

AGENZIA INTERREGIONALE PER IL FIUME PO – PARMA

Strada Giuseppe Garibaldi 75, I-43121 Parma

MO-E-1357 – ADEGUAMENTO DEI MANUFATTI DI REGOLAZIONE E SFIORO DELLA CASSA DI ESPANSIONE DEL FIUME SECCHIA COMPRESIVO DELLA PREDISPOSIZIONE DELLA POSSIBILITÀ DI REGOLAZIONE IN SITUAZIONI EMERGENZIALI ANCHE PER PIENE ORDINARIE IN RELAZIONE ALLA CAPACITÀ DI DEFLUSSO DEL TRATTO ARGINATO (EX CODICE 10969) E AVVIO DELL'ADEGUAMENTO IN QUOTA E POTENZIAMENTO STRUTTURALE DEI RILEVATI ARGINALI DEL SISTEMA CASSA ESPANSIONE ESISTENTE

**MO-E-1273 – LAVORI DI AMPLIAMENTO E ADEGUAMENTO DELLA CASSA DI ESPANSIONE DEL FIUME SECCHIA NEL COMUNE DI RUBIERA (RE)
(ACCORDO DI PROGRAMMA MINISTERO – RER – PARTE A)**

PROGETTO DEFINITIVO

R.08 – RELAZIONE SULLE VERIFICHE GLOBALI DI STABILITÀ DEI MANUFATTI

IL RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROFESSIONISTI:

CAPOGRUPPO MANDATARIA
PROGETTAZIONE GENERALE – INGEGNERIA IDRAULICA E STRUTTURALE



DIZETA INGEGNERIA
STUDIO ASSOCIATO
Via Borsari, 19 – 20133 MILANO Tel. 02-70600125
server@dezetaingegneria.it Fax 02-70600014

ING. FULVIO BERNABEI
ING. STEFANO ADAMI
ING. LAURA GRILLI
ING. GIANLUIGI SEVNI
ING. PAOLO SANAVIA

MANDANTE
RAPPORTI CON ENTI TERZI – MODELLISTICA IDROLOGICA E
IDRAULICA – IDROGEOLOGIA



ING. DENIS CERLINI
ING. MARCO BELICCHI
ING. NICOLA PESSARELLI (CSP)
ING. MICHELE FERRARI

MANDANTE
INGEGNERIA STRUTTURALE



ING. MARCO G. P. BRAGHINI
ING. DANIELE L. GIOMETTI

MANDANTE
GEOLOGIA



EN GEO S.r.l.
ENGINEERING GEOLOGY
www.engeo.it

GEOLOG. CARLO CALEFFI
GEOLOG. FRANCESCO CERUTTI

MANDANTE
ASPETTI AMBIENTALI



ING. MASSIMO SARTORELLI
ING. BENIAMINO BARENGHI
DOTT. AGR. ALESSIA MANICONE
DOTT.SSA CHIARA LUVIE*

MANDANTE
ASPETTI PAESAGGISTICI



ARCH. ANGELO DAL SASSO

PER IL R.T.P.:

IL PROGETTISTA GENERALE
DOTT. ING. FULVIO BERNABEI

IL RUP:

DOTT. ING.
FEDERICA PELLEGRINI

CONSULENTE
INGEGNERIA GEOTECNICA



PROF. ING. FRANCESCO COLLESELLI
ING. GIUSEPPE COLLESELLI

CONSULENTE
PIANO PARTICELLARE DI ESPROPRIO

GEOM. MARCO SOZZE'

CONSULENTE
VALUTAZIONI ARCHEOLOGICHE

DOTT.SSA IVANA VENTURINI

DATA: LUGLIO 2019

Mod.7.3 F – Rev.01

REV.	DATA	DESCRIZIONE MODIFICA	REDATTO	CONTR.	APPR.
01	AGOSTO 2021	INTEGRAZIONI ART.18 L.R. 4/2018			

I N D I C E

1	Premessa	4
2	Documenti di riferimento	5
2.1	Elaborati di progetto	5
2.1.1	<i>Generali</i>	5
2.1.2	<i>Intervento A: Adeguamento del manufatto regolatore</i>	5
2.1.3	<i>Intervento B: Adeguamento del manufatto di sfioro laterale</i>	6
2.2	Normativa	6
2.3	Bibliografia	6
3	DESCRIZIONE DELLE OPERE	8
3.1	Stato di fatto	8
3.2	Interventi in progetto	9
3.2.1	<i>Manufatto regolatore</i>	9
3.2.2	<i>Manufatto di sfioro</i>	12
4	Criteri normativi di verifica	14
4.1	Verifiche in condizioni sismiche	17
4.2	Parametri sismici di riferimento	20
4.2.1	<i>Periodo di riferimento per l'azione sismica</i>	20
4.2.2	<i>Azioni sismiche di calcolo</i>	21
5	MODALITA', CRITERI E ASSUNZIONI DI CALCOLO	22
5.1	Situazioni progettuali e combinazione delle azioni	22
5.2	Modalità e criteri di calcolo	25
5.2.1	<i>Capacità portante e scorrimento</i>	25
5.2.2	<i>Ribaltamento</i>	26

5.2.3 Cedimenti	27
6 VERIFICHE MANUFATTO DI REGOLAZIONE	29
6.1 Stratigrafia e parametri di calcolo	29
6.1.1 Risultati verifiche -Adeguamento (muro principale)	31
6.1.1.1 Combinazione fondamentale - Fine costruzione e serbatoio vuoto	31
6.1.1.2 Combinazione fondamentale – $Q=750\text{m}^3/\text{h}$, bocche chiuse $Q_w = 48.75 \text{ m s.l.m.}$	34
6.1.1.3 Combinazione fondamentale – $Q=750\text{m}^3/\text{h}$, bocche aperte $Q_w = 46.25 \text{ m s.l.m.}$	40
6.1.1.4 Combinazione fondamentale – Invaso Sperimentale (statica)	45
6.1.1.5 Combinazione eccezionale – Piena duecentennale	50
6.1.1.6 Combinazione eccezionale – Piena millenaria	54
6.1.1.7 Combinazioni sismiche SLV-SLC-SLD	58
6.1.2 Risultati verifiche - Manufatto esistente	63
6.1.2.1 Criteri e assunzioni di verifica	63
6.1.2.2 Combinazione fondamentale – bocche chiuse $Q_w = 48.75 \text{ m s.l.m.}$	65
6.1.2.3 Combinazione fondamentale – bocche aperte $Q_w = 46.25 \text{ m s.l.m.}$	68
6.1.2.4 Combinazione fondamentale – Invaso Sperimentale (statica)	71
6.1.2.5 Combinazione eccezionale – Piena duecentennale	74
6.1.2.6 Combinazione eccezionale – Piena millenaria	77

6.1.2.7	Combinazioni sismiche SLV-SLC-SLD	80
7	VERIFICHE SFIORATORE LATERALE-	86
7.1	Capacità portante	86
7.1.1	<i>Combinazione fondamentale statica</i>	87
7.1.2	<i>Combinazioni sismiche SLV-SLC-SLD</i>	90
7.2	Cedimenti	94
8	MURI DI SOSTEGNO DEI RILEVATI ARGINALI	96
8.1	Descrizione delle opere	96
8.2	Criteri e combinazioni di verifica	99
8.3	Risultati delle verifiche: sezione 7-7	101
8.4	Risultati delle verifiche: sezione 4-4	103

1 Premessa

La presente relazione fa parte del Progetto Definitivo degli interventi di adeguamento e completamento del sistema di laminazione delle piene della cassa di espansione del fiume Secchia, in provincia di Modena, località Rubiera-Marzaglia.

In particolare, nel seguito sono riportate le verifiche geotecniche, per quanto attinente alla presente fase progettuale, del manufatto di regolazione principale, lungo il corso del Secchia, e dello sfioratore laterale che immette nella cassa di espansione laterale.

I muri arginali del manufatto sfioratore laterale non sono trattati in questa relazione, essendo essi analizzati in un documento separato facente parte del presente Progetto Definitivo, mediante un modello FEM complessivo del sistema sfioratore-muri arginali, che formano un'opera monolitica.

Nel seguito, dopo un elenco dei documenti di riferimento (cap. 2), si riportano dunque:

- descrizione sintetica delle opere considerate (cap. 3),
- criteri di verifica (cap. 4);
- verifica del manufatto regolatore (cap. 5);
- verifica dello sfioratore laterale (cap. 6);
- verifica dei muri arginali del manufatto regolatore (cap. 7).

Non sono oggetto di questa relazione la caratterizzazione geologica, stratigrafica e geotecnica del sito, la verifica idraulica e strutturale delle opere in oggetto, né le verifiche degli altri elementi ed interventi rientranti nel progetto di adeguamento (rilevati arginali, altre opere idrauliche, eccetera); per tutti questi aspetti si rimanda agli specifici elaborati di progetto.

2 Documenti di riferimento

2.1 Elaborati di progetto

2.1.1 Generali

- [1]. Relazione geologica – R.04
- [2]. Relazione geotecnica – R.05
- [3]. Relazione sismotettonica e sismica – R.06

Nel seguito si farà riferimento anche agli allegati alle relazioni sopra elencate.

2.1.2 Intervento A: Adeguamento del manufatto regolatore

- [4]. Intervento A: Adeguamento del manufatto di sbarramento e regolazione:
Planimetria di progetto - Tav. A.1
- [5]. Intervento A: Adeguamento del manufatto di sbarramento e regolazione:
Sezioni da A-A a C-C– Tav. A.4.1
- [6]. Intervento A: Adeguamento del manufatto di sbarramento e regolazione:
Sezioni da A-A a C-C– Tav. A.4.2
- [7]. Intervento A: Adeguamento del manufatto di sbarramento e regolazione:
Muri del manufatto di sbarramento e regolazione – Tav. 5.3.2
- [8]. Intervento A: Adeguamento del manufatto di sbarramento e regolazione:
Muri di sponda, viste e sezioni – Tav. 5.3.3
- [9]. Intervento A: Adeguamento del manufatto di sbarramento e regolazione:
Pianta a quota 38.00 m s.l.m. (Piano fondazione) – Tav. 5.4

2.1.3 Intervento B: Adeguamento del manufatto di sfioro laterale

- [10]. Intervento B: Adeguamento del manufatto di derivazione nell'invaso laterale: Planimetria di progetto – Tav. B.1
- [11]. Intervento B: Adeguamento del manufatto di derivazione nell'invaso laterale: Sezioni da A-A a B-B – Tav. B.4.1
- [12]. Intervento B: Adeguamento del manufatto di derivazione nell'invaso laterale: Sezioni da C-C a D-D – Tav. B.4.2
- [13]. Intervento B: Adeguamento del manufatto di derivazione nell'invaso laterale: Sezioni da E-E a G-G – Tav. B.4.3
- [14]. Intervento B: Adeguamento del manufatto di derivazione nell'invaso laterale: Piante a quota 41,00 e 38,00 m s.l.m. (piano fondazione e taglio) – Tav. B.5.2

2.2 Normativa

- [15]. DM 26.06.2014 “Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse) – Ministero delle Infrastrutture e Trasporti (G.U. Serie generale n. 156, 8.07.2014)
- [16]. Circolare P.C.M. 7 aprile 1999, n. DSTN/2/7311 “Legge 584/1994. Competenze del Servizio nazionale dighe. Precisazioni” (G.U. Serie generale n. 87, 14.04.1999)
- [17]. D.M. 17.01.2018 “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni” Suppl. ord. n. 8 alla GU del 20.02.2018, n. 42

2.3 Bibliografia

- [18]. Brinch Hansen J. (1970) “A revised and extended formula for bearing capacity” Danish Geotechnical Institute, Bull. n. 28

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)



- [19]. Jumikis A.R. (1971) “Vertical stress tables for uniformly distributed loads on soil for any point under square, rectangular, strip, and circular bearing areas on the boundary surface of an elastic, homogeneous, semi-infinite medium” Rutgers University, New Brunswick, NJ

3 DESCRIZIONE DELLE OPERE

3.1 Stato di fatto

La cassa di espansione attuale, risalente ai primi anni '70 del secolo scorso ed entrata in funzione alla fine del decennio, è oggi costituita (dopo un primo intervento di adeguamento negli anni '90) dalle seguenti opere idrauliche:

- manufatto regolatore in linea al fiume Secchia, realizzato con traversa tracimabile con 4 luci di fondo rettangolari a luce fissa;
- vasca di dissipazione, a valle del manufatto regolatore, costituita da una struttura mista in calcestruzzo e gabbioni, dotata di dispositivi di dissipazione;
- sfioratore laterale fisso, posto a circa 950 m a monte del manufatto regolatore, di collegamento con la cassa fuori linea a Nord del Secchia;
- rilevati arginali di contenimento;
- scarico di fondo della cassa fuori linea, posto poco più a valle del manufatto regolatore;
- briglia a pettine con funzione di trattenuta del materiale flottante posta a circa 5 km a monte del manufatto regolatore e soglia di stabilizzazione di fondo alveo, posta circa 700 m a valle.

Le principali grandezze idrauliche sono costituite da una superficie occupata di circa 200 ha, un volume massimo invasabile complessivo di circa 15 milioni di m³, un sistema arginale della lunghezza complessiva di circa 7,5 km, con altezza massima di 10 m. Gli argini, nei tratti di maggiore altezza, hanno larghezza pari a circa 4 m in sommità e 68 m alla base, con il paramento interrotto da banche e sottobanche collegate tra loro.

3.2 Interventi in progetto

Con specifico ed esclusivo riferimento al manufatto regolatore in linea e allo sfioratore laterale per il deflusso nella cassa di espansione fuori linea, il progetto prevede la configurazione delle opere descritta nel seguito.

3.2.1 Manufatto regolatore

Per il manufatto regolatore si prevede la demolizione del tratto centrale rettilineo, per un'estensione di 54 m, da sostituire con una struttura con l'andamento di una spezzata a formare, in pianta, una "U" in modo da potervi alloggiare 6 luci (due per ciascuno dei lati lunghi, longitudinali al Secchia, e 2 sul lato corto, trasversale al corso d'acqua), regolate da paratoie piane a comando oleodinamico, di dimensioni nominali 6.7 x 4.5m.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

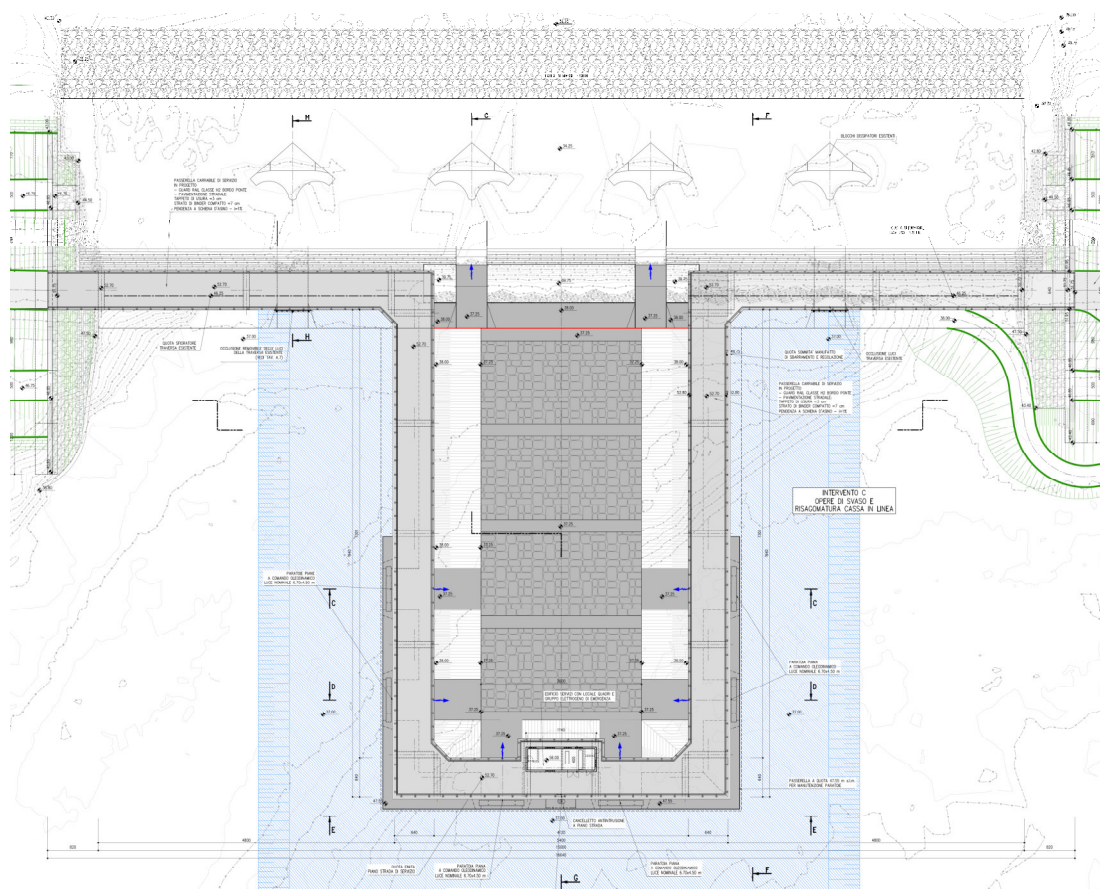


Figura 1 – Adeguamento manufatto di regolazione in linea - Pianta

La “U” avrà un’estensione complessiva di 212.8 m (54 m per il tratto parallelo all’asse della traversa esistente e 79.4 m per ciascuno dei due tratti perpendicolari).

