



FERROVIE EMILIA ROMAGNA

Linea SFM2 Bologna-Portomaggiore: adeguamento della progettazione definitiva e coordinamento per sicurezza in fase di progettazione per la realizzazione del completamento dell'interramento della tratta urbana di Bologna della Linea SFM2 Bologna-Portomaggiore e Redazione del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica relativo al raddoppio del binario tra la fermata di Bologna-Via Larga e la stazione di Budrio (CIG 754332765C).

## PROGETTO DEFINITIVO



### OPERE DI PRESIDIO E MONITORAGGI

ANALISI SUBSIDENZE E IMPATTI SU FABBRICATI E MANUFATTI

### RELAZIONE TECNICA

CARTELLA N° 6.1

FER BP D T0 MOP\_GEN\_R\_001\_0

DATA	CODICE RELAZIONE		REV.
31/10/2019	FER BP D T0	MOP GEN R 001	0

AGGIORNAMENTI						
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	VISTO
0	Emissione finale	31-10-19	Ing. C. Bertello	Ing. G. Quaglio	Ing. S. Stefanizzi	Ing. V. Floria

<u>Responsabile del progetto e dell'integrazione fra le prestazioni specialistiche:</u>  <b>Ing. Vincenza Floria</b> Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino, n. 8042 (Firmato digitalmente)	<u>Il Progettista:</u>  <b>Ing. Stefania Stefanizzi</b> Ordine degli Ingegneri di Lecce, n. 2339 (Firmato digitalmente)	<u>Il Responsabile Unico del Procedimento:</u>  <b>Ing. Fabrizio Maccari</b> (Firmato digitalmente)
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>5</b>
2.1	Elaborati associati alla presente relazione tecnica.....	5
2.2	Riferimenti bibliografici .....	6
<b>3</b>	<b>APPROCCIO METODOLOGICO PER L'ANALISI DEGLI EFFETTI INDOTTI DAGLI SCAVI .....</b>	<b>7</b>
3.1	Introduzione .....	7
3.2	Metodologia di analisi per gli edifici interferenti.....	9
3.2.1	Definizione dei potenziali danni sugli edifici .....	9
3.2.2	Classificazioni di danno e concetto di Rischio.....	11
3.2.3	Indice di Vulnerabilità .....	13
3.3	Metodologia di analisi per le altre opere interferenti.....	15
3.4	Categorie di Danno per gli edifici .....	15
3.5	Valutazioni degli impatti sulle altre interferenze.....	24
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>27</b>
	<b>ALLEGATI.....</b>	<b>28</b>



## 1 INTRODUZIONE

La presente relazione è inquadrata nell'ambito dell'incarico di adeguamento della progettazione definitiva del completamento dell'interramento della Linea ferroviaria Bologna-Portomaggiore, volto all'eliminazione dei passaggi a livello nelle tratte urbane di Bologna tra Zanolini-Rimesse (Tratta 1) e Via Larga (Tratta 2).

La Tratta 1 (Zanolini-Rimesse) è compresa tra le progressive km 2+029,65 e km 3+354,59 della linea, e prevede la realizzazione del completamento della galleria di Zanolini, già realizzata, la predisposizione per la nuova fermata Libia e l'adeguamento dell'esistente Fermata Rimesse

La Tratta 2 (Via Larga) è compresa tra le progressive km 4+000,00 e km 5+100,00, a partire dalla fine del marciapiede di fermata Santa Rita e terminando in via Larga e consiste nell'abbassamento del binario esistente permettendo il sottoattraversamento di via Cellini, dell'autostrada A14 e di via Larga e l'adeguamento dell'esistente Fermata Via Larga.



Figura 1: Ubicazione del sito in progetto su immagine satellitare GoogleEarth®



Figura 2: Corografia dell'intervento di interrimento.

In questo elaborato di adeguamento del progetto definitivo di riferimento viene recepita la seguente prescrizione da parte del Comune di Bologna: *“Si raccomanda l'adozione di misure di particolare attenzione nella salvaguardia anche sotto il profilo statico degli edifici prossimi al sedime ferroviario”*.

L'adeguamento del PD in ottemperanza alla suddetta prescrizione include:

- 1) le analisi delle caratteristiche degli edifici in prossimità del sedime ferroviario (analisi BCS) con definizione degli indici di vulnerabilità per gli edifici rappresentativi lungo il tracciato
- 2) definizione delle classi di danno per gli edifici sulla base delle modellazioni numeriche (analisi BRA) nelle zone critiche
- 3) definizione delle prime indicazioni sul sistema di monitoraggio (strumentazioni, frequenze di lettura e limiti di controllo) per gli edifici in interferenza.

In questo elaborato si dettaglia il punto 2, illustrando le analisi eseguite su fabbricati ed altre strutture in interferenza con le opere in progetto al fine di valutare l'impatto dovuto alla realizzazione degli scavi previsti.

## 2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 ELABORATI ASSOCIATI ALLA PRESENTE RELAZIONE TECNICA

In Tabella 1 sono riportati i documenti ai quali si fa riferimento nel presente elaborato.

**Tabella 1: Documenti di riferimento del presente adeguamento del Progetto Definitivo**

CARTELLA 2.5 – STUDI E INDAGINI FABBRICATI ED ALTRE STRUTTURE IN INTERFERENZA		
FER_BP_D	T0_INT_GEN_R_001	RELAZIONE TECNICA E SCHEDE DI RILIEVO STRUTTURE
CARTELLA 3.3 – GALLERIE, TRINCEE DI LINEA E MANUFATTI PROGETTO STRUTTURALE		
FER_BP_D	T1_STR_GEN_R_001	GALLERIA A FORO CIECO (VIA BENTIVOGLI) - RELAZIONE DI CALCOLO
CARTELLA 6.1 – OPERE DI PRESIDIO E MONITORAGGI		
FER_BP_D	T1_MOP_GN1_S_001	INTERVENTI DI MONITORAGGIO OPERE CIVILI - GALLERIA A FORO CIECO (VIA BENTIVOGLI)



## 2.2 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- International Tunneling Association (ITA) - "Guidelines for systematic Risk Management" (2004, and revisions)
- International Tunneling Insurance Group (ITIG) – "A Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works" (2006)
- American Society of Civil Engineers (ASCE) – "Geotechnical Baseline Reports for Construction - Suggested Guidelines" (2007)
- Boscardin M.D., Cording E.J. (1989): Building response to excavation-induced settlement. ACSE Journal of Geotechnical Engineering, Vol.115, No.1, pp.1-21.
- Mair R.J., Taylor R.N., Burland J.B. (1996): Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling, Proc. Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London (eds R J. Mair and R. N. Taylor), Balkema, pp 713-718.
- New B.M, O'Reilly M.P. (1991): Tunnelling induced ground movements: predicting their magnitude and effects. 4th International Conference on Ground Movements and Structures, Cardiff, invited review paper, pp. 691-697.
- Rankin W.J. (1992): Prediction and effects of ground movements caused by tunnelling in soft ground beneath urban areas. Pub. CIRIA, London.
- Viggiani C. (1999): Fondazioni. Ed. Hevelius.
- Wroth C. P., Burland J. B. (1974): Settlement of building and associated damage". SOA Review, Conf. Settlement of structures, Cambridge. pp. 651-654.
- Bjerrum, L. (1963), Allowable settlement of structures. Proceedings of the 3rd European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, 2, pp. 135-137
- Mair, R.J., Taylor, R.N., Burland, J.B. (1996), Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunneling. Geotechnical Aspects of underground Construction in Soft Ground, Mair & Taylor (eds).
- Muir-Wood, A.M. (1975), The circular tunnel in elastic ground, Géotechnique 25
- Franzius J.N. (2003): Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence. Tesi di Dottorato. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, SW7 2BU.
- Giardina G., Floria V., Hendriks M. & Rots, J. (2012). Vulnerability assessment of buildings subject to tunnel-induced settlements: the influence of orientation and position of the building, WTC 2012 Bangkok.
- Vittorio Guglielmetti Ashraf Mahtab Shulin Xu Geodata S.p.A., Turin, Italy (2003). Mechanized Tunnelling in Urban Areas Design methodology and construction control.
- Z.C. Moh, Daniel H. Ju and R.N. Hwang (1996), Ground Movements around Tunnels in Soft Ground

### 3 APPROCCIO METODOLOGICO PER L'ANALISI DEGLI EFFETTI INDOTTI DAGLI SCAVI

#### 3.1 INTRODUZIONE

Lo scavo di gallerie in ambito urbano provoca inevitabilmente un disturbo nel terreno, inducendo cedimenti nei fabbricati e nelle strutture ricadenti nell'area di influenza dello scavo.

