

COMMITTENTE:



RETE FERROVIARIA ITALIANA S.P.A.  
DIREZIONE INVESTIMENTI

SOGGETTO TECNICO:

RFI – DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI FIRENZE  
S.O. INGEGNERIA

PROGETTAZIONE:

MANDATARIA



MANDANTI



PROGETTO DEFINITIVO

**LINEA PISTOIA - LUCCA - VIAREGGIO/PISA  
RADDOPPIO DELLA LINEA PISTOIA - LUCCA - PISA S.R.  
TRATTA PESCIA - LUCCA**

**09 - OPERE DI SOSTEGNO**

**Relazione geotecnica e di calcolo paratie**

SCALA -

Foglio - di -

PROGETTO/ANNO	SOTTOPR.	LIVELLO	NOME DOC.	PROGR.OP.	FASE FUNZ.	NUMERAZ.
1 3 4 6 P O	S 1 1	P D	T G R I	0 1	0 1	E 0 0 4

Revis.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
A	Prima emissione	G. Tanzi	18/09/2018						

POSIZIONE ARCHIVIO	LINEA	SEDE TECN.	NOME DOC.	NUMERAZ.		
	L 5 4 2	L 0 1 1 1 6	T B 0 0	1 0 / 0 1		
	Verificato e trasmesso	Data	Convalidato	Data	Archiviato	Data

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>RIFERIMENTI PER LA PROGETTAZIONE .....</b>	<b>3</b>
2.1	LEGGI, NORME E RACCOMANDAZIONI .....	3
2.2	DOCUMENTI DI PROGETTO.....	4
2.3	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	4
<b>3</b>	<b>DESCRIZIONE DELLE OPERE .....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>MODELLO GEOTECNICO DI RIFERIMENTO.....</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>VERIFICHE AGLI STATI LIMITE .....</b>	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>VERIFICHE DI STATI LIMITE ULTIMI (SLU DI TIPO GEO).....</b>	<b>8</b>
6.1	ANALISI DEI CARICHI .....	8
6.2	SEZIONI DI CALCOLO.....	8
6.3	STABILITÀ GLOBALE DELL'INSIEME OPERA DI SOSTEGNO – TERRENO .....	9
6.3.1	<i>Metodologia di calcolo .....</i>	<i>9</i>
6.3.2	<i>Risultati delle analisi .....</i>	<i>11</i>
<b>7</b>	<b>VERIFICHE AGLI STATI LIMITE ULTIMI (SLU DI TIPO STR).....</b>	<b>12</b>
7.1	ANALISI DEGLI SLU PER LE OPERE DI SOSTEGNO FLESSIBILI.....	12
7.2	ANALISI DEGLI SLU PER I TIRANTI .....	12
7.3	RISULTATI DELLE ANALISI .....	13
<b>8</b>	<b>VERIFICHE DI STATI LIMITE DI ESERCIZIO (SLE DI TIPO GEO).....</b>	<b>14</b>
8.1	ANALISI DEGLI SLE PER OPERE DI SOSTEGNO FLESSIBILI .....	14
8.1.1	<i>Risultati delle analisi .....</i>	<i>14</i>

## 1 PREMESSA

Il documento presente costituisce la relazione geotecnica e di calcolo delle opere di sostegno flessibili (paratie) previste nell'ambito del Progetto Definitivo per il raddoppio della linea Pistoia – Lucca – Pisa San Rossore, nella tratta da Pescia a Lucca (dalla progressiva chilometrica 20+423 alla progressiva chilometrica 42+200).

Saranno quindi esposte le considerazioni di carattere geotecnico su cui si basa il dimensionamento di tali opere di sostegno e si descriveranno i calcoli e le verifiche effettuate.

Mandataria

**TECH** PROJECT  
ingegneria integrata ©



Mandanti



## 2 RIFERIMENTI PER LA PROGETTAZIONE

Per la stesura della presente relazione, oltre che alle indicazioni contenute in leggi, norme e raccomandazioni di settore, si è fatto riferimento ai documenti progettuali e documenti bibliografici elencati in dettaglio ai paragrafi seguenti.