I tratti laterali dell’opera esistente restano in posto, a connettere la struttura di nuova realizzazione con gli argini di spalla della traversa.

Lo scarico di superficie, nel tratto di nuova costruzione, sarà alzato a quota 48.75 m s.l.m., 2.5 m superiore rispetto alla quota del manufatto esistente (46.25 m s.l.m.), e sarà realizzato secondo un profilo Krieger.

La traversa sarà sormontata, lungo l’intera estensione da una passerella di coronamento carrabile, a quota 52.70 m s.l.m. (esclusi i parapetti e altre opere accessorie); il punto più depresso dei paramenti, in particolare di quello di monte, è a quota 37.00 m s.l.m., ciò che conferisce alla traversa, secondo la definizione del DM2014 (doc. rif. [15]) un’altezza di 14.5 m.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Il piano di imposta della fondazione è a quota 35.25 m s.l.m., posto su un letto di materiale di riporto, opportunamente selezionato e costipato, per uno spessore di 1.5 m, in sostituzione e bonifica del corrispondente terreno naturale, per garantire condizioni di appoggio idonee e uniformi. Alla base del paramento di monte è prevista la realizzazione, a proseguimento di quelli esistenti, di taglioni idraulici in c.a. di lunghezza pari a 8 m (quota di base 27.25 m s.l.m.).

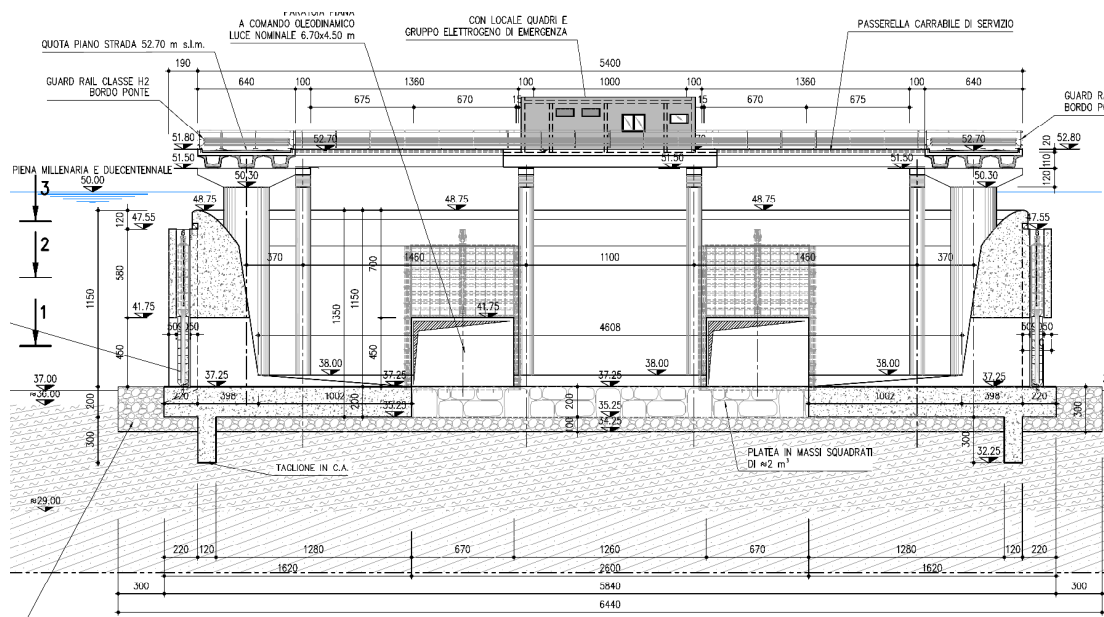


Figura 2 – Adeguamento manufatto di regolazione – Sezione tratti longitudinali e vista tratto trasversale

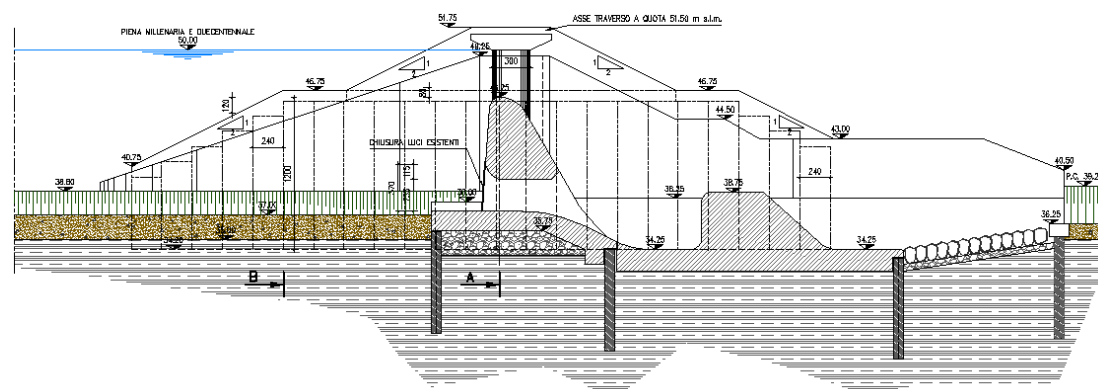


Figura 3 - Adeguamento manufatto di regolazione in linea – Sezione tratti laterali

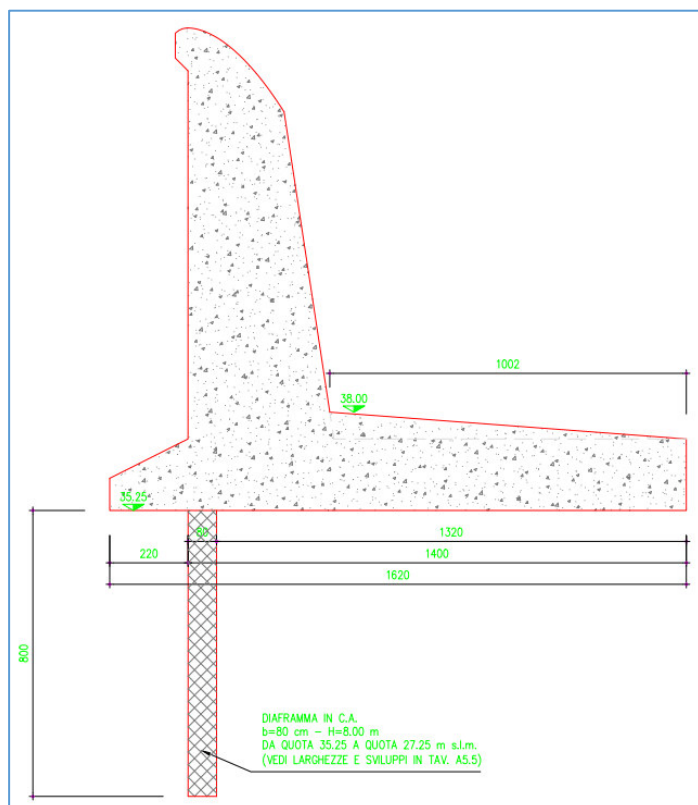


Figura 4 - Adeguamento manufatto di regolazione – Sezione tipo con taglione in fondazione

3.2.2 *Manufatto di sfioro*

Questa sarà costituita da 9 montanti in calcestruzzo, a sezione rettangolare allungata, completata a ciascuna estremità da un semicerchio, di dimensioni 1.5x11.0 m, che sostengono 8 paratoie di dimensioni 7.6x5.4 m interposte fra un montante e il successivo; i due montanti più esterni formano le spalle della struttura e si collegano ai muri arginali di monte e valle.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

L'opera avrà lunghezza complessiva di 74.30 m.

La quota di sommità dei montanti è prevista a 52 m s.l.m., la quota di base a 41 m s.l.m., per un'altezza di 11 m.

La platea di fondazione ha spessore di 1.5m e presenta lungo il perimetro un dente in calcestruzzo armato di profondità pari a 3m da intradosso platea.

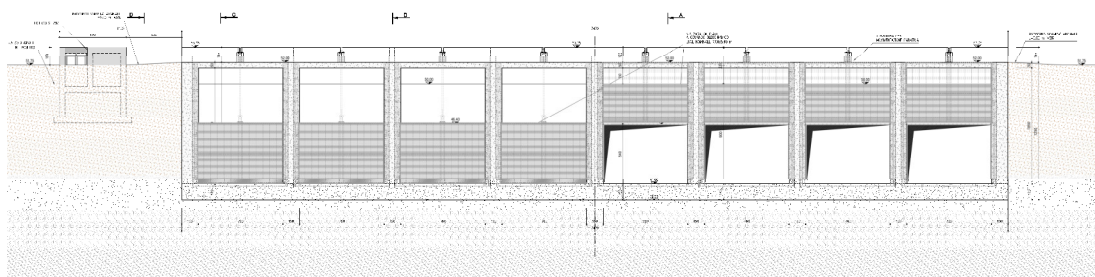


Figura 5 – Sfiatore laterale – Sezione longitudinale dell'opera

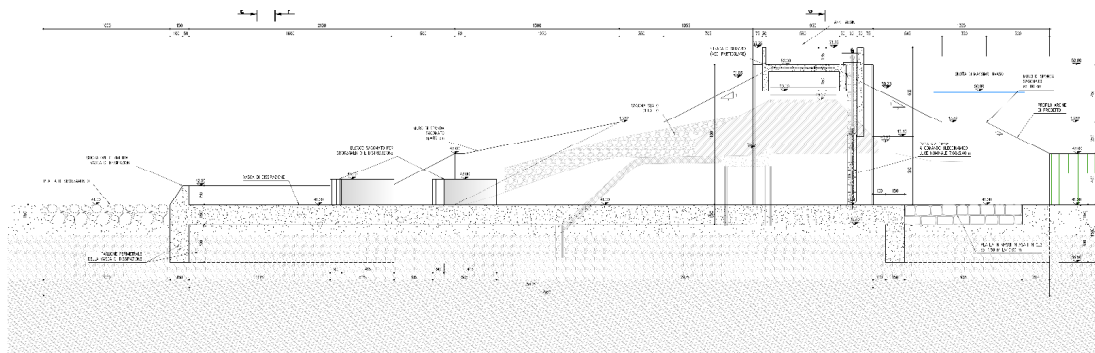


Figura 6 – Sfiatore laterale - Sezione

4 Criteri normativi di verifica

Le traverse fluviali con funzione di regolazione possono essere assimilate a dighe, applicando di conseguenza a medesima normativa di riferimento valida per queste ultime; nella fattispecie, le verifiche geotecniche e strutturali sono condotte in accordo alle indicazioni del DM 26/06/2014 di cui al doc. rif. [15], oltre che a quelle delle Norme Tecniche per le Costruzioni (nel seguito NTC) di cui al DM 17/01/2018 (doc. rif. [17]).

La circolare della Presidenza del Consiglio dei Ministri n. DSTN/2/7311 (doc. rif. [16]) chiarisce come non siano dighe, invece, le opere di sfioro delle casse di espansione in derivazione *“intese come aree opportunamente arginate per consentire l'accumulo temporaneo di acqua in occasione di eventi di piena mediante sfioro di una soglia libera o regolabile inserita in un tratto di sponda del corso d'acqua, oppure mediante altri sistemi quali sifoni auto innescanti o tratti di argine fusibili”*, giacché non si tratta di opere che sbarrano un corso d'acqua e ne intercettano i deflussi.

In quanto segue, tuttavia, anche per le verifiche dello sfioratore si adotteranno i medesimi criteri normativi di verifica delle dighe, come per il manufatto regolatore, per semplicità e cautela.

Il decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018 prevede che per ogni Stato Limite Ultimo (SLU) il valore di progetto dell'azione (o dell'effetto dell'azione), E_d , deve essere minore od uguale, del valore di progetto della resistenza, R_d , del sistema geotecnico di fondazione:

$$E_d \leq R_d$$

Le azioni (o effetti delle azioni) e le resistenze di progetto sono determinate applicando ai valori caratteristici una combinazione di gruppi di fattori parziali di sicurezza definiti rispettivamente per le azioni (A), per la resistenza dei terreni (M) e per la resistenza globale del sistema (R).

Il DM 2014 prevede per le traverse fluviali le verifiche proprie, secondo le NTC2018, delle fondazioni dirette, vale a dire¹:

- scorrimento sul piano di posa;
- collasso per carico limite del complesso fondazione-terreno;

prescrivendo di adottare per i coefficienti γ_R sulla resistenza globale (R) gli stessi valori previsti dalle NTC 2018 per quanto riguarda la verifica nei confronti del carico limite in fondazione, e i seguenti valori per le verifiche allo scorrimento:

$\gamma_R = 1.00$ in fase costruttiva

$\gamma_R = 1.15$ nelle condizioni di serbatoio pieno

Per le verifiche nei confronti del raggiungimento del carico limite e dello scorrimento sul piano di posa delle fondazioni dirette le NTC 2018 prevedono che si applichi la combinazione di fattori parziali di sicurezza:

A1+M1+R3 (Approccio 2)

I valori dei fattori di sicurezza parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici del terreno previsti dalle NTC sono riportati nelle tabelle sottostanti.

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(4)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

Tabella 1 - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (doc. rif. [17])

¹ Nel caso specifico, la verifica di stabilità globale non appare significativa essendo le opere disposte in un piano e avendo uno sviluppo trasversale rilevante, condizioni che rendono di per sé difficile la formazione di un meccanismo di collasso per instabilità globale.

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

Tabella 2 - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (doc. rif. [17])

I valori dei coefficienti parziali sulle resistenze globali previsti dalle NTC per fondazioni dirette sono riportati nella tabella successiva.

Verifica	Coefficiente parziale (R3)
Carico limite	$\gamma_R = 2,3$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$

Tabella 3 - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli SLU di fondazioni superficiali (doc. rif. [17])

Alla luce della sopra ricordata prescrizione del DM 2014 in merito ai fattori di sicurezza da adottare per le verifiche fondazionali delle traverse fluviali, i coefficienti parziali sulle resistenze globali diventano, per questo tipo di opere:

Verifica	Coefficiente parziale	
	(R3)	
Carico limite	2.30	
Scorrimento	fase costruttiva	1.00
	opera ultimata, serbatoio vuoto	1.10
	serbatoio pieno	1.15

Tabella 4. Coefficienti parziali γ_R per le verifiche SLU delle fondazioni delle opere in progetto

Alle verifiche nei confronti degli stati limite sopra indicati è stata aggiunta, nel seguito, la verifica a ribaltamento, condotta in accordo a quanto previsto dalle NTC 2018 per i muri di sostegno, vale a dire ancora con la combinazione di coefficienti parziali:

$A1 + M1 + R3$

in cui i coefficienti sulle azioni e sui parametri del terreno assumono i medesimi valori già indicati nelle tabelle soprastanti, mentre i valori di resistenza globale sono:

Verifica	Coefficiente parziale (R3)
Capacità portante della fondazione	$\gamma_R = 1,4$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$
Ribaltamento	$\gamma_R = 1,15$
Resistenza del terreno a valle	$\gamma_R = 1,4$

Tabella 5. Coefficienti parziali γ_R per le verifiche SLU di muri di sostegno

Nella tabella è stato evidenziato il valore relativo alla verifica a ribaltamento, l'unico che trova applicazione nelle verifiche delle opere di sbarramento fluviale in progetto; i valori di tutti i coefficienti γ_R saranno applicati alle verifiche di stabilità dei muri arginali di nuova realizzazione del manufatto di regolazione, per i quali saranno effettuate le verifiche nei confronti dei medesimi Stati Limite Ultimi di riferimento.

4.1 Verifiche in condizioni sismiche

Per le verifiche in condizioni sismiche si adottano i medesimi criteri normativi, con l'applicazione della stessa combinazione di coefficienti parziali $A1 + M1 + R3$, con le seguenti differenze prescritte dalle NTC 2018:

- i coefficienti parziali sulle azioni o effetti delle azioni (A) sono assunti tutti unitari;
- i coefficienti parziali γ_R sulle resistenze globali per i muri di sostegno assumono valori diversi da quelli in condizioni statiche, e segnatamente quelli indicati nella tabella sottostante.

Verifica	Coefficiente parziale γ_R
Carico limite	1.2
Scorrimento	1.0
Ribaltamento	1.0
Resistenza del terreno a valle	1.2

Tabella 6. Coefficienti parziali γ_R per le verifiche SLU di muri di sostegno in condizioni sismiche

I coefficienti parziali sulle resistenze globali per le fondazioni superficiali (e nello specifico per le fondazioni delle opere di sbarramento fluviale) restano invariati rispetto a quelli previsti in condizioni statiche.

Le verifiche sono state condotte con riferimento ai seguenti stati limite sismici: Stato Limite di Vita SLV, Stato Limite di Danno SLD, Stato Limite di Collasso SLC, assumendo in via cautelativa $\beta = 1.0$ per le opere di sbarramento. Si è infatti considerato che le opere considerate, data la loro configurazione, difficilmente potranno subire spostamenti, se non molto limitati.

Alle verifiche sopra descritte si aggiunge infine quella di sicurezza nei confronti del sollevamento da sottospinta idraulica, per la quale si applicano i seguenti fattori parziali di sicurezza dati dalle NTC.

