

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP J84C19000370009

## U.O. PROGETTAZIONE INTEGRATA NORD

### PROGETTO DEFINITIVO

LINEA A.V. /A.C. MILANO - VERONA

NODO DI BRESCIA

POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA

NUOVE VIABILITÀ

PISTA CICLABILE

Relazione di calcolo opera di sostegno

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

IN1M 11 D 26 CL NV0405 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva		Gennaio 2022	N.Carella <i>N.Carella</i>	Gennaio 2022	L.Barchi <i>LB</i>	Gennaio 2022	A.Perego Gennaio 2022



IN1M11D26CLNV0405001A

n. Elab.: 1



LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA

PROGETTO DEFINITIVO  
POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA

**RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	PAGINE
IN1M	10	D 26 CL	RI000001	A	2 di 28

## INDICE

1	PREMESSA.....	5
2	NORME E RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	7
	2.1 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO .....	7
	2.2 DOCUMENTI PROGETTO FTE II FASE .....	7
	2.3 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO PD.....	7
3	MATERIALI E PRESCRIZIONI RELATIVE.....	8
	3.1 Calcestruzzo magrone.....	8
	3.2 Calcestruzzo Micropali.....	8
	3.3 Acciaio B450C.....	8
	3.4 Acciaio da carpenteria metallica S355 .....	8
4	INQUADRAMENTO GEOTECNICO.....	9
5	CARATTERIZZAZIONE SISMICA.....	11
6	ANALISI DEI CARICHI E COMBINAZIONI.....	13
	6.1 Pesi Propri e Carichi permanenti.....	13
	6.2 Spinte del terreno in fase statica .....	13
	6.3 Spinta statica dell'acqua.....	14
	6.4 Coefficienti sismici .....	14
	6.5 Forze d'inerzia per sisma orizzontale .....	16
	6.6 Sovrappinta sismica .....	16
7	CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE E VERIFICA.....	17
	7.1 Programmi per l'analisi automatica .....	17
	7.2 Modelli di calcolo .....	18
	7.3 Metodo agli Stati Limite ed Approcci di Progetto .....	18

7.4	Verifiche agli Stati Limite Ultimi S.L.U.....	19
7.4.1	Flessione nelle sezioni in acciaio .....	19
7.4.2	Taglio nelle sezioni in acciaio .....	20
7.5	Verifiche agli Stati Limite di Esercizio S.L.E. ....	20
7.5.1	Verifica della compatibilità del campo di spostamenti .....	20
9	PARATIA DI MICROPALI.....	21
9.1	Introduzione .....	21
9.2	Caratteristiche delle sollecitazioni .....	24
9.3	Verifiche agli Stati Limite Ultimi S.L.U.....	26
9.3.1	Micropali.....	26
9.4	Verifiche agli Stati Limite di Esercizio S.L.E. ....	28
9.4.1	Massimi spostamenti della paratia .....	28

	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	PAGINE
	IN1M	10	D 26 CL	RI000001	A	5 di 28

## 1 PREMESSA

La presente Relazione di calcolo è parte del Progetto Definitivo del Potenziamento Infrastrutturale dello Scalo di Brescia; tale progetto riguarda la realizzazione di diversi interventi, fra questi, in particolare:

- realizzazione del nuovo PRG di scalo per adeguarlo alle nuove esigenze di traffico merci;
- realizzazione dell'asta di manovra lato Milano, lunga 750 m, che permetterà l'instradamento dei treni verso Verona;
- realizzazione dell'asta 350 m, prolungamento verso Milano di quella di manovra esistente, parallela alla linea Milano-Verona ed attualmente in esercizio;
- adeguamento del binario 17 e rettifica di linea AV-AC;
- realizzazione di tronchino L = 60 m ad Ovest del fiume Mella.

Nella Figura 1 e nella Figura 2 sono riportate, rispettivamente, l'ubicazione dello scalo di Brescia ed il dettaglio dell'area di intervento.

Nella presente relazione di calcolo l'attenzione è rivolta al dimensionamento e alle verifiche delle opere di sostegno



Figura 1 - Quadro generale dell'area comprendente lo scalo di Brescia

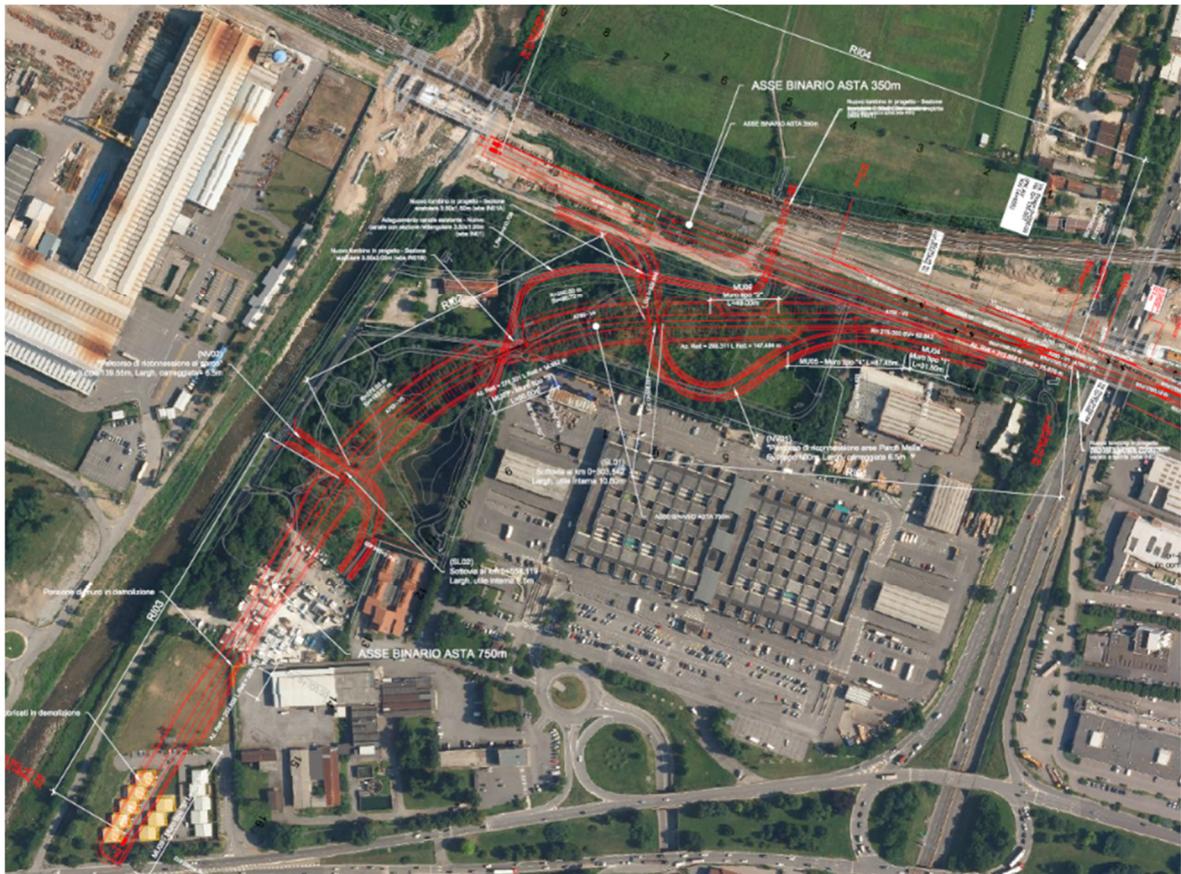


Figura 2 - Dettaglio dell'area di intervento.

	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000001	REV. A	PAGINE 7 di 28

## 2 NORME E RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

### 2.1 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO

- DM 17/01/2018 – «Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»».
- Circolare del 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. – Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.
- RFI DTC SI PS MA IFS 001 E del 2020: «Manuale di Progettazione delle Opere Civili, Parte II, Sezione 2 – Ponti e strutture»;
- RFI DTC SI CS MA IFS 001 del 2020: «Manuale di Progettazione delle Opere Civili, Parte II, Sezione 3 – Corpo stradale»;
- Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo;
- Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica;
- Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica.

### 2.2 DOCUMENTI PROGETTO FTE II FASE

- ITALFERR – PFTE: «Linea AV/AC Milano-Brescia. Potenziamento infrastrutturale dello scalo di Brescia». Relazione Geotecnica Generale (IN0Y10F10GEGE0006001A).
- ITALFERR – PFTE: «Linea AV/AC Milano-Brescia. Potenziamento infrastrutturale dello scalo di Brescia». Carta geologica e Profili Geologici (IN0Y00F69G5GE0001001A - IN0Y00F69FZGE0001001A - IN0Y00F69FZGE0001002A).

### 2.3 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO PD

- ITALFERR – PD: «Linea AV/AC Milano-Brescia. Potenziamento infrastrutturale dello scalo di Brescia». Relazione Indagini Pregresse (IN1M10D69RHGE0001001A).
- ITALFERR – PD: «Linea AV/AC Milano-Brescia. Potenziamento infrastrutturale dello scalo di Brescia». Relazione Esiti Indagini in Situ (IN1M10D69SGGE0001001A).
- ITALFERR – PD: «Linea AV/AC Milano-Brescia. Potenziamento infrastrutturale dello scalo di Brescia». Relazione Esiti Indagini Geofisiche (IN1M10D69IGGE0001001A);
- ITALFERR – PD: «Linea AV/AC Milano-Brescia. Potenziamento infrastrutturale dello scalo di Brescia». Relazione geotecnica generale (IN1M10D26GEGE0005001A)
- ITALFERR – PD: «Linea AV/AC Milano-Brescia. Potenziamento infrastrutturale dello scalo di Brescia». Profilo Geotecnico – Asta 350m (IN1M10D26F6GE0005001A).
- ITALFERR – «Linea AV/AC Milano-Brescia. Potenziamento infrastrutturale dello scalo di Brescia». Profilo Geotecnico – Asta 750m (IN1M10D26F6GE0005002A).