L'entità di tali cedimenti è variabile in funzione della profondità della galleria dal piano di fondazione degli edifici, delle caratteristiche geotecniche dei terreni, e da tutti gli altri fattori che tengono conto dell'interazione dello scavo con le opere circostanti.

Per tale ragione, la realizzazione di strutture interrato in aree urbane richiede un'analisi delle problematiche legate al processo di scavo. Analogamente, 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 le strutture, ponendo eventualmente in opera le adeguate contromisure per ricondurre le varie situazioni entro i limiti previsti.

Come detto in premessa, l'analisi di rischio per le preesistenze si basa su due elementi essenziali quali il BCS (*Building Condition Survey*) ed il BRA (*Building Risk Assessment*):

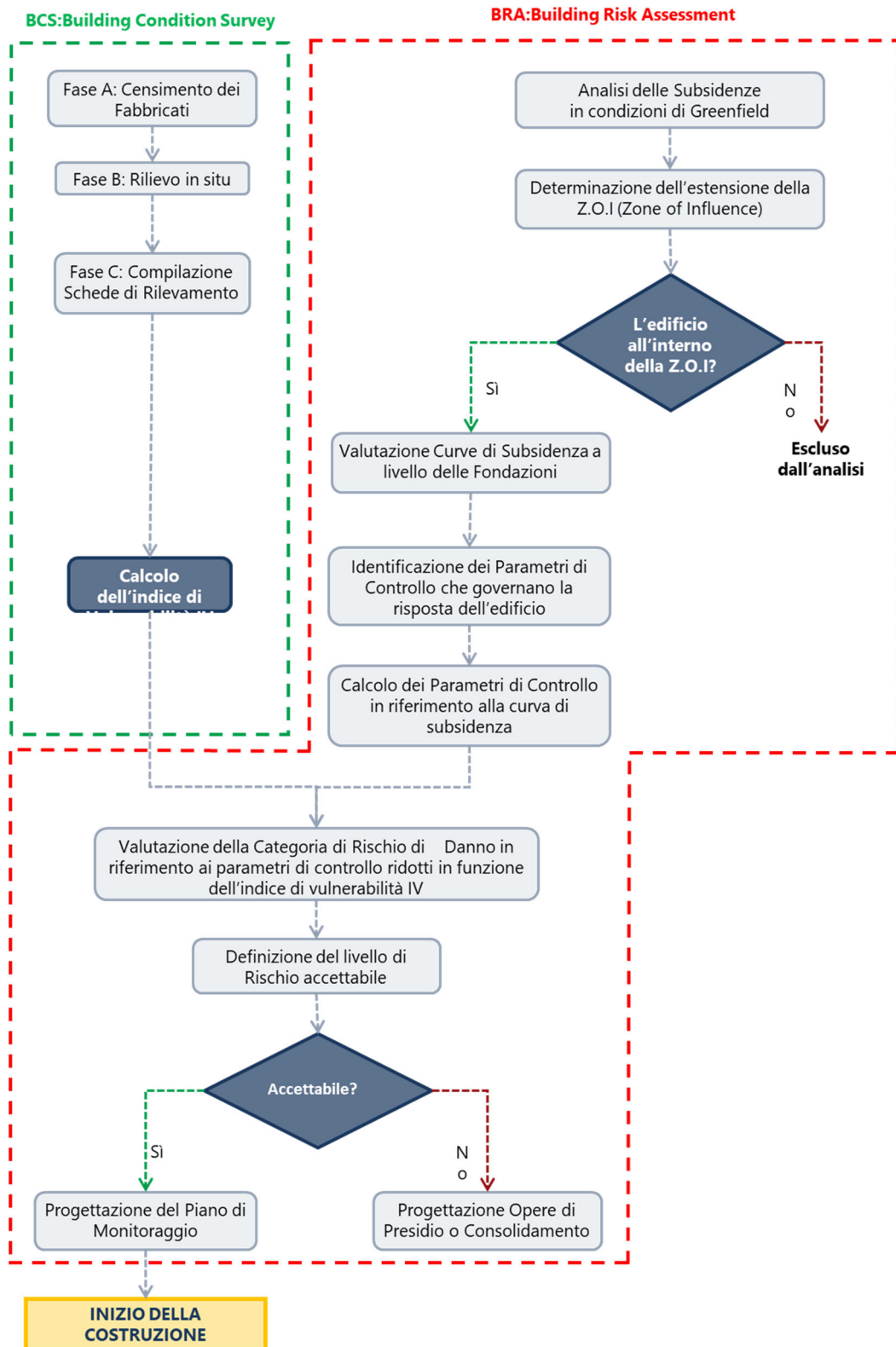
1. Studi integrativi sui fabbricati (BCS) con individuazione delle caratteristiche di vulnerabilità degli stessi mediante schede specifiche per tutti i fabbricati rilevanti lungo il tracciato. Per ciascun edificio è stato definito l'*Indice di Vulnerabilità*, caratteristica intrinseca dell'edificio dipendente dalla sua storia che esprime di quanto l'edificio si allontana dalle condizioni di perfetta conservazione.

I dettagli di questa attività sono riportati nel documento "*Strutture in interferenza - Relazione tecnica*" (codice *T0\_INT\_GEN\_R\_001*) del presente PD e relative schede tecniche allegate.

2. Analisi degli effetti indotti dagli scavi (subsidenze/sollevamenti) BRA con individuazione delle strutture in condizioni critiche da attenzionare durante il corso d'opera, attraverso la definizione delle categorie di danno. Questi studi sono presentati nella presente relazione tecnica.

L'approccio di analisi del rischio è riportato sinteticamente nel diagramma di flusso di Figura 3.





**Figura 3: Diagramma di flusso relativo all'approccio adottato per l'analisi di rischio di danneggiamento degli edifici**

## 3.2 METODOLOGIA DI ANALISI PER GLI EDIFICI INTERFERENTI

### 3.2.1 Definizione dei potenziali danni 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 di identificazione dello stato deformativo di un edificio soggetto a cedimenti differenziali in fondazione.

Parimenti è disponibile un'ampia documentazione bibliografica sull'argomento che consente 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.

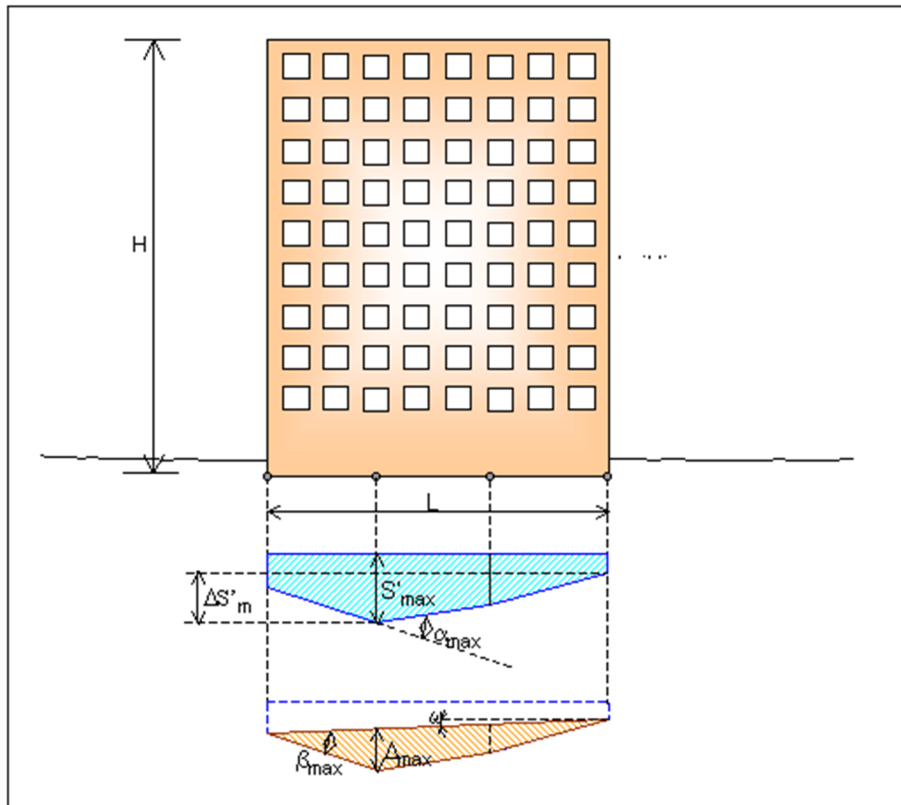
Per definire in maniera più precisa il comportamento degli edifici nei confronti della subsidenza e quindi per individuare i parametri che maggiormente inducono il danneggiamento delle strutture, è necessario effettuare una prima distinzione sulla base della tipologia delle fondazioni:

- 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.