### 2.1 Leggi, norme e raccomandazioni

La presente relazione è stata redatta in conformità alle prescrizioni ed indicazioni contenute nelle leggi oggi in vigore che disciplinano la progettazione e l'esecuzione di opere geotecniche e che riguardano la protezione dal rischio sismico:

- legge 5 novembre 1971, n. 1086 (“Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio, compresso e a struttura metallica”);
- legge 2 febbraio 1974, n. 64 (“Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche”);
- D.P.R. 6 giugno 2001, n. 380 (“Testo unico delle disposizioni legislative e regolamenti in materia edilizia”);
- D.M. 14 gennaio 2008 (“Norme Tecniche per le Costruzioni”);
- Circolare Ministeriale 2 febbraio 2009, n. 617 (“Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008”);
- D.M. 17 gennaio 2018 (“Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»”);
- D.P.G.R. 53/R/2011 “Regolamento di attuazione dell'articolo 62 della legge regionale 3 gennaio 2005, n. 1 (Norme per il governo del territorio) in materia di indagini geologiche”;
- D.G.R. Toscana del 26 maggio 2014, n. 421 “Aggiornamento dell'allegato 1 (elenco dei comuni) e dell'allegato 2 (mappa) della deliberazione GRT n. 878 dell'8 ottobre 2012, recante “Aggiornamento della classificazione sismica regionale in attuazione dell'O.P.C.M. 3519/2006 ed ai sensi del D.M. 14.01.2008 – Revoca della DGRT 431/2006” e cessazione di efficacia dell'elenco dei Comuni a Maggior Rischio Sismico della Toscana (DGRT 841/2007)”.

Inoltre, in mancanza di specifiche indicazioni, ad integrazione delle norme precedenti e per quanto con esse non in contrasto, sono state prese a riferimento le indicazioni contenute nelle seguenti norme e raccomandazioni:

- RFI DTC INC CS SP IFS 001 A, “Specifiche per la progettazione geotecnica delle opere civili ferroviarie”, RFI (2011);
- Eurocodice 7 UNI EN 1997-1 (“Progettazione geotecnica Parte 1: Regole generali”);
- Eurocodice 7 UNI EN 1997-2 (“Progettazione geotecnica Parte 2: Indagini e prove nel sottosuolo”);
- Eurocodice 8 UNI EN 1998-5 (“Progettazione delle strutture per la resistenza sismica geotecnica Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici”);
- Linee guida a cura della Associazione Geotecnica Italiana (2005) (“Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica”);
- Raccomandazioni sui pali di fondazione (AGI, 1984);

## 2.2 Documenti di progetto

- [1] RFI (2018): linea "Pistoia - Lucca – Viareggio/Pisa. Raddoppio della linea Pistoia – Lucca - Pisa S.R. Tratta Pescia – Lucca", Relazione geotecnica, Progetto definitivo
- [2] RFI (2018): linea "Pistoia - Lucca – Viareggio/Pisa. Raddoppio della linea Pistoia – Lucca - Pisa S.R. Tratta Pescia – Lucca", Ponte ferroviario su Torrente Pescia di Collodi – km 22+011: planimetria, profilo e sezioni dell'opera Progetto definitivo
- [3] RFI (2018): linea "Pistoia - Lucca – Viareggio/Pisa. Raddoppio della linea Pistoia – Lucca - Pisa S.R. Tratta Pescia – Lucca", Relazione sismica, Progetto definitivo

## 2.3 Riferimenti bibliografici

- [4] BISHOP, A. W. (1955). *The use of the slip circle in the stability analysis of slopes*. Geotechnique, March, pp. 7-17
- [5] BUSTAMANTE, M., DOIX, B. (1985). *Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés*. Bull Liaison Lab Ponts Chauss, (140).
- [6] FELLENIUS, W. (1927), *Erdstatische berechnungen mit reibung und kohesion*. Ernest Verlag, Berlin
- [7] JANBU, N. (1973), *Slope stability computations*. In *The embankment dam engineering Casagrande volume*. John Wiley & Sons, pp. 47-86
- [8] MONONOBE N., MATSUO, H. (1929). *On the determination of earth pressure during earthquake*. World Engineering Congress Proc., Vol. IX, Tokio
- [9] MORGESTERN N.R., PRICE V.E. (1965). *The analysis of the stability of general slip surface*. Geotechnique, 15, pp. 70-93
- [10] OKABE, S. (1926). *General theory of earth pressure*. Journal of Japanese Society of Civil Engineers, Vol. 12, Tokio

### **3 DESCRIZIONE DELLE OPERE**

Le opere in oggetto sono costituite da pali accostati in c.a., di diametro variabile. Per i tratti in cui le paratie avranno altezza di sbalzo superiore a 3,5m è previsto di integrare la paratia con due ordini di tiranti.