### 3 MATERIALI E PRESCRIZIONI RELATIVE

#### 3.1 Calcestruzzo magrone

Conglomerato classe di resistenza	C12/15 – Rck 15 MPa
Resistenza caratteristica cubica:	Rck = 15 MPa
Resistenza caratteristica cilindrica:	fck = 12 MPa
Classe di esposizione:	X0
Classe di consistenza slump:	S3

#### 3.2 Calcestruzzo Micropali

Conglomerato classe di resistenza	C20/25 – Rck 25 MPa
Resistenza caratteristica cubica:	Rck = 25 MPa
Resistenza caratteristica cilindrica:	fck = 20 MPa
Classe di esposizione:	X2
Classe di consistenza slump	S4-S5

#### 3.3 Acciaio B450C

Tensione caratteristica di snervamento:	$f_{yk} = 450 \text{ MPa};$
Tensione di progetto:	$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_m$
In cui $\gamma_m = 1.15$	$f_{yd} = 450 / 1.15 = 391.3 \text{ MPa};$
Modulo Elastico	$E_s = 210'000 \text{ MPa}.$

#### 3.4 Acciaio da carpenteria metallica S355

Tensione caratteristica di snervamento:	$f_{yk} = 275 \text{ MPa};$
Tensione di progetto:	$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_m$
In cui $\gamma_m = 1.05$	$f_{yd} = 275 / 1.05 = 261.9 \text{ MPa};$
Modulo Elastico	$E_s = 210'000 \text{ MPa}.$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000001	REV. A	PAGINE 9 di 28

## 4 INQUADRAMENTO GEOTECNICO

Per ricostruire il modello geotecnico del sottosuolo si è fatto riferimento ai risultati delle indagini sui terreni eseguite nell'ambito di quattro campagne di indagini, le prime tre, completate negli anni 2012, 2018, 2019 e la campagna più recente ultimata a Febbraio 2021.

Nella Figura 3 è riportato stralcio planimetrico dell'area di interesse con l'ubicazione delle diverse indagini.

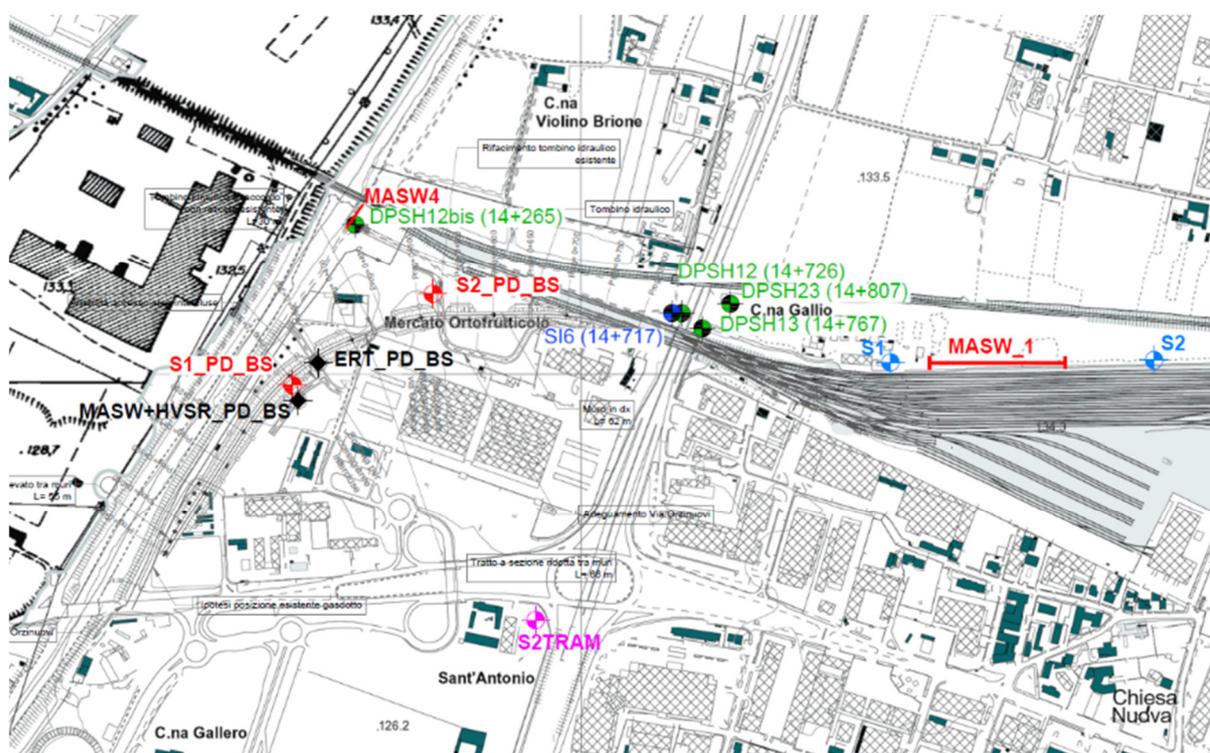


Figura 3 - Ubicazione indagini eseguite nelle campagne di indagini dal 2012 al 2021.

Sintetizzando ed ordinando queste informazioni è stato possibile tracciare uno schema stratigrafico del sottosuolo, nel quale gli orizzonti dei diversi terreni sono distinti in accordo con la classificazione geotecnica. Si rimanda all'elaborato "IN1M10D26GEGE0005001A – Relazione geotecnica generale" per un approfondimento della tematica.

Ai fini dell'analisi di interazione tra i terreni e l'opera di sostegno la risposta meccanica del terreno è descritta mediante molle elasto-plastiche. La condizione limite è raggiunta allorché si mobilitano la spinta attiva o la spinta passiva (estremi inferiore e superiore). Per simulare il comportamento non lineare dei terreni reale, caratterizzato da una marcata non linearità ed in particolare da una differente risposta nella condizione di primo carico o carico vergine rispetto alla condizione di scarico e ricarico, si definiscono valori diversi delle costanti elastiche. In particolare si adottano valori di rigidità diversi nella condizione di primo carico o carico vergine rispetto alla condizione di scarico e ricarico, rispettivamente  $E_{CV}$  ed  $E_{UR}$ . Per il progetto in esame si è proceduto distinguendo due stratigrafie di calcolo, riportate nelle tabelle seguenti.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000001	REV. A	PAGINE 10 di 28

Per il progetto in esame la stratigrafia di calcolo è sintetizzata a seguire.

Terreni	z	$\gamma$	$\phi'$ (k)	$c'$ (k)	$E_{cv}$	$E_{ur}$
	[m dal p.c.]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[kPa]	[MPa]	[MPa]
Ghiaia e sabbia (1)	0.0 – 10.0	19	39	0	40	60
Ghiaia e sabbia (3)	10	19	37	0	75	112.5

**Tabella I - Parametri geotecnici di calcolo per le opere individuate nell'”Asta 750”.**

Per il rilevato arginale, in mancanza di informazioni, sono stati assunti cautelativamente i seguenti parametri:

- $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
- $\phi' = 28^\circ$
- $c' = 0 \text{ kPa}$
- $E_{cv} = 15 \text{ MPa}$
- $E_{ur} = 25 \text{ MPa}$

L'altezza di falda assunta in progetto, riportata nei profili geotecnici, è impostata a 118 m.s.l.m. e pertanto ad una profondità di circa 11 m da piano campagna.

	LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO          POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000001	REV. A	PAGINE 11 di 28

## 5 CARATTERIZZAZIONE SISMICA

Nel seguente paragrafo è riportata la valutazione dei parametri di pericolosità sismica utili alla determinazione delle azioni sismiche di progetto dell'opera cui si riferisce il presente documento, in accordo a quanto specificato a riguardo dal D.M. 17 Gennaio 2018 e relativa circolare applicativa. Per la valutazione dei parametri di pericolosità sismica è necessario definire, oltre alla localizzazione geografica del sito, la Vita nominale dell'opera strutturale ( $V_N$ ), intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata, e la Classe d'Uso a cui è associato un coefficiente d'uso ( $C_U$ ). Per le opere in oggetto si considera una vita nominale:  $V_N = 75$  anni. Riguardo invece la Classe d'Uso, all'opera in oggetto corrisponde una Classe III a cui è associato un coefficiente d'uso pari a (NTC – Tabella 2.4.II):  $C_U = 1.5$ .

I parametri di pericolosità sismica vengono quindi valutate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  che si ricava per ciascun tipo di costruzione, moltiplicando la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_U$ , ovvero:

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

Pertanto, per l'opera in oggetto, il periodo di riferimento è pari a  $V_R = 75 \times 1.5 = 112.5$  anni.

In funzione dello stato limite rispetto al quale viene verificata l'opera si definisce una probabilità di superamento  $P_{VR}$  nel periodo di riferimento. Per il progetto delle opere in esame si farà essenzialmente riferimento allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV), a cui è associata una  $P_{VR}$  pari al 10% [NTC 2018 – Tabella 3.2.I]. Nota la probabilità di superamento nel periodo di riferimento è possibile valutare il periodo di ritorno  $T_R$ , come previsto nell'allegato A alle norme tecniche per le costruzioni, secondo la seguente espressione:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})} = -\frac{75}{\ln(1 - 0.10)} = 1068 \text{ anni}$$

Per il calcolo dell'azione sismica si è utilizzato il metodo dell'analisi pseudostatica in cui l'azione sismica è rappresentata da una forza statica equivalente pari al prodotto delle forze di gravità per un opportuno coefficiente sismico  $k$ , dipendente dall'accelerazione massima al sito  $a_g$  in condizioni rocciose e topografia orizzontale; tale parametro è uno dei tre indicatori che caratterizza la pericolosità sismica del sito ed è tanto più alto tanto più è ampio il periodo di ritorno al quale si riferisce.

