



Città Metropolitana di Bologna

Via Zamboni, 13 - 40126 Bologna (BO)

IL RUP:

P.I.E. Stefano Romagnoli

IL DIRETTORE DELL'ESECUZIONE DEL CONTRATTO:

Ing. Jonathan Manzi

INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA

(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA

OPERE D'ARTE MINORI

Muro di sottoscarpa via S. Zagno

Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B

PROGETTAZIONE:
Mandataria:**SYSTRA**

SYSTRA S.p.A.

Via della Stazione, 27 38123 Trento (TN), Italy - www.systra.com/italy

Mandanti:



SETECO Ingegneria S.r.l.



ITEC Engineering S.r.l.

SCALA: ---	IL PROGETTISTA: Ing. Erica Calatozzo	IL RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE: Ing. Erica Calatozzo
FORMATO: A4	DATA: Mag 2026	

REV.	DESCRIZIONE	REDATTO	DATA	VERIFICATO	DATA	APPROVATO	DATA
r00	Emissione	H.Mistry/ A.Konstantinou	Mag 2026	M. Palomba	Mag 2026	M. Ravelli	Mag 2026

CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROGETTAZIONE PF	TIPO DOC. R	AMBITO OM	PROGRESSIVO 722	REV. r00
---------------------------------	------------------------------------	-----------------------	---------------------	---------------------------	--------------------

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

INDICE

1.	PREMESSA	4
1.1	IDENTIFICAZIONE DEL PROGETTO	4
1.2	DESCRIZIONE DELL'OPERA	5
1.3	VITA NOMINALE E CLASSE D'USO	6
2.	NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	6
2.1	NORMATIVA	6
2.2	ELABORATI DI RIFERIMENTO	7
2.3	SOFTWARE IMPIEGATI	7
3.	MATERIALI E RESISTENZE DI PROGETTO	7
4.	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E SISMICO	9
5.	MODELLAZIONE GEOTECNICA E STRUTTURALE DEI MURI	10
5.1	MODELLAZIONE STRUTTURALE	10
5.2	MODELLAZIONE SISMICA	11
5.3	APPROCCIO PROGETTUALE E DI VERIFICA	14
5.4	COMBINAZIONI	14
5.5	VERIFICA STRUTTURALE E GEOTECNICA DEI MURI	15
5.5.1	VERIFICA ALLO SCORRIMENTO	16
5.5.2	VERIFICA AL RIBALTAMENTO	17
5.5.3	VERIFICA DI CAPACITÀ PORTANTE (CARICO LIMITE FONDAZIONI DIRETTE)	17
5.6	VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE	21
5.7	INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI	22
6.	DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DEL MURO	23
6.1	ANALISI DEI CARICHI	23
6.2	MURO A: H=9.8M (TIPO 1)	25
6.2.1	GEOMETRIA DEL MURO	25
6.2.2	VERIFICHE SLU/SLV GEO	25
6.2.2.1	Verifica allo scorrimento	27
6.2.2.2	Verifica al ribaltamento	27
6.2.2.3	Verifica di capacità portante (carico limite fondazioni dirette)	28
6.2.2.4	Cedimento della fondazione	30
6.2.2.5	Incidenza dell'opera	31
6.3	MURO B: H=9.1M (TIPO 2)	32
6.3.1	GEOMETRIA DEL MURO	32
6.3.2	VERIFICHE SLU/SLV GEO	32

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>OM</td><td>722</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	OM	722	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	OM	722	r00								

6.3.2.1	Verifica allo scorrimento	34
6.3.2.2	Verifica al ribaltamento	34
6.3.2.3	Verifica di capacità portante (carico limite fondazioni dirette)	35
6.3.2.4	Cedimento della fondazione	37
6.3.2.5	Incidenza dell'opera	38
6.4	MURO C: H=6.2M (TIPO 3)	39
6.4.1	GEOMETRIA DEL MURO	39
6.4.2	VERIFICHE SLU/SLV GEO	39
6.4.2.1	Verifica allo scorrimento	41
6.4.2.2	Verifica al ribaltamento	41
6.4.2.3	Verifica di capacità portante (carico limite fondazioni dirette)	43
6.4.2.4	Cedimento della fondazione	46
6.4.2.5	Incidenza dell'opera	46

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

1. PREMESSA

Il presente documento riporta il dimensionamento geotecnico e strutturale del muro di sostegno in spalla SX del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica (PFTE) dei servizi di supporto alla progettazione e all'esecuzione dei lavori relativo all'intervento di "RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SULLA S.P. 6 AL KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA" - CUP C51B23000440001 (ALLUVIONE MAGGIO 2023 - 2024VIMASNC25).

Questa relazione è stata sviluppata sulla base della caratterizzazione geotecnica presentata nella relazione 24V25_PF_R_GE_102.

Nella presente relazione sono trattati i seguenti argomenti:

- Nel capitolo 2 sono elencate le normative e i documenti di riferimento;
- Nel capitolo 3 si riportano le caratteristiche dei materiali utilizzati
- Nel capitolo 4 si presenta l'inquadramento geologico e sismico
- Nel capitolo 5 sono riportati i criteri generali di progettazione per le opere oggetto del presente documento.
- Nel capitolo 6 si presentano i calcoli dettagliati per il dimensionamento e la verifica del muro

Tutte le analisi svolte nel seguito sono eseguite in conformità alla normativa italiana vigente sulle opere civili (DM 17/01/2018) e secondo i criteri di calcolo descritti nei capitoli seguenti.

1.1 Identificazione del progetto

I dati principali del progetto sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 1. Identificazione del progetto

TIPOLOGIA MODELLO DISCIPLINARE	CONTENUTO MODELLO
CUP	C51B23000440001
Denominazione opera	ID 0060075 Ponte Torrente Idice km 11,776
Codice PBM	2024VIMASNC25
Stazione Appaltante	Città Metropolitana di Bologna (CMBO)
RUP	P.i.E. Stefano Romagnoli
Localizzazione geografica dell'intervento	S.P. 6 "Zenzalino" al Km 11,776 tra i Comuni di Budrio e Molinella
Descrizione del progetto	RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SULLA S.P. 6 AL KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO OM	PROGRESSIVO 722	REV. r00

Identificazione della fase di incarico (come da Codice dei Contratti Pubblici)

PFTE

1.2 Descrizione dell'opera

Nei tratti a maggiore rilevanza altimetrica del rilevato di approccio nord, sul lato di via Zagno, è prevista la realizzazione di un muro di sostegno in c.a., da km 0+030 fino alla spalla in km 0+306 circa, per un'estensione complessiva di circa 276m. Il paramento ha un'altezza variabile tra 2,5m e 8,9m.

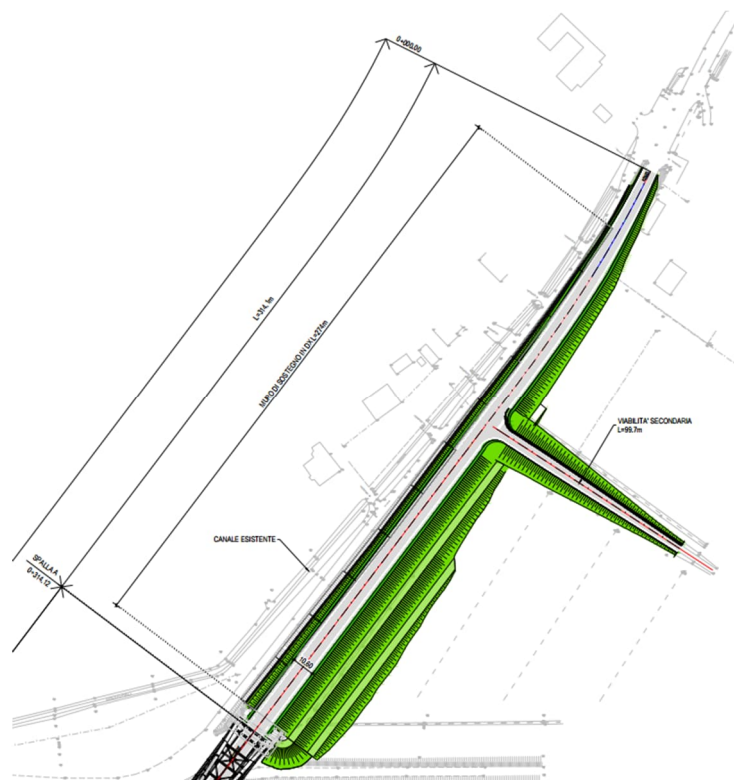


Figura 1: Stralcio planimetrico dell'approccio nord, con indicazione dell'estensione del muro di sostegno

Nella figura sotto si riporta la sezione tipo "1", la quale si applica nella zona più alta del rilevato. Le piante, sviluppate e le altre sezioni tipo sono presentate nell'elaborato 24V25_PF_T_ST_723.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO OM	PROGRESSIVO 722	REV. r00

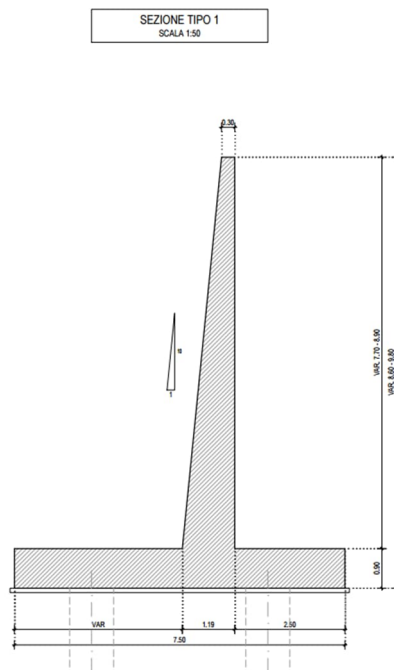


Figura 2: Sezione tipo "1"

1.3 Vita nominale e classe d'uso

Per le considerazioni dettagliate è possibile fare riferimento alla relazione sismica [10]. La vita nominale della struttura, V_N , è pari a 100 anni e il coefficiente d'uso, C_u , è pari a 1.5, con un periodo di riferimento pari a 150 anni.

2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Normativa

Si riporta di seguito l'elenco delle Normative a cui si è fatto riferimento per la stesura della presente relazione.

- [1] Eurocodice 7. Progettazione geotecnica, 2004;
- [2] Eurocodice 8. Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture. Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti di geotecnica, 2004;
- [3] Aggiornamento Norme Tecniche per le Costruzioni DM 17 gennaio 2018.
- [4] Circolare del 21 gennaio 2019 – Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme Tecniche per le costruzioni, di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018;

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO OM	PROGRESSIVO 722	REV. r00

Per quanto concerne le caratteristiche del calcestruzzo armato e le barre di armatura, si considerano le seguenti normative:

- [5] UNI EN 206 - "Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità";
- [6] UNI 11104 - "Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206";
- [7] UNI EN 13670 - "Esecuzione di strutture di calcestruzzo";

2.2 Elaborati di riferimento

- [8] 24V25_PF_R_GE_102: "Relazione geotecnica di caratterizzazione"
- [9] 24V25_PF_R_GE_101: "Relazione geologica"
- [10] 24V25_PF_R_GT_101: "Relazione sismica"
- [11] 24V25_PF_T_GE_400: "Planimetria ubicazione indagini e profilo geologico"
- [12] 24V25_PF_T_PS_301: "Planimetria di progetto"
- [13] 24V25_PF_R_GT_720: "Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati"
- [14] 24V25_PF_T_GT_721: "Planimetria e sezioni interventi di consolidamento dei rilevati"
- [15] 24V25_PF_R_ST_712: "Relazione di calcolo spalle e fondazioni"

2.3 Software impiegati

Il dimensionamento strutturale e geotecnico è stato condotto mediante fogli di calcolo sviluppati internamente.

3. MATERIALI E RESISTENZE DI PROGETTO

Si riportano di seguito le principali caratteristiche dei diversi materiali impiegati nelle opere in progetto, con l'indicazione dei valori di resistenza e deformabilità adottati nelle verifiche, nel rispetto delle indicazioni del DM 17/01/2018.

Nella tabella che segue si riportano in sintesi le classi dei materiali impiegati per l'analisi strutturale:

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscampa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

Tabella 2: Classi di resistenza dei materiali impiegati per l'analisi strutturale

ELEMENTI	CALCESTRUZZO
Magrone	C12/15
Paramento e fondazione del muro di sostegno	C32/40
ELEMENTI	ACCIAIO PER C.A.
Tutti	B450C

Con riferimento alle specifiche di cui alla norma UNI 11104, si definiscono di seguito la classe di esposizione del calcestruzzo delle diverse parti della struttura oggetto dei dimensionamenti di cui al presente documento:

Tabella 3: Classi di esposizione secondo UNI-EN 206-2006

Elemento	Classe cls	Classe esposizione	Ambiente	Diametro massimo aggregati	Max a/c	Min cemento
[-]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[kg/mc]
Paramento	C32/40	XC4 lato esterno XC2 lato terra	Aggressivo (XC4)	32	0.50	340
Fondazione	C32/40	XC2	Ordinario	32	0.50	340
Pali (*)	C25/30	XC2	Ordinario	25	0.60	300

(*) I pali sono non armati e sono considerati solo come inclusioni rigide nel terreno nelle tratte più alte del muro. Sono a contatto con la fondazione del muro, ma non sono collegati strutturalmente. Si considera una classe di resistenza di C25/30.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscampa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E SISMICO

Per l'inquadramento geologico e sismico di dettaglio si rimanda alla relazione geologica [9], la relazione geotecnica di caratterizzazione [8] e la relazione sismica [10].