La geometria delle sezioni analizzate, rappresentative delle tipologie di paratie lungo la tratta, è presentata al Cap. 6.2 e nella tavola 1346-PO-S11-PD-TRRI-01-01-E002.

Mandataria

**TECH** PROJECT  
ingegneria integrata ©



Mandanti



#### 4 MODELLO GEOTECNICO DI RIFERIMENTO

Il modello geotecnico di riferimento è ricavato dalle indagini e dalla caratterizzazione geotecnica descritta nella Relazione geotecnica.

In relazione all'ubicazione delle opere di sostegno lungo la tratta in esame, sono stati riconosciuti tre possibili terreni coesivi di interesse (formazioni b, bna e VIL\_a).

Le analisi sono state eseguite considerando cautelativamente i parametri del materiale coesivo della formazione bna.

In base alla relazione Geotecnica, i parametri geotecnici rappresentativi sono i seguenti:

Formazione	Materiale	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi'$ [°]	c' [kPa]	C <sub>u</sub> [kPa]
bna	coesivo	19	20	12	75

La falda di progetto è posta alla base dello scavo.

## 5 VERIFICHE AGLI STATI LIMITE

La norma vigente (D.M. 17/01/2018) prescrive che per le opere di sostegno siano effettuate le verifiche di sicurezza (SLU), che sono relative alla resistenza dell'opera e del terreno con cui l'opera interagisce, e le verifiche di esercizio (SLE), che sono relative agli spostamenti dell'opera e del terreno con cui l'opera interagisce.

Le verifiche di sicurezza devono essere effettuate secondo approcci di calcolo che prevedono l'applicazione dei coefficienti parziali per le azioni (A), per le resistenze del terreno (M) e per la resistenza del sistema geotecnico (R), combinati in modo diverso in funzione dell'approccio.

Le tabelle seguenti, estratte dalla norma vigente, riportano i diversi coefficienti parziali da adottare nelle possibili condizioni di interesse progettuale.

**Tabella 5.1 Coefficienti parziali per le azioni o per gli effetti delle azioni (Tabella 6.2.I delle Norme tecniche per le costruzioni)**

	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 $G_2$ <sup>(1)</sup>	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	$\gamma_{Qi}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

<sup>(1)</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  $\gamma_{Gi}$

**Tabella 5.2 Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (Tabella 6.2.II delle Norme tecniche per le costruzioni)**

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 5.3 Coefficiente parziale per la resistenza del sistema geotecnico per verifiche di stabilità globale (Tabella 6.8.I delle Norme tecniche per le costruzioni)**

COEFFICIENTE	R2
$\gamma_R$	1,1



## 6 VERIFICHE DI STATI LIMITE ULTIMI (SLU DI TIPO GEO)

Le Norme prescrivono che per le opere di sostegno siano effettuate le verifiche degli SLU di tipo geotecnico (GEO) analizzando le situazioni:

- stabilità globale del complesso opera di sostegno – terreno.

Data la soggiacenza della falda, non è necessario verificare gli SLU di tipo idraulico (stabilità del fondo scavo per sollevamento - UPL).

Ai paragrafi seguenti si descrivono metodologia di calcolo, calcoli effettuati e risultati ottenuti.

### 6.1 Analisi dei carichi

Poiché il rilevato ferroviario non insiste direttamente sull'opera di sostegno, nei calcoli qui presentati viene trascurata l'azione variabile dovuta al carico ferroviario.

Sovraccarichi permanenti a tergo dell'opera di sostegno sono stati presi in considerazione in presenza di edifici adiacenti all'opera.

Si è anche tenuto conto dell'eventuale presenza di barriere antirumore di altezza pari a 5m posizionate in testa alle opere di sostegno, applicando le seguenti forze e momenti caratteristici (dovuti al peso proprio della barriera, all'azione del vento e agli effetti aerodinamici associati al passaggio dei convogli):

- Forza verticale:  $N=12\text{kN}$
- Forza orizzontale:  $H=18\text{kN}$
- Momento:  $M=40\text{kNm}$

### 6.2 Sezioni di calcolo

Come richiamato in precedenza (Cap. 3), sono state esaminate due sezioni tipiche, rappresentative di geometrie e condizioni stratigrafiche che si incontrano in corrispondenza dell'ubicazione prevista per le paratie. Le sezioni analizzate sono riassunte nel prospetto seguente.