Nello specifico, la Normativa attribuisce al generico sito una pericolosità sismica mediante la definizione dei seguenti tre parametri:

- $a_g$  è l'accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F_0$  è il valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $T_c^*$  è il valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

	LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000001	REV. A	PAGINE 12 di 28

Per quanto concerne la categoria di sottosuolo, i risultati delle prove MASW richiamate forniscono valori di  $V_{s,30}$  sempre riferibili alla **Categoria di sottosuolo C** (MASW1:  $V_{s30}=324$  m/s; MASW4:  $V_{s30}=304$  m/s; MASW5:  $V_{s30}=300$  m/s; MASW\_PD-BS:  $V_{s30}=326$  m/s) , per cui si farà nel seguito riferimento a tale categoria suggerendo comunque approfondimenti per la fasi progettuali successive.

Ulteriore parametro utile alla definizione della risposta sismica locale, è come detto, la categoria topografica, da individuare nell'ambito della classificazione di cui alla Tab 3.2.V della normativa vigente di seguito riportata per completezza:

Tab. 3.2.V - Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	$S_T$
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

Per il caso in esame, si può ritenere di riferimento la Categoria **T1**.

Sulla base delle indicazioni delle N.T.C. 2018 si assumono i seguenti valori per determinare l'azione sismica di riferimento nel comune di Brescia interessato dall'opera:

- vita nominale:  $V_N = 75$  anni (costruzioni con livelli di prestazione ordinari)
- coefficiente d'uso:  $C_U = 1.5$
- periodo di riferimento:  $V_R = V_N \times C_U = 112.5$  anni:
- stato limite ultimo di salvaguardia della vita, SLV
- probabilità di superamento associata allo stato limite SLV:  $P_{VR} = 10\%$
- periodo di ritorno:  $T_R = -V_R / \ln(1 - P_{VR}) = 1068$  anni
- categoria di sottosuolo: C
- categoria topografica: T1

Stato Limite	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	S (-)	$a_{max}$ (g)
SLO	68	0.063	1.500	0.095
SLD	113	0.081	1.500	0.122
SLV	1068	0.195	1.413	0.276
SLC	2193	0.249	1.335	0.332

Tabella II – Riepilogo dei parametri di pericolosità sismica.

Qualora invece l'opera avesse natura provvisoria, l'azione sismica non deve essere considerata al fine del dimensionamento e delle verifiche strutturali, così come riportato nel Paragrafo 2.4.1 del D.M. 17-01-18.

	LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000001	REV. A	PAGINE 13 di 28

## 6 ANALISI DEI CARICHI E COMBINAZIONI

Nel presente paragrafo si descrivono i criteri di valutazione delle azioni sollecitanti le opere di sostegno e relative combinazioni di calcolo adottate.

### 6.1 Pesì Propri e Carichi permanenti

I pesi propri relativi alla struttura ed al terreno eventualmente gravante sulla fondazione, nonché della piattaforma ferroviaria, sono valutati tenendo conto dei pesi dell'unità di volume specifici  $\gamma$  come di seguito definiti:

- Calcestruzzo strutturale:  $\gamma = 25 \text{ KN/m}^3$

### 6.2 Spinte del terreno in fase statica

Nel modello di calcolo impiegato dal software di calcolo PARATIE, la spinta del terreno viene determinata investigando l'interazione statica tra terreno e la struttura deformabile a partire da uno stato di spinta a riposo del terreno sulla paratia. I parametri che identificano il tipo di legge costitutiva possono essere distinti in due sottoclassi: parametri di spinta e parametri di deformabilità del terreno.

I parametri di spinta sono il coefficiente di spinta a riposo  $K_0$ , il coefficiente di spinta attiva  $K_a$  e il coefficiente di spinta passiva  $K_p$ . Il coefficiente di spinta a riposo fornisce lo stato tensionale presente in sito prima delle operazioni di scavo. Esso lega la tensione orizzontale efficace  $\sigma'_h$  a quella verticale  $\sigma'_v$  attraverso la relazione:

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v$$

$K_0$  dipende dalla resistenza del terreno, attraverso il suo angolo di attrito efficace  $\phi'$  e dalla sua storia geologica. Si può assumere che:

$$K_0 = K_0^{\text{NC}} \cdot (\text{OCR})^m$$

Dove:

$$K_0^{\text{NC}} = 1 - \text{sen } \phi'$$

è il coefficiente di spinta a riposo per un terreno normalconsolidato ( $\text{OCR}=1$ ).  $\text{OCR}$  è il grado di sovraconsolidazione e  $m$  è un parametro empirico, di solito compreso tra 0.4 e 0.7.

I coefficienti di spinta attiva e passiva sono forniti dalla teoria di Rankine per una parete liscia dalle seguenti espressioni:

$$K_a = \tan^2(45 - \phi'/2)$$

$$K_p = \tan^2(45 + \phi'/2)$$

Per tener conto dell'angolo di attrito  $\delta$  tra paratia e terreno il software PARATIE impiega per  $K_a$  e  $K_p$  la formulazione rispettivamente di Coulomb e Lancellotta.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000001	REV. A	PAGINE 14 di 28

### Formulazione di Coulomb per $k_a$

$$k_a = \frac{\cos^2(\phi' - \beta)}{\cos^2 \beta \cdot \cos(\beta + \delta) \cdot \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi') \cdot \sin(\phi' - i)}{\cos(\beta + \delta) \cdot \cos(\beta - i)}} \right]^2}$$

dove:

- $\phi'$  è l'angolo di attrito del terreno;
- $\beta$  è l'angolo d'inclinazione del diaframma rispetto alla verticale;
- $\delta$  è l'angolo di attrito paratia-terreno;
- $i$  è l'angolo d'inclinazione del terreno a monte della paratia rispetto all'orizzontale.

Il valore limite della tensione orizzontale sarà pari a:

$$\sigma'_h = K_a \cdot \sigma'_v - 2 \cdot c' \cdot \sqrt{K_a}$$

$$\sigma'_h = K_p \cdot \sigma'_v + 2 \cdot c' \cdot \sqrt{K_p}$$

a seconda che il collasso avvenga in spinta attiva o passiva rispettivamente.  $c'$  è la coesione drenata del terreno.

### Formulazione di Lancellotta per $k_p$

$$K_p = \left[ \frac{\cos \delta}{1 - \sin \phi'} (\cos \delta + \sqrt{\sin^2 \phi' - \sin^2 \delta}) \right] e^{2\theta \tan \phi'}$$

dove:

$$2\theta = \sin^{-1} \left( \frac{\sin \delta}{\sin \phi'} \right) + \delta$$

## 6.3 Spinta statica dell'acqua

La spinta dell'acqua sulle opere di sostegno è calcolata con riferimento ad una distribuzione idrostatica delle pressioni interstiziali. Per l'opera in progetto, dati i volumi geotecnicamente interessati, di fatto non ci sarà interferenza e quindi non si considera agente sull'opera di sostegno la spinta statica dell'acqua.

## 6.4 Coefficienti sismici

Il § 7.11.3.5.2 del DM 18, precisa che l'analisi della sicurezza di opere di sostegno in condizioni sismiche, può essere eseguite mediante i metodi pseudo-statici o i metodi degli spostamenti. Nell'analisi pseudo-statica, l'azione sismica è rappresentata da una forza statica equivalente pari al prodotto delle forze di gravità per un opportuno coefficiente sismico. Nelle verifiche, i valori dei coefficienti sismici orizzontale  $k_h$  e verticale  $k_v$  possono essere valutati mediante le espressioni:

$$k_h = \alpha \cdot \beta \cdot \frac{a_{max}}{g}$$

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

Dove:

- $g$  è l'accelerazione di gravità;
- $k_h$  è il coefficiente sismico in direzione orizzontale;
- $\alpha$  è un coefficiente che tiene conto della deformabilità dei terreni a contatto con l'opera;
- $\beta$  è un coefficiente funzione della capacità dell'opera di subire spostamenti senza cadute di resistenza.

Per le paratie si può porre  $k_v=0$

Il valore del coefficiente  $\beta$  può essere ricavato dal diagramma di Fig. 7.11.3, in funzione del massimo spostamento permanente  $u_s$  che l'opera può tollerare, verificando l'effettivo sviluppo di meccanismi duttili nel sistema. In assenza di tale verifica, il coefficiente  $\beta$  vale 1.

Per  $u_s = 0$  è  $\beta = 1$ . Deve comunque risultare:

$$u_s \leq 0,005 H$$

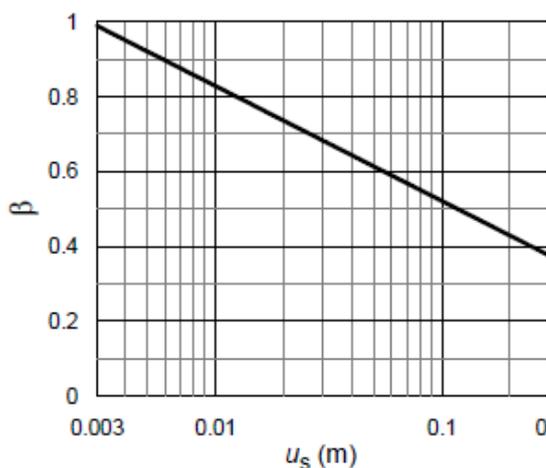


Fig. 7.11.3 – Diagramma per la valutazione del coefficiente di spostamento  $\beta$

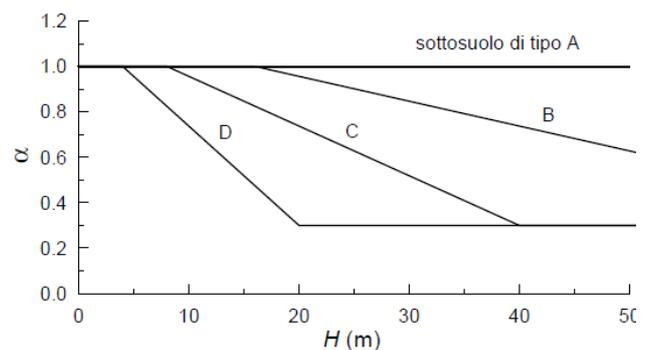


Figura 7.11.2 – Diagramma per la valutazione del coefficiente di deformabilità

Il valore del coefficiente  $\alpha$  può essere ricavato a partire dall'altezza complessiva  $H$  della paratia e dalla categoria di sottosuolo mediante il diagramma di Fig. 7.11.2.