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente parziale γ_F (o γ_E)	SOLLEVAMENTO (UPL)
Permanenti	Favorevole	γ_{G1}	0,9
	Sfavorevole		1,1
Permanenti non strutturali ⁽¹⁾	Favorevole	γ_{G2}	0,0
	Sfavorevole		1,5
Variabili	Favorevole	γ_{Q1}	0,0
	Sfavorevole		1,5

Tabella 7 – Coefficienti parziali per le verifiche a sollevamento

Le verifiche a sollevamento del fondo scavo non sono significative, essendo in genere riferite a un volume di terreno di estensione orizzontale, misurata a partire dal paramento di valle del taglione, pari a metà dell'infissione del taglione stesso.

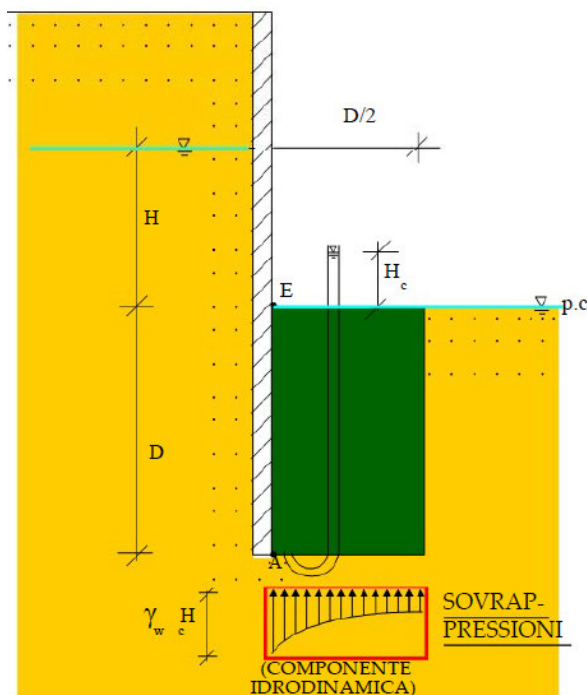


Figura 7 – Schema per la verifica a sollevamento del fondo scavo

Nel caso in esame, tale volume di terreno è coperto dalla struttura delle opere in progetto, che contrasta le sottopressioni con fattori di sicurezza adeguati, come si mostra nelle verifiche riportate nel seguito della relazione. Inoltre, i terreni di fondazione sono fini e permeabilità molto bassa, dell'ordine di $k = 10^{-10}$ m/s: la filtrazione risulterà dunque molto limitata e la corrispondente azione idrodinamica tendenzialmente trascurabile, a maggior ragione quando si tenga conto della transitorietà delle piene rispetto al tempo necessario a dare luogo fisicamente alla filtrazione (nel normale regime fluviale, non è previsto si formi un battente idraulico, e conseguente differenza di carico, significativi fra monte e valle opera).

Per lo stesso motivo, sono state omesse le verifiche nei confronti del sifonamento.

4.2 Parametri sismici di riferimento

4.2.1 Periodo di riferimento per l'azione sismica

Le dighe che superano i 15m di altezza (misurata dalla quota del piano di coronamento al punto più depresso dei paramenti) o che determinano un volume di invaso superiore a 1'000'000 m³ sono definite “grandi dighe”; fra queste si distinguono poi le dighe “strategiche” (*“dighe la cui funzionalità durante e a seguito di eventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile [...] in assenza di specifica individuazione o classificazione si definiscono strategiche le dighe che realizzano serbatoi a prevalente utilizzazione idroelettrica o potabile”*) e “rilevanti”: tutte le grandi dighe che non siano strategiche.

Le opere di sbarramento oggetto del presente Studio di Fattibilità tecnica ed economica, pur essendo di altezza leggermente inferiore a 15 m, determinano invasi superiori al 1'000'000 di metri cubi, e si qualificano così come “grandi dighe”; possono inoltre essere classificate come “rilevanti”, dal momento che non hanno rilievo fondamentale in caso di sisma (anche per l'improbabilità della concomitanza fra sisma e piena di progetto) né realizzano serbatoi a uso idroelettrico o potabile.

Il periodo di riferimento, V_R , per l'azione sismica è definito in funzione della vita nominale, V_N , e del coefficiente d'uso, C_U , dalla relazione:

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

Il coefficiente d'uso C_U è funzione della classificazione delle dighe secondo quanto ai capoversi precedenti; la tabella seguente riepiloga che contiene i valori della vita nominale e dei coefficienti d'uso da adottare nelle verifiche, come definiti nelle NTC.

<i>Dighe:</i>	V_N (anni)		C_U	V_R (anni)	
<i>strategiche</i>	≥ 100		2,0	200	
<i>rilevanti</i>	$\geq 50^{(1)}$	$\geq 100^{(2)}$	1,5	$75^{(1)}$	$150^{(2)}$
<i>Imp. normale</i>	≥ 50		1	50	

⁽¹⁾ dighe di dimensioni contenute

⁽²⁾ grandi dighe

Tabella 8 – Vita nominale e coefficiente d'uso per dighe e traverse (da doc. rif. [15])

Per quanto sopra, trattandosi di grandi dighe rilevanti, la vita nominale e il coefficiente d'uso devono essere assunti pari a:

$$V_N = 100 \text{ anni}$$

$$C_U = 1.5$$

E di conseguenza:

$$\Rightarrow V_R = 150 \text{ anni}$$

4.2.2 Azioni sismiche di calcolo

I parametri sismici per la definizione degli spettri di riferimento e delle azioni sismiche di calcolo sono stati determinati mediante un'analisi di risposta sismica locale, esposta nella "Relazione sismotettonica e sismica" facente parte del presente Progetto Definitivo (doc. rif. [3]), alla quale si rimanda per ogni dettaglio in merito.

In questa sede si richiama soltanto il valore delle accelerazioni a_{max} ottenute ai siti del manufatto regolatore e dello sfioratore laterale:

- Per il manufatto regolatore

$$a_{max}/g = 0.492 \text{ (SLV)}$$

$$a_{max}/g = 0.558 \text{ (SLC)}$$

$$a_{max}/g = 0.247 \text{ (SLD)}$$

- Per lo sfioratore laterale.

$$a_{max}/g = 0.495 \text{ (SLV)}$$

$$a_{max}/g = 0.562 \text{ (SLC)}$$

$$a_{max}/g = 0.231 \text{ (SLD)}$$

5 MODALITA', CRITERI E ASSUNZIONI DI CALCOLO

5.1 Situazioni progettuali e combinazione delle azioni

In accordo al DM 26/06/2014, si considerano, in partenza, le seguenti combinazioni:

<i>combinazione</i> <i>azioni</i>	fondamentale				eccezionale	sismica	
	fase costruttiva	fine costruzione o serbatoio vuoto	rapida vuotatura	esercizio normale	massima piena	SLE	SLU
peso proprio	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
spinta idrostatica				SI ⁽¹⁾	SI ⁽²⁾	SI ⁽¹⁾	SI ⁽¹⁾
sottospinta			SI	SI	SI	SI	SI
coazioni termiche e da ritiro	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
coazione da calore di idratazione	SI	SI					
spinta del ghiaccio				se applicabile			
spinta dell'interrimento				se applicabile	se applicabile	se applicabile	se applicabile
azione sismica						SI	SI

⁽¹⁾ quota massima regolazione e livelli inferiori nonché serbatoio vuoto

⁽²⁾ quota di massimo invaso

Nel caso specifico, si osserva che:

- la spinta del ghiaccio non appare applicabile;
- la fase costruttiva non è significativa per il manufatto in esame, dal momento che il piano di posa è orizzontale (non si può avere scivolamento lungo la sponda su cui poggiano le spalle, come per dighe a gravità impostate su versanti vallivi) e per di più, nel caso del manufatto regolatore, la parte di nuova realizzazione si collega a quella esistente, quindi non riceve spinte nemmeno dagli argini;
- la rapida vuotatura non è significativa, data la tipologia di manufatto.

Si osserva inoltre che data la presenza di depositi a granulometria fine, caratterizzati da valori del coefficiente di permeabilità molto bassi (dell'ordine di $k = 10^{-10}$ m/s), la

filtrazione sotto il dente e conseguentemente le sottospinte alla base della traversa possono essere ritenute trascurabili e quindi non conteggiate nelle verifiche.

Le spinte idrostatiche sono state valutate in base alle quote dell'acqua di riferimento riportate nelle tabelle sottostanti per le varie situazioni progettuali.

Situazione progettuale	Monte	Valle
Fine costruzione, serbatoio vuoto	-	-
Fondamentale, $Q=750\text{m}^3/\text{h}$, bocche chiuse	48,75	42,95
Fondamentale, $Q=750\text{m}^3/\text{h}$, bocche aperte	46,25	44,06
Fondamentale-statica	46,25	-
Eccezionale, piena duecentennale	49,83	44,53
Eccezionale, piena millenaria	50,24	45,25
Sismiche: SLV-SLC-SLD	46,25	-

Tabella 9. Situazioni progettuali: manufatto regolatore

Situazione progettuale	Monte	Valle
Fondamentale statica	48.75	-
Sismiche: SLV-SLC-SLD	46,25	-

Tabella 10. Situazioni progettuali: sfioratore laterale

Nella fattispecie, sono state quindi analizzate le seguenti situazioni progettuali:

Combinazione	Situazione	Verifiche
Fondamentale	Fine costruzione - Serbatoio vuoto	Capacità portante
		Calcolo dei cedimenti
	Q=750m ³ /h	Capacità portante
		Scorrimento
		Ribaltamento
	Invaso sperimentale	Capacità portante
		Scorrimento
		Ribaltamento
Eccezionale	Piena duecentennale	Capacità portante
		Scorrimento
		Ribaltamento
	Piena millenaria	Capacità portante
		Scorrimento
		Ribaltamento
Sisma	SLV	Capacità portante
		Scorrimento
		Ribaltamento
	SLC	Capacità portante
		Scorrimento
		Ribaltamento
	SLD	Capacità portante
		Scorrimento
		Ribaltamento

Tabella 11. Situazioni progettuali analizzate manufatto regolatore-

Per la parte di sbarramento esistente che rimane in opera, saranno considerate le stesse situazioni progettuali considerate per la parte in adeguamento, a meno delle verifiche a ribaltamento e a scorrimento.

Ovviamente in questo caso non saranno condotte stime del cedimento atteso.

5.2 Modalità e criteri di calcolo

5.2.1 Capacità portante e scorrimento

Il calcolo del valore limite della capacità portante è stato condotto con la classica formula di Brinch-Hansen (1970; doc. rif.[18]).

Nel caso di fondazione su terreni a granulometria fine, la formula di Brinch Hansen è espressa nella forma:

$$q_{lim} = c_u \cdot N_c + \gamma \cdot D$$

in cui:

c_u = coesione in condizioni non drenate

N_c = coefficiente di capacità portante = 5.14

γ = peso di volume del terreno di fondazione

D = affondamento del piano di posa della fondazione

Per le verifiche in condizioni drenate, la formula è invece applicata nella forma:

$$q_{lim} = 0.5 \gamma' B' N_{\gamma i_{\gamma} d_{\gamma}} + q' N_{q i_q d_q} + c' N_{c i_c d_c}$$

in cui, tenuto conto delle condizioni specifiche, si ha:

$B' = B - 2e$ = larghezza efficace della fondazione, ridotta in funzione dell'eccentricità del carico

B = larghezza della fondazione

$e = M/N$ = eccentricità del carico

q' = carico geostatico alla profondità del piano di posa

c' = coesione intercetta del terreno di fondazione

$N_q = [(1 + \sin \varphi') / (1 - \sin \varphi')] \cdot e^{\pi \cdot \tan \varphi'}$ = fattore di capacità portante

$N_{\gamma} = 1.5 \cdot (N_q - 1) \tan \varphi'$ = fattore di capacità portante

$N_c = (N_q - 1) / \tan \varphi'$ = fattore di capacità portante

$i_{\gamma} = (1 - H/N)^3$ = fattore di inclinazione del carico

$i_q = (1 - H/N)^2$ = fattore di inclinazione del carico

$i_c = i_q$ = fattore di inclinazione del carico

$d_\gamma = 1.0$ = fattore di profondità

$d_q = 1 + 2 \tan \varphi' \cdot (1 - \sin \varphi') \cdot 2 \cdot D/B'$ = fattore di profondità

$d_c = (d_q \cdot N_q - 1) / (N_q - 1)$ = fattore di profondità

avendo considerato la fondazione come nastriforme e tenuto conto che sia il piano di fondazione che il piano di campagna sono orizzontali.

Per la verifica a scorrimento deve essere:

$$H \cdot \gamma_A \leq N \gamma_A \cdot (\tan \varphi') / \gamma_M$$

essendo H e N le risultanti rispettivamente delle azioni orizzontali e verticali in fondazione, e φ' l'angolo di resistenza a taglio al contatto struttura - terreno di fondazione.

Le verifiche a scorrimento in condizioni statiche sono state condotte trascurando, in via cautelativa, la presenza del dente in fondazione e delle travi di contrasto per i tratti longitudinali all'alveo del fiume, contrapposti.

Solo per le verifiche in condizioni sismiche si è considerato il dente in fondazione, appositamente introdotto.

5.2.2 Ribaltamento

La verifica a ribaltamento è effettuata confrontando i momenti, rispetto al filo di valle dell'intradosso fondazione, delle azioni ribaltanti con quello delle azioni stabilizzanti. Come anticipato in precedenza, si applicano i fattori di sicurezza parziali γ_R previsti dalle NTC 2018 per i muri, differenziati fra condizioni statiche e sismiche.

5.2.3 Cedimenti

Il cedimento è stato calcolato, limitatamente alle opere di nuova esecuzione, suddividendo idealmente il terreno in n “straterelli” orizzontali, mediante l'espressione:

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{[\Delta\sigma_{zi} - \mu \cdot (\Delta\sigma_{xi} + \Delta\sigma_{yi})]}{E_i} \cdot \Delta h_i$$

in cui:

s = cedimento

n = numero di suddivisioni

E = modulo elastico del terreno nello straterello i -esimo

Δh_i = spessore dello straterello i -esimo

$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$ = incrementi di sforzo totale nel terreno

x, y, z = coordinate geometriche di riferimento

μ = coefficiente di Poisson = 0.30

Il calcolo è stato interrotto a una profondità tale che:

$$\Delta\sigma_v / \sigma'_{v0} > 0.10$$

essendo:

σ'_{v0} = sforzo efficace verticale preesistente all'applicazione del carico

L'incremento delle tensioni nel terreno è stato calcolato seguendo la formulazione di Jumikis (1971, doc. rif. [19]) per carichi uniformi su aree di carico nastriformi rettangolari, secondo cui:

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi} \cdot \left[\tan^{-1} \left(\frac{x+B}{z} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{x-B}{z} \right) - \frac{z \cdot (x-B)}{(x-B)^2 + z^2} + \frac{z \cdot (x+B)}{(x+B)^2 + z^2} \right]$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{q}{\pi} \cdot \left[\tan^{-1} \left(\frac{x+B}{z} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{x-B}{z} \right) - \frac{z \cdot (x-B)}{(x-B)^2 + z^2} + \frac{z \cdot (x+B)}{(x+B)^2 + z^2} \right]$$

$$\Delta\sigma_y = \mu \cdot (\Delta\sigma_z + \Delta\sigma_x)$$

in cui:

x, y, z = coordinate geometriche di riferimento secondo la convenzione indicata nella figura seguente (y = direzione orizzontale ortogonale al piano della sezione)

q = intensità del carico

B = semi-larghezza dell'area di carico

μ = coefficiente di Poisson

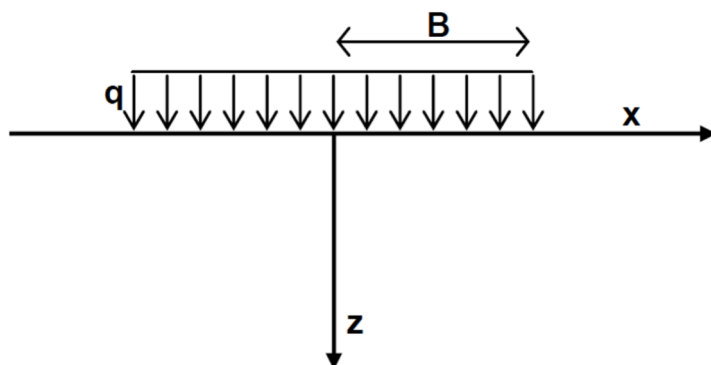


Figura 8 – Schema di carico uniforme e convenzioni

6 VERIFICHE MANUFATTO DI REGOLAZIONE

6.1 Stratigrafia e parametri di calcolo

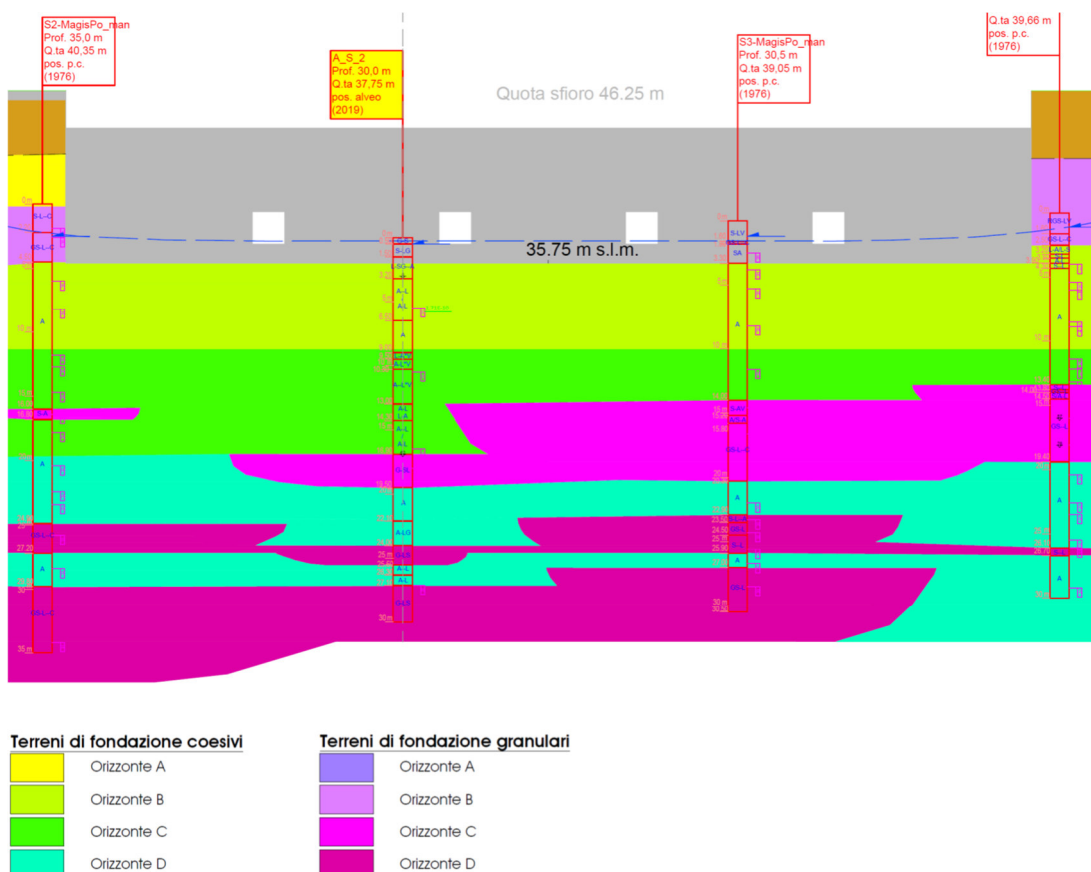
La stratigrafia di riferimento vede, nell'ambito delle profondità di interesse e procedendo dal piano di imposta alla quota 35.25 m s.l.m.:

