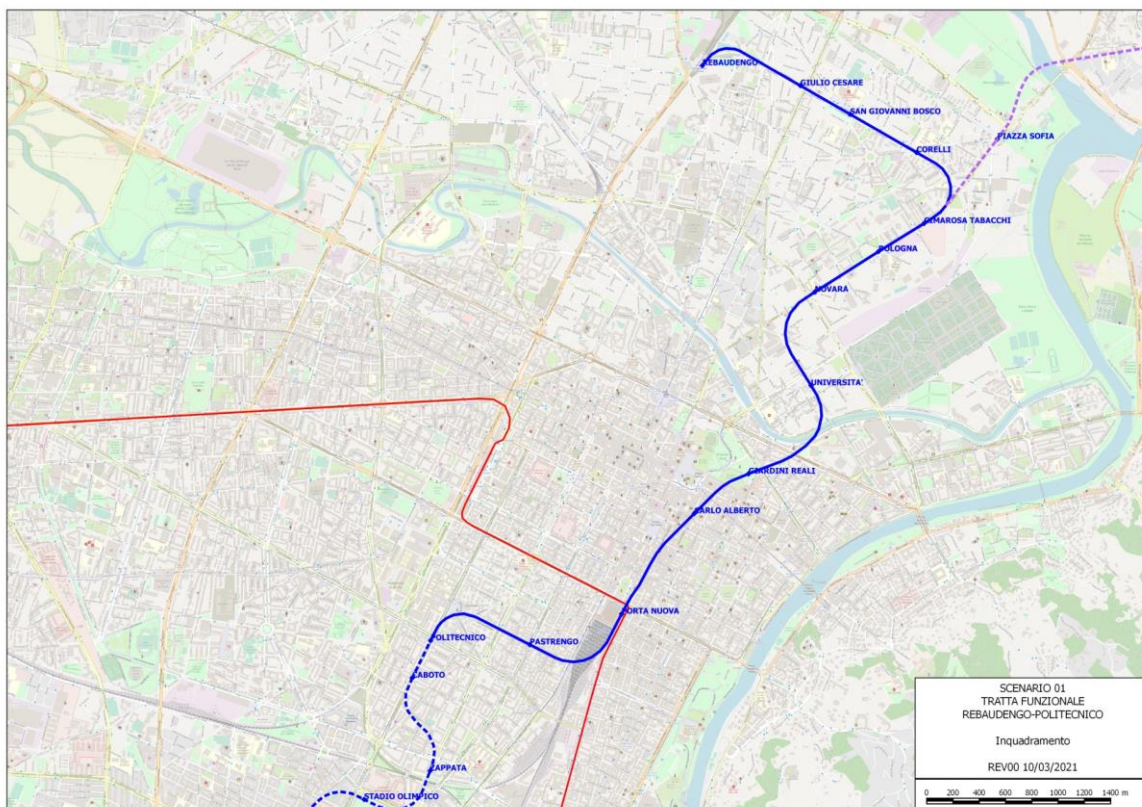


Figura 1. Key-plan della linea 2 – tratta funzionale Politecnico-Rebaudengo



CITTA' DI TORINO

**Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta:
Politecnico – Rebaudengo
Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna**

Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi

96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

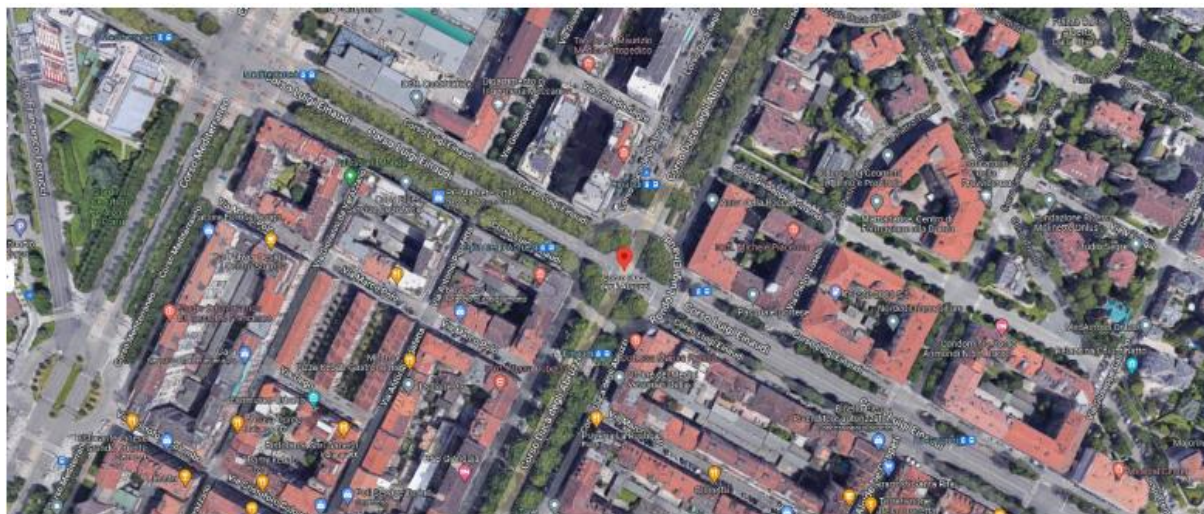


Figura 2. Estratto Google Maps stazione Politecnico

1.2 Descrizione delle opere

La stazione Politecnico è un manufatto interrato a quattro livelli interrati, con fondo scavo posto alla profondità di -31.75 m rispetto al piano campagna.