Comune	Opera	Lato linea ferroviaria	km inizio	km fine	Massima altezza sbalzo (m)	Sezione tipologica	Presenza di barriere a.r.
Pescia	Paratia di pali	sinistro	21+000	21+120	7	1	Si
			21+120	21+160	3	2	Si
Pescia	Paratia di pali	destro	21+000	21+120	7	1	No
			21+120	21+160	3	2	No
Pescia	Paratia di pali	destro	21+305	21+385	2.5	2	Si
Altopascio	Paratia di pali	destro	26+610	26+860	3	2	Si
Altopascio	Paratia di pali	destro	26+930	27+425	2	2	Si
Altopascio	Paratia di pali	destro	27+465	27+560	3.5	2	No
Altopascio	Paratia di pali	sinistro	27+476	27+566	3.5	2	Si

La tabella seguente fornisce le caratteristiche delle paratie in relazione all'altezza dello sbalzo fuori terra.

Sezione tipologica	Altezza sbalzo (m)	Altezza complessiva opera (m)	Diametro pali (m)	Interasse pali (m)	Tiranti			Bulbo
					n. ordini	Lunghezza (m)	Inclinazione (°)	Lunghezza (m)
1	7	18	1,2	1,6	2	10	30	6
2	3,5	10	1,0	1,2	-	-	-	-

I tiranti contengono quattro trefoli. Il diametro di perforazione del bulbo è stato assunto pari a 0.168m.

Come prescritto dalle Norme vigenti, per opere di sostegno a sbalzo, per le quali la resistenza del volume di terreno a valle dell'opera determina la resistenza dell'opera stessa, si deve tener conto di possibili variazioni del profilo del terreno. In quest'ottica, la quota del p.c. a valle viene diminuita di una quantità pari al minore tra 0.5m e il 10% dell'altezza di terreno da sostenere.

### 6.3 Stabilità globale dell'insieme opera di sostegno – terreno

#### 6.3.1 Metodologia di calcolo

In accordo al DM 17/01/2018, la verifica di stabilità globale dell'insieme opera di sostegno – terreno deve essere effettuata secondo l'Approccio 1 – Combinazione 2 (coefficienti parziali  $A_2+M_2+R_2$ ).

La verifica di stabilità globale viene effettuata con i metodi cosiddetti "dell'equilibrio limite" tipici delle analisi di stabilità dei pendii, che consistono nell'individuare diverse possibili superfici di scivolamento che coinvolgono il terreno sostenuto dall'opera e quello di fondazione e nell'analizzare, per ciascuna di esse, l'equilibrio allo scivolamento del cuneo di materiali soprastanti, considerato come se fosse rigido.

I vari metodi di calcolo dell'equilibrio limite disponibili in letteratura (Bishop, 1955; Janbu, 1973; Morgenstern e Price, 1965; Fellenius, 1927; etc.), si basano tutti sulle ipotesi seguenti:

- il coefficiente di sicurezza è definito come rapporto tra resistenza al taglio e sforzo di taglio mobilitato lungo la ipotetica superficie di scorrimento;
- il coefficiente di sicurezza (FS), che per la superficie corrispondente alla rottura è unitario, è costante in tutti i punti della superficie di scorrimento;
- la rottura avviene per il raggiungimento, contemporaneamente in tutti i punti della superficie di scorrimento, della resistenza limite.

Per quanto riguarda le opere di sostegno di tipo paratie, le analisi di stabilità sono effettuate sia per le condizioni statiche sia per le condizioni sismiche. Queste ultime saranno effettuate con il metodo pseudo-statico, che consiste nel sostituire alle reali azioni dinamiche indotte dal sisma in ogni elemento di volume di terreno una forza di inerzia costante (F) valutata come segue:

Mandataria

Mandanti

**RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLE  
 PARATIE**

a) componente verticale:  $F_V = 0$

b) componente orizzontale:  $F_H = W \cdot k_H$

dove:

$W$  = peso del volume di terreno potenzialmente instabile;

$k_H$  = coefficiente sismico orizzontale.