Di seguito si riporta una sintesi della stratigrafia e dei parametri geotecnici dei rilevati.

Le unità geotecniche individuate sono le seguenti:

- Unità rilevato esistente, costituita dal materiale utilizzato per la costruzione del rilevato relativo al vecchio ponte;
- Unità incoerenti: sabbia limosa (SL) e sabbia e ghiaia (SG)
- Unità coesive: limo sabbioso (L) e argilla limosa/limo argilloso (AL)

La stratigrafia è presentata nell'elaborato 24V25_PF_T_GE_400 "Planimetria ubicazione indagini e profilo geologico e geotecnico".

I parametri geotecnici riferiti alla sponda sinistra sono riassunti nella Tabella 4.

Tabella 4: Parametri geotecnici sponda sinistra

Sponda sinistra								
Unità	z (m)	γ (kN/m ³)	c_u (kPa)	c' (kPa)	ϕ (°)	E_0 (MPa)	E' (MPa)	k (m/s)
R	-	17 – 19	-	0 – 5	28 – 32	180 – 300	18 – 30	$10^{-7} - 10^{-5}$
SL	z < 20	18 – 20	-	0 – 5	30 – 34	200 – 400	20 – 40	$10^{-7} - 10^{-5}$
	z > 28					350 – 600	35 – 60	
LSA	z < 20	18 – 20	50 – 130	10 – 20	22 – 26	200 – 300	20 – 30	$10^{-9} - 10^{-7}$
	z > 20					300 – 400	30 – 40	

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO OM	PROGRESSIVO 722	REV. r00

5. MODELLAZIONE GEOTECNICA E STRUTTURALE DEI MURI

5.1 Modellazione strutturale

Ai fini delle verifiche strutturali, il calcolo delle sollecitazioni viene effettuato attraverso l'utilizzo di semplici schemi statici fondamentali di travi isostatiche.

Ad esempio, per la fondazione sono state adottate le seguenti schematizzazioni.

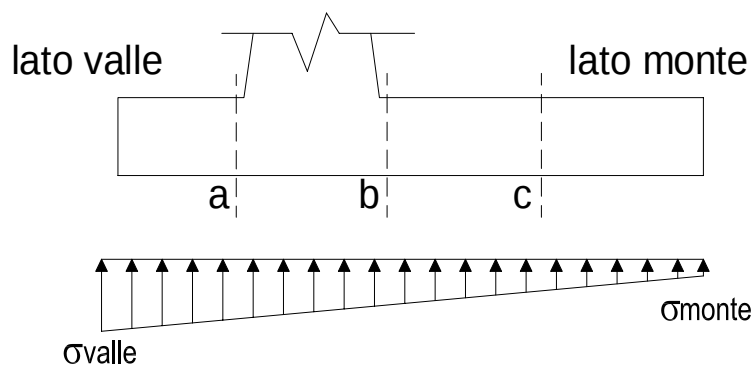


Figura 3: Pressioni agenti alla base della Fondazione del muro

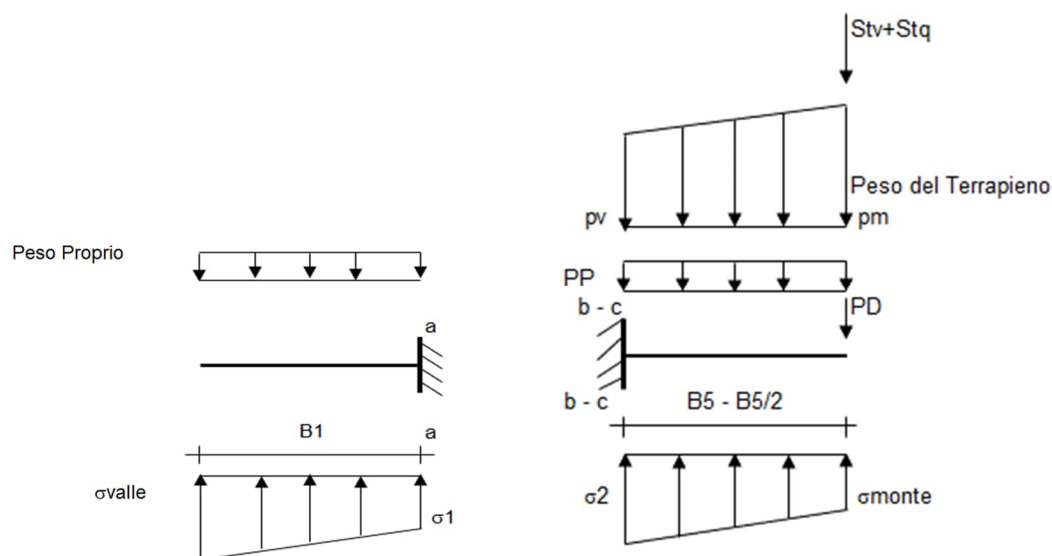


Figura 4: Schemi statici adottati per il calcolo delle sollecitazioni nella fondazione del muro

La medesima procedura viene effettuata per il calcolo delle sollecitazioni nel paramento.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>OM</td><td>722</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	OM	722	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	OM	722	r00								

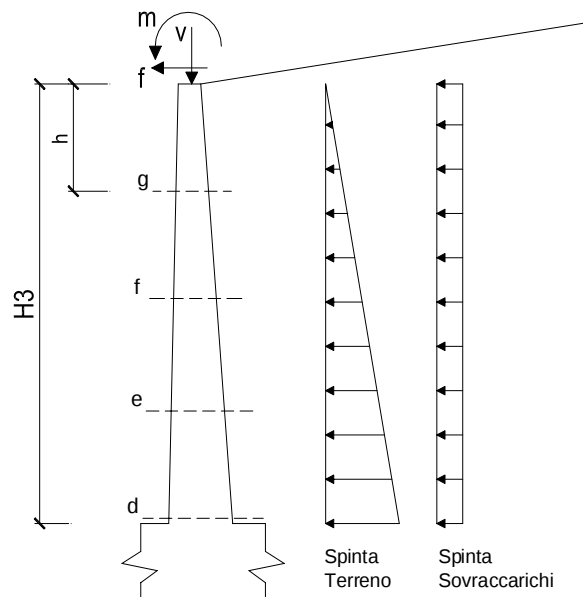


Figura 5: Spinte agenti sul paramento del muro

5.2 Modellazione sismica

Se la struttura può spostarsi, l'analisi pseudo-statica si esegue mediante i metodi dell'equilibrio limite. Il modello di calcolo deve comprendere l'opera di sostegno, il volume di terreno a tergo dell'opera, che si suppone in stato di equilibrio limite attivo, e gli eventuali sovraccarichi agenti sul volume suddetto.

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:

$$k_h = \beta_m \cdot \left(\frac{a_{max}}{g} \right)$$

$$k_v = \pm 0,5 \cdot k_h$$

dove

- β_m = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;
- a_{max} = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;
- g = accelerazione di gravità.

La modellazione dell'azione sismica viene effettuata attraverso la teoria di Mononobe-Okabe.

Adottando il metodo pseudostatico, viene calcolato il coefficiente sismico orizzontale e verticale secondo le prescrizioni della normativa (DM 17/01/2018):

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

$$k_h = \alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{a_{max}}{g} \right)$$

$$k_v = 0 \text{ (per paratie)}$$

dove:

- β coefficiente funzione della capacità dell'opera di subire spostamenti senza cadute di resistenza (Fig. 7.11.3 NTC18), assunto pari a 0,38 nelle verifiche allo stato limite ultimo (SLV).;
- α coefficiente che tiene conto della deformabilità dei terreni interagenti con l'opera (Fig. 7.11.2 NTC18);
- a_{max} è l'accelerazione orizzontale massima attesa al sito;
- g è l'accelerazione di gravità.

Mediante i coefficienti α e β è possibile tenere in considerazione dell'amplificazione/ deamplificazione delle spinte del terreno a monte e a valle dell'opere (§7.11.6.3 NTC18).

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

In assenza di analisi specifiche della risposta sismica locale, l'accelerazione massima può essere valutata con la relazione:

$$a_{max} = S \cdot a_g = (S_S \cdot S_T) \cdot a_g$$

dove:

- S = coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione stratigrafica (S_S) e dell'amplificazione topografica (S_T), di cui al § 3.2.3.2.1 del DM 17/01/2018;
- a_g è l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

L'effetto del sisma è ottenuto applicando un incremento di spinta del terreno valutato secondo la teoria di Mononobe-Okabe, agente direttamente sulla paratia secondo una distribuzione uniforme sull'intera altezza dell'opera.

$$\Delta S_E = \left[\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot (K_{aE} - K_a) \right] / H$$

dove:

- γ rappresenta il peso dell'unità di volume della formazione con la quale l'opera interagisce;
- H rappresenta l'altezza totale dell'opera (comprensiva del tratto infisso);
- K_{aE} e K_a rappresentano il coefficiente di spinta attiva in condizioni sismiche e statiche rispettivamente.

I coefficienti di spinta risultano inclinati dell'angolo δ sull'orizzontale. Pertanto, al fine di ottenere i valori della spinta orizzontale (k_{Ah} e $k_{Ah,E}$), questi vanno moltiplicati per il coseno dell'angolo di attrito muro-terreno:

$$k_{Ah} = k_A \cdot \cos \delta$$

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

$$k_{Ah,E} = k_{A,E} \cdot \cos \delta$$

Per il calcolo di $k_{A,E}$ si utilizza la formula di Mononobe - Okabe riportata di seguito.

- per $\beta \leq \phi - \theta$:

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

- per $\beta \geq \phi - \theta$:

$$k_{A,E} = \frac{\sin^2(\psi + \phi - \theta)}{\cos \theta \sin^2 \psi \sin(\phi + \theta - \delta)}$$

In cui:

- ϕ rappresenta l'angolo di resistenza al taglio del terreno;
- β rappresenta l'inclinazione del terreno a monte della paratia rispetto all'orizzontale (positivo per terreno che sale allontanandosi dal muro);
- ψ rappresenta l'inclinazione della paratia rispetto all'orizzontale ($>90^\circ$ per parete inclinata verso valle);
- δ rappresenta l'angolo di attrito muro terreno;
- θ rappresenta l'angolo dipendente dalla accelerazione sismica e definito dalle seguenti espressioni:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{k_h}{1 \pm k_v} \right)$$

Per la valutazione della spinta nelle condizioni di equilibrio limite passivo deve porsi $\alpha = 1$ e il coefficiente sismico verticale, k_v , si assume pari a 0 (§7.11.6.3 NTC18).

Se si applica la teoria di Mononobe-Okabe, possono inoltre essere trascurati gli effetti inerziali sulle masse che costituiscono la paratia.

I coefficienti di spinta attiva vengono determinati attraverso la relazione di Mononobe (1929) e Okabe (1926). I coefficienti di spinta passiva sono stati determinati attraverso la relazione di Lancellotta (2007). L'angolo di attrito terreno/struttura, δ , vale:

$$\delta' \cong 2/3 \cdot \phi' \quad \text{in condizioni statiche}$$

$$\delta' \cong 0 \cdot \phi' \quad \text{in condizioni sismiche}$$

L'azione sismica pseudo-statica viene combinata con i carichi permanenti e accidentali secondo quanto riportato al § 2.5.3. del DM 17/01/2018 e la verifica si ritiene soddisfatta se:

$$E_d \leq R_d$$

Essendo E_d il valore di progetto dell'azione e R_d il valore di progetto della resistenza.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO OM	PROGRESSIVO 722	REV. r00

5.3 Approccio progettuale e di verifica

Nelle verifiche di sicurezza devono essere presi in considerazione tutti i meccanismi di stato limite ultimo, sia a breve sia a lungo termine. Gli stati limite ultimi delle opere di sostegno si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno, e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che compongono le opere stesse.

Le verifiche sono state condotte in accordo con le prescrizioni e le indicazioni del DM 17/01/2018 e della Circolare n. 7/19 (si veda §6.5.3 NTC2018).

Devono essere effettuate le verifiche con riferimento almeno ai seguenti stati limite, accertando che la condizione $E_d \leq R_d$ sia soddisfatta per ogni stato limite considerato:

- SLU di tipo geotecnico (GEO)
 - scorrimento sul piano di posa;
 - collasso per carico limite del complesso fondazione-terreno;
 - ribaltamento
 - stabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno
- SLU di tipo strutturale (STR)
 - raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali;
 - controllo dello stato tensionale e fessurativo degli elementi strutturali.

5.4 Combinazioni

Le azioni considerate per l'opera sono le seguenti:

- Azioni permanenti strutturali (G1): peso proprio degli elementi strutturali;
- Azioni permanenti non strutturali (G2): spinta del terreno a monte e a valle dell'opera; carico distribuito sul piano campagna a monte della struttura di sostegno al fine di simulare il piano campagna non orizzontale;
- Azioni variabili (Q_k): carico variabile sul piano campagna atto a simulare la presenza di sovraccarichi variabili in fase costruttiva legato alle varie fasi realizzative;
- Azione sismica (E): Accelerazione orizzontale e verticale come definita al come definita nella relazione sismica.