0.0 ÷ 1.0 m riporto ghiaioso-sabbioso (bonifica)

1.0 ÷ 6.2 m orizzonte a granulometria fine "B" (doc. rif. [2] e allegati)

6.2 ÷ (10 / 14.5) m orizzonte a granulometria fine "C" (doc. rif. [2] e allegati)

Lo spessore dell'orizzonte a granulometria fine "C" varia lungo lo sviluppo longitudinale del manufatto.



A profondità maggiori, i depositi coesivi sono intercalati a depositi a comportamento granulare caratterizzati da buone proprietà meccanica, che sono stati trascurati in via cautelativa.

Nelle verifiche SLU si considereranno i carichi applicati all'orizzonte a granulometria fine "B", considerando come carico il peso dello spessore di bonifica; l'orizzonte "C", che ha angolo di attrito leggermente minore del "B", ma coesione intercetta maggiore, sarà trascurato.

Le verifiche sono state condotte in condizioni sia drenate che non drenate per tutte le situazioni progettuali analizzate, tranne per le condizioni sismiche, per le quali sono state considerate solo condizioni non drenate.

I parametri di calcolo assunti per le unità sopra elencati sono i seguenti:

bonifica

$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$	peso di volume
$\varphi' = 38^\circ$	angolo di resistenza a taglio
$c' = 0$	coesione intercetta
$E = 80 \text{ MPa}$	modulo elastico operativo

Orizzonte B a granulometria fine

$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$	peso di volume
$\varphi' = 28.5^\circ$	angolo di resistenza a taglio
$c' = 9$	coesione intercetta
$c_u = 81.4$	coesione non drenata
$E_{ed} = 4.2 \text{ MPa}$	modulo elastico edometrico

Per ogni dettaglio in merito all'inquadramento geologico e geotecnico del sito e alla determinazione conseguente della caratterizzazione stratigrafica e geotecnica si rimanda agli specifici elaborati progettuali.

6.1.1 Risultati verifiche -Adeguamento (muro principale)

6.1.1.1 Combinazione fondamentale - Fine costruzione e serbatoio vuoto

La traversa ha, in media, un volume per unità di lunghezza di circa $73.6 \text{ m}^3/\text{m}$, avendo considerato la presenza delle luci e del coronamento coi relativi montanti di sostegno e pulvini (i cui volumi sono ricavabili dagli elaborati di cui ai doc. rif. [5] e [6]).

Ciò corrisponde a un carico di 1841 kN/m nel senso dello sviluppo longitudinale della traversa, applicato su una base di larghezza 16.2 m .

Nella combinazione considerata, questo è l'unico carico verticale agente, applicato sulla proiezione in fondazione del baricentro della sezione trasversale, con una eccentricità del carico in fondazione di $e = 1.92 \text{ m}$ verso monte.

Applicando la formula di Brinch Hansen alle fondazioni "ideali" descritte nel paragrafo 5.2.1, per la Combinazione 2 dell'Approccio 2 secondo NTC, si ottiene quanto di seguito, avendo considerato la fondazione del tratto centrale ($L=54\text{m}$).

Lo schema sottostante riporta le convenzioni di segno adottate nei calcoli.

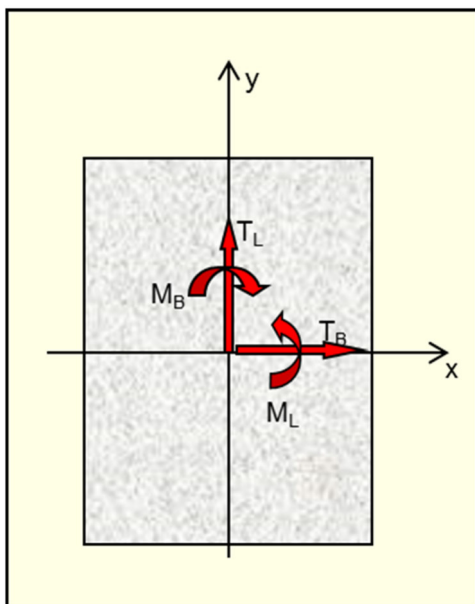


Figura 9. Convenzioni di segno adottate nei calcoli di capacità portante

condizioni non drenate

$$q_{es,d} = 209.5 \text{ kPa}$$

carico medio agente sulla fondazione ideale

$$q_{lim,k} = 589 \text{ kPa}$$

portata limite caratteristica sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 256 \text{ kPa}$$

portata limite di calcolo sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} / q_{es,d} = 1.22 > 1.0$$

B	17,7	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	166521,4	[kN]
L	54,0	[m]	c_u	81,4	[kPa]	N*	166521,4	[kN]
A	955,8	[m ²]				M _B	248137,3	[kNm]
H	1,5	[m]	Nc,s	5,14	[-]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,00	[m]				H _B	0,0	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
B'	14,72	[m]				σ'_{ave}	174,22	[kPa]
L'	54,00	[m]				e _B	1,490	[m]
A'	794,87	[m ²]				e _L	0,000	[m]
						σ_1	66,86	[kPa]
q	57,0	[kPa]				σ_2	105,58	[kPa]
						σ_3	242,87	[kPa]
						σ_4	281,58	[kPa]
q_{es,d}	209,5	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A1+M1+R3			
q_{lim,k}	=	589	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim,\gamma_i} + q_{lim,q_i} + q_{lim,c_i}$			
q_{lim,d}	=	256	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
FS_{calc}	=	1,22			$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$			

condizioni drenate

$q_{es,d} = 209.5 \text{ kPa}$

carico medio agente sulla fondazione ideale

$q_{lim,k} = 1535 \text{ kPa}$

portata limite caratteristica sulla fondazione ideale

$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 667 \text{ kPa}$ portata limite di calcolo sulla fondazione ideale

$q_{lim,d} / q_{es,d} = 3.19 > 1.0$

B	17,7	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	166521,4	[kN]
L	54,0	[m]	ϕ_{PS}	28,5	[°]	N*	166521,4	[kN]
A	955,8	[m ²]	ϕ_{TR}		[°]	M _B	248137,3	[kNm]
H	1,5	[m]	ϕ_{CV}		[°]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,00	[m]	c'	9,0	[kPa]	H _B	0,0	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
h _w	3	[m]	$\gamma_{cB'}$	9,40	[kN/m ³]	σ'_{ave}	174,22	[kPa]
B'	14,72	[m]	$\gamma_{cL'}$	9,25	[kN/m ³]	e _B	1,490	[m]
L'	54,00	[m]	G	699	[kPa]	e _L	0,000	[m]
A'	794,87	[m ²]				σ_1	145,38	[kPa]
						σ_2	203,07	[kPa]
q'	27,6	[kPa]	$\sigma_v (B/2)$	81,4		σ_3	145,38	[kPa]
			$p(B/2)$	53,0		σ_4	203,07	[kPa]
			I _R	24				
q_{es,d}	209,5	[kPa]						
γ_R	=	2,3		A1+M1+R3				
q_{lim,k}	=	1535	[kPa]	$q_{lim,k} = q_{lim, \gamma_i} + q_{lim, q_i} + q_{lim, c_i}$				
q_{lim,d}	=	667	[kPa]	$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$				
FS_{calc}	=	3,19		$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$				

Le verifiche sono dunque soddisfatte.

In questa combinazione i carichi orizzontali sono poco significativi e pressoché bilanciati (si hanno solo i rinterri attorno alla zattera di fondazione, di modesta entità e solo leggermente diversi fra monte e valle della traversa), per cui si omettono le verifiche a scorrimento e ribaltamento.

6.1.1.2 *Combinazione fondamentale – $Q=750\text{m}^3/\text{h}$, bocche chiuse* $Q_w = 48.75 \text{ m s.l.m.}$

Si è considerata solo la situazione corrispondente alla *portata di progetto* $Q=750\text{m}^3/\text{h}$ e *bocche chiuse*, nella quale si ha un dislivello dell'acqua maggiore rispetto a quella corrispondente, ma a bocche aperte, trattata nel seguito; in questa situazione progettuale, il livello dell'acqua a monte della traversa è a quota 48.75 m s.l.m. (sommità scarico di superficie) e a valle a quota 42.95 m s.l.m. .

Le azioni considerate sono le seguenti:

W = peso proprio dell'opera

W_{wm} = peso dell'acqua sulla zattera di monte

W_{wv} = peso dell'acqua sulla zattera di valle

P_{wm} = spinta dell'acqua sul paramento di monte

P_{wv} = spinta dell'acqua sul paramento di valle

U_m = sottospinta alla base della zattera di monte

U_v = sottospinta alla base della zattera di valle

Le sottospinte sono state assunte di entità costante pari alla pressione idrostatica a quota fondazione rispettivamente a monte e a valle, considerando di fatto impermeabili, come detto, il taglione in c.a. e il terreno fine alla base della fondazione, in cui è immorsato.

Lo schema seguente riporta le azioni considerate nelle verifiche di capacità portante e scorrimento, i valori per esse calcolati e i bracci rispetto al baricentro geometrico della sezione, per il calcolo dei momenti in fondazione.

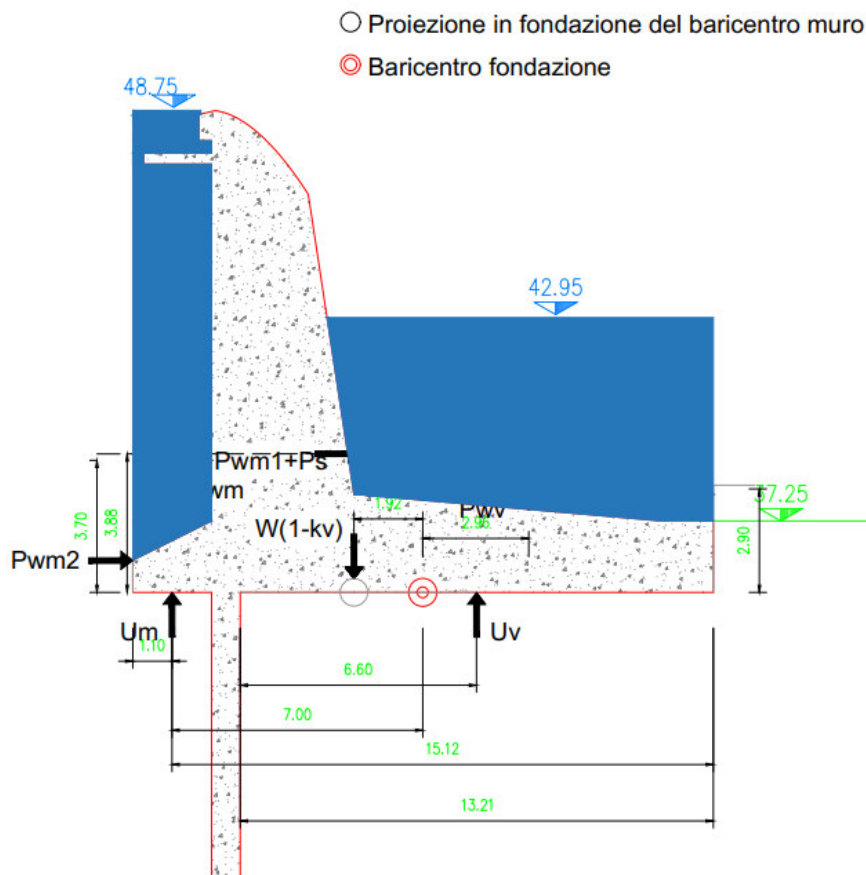


Figura 10 – Man. regolatore: schema per capacità portante e scorrimento: fondamentale $Q = 750\text{m}^3/\text{h}$, $Q_w = 48.75 \text{ m slm}$ / bocche chiuse

V	W	1841,1 kN/m
	Wwm	257 kN/m
	Wwv	665 kN/m
	Um	-291 kN/m
	Uv	-997 kN/m
	S	1475 kN/m

H	Pwm	894 kN/m
	Pwv	-291 kN/m
	S	603 kN/m

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)



Per la verifica a capacità portante, con le stesse assunzioni e ipotesi viste in precedenza, si hanno i risultati riportati nel seguito.



Condizioni drenate

$$q_{es,d} = 137.7 \text{ kPa}$$

carico medio agente sulla fondazione ideale

$$q_{lim,k} = 1702 \text{ kPa}$$

portata limite caratteristica sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 740 \text{ kPa}$$

portata limite di calcolo sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} / q_{es,d} = 5.37 > 1.0$$

B	17,7	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	140821,2	[kN]
L	54,0	[m]	ϕ_{PS}	28,5	[°]	N*	140821,2	[kN]
A	955,8	[m ²]	ϕ_{TR}		[°]	M _B	-87598,7	[kNm]
H	1,5	[m]	ϕ_{cv}		[°]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,00	[m]	c'	9,0	[kPa]	H _B	603,0	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
h _w	3	[m]	$\gamma_{cB'}$	9,35	[kN/m ³]	σ'_{ave}	147,33	[kPa]
B'	18,94	[m]	$\gamma_{cL'}$	9,25	[kN/m ³]	e _B	-0,622	[m]
L'	54,00	[m]	G	699	[kPa]	e _L	0,000	[m]
A'	1022,98	[m ²]				σ_1	157,52	[kPa]
q'	27,6	[kPa]	$\sigma_v (B/2)$	81,4		σ_2	137,15	[kPa]
			p(B/2)	53,0		σ_3	157,52	[kPa]
			I _R	24		σ_4	137,15	[kPa]
q_{es,d}	137,7	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A1+M1+R3			
q_{lim,k}	=	1702	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim,\gamma_i} + q_{lim,q_i} + q_{lim,ci}$			
q_{lim,d}	=	740	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
FS_{calc}	=	5,37			$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$			

Condizioni non drenate

$$q_{es,d} = 137.7 \text{ kPa}$$

carico medio agente sulla fondazione ideale

$$q_{lim,k} = 589 \text{ kPa}$$

portata limite caratteristica sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 256 \text{ kPa}$$

portata limite di calcolo sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} / q_{es,d} = 1.86 > 1.0$$

B	17,7	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	140821,2	[kN]
L	54,0	[m]	c_u	81,4	[kPa]	N*	140821,2	[kN]
A	955,8	[m ²]				M _B	-87598,7	[kNm]
H	1,5	[m]	Nc,s	5,14	[-]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,00	[m]				H _B	603,0	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
B'	18,94	[m]				σ'_{ave}	147,33	[kPa]
L'	54,00	[m]				e _B	-0,622	[m]
A'	1022,98	[m ²]				e _L	0,000	[m]
						σ_1	157,52	[kPa]
q	57,0	[kPa]				σ_2	137,15	[kPa]
						σ_3	157,52	[kPa]
						σ_4	137,15	[kPa]
q_{es,d}	137,7	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A1+M1+R3			
q_{lim,k}	=	589	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim,\gamma_i} + q_{lim,q_i} + q_{lim,ci}$			
q_{lim,d}	=	256	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
FS_{calc}	=	1,86			$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$			

Le verifiche di capacità portante sono dunque soddisfatte in condizioni sia drenate sia non drenate.