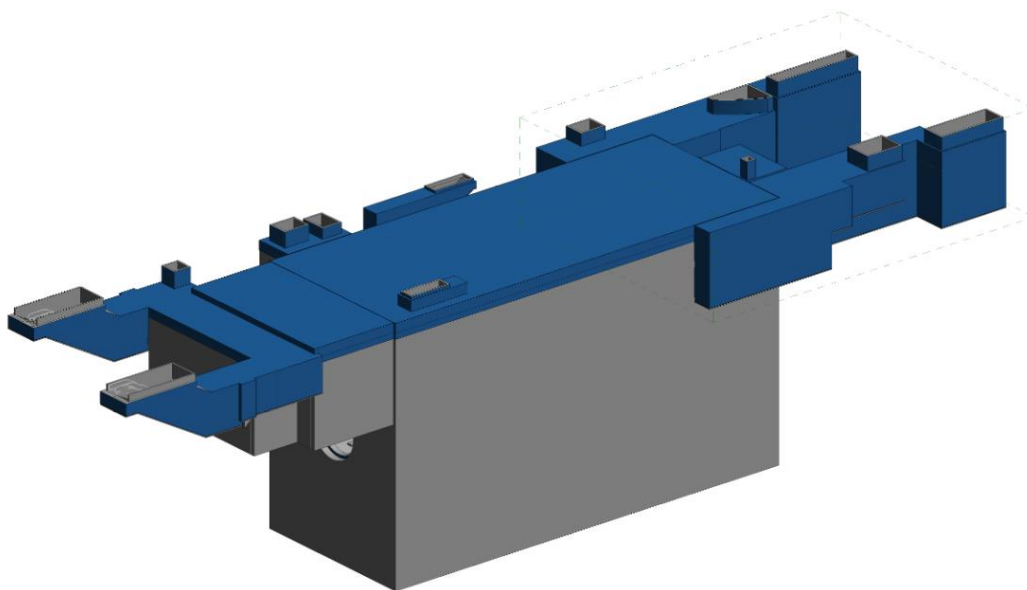




Figura 3. Modello 3d – Stazione Politecnico

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna
Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi	96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

La stazione verrà realizzata attraverso la tecnologia esecutiva di tipo top-down caratterizzata da uno scavo sostenuto da diaframmi contrastati da solai permanenti. I diaframmi presentano spessore di 1.20 m ed un immorsamento al di sotto del fondo scavo di 12 m. La stabilità del fondo scavo è garantita da un tampone di fondo realizzato mediante colonne in Jet Grouting. Data la luce della stazione verranno anticipati in concomitanza alla realizzazione dei diaframmi anche i setti permanenti interni che fungeranno, fin dalle fasi costruttive, da sostegno alle solette di copertura ed intermedia.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna
Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi	96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

2. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA E ANALISI NUMERICHE

2.1 Parametri geotecnici di riferimento

Con riferimento alla relazione Geotecnica, sono state individuate 7 unità geotecniche, caratterizzate da un comportamento meccanico-deformativo simile.

Nella seguente tabella si riportano gli intervalli di valori proposti per i parametri di resistenza e deformabilità delle unità geotecniche interessate dalla realizzazione delle opere in sotterraneo della linea 2 della Metropolitana di Torino. Considerando la quantità di prove di laboratorio eseguite sino a questa fase, ed una volta verificato che i materiali attraversati sono principalmente gli stessi, si è usato come riferimento la caratterizzazione geo-meccanica utilizzata nel contesto del progetto esecutiva della linea 1 della Metropolitana di Torino esistente.

Tabella 1. Parametri di resistenza e deformabilità per le unità geotecniche di riferimento

Unità	Geologia	Peso di volume (γ)	Coesione c' (kPa)	Angolo resistenza ϕ'	Modulo (MPa)	Poisson (-)	Coeff. permeabilità (m/s)
1	UID	19	0	29	15	0.30	$2 \cdot 10^{-5}$ a $8 \cdot 10^{-6}$
2	AFR-INS	19	10	36÷38	150÷170	0.30	$2 \cdot 10^{-5}$ a $8 \cdot 10^{-6}$
3	AFR-INS	19÷20	30÷50	38÷40	170÷200	0.30	$8 \cdot 10^{-6}$ a $5 \cdot 10^{-6}$
4	AFR-INS	19÷20	50÷100	38÷40	200÷260	0.30	$8 \cdot 10^{-6}$ a $5 \cdot 10^{-6}$
6	SFR	19	20	31	90	0.35	$5 \cdot 10^{-6}$
5	FAA	20	40	22-26	65	0.35	$2 \div 6 \cdot 10^{-9}$
7	SAF	20÷21	25÷50	26÷28	150	0.35	$2 \div 6 \cdot 10^{-9}$

NOTE:

- 1) Il valore del coefficiente di permeabilità nell'Unità 1 (UID) è assimilato a quello degli strati immediatamente inferiori, tenuto conto della sua elevata variabilità granulometrica,
- 2) Lo stesso parametro per l'Unità 2 (AFR e INS) va inteso come valore minimo e per direzione di flusso orizzontale; per direzione di flusso verticale è di circa un ordine di grandezza inferiore.
- 3) Il valore di k nell'Unità 6 (SFR) è stimato in base alla granulometria del terreno.



- 4) Il valore di k per le Unità 5 e 7 (FAA e SAF) si base sui risultati delle prove edometriche, con *U1: Terreno superficiale; U2: Ghiaie e sabbie da sciolte a debolmente cementate; U3: Ghiaie e sabbie mediamente cementate; U4: Ghiaie e sabbie altamente cementate; U5: Limi argillosi ed argille limose; U6: Alternanza di sabbie fini-medie debolmente limose e limi argillosi-sabbiosi; U7: Argille limose compatte e localmente litificate (marne di Sant’Agata).

Per ulteriori dettagli e/o approfondimenti in merito alla caratterizzazione geotecnica dei materiali si rimanda all’elaborato specialistico

Nella Tabella 2 è riportato il modello geotecnico di riferimento utilizzato per il dimensionamento della paratia di micropali. In Tabella 3 sono riportati i parametri geotecnici utilizzati nelle analisi. Per maggiori dettagli sulla caratterizzazione geotecnica si rimanda agli elaborati progettuali di riferimento.