Si rende 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 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 ( $\varepsilon_{max}$ ), che è funzione dell'inflessione relativa massima ( $\Delta_{max}$ ) subita dall'edificio. La deformazione massima di trazione deve essere confrontata con la deformazione limite ( $\varepsilon_{lim}$ ) 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 4).



**Figura 4: Principali parametri di controllo per la valutazione del danneggiamento degli edifici**

Per quanto concerne l'entità del danneggiamento, la classificazione è quella di seguito riportata:

- **danni estetici:** riguardano lievi fessurazioni o dislocamenti in tamponamenti, pareti divisorie, pavimentazioni, e finiture in genere. Questi effetti possono essere tollerati in quanto 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 (per le strutture in c.a.) o l'eccessiva deformazione (per le 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 sconnessione di questi e in casi limite al collasso dell'intero edificio.

### 3.2.2 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 (come detto la deformazione limite di trazione) sono forniti dalla classificazione di *Burland* (classificazione di rischio 1 - 1977), che propone diverse categorie di rischio in funzione dello stato fessurativo della struttura.

La Tabella 2 associa ad ogni categoria di rischio una descrizione del potenziale danno alla struttura.

**Tabella 2: Classificazione utilizzata per la valutazione del danneggiamento di edifici a fondazioni continue (Burland, 1977)**

CATEGORIA DEL RISCHIO DI DANNO	TIPO DI DANNO	DESCRIZIONE DEL DANNO	PARAMETRO DI CONTROLLO
			$\epsilon_{lim}$ [%]
0 (estetico)	Irrilevante, non visibile	Crepe a "corda di crine".	<b>0 - 0,05</b>
1 (estetico)	Molto lieve	Crepe leggere. Eventuali fessurazioni isolate all'interno degli edifici. Crepe nei tavolati in laterizio osservabili con attente ispezioni.	<b>0,05 - 0,075</b>
2 (estetico)	Lieve	Molte fessurazioni all'interno dell'edificio: crepe visibili, possibili infiltrazioni dovute all'umidità. Le porte e le finestre possono svergolarsi.	<b>0,075 - 0,15</b>
3 (estetico/funzionale)	Medio	Danni a porte e finestre. Danni da infiltrazioni di umidità. Possibili danneggiamenti alle tubature.	<b>0,15 - 0,3</b>
4 (funzionale)	Elevato	Onde e rigonfiamenti sulle pavimentazioni e sui muri. Perdita della capacità portante delle travature.	<b>&gt; 0,3</b>
5 (strutturale)	Molto elevato	Notevole perdita della capacità portante delle travature. Pericolo d'instabilità strutturali.	<b>&gt; 0,3</b>

Per gli edifici caratterizzati da fondazioni isolate, si utilizza la classificazione di *Rankine* (classificazione di danno 2) per stabilire i limiti base in funzione dei parametri di riferimento cedimento e deformazione angolare e quindi permettere l'individuazione delle diverse categorie di rischio.

Nella seguente Tabella 3 è presentata la descrizione del danno per tale classificazione.

**Tabella 3 Classificazione utilizzata per la valutazione del danneggiamento di edifici a fondazioni isolate (Rankine, 1988)**

CATEGORIA DEL RISCHIO DI DANNO	TIPO DI DANNO	DESCRIZIONE DEL DANNO	PARAMETRI DI CONTROLLO	
			$\beta_{MAX}$	$S_{MAX}$ [mm]
1 (estetico)	Irrilevante, non visibile	Improbabile danno superficiale.	<1/500	<10
2 (estetico)	Lieve	Possibile danno superficiale senza conseguenze strutturali	1/500 – 1/200	10-50
3 (funzionale)	Medio	Probabile danno superficiale e possibile danno strutturale ed alle tubature	1/200 – 1/50	50-75
4 (strutturale)	Elevato	Probabile danno strutturale ed alle tubature	>1/50	>75

Al fine di unificare la nomenclatura esistente in funzione della correlazione fra le due classificazioni sopracitate, sono state fra loro assimilate in funzione della tipologia di danno potenziale verificabile e dell'entità del danneggiamento le categorie 0 e 1 (danni trascurabili o molto lievi) e le categorie 4 e 5 (danni elevati e molto elevati) di *Burland* per le fondazioni continue, ottenendo una correlazione fra questa categoria di rischio e quella di *Rankine*. Questo permette di uniformare gli indici di riferimento che possono essere utilizzati per definire il livello di danneggiamento potenziale e gli interventi eventuali da mettere in opera.

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.



### 3.2.3 Indice di Vulnerabilità

La realizzazione di strutture sotterranee può causare nell'edificio modi di deformazione differenti da quelli che esso normalmente sperimenta e che sono riconducibili 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 della galleria 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 sarà 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  $I_V$ . Per la definizione dell'Indice di Vulnerabilità di tutti gli edifici rilevanti lungo il tracciato si rimanda alla relazione tecnica *T0\_INT\_GEN\_R\_001*.

**Tabella 4 Indice di Vulnerabilità -  $I_V$**

INDICE DI VULNERABILITÀ	CLASSE DELL'EDIFICIO
0 - 2	Irrilevante
2 - 4	Basso
4 - 6	Medio
6 - 8	Alto
8 - 10	Elevato

L' $I_V$  viene utilizzato per stabilire un fattore riduttivo dei valori limite dei parametri di controllo che compaiono delle 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. Le correzioni delle classificazioni di rischio adottate sono riportate in Figura 5 per il caso di *Rankine*. In funzione della classe di appartenenza di  $I_V$ , si stabilisce un coefficiente riduttivo  $F_R$  dei valori limite dei parametri di controllo ( $\epsilon_{lim}$ ,  $\Delta_{max}$ ,  $\beta_{max}$ ,  $S_{max}$ ) variabile da 1.0 a 2.0.

Il significato della correzione è il seguente: a parità di cedimento indotto a livello del piano di fondazione, un edificio molto vulnerabile subisce danni molto più elevati (poiché appartiene ad una classe di rischio più alta) di un edificio poco vulnerabile.

La definizione di un livello di soglia per i cedimenti superficiali sviluppati in corrispondenza degli edifici è una tematica complessa e delicata, poiché implica la necessità di fissare il livello di danno massimo che si è disposti ad accettare. 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 come 'lieve' (categoria 2) nella *classificazione di rischio 2 di Rankine* (Tabella 3). Tale tabella fa riferimento

ad edifici con telaio in c.a. a plinti isolati, che risultano essere quelli più sensibili rispetto ad edifici in muratura, oppure con telai in c.a. ma con fondazioni a graticcio o platea.

Nel seguito (Figura 5) sono quindi riportate le classificazioni di rischio con i relativi valori dei parametri limite di riferimento per le varie categorie, integrate in funzione della vulnerabilità caratteristica degli edifici (*"Mechanized tunnelling in urban areas"*, V. Guglielmetti, P. Grasso, A. Mathab, S. Xu).