Se  $\alpha \cdot \beta \leq 0,2$  deve assumersi  $k_h = 0,2 a_{max} / g$ .

	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000001	REV. A	PAGINE 16 di 28

## 6.5 Forze d'inerzia per sisma orizzontale

L'azione inerziale è stata introdotta come accelerazione nella direzione del sisma di intensità pari:

$$F_h = W_i \cdot k_h$$

In cui:

- $k_h$  è il coefficiente sismico orizzontale;
- $W_i$  è la massa dell'elemento soggetto all'accelerazione sismica.

## 6.6 Sovrappinta sismica

Per la determinazione della spinta in condizioni sismiche si utilizza la formulazione fornita da Mononobe-Okabe (1929).

$$\beta \leq \phi - \theta : K_{A,E} = \frac{\sin^2(\Psi + \phi - \theta)}{\cos \theta \cdot \sin^2 \Psi \cdot \sin(\psi + \theta - \delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \beta - \theta)}{\sin(\Psi - \theta - \delta) \cdot \sin(\Psi + \beta)}} \right]}$$

$$\beta > \phi - \theta : K_{A,E} = \frac{\sin^2(\Psi + \phi - \theta)}{\cos \theta \cdot \sin^2 \Psi \cdot \sin(\psi + \theta - \delta)}$$

La spinta sarà data da:

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (1 \pm k_v) \cdot K_{A,E} \cdot H^2$$

nella quale  $\gamma$  è la media pesata del peso di volume del terreno da p.c. a fondo scavo e  $H$  è il dislivello tra la quota del piano campagna e la quota di fondo scavo.

Tale forza viene applicata ad 1/3 dell'altezza libera della paratia.

	LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000001	REV. A	PAGINE 17 di 28

## 7 CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE E VERIFICA

Nel seguito si richiamano le principali caratteristiche degli strumenti di calcolo utilizzati per le verifiche geotecniche delle opere in esame unitamente ai necessari richiami inerenti la progettazione e la verifica delle opere strutturali e geotecniche tratti dalla normativa di riferimento.

### 7.1 Programmi per l'analisi automatica

Per l'analisi dell'interazione tra il terreno e l'opera di sostegno è stato utilizzato il codice di calcolo PARATIE PLUS. Nell'ipotesi di stato piano di deformazione e sottosuolo stratificato orizzontalmente, il calcolo si sviluppa mediante un procedimento iterativo, a partire dalla condizione di sforzo a riposo. Con tale procedimento si ricerca la condizione di equilibrio del complesso terreno-struttura per effetto del progressivo approfondimento dello scavo sino alla quota di progetto. La risposta dell'opera di sostegno è modellata tenendo conto del progressivo accumulo delle deformazioni nella struttura e nel terreno e della contestuale variazione dello stato di sforzo orizzontale al contatto tra i due mezzi. Per ciascuna fase di calcolo, definita da una geometria di scavo o da una distribuzione di azioni esterne sulla struttura, quale, ad esempio, la forza di tesatura di un tirante, l'opera di contenimento deve rimanere in equilibrio sotto le azioni applicate e le spinte del terreno a tergo, sfruttando la resistenza dei materiali dal lato di valle. Muovendo dalla condizione di riposo, si tiene conto del progressivo incremento degli spostamenti per effetto dello scavo, sino al raggiungimento di una situazione limite, minima o massima; a queste corrisponde, rispettivamente, la mobilitazione della spinta attiva e della spinta passiva. Nella ricerca della condizione di equilibrio fra spinte lato monte ed azioni resistenti a valle, si tiene conto della loro dipendenza dall'entità degli spostamenti, che sono funzione della rigidità relativa fra l'opera ed i terreni. Ai fini della determinazione degli spostamenti orizzontali della struttura di sostegno, e quindi delle spinte, la risposta meccanica del terreno è modellata utilizzando il noto schema con molle elasto-plastiche, implementato rispetto all'originaria impostazione proposta da Winkler. La condizione di plasticizzazione si definisce allorché si attinge uno stato limite, minimo o massimo. La costante elastica delle molle, variabile in dipendenza delle caratteristiche meccaniche dei terreni interessati dall'opera, può essere definita a priori dall'utente ovvero determinata nell'ambito della procedura di calcolo automatico sulla base di un valore del modulo di elasticità longitudinale. Per simulare il comportamento reale dei terreni, caratterizzato da una marcata non linearità ed in particolare da una differente risposta nella condizione di primo carico o carico vergine rispetto alla condizione di scarico e ricarico, si definiscono valori diversi delle costanti elastiche delle molle; in pratica si adottano due valori dei moduli di elasticità longitudinale, per distinguere la risposta in fase di primo carico ( $E_{CV}$ ) da quella in fase di scarico ( $E_{UR}$ ). L'opera di sostegno è assimilata ad una trave equivalente inflessa, avente sezione trasversale orizzontale di forma rettangolare. La dimensione trasversale di questa trave si determina uguagliando l'inerzia della struttura reale a quella della trave fittizia, tenendo conto, eventualmente, della maggior rigidità di elementi metallici mediante semplici procedimenti di omogeneizzazione.

	LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000001	REV. A	PAGINE 18 di 28

## 7.2 Modelli di calcolo

I calcoli sono sviluppati con riferimento a schemi bidimensionali, nell'ipotesi di stato piano di deformazione. Pertanto si prende in esame una striscia di parete avente larghezza unitaria. La realizzazione dello scavo sostenuto dalla paratia è seguita in tutte le varie fasi attraverso un'analisi statica incrementale; a ciascun passo o fase di carico corrisponde una configurazione geometrica caratterizzata da una profondità di scavo, da un insieme di puntoni e tiranti applicati e da una specifica distribuzione di carichi applicati.

## 7.3 Metodo agli Stati Limite ed Approcci di Progetto

Per le paratie si devono considerare almeno i seguenti stati limite ultimi:

### SLU di tipo geotecnico (GEO) e di tipo idraulico (UPL e HYD)

- collasso per rotazione intorno a un punto dell'opera (atto di moto rigido);
- collasso per carico limite verticale;
- instabilità del fondo scavo in terreni a grana fine in condizioni non drenate;
- instabilità del fondo scavo per sollevamento;
- sifonamento del fondo scavo;
- instabilità globale dell'insieme terreno-opera.

### SLU di tipo strutturale (STR)

- raggiungimento della resistenza in uno o più ancoraggi;
- raggiungimento della resistenza in uno o più puntoni o di sistemi di contrasto;
- raggiungimento della resistenza strutturale della paratia.

accertando che la relazione (6.2.1) riportata nelle NTC2018 sia soddisfatta per ogni stato limite considerato.

La verifica di stabilità globale dell'insieme terreno-struttura deve essere effettuata secondo l'Approccio 1 - Combinazione 2: (A2+M2+R2) tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I e 6.2.II e 6.8.I.

Le rimanenti verifiche devono essere effettuate considerando le seguenti combinazioni di coefficienti Combinazione 1 - (A1+M1+R1) e Combinazione 2: (A2+M2+R1) tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.8.I.

Fermo restando quanto specificato nel § 6.5.3.1.1, laddove si assuma un valore dell'angolo d'attrito tra terreno e parete  $\delta > \phi'/2$  la determinazione della resistenza passiva, ai fini del calcolo delle spinte, deve tenere conto della non planarità delle superfici di scorrimento.

	Effetto	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti $G_1$	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(0)}$	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	$\gamma_Q$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

<sup>(0)</sup> Per i carichi permanenti  $G_2$  si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti  $\gamma_{G1}$

Tabella III – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I N.T.C. 2018)

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale $\gamma_M$	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_\gamma$	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0

Tabella IV – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (Tab.6.2.II NTC2018)

COEFFICIENTE	R2
$\gamma_R$	1,1

Tabella V: Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo (Tabella 6.8.I – N.T.C. 2018)

## 7.4 Verifiche agli Stati Limite Ultimi S.L.U.

### 7.4.1 Flessione nelle sezioni in acciaio

La verifica a flessione per le sezioni in acciaio quali micropali e travi di ripartizione deve essere eseguita nel rispetto del paragrafo 4.2.4.1.2.3 delle NTC 2018.

Il momento flettente di progetto  $M_{Ed}$  deve rispettare la seguente condizione:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

Dove la resistenza di progetto a flessione retta della sezione  $M_{c,Rd}$  vale:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$

In cui:

- $W_{pl}$  è il modulo di resistenza plastico della sezione;
- $f_{yk}$  è la resistenza caratteristica allo snervamento dell'acciaio scelto;
- $\gamma_{M0}$  è un coefficiente pari a 1.05.

	LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000001	REV. A	PAGINE 20 di 28

#### 7.4.2 Taglio nelle sezioni in acciaio

La verifica a taglio per le sezioni in acciaio quali micropali e travi di ripartizione deve essere eseguita nel rispetto del paragrafo 4.2.4.1.2.4 delle NTC 2018.