Per la verifica a scorrimento sul piano di fondazione (interfaccia fra l'intradosso della traversa e lo strato ghiaioso-sabbioso di bonifica), si ha, sempre in combinazione A1+M1+R3:

$$\Sigma H = 603 \text{ kN/m} \quad \text{risultante delle azioni orizzontali}$$

$$\Sigma V = 1475 \text{ kN/m} \quad \text{risultante delle azioni verticali}$$

$$(\Sigma V \cdot \tan \varphi / \gamma_M) / \Sigma H \cdot \gamma_E = 1048 / 784 = 1.34 > 1.15 = \gamma_R$$

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)



La verifica è dunque soddisfatta.

La figura seguente riporta ancora lo schema delle azioni, coi bracci delle stesse valutati rispetto al filo di valle dell'intradosso traversa, per la verifica a ribaltamento.

$$M_{rib} = U_m \cdot 15.10 + U_v \cdot 6.60 + P_{wm} \cdot 4.50 = 14998 \text{ kNm/m}$$

$$M_{stab} = W_{wm} \cdot 15.10 + W_{wv} \cdot 5.21 + W \cdot 10.02 + P_{wv} \cdot 2.60 = 26537 \text{ kNm/m}$$

$$FS_{rib} = (M_{stab} / 1.15) / M_{rib} = 1.54 > 1.0$$

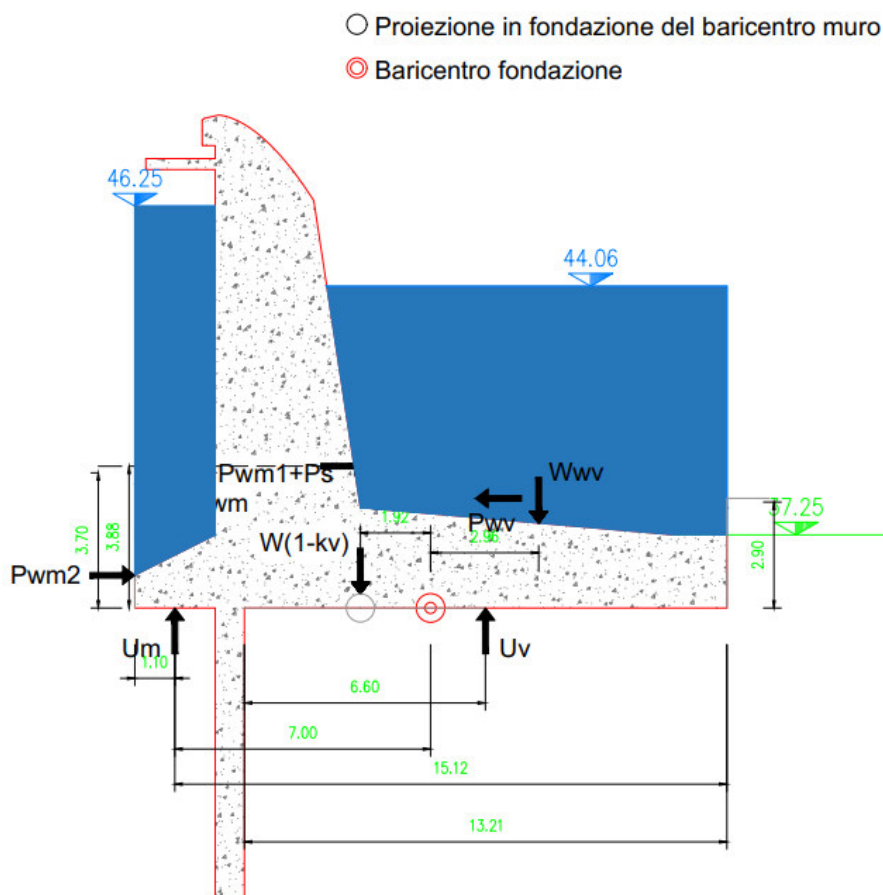
La verifica è dunque soddisfatta.

6.1.1.3 Combinazione fondamentale – $Q=750\text{m}^3/\text{h}$, bocche aperte $Q_w = 46.25 \text{ m s.l.m.}$

Si è considerata solo la situazione corrispondente alla *portata di progetto* $Q=750\text{m}^3/\text{h}$ con bocche aperte,; in questa situazione progettuale, il livello dell'acqua a monte della traversa è a quota 46.25 m s.l.m. (sommità scarico di superficie) e a valle a quota 44.06 m s.l.m. .

Le azioni considerate sono le stesse considerate nella combinazione a bocche chiuse (ref. 6.1.1.2).

Lo schema seguente riporta le azioni considerate nelle verifiche di capacità portante e scorrimento, i valori per esse calcolati e i bracci rispetto al baricentro geometrico della sezione, per il calcolo dei momenti in fondazione.



**Figura 11 – Man. regolatore: schema per capacità portante e scorrimento: fondamentale
 $Q=750\text{m}^3/\text{h}$, $Q_w = 48.75 \text{ m s.l.m.}$ / bocche aperte**

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)



V	W	1841,1 kN/m
	W _{wm}	206 kN/m
	W _{wv}	737 kN/m
	U _m	-237 kN/m
	U _v	-1141 kN/m
	S	1406 kN/m

H	P _{wm}	594 kN/m
	P _{wv}	-381 kN/m
	S	213 kN/m

Per la verifica a capacità portante, con le stesse assunzioni e ipotesi viste in precedenza, si hanno i risultati riportati nel seguito.

Condizioni drenate

$q_{es,d} = 116.9 \text{ kPa}$ carico medio agente sulla fondazione ideale
 $q_{lim,k} = 1825 \text{ kPa}$ portata limite caratteristica sulla fondazione ideale
 $q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 794 \text{ kPa}$ portata limite di calcolo sulla fondazione ideale
 $q_{lim,d} / q_{es,d} = 6.79 > 1.0$

B	17,7	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	135998,5	[kN]
L	54,0	[m]	ϕ_{PS}	28,5	[°]	N*	135998,5	[kN]
A	955,8	[m ²]	ϕ_{TR}		[°]	M _B	-261984,2	[kNm]
H	1,5	[m]	ϕ_{CV}		[°]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,00	[m]	c'	9,0	[kPa]	H _B	212,8	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
h _w	3	[m]	$\gamma_{cB'}$	9,33	[kN/m ³]	σ'_{ave}	142,29	[kPa]
B'	21,55	[m]	$\gamma_{cL'}$	9,25	[kN/m ³]	e _B	-1,926	[m]
L'	54,00	[m]	G	699	[kPa]	e _L	0,000	[m]
A'	1163,85	[m ²]				σ_1	172,74	[kPa]
						σ_2	111,83	[kPa]
q'	27,6	[kPa]	$\sigma_v (B/2)$	81,4		σ_3	172,74	[kPa]
			p(B/2)	53,0		σ_4	111,83	[kPa]
			I _R	24				
q_{es,d}	116,9	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A1+M1+R3			
q_{lim,k}	=	1825	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim,\gamma_i} + q_{lim,q_i} + q_{lim,c_i}$			
q_{lim,d}	=	794	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
FS_{calc}	=	6,79			$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$			

Condizioni non drenate

$$q_{es,d} = 132.6 \text{ kPa}$$

carico medio agente sulla fondazione ideale

$$q_{lim,k} = 589 \text{ kPa}$$

portata limite caratteristica sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 256 \text{ kPa}$$

portata limite di calcolo sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} / q_{es,d} = 1.93 > 1.0$$

B	17,7	[m]		γ	19,0	[kN/m ³]		N	135998,5	[kN]
L	54,0	[m]		c_u	81,4	[kPa]		N*	135998,5	[kN]
A	955,8	[m ²]						M _B	-87598,7	[kNm]
H	1,5	[m]		Nc,s	5,14	[-]		M _L	0,0	[kNm]
D	3,00	[m]						H _B	603,0	[kN]
Z _w	0,00	[m]						H _L	0,0	[kN]
B'	18,99	[m]						σ'_{ave}	142,29	[kPa]
L'	54,00	[m]						e _B	-0,644	[m]
A'	1025,36	[m ²]						e _L	0,000	[m]
								σ_1	152,47	[kPa]
q	57,0	[kPa]						σ_2	132,10	[kPa]
								σ_3	152,47	[kPa]
								σ_4	132,10	[kPa]
q_{es,d}	132,6	[kPa]								
γ_R	=	2,3				A1+M1+R3				
q_{lim,k}	=	589	[kPa]			$q_{lim,k} = q_{lim,\gamma_i} + q_{lim,q_i} + q_{lim,c_i}$				
q_{lim,d}	=	256	[kPa]			$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$				
FS_{calc}	=	1,93				$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$				

Le verifiche di capacità portante sono dunque soddisfatte in condizioni sia drenate sia non drenate.

Per la verifica a scorrimento sul piano di fondazione (interfaccia fra l'intradosso della traversa e lo strato ghiaioso-sabbioso di bonifica), si ha, sempre in combinazione A1+M1+R3:

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)



$\Sigma H = 213 \text{ kN/m}$ risultante delle azioni orizzontali

$\Sigma V = 1406 \text{ kN/m}$ risultante delle azioni verticali

$$(\Sigma V \cdot \tan \varphi / \gamma_M) / \Sigma H \cdot \gamma_E = 999/277 = 2.4 > 1.15 = \gamma_R$$

La verifica è dunque soddisfatta.

La figura seguente riporta ancora lo schema delle azioni, coi bracci delle stesse valutati rispetto al filo di valle dell'intradosso traversa, per la verifica a ribaltamento.

$$M_{\text{rib}} = U_m \cdot 15.10 + U_v \cdot 6.60 + P_{\text{wm}} \cdot 3.7 = 13290 \text{ kNm/m}$$

$$M_{\text{stab}} = W_{\text{wm}} \cdot 15.10 + W_{\text{wv}} \cdot 5.21 + W \cdot 10.02 + P_{\text{wv}} \cdot 2.90 = 26519 \text{ kNm/m}$$

$$FS_{\text{rib}} = (M_{\text{stab}} / 1.15) / M_{\text{rib}} = 1.74 > 1.0$$

La verifica è dunque soddisfatta.

6.1.1.4 Combinazione fondamentale – Invaso Sperimentale (statica)

Si è considerata una situazione statica, nella quale si ha un livello dell'acqua a monte della traversa a quota 46.25 m s.l.m. (sommità scarico di superficie) e assenza di acqua a valle considerando come quota quella del fondo pari a 37.25 m s.l.m. .

Lo schema seguente riporta le azioni considerate nelle verifiche di capacità portante e scorrimento, i valori per esse calcolati e i bracci rispetto al baricentro geometrico della sezione, per il calcolo dei momenti in fondazione.

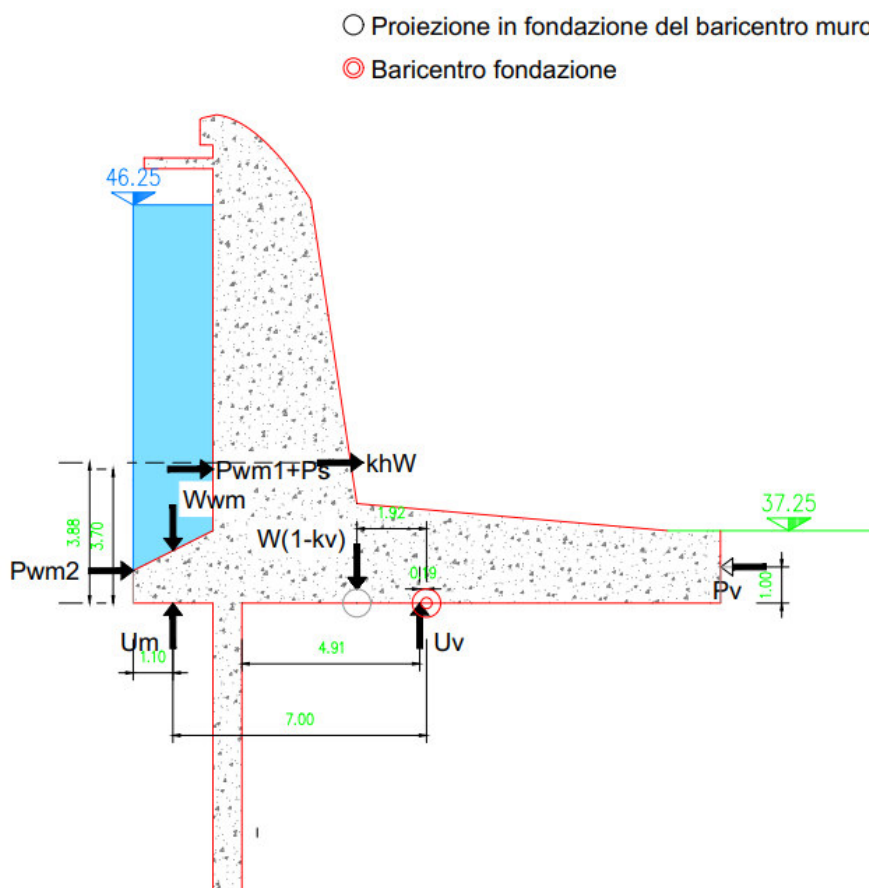


Figura 12 – Invaso Sperimentale: schema per capacità portante e scorrimento: statica

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente



MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

V	W	1841,1 kN/m
	W _{wm}	206 kN/m
	W _{wv}	0 kN/m
	U _m	-177,60 kN/m
	U _v	-276,87 kN/m
	S	1593 kN/m

H	P _{wm}	594 kN/m
	P _{wm2}	20 kN/m
	P _v	-19,6 kN/m
	S	594 kN/m

Per la verifica a capacità portante, con le stesse assunzioni e ipotesi viste in precedenza, si hanno i risultati riportati nel seguito.

Condizioni drenate

$$q_{es,d} = 137.9 \text{ kPa}$$

carico medio agente sulla fondazione ideale

$$q_{lim,k} = 1749 \text{ kPa}$$

portata limite caratteristica sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 760 \text{ kPa}$$

portata limite di calcolo sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} / q_{es,d} = 5.51 > 1.0$$

B	17,7	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	149085,8	[kN]
L	54,0	[m]	ϕ_{PS}	28,5	[°]	N*	149085,8	[kN]
A	955,8	[m ²]	ϕ_{TR}		[°]	M _B	-172502,2	[kNm]
H	1,5	[m]	ϕ_{CV}		[°]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,00	[m]	c'	9,0	[kPa]	H _B	593,9	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
h _w	3	[m]	$\gamma_{cB'}$	9,34	[kN/m ³]	σ'_{ave}	155,98	[kPa]
B'	20,01	[m]	$\gamma_{cL'}$	9,25	[kN/m ³]	e _B	-1,157	[m]
L'	54,00	[m]	G	699	[kPa]	e _L	0,000	[m]
A'	1080,8	[m ²]				σ_1	176,03	[kPa]
						σ_2	135,93	[kPa]
q'	27,6	[kPa]	$\sigma_v (B/2)$	81,4		σ_3	176,03	[kPa]
			$p_{(B/2)}$	53,0		σ_4	135,93	[kPa]
			I _R	24				
q_{es,d}	137,9	[kPa]						
γ_R	=	2,3		A1+M1+R3				
q_{lim,k}	=	1749	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim,yi} + q_{lim,qi} + q_{lim,ci}$			
q_{lim,d}	=	760	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
FS_{calc}	=	5,51			$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$			

Condizioni non drenate

$$q_{es,d} = 137.9 \text{ kPa}$$

carico medio agente sulla fondazione ideale

$$q_{lim,k} = 589 \text{ kPa}$$

portata limite caratteristica sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 256 \text{ kPa}$$

portata limite di calcolo sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} / q_{es,d} = 1.86 > 1.0$$

B	17,7	[m]		γ	19,0	[kN/m ³]		N	149085,8	[kN]
L	54,0	[m]		c_u	81,4	[kPa]		N*	149085,8	[kN]
A	955,8	[m ²]						M _B	-172502,2	[kNm]
H	1,5	[m]		Nc,s	5,14	[-]		M _L	0,0	[kNm]
D	3,00	[m]						H _B	593,9	[kN]
Z _w	0,00	[m]						H _L	0,0	[kN]
B'	20,01	[m]						σ'_{ave}	155,98	[kPa]
L'	54,00	[m]						e _B	-1,157	[m]
A'	1080,76	[m ²]						e _L	0,000	[m]
								σ_1	176,03	[kPa]
q	57,0	[kPa]						σ_2	135,93	[kPa]
								σ_3	176,03	[kPa]
								σ_4	135,93	[kPa]
q_{es,d}	137,9	[kPa]								
γ_R	=	2,3				A1+M1+R3				
q_{lim,k}	=	589	[kPa]			$q_{lim,k} = q_{lim,\gamma_i} + q_{lim,q_i} + q_{lim,c_i}$				
q_{lim,d}	=	256	[kPa]			$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$				
FS_{calc}	=	1,86				$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$				

Le verifiche di capacità portante sono dunque soddisfatte in condizioni sia drenate sia non drenate.

Per la verifica a scorrimento sul piano di fondazione (**interfaccia fra l'intradosso della traversa e lo strato ghiaioso-sabbioso di bonifica**), si ha, sempre in combinazione

A1+M1+R3:

$\Sigma H = 594 \text{ kN/m}$ risultante delle azioni orizzontali

$\Sigma V = 1593 \text{ kN/m}$ risultante delle azioni verticali

$$(\Sigma V \cdot \tan \varphi / \gamma_M) / \Sigma H \cdot \gamma_E = 1131 / 772 = 1.47 > 1.15 = \gamma_R$$

La verifica è dunque soddisfatta.