		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	
Categorie di Danno		Parametri di controllo									
		$S_{max}$ [mm]	$\beta_{lim}$ [%]	$S_{max}$ [mm]	$\beta_{lim}$ [%]	$S_{max}$ [mm]	$\beta_{lim}$ [%]	$S_{max}$ [mm]	$\beta_{lim}$ [%]	$S_{max}$ [mm]	$\beta_{lim}$ [%]
1	$\epsilon_{lim}$ [%]	<1/500	<8	<1/625	<6.7	<1/750	<5.7	1/875	<5	<1/1000	
	min max	0,000 0,050	0,000 0,040	0,000 0,033	0,000 0,029	0,000 0,025	0,029 0,043	0,025 0,038			
2	$\epsilon_{lim}$ [%]	10-50	1/200	8-40	1/250	6.7-33.3	1/300	5.7-28.6	1/350	5-25	1/400
	min max	0,075 0,150	0,080 0,120	0,050 0,100	0,043 0,088	0,038 0,075					
3	$\epsilon_{lim}$ [%]	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
	min max	0,150 0,300	0,120 0,240	0,100 0,200	0,088 0,171	0,075 0,150					
4	$\epsilon_{lim}$ [%]	>75	>1/50	>60	>1/62.5	>50	>1/75	>42.9	>1/87.5	>37.5	>1/100
	min	>0.300	>0.240	>0.200	>0.171	>0.150					

FR Coefficiente di riduzione per la correzione degli intervalli di valori caratteristici dei parametri di controllo

Figura 5: Classificazioni di rischio e parametri limite di riferimento

Nella stessa tabella è evidenziato il sottoinsieme di Categorie di Danno / Classi di Vulnerabilità degli edifici risultanti dalle analisi e verifiche eseguite in questa fase di progettazione dell'interramento della tratta urbana di Bologna della Linea SFM2: tutti gli edifici rientrano in categorie di danno inferiori alla seconda.

### 3.3 METODOLOGIA DI ANALISI PER LE ALTRE OPERE INTERFERENTI

I criteri precedentemente descritti per la valutazione delle Classi di Danno sono validi nell'ambito degli studi di impatto dei fabbricati. Per le altre interferenze presenti nel tracciato sono state eseguite analisi specifiche di tipo numerico.

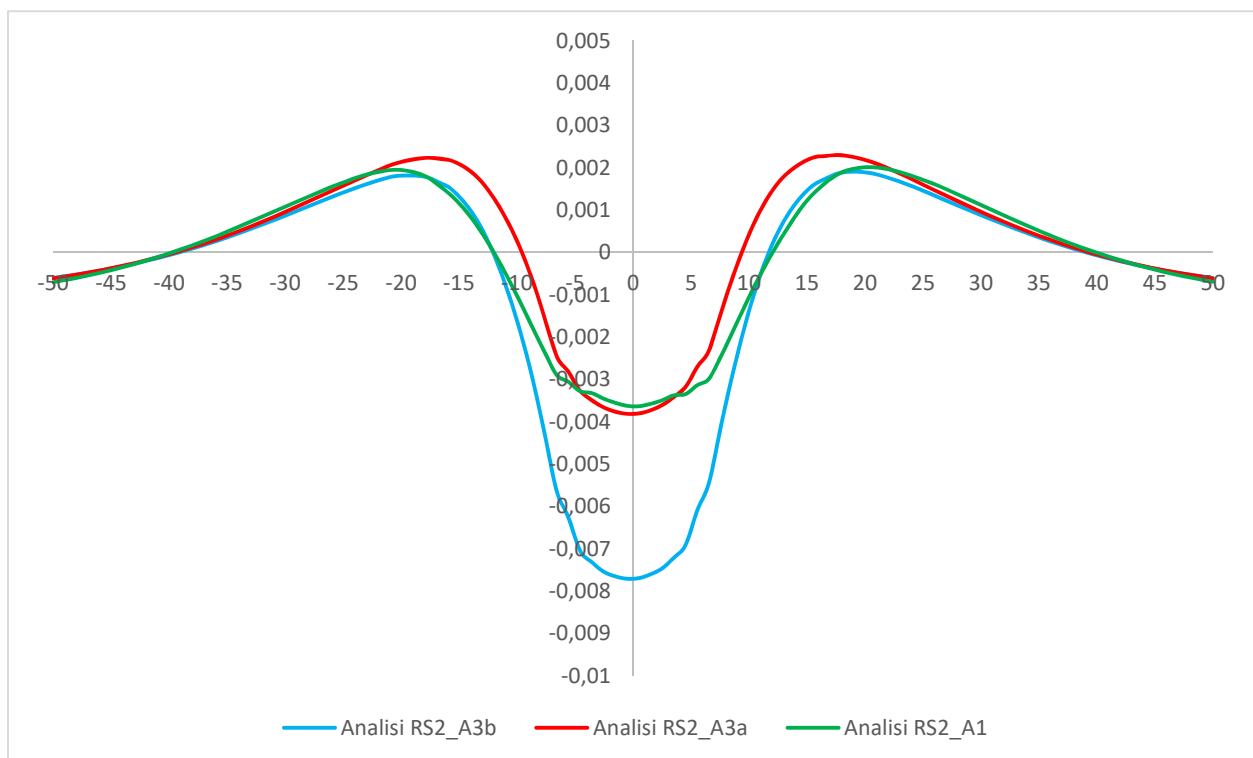
### 3.4 CATEGORIE DI DANNO PER GLI EDIFICI

Il calcolo dei parametri di controllo definiti in precedenza, utili a determinare la classe di danno degli edifici, è stato condotto per alcuni di essi ritenuti maggiormente rappresentativi. In particolare, sono stati individuati 11 manufatti lungo le tratte in esame.

Il tracciato è stato suddiviso in 3 zone di influenza, ognuna delle quali presenta una diversa curva di subsidenza e di conseguenza diverse curve di isocedimento:

1. Zona di influenza della galleria a foro cieco;
2. Zona di influenza di galleria artificiale;
3. Zona di influenza stazione Rimesse (utilizzata anche per quanto riguarda la stazione Larga, mentre per la stazione Libia si è deciso di utilizzare in via cautelativa la curva di subsidenza relativa alla galleria artificiale).

La curva di subsidenza nell'intorno della galleria a foro cieco è stata ricavata da modelli numerici bidimensionali secondo le modalità descritte nel documento T1\_STR\_GEN\_R\_001 e riportata in Figura 6. Si specifica che nelle considerazioni che seguono è fatto riferimento all'analisi RS2\_A3b che, oltre ad essere quella proposta nel presente PD, risulta anche la più cautelativa.



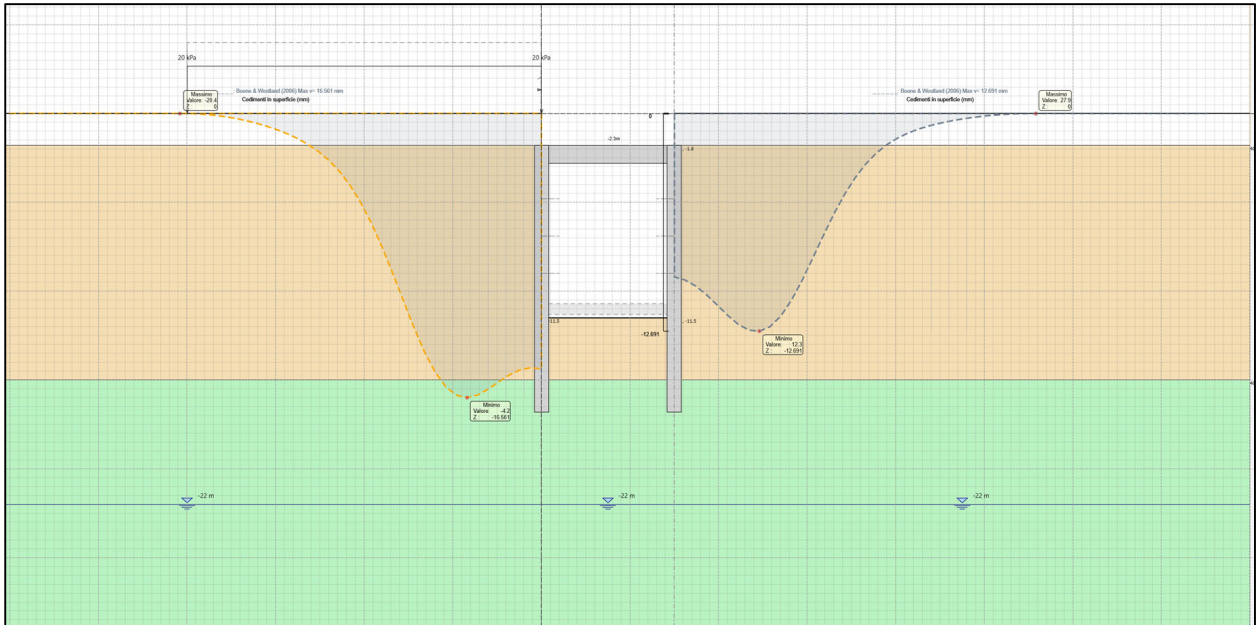
**Figura 6: Curve di subsidenza relative alle analisi numeriche 2D (ci si riferisce all'analisi RS2\_A3b nel presente PD)**