Il valore di progetto dell'azione tagliante  $V_{Ed}$  deve rispettare la seguente condizione:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

Dove la resistenza a taglio di progetto  $V_{c,Rd}$ , in assenza di torsione, vale:

$$V_{c,Rd} = \frac{A_v \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

In cui:

- $f_{yk}$  è la resistenza caratteristica allo snervamento dell'acciaio scelto;
- $\gamma_{M0}$  è un coefficiente pari a 1.05;
- $A_v$  per le sezioni circolari cave vale:

$$A_v = \frac{2A_v}{\pi}$$

### 7.5 Verifiche agli Stati Limite di Esercizio S.L.E.

La verifica nei confronti degli Stati limite di esercizio, consiste nel controllare, con riferimento alle sollecitazioni di calcolo corrispondenti alle Combinazioni di Esercizio il tasso di Lavoro nei Materiali e l'ampiezza delle fessure attesa, secondo quanto di seguito specificato.

#### 7.5.1 Verifica della compatibilità del campo di spostamenti

In tutti i casi, nelle condizioni di esercizio, gli spostamenti dell'opera di sostegno e del terreno circostante devono essere valutati per verificarne la compatibilità con la funzionalità dell'opera e con la sicurezza e funzionalità di manufatti adiacenti, anche a seguito di modifiche indotte sul regime delle pressioni interstiziali.

In presenza di manufatti particolarmente sensibili agli spostamenti dell'opera di sostegno, deve essere sviluppata una specifica analisi dell'interazione tra opere e terreno, tenendo conto della sequenza delle fasi costruttive.

## 9 PARATIA DI MICROPALI

### 9.1 Introduzione

L'opera oggetto di questo capitolo si rende necessaria al fine di permettere la costruzione, in sinistra idraulica del Fiume Mella, di una nuova pista ciclabile in affiancamento all'attuale Via Girelli Lombardia. Tale costruzione prevederà la parziale demolizione del rilevato adiacente alla suddetta via e pertanto la necessità dell'opera di sostegno.

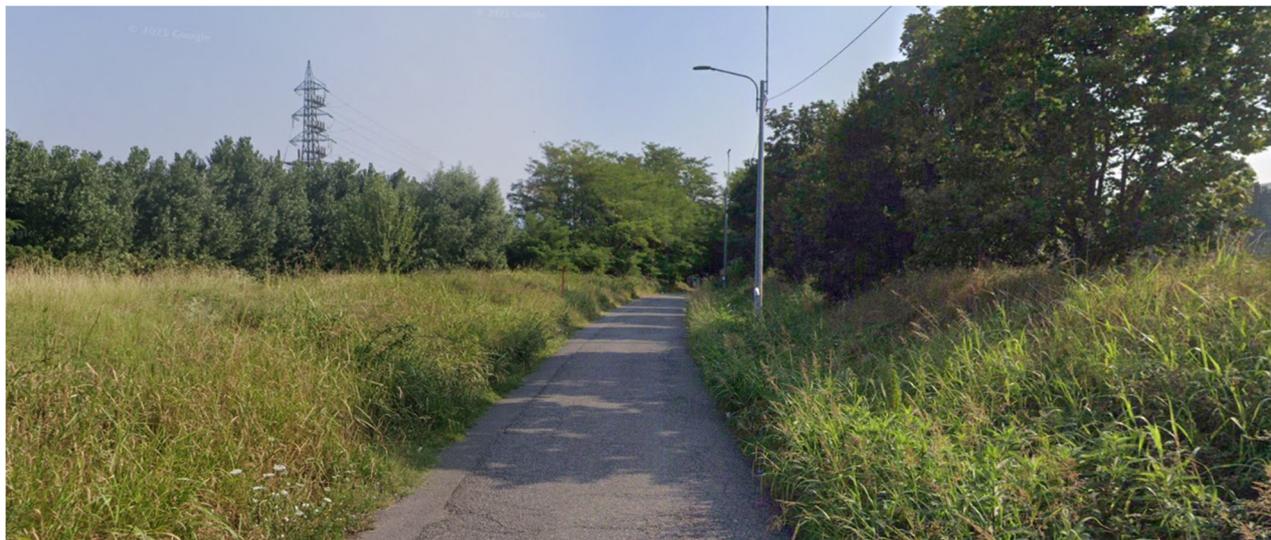


Figura 4 - Vista di Via Girelli Lombardia. In sinistra il fiume Mella, in destra il rilevato in parziale demolizione da progetto definitivo.

Si riportano a seguire degli stralci della tavola di progetto.

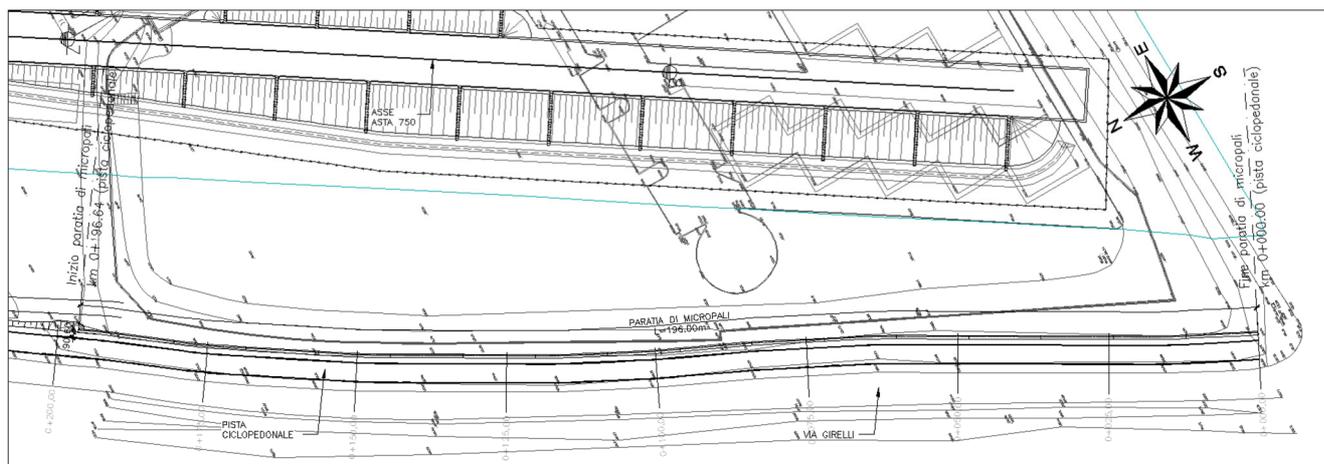


Figura 5 - Opera in progetto, planimetria.

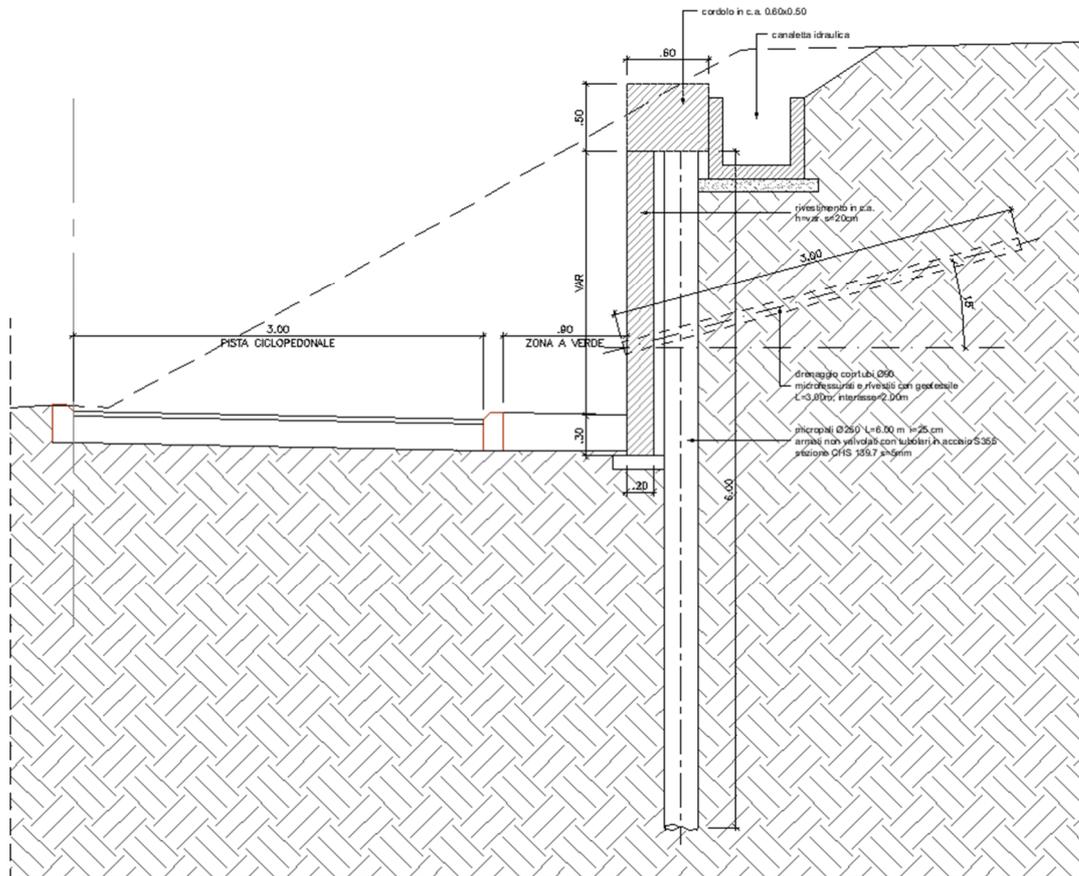


Figura 6 – Opera in progetto, sezione.