Nelle seguenti tabelle vengono riportati la stratigrafia adottata e i parametri geotecnici adottati nella presente modellazione.

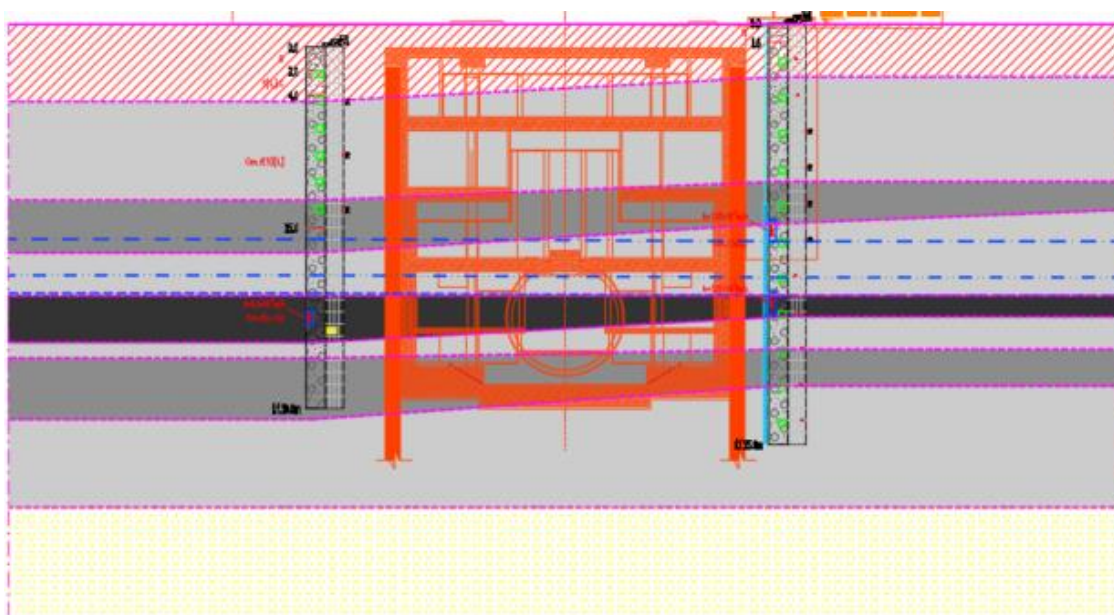



Figura 4. Stralcio stratigrafia stazione Politecnico

Unità geotecnica	Quota superiore da p.c. [m]	Quota inferiore da p.c. [m]
U1 - Terreno superficiale	0.0	-4.5

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna
Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi	96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

U2 – Ghiaia e sabbia da sciolta a debolmente cementata	-4.5	-40.0
U6 – Limo sabbioso debolmente argilloso	-40.0	-

Tabella 2. Modello geotecnico

Unità geotecnica	γ [kN/m ³]	ϕ [°]	c' [kPa]	c_u [kPa]	E [MPa]	ν [-]
U1	19	29	0	-	15	0.3
U2	19	36	10	-	150	0.3
U6	19	31	20	-	90	0.35

Tabella 3. Parametri geotecnici caratteristici

dove:

γ : peso di volume unitario

ϕ : angolo di attrito


c' : coesione apparente

c_u : coesione non drenata

E' : modulo di Young del terreno

ν : coefficiente di Poisson del terreno

Nell'ambito della caratterizzazione geotecnica, gli strati riconducibili alle unità 3 e 4 sono stati debitamente esaminati (si veda la Relazione Geotecnica par.7.8.3 cod. MTL2T1A0DGEOPENR002) e raggruppati nella formazione AFR-INS come indicato al capitolo 7.3 della Relazione Geotecnica, cautelativamente si riconduce quindi alle caratteristiche geomeccaniche fornite per l'Unità 2.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna
Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi	96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

3. ISOCEDIMENTI

In questo capitolo sono riportate le metodologie di calcolo adottate per la previsione degli spostamenti indotti dallo scavo della stazione.

3.1 Cedimenti dovuti allo scavo della stazione

Il modello di calcolo adottato per la previsione dei fenomeni di subsidenza si basa su relazioni empiriche, desunte dalla letteratura scientifica di riferimento e consente la valutazione del bacino di subsidenza causato dai lavori di scavo.

Viene scelto un metodo derivato dalla teoria di Bowles per identificare il profilo di subsidenza intorno alla stazione.

Bowles ha suggerito l'assestamento del terreno indotto dallo scavo in funzione della perdita di terreno dovuta alla flessione del muro di contenimento. Bowles dimostrò il calcolo dei cedimenti a una distanza specificata assumendo variazioni paraboliche di cedimenti all'interno della distanza di influenza.

Utilizzando la deflessione prevista del diaframma, il cedimento superficiale dietro il muro è stato calcolato mediante formule empiriche proposte da Bowles.

Di seguito viene riportato il metodo proposto da Zaw Zaw Aye, Dhiraj Karki e Christian Schulz.

Nella prima fase viene costruita la linea di influenza del cedimento del sottosuolo. Come mostrato nella figura seguente, si presume che la zona di influenza dell'assestamento diminuisca con la profondità da "D0" in superficie e zero al piede del muro. Con l'assunzione di relazioni lineari tra il volume della forma della parete deviata e il volume di cedimento a qualsiasi profondità all'interno della zona di influenza dei cedimenti, si calcolano i cedimenti del sottosuolo a diverse profondità.