Ai fini della determinazione delle sollecitazioni di verifica, le azioni nominali vanno combinate nei vari Stati Limite di verifica previsti (SLE, SLU, SLV) in accordo a quanto previsto al §2.5.3 delle NTC18.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.1]
- Combinazione caratteristica, cosiddetta rara, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.2]
- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.3]
- Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.4]
- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E:

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$
 [2.5.5]
- Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali A:

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$
 [2.5.6]

Oltre ai coefficienti parziali sulle azioni, si affiancano i fattori parziali di sicurezza da applicare ai parametri geotecnici del terreno.

5.5 Verifica strutturale e geotecnica dei muri

In accordo a quanto prescritto dalle NTC18 sono state individuate le combinazioni di carico per le verifiche di stati limite ultimi in condizioni statiche e in condizioni sismiche.

- Combinazione fondamentale (SLU);
- Combinazione sismica (SLV).

Come prescritto dalle NTC18 per il dimensionamento geotecnico delle strutture di sostegno, è stato adottato l'Approccio 2 con la combinazione di coefficienti parziali A1 + M1 + R3 (tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.5.1 di nella Tab. 7.1 delle NTC2018). Nella verifica a ribaltamento i coefficienti R3 della Tab. 6.5.I si applicano agli effetti delle azioni stabilizzanti.

Per quanto riguarda le verifiche di stati limite ultimi STR l'analisi è stata condotta la combinazione (A1+M1+R1).

Per le verifiche di stabilità globale è stato applicato l'Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R2 – tab. 6.2.I, 6.2.II e 6.8.I di nella Tab. 7.1 delle NTC2018).

Il corretto dimensionamento nei confronti degli SLU GEO assicura che non ci siano cinematismi non ammessi dell'opera stessa; mentre la verifica agli stati limite di esercizio implica l'analisi del problema di interazione terreno-struttura, al termine della costruzione e nel tempo.

Le verifiche in condizioni sismiche sono state condotte con riferimento allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV), con riferimento alla configurazione finale dell'opera di sostegno. Per le verifiche in condizioni sismiche i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici sono pari all'unità, mentre per i coefficienti parziali sulle resistenze sono descritti nella Tab. 7.11.III di nella Tab. 7.1 delle NTC2018).

Fare riferimento al § 5.2 per i dettagli relativi all'applicazione dell'azione sismica nei modelli di calcolo.

La verifica nei confronti degli Stati Limite di Esercizio consiste nel controllare il tasso di lavoro nei materiali e l'ampiezza delle fessure attesa, secondo quanto di seguito specificato.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

La verifica delle tensioni in esercizio consiste nel controllare il rispetto dei limiti tensionali previsti per il calcestruzzo e per l'acciaio per ciascuna delle combinazioni di carico caratteristiche "Rara" e "Quasi Permanente"; i valori tensionali nei materiali sono valutati secondo le note teorie di analisi delle sezioni in c.a. in campo elastico e con calcestruzzo "non reagente" adottando come limiti di riferimento, quelli indicati al §4.1.2.2.5 della Normativa vigente.

La verifica a fessurazione consiste nel controllo dell'ampiezza massima delle fessure per le combinazioni di carico di esercizio i cui valori limite sono stabiliti nella Tabella 4.1.IV della Normativa vigente.

In particolare, l'apertura delle fessure dovrà rispettare i seguenti limiti per una classe di esposizione di XC2 per la fondazione e il lato interno (contro terra) del paramento, che è il lato dove l'armatura è soggetta a trazione:

- Combinazione frequente: $w_k \leq w_2 = 0,4 \text{ mm}$
- Combinazione quasi permanente: $w_k \leq w_1 = 0,3 \text{ mm}$

5.5.1 Verifica allo scorrimento

La verifica allo scorrimento sul piano di posa della fondazione è condotta rispetto alle combinazioni:

- SLU → Approccio 2, combinazione A1+M1+R3 (si vedano nel documento NTC18 le Tab. 6.2.I per i coefficienti γ_E , Tab. 6.2.II per i coefficienti γ_M e Tab. 6.5.1 per i coefficienti γ_R);
- SLV → Coefficienti parziali sulle azioni e materiali unitari (si veda Tab. 7.11.III di nella Tab. 7.1 delle NTC2018). per il coefficiente γ_R).

In particolare, è stato verificato il rispetto della seguente condizione:

$$FS_{SLU} = \frac{c' \cdot B + N \cdot \tan \mu}{H} \geq 1,1$$

$$FS_{SLV} = \frac{c' \cdot B + N \cdot \tan \mu}{H} \geq 1,0$$

Dove:

- N = Risultante delle azioni ortogonali al piano di scorrimento;
- H = Risultante delle azioni parallele al piano di scorrimento;
- c' = coesione efficace, posta generalmente pari a zero, salvo particolari condizioni che ne consentano di tenerne conto;
- B = Dimensione della fondazione sul piano di scorrimento;
- μ = Coefficiente di attrito fondazione-terreno.

Per la valutazione del coefficiente di attrito fondazione-terreno, si tiene in adottano i seguenti valori in funzione dell'angolo di attrito del terreno:

- Per $\varphi \leq 30^\circ$ $\delta = \varphi'$
- Per $\varphi \geq 35^\circ$ $\delta = 0,85 \cdot \varphi'$
- Per $30^\circ \leq \varphi \leq 35^\circ$ δ = ricavato per interpolazione lineare

L'adesione c_a terra-opera sarà considerata nulla.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscampa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

5.5.2 Verifica al ribaltamento

La verifica al ribaltamento rispetto al vertice esterno della fondazione viene trattata secondo la normativa come uno stato limite di equilibrio del corpo rigido (EQU).

La verifica è condotta rispetto alle combinazioni:

- SLU → Approccio 2, combinazione A1+M1+R3 (si vedano nel documento nella Tab. 7.1 delle NTC2018 le Tab. 6.2.I per i coefficienti γ_E , Tab. 6.2.II per i coefficienti γ_M e Tab. 6.5.1 per i coefficienti γ_R , questi ultimi da applicare agli effetti delle azioni stabilizzanti)
- SLV → Coefficienti parziali sulle azioni e materiali unitari (si veda Tab. 7.11.III di nella Tab. 7.1 delle NTC2018 per il coefficiente γ_R).

In particolare, per ciascuna delle combinazioni di verifica allo SLU statico e sismico rispetto alle quali è prescritta la verifica al ribaltamento, è stata verificata rispetto a:

$$FS = \frac{M_{S,d}/\gamma_R}{M_{R,d}} \geq 1$$

Dove:

- $M_{S,d}$ = risultante momenti stabilizzanti;
- $M_{R,d}$ = risultante momenti ribaltanti.

Entrambi i momenti sono ottenuti moltiplicando l'azione di progetto considerata per il rispettivo braccio e considerando come punto di rotazione lo spigolo di valle del muro.

5.5.3 Verifica di capacità portante (carico limite fondazioni dirette)

Per la valutazione del carico limite delle fondazioni dirette, nella condizione di lungo termine, si utilizza il criterio di Brinch-Hansen di cui nel seguito si riporta la relativa trattazione teorica:

$$q_{ult} = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot g_c \cdot b_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot g_q \cdot b_q + 0.5 \cdot B \cdot \gamma \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot g_\gamma \cdot b_\gamma$$

in cui:

- d_c , d_q e d_γ sono i fattori di profondità;
- s_c , s_q e s_γ sono i fattori di forma;
- i_c , i_q e i_γ sono i fattori di inclinazione del carico;
- b_c , b_q e b_γ , sono i fattori di inclinazione del piano di posa;
- g_c , g_q e g_γ sono fattori che tengono conto del fatto che la fondazione poggia su un terreno in pendenza.

Tale formula va applicata a fondazioni superficiali rettangolari di dimensioni BxL soggette ad un carico verticale N. Grazie all'introduzione dei coefficienti i_γ , i_c e i_q riusciamo ad applicare la suddetta formula anche al caso in cui sia presente un carico trasversale di componenti H_B (componente lungo B) e H_L (componente lungo L). Nel caso in cui sia presente anche un momento esterno scomponibile nelle

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

sue due componenti lungo B (M_B) ed L (M_L), riusciamo comunque ad applicare la suddetta formula ricorrendo all'artificio di considerare valori di B' ed L' ridotti:

$$B' = B - 2 e_B = B - 2 \frac{M_B}{N}$$

$$L' = L - 2 e_L = L - 2 \frac{M_L}{N}$$

Fattori di capacità portante (Prandtl, 1921 – Vesic, 1970):

$$N_q = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \cdot e^{\pi \cdot \tan \phi'}$$

$$N_c = \frac{(N_q - 1)}{\tan \phi'}$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan \phi'$$

Fattori di inclinazione del carico (Vesic, 1973):

Nel caso di fondazioni aventi lunghezza finita, ad esempio plinti:

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{|H|}{N + B' L' c' \tan \phi'} \right)^{m+1}$$

$$i_q = \left(1 - \frac{|H|}{N + B' L' c' \tan \phi'} \right)^m$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \tan \phi'}$$

In cui:

$$m = \frac{2 + \frac{B'}{L'}}{1 + \frac{B'}{L'}}$$

$$|H| = \sqrt{H_B^2 + H_L^2}$$

Nel caso di fondazione di lunghezza infinita (e.g. verifica di muri controterra) diventano:

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{H}{N} \right)^3$$

$$i_q = \left(1 - \frac{H}{N} \right)^2$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \tan \phi'}$$

Fattori di forma della fondazione (Meyerhof, 1951):

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO OM	PROGRESSIVO 722	REV. r00

$$s_{\gamma} = s_q = 1 + 0,1 \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \frac{B'}{L'}$$

$$s_c = 1 + 0,2 \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \frac{B'}{L'}$$

Fattori di profondità (Brinch-Hansen, 1970 – Vesic, 1973):

$$d_{\gamma} = 1$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \frac{D}{B'} \quad \text{se } D \leq B'$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \arctan\left(\frac{D}{B'}\right) \quad \text{se } D > B'$$

$$d_c = d_q - \frac{1 - d_q}{N_c \tan \phi'}$$

Fattori di inclinazione della base della fondazione (Brinch-Hansen, 1970):

Supponendo che la fondazione sia inclinata rispetto all'orizzontale di un angolo α , i coefficienti di inclinazione della base della fondazione sono dati da:

$$b_q = b_{\gamma} = (1 - \alpha \tan \phi')^2$$

$$b_c = b_q - \frac{1 - b_q}{N_c \tan \phi'}$$

Fattori di inclinazione del piano campagna (Brinch-Hansen, 1970):

Supponendo che il piano di campagna sia inclinato rispetto all'orizzontale di un angolo ω , i coefficienti di inclinazione del piano campagna sono dati da:

$$g_{\gamma} = g_q = (1 - \tan \omega)^2$$

$$g_c = g_q - \frac{1 - g_q}{N_c \tan \phi'}$$

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

Sulla scorta di quanto sopra riportato, nel caso di condizione di breve termine, la formula di Brinch-Hansen diventa:

$$q_{ult} = 5.14 \cdot c \cdot (1 + s_c + d_c - i_c - g_c - b_c) + q$$

$$B' = B - 2e_B = B - 2\frac{M_B}{N}$$

$$L' = L - 2e_L = L - 2\frac{M_L}{N}$$

Fattore di capacità portante:

Per fondazioni nastriformi:

$$N_c^0 = 2 + \pi \approx 5,14$$

Per fondazioni circolari:

$$N_c^0 = 6,14$$

Fattore di inclinazione del carico:

$$i_c^\circ = 1 - \frac{m|H|}{B'L'c_uN_c}$$

In cui:

$$m = \frac{2 + \frac{B'}{L'}}{1 + \frac{B'}{L'}}$$

$$|H| = \sqrt{H_B^2 + H_L^2}$$

Fattore di forma della fondazione:

$$s_c^\circ = 1 + 0,2\frac{B'}{L'}$$

Fattore di profondità:

$$d_c^\circ = 1 + 0,4\frac{D}{B'} \quad se \ D \leq B'$$

$$d_c^\circ = 1 + 0,4 \arctan\left(\frac{D}{B'}\right) \quad se \ D > B'$$

Fattore di inclinazione della base della fondazione:

Indicando con α l'inclinazione della base della fondazione:

$$b_c^\circ = 1 - \frac{2\alpha}{\pi + 2}$$

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO OM	PROGRESSIVO 722	REV. r00

Fattore di inclinazione del piano campagna:

Indicando con ω l'inclinazione del piano di campagna:

$$g_c^\circ = 1 - \frac{2\omega}{\pi + 2}$$

e

$$t_g^\circ = \frac{1}{2} \gamma B' N_\gamma^\circ s_\gamma^\circ$$

In cui

$$N_\gamma^\circ = -2 \sin \omega$$

$$s_\gamma^\circ = 1 - 0,4 \frac{B'}{L'}$$

5.6 Verifica di stabilità globale

In accordo con le indicazioni del DM 17/01/2018 §6.8.2, le verifiche di sicurezza SLU sono state condotte secondo l'Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R2), in cui A2 sono i coefficienti moltiplicativi delle azioni e M2 e R2 sono i coefficienti riduttivi dei parametri di resistenza dei materiali e della resistenza globale del sistema. Il rapporto tra R_d ed E_d dovrà risultare sempre maggiore o uguale a $\gamma_R = 1,1$ (Tab. 6.8.I NTC2018) in condizioni statiche per assicurare che la verifica di sicurezza richiesta da normativa sia rispettata.