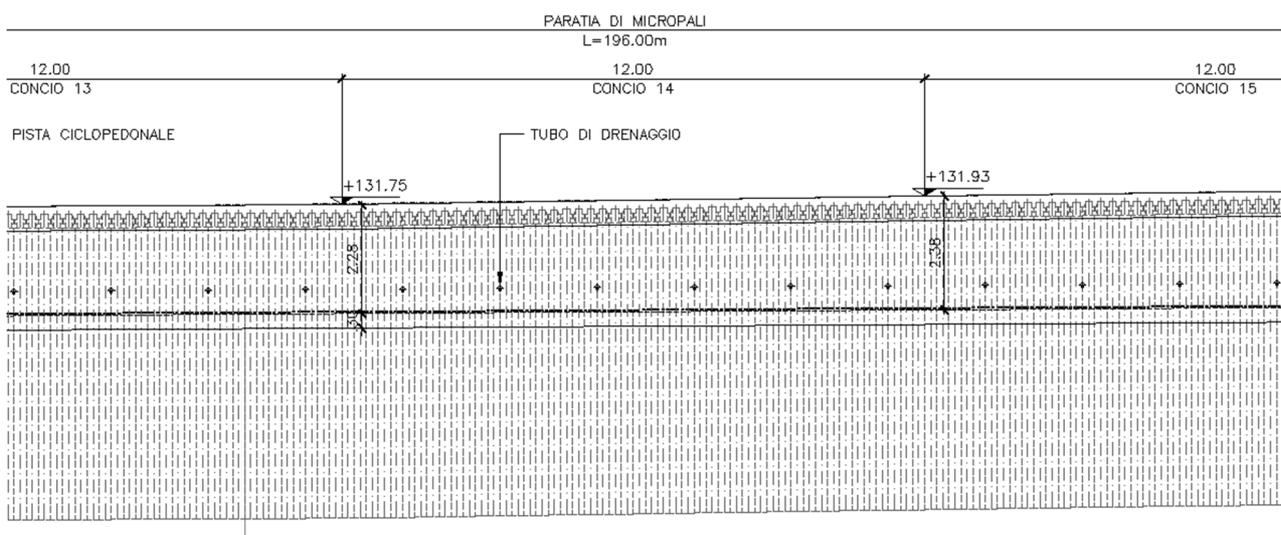
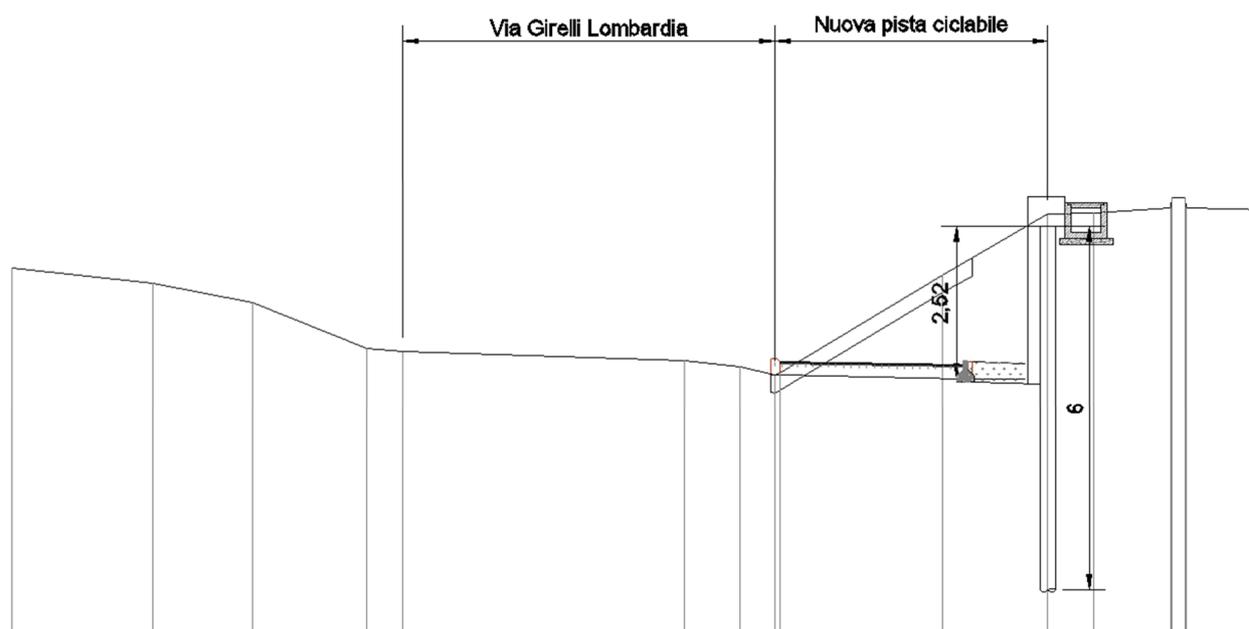


Figura 7 - Opera in progetto, sviluppata dell'opera.

	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	PAGINE
	IN1M	10	D 26 CL	RI0000001	A	23 di 28

Dallo studio delle sezioni correnti dell'opera in esame si evince una massima altezza di scavo da sostenere pari a 2.50 m, come visibile nella figura a seguire.



**Figura 8 – Sezione corrente, massima altezza di scavo.**

In accordo con le prescrizioni riportate nel paragrafo 6.5.2.2 del DM 2018, il modello geometrico di calcolo deve tenere in conto delle possibili variazioni del profilo del terreno a monte e a valle del paramento rispetto ai valori nominali. Per questo motivo, la massima altezza di scavo dovrebbe essere incrementata di una quantità pari al minore dei seguenti valori:

- 10% dell'altezza di terreno da sostenere nel caso di opere a sbalzo;
- 10% della differenza di quota fra il livello inferiore di vincolo e il fondo scavo nel caso di opere vincolate;
- 0.5 m;

La normativa prevede pertanto un incremento del 10% dell'altezza di scavo che ai soli fini del calcolo diventa pari a 2.75 m.

Utilizzando il codice di calcolo ParatiePlus l'analisi è sviluppata con riferimento ad uno schema piano e nell'ipotesi di sottosuolo assimilato ad una successione di strati orizzontali. L'analisi si articola secondo una sequenza di fasi, diverse in funzione del tipo di problema, allo scopo di simulare sia le reali fasi costruttive che la variazione dello stato di sforzo sino al completamento della costruzione.

Per la geometria del problema in esame, l'analisi è articolata nella seguente successione di fasi:

- Stage 1. Inizializzazione geostatica;  
 Stage 2-3 Costruzione del rilevato provvisorio;  
 Stage 4 Costruzione della paratia di micropali;  
 Stage 5-8. Fasi successive di scavo lato valle;  
 Stage 9. Rinterro per simulazione carico della pista ciclabile;  
 Stage 10. Applicazione dell'azione sismica.

1b /  
Base Design Section  
Nominal  
Stage 9

Terreni	c' [kPa]	$\phi'$ [°]
Rilevato Arginale Sabbia / Ghiaia	0	28
Ghiaia e sabbia (1) Sabbia / Ghiaia	0	30
Ghiaia e sabbia (3) Sabbia / Ghiaia	0	37

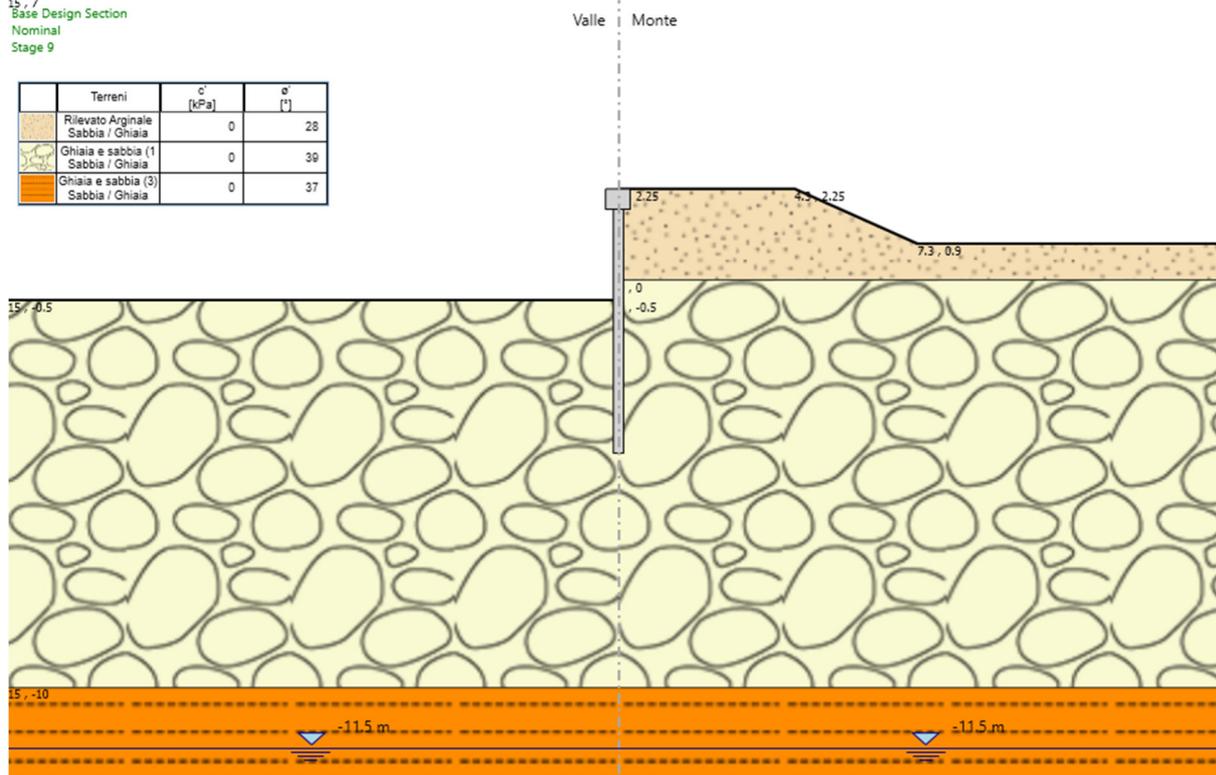


Figura 9 - Modello di calcolo di ParatiePlus.