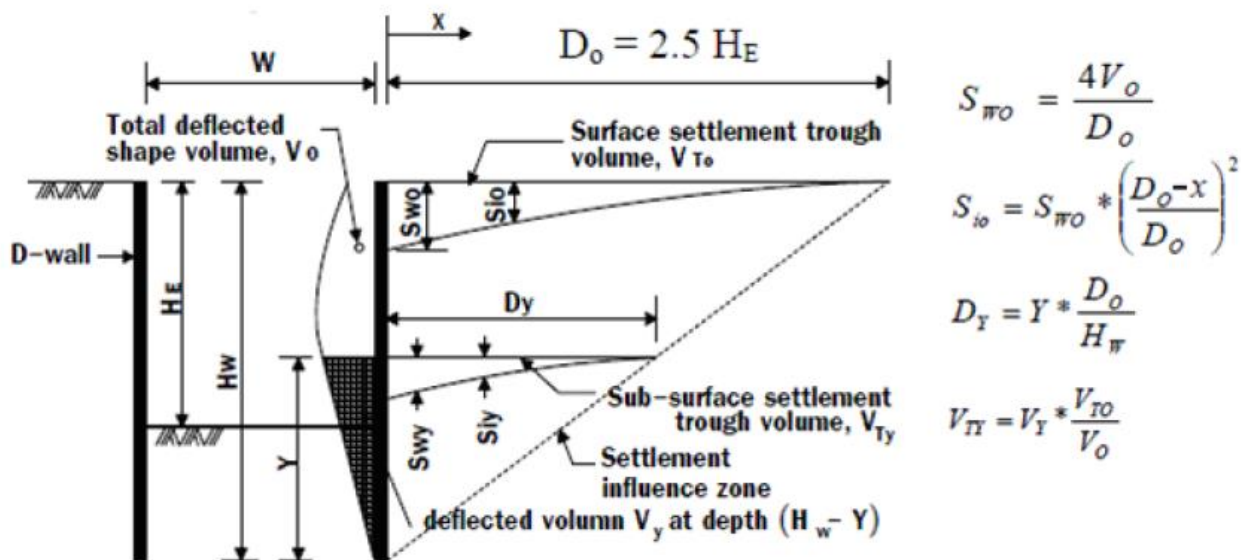


Figura 5. Dimostrazione della previsione dei cedimenti del sottosuolo dai valori di deflessione del diaframma

Assumendo una semplice distribuzione lineare del movimento orizzontale del terreno con la distanza, viene sviluppato un metodo di previsione per il movimento orizzontale del terreno sotto la superficie. Si presume che la distanza di influenza dello spostamento orizzontale dietro il diaframma sia $2,5 H_g$ a livello del suolo, come mostrato nella figura seguente. La profondità di influenza dello spostamento orizzontale è una profondità a deflessione del diaframma pari a zero, H_w , che può essere ottenuta estrapolando il profilo di deflessione del diaframma. La zona di influenza del movimento del suolo orizzontale è costruita collegando i punti finali di D_0 e H_w come mostrato nella figura seguente. Si presume che lo spostamento orizzontale diminuisca linearmente con la distanza, il massimo sulla superficie della parete e zero alla fine della zona di influenza.

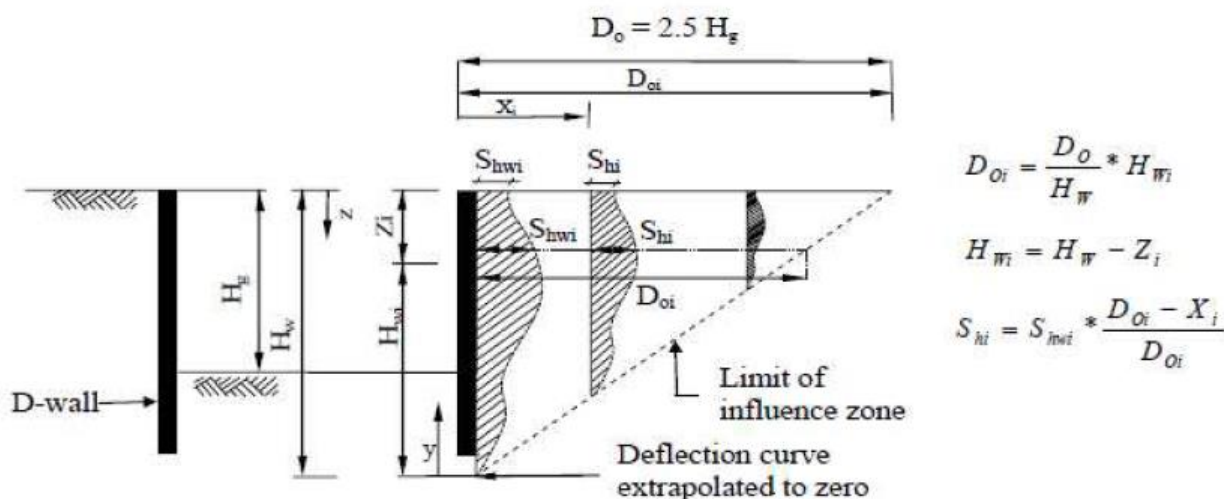


Figura 6. Dimostrazione della previsione del movimento orizzontale del sottosuolo dai valori di deflessione della parete del diaframma

3.2 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

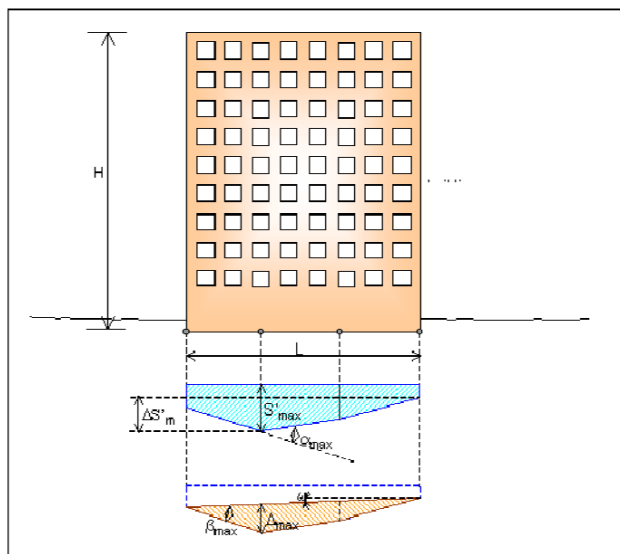



Figura 7. Principali parametri per la valutazione del danneggiamento degli edifici

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

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna
Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi	96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

- *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.