Per le verifiche sismiche si applicano gli stessi criteri ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici (§7.11.1 e §7.11.4 NTC2018) e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a $\gamma_R = 1,2$. (§ 7.11.4 NTC2018).

Per la valutazione della superficie di scorrimento critica (ed in generale di tutte le superfici di scorrimento) è stato utilizzato il metodo di Morgenstern & Price.

Nei metodi pseudostatici l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso W del volume di terreno potenzialmente instabile. Tale forza dipende dalle caratteristiche del moto sismico atteso nel volume di terreno potenzialmente instabile e dalla capacità di tale volume di subire spostamenti senza significative riduzioni di resistenza. Nelle verifiche allo stato limite ultimo, in mancanza di studi specifici, le componenti orizzontale e verticale di tale forza possono esprimersi come:

$$F_h = k_h \cdot W$$

$$F_v = k_v \cdot W$$

con k_h e k_v rispettivamente pari ai coefficienti sismici orizzontale e verticale definiti ai paragrafi 6.1.3 e 6.2.3.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

Per la verifica di stabilità globale in condizioni sismiche, come citato al §7.11.6.3.2 NTC2018: “*Per i muri o le paratie realizzati/e in corrispondenza di versanti o in prossimità di pendii naturali devono essere soddisfatte le condizioni di stabilità del pendio, in presenza della nuova opera, con i metodi di analisi di cui al § 7.11.3.5*”, si farà riferimento al coefficiente β_s relativo alla stabilità dei pendii.

5.7 Interventi di consolidamento dei terreni

Per le tratte più alte del muro è stata prevista l'adozione di pali in calcestruzzo non armato con funzione di miglioramento del terreno e trasferimento dei carichi agli strati più profondi per limitare l'entità dei cedimenti. L'estensione di questo miglioramento è illustrata nell'elaborato [14].

Sulla base delle indagini geotecniche e delle ricostruzioni stratigrafiche disponibili, è stata scelta una profondità pari a 15m per i pali in modo che raggiungano gli strati di base più spessi. In questo modo si mitigano gli effetti della liquefazione dei terreni, e si limitano i cedimenti. I pali hanno un diametro di 1,0 m, disposti con uno schema rettangolare con maglia 5 x 5 m.

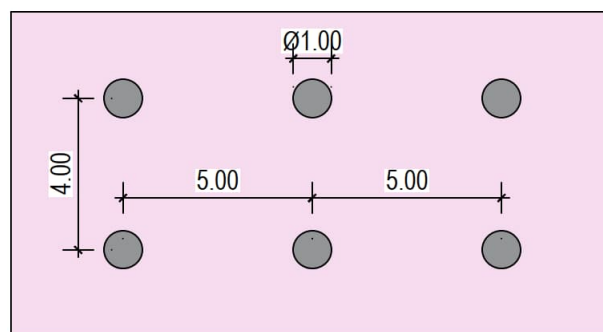


Figura 6: Layout dei pali in calcestruzzo non armato – maglia 5x5

Nella fase successiva della progettazione la disposizione dei pali e in generale la soluzione nella sua complessità potrà essere rivista in base agli esiti delle indagini geotecniche aggiuntive.

Considerando lo schema in Figura 6, i pali occupano un'area di circa il 4% dell'area totale considerata (l'area della fondazione del muro di sostegno). Il modulo equivalente, E_{eq} , è calcolato con l'equazione seguente:

$$E_{eq} = 0,96 \cdot E_{terreno} + 0,04 \cdot E_{palo}$$

Dalla caratterizzazione geotecnica ne deriva un modulo elastico del terreno di 25MPa e, considerando un modulo elastico dei pali non armati pari a 30GPa, si ottiene che il modulo elastico equivalente del sistema terreno-pali sia pari a circa 1,2GPa.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscampa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

6. DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DEL MURO

Vengono analizzate tre tipologie di altezze: 9,8m, 9,1m e 6,2m. Per le geometrie di dettaglio si rimanda all'elaborato 24V25_PF_T_ST_723.

6.1 Analisi dei carichi

I carichi applicati per il dimensionamento dell'opera sono riportati come segue:

- 1) Peso proprio: Il peso proprio delle strutture è stato considerato con un peso dell'unità di volume del c.a. $\gamma_{cls} = 25 \text{ kN/m}^3$.
- 2) Spinta del terreno: In fase statica la struttura è stata analizzata nella condizione di spinta attiva. La spinta esercitata dal terrapieno è stata valutata con il metodo di Coulomb.
- 3) Inclinazione del pendio:
 - a. A monte → Viene considerato un p.c. avente inclinazione coerente con le geometrie del rilevato. Il coefficiente β di inclinazione del pendio andrà ad influenzare il coefficiente di spinta attiva.
 - b. A valle → Viene considerato un p.c. orizzontale.
- 4) Traffico stradale: Viene assunto un carico stradale pari a 20 kPa.
- 5) Spinta della falda: Assente in quanto a monte del muro sono previsti accorgimenti che consentono di drenare l'acqua di falda.
- 6) Incremento di spinta del terreno per l'azione sismica (ΔS_H) calcolato secondo la teoria di Mononobe-Okabe (si veda §5.2) come da formula seguente:

$$\Delta S_E = \left[\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot (k_{aE} - k_a) \right] / H$$

dove:

- o γ rappresenta il peso dell'unità di volume della formazione con la quale l'opera interagisce;
- o H rappresenta l'altezza totale dell'opera;
- o k_{aE} e k_a rappresentano il coefficiente di spinta attiva in condizioni sismiche e statiche rispettivamente.

Come previsto dalla normativa si è posto $k_v = \pm 0,5 \cdot k_h$.

- 7) Forze di inerzia: Le forze di inerzia sismica orizzontali e verticali sono così calcolate (si veda §5.2):

$$F_h = k_h \cdot W$$

$$F_v = \pm k_v \cdot W$$

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO OM	PROGRESSIVO 722	REV. r00

6.1 Schema di calcolo

La geometria del modello di calcolo è schematizzata nella figura seguente.

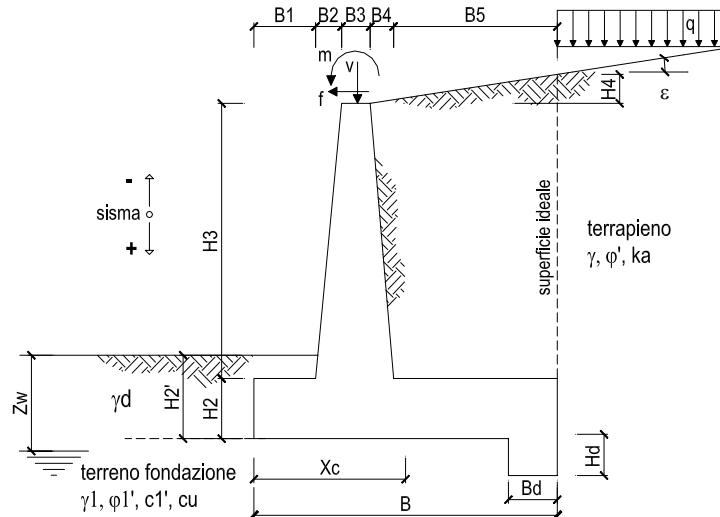


Figura 7: Schema di calcolo (schematico)

Per il terrapieno a tergo del muro si tengono in considerazione i parametri del terreno trattato a calce, ignorando cautelativamente la componente coesiva:

- $\phi' = 30^\circ$
- $c' = 0 \text{ kPa}$
- $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$

Per quanto riguarda il terreno di fondazione è stata utilizzata l'unità geotecnica del rilevato esistente, con le seguenti caratteristiche geotecniche:

- $\phi' = 30^\circ$
- $c' = 3 \text{ kPa}$
- $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$

Il livello medio della falda è a -4 m dal p.c.

I parametri geotecnici adottati nelle analisi variano a seconda della combinazione di riferimento adottata in considerazione della specifica verifica prevista dal D.M. 17/01/2018.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

6.2 Muro A: H=9.8m (Tipo 1)

6.2.1 Geometria del muro

Sono di seguito descritte le principali caratteristiche geometriche della struttura.



DATI DI PROGETTO

Geometria del Muro

Elevazione	H3 =	8,90	(m)
Aggetto Valle	B2 =	0,00	(m)
Spessore del Muro in Testa	B3 =	0,30	(m)
Aggetto monte	B4 =	0,89	(m)

Geometria della Fondazione

Larghezza Fondazione	B =	7,50	(m)
Spessore Fondazione	H2 =	0,90	(m)
Suola Lato Valle	B1 =	2,50	(m)
Suola Lato Monte	B5 =	3,81	(m)
Altezza dente	Hd =	0,00	(m)
Larghezza dente	Bd =	0,00	(m)
Mezzeria Sezione	Xc =	3,75	(m)

Peso Specifico del Calcestruzzo	γ_{cls} =	25,00	(kN/m ³)
---------------------------------	------------------	-------	----------------------

Figura 8: Parametri geometrici del muro H=9.8m

6.2.2 Verifiche SLU/SLV GEO

Di seguito vengono riportati i dati di input e i risultati delle verifiche geotecniche, esplicitate in allegato.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

Dati Geotecnici				valori caratteristici SLE		valori prog. STR/GEO	
Dati Terrapieno	Angolo di attrito del terrapieno	(°)	φ'	30,00		30,00	
	Peso Unità di Volume del terrapieno	(kN/m³)	γ'	19,00		19,00	
	Angolo di attrito terreno-superficie ideale	(°)	δ	20,00		20,00	
Dati Terreno Fondazione	Condizioni			☒ drenate ☐ Non Drenate			
	Coesione Terreno di Fondazione	(kPa)	$c1'$	3,00		3,00	
	Angolo di attrito del Terreno di Fondazione	(°)	$\varphi1'$	30,00		30,00	
	Peso Unità di Volume del Terreno di Fondazione	(kN/m³)	$\gamma1$	18,00		18,00	
	Peso Unità di Volume del Rinterro della Fondazione	(kN/m³)	γd	18,00		18,00	
	Profondità "Significativa" (n.b.: consigliata H = 2*B)	(m)	H_s	15,00			
	Modulo di deformazione	(kN/m²)	E	25000			
Dati Sismici	Accelerazione sismica	a_g/g		0,256	(-)		
	Coefficiente Amplificazione Stratigrafico	S_s		1,324	(-)		
	Coefficiente Amplificazione Topografico	S_T		1	(-)		
	Coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima	β_s		0,38	(-)		
	Coefficiente sismico orizzontale	k_h		0,1287987	(-)		
	Coefficiente sismico verticale	k_v		0,0644	(-)		
	Muro libero di traslare o ruotare			☒ si ☐ no			
Coefficienti di Spinta				SLE	STR/GEO	SLV_rib	
	Coeff. di Spinta Attiva Statico	k_a		0,297	0,297	0,297	
	Coeff. Di Spinta Attiva Sismica sisma +	k_{as+}		0,383	0,383	0,431	
	Coeff. Di Spinta Attiva Sismica sisma -	k_{as-}		0,396	0,396	0,431	
	Coeff. Di Spinta Passiva	k_p		3,000	3,000	3,000	
	Coeff. Di Spinta Passiva Sismica sisma +	k_{ps+}		2,782	2,782	2,676	
	Coeff. Di Spinta Passiva Sismica sisma -	k_{ps-}		2,751	2,751	2,601	
Carichi Agenti				valori caratteristici SLE - sisma		valori di progetto STR/GEO EQU	
Carichi permanenti	Sovraccarico permanente	(kN/m²)	q_p	18,00		23,40	19,80
	Sovraccarico su zattera di monte	(kN/m²)	q_p				
	Forza Orizzontale in Testa permanente	(kN/m)	f_p	0,00		0,00	0,00
	Forza Verticale in Testa permanente	(kN/m)	v_p	1,00		1,00	0,90
	Momento in Testa permanente	(kNm/m)	m_p	0,00		0,00	0,00
Condizioni Statiche	Sovraccarico Accidentale in condizioni statiche	(kN/m²)	q	20,00		30,00	30,00
	Forza Orizzontale in Testa accidentale in condizioni statiche	(kN/m)	f	1,00		1,50	1,50
	Forza Verticale in Testa accidentale in condizioni statiche	(kN/m)	v	0,00		0,00	0,00
	Momento in Testa accidentale in condizioni statiche	(kNm/m)	m	1,20		1,80	1,80
	Coefficienti di combinazione	condizione frequente $\Psi1$		0,50		condizione quasi permanente $\Psi2$	0,30
Condizioni Sismiche	Sovraccarico Accidentale in condizioni sismiche	(kN/m²)	q_s	6,00			
	Forza Orizzontale in Testa accidentale in condizioni sismiche	(kN/m)	f_s	0,00			
	Forza Verticale in Testa accidentale in condizioni sismiche	(kN/m)	v_s	0,00			
	Momento in Testa accidentale in condizioni sismiche	(kNm/m)	m_s	0,00			

Figura 9: Dati di input per le analisi del muro

Tabella 5: Risultati delle verifiche geotecniche

Coefficienti di sicurezza			
	Scorrimento	Ribaltamento	Carico limite
Statico	1,48	3,51	2,16
Sismico	1,21	2,07	1,40

Sono state eseguite le seguenti verifiche geotecniche di stabilità locale del muro:

- Verifica allo scorrimento
- Verifica al ribaltamento

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

- Verifica di capacità portante
- Cedimento della fondazione

6.2.2.1 Verifica allo scorrimento

La verifica allo scorrimento sul piano di posa della fondazione è condotta rispetto alla combinazione di SLU del gruppo A1+M1+R3 in condizione statica e sismica.