La figura seguente riporta ancora lo schema delle azioni, coi bracci delle stesse valutati rispetto al filo di valle dell'intradosso traversa, per la verifica a ribaltamento.

$$M_{rib} = U_m \cdot 15.10 + U_v \cdot 6.60 + P_{wm} \cdot 3.7 = 7176 \text{ kNm/m}$$

$$M_{stab} = W_{wm} \cdot 15.10 + W \cdot 10.02 + P_{wv} \cdot 2.90 = 21579 \text{ kNm/m}$$

$$FS_{rib} = (M_{stab} / 1.15) / M_{rib} = 2.61 > 1.0$$

La verifica è dunque soddisfatta.

6.1.1.5 Combinazione eccezionale – Piena duecentennale

La piena di riferimento con tempo di ritorno pari a 200 anni è stata individuata come rappresentativa delle condizioni più gravose, per quanto già argomentato in precedenza; in tale evenienza, il livello dell'acqua è previsto a quota 49.83 m s.l.m. a monte della traversa, e a quota 44.53 m s.l.m. a valle.

Il valore delle azioni nel caso in esame è riportato di seguito; i termini hanno lo stesso significato già visto per la combinazione fondamentale precedente, salvo ove diversamente specificato.

$$W = 1841 \text{ kN/m}$$

$$W_{wm} = 279.3 \text{ kN/m}$$

$$W_{wv} = 710.6 \text{ kN/m}$$

$$P_{wm1} = 143 \text{ kN/m} \quad \text{componente rettangolare della spinta dell'acqua di monte}$$

$$P_{wm2} = 893.9 \text{ kN/m} \quad \text{componente triangolare della spinta dell'acqua di monte}$$

$$P_{wv} = 422 \text{ kN/m}$$

$$U_m = 261.7 \text{ kN/m}$$

$$U_v = 1106 \text{ kN/m}$$

La componente rettangolare della spinta di monte è applicata ad $H/2$, essendo $H=13.5 \text{ m}$ l'altezza della traversa; la componente triangolare è applicata a distanza $H/3$ dall'intradosso fondazione.

Condizioni drenate

B	17,7	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	140018,1	[kN]
L	54,0	[m]	ϕ_{PS}	28,5	[°]	N*	140018,1	[kN]
A	955,8	[m ²]	ϕ_{TR}		[°]	M _B	100089,5	[kNm]
H	1,5	[m]	ϕ_{CV}		[°]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,25	[m]	c'	9,0	[kPa]	H _B	43142,5	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
h _w	3,25	[m]	$\gamma_{cB'}$	9,39	[kN/m ³]	σ'_{ave}	146,49	[kPa]
B'	16,27	[m]	$\gamma_{cL'}$	9,25	[kN/m ³]	e _B	0,715	[m]
L'	54,00	[m]	G	699	[kPa]	e _L	0,000	[m]
A'	878,60	[m ²]				σ_1	134,86	[kPa]
						σ_2	158,13	[kPa]
q'	29,9	[kPa]	$\sigma_v (B/2)$	81,4		σ_3	134,86	[kPa]
			p(B/2)	53,0		σ_4	158,13	[kPa]
			I _R	24				
q _{es,d}	159,4	[kPa]						
γ_R	=	2,3		A1+M1+R3				
q _{lim,k}	=	608	[kPa]		q _{lim,k} = q _{lim,γi} + q _{lim,qi} + q _{lim,ci}			
q _{lim,d}	=	264	[kPa]		q _{lim,d} = q _{lim,k} / γ_R			
FS _{calc}	=	1,66			FS _{calc} = q _{lim,d} / q _{es,d}			

q_{es,d} = 159.4 kPa

carico medio agente sulla fondazione ideale

q_{lim,k} = 608 kPa

portata limite caratteristica sulla fondazione ideale

q_{lim,d} = q_{lim,k} / γ_R (R3) = 264 kPa

portata limite di calcolo sulla fondazione ideale

q_{lim,d} / q_d = 1.66 > 1.0

Condizioni non drenate

$$q_{es,d} = 159.4 \text{ kPa}$$

carico medio agente sulla fondazione ideale

$$q_{lim,k} = 619 \text{ kPa}$$

portata limite caratteristica sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 269 \text{ kPa}$$

portata limite di calcolo sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} / q_{es,d} = 1.69 > 1.0$$

B	17,7	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	140018,1	[kN]
L	54,0	[m]	c_u	81,4	[kPa]	N*	140018,1	[kN]
A	955,8	[m ²]				M _B	100089,5	[kNm]
H	1,5	[m]	Nc,s	5,14	[-]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,25	[m]				H _B	43142,5	[kN]
z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
B'	16,27	[m]				σ'_{ave}	146,49	[kPa]
L'	54,00	[m]				e _B	0,715	[m]
A'	878,60	[m ²]				e _L	0,000	[m]
q	61,8	[kPa]				σ_1	134,86	[kPa]
						σ_2	158,13	[kPa]
						σ_3	134,86	[kPa]
						σ_4	158,13	[kPa]
q_{es,d}	159,4	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A1+M1+R3			
q_{lim,k}	=	619	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim,gi} + q_{lim,qi} + q_{lim,ci}$			
q_{lim,d}	=	269	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
FS_{calc}	=	1,69			$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$			

Le verifiche (condotte, come in precedenza, per il tratto di struttura centrale, di 54m di lunghezza) sono dunque soddisfatte in condizioni sia drenate che non drenate, anche per questa combinazione.

Per la verifica a scorrimento sul piano di fondazione (interfaccia fra l'intradosso della traversa e lo strato ghiaioso-sabbioso di bonifica), si ha, sempre in combinazione A1+M1+R3:

$$\Sigma H = 615 \text{ kN/m} \quad \text{risultante delle azioni orizzontali}$$

$$\Sigma V = 1464 \text{ kN/m} \quad \text{risultante delle azioni verticali}$$

$$(\Sigma V \cdot \tan \phi / \gamma_M / \Sigma H \cdot \gamma_E = 1040 / 799 = 1.30 > 1.15 = \gamma_R$$

La verifica è dunque soddisfatta.

Per la verifica a ribaltamento si ha:

$$M_{rib} = U_m \cdot 15.10 + U_v \cdot 6.6 + P_{wm1} \cdot 6.8 + P_{wm2} \cdot 4.50 = 16238 \text{ kNm/m}$$

$$M_{stab} = W_{wm} \cdot 15.10 + W_{wv} \cdot 5.21 + W \cdot 10.02 + P_{wv} \cdot 3.1 = 27674 \text{ kNm/m}$$

$$FS_{rib} = (M_{stab} / 1.15) / M_{rib} = 1.48 > 1.0$$

La verifica è dunque soddisfatta.

La combinazione eccezionale è anche quella più significativa per quanto riguarda le verifiche a sollevamento della struttura; considerando i valori dei carichi verticali e delle sottospinte idrauliche sopra indicati, si ha:

$$\Sigma U = -1367 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma W = 2831 \text{ kN/m}$$

$$FS_{upl} = 0.9 \cdot \Sigma W / (1.1 \cdot \Sigma U) = 1.69 > 1.0$$

E anche in questo caso la verifica risulta soddisfatta.

6.1.1.6 Combinazione eccezionale – Piena millenaria

La piena di riferimento con tempo di ritorno pari a 1000 anni è stata individuata come rappresentativa delle condizioni più gravose, per quanto già argomentato in precedenza; in tale evenienza, il livello dell'acqua è previsto a quota 50.24 m s.l.m. a monte della traversa, e a quota 45.25 m s.l.m. a valle.

Il valore delle azioni nel caso in esame è riportato di seguito; i termini hanno lo stesso significato già visto per la combinazione fondamentale precedente, salvo ove diversamente specificato.

$$W = 1841 \text{ kN/m}$$

$$W_{wm} = 288.8 \text{ kN/m}$$

$$W_{wv} = 785 \text{ kN/m}$$

$$P_{wm1} = 197 \text{ kN/m} \quad \text{componente rettangolare della spinta dell'acqua di monte}$$

$$P_{wm2} = 893.6 \text{ kN/m} \quad \text{componente triangolare della spinta dell'acqua di monte}$$

$$P_{wv} = 422 \text{ kN/m}$$

$$U_m = 271 \text{ kN/m}$$

$$U_v = 1189 \text{ kN/m}$$

La componente rettangolare della spinta di monte è applicata ad $H/2$, essendo $H=13.5 \text{ m}$ l'altezza della traversa; la componente triangolare è applicata a distanza $H/3$ dall'intradosso fondazione.

Condizioni drenate

$q_{es,d} = 158.9 \text{ kPa}$

carico medio agente sulla fondazione ideale

$q_{lim,k} = 620 \text{ kPa}$

portata limite caratteristica sulla fondazione ideale

$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 270 \text{ kPa}$ portata limite di calcolo sulla fondazione ideale

$q_{lim,d} / q_{es,d} = 1.70 > 1.0$

B	17,7	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	139376,8	[kN]
L	54,0	[m]	ϕ_{PS}	28,5	[°]	N*	139376,8	[kN]
A	955,8	[m ²]	ϕ_{TR}		[°]	M _B	101548,9	[kNm]
H	1,5	[m]	ϕ_{CV}		[°]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,25	[m]	c'	9,0	[kPa]	H _B	42154,5	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
h _w	3,25	[m]	$\gamma_{cB'}$	9,39	[kN/m ³]	σ'_{ave}	145,82	[kPa]
B'	16,24	[m]	$\gamma_{cL'}$	9,25	[kN/m ³]	e _B	0,729	[m]
L'	54,00	[m]	G	699	[kPa]	e _L	0,000	[m]
A'	877,11	[m ²]				σ_1	134,02	[kPa]
						σ_2	157,63	[kPa]
q'	29,9	[kPa]	$\sigma_v (B/2)$	81,4		σ_3	134,02	[kPa]
			$p(B/2)$	53,0		σ_4	157,63	[kPa]
			I _R	24				
q_{es,d}	158,9	[kPa]						
γ_R	=	2,3		A1+M1+R3				
q_{lim,k}	=	620	[kPa]	$q_{lim,k} = q_{lim,\gamma_i} + q_{lim,q_i} + q_{lim,c_i}$				
q_{lim,d}	=	270	[kPa]	$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$				
FS_{calc}	=	1,70		$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$				

Condizioni non drenate

$q_{es,d} = 158.9 \text{ kPa}$

carico medio agente sulla fondazione ideale

$q_{lim,k} = 619 \text{ kPa}$

portata limite caratteristica sulla fondazione ideale

$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 269 \text{ kPa}$ portata limite di calcolo sulla fondazione ideale

$q_{lim,d} / q_{es,d} = 1.69 > 1.0$

B	17,7	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	139376,8	[kN]
L	54,0	[m]	c_u	81,4	[kPa]	N*	139376,8	[kN]
A	955,8	[m ²]				M _B	101548,9	[kNm]
H	1,5	[m]	Nc,s	5,14	[-]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,25	[m]				H _B	42154,5	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
B'	16,24	[m]				σ'_{ave}	145,82	[kPa]
L'	54,00	[m]				e _B	0,729	[m]
A'	877,11	[m ²]				e _L	0,000	[m]
						σ_1	134,02	[kPa]
q	61,8	[kPa]				σ_2	157,63	[kPa]
						σ_3	134,02	[kPa]
						σ_4	157,63	[kPa]
q_{es,d}	158,9	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A1+M1+R3			
q_{lim,k}	=	619	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim, \gamma_i} + q_{lim, q_i} + q_{lim, c_i}$			
q_{lim,d}	=	269	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
FS_{calc}	=	1,69			$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$			

Le verifiche (condotte, come in precedenza, per il tratto di struttura centrale, di 54m di lunghezza) sono dunque soddisfatte in condizioni sia drenate che non drenate, anche per questa combinazione.

Per la verifica a scorrimento sul piano di fondazione (interfaccia fra l'intradosso della traversa e lo strato ghiaioso-sabbioso di bonifica), si ha, sempre in combinazione A1+M1+R3:

$\Sigma H = 600 \text{ kN/m}$ risultante delle azioni orizzontali

$\Sigma V = 1454 \text{ kN/m}$ risultante delle azioni verticali

$(\Sigma V \cdot \tan \phi / \gamma_M / \Sigma H \cdot \gamma_E = 1033 / 781 = 1.30 > 1.15 = \gamma_R$

La verifica è dunque soddisfatta.

Per la verifica a ribaltamento si ha:

$$M_{rib} = U_m \cdot 15.10 + U_v \cdot 6.6 + P_{wm1} \cdot 6.8 + P_{wm2} \cdot 4.50 = 17298 \text{ kNm/m}$$

$$M_{stab} = W_{wm} \cdot 15.10 + W_{wv} \cdot 5.21 + W \cdot 10.02 + P_{wv} \cdot 3.1 = 28553 \text{ kNm/m}$$

$$FS_{rib} = (M_{stab} / 1.15) / M_{rib} = 1.44 > 1.0$$

La verifica è dunque soddisfatta.

La combinazione eccezionale è anche quella più significativa per quanto riguarda le verifiche a sollevamento della struttura; considerando i valori dei carichi verticali e delle sottospinte idrauliche sopra indicati, si ha:

$$\Sigma U = -1461 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma W = 2915 \text{ kN/m}$$

$$FS_{upl} = 0.9 \cdot \Sigma W / (1.1 \cdot \Sigma U) = 1.63 > 1.0$$

E anche in questo caso la verifica risulta soddisfatta.

6.1.1.7 Combinazioni sismiche SLV-SLC-SLD

Le verifiche per la combinazione sismica sono state condotte con riferimento alle sole condizioni non drenate del terreno di fondazione, data la transitorietà e la breve durata del fenomeno, che non consente la dissipazione delle sovrappressioni interstiziali.

Di seguito è riportato lo schema delle azioni di riferimento per le verifiche di capacità portante e resistenza allo scorrimento, in condizioni sismiche.

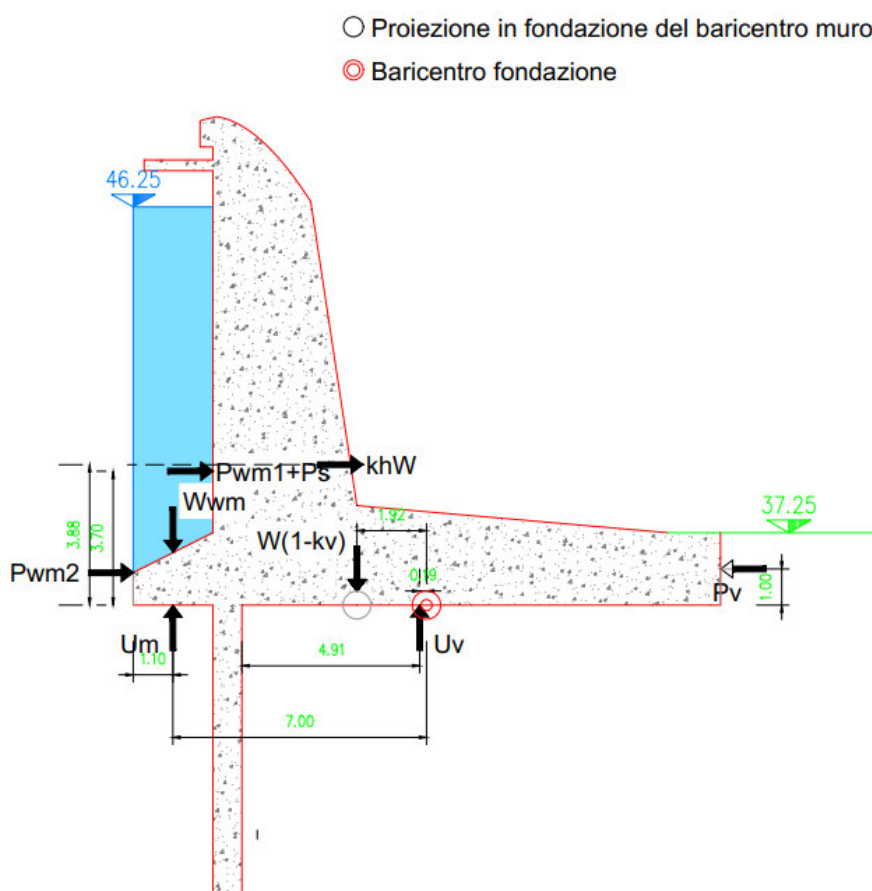


Figura 13 – Man. regolatore: schema per capacità portante: sisma SLV-SLC-SLD

Nella figura, sono stati introdotti i termini inerziali:

$k_h W$ = azione inerziale orizzontale della massa della struttura

$k_v W$ = azione inerziale verticale della massa della struttura

P_s = spinta inerziale della massa dell'acqua nell'invaso

In questo caso (SLV) si assume:

$$k_h = a_{\max}/g = 0.492$$

Il coefficiente sismico verticale k_v è assunto pari a $0.3 \cdot k_h$, che equivale al coefficiente di concomitanza indicato nel DM 26.06.2014 (doc. rif. [15]) per la verifica sismica delle opere di sbarramento, quando si applichi per intero l'azione sismica orizzontale. La spinta inerziale dell'acqua a monte P_s è stata calcolata come risultante delle pressioni date da:

$$p = a_{\max} \cdot \rho \cdot c \cdot y_0$$

con:

$$\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3 = \text{massa volumica dell'acqua}$$

$$c = \frac{c_m}{2} \left[\frac{y}{y_0} \left(2 - \frac{y}{y_0} \right) + \sqrt{\frac{y}{y_0} \left(2 - \frac{y}{y_0} \right)} \right]$$

y_0 = differenza della quota dell'acqua in combinazione sismica e quella del punto più depresso dell'alveo al piede del paramento = 9 m

y = differenza della quota dell'acqua in combinazione sismica e quella del punto generico in cui si calcola p

$$c_m = -.0073\alpha + 0.7412$$

α = angolo di inclinazione del paramento di monte rispetto alla verticale = 0

Applicando la formulazione esposta, si ottiene una risultante delle spinte inerziali dell'acqua pari a 231kN/m, applicata ad H/3 (cfr. DM 2014, doc. rif. [15]).