3.2.1 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 4. 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.

Tabella 5. Classificazione del danno secondo Rankine

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna
Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi	96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

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.

3.2.2 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.

Tabella 6. Indice di vulnerabilità

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna
Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi	96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

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



CITTA' DI TORINO

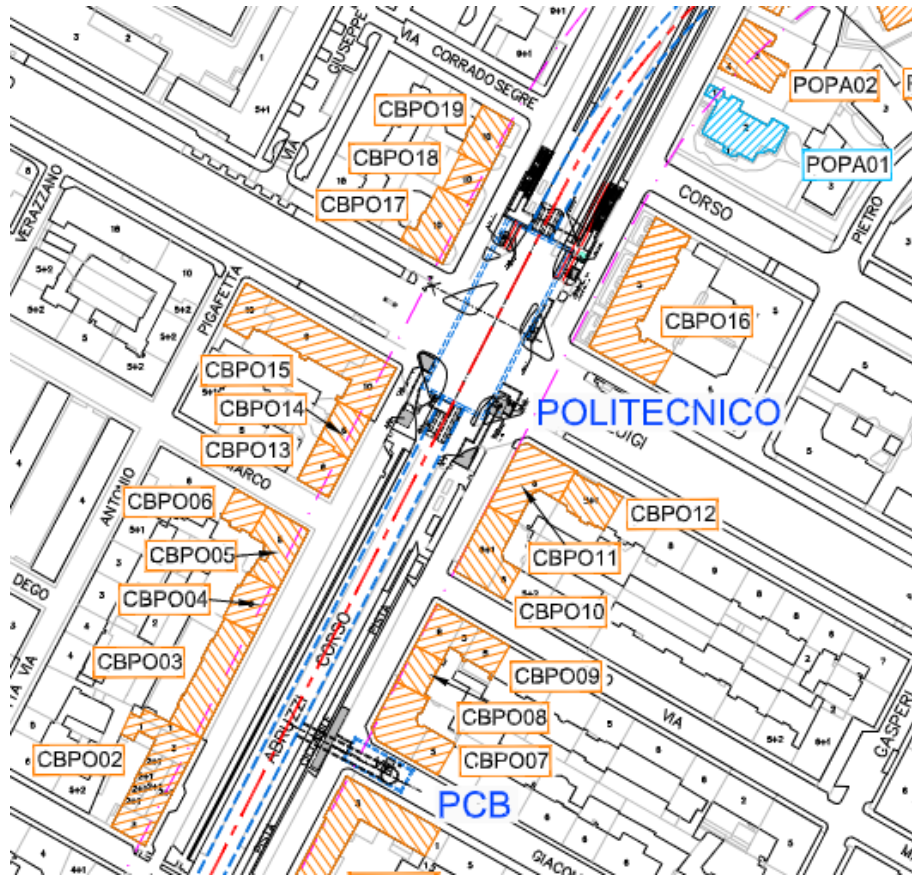
**Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta:
Politecnico – Rebaudengo
Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna**

Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi

96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

Indice di Vulnerabilità dell'edificio

		IRRILEVANTE	BASSO	MEDIO	ALTO	ELEVATO
		0<lv<2	2<lv<4	4<lv<6	6<lv<8	8<lv<10
		Fr=1.0	Fr=1.25	Fr=1.5	Fr=1.75	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 max >0.300	ε _{lim} [%] min max >0.240	ε _{lim} [%] min max >0.200	ε _{lim} [%] min max >0.171	ε _{lim} [%] min max >0.150



LEGENDA	
	TRACCIATO DI RIFERIMENTO
	FASCIA DI INFLUENZA DELLO SCAVO IN GALLERIA Larghezza totale 80,00 m
	INDAGINE LIVELLO 2
	INDAGINE LIVELLO 1
	INDAGINE LIVELLO 2 - MANUFATTO SOTTERRANEO
	EDIFICI INDAGATI A LIVELLO 1 PER ACCESSO NEGATO DA PARTE DELLA PROPRIETA'

Tabella 8. Pianta vulnerabilità fabbricati stazione Politecnico



3.1 Calcolo dei cedimenti

Nella zona intorno alla stazione verranno studiati i cedimenti dovuti allo scavo della stazione.

Partendo dalla forma deformata dei diaframmi derivati dal modello geotecnico, è possibile prevedere i cedimenti del terreno dovuti allo scavo della stazione.

3.1.1 Cedimenti dovuti al calcolo della stazione – breve termine

Innanzitutto vengono calcolati i cedimenti dovuti allo scavo della stazione.

Secondo questo metodo, il primo passo è ottenere il volume dei materiali persi V_s , mediante l'integrazione della curva deformata della parete basata sugli spostamenti orizzontali della parete δ_i .

Dall'integrale della deformazione risulta che il volume perso V_s risulta essere pari a $0.3\text{m}^3/\text{m}$.

È ora possibile procedere con il calcolo dei cedimenti a tergo della paratia di diaframmi dovuti allo scavo della stazione.