Si rimanda al §5.5.1 per l'approccio progettuale.

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione statica.

<u>VERIFICA ALLO SCORRIMENTO (STR/GEO)</u>				
Risultante forze verticali (N)				
N	=	$P_m + P_t + v + S_{tv} + S_{qv \text{ perm}} + S_{qv \text{ acc}}$	1228,86	(kN/m)
Risultante forze orizzontali (T)				
T	=	$S_{th} + S_{qh} + f$	479,08	(kN/m)
Coefficiente di attrito alla base (f)				
f	=	$\tan \phi_1'$	0,58	(-)
Fs scorr.		$(N \cdot f + S_p) / T$	1,48	> 1,1

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV+).

<u>VERIFICA ALLO SCORRIMENTO</u>				
Risultante forze verticali (N)				
N	=	$P_m + P_t + v_p + v_s + S_{st1v} + S_{sq1v} + P_s v + P_{tsv}$	1134,77	(kN/m)
Risultante forze orizzontali (T)				
T	=	$S_{st1h} + S_{sq1h} + f_p + f_s + P_s h + P_{tsh}$	541,32	(kN/m)
Coefficiente di attrito alla base (f)				
f	=	$\tan \phi_1'$	0,58	(-)
Fs	=	$(N \cdot f + S_p) / T$	1,2	> 1,00

Le verifiche risultano soddisfatte.

6.2.2.2 Verifica al ribaltamento

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione statica.

<u>VERIFICA AL RIBALTAMENTO (STR/GEO)</u>				
Momento stabilizzante (Ms)				
Ms	=	$M_m + M_t + M_{fext3} + M_{St2} + M_{Sq2}$	5618,72	(kNm/m)
Momento ribaltante (Mr)				
Mr	=	$M_{St1} + M_{Sq1} + M_{fext1} + M_{fext2} + M_{Sp}$	1600,57	(kNm/m)
Fs ribaltamento		Ms / Mr	3,51	> 1,15

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV+).

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscampa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

VERIFICA AL RIBALTAMENTO

Momento stabilizzante (Ms)

$$M_s = M_m + M_t + M_{fext3} + M_{Sst2} + M_{Ssq2} + M_{Psv} + M_{Pstv} = 6149,74 \text{ (kNm/m)}$$

Momento ribaltante (Mr)

$$M_r = M_{Sst1} + M_{Ssq1} + M_{fext1} + M_{fext2} + M_{Sp} + M_{Psh} + M_{Ptsh} = 2965,51 \text{ (kNm/m)}$$

$$Fr = Ms / Mr$$

2,07	>	1,00
-------------	-------------	-------------

Le verifiche risultano soddisfatte.

6.2.2.3 Verifica di capacità portante (carico limite fondazioni dirette)

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione statica.

Formula Generale per il Calcolo del Carico Limite Unitario (Brinch-Hansen, 1970)

Fondazione Nastriforme

$$q_{lim} = c'N_c i_c + q_0 N_q i_q + 0,5 \gamma_1 B N_\gamma i_\gamma$$

c1'	coesione terreno di fondaz.	3,00		(kPa)
$\phi 1'$	angolo di attrito terreno di fondaz.	30,00		(°)
γ_1	peso unità di volume terreno fondaz.	12,13		(kN/m ³)
$\theta_0 = \gamma d' H_2'$	sovraccarico stabilizzante	16,20		(kN/m ²)
e = M / N	eccentricità	0,11	-0,04	(m)
B* = B - 2e	larghezza equivalente	7,27	7,42	(m)

I valori di Nc, Nq e Ng sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)

$N_q = \tan^2(45 + \phi'/2) e^{(\pi \tan(\phi'))}$	(1 in cond. nd)	18,40		(-)
$N_c = (N_q - 1) / \tan(\phi')$	(2+ π in cond. nd)	30,14		(-)
$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan(\phi')$	(0 in cond. nd)	22,40		(-)

I valori di ic, iq e i γ sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)

$i_q = (1 - T / (N + B^* c' \cot(\phi')))^m$	(1 in cond. nd)	0,39	0,44	(-)
$i_c = i_q - (1 - i_q) / (N_q - 1)$		0,35	0,35	(-)
$i_\gamma = (1 - T / (N + B^* c' \cot(\phi')))^{m+1}$		0,24	0,24	(-)

(fondazione nastriforme m = 2)

q _{lim}	(carico limite unitario)	384,53	399,34	(kN/m ²)
------------------	--------------------------	--------	--------	----------------------

FS carico limite

$$F = q_{lim} \cdot B^* / N$$

N _{min}	2,3	>	1,4
N _{max}	2,2	>	

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscampa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV+).

VERIFICA A CARICO LIMITE DELLA FONDAZIONE				
Risultante forze verticali (N)		Nmin	Nmax	
N	= Pm+ Pt + vp + vs + Sst1v + Ssq1v + Ps v + Ptsv + (Sovr acc)	1280,75	1308,95	(kN/m)
Risultante forze orizzontali (T)				
T	= Sst1h + Ssq1h + fp + fs +Ps h + Pts h - Sp	569,41		(kN/m)
Risultante dei momenti rispetto al piede di valle (MM)				
MM	= ΣM	4316,88	4462,11	(kNm/m)
Momento rispetto al baricentro della fondazione (M)				
M	= Xc*N - MM	485,92	446,44	(kNm/m)
Formula Generale per il Calcolo del Carico Limite Unitario (Brinch-Hansen, 1970)				
Fondazione Nastriforme				
qlim = c*Nc*ic + qo*Nq*iq + 0,5*γ1*B*Nγ*iy				
c1'	coesione terreno di fondaz.	3,00		(kN/mq)
φ 1'	angolo di attrito terreno di fondaz.	30,00		(°)
γ1	peso unità di volume terreno fondaz.	12,13		(kN/m³)
θo =γd*H2'	sovraccarico stabilizzante	16,20		(kN/m²)
e = M / N	eccentricità	0,38	0,34	(m)
B*= B - 2e	larghezza equivalente	6,74	6,82	(m)
I valori di Nc, Nq e Ng sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)				
Nq = tg²(45 + φ'/2)*e ^{(π*tg(φ'))}	(1 in cond. nd)	18,40		(-)
Nc = (Nq - 1)/tg(φ')	(2+π in cond. nd)	30,14		(-)
Nγ = 2*(Nq + 1)*tg(φ')	(0 in cond. nd)	22,40		(-)
I valori di ic, iq e iy sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)				
iq = (1 - T/(N + B*c'cotgφ')) ^m	(1 in cond. nd)	0,32	0,33	(-)
ic = iq - (1 - iq)/(Nq - 1)		0,28	0,29	(-)
iy = (1 - T/(N + B*c'cotgφ')) ^{m+1}		0,18	0,18	(-)
(fondazione nastriforme m = 2)				
qlim	(carico limite unitario)	288,71	294,87	(kN/m²)
FS carico limite		F = qlim*B*/ N		
		Nmin	1,5	>
		Nmax	1,5	>
		1,2		

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV-).

VERIFICA A CARICO LIMITE DELLA FONDAZIONE				
Risultante forze verticali (N)				
N	=	Pm+ Pt + vp + vs + Sst1v + Ssq1v + Ps v + Ptsv	Nmin 1134,77	Nmax 1162,97 (kN/m)
Risultante forze orizzontali (T)				
T	=	Sst1h + Ssq1h + fp + fs +Ps h + Ptsh - Sp	541,32	(kN/m)
Risultante dei momenti rispetto al piede di valle (MM)				
MM	=	ΣM	3678,83	3824,06 (kNm/m)
Momento rispetto al baricentro della fondazione (M)				
M	=	Xc*N - MM	576,54	537,06 (kNm/m)
Formula Generale per il Calcolo del Carico Limite Unitario (Brinch-Hansen, 1970)				
Fondazione Nastriforme				
$q_{lim} = c'N_c i_c + q_0 N_q i_q + 0,5 \gamma_1 B N_\gamma i_\gamma$				
c1'	coesione terreno di fondaz.		3,00	(kN/mq)
φ1'	angolo di attrito terreno di fondaz.		30,00	(°)
γ1	peso unità di volume terreno fondaz.		12,13	(kN/m³)
q0 = γd'H2'	sovraccarico stabilizzante		16,20	(kN/m²)
e = M / N	eccentricità		0,51	0,46 (m)
B* = B - 2e	larghezza equivalente		6,48	6,58 (m)
I valori di Nc, Nq e Ng sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)				
Nq = tg ² (45 + φ'/2) * e ^{(π*tg(φ'))}	(1 in cond. nd)		18,40	(-)
Nc = (Nq - 1)/tg(φ')	(2+π in cond. nd)		30,14	(-)
Nγ = 2*(Nq + 1)*tg(φ')	(0 in cond. nd)		22,40	(-)
I valori di ic, iq e iγ sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)				
iq = (1 - T/(N + B*c'*cotgφ')) ^m	(1 in cond. nd)		0,29	0,30 (-)
ic = iq - (1 - iq)/(Nq - 1)			0,25	0,26 (-)
iγ = (1 - T/(N + B*c'*cotgφ')) ^{m+1}			0,15	0,15 (-)
(fondazione nastriforme m = 2)				
q _{lim}	(carico limite unitario)		244,47	251,30 (kN/m²)
FS carico limite		F = q_{lim}*B*/ N		
			Nmin	1,4
			Nmax	1,4
				>
				1,2

Le verifiche risultano soddisfatte.

6.2.2.4 Cedimento della fondazione

Il cedimento della fondazione è stato valutato per le condizioni di esercizio come segue, considerando il contributo dei pali nell'incremento delle caratteristiche meccaniche del terreno.

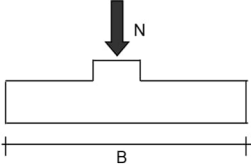
STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

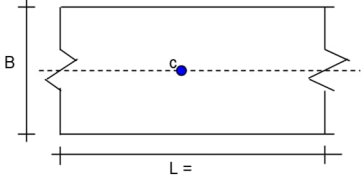


Cedimenti
Fondazioni nastriformi

Input

Output





LAVORO

Formulazione Teorica (H.G. Poulos, E.H. Davis; 1974)

$$\Delta\sigma_{zi} = (2q/\pi) * (\alpha + \sin\alpha \cos\alpha)$$

$$\Delta\sigma_{xi} = (2q/\pi) * (\alpha - \sin\alpha \cos\alpha)$$

$$\Delta\sigma_{yi} = (4q/\pi) * (v\alpha)$$

$$\alpha = \tan^{-1}((B/2)/z)$$

$$\delta_{tot} = \sum \delta_i = \sum (((\Delta\sigma_{zi} - v_i(\Delta\sigma_{xi} + \Delta\sigma_{yi})) \Delta z_i / E_i)$$

DATI DI INPUT

B =	7.50	(m)	(Larghezza della Fondazione)
N =	1223.0	(kN)	(Carico Verticale Agente)
z _w =	4.0	(m)	(profondità della falda)
γ _t =	18	(kN)	(peso di volume medio del terreno)
φ _m =	30	(°)	(angolo d'attrito)
D =	0.9	(m)	(approfondimento fondazione)
Δσ _m /σ _{mo} =	10	(%)	(sovrappressione max)

q =	163.07	(kN/mq)	(Pressione Agente (q = N/B))
ns =	4	(-)	(numero strati) (massimo 6)

Strato	Litologia	Spessore	da	zi	a	zi+1	Δzi	E	v	δci
(-)	(-)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(kN/m ²)	(-)	(cm)
1	Pali	15.00	0.0	15.0	1.0	1200000	0.30	0.10		
2	Sabbia e sabbia limosa	2.00	15.0	17.0	1.0	25000	0.30	0.34		
3	Sabbia e ghiaia	1.00	17.0	18.0	1.0	30000	0.30	0.13		
4	Limo argilloso ed argilla limosa	7.00	18.0	25.0	1.0	25000	0.30	0.55		
-			0.0	0.0				-		
-			0.0	0.0				-		

δ_{ctot} = 1.12 (cm)

6.2.2.5 Incidenza dell'opera

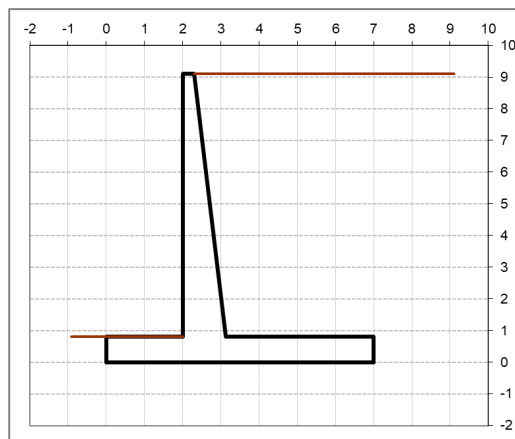
L'incidenza del paramento verticale del muro è pari a 145 kg/m³, quella della fondazione è pari a 120 kg/m³.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

6.3 Muro B: H=9.1m (Tipo 2)

6.3.1 Geometria del muro

Sono di seguito descritte le principali caratteristiche geometriche della struttura.