I risultati della verifica, condotta solo in condizioni non drenate, sono riportati di seguito.

Condizioni non drenate (SLV)

$q_{es,d} = 122.9 \text{ kPa}$ carico medio agente sulla fondazione ideale
 $q_{lim,k} = 589 \text{ kPa}$ portata limite caratteristica sulla fondazione ideale
 $q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 256 \text{ kPa}$ portata limite di calcolo sulla fondazione ideale
 $q_{lim,d} / q_{es,d} = 2.08 > 1.0$

B	17,7	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	100062,2	[kN]
L	54,0	[m]	c_u	81,4	[kPa]	N*	100062,2	[kN]
A	955,8	[m ²]				M _B	131270,5	[kNm]
H	1,5	[m]	Nc,s	5,14	[-]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,00	[m]				H _B	93279,9	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
B'	15,08	[m]				σ'_{ave}	104,69	[kPa]
L'	54,00	[m]				e _B	1,312	[m]
A'	814,12	[m ²]				e _L	0,000	[m]
						σ_1	89,43	[kPa]
q	57,0	[kPa]				σ_2	119,95	[kPa]
						σ_3	89,43	[kPa]
						σ_4	119,95	[kPa]
q_{es,d}	122,9	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A1+M1+R3			
q_{lim,k}	=	589 [kPa]			$q_{lim,k} = q_{lim,\gamma_i} + q_{lim,q_i} + q_{lim,c_i}$			
q_{lim,d}	=	256 [kPa]			$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
FS_{calc}	=	2,08			$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$			

Per la verifica a scorrimento e ribaltamento si è considerata la sezione con il taglione in fondazione.

La verifica a scorrimento è condotta con riferimento al potenziale scorrimento sulla superficie tratteggiata congiungente la base del dente col filo di valle dell'intradosso fondazione. Le azioni rappresentate nello schema sono dunque scomposte lungo le direzioni normale (N) e tangente (T) a detta superficie. Ne risultano le azioni indicate nelle tabelle seguenti, in cui VN = componenti lungo N delle azioni verticali; HN =

componenti lungo N delle azioni orizzontali; e analogamente: VT = componenti lungo T delle azioni verticali; HT = componenti lungo T delle azioni orizzontali.

VN	
W	1578 kN/m
W _{wm}	177 kN/m
W _{wv}	0 kN/m
k _v W	-232 kN/m
W _d (1-k _v)	117 kN/m
W _t (1-k _v)	281 kN/m
U _m	-152 kN/m
U _v	-237 kN/m
totale	1531 kN/m

VT	
W	-948 kN/m
W _{wm}	-106 kN/m
W _{wv}	0 kN/m
k _v W	139 kN/m
W _d (1-k _v)	-70 kN/m
W _t (1-k _v)	-169 kN/m
U _m	91 kN/m
U _v	-143 kN/m
totale	-1205 kN/m

HN	
P _{wm}	306 kN/m
P _s	119 kN/m
khW _d	40 kN/m
khW _t	97 kN/m
k _h W	465 kN/m
P _{wv}	-10 kN/m
totale	1017 kN/m

HT	
P _{wm}	509 kN/m
P _s	198 kN/m
khW _d	67 kN/m
khW _t	161 kN/m
k _h W	773 kN/m
P _{wv}	-17 kN/m
totale	1692 kN/m

Nelle tabelle:

W_d = massa del dente in c.a. in fondazione

W_t = massa del terreno interposto fra la fondazione e la linea tratteggiata sulla quale si analizza il possibile scorrimento

P_s = spinta inerziale dell'acqua (considerata solo sul paramento di monte)

Tutto il volume interposto fra questa linea e la fondazione è costituito da terreno di bonifica ($\varphi'_k=38^\circ$).

Si ottengono così le risultanti:

$$N = \Sigma VN + \Sigma HN = 2548 \text{ kN/m}$$

$$T = \Sigma VT + \Sigma HT = 487 \text{ kN/m}$$

$$(N \cdot \tan \varphi'_M) / T = 1832 / 785 = 1.82 > 1.15 = \gamma_R$$

La verifica è dunque soddisfatta.

Per quanto riguarda la verifica a ribaltamento, si ha:

$$M_{rib} = U_m \cdot 15.1 + U_v \cdot 8.3 + (P_{wm1} + P_s) \cdot 3.7 + P_{wm2} \cdot 1 + k_h W \cdot 3.88 + k_v W \cdot 10.02 = 14236$$

kNm/m

$$M_{stab} = W_{wm} \cdot 15.1 + W \cdot 10.02 = 21563 \text{ kNm/m}$$

$$FS_{rib} = (M_{stab} / 1.0) / M_{rib} = 1.51 > 1.0$$

La verifica, nella quale si sono trascurate le azioni W_t (il terreno dovrebbe essere solidale alla struttura per dare momento) e, in via cautelativa, la componente orizzontale $k_h W_d$ che fornirebbe un contributo stabilizzante, è dunque soddisfatta.

Sono state inoltre esaminate anche le verifiche sismiche per lo Stato Limite del Collasso (SLC) e Stato Limite di Danno (SLD).

I coefficienti sismici assunti sono:

$$k_h = a_{max}/g = 0.558 \quad \text{SLC}$$

$$k_h = a_{max}/g = 0.247 \quad \text{SLD}$$

I risultati delle verifiche sono riportati nella seguente tabella riassuntiva:

			Fs		
Condizione	Monte	Valle	Cap. portante	Ribaltamento	Scorrimento
	Qw (m s.l.m)				
Sismica SLV (amax/g = 0.492)	46,25	-	2,08	1,52	4,09
Sismica SLC (amax/g = 0.558)	46,25	-	2,03	1,43	3,11
Sismica SLD (amax/g = 0.247)	46,25	-	2,23	1,93	5.71

6.1.2 Risultati verifiche - Manufatto esistente

Di seguito si riportano le verifiche per le parti di spalla di manufatto regolatore esistente, che rimangono in posto anche dopo l'adeguamento della parte centrale.

6.1.2.1 Criteri e assunzioni di verifica

Le condizioni di verifica sono le stesse già esaminate per la parte in adeguamento (eccezione fatta per le verifiche in condizioni di serbatoio vuoto, essendo l'opera realizzata da molti anni); così pure, in generale, i criteri di verifica, per i quali si rimanda ai paragrafi precedenti, con le ulteriori specificazioni riportate di seguito.

La verifica di capacità portante è stata svolta con riferimento alla superficie di intradosso della zattera di monte della traversa (quota 35.75 m s.l.m.).

Data la presenza di diversi allineamenti di diaframmi sia a monte che a valle della traversa, e della transitorietà delle combinazioni analizzate, all'intradosso fondazione sono state considerate le sottospinte idrostatiche corrispondenti a quota dell'acqua a fondo alveo, senza variazioni legate alle diverse condizioni di piena a monte e a valle.

La capacità portante della fondazione del manufatto esistente è stata condotta in accordo alle NTC, seguendo ancora l'Approccio 2 secondo quanto già esposto

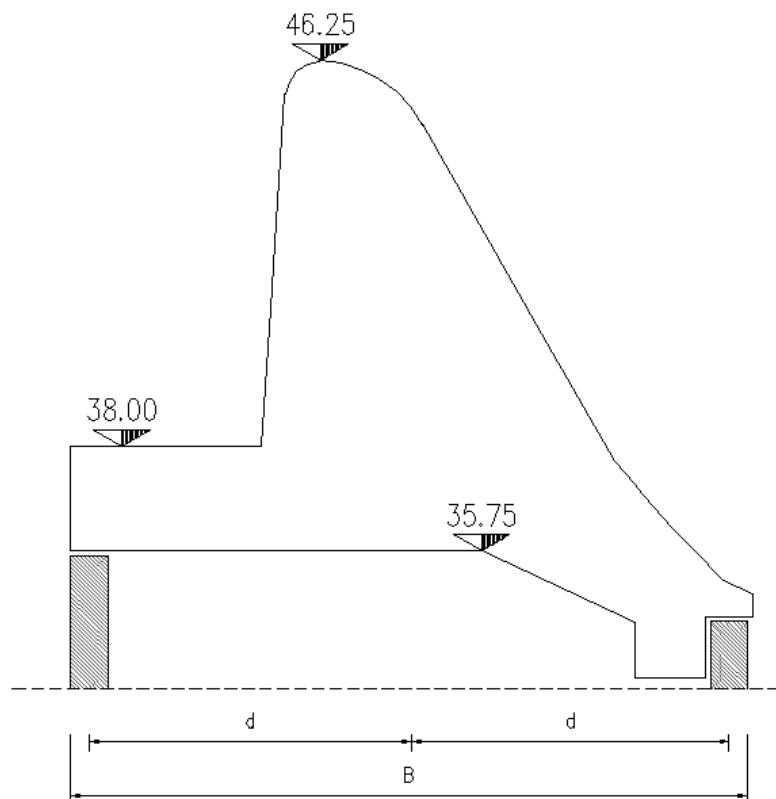
$A1 + M1 + R3$

in cui il fattore parziale $\gamma_{R(R3)}$ assume il seguente valore (cfr. tab. 6.4.I delle NTC):

Verifica	Fattore parziale (R3)
Capacità portante	$\gamma_R = 2.30$

Tabella 12 – Fattore di sicurezza parziale per fondazioni miste

Le verifiche sono pertanto condotte amplificando i carichi (tranne per le condizioni sismiche, in accordo al par. 7.1.1 delle NTC) e senza fattorizzare i parametri del terreno. Cautelativamente si è trascurata la presenza dei diaframmi in fondazione, riconducendo la verifica a quella di una fondazione diretta, i cui criteri di calcolo di capacità portante sono gli usuali già esposti in precedenza.



Il piano di fondazione su cui è stata condotta la verifica è quello posto a quota 35.75m s.l.m.: di conseguenza alcune parti della struttura, che non ha una imposta regolare, si trovano sotto la quota di fondazione assunta nelle verifiche: di ciò si è tenuto conto nel calcolo dei momenti.

La stratigrafia di riferimento vede, al contatto con la fondazione come sopra definita, l'orizzonte coesivo "B" caratterizzato da:

$$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$$

$$\varphi',k = 28.5^\circ$$

$$c',k = 9 \text{ kPa}$$

$$c_{u,k} = 81.4 \text{ kPa.}$$

6.1.2.2 Combinazione fondamentale – bocche chiuse $Q_w = 48.75 \text{ m s.l.m.}$

Per il manufatto esistente si procede secondo quanto già visto in precedenza.

Per questa combinazione i valori calcolati delle azioni considerate sono i seguenti:

V	W	1780 kN/m
	W _{wm}	488 kN/m
	W _{wv}	263 kN/m
	U _m	-543 kN/m
	U _v	-1093 kN/m
	S	895 kN/m

H	P _{wm}	894 kN/m
	P _{wv}	-291 kN/m
	S	603 kN/m

Tabella 13 – Valori caratteristici delle azioni

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Condizioni drenate

B	14,6	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	82677,9	[kN]
L	47,7	[m]	ϕ_{PS}	28,5	[°]	N*	82677,9	[kN]
A	696,42	[m ²]	ϕ_{TR}		[°]	M _B	-154489,9	[kNm]
H	0,0	[m]	ϕ_{CV}		[°]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,50	[m]	c'	9,0	[kPa]	H _B	603,0	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
h _w	3,5	[m]	$\gamma_{cB'}$	9,38	[kN/m ³]	σ'_{ave}	118,72	[kPa]
B'	18,34	[m]	$\gamma_{cL'}$	9,27	[kN/m ³]	e _B	-1,869	[m]
L'	47,70	[m]	G	699	[kPa]	e _L	0,000	[m]
A'	874,68	[m ²]				σ_1	146,62	[kPa]
						σ_2	90,81	[kPa]
q'	32,2	[kPa]	$\sigma_v(B/2)$	67,1		σ_3	146,62	[kPa]
			p(B/2)	43,7		σ_4	90,81	[kPa]
			I _R	29				
q _{es,d}	94,5	[kPa]						
γ_R	=	2,3		A1+M1+R3				
q _{lim,k}	=	1755	[kPa]	q _{lim,k} = q _{lim,γi} + q _{lim,qi} + q _{lim,ci}				
q _{lim,d}	=	763	[kPa]	q _{lim,d} = q _{lim,k} /γ _R				
FS _{calc}	=	8,07		FS _{calc} = q _{lim,d} / q _{es,d}				

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Condizioni non drenate

B	14,6	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	82677,9	[kN]
L	47,7	[m]	c_u	81,4	[kPa]	N*	82677,9	[kN]
A	696,42	[m ²]				M _B	-154489,9	[kNm]
H	0,0	[m]	N _{c,s}	5,14	[-]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,50	[m]				H _B	603,0	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
B'	18,34	[m]				σ'_{ave}	118,72	[kPa]
L'	47,70	[m]				e _B	-1,869	[m]
A'	874,68	[m ²]				e _L	0,000	[m]
						σ_1	146,62	[kPa]
q	66,5	[kPa]				σ_2	90,81	[kPa]
						σ_3	146,62	[kPa]
						σ_4	90,81	[kPa]
q _{es,d}	94,5	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A1+M1+R3			
q _{lim,k}	=	651	[kPa]		q _{lim,k} = q _{lim,γi} + q _{lim,qi} + q _{lim,ci}			
q _{lim,d}	=	283	[kPa]		q _{lim,d} = q _{lim,k} / γ _R			
FS _{calc}	=	3,00			FS _{calc} = q _{lim,d} / q _{es,d}			

La fondazione risulta dunque verificata nella combinazione in esame.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)



6.1.2.3 Combinazione fondamentale – bocche aperte $Q_w = 46.25 \text{ m s.l.m.}$

I valori calcolati delle azioni considerate sono i seguenti:

V	W	1780 kN/m
	W _{wm}	356 kN/m
	W _{wv}	302 kN/m
	U _m	442 kN/m
	U _v	-1251 kN/m
	S	1630 kN/m

H	P _{wm}	594 kN/m
	P _{wv}	-381 kN/m
	S	213 kN/m

Tabella 14 – Valori caratteristici delle azioni

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Condizioni drenate

B	14,6	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	128224,3	[kN]
L	47,7	[m]	ϕ_{PS}	28,5	[°]	N*	128224,3	[kN]
A	696,4	[m ²]	ϕ_{TR}		[°]	M _B	-686258,6	[kNm]
H	0,0	[m]	ϕ_{CV}		[°]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,50	[m]	c'	9,0	[kPa]	H _B	212,8	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
h _w	3,5	[m]	$\gamma_{cB'}$	9,33	[kN/m ³]	σ'_{ave}	184,12	[kPa]
B'	25,30	[m]	$\gamma_{cL'}$	9,27	[kN/m ³]	e _B	-5,352	[m]
L'	47,70	[m]	G	#RIF!	[kPa]	e _L	0,000	[m]
A'	#####	[m ²]				σ_1	308,07	[kPa]
						σ_2	60,17	[kPa]
q'	32,2	[kPa]	$\sigma_v (B/2)$	67,1		σ_3	308,07	[kPa]
			$p(B/2)$	43,7		σ_4	60,17	[kPa]
			I _R	#RIF!				
q _{es,d}	106,2	[kPa]						
γ_R	=	2,3		A1+M1+R3				
q _{lim,k}	=	2062	[kPa]		q _{lim,k} = q _{lim,γi} + q _{lim,qi} + q _{lim,ci}			
q _{lim,d}	=	896	[kPa]		q _{lim,d} = q _{lim,k} /γ _R			
FS _{calc}	=	8,44			FS _{calc} = q _{lim,d} / q _{es,d}			

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Condizioni non drenate

B	14,6	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	128224,3	[kN]
L	47,7	[m]	C_u	81,4	[kPa]	N*	128224,3	[kN]
A	696,42	[m ²]				M _B	-154489,9	[kNm]
H	0,0	[m]	Nc,s	5,14	[-]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,50	[m]				H _B	603,0	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
B'	17,01	[m]				σ'_{ave}	184,12	[kPa]
L'	47,70	[m]				e _B	-1,205	[m]
A'	811,36	[m ²]				e _L	0,000	[m]
						σ_1	212,02	[kPa]
q	66,5	[kPa]				σ_2	156,22	[kPa]
						σ_3	212,02	[kPa]
						σ_4	156,22	[kPa]
q _{es,d}	158,0	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A1+M1+R3			
q _{lim,k}	=	651	[kPa]		q _{lim,k} = q _{lim,γi} + q _{lim,qi} + q _{lim,ci}			
q _{lim,d}	=	283	[kPa]		q _{lim,d} = q _{lim,k} /γ _R			
FS _{calc}	=	1,79			FS _{calc} = q _{lim,d} / q _{es,d}			

La fondazione risulta dunque verificata nella combinazione in esame.