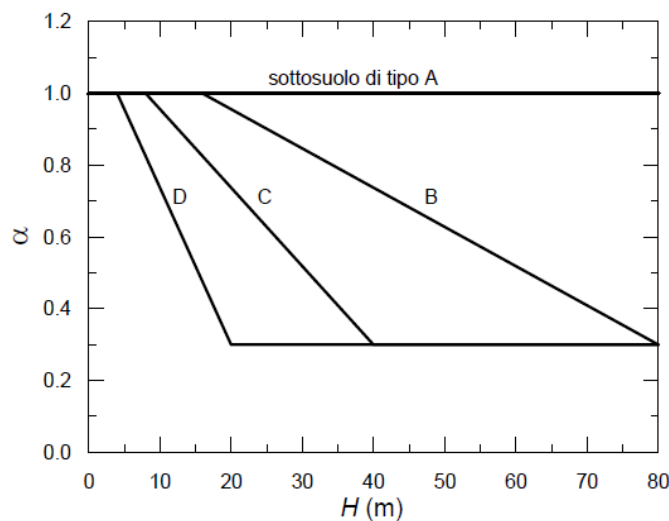
$k_H = \alpha \cdot \beta \cdot a_{max}/g \geq 0.2 a_{max}/g$ ;

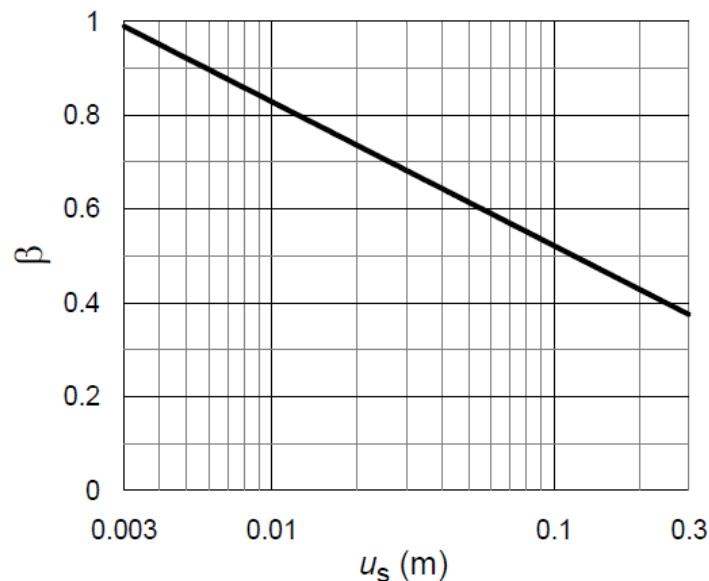
$\alpha, \beta$  = coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;

$a_{max}$  = accelerazione orizzontale massima al sito;

$g$  = accelerazione di gravità.

I valori dei coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  possono essere ricavati dai diagrammi seguenti (Fig. 7.11.2 e 7.11.3 della Normativa vigente) in funzione dell'altezza complessiva dell'opera di sostegno  $H$ , della categoria di sottosuolo e del massimo spostamento permanente  $u_s \leq 0.005H$  che l'opera può tollerare:





La categoria di sottosuolo C, il valore atteso dell'accelerazione orizzontale al sito (per tutta la tratta) pari a  $a_g=0.155g$  e il coefficiente che tiene conto dell'amplificazione stratigrafica e topografica  $S=1.773$  sono stati ricavati in precedenza per lo stato limite ultimo SLV (rif. [3]). La massima accelerazione orizzontale attesa al sito risulta quindi pari a  $a_{max}=1.773 \cdot 0.155g=0.275g$ .

Per l'analisi sismica delle varie sezioni di calcolo sono state valutate le seguenti quantità:

Sezione	Massimo spostamento tollerabile $u_s$ (m)	$\alpha$ (-)	$\beta$ (-)	Coefficiente sismico $k_H$ (-)
1	0,09	0,8	0,52	0,114
2	0,05	0,95	0,6	0,157

### 6.3.2 Risultati delle analisi

Data la geometria dell'opera di sostegno (larghezza dello scavo inferiore alla lunghezza di infissione della paratia), il fattore di sicurezza minimo risulta pari a 2,6 e 2,3 rispettivamente per le due sezioni analizzate.

La stabilità globale dell'insieme opera di sostegno-terreno è pertanto soddisfatta con requisiti di normativa (DM 17/01/2018) anche per le condizioni sismiche, essendo  $\gamma_{R,min} \geq 1,1$ .