DATI DI PROGETTO

Geometria del Muro

Elevazione	H3 =	8,30	(m)
Aggetto Valle	B2 =	0,00	(m)
Spessore del Muro in Testa	B3 =	0,30	(m)
Aggetto monte	B4 =	0,83	(m)

Geometria della Fondazione

Larghezza Fondazione	B =	7,00	(m)
Spessore Fondazione	H2 =	0,80	(m)
Suola Lato Valle	B1 =	2,00	(m)
Suola Lato Monte	B5 =	3,87	(m)
Altezza dente	Hd =	0,00	(m)
Larghezza dente	Bd =	0,00	(m)
Mezzeria Sezione	Xc =	3,50	(m)

Peso Specifico del Calcestruzzo	γ_{cls} =	25,00	(kN/m ³)
---------------------------------	------------------	-------	----------------------

Figura 10: Parametri geometrici del muro

6.3.2 Verifiche SLU/SLV GEO

Di seguito vengono riportati i dati di input e i risultati delle verifiche geotecniche, esplicitate in allegato.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

Dati Geotecnici				valori caratteristici SLE		valori prog. STR/GEO	
Dati Terrapieno	Angolo di attrito del terrapieno	(°)	φ'	30,00		30,00	
	Peso Unità di Volume del terrapieno	(kN/m³)	γ'	19,00		19,00	
	Angolo di attrito terreno-superficie ideale	(°)	δ	20,00		20,00	
Dati Terreno Fondazione	Condizioni			☒ drenate ☐ Non Drenate			
	Coesione Terreno di Fondazione	(kPa)	$c1'$	3,00		3,00	
	Angolo di attrito del Terreno di Fondazione	(°)	$\varphi1'$	30,00		30,00	
	Peso Unità di Volume del Terreno di Fondazione	(kN/m³)	$\gamma1$	18,00		18,00	
	Peso Unità di Volume del Rinterro della Fondazione	(kN/m³)	γd	18,00		18,00	
	Profondità "Significativa" (n.b.: consigliata H = 2*B)	(m)	H_s	13,00			
	Modulo di deformazione	(kN/m²)	E	25000			
Dati Sismici	Accelerazione sismica	a_g/g		0,256	(-)		
	Coefficiente Amplificazione Stratigrafico	S_s		1,324	(-)		
	Coefficiente Amplificazione Topografico	S_T		1	(-)		
	Coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima	β_s		0,38	(-)		
	Coefficiente sismico orizzontale	k_h		0,1287987	(-)		
	Coefficiente sismico verticale	k_v		0,0644	(-)		
	Muro libero di traslare o ruotare			☒ si ☐ no			
Coefficienti di Spinta				SLE	STR/GEO	SLV_rib	
	Coeff. di Spinta Attiva Statico	k_a		0,297	0,297	0,297	
	Coeff. Di Spinta Attiva Sismica sisma +	k_{as+}		0,383	0,383	0,431	
	Coeff. Di Spinta Attiva Sismica sisma -	k_{as-}		0,396	0,396	0,431	
	Coeff. Di Spinta Passiva	k_p		3,000	3,000	3,000	
	Coeff. Di Spinta Passiva Sismica sisma +	k_{ps+}		2,782	2,782	2,676	
	Coeff. Di Spinta Passiva Sismica sisma -	k_{ps-}		2,751	2,751	2,601	
Carichi Agenti				valori caratteristici SLE - sisma		valori di progetto STR/GEO EQU	
Carichi permanenti	Sovraccarico permanente	(kN/m²)	q_p	18,00		23,40	19,80
	Sovraccarico su zattera di monte						
	Forza Orizzontale in Testa permanente	n (kN/m)	f_p	0,00		0,00	0,00
	Forza Verticale in Testa permanente	(kN/m)	v_p	1,00		1,00	0,90
	Momento in Testa permanente	(kNm/m)	m_p	0,00		0,00	0,00
Condizioni Statiche	Sovraccarico Accidentale in condizioni statiche	(kN/m²)	q	20,00		30,00	30,00
	Forza Orizzontale in Testa accidentale in condizioni statiche	(kN/m)	f	1,00		1,50	1,50
	Forza Verticale in Testa accidentale in condizioni statiche	(kN/m)	v	0,00		0,00	0,00
	Momento in Testa accidentale in condizioni statiche	(kNm/m)	m	1,20		1,80	1,80
	Coefficienti di combinazione	condizione frequente $\Psi1$	0,50	condizione quasi permanente $\Psi2$			0,30
Condizioni Sismiche	Sovraccarico Accidentale in condizioni sismiche	(kN/m²)	q_s	6,00			
	Forza Orizzontale in Testa accidentale in condizioni sismiche	(kN/m)	f_s	0,00			
	Forza Verticale in Testa accidentale in condizioni sismiche	(kN/m)	v_s	0,00			
	Momento in Testa accidentale in condizioni sismiche	(kNm/m)	m_s	0,00			

Figura 11: Dati di input per le analisi del muro

Tabella 6: Risultati delle verifiche geotecniche

Coefficienti di sicurezza			
	Scorrimento	Ribaltamento	Carico limite
Statico	1,53	3,51	2,14
Sismico	1,24	2,06	1,37

Sono state eseguite le seguenti verifiche geotecniche di stabilità locale del muro:

- Verifica allo scorrimento
- Verifica al ribaltamento

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

- Verifica di capacità portante
- Cedimento della fondazione

6.3.2.1 Verifica allo scorrimento

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione statica.

VERIFICA ALLO SCORRIMENTO (STR/GEO)				
Risultante forze verticali (N)				
N	=	$P_m + P_t + v + S_{tv} + S_{qv} \text{ perm} + S_{qv} \text{ acc}$	1118,52	(kN/m)
Risultante forze orizzontali (T)				
T	=	$S_{th} + S_{qh} + f$	422,99	(kN/m)
Coefficiente di attrito alla base (f)				
f	=	$\tan \phi'$	0,58	(-)
Fs scorr.		$(N \cdot f + S_p) / T$	1,53	> 1,1

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV+).

VERIFICA ALLO SCORRIMENTO				
Risultante forze verticali (N)				
N	=	$P_m + P_t + v_p + v_s + S_{st1v} + S_{sq1v} + P_s v + P_{tsv}$	1165,33	(kN/m)
Risultante forze orizzontali (T)				
T	=	$S_{st1h} + S_{sq1h} + f_p + f_s + P_s h + P_{tsh}$	503,70	(kN/m)
Coefficiente di attrito alla base (f)				
f	=	$\tan \phi'$	0,58	(-)
Fs	=	$(N \cdot f + S_p) / T$	1,3	> 1,00

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV-).

VERIFICA ALLO SCORRIMENTO				
Risultante forze verticali (N)				
N	=	$P_m + P_t + v_p + v_s + S_{st1v} + S_{sq1v} + P_s v + P_{tsv}$	1032,41	(kN/m)
Risultante forze orizzontali (T)				
T	=	$S_{st1h} + S_{sq1h} + f_p + f_s + P_s h + P_{tsh}$	479,68	(kN/m)
Coefficiente di attrito alla base (f)				
f	=	$\tan \phi'$	0,58	(-)
Fs	=	$(N \cdot f + S_p) / T$	1,2	> 1,00

Le verifiche risultano soddisfatte.

6.3.2.2 Verifica al ribaltamento

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione statica.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscampa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

<u>VERIFICA AL RIBALTAMENTO (STR/GEO)</u>			
Momento stabilizzante (Ms)			
Ms	=	Mm + Mt + Mfext3 + MSst2 + MSsq2	4651,75 (kNm/m)
Momento ribaltante (Mr)			
Mr	=	MSst1 + MSsq1 + Mfext1+ Mfext2 + MSp	1324,90 (kNm/m)
Fs	ribaltamento	Ms / Mr	3,51 > 1,15

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV+).

<u>VERIFICA AL RIBALTAMENTO</u>			
Momento stabilizzante (Ms)			
Ms	=	Mm + Mt + Mfext3 + MSst2 + MSsq2 + MPsv + MPstv	5643,50 (kNm/m)
Momento ribaltante (Mr)			
Mr	=	MSst1+MSsq1+Mfext1+Mfext2+MSp+MPsh+MPtsh	2255,01 (kNm/m)
Fr	=	Ms / Mr	2,50 > 1,00

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV-).

<u>VERIFICA AL RIBALTAMENTO</u>			
Momento stabilizzante (Ms)			
Ms	=	Mm + Mt + Mfext3 + MSst2 + MSsq2 + MPsv + MPstv	5084,03 (kNm/m)
Momento ribaltante (Mr)			
Mr	=	MSst1+MSsq1+Mfext1+Mfext2+MSp+MPsh+MPtsh	2471,09 (kNm/m)
Fr	=	Ms / Mr	2,06 > 1,00

Le verifiche risultano soddisfatte.

6.3.2.3 Verifica di capacità portante (carico limite fondazioni dirette)

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione statica.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO OM	PROGRESSIVO 722	REV. r00

Formula Generale per il Calcolo del Carico Limite Unitario (Brinch-Hansen, 1970)					
Fondazione Nastriforme					
$q_{lim} = c \cdot N_c \cdot i_c + q_0 \cdot N_q \cdot i_q + 0,5 \cdot \gamma \cdot 1 \cdot B \cdot N_{\gamma} \cdot i_{\gamma}$					
c1'	coesione terreno di fondaz.	3,00		(kPa)	
$\phi 1'$	angolo di attrito terreno di fondaz.	30,00		(°)	
γ_1	peso unità di volume terreno fondaz.	12,57		(kN/m ³)	
$\theta_0 = \gamma d^2 H^2$	sovraccarico stabilizzante	14,40		(kN/m ²)	
e = M / N	eccentricità	0,19	0,04	(m)	
B* = B - 2e	larghezza equivalente	6,62	6,92	(m)	
I valori di Nc, Nq e Ng sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)					
$N_q = tg^2(45 + \phi/2) \cdot e^{(\pi \cdot tg(\phi))}$	(1 in cond. nd)	18,40		(-)	
$N_c = (N_q - 1) / tg(\phi)$	(2+π in cond. nd)	30,14		(-)	
$N_{\gamma} = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot tg(\phi)$	(0 in cond. nd)	22,40		(-)	
I valori di ic, iq e iγ sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)					
$i_q = (1 - T / (N + B \cdot c \cdot cotg(\phi)))^m$	(1 in cond. nd)	0,40	0,45	(-)	
$i_c = i_q - (1 - i_q) / (N_q - 1)$		0,37	0,37	(-)	
$i_{\gamma} = (1 - T / (N + B \cdot c \cdot cotg(\phi)))^{m+1}$		0,25	0,25	(-)	
(fondazione nastriforme m = 2)					
q _{lim}	(carico limite unitario)	375,73	390,27	(kN/m ²)	
FS carico limite		F = q_{lim} · B* / N			
		Nmin	2,2	>	1,4
		Nmax	2,1	>	

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV+).

VERIFICA A CARICO LIMITE DELLA FONDAZIONE					
Risultante forze verticali (N)					
N	=	Pm+ Pt + vp + vs + Sst1v + Ssq1v + Ps v + Ptsv + (Sovr acc)	Nmin	Nmax	(kN/m)
			1165,33	1193,53	
Risultante forze orizzontali (T)					
T	=	Sst1h + Ssq1h + fp + fs +Ps h + Pts h - Sp	503,70		(kN/m)
Risultante dei momenti rispetto al piede di valle (MM)					
MM	=	Σ M	3561,96	3693,09	(kNm/m)
Momento rispetto al baricentro della fondazione (M)					
M	=	Xc · N - MM	516,70	484,27	(kNm/m)
Formula Generale per il Calcolo del Carico Limite Unitario (Brinch-Hansen, 1970)					
Fondazione Nastriforme					
$q_{lim} = c \cdot N_c \cdot i_c + q_0 \cdot N_q \cdot i_q + 0,5 \cdot \gamma \cdot 1 \cdot B \cdot N_{\gamma} \cdot i_{\gamma}$					
c1'	coesione terreno di fondaz.	3,00		(kN/mq)	
$\phi 1'$	angolo di attrito terreno di fondaz.	30,00		(°)	
γ_1	peso unità di volume terreno fondaz.	12,57		(kN/m ³)	
$\theta_0 = \gamma d^2 H^2$	sovraccarico stabilizzante	14,40		(kN/m ²)	
e = M / N	eccentricità	0,44	0,41	(m)	
B* = B - 2e	larghezza equivalente	6,11	6,19	(m)	
I valori di Nc, Nq e Ng sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)					
$N_q = tg^2(45 + \phi/2) \cdot e^{(\pi \cdot tg(\phi))}$	(1 in cond. nd)	18,40		(-)	
$N_c = (N_q - 1) / tg(\phi)$	(2+π in cond. nd)	30,14		(-)	
$N_{\gamma} = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot tg(\phi)$	(0 in cond. nd)	22,40		(-)	
I valori di ic, iq e iγ sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)					
$i_q = (1 - T / (N + B \cdot c \cdot cotg(\phi)))^m$	(1 in cond. nd)	0,34	0,35	(-)	
$i_c = i_q - (1 - i_q) / (N_q - 1)$		0,30	0,31	(-)	
$i_{\gamma} = (1 - T / (N + B \cdot c \cdot cotg(\phi)))^{m+1}$		0,19	0,19	(-)	
(fondazione nastriforme m = 2)					
q _{lim}	(carico limite unitario)	283,08	289,40	(kN/m ²)	
FS carico limite		F = q_{lim} · B* / N			
		Nmin	1,5	>	1,2
		Nmax	1,5	>	

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV-).