V_0	m^3/m	0,3	H_g	m	29,95
H_E	m	29,95	Z_i	m	0,00
H_w	m	43,00	H_{wi}	m	43,00
D_0	m	74,88	D_{0i}	m	74,88
S_{w0}	cm	1,40	S_{hwi}	cm	0,09

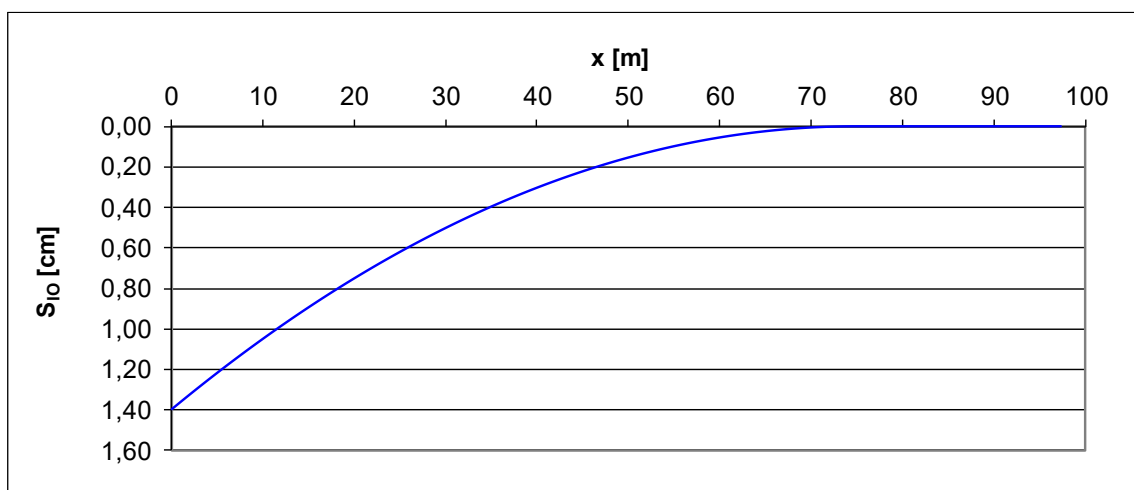


Figura 8. Diagramma cedimenti verticali

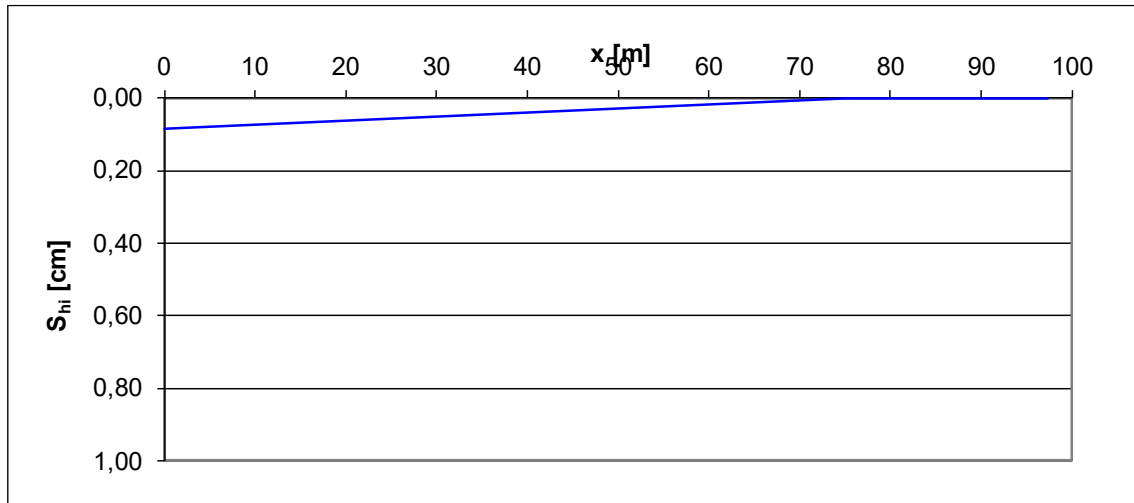


Figura 9. Diagramma spostamenti orizzontali

3.1.2 Cedimenti dovuti al calcolo della stazione – lungo termine

Per il calcolo degli isocedimenti a lungo termine si è preso come riferimento l'andamento dello spostamento a lungo termine dei diaframmi, abbattendo il modulo elastico del calcestruzzo degli stessi.

Secondo questo metodo, il primo passo è ottenere il volume dei materiali persi V_s , mediante l'integrazione della curva deformata della parete basata sugli spostamenti orizzontali della parete δ_i .

Dall'integrale della deformazione risulta che il volume perso V_s risulta essere pari a $0.30\text{m}^3/\text{m}$.

È ora possibile procedere con il calcolo dei cedimenti a tergo della paratia di diaframmi dovuti allo scavo della stazione.

V_0	m^3/m	0,30	H_g	m	29,95
H_E	m	29,95	Z_i	m	0,00
H_w	m	43,00	H_{wi}	m	43,00
D_0	m	74,88	D_{0i}	m	74,88
S_{w0}	cm	1,58	S_{hwi}	cm	0,21