In Figura 7 sono riportati gli edifici oggetto di studio nonché le curve di isocedimento per lo scenario pessimistico considerato. Risulta evidente che gli edifici nell'intorno della galleria a foro cieco T1E01, T1E02 e T1E04 non vengono interessati dai cedimenti indotti dallo scavo, mentre solamente una minima porzione dell'edificio T1E03 presenta una debole interazione.



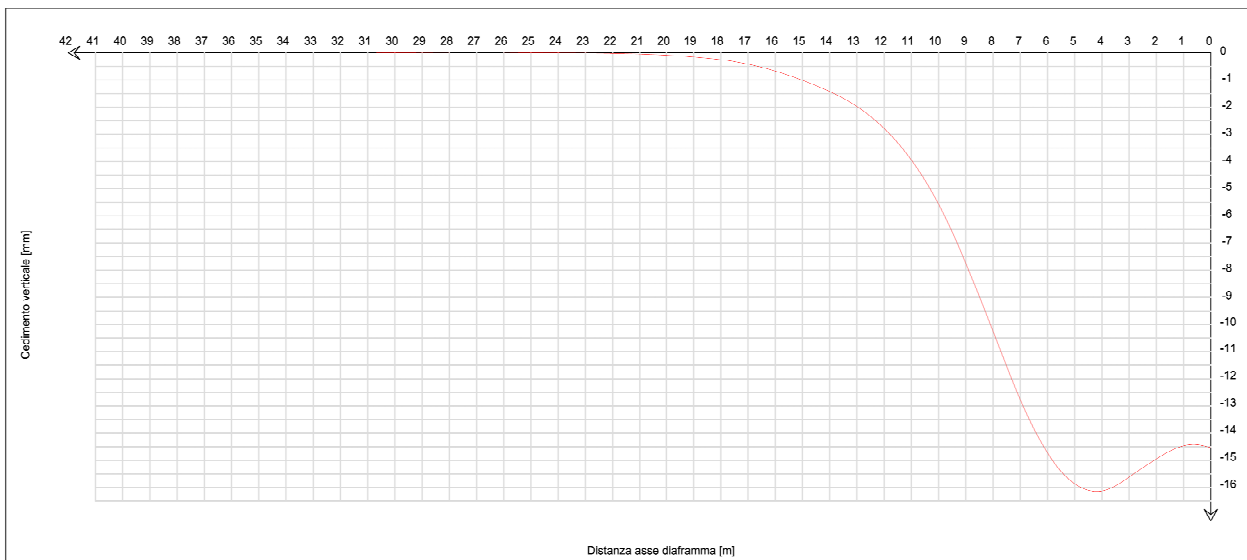
**Figura 7: Curve di isocedimento in conseguenza allo scavo della galleria naturale**

Per la determinazione della curva di subsidenza relativa alla maggior parte del tracciato della galleria artificiale (Sezioni Tipo 1-2-3-4-5-7) si è fatto riferimento alla condizione peggiore relativa alla sezione TIPO 5 del presente PD (Figura 8).



**Figura 8: Analisi subsidenza da codice "Paratie Plus" su sezione TIPO 5**

La curva di subsidenza relativa agli scavi della galleria artificiale è riportata in Figura 9.



**Figura 9: Curve di subsidenza relative alle analisi numeriche 2D sulle gallerie artificiali**

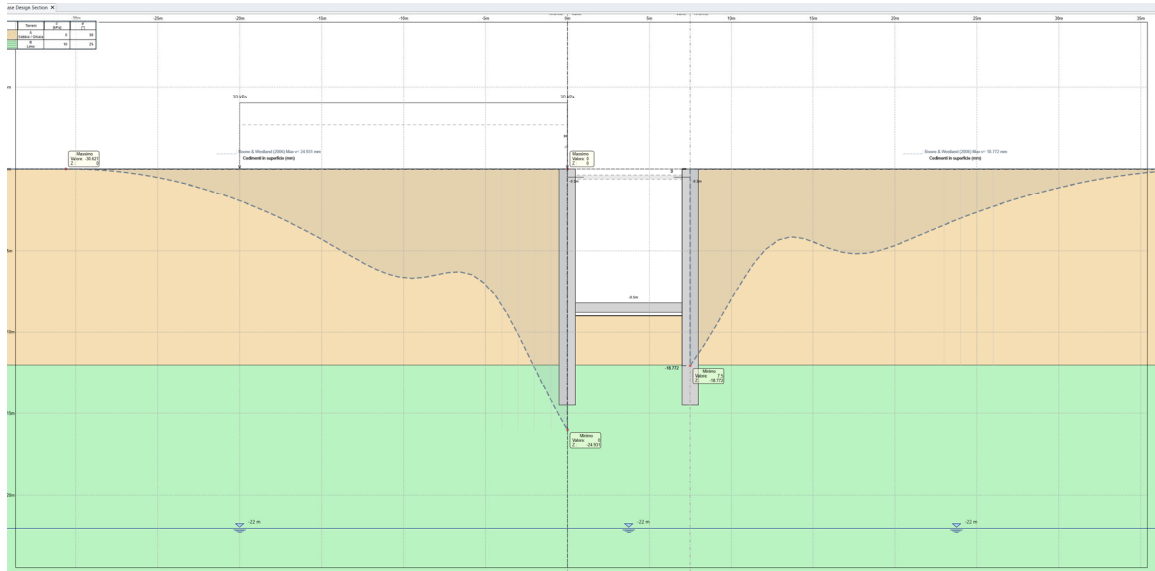


Nella planimetria generale in allegato alla presente relazione sono riportati gli edifici oggetto di studio considerando l'intorno delle gallerie artificiali nonché le curve di isocedimento per lo scenario pessimistico considerato lungo tutto lo sviluppo del tracciato. In Figura 10 se ne riporta un estratto relativo all'intorno della fermata Libia.



**Figura 10: Curve di isocedimento in conseguenza alla realizzazione della galleria artificiale**

Particolare attenzione è stata rivolta alla determinazione della curva di subsidenza relativa alla sezione Tipo 6 (Figura 11), la quale non presenta soletta di copertura bensì un puntone in testa ai diaframmi la cui rimozione è prevista dopo gli scavi.