VERIFICA A CARICO LIMITE DELLA FONDAZIONE				
Risultante forze verticali (N)				
N	=	$P_m + P_t + v_p + v_s + S_{st1v} + S_{sq1v} + P_s v + P_{tsv}$	Nmin 1032,41	Nmax 1060,61 (kN/m)
Risultante forze orizzontali (T)				
T	=	$S_{st1h} + S_{sq1h} + f_p + f_s + P_s h + P_{tsh} - S_p$	479,68	(kN/m)
Risultante dei momenti rispetto al piede di valle (MM)				
MM	=	$\sum M$	3032,36	3163,49 (kNm/m)
Momento rispetto al baricentro della fondazione (M)				
M	=	$X_c \cdot N - MM$	581,08	548,65 (kNm/m)
Formula Generale per il Calcolo del Carico Limite Unitario (Brinch-Hansen, 1970)				
Fondazione Nastriforme				
$q_{lim} = c'N_c \cdot i_c + q_0 \cdot N_q \cdot i_q + 0,5 \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot N_\gamma \cdot i_\gamma$				
c1'	coesione terreno di fondaz.		3,00	(kN/mq)
$\phi 1'$	angolo di attrito terreno di fondaz.		30,00	(°)
γ_1	peso unità di volume terreno fondaz.		12,57	(kN/m ³)
$q_0 = \gamma_d \cdot H_2'$	sovraccarico stabilizzante		14,40	(kN/m ²)
e = M / N	eccentricità		0,56	0,52 (m)
B* = B - 2e	larghezza equivalente		5,87	5,97 (m)
I valori di Nc, Nq e Ng sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)				
$N_q = \tan^2(45 + \phi'/2) \cdot e^{(\pi \cdot \tan(\phi'))}$	(1 in cond. nd)		18,40	(-)
$N_c = (N_q - 1) / \tan(\phi')$	(2+ π in cond. nd)		30,14	(-)
$N_\gamma = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan(\phi')$	(0 in cond. nd)		22,40	(-)
I valori di ic, iq e i γ sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)				
$i_q = (1 - T / (N + B \cdot c' \cot \phi'))^m$	(1 in cond. nd)		0,30	0,31 (-)
$i_c = i_q - (1 - i_q) / (N_q - 1)$			0,26	0,27 (-)
$i_\gamma = (1 - T / (N + B \cdot c' \cot \phi'))^{m+1}$			0,17	0,17 (-)
(fondazione nastriforme m = 2)				
q _{lim}	(carico limite unitario)		240,04	247,06 (kN/m ²)
FS carico limite		F = q_{lim} · B* / N		
		Nmin	1,4	>
		Nmax	1,4	>
				1,2

Le verifiche risultano soddisfatte.

6.3.2.4 Cedimento della fondazione

Il cedimento della fondazione è stato valutato per le condizioni di esercizio come segue, considerando il contributo dei pali nell'incremento delle caratteristiche meccaniche del terreno.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscampa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

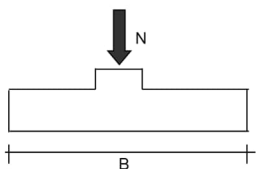
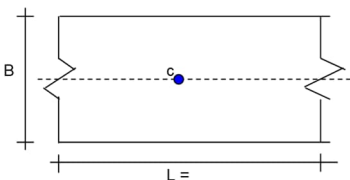


Cedimenti
Fondazioni nastriformi

Input

Output

LAVORO

Formulazione Teorica (H.G. Poulos, E.H. Davis; 1974)

$\Delta\sigma_{zi} = (2q/\pi) * (\alpha + \text{sen}\alpha\cos\alpha)$
 $\Delta\sigma_{xi} = (2q/\pi) * (\alpha - \text{sen}\alpha\cos\alpha)$
 $\Delta\sigma_{yi} = (4q/\pi) * (v\alpha)$
 $\alpha = \tan^{-1}((B/2)/z)$
 $\delta_{tot} = \sum \delta_i = \sum (((\Delta\sigma_{zi} - v_i(\Delta\sigma_{xi} + \Delta\sigma_{yi}))\Delta z_i / E_i)$

DATI DI INPUT

B =	7,00	(m)	(Larghezza della Fondazione)
N =	1118,0	(kN)	(Carico Verticale Agente)
z _w =	4,0	(m)	(profondità della falda)
γ _t =	18	(kN)	(peso di volume medio del terreno)
φ _m =	30	(°)	(angolo d'attrito)
D =	0,8	(m)	(approfondimento fondazione)
Δσ _{mf} /σ _{mo} =	10	(%)	(sovrappressione max)
q =	159,71	(kN/mq)	(Pressione Agente (q = N/B)
ns =	4	(-)	(numero strati) (massimo 6)

Strato	Litologia	Spessore	da	zi	a	zi+1	Δzi	E	v	δci
(-)	(-)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(kN/m ²)	(-)	(cm)
1	Pali	15,00	0,0	15,0	1,0	1200000	0,30	0,10		
2	Sabbia e sabbia limosa	2,00	15,0	17,0	1,0	30000	0,30	0,26		
3	Sabbia e ghiaia	1,00	17,0	18,0	1,0	25000	0,30	0,14		
4	Limo argilloso ed argilla limosa	7,00	18,0	25,0	1,0	25000	0,30	0,39		
-			0,0	0,0				-		
-			0,0	0,0				-		

δ_{ctot} = 0,89 (cm)

6.3.2.5 Incidenza dell'opera

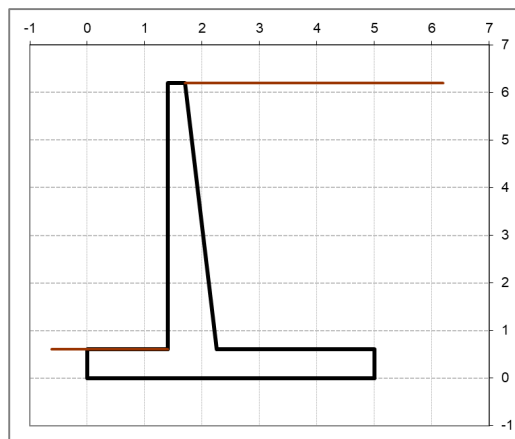
L'incidenza del paramento verticale del muro è pari a 135 kg/m³, quella della fondazione è pari a 110 kg/m³.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

6.4 Muro C: H=6.2m (Tipo 3)

6.4.1 Geometria del muro

Sono di seguito descritte le principali caratteristiche geometriche della struttura.



DATI DI PROGETTO

Geometria del Muro

Elevazione	H3 =	5,60	(m)
Aggetto Valle	B2 =	0,00	(m)
Spessore del Muro in Testa	B3 =	0,30	(m)
Aggetto monte	B4 =	0,56	(m)

Geometria della Fondazione

Larghezza Fondazione	B =	5,00	(m)
Spessore Fondazione	H2 =	0,60	(m)
Suola Lato Valle	B1 =	1,40	(m)
Suola Lato Monte	B5 =	2,74	(m)
Altezza dente	Hd =	0,00	(m)
Larghezza dente	Bd =	0,00	(m)
Mezzeria Sezione	Xc =	2,50	(m)

Peso Specifico del Calcestruzzo	γ_{cls} =	25,00	(kN/m ³)
---------------------------------	------------------	-------	----------------------

Figura 12: Parametri geometrici del muro

6.4.2 Verifiche SLU/SLV GEO

Di seguito vengono riportati i dati di input e i risultati delle verifiche geotecniche, esplicitate in allegato.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

Dati Geotecnici				valori caratteristici SLE		valori prog. STR/GEO	
Dati Terrapieno	Angolo di attrito del terrapieno	(°)	φ'	30,00		30,00	
	Peso Unità di Volume del terrapieno	(kN/m³)	γ'	19,00		19,00	
	Angolo di attrito terreno-superficie ideale	(°)	δ	20,00		20,00	
Dati Terreno Fondazione	Condizioni			☒ drenate ☐ Non Drenate			
	Coesione Terreno di Fondazione	(kPa)	c1'	3,00		3,00	
	Angolo di attrito del Terreno di Fondazione	(°)	φ1'	30,00		30,00	
	Peso Unità di Volume del Terreno di Fondazione	(kN/m³)	γ1	18,00		18,00	
	Peso Unità di Volume del Rinterro della Fondazione	(kN/m³)	γd	18,00		18,00	
	Profondità "Significativa" (n.b.: consigliata H = 2*B)	(m)	Hs	10,00			
	Modulo di deformazione	(kN/m²)	E	25000			
Dati Sismici	Accelerazione sismica	ag/g	0,256		(-)		
	Coefficiente Amplificazione Stratigrafico	Ss	1,324		(-)		
	Coefficiente Amplificazione Topografico	ST	1		(-)		
	Coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima	βs	0,38		(-)		
	Coefficiente sismico orizzontale	kh	0,1287987		(-)		
	Coefficiente sismico verticale	kv	0,0644		(-)		
	Muro libero di traslare o ruotare			☒ si ☐ no			
				SLE	STR/GEO	SLV_rib	
Coefficienti di Spinta	Coeff. di Spinta Attiva Statico	ka	0,297	0,297	0,297		
	Coeff. Di Spinta Attiva Sismica sisma +	kas+	0,383	0,383	0,431		
	Coeff. Di Spinta Attiva Sismica sisma -	kas-	0,396	0,396	0,431		
	Coeff. Di Spinta Passiva	kp	3,000	3,000	3,000		
	Coeff. Di Spinta Passiva Sismica sisma +	kps+	2,782	2,782	2,676		
	Coeff. Di Spinta Passiva Sismica sisma -	kps-	2,751	2,751	2,601		
Carichi Agenti				valori caratteristici SLE - sisma		valori di progetto STR/GEO EQU	
Carichi permanenti	Sovraccarico permanente	(kN/m²)	qp	18,00		23,40	19,80
	Sovraccarico su zattera di monte	(kN/m²)	qp				
	Forza Orizzontale in Testa permanente ☐ si	n (kN/m)	fp	0,00		0,00	0,00
	Forza Verticale in Testa permanente	(kN/m)	vp	1,00		1,00	0,90
	Momento in Testa permanente	(kNm/m)	mp	0,00		0,00	0,00
Condizioni Statiche	Sovraccarico Accidentale in condizioni statiche	(kN/m²)	q	20,00		30,00	30,00
	Forza Orizzontale in Testa accidentale in condizioni statiche	(kN/m)	f	1,00		1,50	1,50
	Forza Verticale in Testa accidentale in condizioni statiche	(kN/m)	v	0,00		0,00	0,00
	Momento in Testa accidentale in condizioni statiche	(kNm/m)	m	1,20		1,80	1,80
	Coefficienti di combinazione	condizione frequente Ψ1	0,50	condizione quasi permanente Ψ2			0,30
	Condizioni Sismiche	Sovraccarico Accidentale in condizioni sismiche	(kN/m²)	qs	6,00		
Forza Orizzontale in Testa accidentale in condizioni sismiche		(kN/m)	fs	0,00			
Forza Verticale in Testa accidentale in condizioni sismiche		(kN/m)	vs	0,00			
Momento in Testa accidentale in condizioni sismiche		(kNm/m)	ms	0,00			

Figura 13: Dati di input per le analisi del muro

Tabella 7: Risultati delle verifiche geotecniche

Coefficienti di sicurezza			
	<i>Scorrimento</i>	<i>Ribaltamento</i>	<i>Carico limite</i>
<i>Statico</i>	1,43	3,26	2,19
<i>Sismico</i>	1,22	2,07	1,57

Sono state eseguite le seguenti verifiche geotecniche di stabilità locale del muro:

- Verifica allo scorrimento
- Verifica al ribaltamento

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

- Verifica di capacità portante
- Cedimento della fondazione

6.4.2.1 Verifica allo scorrimento

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione statica.