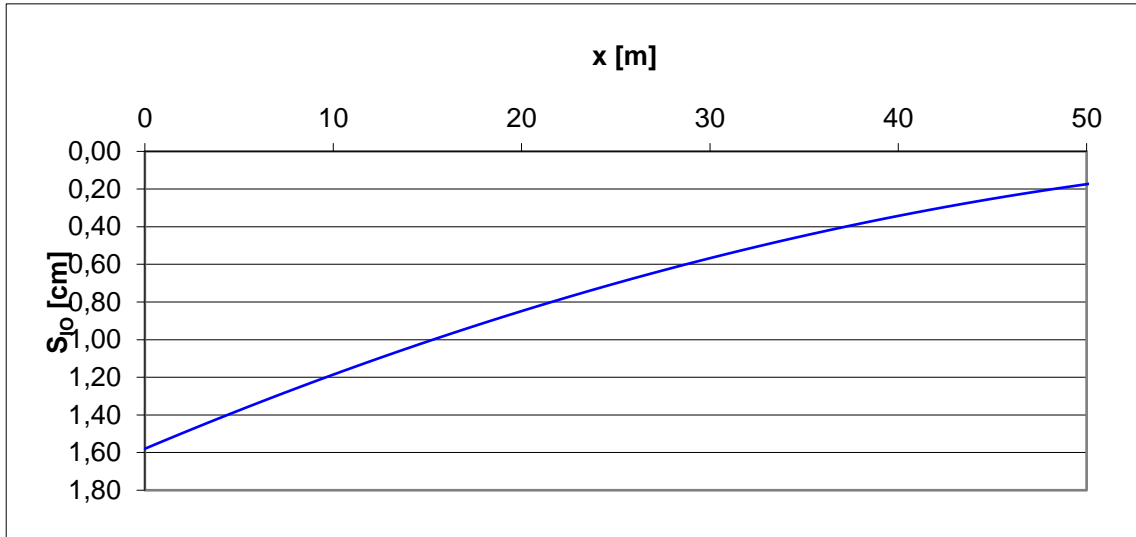


Figura 10. Diagramma cedimenti verticali

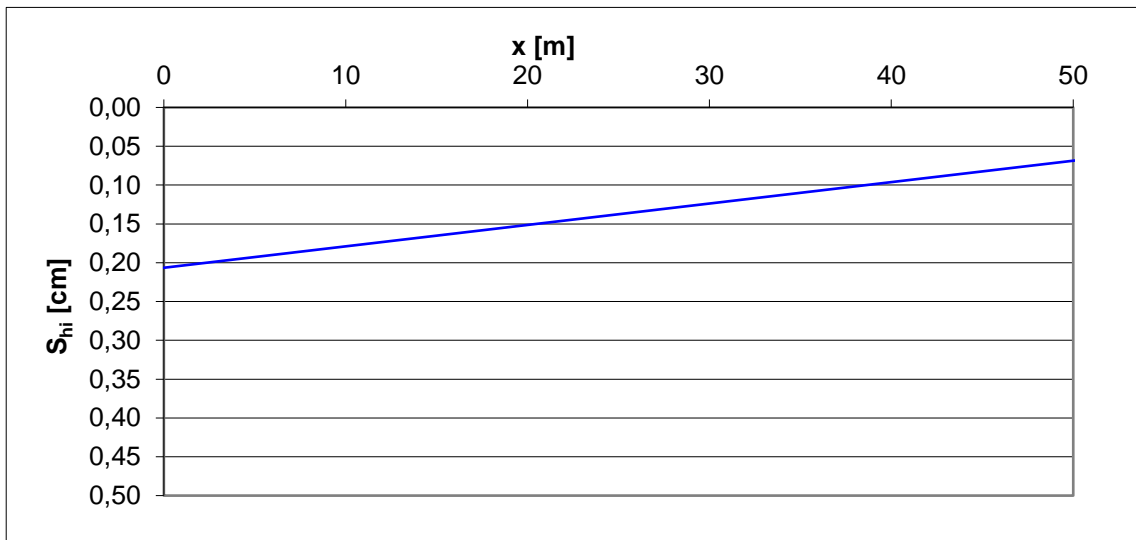



Figura 11. Diagramma spostamenti orizzontali

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna
Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi	96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

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 12).

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.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna
Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi	96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

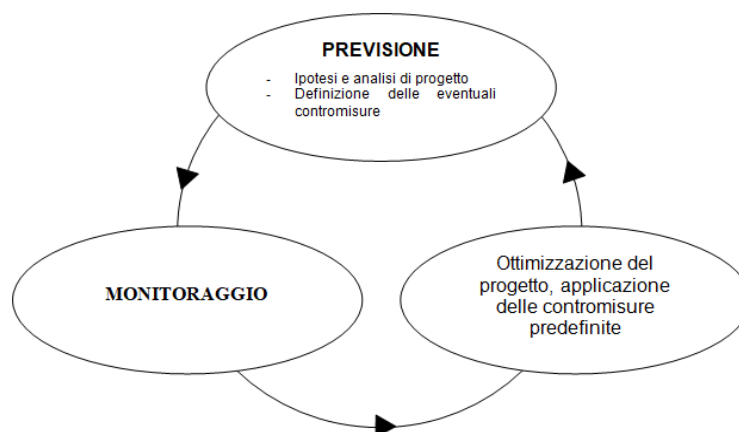


Figura 12. Diagramma di flusso relativo alla metodologia di progettazione flessibile

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.