L'opera di sostegno sarà costituita di paratia di pali Ø250 ad interasse 25 cm di lunghezza pari a 6 m. I micropali saranno sormontati in testa da un cordolo di dimensioni 60 cm x 50 cm.

## 9.2 Caratteristiche delle sollecitazioni

Di seguito si sintetizzano i risultati dei calcoli relativi alle diverse combinazioni di carico. In particolare si riportano i valori massimi delle sollecitazioni sulla paratia e gli andamenti delle sollecitazioni per le combinazioni dimensionanti.

Elemento	$M_{Ed,max}$	$T_{Ed,max}$
	[kNm/m]	[kN/m]
Inv. (SLU + Sismica)	107.7	64.17

Tabella VI - Sollecitazioni massime per metro lineare agenti sulla paratia.

	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000001	REV. A	PAGINE 25 di 28

Le sollecitazioni sopra riportate dovranno essere moltiplicate per le corrispondenti zone di influenza. Nel caso in esame le azioni agenti sul singolo micropalo dovranno essere ricavate moltiplicando le suddette sollecitazioni per l'interasse adottato, pari a 0.25 m.

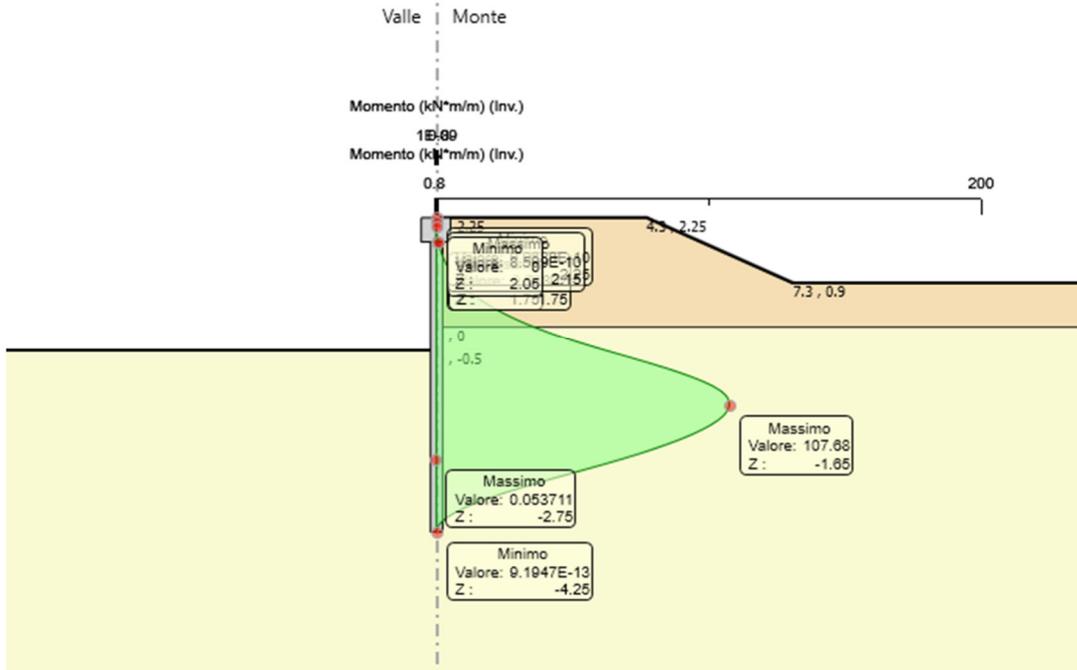


Figura 10 – Involuppo del momento flettente (Comb. S.L.U. + Comb. Sismica).

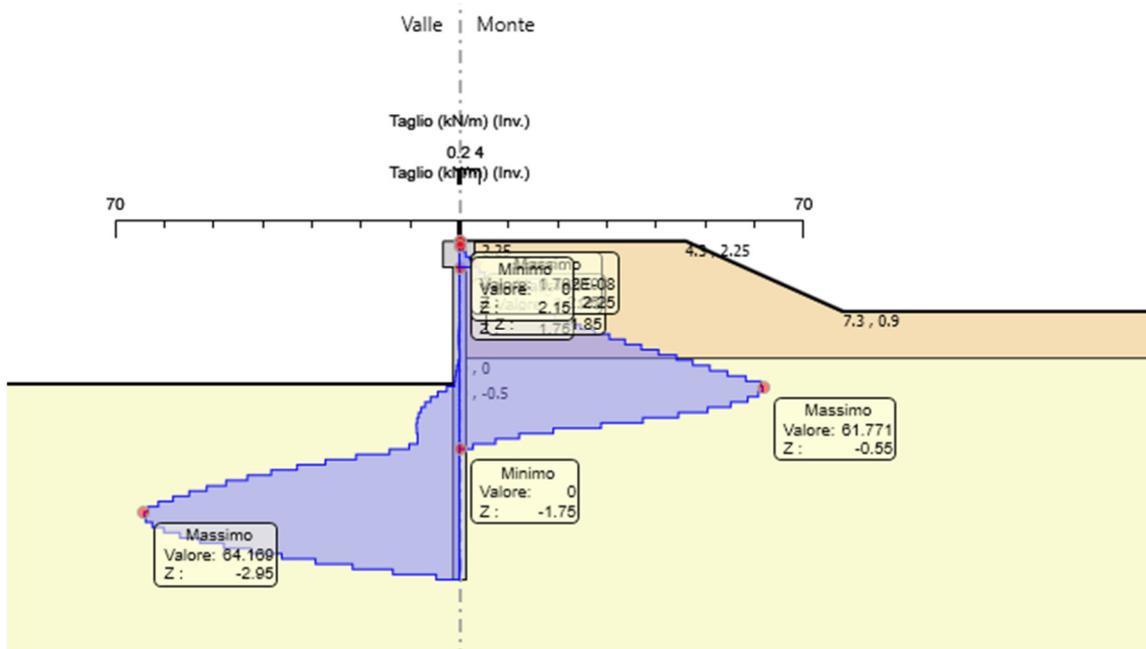


Figura 11 - Involuppo del taglio (Comb. S.L.U. + Comb. Sismica).

	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000001	REV. A	PAGINE 26 di 28

### 9.3 Verifiche agli Stati Limite Ultimi S.L.U.

#### 9.3.1 Micropali

Si riportano a seguire le verifiche strutturali agli stati limite ultimi per i pali della presente opera.

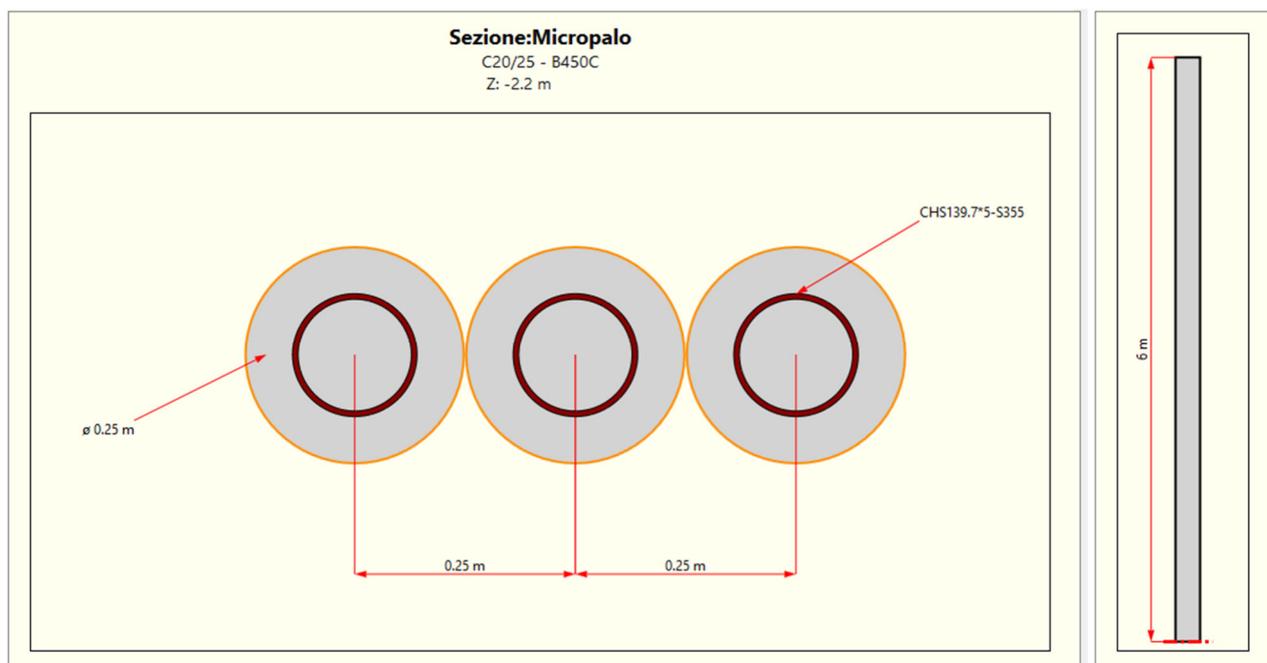


Figura 12 - Geometria dei pali adottata per il modello di calcolo.