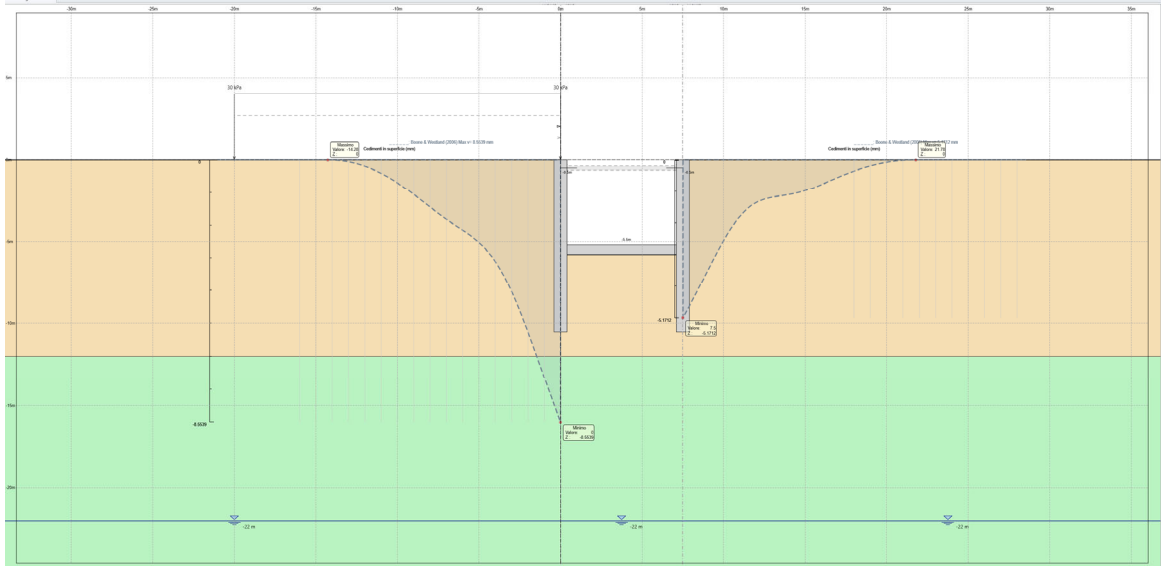
**Figura 11: Analisi subsidenza da codice "Paratie Plus" su sezione TIPO 6**

In Figura 12 si riporta un estratto della planimetria generale relativo all'intorno della sezione Tipo 6.



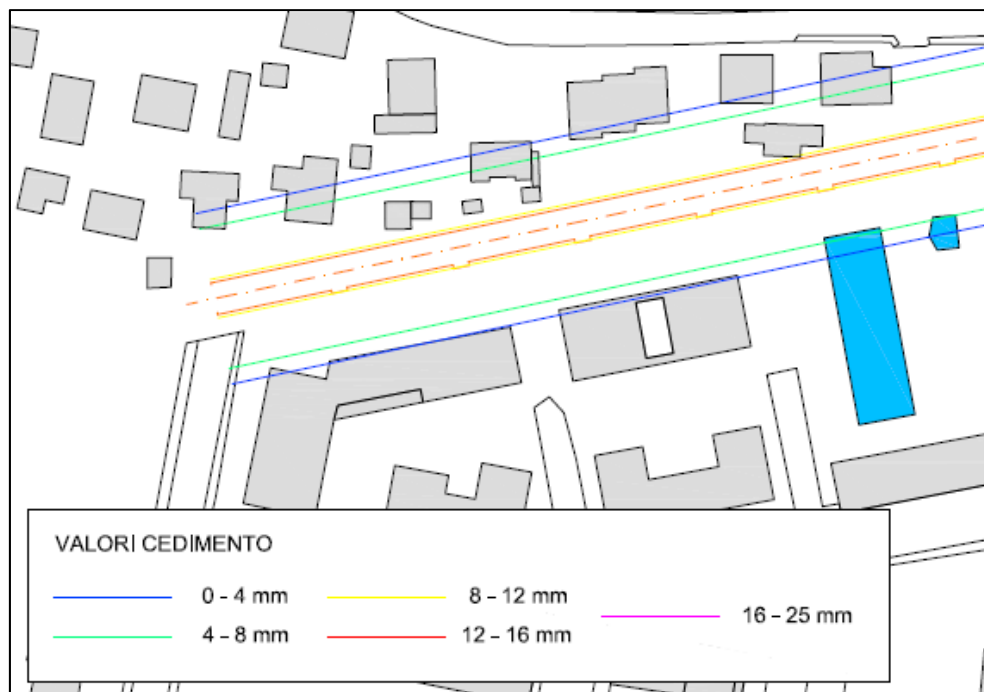
**Figura 12: Curve di isocedimento in conseguenza alla realizzazione della sezione Tipo 6**

La curva di subsidenza relativa alla sezione Tipo 7a (Figura 13) è stata utilizzata nella analisi relative alla Tratta 2. Anche questa sezione non presenta soletta di copertura bensì un puntone in testa ai diaframmi la cui rimozione è prevista dopo gli scavi.



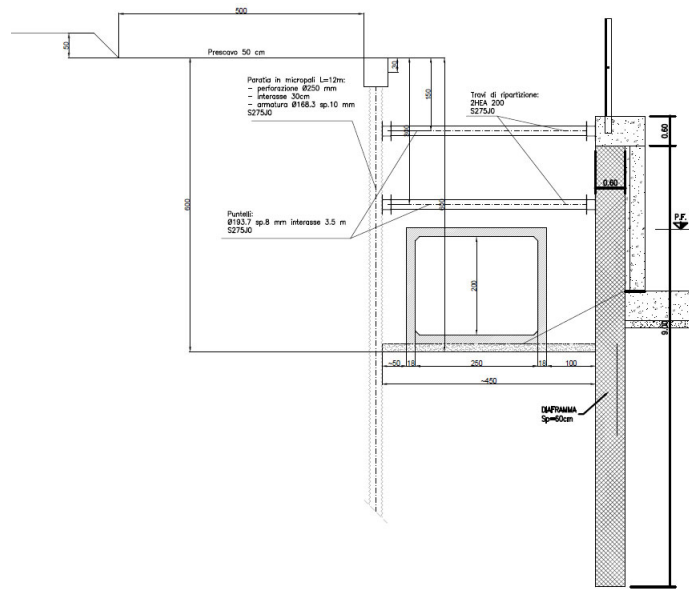
**Figura 13: Analisi subsidenza da codice "Paratie Plus" su sezione TIPO 7<sup>a</sup>**

In Figura 14 si riporta un estratto della planimetria generale relativo all'intorno della sezione Tipo 7a.



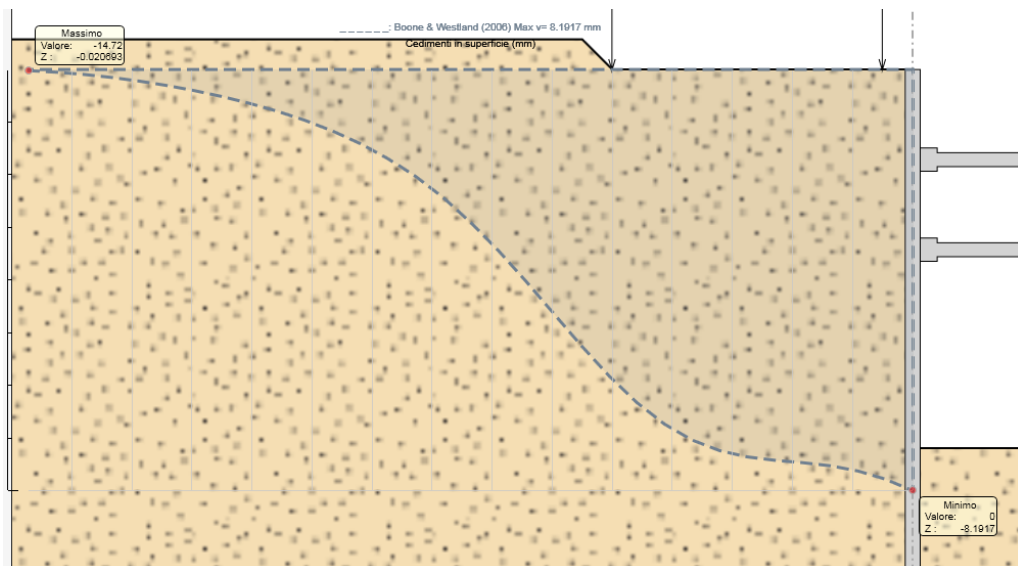
**Figura 14: Curve di isocedimento in conseguenza alla realizzazione della sezione Tipo 7a (estratto)**

Per quanto riguarda la zona di influenza della fermata Rimesse la determinazione della curva di subsidenza è stata fatta in riferimento agli studi di interferenza degli scavi necessari per le deviazioni dei sottoservizi. Tali scavi inducono perturbazioni maggiori nei prospicienti edifici rispetto agli scavi sostenuti dai diaframmi di stazione. In via cautelativa è stata considerata la sezione tipo di scavo che prevede la realizzazione di una paratia di micropali contrastata a mezzo di puntoni sui diaframmi necessari per lo scavo della fermata Rimesse (Figura 15).