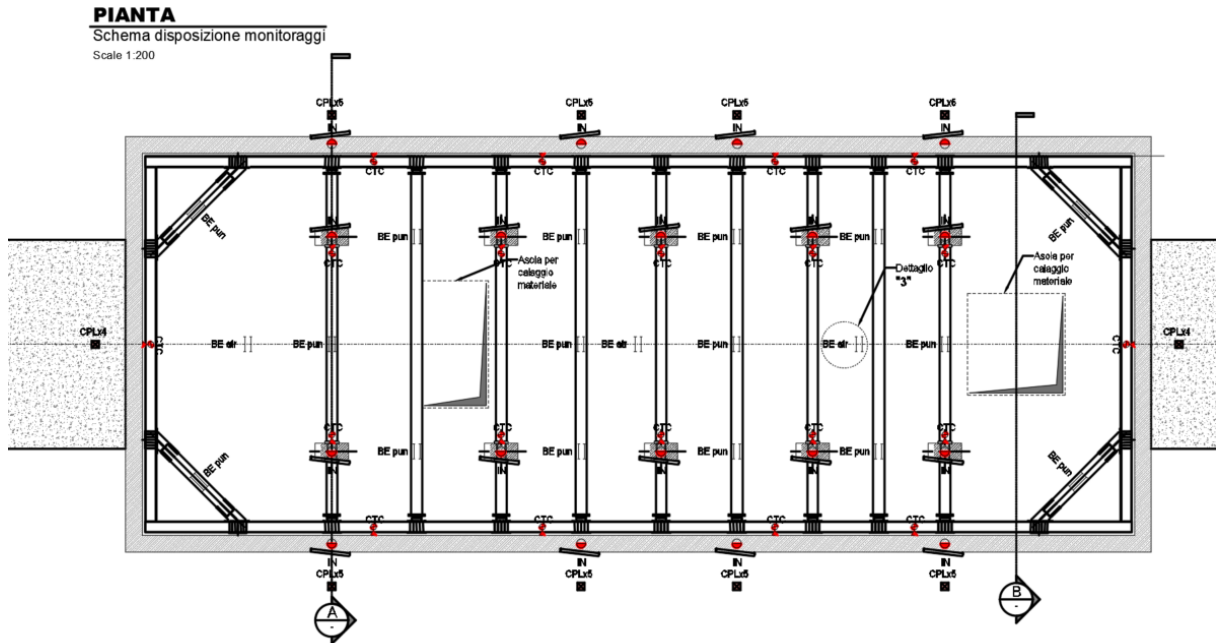


Figura 13. Schema preliminare di monitoraggio – Planimetria tipo

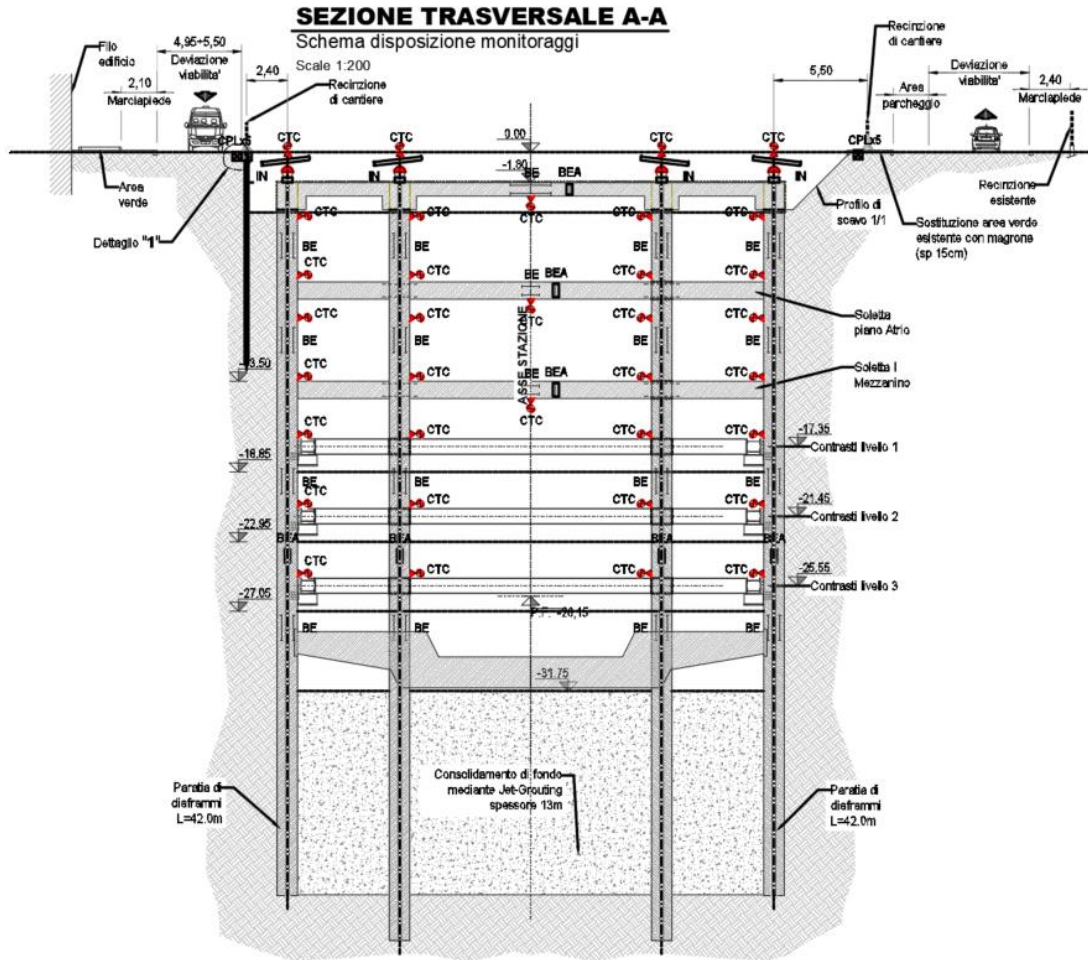


Figura 14. Schema preliminare di monitoraggio – Sezione tipo



Strumento	Sigla	Applicazione	Misurazione	Num.
Mire ottiche	CTC	Diaframmi e solette	Misurazione delle deformazioni	142
Punti di livellazione superficiale	CPL	Piano campagna	Subsidenza	48
Barrette estensimetriche	BE	Rivestimento definitivo	Stato tensionale	49
Barrette estensimetriche	BE	Puntoni	Stato tensionale	42
Barrette estensimetriche di riferimento	BEA	Rivestimento definitivo	Stato tensionale	15
Inclinometri	IN	Diaframmi	Misurazione inclinazione	8

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.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo Lotto costruttivo 2: Rebaudengo - Bologna
Relazione di calcolo sugli effetti indotti dagli scavi	96_MTL2T1A2DPRCSPOR001-0-0

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.

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.