In ragione dell'interasse assunto, pari a 0.25m, le sollecitazioni di calcolo agenti sul singolo palo sono pari a:

$$M_{SLU} = 26.9 \text{ kNm}$$

$$T_{SLU} = 16.04 \text{ kN}$$

Si prevede l'impiego di un profilo tubolare CHS139.7 spessore 5 mm, acciaio classe S355, con le caratteristiche geometriche riportate di seguito:

Diametro esterno	Spessore	Massa a ml	Area della sezione	Momento d'inerzia	Raggio d'inerzia	Modulo di resistenza elastico	Modulo di resistenza plastico	Momento d'inerzia di torsione	Costante di torsione	Superficie esterna a ml	Lunghezza per ton
D	t	M	A	I	i	W <sub>el</sub>	W <sub>pl</sub>	I <sub>t</sub>	C <sub>t</sub>		
mm	mm	kg/m	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	m <sup>2</sup> /m	m/t
139,7	4,0	13,4	17,1	393	4,80	56,2	73,7	786	112	0,439	74,7
139,7	5,0	16,6	21,2	481	4,77	68,8	90,8	961	138	0,439	60,2
139,7	6,0	19,8	25,2	564	4,73	80,8	107	1129	162	0,439	50,5
139,7	6,3	20,7	26,4	589	4,72	84,3	112	1177	169	0,439	48,2
139,7	8,0	26,0	33,1	720	4,66	103	139	1441	206	0,439	38,5
139,7	10,0	32,0	40,7	862	4,60	123	169	1724	247	0,439	31,3
139,7	12,0	37,8	48,1	990	4,53	142	196	1980	283	0,439	26,5
139,7	12,5	39,2	50,0	1020	4,52	146	203	2040	292	0,439	25,5

Figura 13 - Caratteristiche dei profilati tubolari.

Il momento resistente è pari a:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$

Il taglio resistente è pari a:

$$V_{c,Rd} = \frac{A_v \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

Per le verifiche è stato utilizzando un foglio di calcolo. I risultati sono riportati a seguire.

VERIFICHE DI RESISTENZA E STABILITA' PER PROFILI CAVI A SEZIONE CIRCOLARE													
Dati INPUT				Dati OUTPUT									
Caratteristiche acciaio				Dati geometrici									
Qualità acciaio:	UNI EN 10210 S 355 H	Diametro esterno	Spessore	Classe della sezione	Area sezione trasversale	Momento inerzia	Raggio giratore inerzia	Modulo resistente elastico	Modulo resistente plastico	massa per unità di lunghezza	Superf. per unità di lunghezza	Lunghezza per tonnellata	
f <sub>yk</sub> =	355 [Mpa]	D	T	1	A	I	i	W <sub>el</sub>	W <sub>pl</sub>	M	As	L/1t	
f <sub>ik</sub> =	510 [Mpa]	[mm]	[mm]		[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm <sup>3</sup> ]	[kg/m]	[m <sup>2</sup> /m]	[m]	
		139,7	5,0		21,16	480,54	4,77	68,80	90,76	16,61	0,44	60,21	
Geometria sezione				Verifiche secondo NTC2018 - §4.2									
D =	139,7 [mm]	Verifica a trazione (4.2.4.1.2.1)			N <sub>p,Rd</sub> =	715,36	N <sub>ed</sub> / N <sub>p,Rd</sub> =	0,00	verifica soddisfatta				
t =	5,0 [mm]	Verifica a compressione (4.2.4.1.2.2)			N <sub>c,Rd</sub> =	715,36	N <sub>ed</sub> / N <sub>c,Rd</sub> =	0,00	verifica soddisfatta				
L =	6,00 [m]	Verifica a flessione retta (4.2.4.1.2.3 - 4.2.4.1.2.6)			M <sub>c,Rd</sub> =	30,69	M <sub>y,Ed</sub> / M <sub>c,Rd</sub> =	0,88	verifica soddisfatta				
β =	1,00 [-]	Verifica a taglio (4.2.4.1.2.4)			V <sub>c,Rd</sub> =	262,93	V <sub>ed</sub> / V <sub>c,Rd</sub> =	0,06	verifica soddisfatta				
Solllecitazioni agenti				Verifica a presso/tenso-flessione retta (4.2.4.1.2.7 - 4.2.4.1.2.9)			Sez. Classe 1-2	M <sub>N,Rd</sub> =	30,69	M <sub>Ed</sub> / M <sub>N,Rd</sub> =	0,88	verifica soddisfatta	
N <sub>Ed</sub> =	0,00 [kN]				Sez. Classe 3	σ <sub>x,Ed</sub>   =			f <sub>yd</sub> =				
V <sub>Ed</sub> =	16,04 [kN]	Verifica stabilità membrature compresse (4.2.4.1.3.1)			N <sub>b,Rd</sub> =	226,40	N <sub>ed</sub> / N <sub>b,Rd</sub> =	0,00	verifica soddisfatta				
M <sub>y,Ed</sub> =	26,92 [kNm]	Verifica stabilità membrature presso-inflesse (4.2.4.1.3.3)			$\frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{min} \cdot f_{yk} \cdot A} + \frac{M_{y,eq,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{f_{yk} \cdot W_y \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)} + \frac{M_{z,eq,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{f_{yk} \cdot W_z \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} = 0,66$			verifica soddisfatta					
ψ =	0,00												

Figura 14 - Verifiche eseguite sui micropali.

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo dei micropali sono pertanto soddisfatte.

	LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE OPERE DI SOSTEGNO</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000001	REV. A	PAGINE 28 di 28

## 9.4 Verifiche agli Stati Limite di Esercizio S.L.E.

### 9.4.1 Massimi spostamenti della paratia

Nel rispetto dei principi di funzionalità dell'opera, è necessario eseguire anche la verifica nei confronti degli Stati Limite di Esercizio (SLE). A tal fine si controlla che gli spostamenti subiti dalla paratia siano tollerabili e compatibili con le prestazioni attese nelle condizioni di regolare esercizio.

Di seguito si riporta la configurazione deformata della paratia.

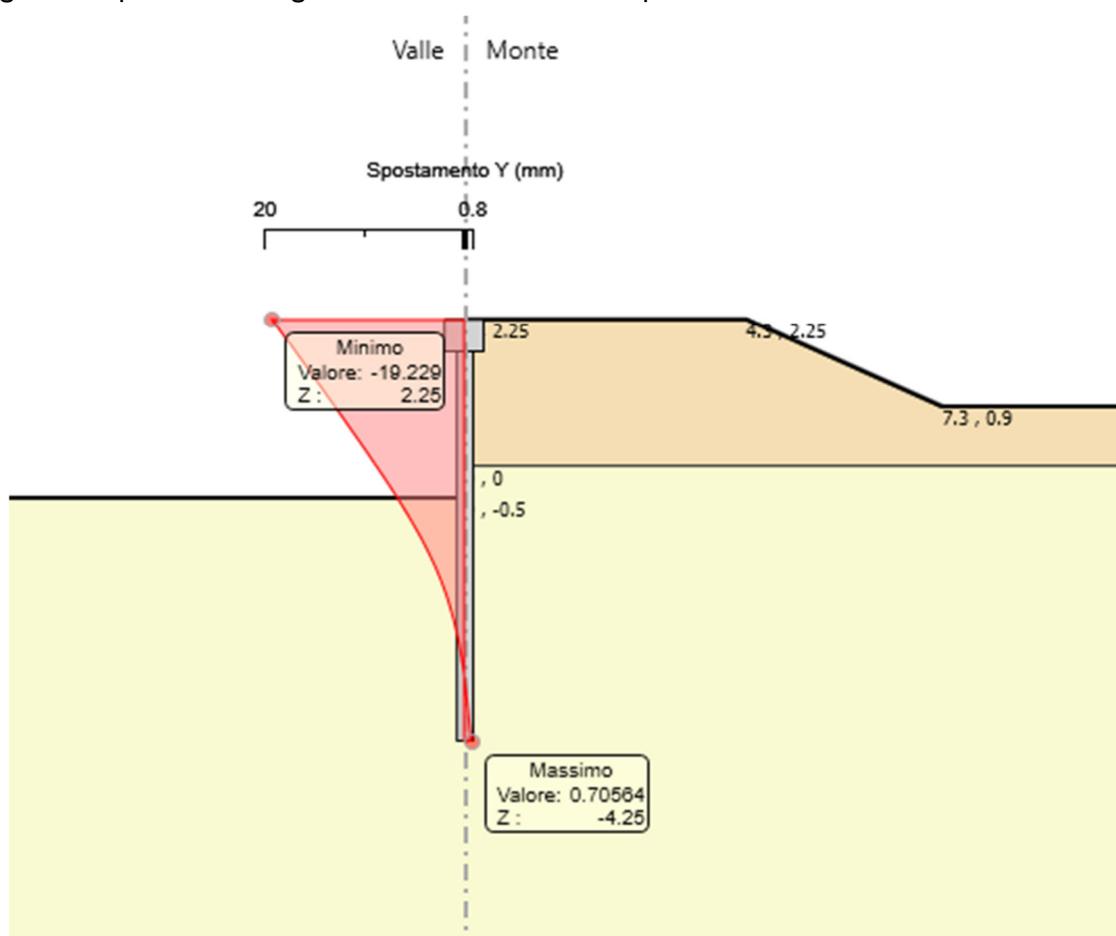


Figura 15 – Deformata della paratia (Combinazione SLE – Rara/ Frequente/ Quasi Permanente).

Gli spostamenti massimi subiti dall'opera sono pari a 19.2 mm. Tale valore è ritenuto accettabile in considerazione delle ipotesi semplificative che si adottano nel calcolo. Oltre all'esiguità stessa degli spostamenti, si ricorda che la sezione di calcolo presentata è la sezione con la massima quota di scavo che si presenta solamente per un tratto limitato di opera e che inoltre, a tergo dell'opera stessa, sono assenti qualsivoglia tipo di manufatti che possano essere interessati dal campo di spostamenti indotto. Di fatto, la verifica agli spostamenti in questo caso non risulta essere vincolante ai fini del dimensionamento dell'opera di sostegno.