## 7 VERIFICHE AGLI STATI LIMITE ULTIMI (SLU DI TIPO STR)

Le verifiche agli stati limite ultimi sono state effettuate con analisi di interazione terreno-struttura mediante il codice di calcolo agli elementi finiti (FEM) PLAXIS 2D versione 2017 (www.plaxis.com, P.O. Box 572, 2600 AN Delft, The Netherlands). Il programma permette di simulare le fasi di scavo e di realizzazione delle opere secondo l'effettiva sequenza costruttiva prevista.

I calcoli sono condotti in condizione di deformazione piana (modello 2D). Le seguenti condizioni al contorno sono state applicate sui bordi del modello:

- spostamenti orizzontali nulli sui contorni verticali;
- spostamenti orizzontali e verticali nulli alla base del modello.

Il comportamento dei terreni è modellato mediante una legge costitutiva elasto-plastica con criterio di rottura secondo il modello di Mohr-Coulomb (parametri  $c'$ ,  $\phi'$  ed eventualmente dilatanza). I parametri utilizzati nel modello sono quelli indicati al Cap. 4.

### 7.1 Analisi degli SLU per le opere di sostegno flessibili

Le analisi di interazione sono state effettuate adottando coefficienti parziali unitari sia sulle azioni che sulle resistenze dei terreni (parametri caratteristici).

I valori di progetto delle sollecitazioni negli elementi strutturali ( $E_d$ ) sono stati determinati applicando i coefficienti parziali per le azioni  $\gamma_A$  agli effetti delle azioni, in particolare:

- $\gamma_{A1} = 1,3$  applicato agli effetti indotti dai carichi permanenti ( $E_{k,PL}$ )
- $\gamma_{A1} = 1,5$  applicato agli effetti indotti dai carichi variabili ( $E_{k,VL}$ )

I valori di progetto degli effetti delle azioni agenti sugli elementi strutturali sono quindi pari a:

$$E_d = 1,3 \cdot E_{k,PL} + 1,5 \cdot (E_{k,TOT} - E_{k,PL})$$

Sono state verificate sia le condizioni statiche, in fase provvisoria di scavo e considerando la configurazione finale dell'opera, che quelle sismiche per la sola configurazione finale dell'opera (analisi pseudo-statica con i coefficienti sismici indicati al paragrafo 6.3.1).

Vista la tipologia dell'opera di sostegno, riconducibile ad un'opera flessibile, le forze pseudo-statiche che sostituiscono le azioni dinamiche vengono valutate secondo la teoria di Mononobe & Okabe, cioè con distribuzione triangolare lungo l'intera altezza complessiva dell'opera e risultante nello stesso punto della risultante delle spinte statiche.

### 7.2 Analisi degli SLU per i tiranti

Per i tiranti è stata verificata allo SLU (STR) la resistenza a sfilamento.

Il metodo proposto da Bustamante e Doix (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) si basa sull'uso di diagrammi sperimentali che forniscono la resistenza unitaria  $q_s$  allo sfilamento della fondazione del tirante in funzione delle caratteristiche del terreno e delle modalità esecutive.

La resistenza a sfilamento risulta:

$$R_{a,d} = \frac{R_{a,k}}{\gamma_R} \quad \text{resistenza di progetto}$$

Dove:

$$R_{a,k} = \min \left\{ \frac{(R_{a,c})_{medio}}{\xi_{a,3}}; \frac{(R_{a,c})_{min}}{\xi_{a,4}} \right\} \quad \text{resistenza caratteristica}$$

$$R_{a,c} = \pi \cdot (\alpha \cdot D_d) \cdot L_f \cdot q_s \quad \text{resistenza limite allo sfilamento}$$

$$D_d = 0.168\text{m}$$

$$\alpha = 1.6$$

$$L_f = 6\text{m}$$

$$q_s = 150\text{kPa}$$

diametro di perforazione della fondazione del tirante  
coefficiente maggiorativo del diametro di perforazione  
lunghezza della fondazione del tirante  
resistenza unitaria (da diagramma)

### 7.3 Risultati delle analisi

L'incidenza dell'armatura viene valutata in base alla percentuale di armatura necessaria nella sezione in corrispondenza del momento flettente massimo.