**Figura 15: Sezione di riferimento per il tratto della stazione Rimesse**

Il cedimento massimo in prossimità della paratia è stato calcolato attraverso il codice *Paratie Plus* utilizzando la teoria di Boone e Westland (2006) e risulta pari a 8,2 mm (Figura 16).



**Figura 16: Curva di subsidenza di riferimento fermata Rimesse**

In Figura 17 sono riportati gli edifici oggetto di studio relativi alla zona della fermata Rimesse.

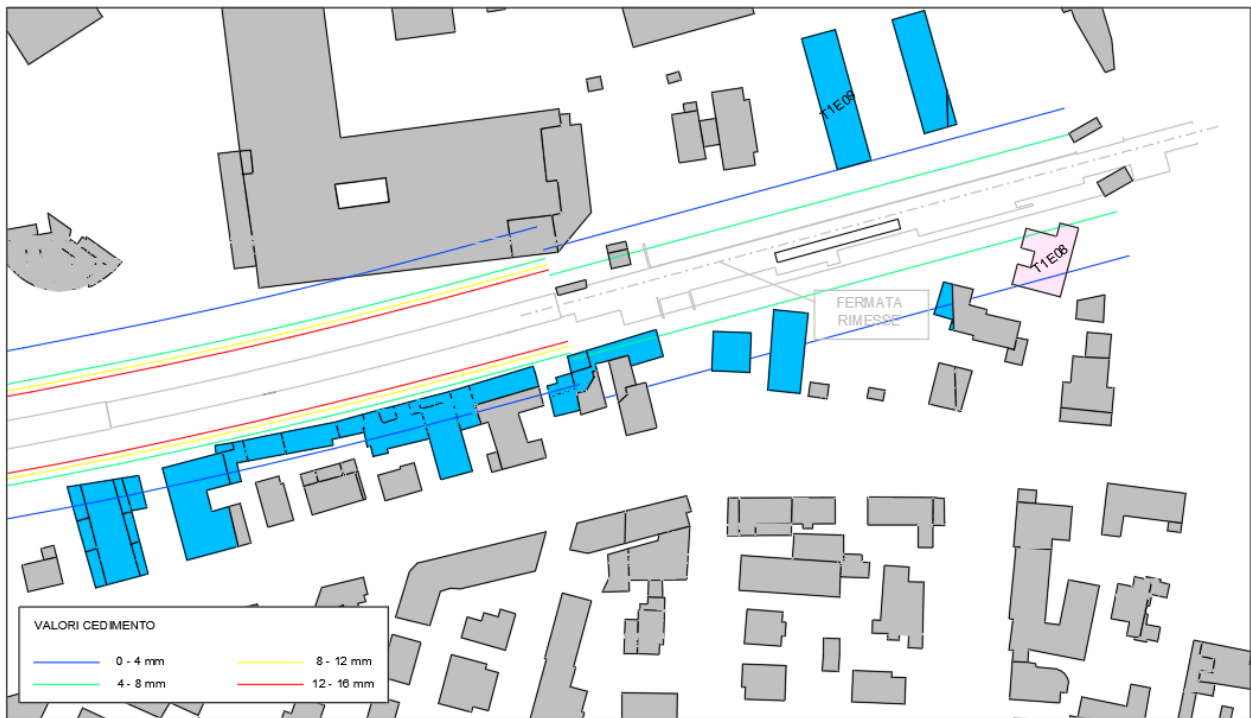


Figura 17: Curve di isocedimento in conseguenza alla realizzazione della fermata Rimesse



Nella seguente tabella sono riportate le categorie di danno derivanti dalle analisi. Si evidenzia l'assenza di criticità in quanto tutti gli edifici ricadono in categorie inferiori alla seconda.

**Tabella 5: Categorie di danno degli edifici risultanti dalle analisi**

EDIFICIO T1E01			CATEGORIA DI DANNO	EDIFICIO T1E07			CATEGORIA DI DANNO
$l_v$	5,188	[-]		$l_v$	4,125	[-]	
$\beta$	1/40911	[-]	1	$\beta$	1/1770	[-]	2
$s_{max}$	0,23	[mm]		$s_{max}$	12,39	[mm]	
$\varepsilon_r$	0,005	[%]		$\varepsilon_r$	0,047	[%]	
EDIFICIO T1E02				CATEGORIA DI DANNO	EDIFICIO T1E08		
$l_v$	5,188	[-]	$l_v$		3,625	[-]	
$\beta$	1/2148	[-]	1	$\beta$	1/1234	[-]	2
$s_{max}$	6,16	[mm]		$s_{max}$	13,95	[mm]	
$\varepsilon_r$	0,031	[%]		$\varepsilon_r$	0,035	[%]	
EDIFICIO T1E03				CATEGORIA DI DANNO	EDIFICIO T1E09		
$l_v$	4,313	[-]	$l_v$		4,18	[-]	
$\beta$	1/80165	[-]	1	$\beta$	1/8519	[-]	1
$s_{max}$	0,35	[mm]		$s_{max}$	1,45	[mm]	
$\varepsilon_r$	0,005	[%]		$\varepsilon_r$	0,015	[%]	
EDIFICIO T1E04				CATEGORIA DI DANNO	EDIFICIO T2E01		
$l_v$	5,188	[-]	$l_v$		4,19	[-]	
$\beta$	1/1230	[-]	2	$\beta$	1/157128	[-]	1
$s_{max}$	8,02	[mm]		$s_{max}$	0,06	[mm]	
$\varepsilon_r$	0,033	[%]		$\varepsilon_r$	0,002	[%]	
EDIFICIO T1E05				CATEGORIA DI DANNO	EDIFICIO T2E02		
$l_v$	4,125	[-]	$l_v$		3,12	[-]	
$\beta$	1/2641	[-]	2	$\beta$	1/2319	[-]	2
$s_{max}$	16,14	[mm]		$s_{max}$	12,8	[mm]	
$\varepsilon_r$	0,017	[%]		$\varepsilon_r$	0,081	[%]	
EDIFICIO T1E06				CATEGORIA DI DANNO			
$l_v$	4,438	[-]	$l_v$				
$\beta$	1/1143	[-]	2	$\beta$			
$s_{max}$	14,18	[mm]		$s_{max}$			
$\varepsilon_r$	0,033	[%]		$\varepsilon_r$			

### 3.5 VALUTAZIONI DEGLI IMPATTI SULLE ALTRE INTERFERENZE

Il tracciato in esame passa nelle vicinanze di altre interferenze, non assimilabili a edifici. Tali opere, di tipo infrastrutturale, sono (

Tabella 6):





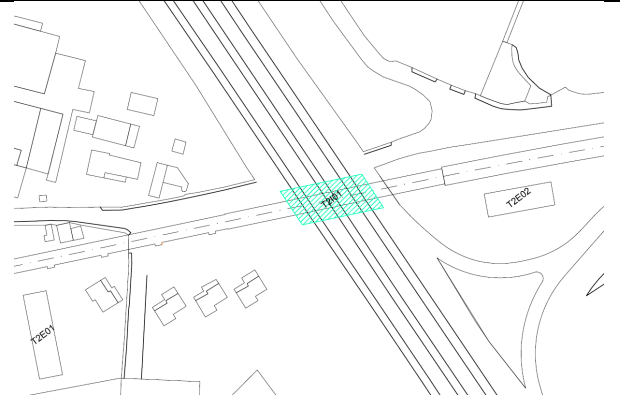
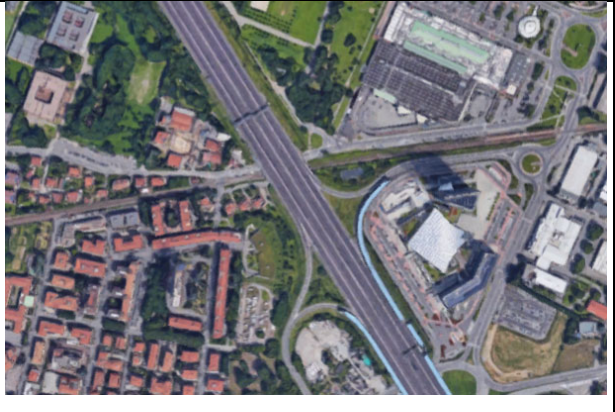
- Ponte Bentivogli (ponte in muratura del 1922 tutelato dalla Soprintendenza);
- Ponti ferroviari di attraversamento Via Grassetti;
- Viadotto autostradale (A14).