<u>VERIFICA ALLO SCORRIMENTO (STR/GEO)</u>				
Risultante forze verticali (N)				
N	=	$P_m + P_t + v + S_{tv} + S_{qv} \text{ perm} + S_{qv} \text{ acc}$	560,47	(kN/m)
Risultante forze orizzontali (T)				
T	=	$S_{th} + S_{qh} + f$	226,63	(kN/m)
Coefficiente di attrito alla base (f)				
f	=	$\tan \phi'$	0,58	(-)
Fs scorr.		$(N \cdot f + S_p) / T$	1,43	> 1,1

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV+).

<u>VERIFICA ALLO SCORRIMENTO</u>				
Risultante forze verticali (N)				
N	=	$P_m + P_t + v_p + v_s + S_{st1v} + S_{sq1v} + P_s v + P_{tsv}$	579,61	(kN/m)
Risultante forze orizzontali (T)				
T	=	$S_{st1h} + S_{sq1h} + f_p + f_s + P_s h + P_{tsh}$	254,72	(kN/m)
Coefficiente di attrito alla base (f)				
f	=	$\tan \phi'$	0,58	(-)
Fs	=	$(N \cdot f + S_p) / T$	1,3	> 1,00

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV-).

<u>VERIFICA ALLO SCORRIMENTO</u>				
Risultante forze verticali (N)				
N	=	$P_m + P_t + v_p + v_s + S_{st1v} + S_{sq1v} + P_s v + P_{tsv}$	514,27	(kN/m)
Risultante forze orizzontali (T)				
T	=	$S_{st1h} + S_{sq1h} + f_p + f_s + P_s h + P_{tsh}$	244,19	(kN/m)
Coefficiente di attrito alla base (f)				
f	=	$\tan \phi'$	0,58	(-)
Fs	=	$(N \cdot f + S_p) / T$	1,2	> 1,00

Le verifiche risultano soddisfatte.

6.4.2.2 Verifica al ribaltamento

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione statica.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscampa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

VERIFICA AL RIBALTAMENTO (STR/GEO)

Momento stabilizzante (Ms)

$$Ms = Mm + Mt + Mfext3 + MSst2 + MSsq2 \quad 1664,56 \quad (kNm/m)$$

Momento ribaltante (Mr)

$$Mr = MSst1 + MSsq1 + Mfext1 + Mfext2 + MSp \quad 510,45 \quad (kNm/m)$$

Fs ribaltamento	Ms / Mr	3,26	>	1,15
------------------------	----------------	-------------	-------------	-------------

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV+).

VERIFICA AL RIBALTAMENTO

Momento stabilizzante (Ms)

$$Ms = Mm + Mt + Mfext3 + MSst2 + MSsq2 + MPsv + MPstv \quad 1993,87 \quad (kNm/m)$$

Momento ribaltante (Mr)

$$Mr = MSst1 + MSsq1 + Mfext1 + Mfext2 + MSp + MPsh + MPtsh \quad 788,82 \quad (kNm/m)$$

Fr = Ms / Mr	2,53	>	1,00
---------------------	-------------	-------------	-------------

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV-).

VERIFICA AL RIBALTAMENTO

Momento stabilizzante (Ms)

$$Ms = Mm + Mt + Mfext3 + MSst2 + MSsq2 + MPsv + MPstv \quad 1800,81 \quad (kNm/m)$$

Momento ribaltante (Mr)

$$Mr = MSst1 + MSsq1 + Mfext1 + Mfext2 + MSp + MPsh + MPtsh \quad 870,88 \quad (kNm/m)$$

Fr = Ms / Mr	2,07	>	1,00
---------------------	-------------	-------------	-------------

Le verifiche risultano soddisfatte.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

6.4.2.3 Verifica di capacità portante (carico limite fondazioni dirette)

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione statica.

Formula Generale per il Calcolo del Carico Limite Unitario (Brinch-Hansen, 1970)					
Fondazione Nastriforme					
$q_{lim} = c'N_c i_c + q_0 N_q i_q + 0,5 \gamma_1 B N_\gamma i_\gamma$					
c1'	coesione terreno di fondaz.	3,00			(kPa)
$\phi 1'$	angolo di attrito terreno di fondaz.	30,00			(°)
γ_1	peso unità di volume terreno fondaz.	14,80			(kN/m ³)
$\theta_0 = \gamma d' H_2'$	sovraccarico stabilizzante	10,80			(kN/m ²)
e = M / N	eccentricità	0,21	0,05		(m)
B* = B - 2e	larghezza equivalente	4,59	4,91		(m)
I valori di Nc, Nq e Ng sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)					
$N_q = \tan^2(45 + \phi'/2) \cdot e^{(\pi \tan \phi' \tan \phi')}$	(1 in cond. nd)	18,40			(-)
$N_c = (N_q - 1) / \tan \phi'$	(2+ π in cond. nd)	30,14			(-)
$N_\gamma = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan \phi'$	(0 in cond. nd)	22,40			(-)
I valori di ic, iq e i γ sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)					
$i_q = (1 - T / (N + B \cdot c' \cot \phi'))^m$	(1 in cond. nd)	0,37	0,45		(-)
$i_c = i_q - (1 - i_q) / (N_q - 1)$		0,34	0,34		(-)
$i_\gamma = (1 - T / (N + B \cdot c' \cot \phi'))^{m+1}$		0,23	0,23		(-)
(fondazione nastriforme m = 2)					
qlim	(carico limite unitario)	279,59	295,03		(kN/m ²)
FS carico limite	F = qlim*B*/ N	Nmin	2,3	>	1,4
		Nmax	2,2	>	

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV+).

VERIFICA A CARICO LIMITE DELLA FONDAZIONE				
Risultante forze verticali (N)		Nmin	Nmax	
N	= Pm+ Pt + vp + vs + Sst1v + Ssq1v + Ps v + Ptsv + (Sovr acc)	579,61	599,41	(kN/m)
Risultante forze orizzontali (T)				
T	= Sst1h + Ssq1h + fp + fs +Ps h + Pts h - Sp	254,72		(kN/m)
Risultante dei momenti rispetto al piede di valle (MM)				
MM	= ΣM	1261,20	1327,53	(kNm/m)
Momento rispetto al baricentro della fondazione (M)				
M	= Xc*N - MM	187,81	170,98	(kNm/m)
Formula Generale per il Calcolo del Carico Limite Unitrario (Brinch-Hansen, 1970)				
Fondazione Nastriforme				
qlim = c'Nc*ic + q0*Nq*iq + 0,5*γ1*B*Nγ*iy				
c1'	coesione terreno di fondaz.	3,00		(kN/mq)
φ1'	angolo di attrito terreno di fondaz.	30,00		(°)
γ1	peso unità di volume terreno fondaz.	14,80		(kN/m ³)
θ0 =γd*H2'	sovraccarico stabilizzante	10,80		(kN/m ²)
e = M / N	eccentricità	0,32	0,29	(m)
B*= B - 2e	larghezza equivalente	4,35	4,43	(m)
I valori di Nc, Nq e Ng sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)				
Nq = tg ² (45 + φ'/2)*e ^{(π*tg(φ'))}	(1 in cond. nd)	18,40		(-)
Nc = (Nq - 1)/tg(φ')	(2+π in cond. nd)	30,14		(-)
Nγ = 2*(Nq + 1)*tg(φ')	(0 in cond. nd)	22,40		(-)
I valori di ic, iq e iy sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)				
iq = (1 - T/(N + B*c'cotgφ')) ^m	(1 in cond. nd)	0,33	0,35	(-)
ic = iq - (1 - iq)/(Nq - 1)		0,29	0,31	(-)
iy = (1 - T/(N + B*c'cotgφ')) ^{m+1}		0,19	0,19	(-)
(fondazione nastriforme m = 2)				
qlim	(carico limite unitario)	231,42	238,82	(kN/m ²)
FS carico limite		F = qlim*B* / N		
		Nmin	1,7	>
		Nmax	1,8	>
		1,2		

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

Di seguito i risultati delle analisi per la condizione sismica (SLV-).

VERIFICA A CARICO LIMITE DELLA FONDAZIONE				
Risultante forze verticali (N)		Nmin	Nmax	
N	= Pm+ Pt + vp + vs + Sst1v + Ssq1v + Ps v + Ptsv	514,27	534,07	(kN/m)
Risultante forze orizzontali (T)				
T	= Sst1h + Ssq1h + fp + fs +Ps h + Ptsh - Sp	244,19		(kN/m)
Risultante dei momenti rispetto al piede di valle (MM)				
MM	= ΣM	1073,69	1140,02	(kNm/m)
Momento rispetto al baricentro della fondazione (M)				
M	= Xc*N - MM	211,98	195,15	(kNm/m)
Formula Generale per il Calcolo del Carico Limite Unitario (Brinch-Hansen, 1970)				
Fondazione Nastriorme				
qlim = c'Nc*ic + q0*Nq*iq + 0,5*γ1*B*Nγ*iy				
c1'	coesione terreno di fondaz.	3,00		(kN/mq)
φ1'	angolo di attrito terreno di fondaz.	30,00		(°)
γ1	peso unità di volume terreno fondaz.	14,80		(kN/m ³)
q0 =γd*H2'	sovraccarico stabilizzante	10,80		(kN/m ²)
e = M / N	eccentricità	0,41	0,37	(m)
B*= B - 2e	larghezza equivalente	4,18	4,27	(m)
I valori di Nc, Nq e Ng sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)				
Nq = tg ² (45 + φ'/2)*e ^{(π*tg(φ'))}	(1 in cond. nd)	18,40		(-)
Nc = (Nq - 1)/tg(φ')	(2+π in cond. nd)	30,14		(-)
Nγ = 2*(Nq + 1)*tg(φ')	(0 in cond. nd)	22,40		(-)
I valori di ic, iq e iy sono stati valutati con le espressioni suggerite da Vesic (1975)				
iq = (1 - T/(N + B*c'*cotgφ')) ^m	(1 in cond. nd)	0,30	0,31	(-)
ic = iq - (1 - iq)/(Nq - 1)		0,26	0,28	(-)
iy = (1 - T/(N + B*c'*cotgφ')) ^{m+1}		0,16	0,16	(-)
(fondazione nastriorme m = 2)				
qlim	(carico limite unitario)	193,72	201,89	(kN/m ²)
FS carico limite		F = qlim*B* / N		
		Nmin	1,6	>
		Nmax	1,6	>
		1,2		

Le verifiche risultano soddisfatte.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
OPERE D'ARTE MINORI – Muro di sottoscarpa via S. Zagno Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno Spalla B	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO OM PROGRESSIVO 722 REV. r00

6.4.2.4 Cedimento della fondazione

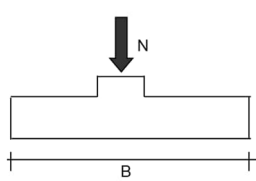
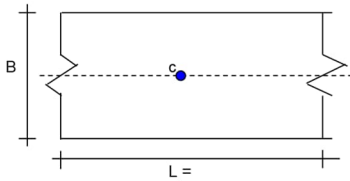
Il cedimento della fondazione è stato valutato per le condizioni di esercizio come segue.


Cedimenti
 Fondazioni nastriformi

Input

Output

LAVORO

Formulazione Teorica (H.G. Poulos, E.H. Davis; 1974)

$$\Delta\sigma_{zi} = (2q/\pi) * (\alpha + \sin\alpha \cos\alpha)$$

$$\Delta\sigma_{xi} = (2q/\pi) * (\alpha - \sin\alpha \cos\alpha)$$

$$\Delta\sigma_{yi} = (4q/\pi) * (v\alpha)$$

$$\alpha = \tan^{-1}((B/2)/z)$$

$$\delta_{tot} = \sum \delta_i = \sum (((\Delta\sigma_{zi} - v(\Delta\sigma_{xi} + \Delta\sigma_{yi})) \Delta z_i / E_i))$$

DATI DI INPUT

B =	5,00	(m)	(Larghezza della Fondazione)
N =	567,0	(kN)	(Carico Verticale Agente)
z _w =	4,0	(m)	(profondità della falda)
γ' =	18	(kN)	(peso di volume medio del terreno)
φ' =	30	(°)	(angolo d'attrito)
D =	0,6	(m)	(approfondimento fondazione)
Δσ _m /σ _{mc} =	10	(%)	(sovrappressione max)

q =	113,40	(kN/mq)	(Pressione Agente (q = N/B))
ns =	4	(-)	(numero strati) (massimo 6)

Strato	Litologia	Spessore	da	z _i	a	z _{i+1}	Δz _i	E	v	δ _{ci}
(-)	(-)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(kN/m ²)	(-)	(cm)
1	Rilevato esistente	10,00	0,0	10,0	1,0	25000	0,30	2,23		
2	Sabbia e sabbia limosa	7,00	10,0	17,0	1,0	30000	0,30	0,36		
3	Sabbia e ghiaia	1,00	17,0	18,0	1,0	25000	0,30	0,00		
4	Limo argilloso ed argilla limosa	7,00	18,0	25,0	1,0	25000	0,30	0,00		
-			0,0	0,0				-		
-			0,0	0,0				-		

δ_{ctot} = 2,59 (cm)

Il cedimento del muro risulta pari a 2,59 cm, che è ritenuto ammissibile per questo tipo di opera.

6.4.2.5 Incidenza dell'opera

L'incidenza del paramento verticale del muro è pari a 115 kg/m³, quella della fondazione è pari a 100 kg/m³.