Alla tabella seguente sono riassunti i valori dei momenti di progetto  $M_d$  e le relative incidenze delle armature per l'opera di sostegno.

Come da Normativa vigente, l'azione variabile del vento e il sisma sono stati considerati separatamente. Quindi, nel caso di verifica in condizioni sismiche, il momento dovuto ai soli carichi permanenti risulta uguale a quello dovuto ai carichi totali.

Sezione	$M_{k,PL}$ (KMm/m)		$M_{k,TOT}$ (KMm/m)		Momento flettente (kNm/m)		% armatura ( $A_t/A_c$ )	Incidenza armatura ( $\text{kg/m}^3$ )
	Statica	Sismica	Statica	Sismica	Statica	Sismica		
1	363	393	285	393	355	511	0,3	50
2	15	27	98	27	144	35	0,3	50

Per la verifica a sfilamento dei tiranti, considerando  $\xi_{a,3} = \xi_{a,4} = 1.8$  (corrispondenti a un profilo di indagine) e  $\gamma_R=1.2$ , la resistenza a sfilamento di progetto risulta pari a:

$$R_{a,d} = \frac{1}{1.2} \cdot \frac{1}{1.8} \cdot [\pi \cdot (1.6 \cdot 0.168) \cdot 6 \cdot 150] = 352\text{kN}$$

L'azione assiale agente sul tirante è pari a  $E_d = 300\text{kN}$ .

Poiché  $R_{a,d} > E_d$  la verifica a sfilamento è soddisfatta.

## 8 VERIFICHE DI STATI LIMITE DI ESERCIZIO (SLE DI TIPO GEO)

### 8.1 Analisi degli SLE per opere di sostegno flessibili

Le verifiche agli stati limite ultimi di esercizio sono state effettuate con analisi di interazione terreno-struttura mediante il codice di calcolo agli elementi finiti (FEM) PLAXIS 2D versione 2017 (www.plaxis.com, P.O. Box 572, 2600 AN Delft, The Netherlands). Il programma permette di simulare le fasi di scavo e di realizzazione delle opere secondo l'effettiva sequenza costruttiva prevista.

I calcoli sono condotti in condizione di deformazione piana (modello 2D). Le seguenti condizioni al contorno sono state applicate sui bordi del modello:

- spostamenti orizzontali nulli sui contorni verticali;
- spostamenti orizzontali e verticali nulli alla base del modello.

Il comportamento dei terreni è modellato mediante una legge costitutiva elasto-plastica con criterio di rottura secondo il modello di Mohr-Coulomb (parametri  $c'$ ,  $\phi'$  ed eventualmente dilatanza). I parametri utilizzati nel modello sono quelli indicati al Cap. 4.

Le analisi di interazione sono state effettuate adottando coefficienti parziali unitari sia sulle azioni che sulle resistenze dei terreni (parametri caratteristici).

Sono state verificate sia le condizioni statiche, in fase provvisoriale di scavo e considerando la configurazione finale dell'opera, che quelle sismiche per la sola configurazione finale dell'opera (analisi pseudo-statica con i coefficienti sismici indicati al paragrafo 6.3.1).

Vista la tipologia dell'opera di sostegno, riconducibile ad un'opera flessibile, le forze pseudo-statiche che sostituiscono le azioni dinamiche vengono valutate secondo la teoria di Mononobe & Okabe, cioè con distribuzione triangolare lungo l'intera altezza complessiva dell'opera e risultante nello stesso punto della risultante delle spinte statiche.

#### 8.1.1 Risultati delle analisi

Nella seguente Tabella 8-1 vengono riassunti i valori degli spostamenti orizzontali attesi in testa all'opera di sostegno di tipo paratia corrispondenti ai vari casi esaminati per la sezione con profondità di scavo massima.

Si ritiene che i valori di spostamento calcolati, inferiori al centimetro in condizioni statiche e nell'ordine di 2cm in condizioni sismiche, siano compatibili con la sicurezza dell'opera e delle strutture ad essa adiacenti.

**Tabella 8-1 Sintesi degli spostamenti orizzontali in testa all'opera di sostegno (SLE-GEO)**

Sezione	Spostamenti orizzontali $d_x$ (cm) (*)	
	Statica	Sismica
1	-1,3	-0,9
2	-0,2	0,2

(\*) Valori negativi indicano movimento della paratia verso monte