La prima interferenza (T1I01) è stata risolta sottopassando il ponte con una galleria a foro cieco. La validazione della soluzione proposta in questa sede è stata effettuata mediante specifiche modellazioni 2D e 3D. Tali analisi non hanno evidenziato criticità sul manufatto per il quale sono previste specifiche opere di presidio (consolidamenti del terreno e cerchiaggio delle fondazioni) oltre a un dettagliato sistema di monitoraggio. Per la descrizione dettagliata delle analisi e degli interventi a presidio del ponte si rimanda al documento T1\_STR\_GEN\_R\_001 del Progetto Definitivo.

La seconda e la terza interferenza (T1I02 e T1I03) riguardano una parte del tracciato in trincea di limitata profondità per la quale sono attesi cedimenti trascurabili.

La quarta interferenza (T2I01) riguarda il viadotto autostradale della tangenziale NORD di Bologna. Per l'analisi dettagliata di questo settore si rimanda al documento "FER\_BP\_D\_T0\_STR\_GEN\_R\_001" (GALLERIA ARTIFICIALE E ALTRE OPERE – RELAZIONE DI CALCOLO).

**Tabella 6: Infrastrutture interferenti**

<b>COD T1101 - Ponte stradale - Ponte su via Bentivogli</b>	
	
<b>COD T1102 e T1103 - Ponte ferroviario - Attraversamento di via Anna Grassetti</b>	
	
<b>COD T2101 - Viadotto Autostradale - A14/Tangenziale NORD di Bologna</b>	
	

## 4 CONCLUSIONI

La strategia di difesa dei manufatti (edifici ed altre strutture) ricadenti nell'area suscettibile di fenomeni di subsidenza include lo studio dello stato di fatto e le valutazioni dell'impatto dei cedimenti attesi in funzione delle caratteristiche di vulnerabilità degli stessi.

Il complesso delle analisi condotte (analisi numeriche 2D e 3D) non evidenziano situazioni di criticità per la sicurezza degli edifici e delle infrastrutture interessate dal potenziale bacino di subsidenza delle opere in progetto, sia pur considerando gli scenari più pessimistici in termini di vulnerabilità delle strutture e di deformazioni attese nell'intorno dell'area di scavo.

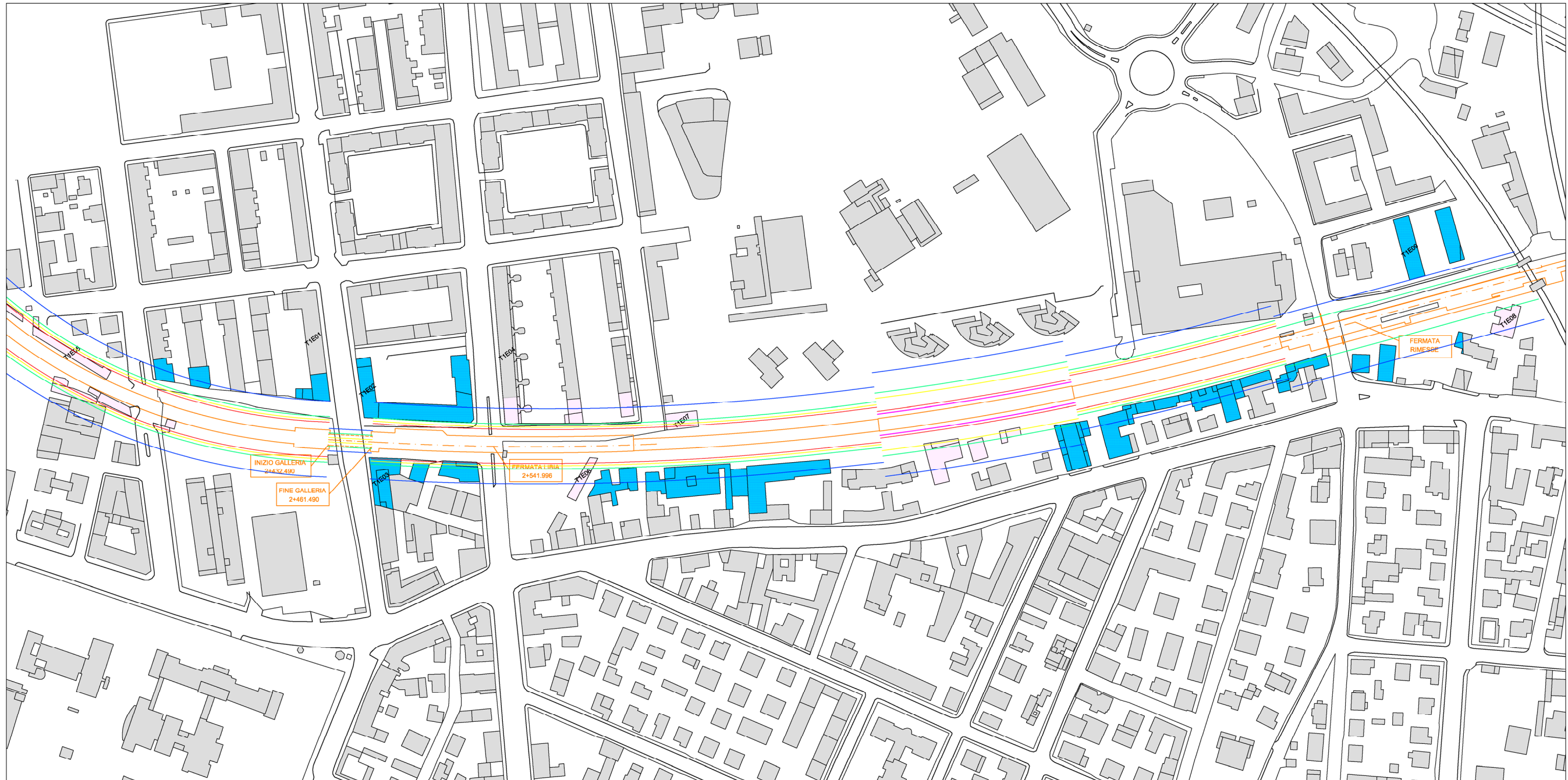
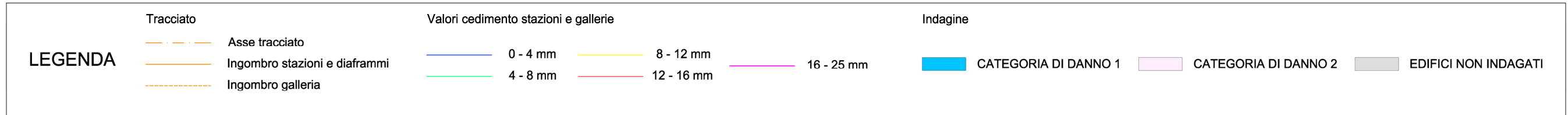
Non sono pertanto previsti interventi di consolidamento fatta eccezione per gli specifici trattamenti ed opere di presidio definiti nell'ambito della progettazione dello scavo della galleria a foro cieco in corrispondenza del Ponte Bentivogli.

Per gli edifici ricadenti nella Categoria di Danno 2 si prevede un monitoraggio più accurato durante la realizzazione delle opere, come indicato nello specifico elaborato "Interventi di monitoraggio – Relazione Tecnica" ("FER\_BP\_D\_T0\_MOP\_GEN\_R\_002") al quale si rimanda per i dettagli sul sistema di monitoraggio.

## ALLEGATI



### Curve di isocedimento e Categorie di Danno – Tratta T1



NOTA: La Categoria di Danno definita per gli edifici nella zona Zanolini-Bentivogli (nell'intorno cioè dell'edificio T1E05) risulta sovrastimata in quanto nella valutazione non è stato tenuto conto della presenza dei diaframmi esistenti.

### Curve di isocedimento e Categorie di Danno – Tratta T2