6.1.2.4 Combinazione fondamentale – Invaso Sperimentale (statica)

I valori calcolati delle azioni considerate sono i seguenti:

V	W	1780 kN/m
	W _{wm}	357 kN/m
	W _{wv}	0 kN/m
	U _{m1}	-789 kN/m
	U _{m2}	-102,2 kN/m
	U _v	-934,91 kN/m
	S	310,89
H	P _{wm}	594 kN/m
	P _{wm2}	0 kN/m
	P _v	0,0 kN/m
	S	594 kN/m

Tabella 15 – Valori caratteristici delle azioni

Di seguito si riportano le verifiche, secondo quanto già visto in precedenza.

Condizioni drenate

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

B	14,6	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	46438,7	[kN]
L	47,7	[m]	ϕ_{PS}	28,5	[°]	N*	46438,7	[kN]
A	696,4	[m ²]	ϕ_{TR}		[°]	M _B	90257,2	[kNm]
H	0,0	[m]	ϕ_{CV}		[°]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,50	[m]	c'	9,0	[kPa]	H _B	593,5	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
h _w	3,5	[m]	$\gamma_{cB'}$	9,52	[kN/m ³]	σ'_{ave}	66,68	[kPa]
B'	10,71	[m]	$\gamma_{cL'}$	9,27	[kN/m ³]	e _B	1,944	[m]
L'	47,70	[m]	G	699	[kPa]	e _L	0,000	[m]
A'	511,0	[m ²]				σ_1	50,38	[kPa]
						σ_2	82,98	[kPa]
q'	32,2	[kPa]	$\sigma_v(B/2)$	67,1		σ_3	50,38	[kPa]
			p(B/2)	43,7		σ_4	82,98	[kPa]
			I _R	29				
q _{es,d}	90,9	[kPa]						
γ_R	=	2,3		A1+M1+R3				
q _{lim,k}	=	1401	[kPa]	q _{lim,k} = q _{lim,γi} + q _{lim,qi} + q _{lim,ci}				
q _{lim,d}	=	609	[kPa]	q _{lim,d} = q _{lim,k} / γ_R				
FS _{calc}	=	6,70		FS _{calc} = q _{lim,d} / q _{es,d}				

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Condizioni non drenate

B	14,6	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	46438,7	[kN]
L	47,7	[m]	c_u	81,4	[kPa]	N*	46438,7	[kN]
A	696,42	[m ²]				M _B	90257,2	[kNm]
H	0,0	[m]	N _{c,s}	5,14	[-]	M _L	3,1	[kNm]
D	3,50	[m]				H _B	593,5	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
B'	10,71	[m]				σ'_{ave}	66,68	[kPa]
L'	47,70	[m]				e _B	1,944	[m]
A'	511,00	[m ²]				e _L	0,000	[m]
						σ_1	50,38	[kPa]
q	66,5	[kPa]				σ_2	82,98	[kPa]
						σ_3	50,38	[kPa]
						σ_4	82,99	[kPa]
q _{es,d}	90,9	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A1+M1+R3			
q _{lim,k}	=	651	[kPa]		q _{lim,k} = q _{lim,γi} + q _{lim,qi} + q _{lim,ci}			
q _{lim,d}	=	283	[kPa]		q _{lim,d} = q _{lim,k} / γ _R			
FS _{calc}	=	3,12			FS _{calc} = q _{lim,d} / q _{es,d}			

La fondazione risulta dunque verificata nella combinazione in esame.

6.1.2.5 Combinazione eccezionale – Piena duecentennale

I valori calcolati delle azioni considerate sono i seguenti:

V	
W	1780 kN/m
W _{wm}	522 kN/m
W _{wv}	326 kN/m
U	-586 kN/m
Σ	2042 kN/m

H	
P _{wm1}	1042 kN/m
P _{wm2}	
P _{wv1}	-422
Σ	620 kN/m

Tabella 16 – Valori caratteristici delle azioni

Di seguito si riportano le verifiche, secondo quanto già visto in precedenza.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Condizioni drenate

B	14,6	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	120197,5	[kN]
L	47,7	[m]	ϕ_{PS}	28,5	[°]	N*	120197,5	[kN]
A	696	[m ²]	ϕ_{TR}		[°]	M _B	0,0	[kNm]
H	0,0	[m]	ϕ_{CV}		[°]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,50	[m]	c'		[kPa]	H _B	0,0	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
h _w	3,5	[m]	$\gamma_{cB'}$	9,43	[kN/m ³]	σ'_{ave}	172,59	[kPa]
B'	14,60	[m]	$\gamma_{cL'}$	9,27	[kN/m ³]	e _B	0,000	[m]
L'	47,70	[m]				e _L	0,000	[m]
A'	696,42	[m ²]				σ_1	172,59	[kPa]
						σ_2	172,59	[kPa]
q'	32,2	[kPa]				σ_3	172,59	[kPa]
						σ_4	172,59	[kPa]
q _{es,d}	172,6	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A2+M2+R2			
q _{lim,k}	=	1331	[kPa]		q _{lim,k} = q _{lim,γi} + q _{lim,qi} + q _{lim,ci}			
q _{lim,d}	=	579	[kPa]		q _{lim,d} = q _{lim,k} /γ _R			
FS _{calc}	=	7,71			FS _{calc} = q _{lim,k} / q _{es,d}			

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Condizioni non drenate

B	14,6	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	120197,5	[kN]
L	44,7	[m]	c_u	81,4	[kPa]	N*	149262,8	[kN]
A	652,844	[m ²]				M _B	157860,2	[kNm]
H	0,0	[m]	N _{c,s}	5,14	[-]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,50	[m]				H _B	21622,4	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
B'	11,98	[m]				σ'_{ave}	184,11	[kPa]
L'	44,70	[m]				e _B	1,313	[m]
A'	535,43	[m ²]				e _L	0,000	[m]
						σ_1	151,66	[kPa]
q	66,5	[kPa]				σ_2	216,57	[kPa]
						σ_3	151,66	[kPa]
						σ_4	216,57	[kPa]
q _{es,d}	224,5	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A2+M2+R2			
q _{lim,k}	=	651	[kPa]		q _{lim,k} = q _{lim,γi} + q _{lim,qi} + q _{lim,ci}			
q _{lim,d}	=	283	[kPa]		q _{lim,d} = q _{lim,k} /γ _R			
FS _{calc}	=	2,90			FS _{calc} = q _{lim,k} / q _{es,d}			

La fondazione risulta dunque verificata nella combinazione in esame.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)



6.1.2.6 Combinazione eccezionale – Piena millenaria

I valori calcolati delle azioni considerate sono i seguenti:

V	
W	1780 kN/m
W _{wm}	562 kN/m
W _{wv}	301 kN/m
U	-1380 kN/m
	-193
Σ	1070 kN/m
H	
P _{wm1}	1102 kN/m
P _{wm2}	
P _{wv1}	-490
Σ	612 kN/m

Tabella 17 – Valori caratteristici delle azioni

Di seguito si riportano le verifiche, secondo quanto già visto in precedenza.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Condizioni drenate

B	14,6	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	79122,2	[kN]
L	47,7	[m]	ϕ_{PS}	28,5	[°]	N*	79122,2	[kN]
A	696	[m ²]	ϕ_{TR}		[°]	M _B	0,0	[kNm]
H	0,0	[m]	ϕ_{CV}		[°]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,50	[m]	c'		[kPa]	H _B	0,0	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
h _w	3,5	[m]	$\gamma_{cB'}$	9,43	[kN/m ³]	σ'_{ave}	113,61	[kPa]
B'	14,60	[m]	$\gamma_{cL'}$	9,27	[kN/m ³]	e _B	0,000	[m]
L'	47,70	[m]				e _L	0,000	[m]
A'	696,42	[m ²]				σ_1	113,61	[kPa]
						σ_2	113,61	[kPa]
q'	32,2	[kPa]				σ_3	113,61	[kPa]
						σ_4	113,61	[kPa]
q _{es,d}	113,6	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A2+M2+R2			
q _{lim,k}	=	1331	[kPa]		q _{lim,k} = q _{lim,γi} + q _{lim,qi} + q _{lim,ci}			
q _{lim,d}	=	579	[kPa]		q _{lim,d} = q _{lim,k} /γ _R			
FS _{calc}	=	11,71			FS _{calc} = q _{lim,k} / q _{es,d}			

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Condizioni non drenate

B	14,6	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	79122,2	[kN]
L	44,7	[m]	c_u	81,4	[kPa]	N*	149262,8	[kN]
A	652,844	[m ²]				M _B	157860,2	[kNm]
H	0,0	[m]	N _{c,s}	5,14	[-]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,50	[m]				H _B	21622,4	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
B'	10,61	[m]				σ'_{ave}	121,20	[kPa]
L'	44,70	[m]				e _B	1,995	[m]
A'	474,48	[m ²]				e _L	0,000	[m]
						σ_1	88,74	[kPa]
q	66,5	[kPa]				σ_2	153,65	[kPa]
						σ_3	88,74	[kPa]
						σ_4	153,65	[kPa]
q _{es,d}	166,8	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A2+M2+R2			
q _{lim,k}	=	651	[kPa]		q _{lim,k} = q _{lim,γi} + q _{lim,qi} + q _{lim,ci}			
q _{lim,d}	=	283	[kPa]		q _{lim,d} = q _{lim,k} /γ _R			
FS _{calc}	=	3,90			FS _{calc} = q _{lim,k} / q _{es,d}			

La fondazione risulta dunque verificata nella combinazione in esame.

6.1.2.7 Combinazioni sismiche SLV-SLC-SLD

Sono state esaminate anche per il manufatto esistente le verifiche agli stati limite SLV-SLC-SLD.

I coefficienti sismici sono gli stessi assunti per il manufatto nuovo:

$$k_h = a_{\max}/g = 0.492 \quad \text{SLV}$$

$$k_h = a_{\max}/g = 0.558 \quad \text{SLC}$$

$$k_h = a_{\max}/g = 0.247 \quad \text{SLD}$$

Lo schema di calcolo per questa combinazione è riportato nella seguente figura:

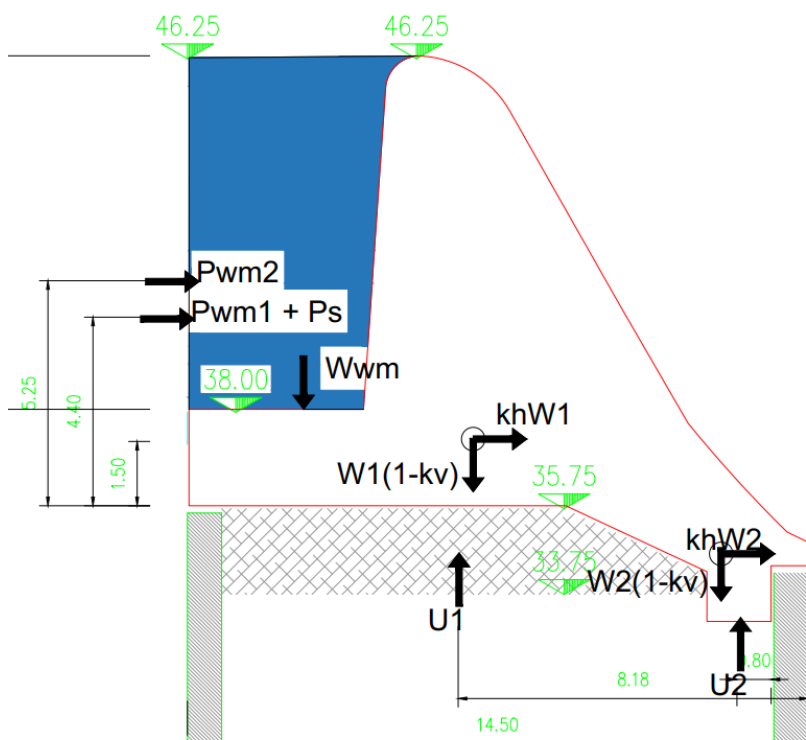


Figura 14 – Man. Regolatore esistente: schema per capacità portante: sismica

SLV - Condizioni non drenate

$q_{es,d} = 287.4 \text{ kPa}$

carico medio agente sulla fondazione ideale

$q_{lim,k} = 379 \text{ kPa}$

portata limite caratteristica sulla fondazione ideale

$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 165 \text{ kPa}$ portata limite di calcolo sulla fondazione ideale

$q_{lim,d} / q_{es,d} = 1.32 > 1.0$

B	14,6	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	67840,8	[kN]
L	47,7	[m]	c_u	28,5	[kPa]	N*	67840,8	[kN]
A	696,42	[m ²]				M _B	327401,5	[kNm]
H	0,0	[m]	Nc,s	5,14	[-]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,50	[m]				H _B	80956,4	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
B'	4,95	[m]				σ'_{ave}	97,41	[kPa]
L'	47,70	[m]				e _B	4,826	[m]
A'	236,02	[m ²]				e _L	0,000	[m]
						σ_1	38,28	[kPa]
q	66,5	[kPa]				σ_2	156,55	[kPa]
						σ_3	38,28	[kPa]
						σ_4	156,55	[kPa]
q_{es,d}	287,4	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A2+M2+R2			
q_{lim,k}	=	379	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim,\gamma_i} + q_{lim,q_i} + q_{lim,ci}$			
q_{lim,d}	=	165	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
FS_{calc}	=	1,32			$FS_{calc} = q_{lim,k} / q_{es,d}$			

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

SLC - Condizioni non drenate

B	14,6	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	66108,8	[kN]
L	47,7	[m]	c_u	28,5	[kPa]	N*	66108,8	[kN]
A	696,42	[m ²]				M _B	348590,7	[kNm]
H	0,0	[m]	Nc,s	5,14	[-]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,50	[m]				H _B	86730,0	[kN]
z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
B'	4,05	[m]				σ'_{ave}	94,93	[kPa]
L'	47,70	[m]				e _B	5,273	[m]
A'	193,38	[m ²]				e _L	0,000	[m]
						σ_1	31,96	[kPa]
q	66,5	[kPa]				σ_2	157,89	[kPa]
						σ_3	31,96	[kPa]
						σ_4	157,89	[kPa]
q_{es,d}	341,9	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A2+M2+R2			
q_{lim,k}	=	379	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim,gi} + q_{lim,qi} + q_{lim,ci}$			
q_{lim,d}	=	165	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
FS_{calc}	=	1,11			$FS_{calc} = q_{lim,k} / q_{es,d}$			

SLD - Condizioni non drenate

B	14,6	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	74030,5	[kN]
L	47,7	[m]	C_u	28,5	[kPa]	N*	74030,5	[kN]
A	696,42	[m ²]				M _B	216269,0	[kNm]
H	0,0	[m]	Nc,s	5,14	[-]	M _L	0,0	[kNm]
D	3,50	[m]				H _B	54791,1	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	0,0	[kN]
B'	8,76	[m]				σ'_{ave}	106,30	[kPa]
L'	47,70	[m]				e _B	2,921	[m]
A'	417,72	[m ²]				e _L	0,000	[m]
						σ_1	67,24	[kPa]
q	66,5	[kPa]				σ_2	145,36	[kPa]
						σ_3	67,24	[kPa]
						σ_4	145,36	[kPa]
q_{es,d}	177,2	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A2+M2+R2			
q_{lim,k}	=	379	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim, \gamma_i} + q_{lim, q_i} + q_{lim, c_i}$			
q_{lim,d}	=	165	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
FS_{calc}	=	2,14			$FS_{calc} = q_{lim,k} / q_{es,d}$			

La fondazione risulta dunque verificata nelle combinazioni sismiche

I risultati delle verifiche sono riportati nella seguente tabella riassuntiva:

Condizione	Monte	Valle	Fs
	Qw (m s.l.m)		Non drenata
Sismica SLV (amax/g = 0.492)	46,25	-	1.32
Sismica SLC (amax/g = 0.558)	46,25	-	1.11
Sismica SLD (amax/g = 0.247)	46,25	-	2.14

Cedimenti

Si è considerata la seguente stratigrafia di calcolo (considerata dal piano di imposta fondazioni), mediamente cautelativa rispetto alle condizioni attese sotto la base del manufatto:

prof. 0 ÷ 1m	strato di bonifica	E = 80 MPa
prof. 1÷6.25m	orizzonte fine "B"	E = 5.1 MPa
prof. 6.25÷14.25m	orizzonte fine "C"	E = 5.5 MPa
prof. 14.25÷17.5m	orizzonte granulare "C"	E = 53 MPa
prof. 17.5÷22m	orizzonte fine "D"	E = 8 MPa
>22m	orizzonte granulare "D"	E = 47 MPa

La falda è ovviamente assunta in corrispondenza del piano di posa della fondazione (l'acqua sopra il piano di posa è neutra quanto al calcolo in esame, poiché costituisce un incremento uguale sia di sforzo totale che di pressione interstiziale); l'approfondimento del piano di posa è stato considerato nel calcolo imponendo la corrispondente pressione verticale efficace sul piano di fondazione.

La tabella alla pagina seguente riporta il calcolo effettuato secondo le modalità e i criteri esposti; il cedimento atteso è dell'ordine di 22cm.

La pressione media in fondazione è pari a $1841 / 16.2 = 113.6$ kPa.



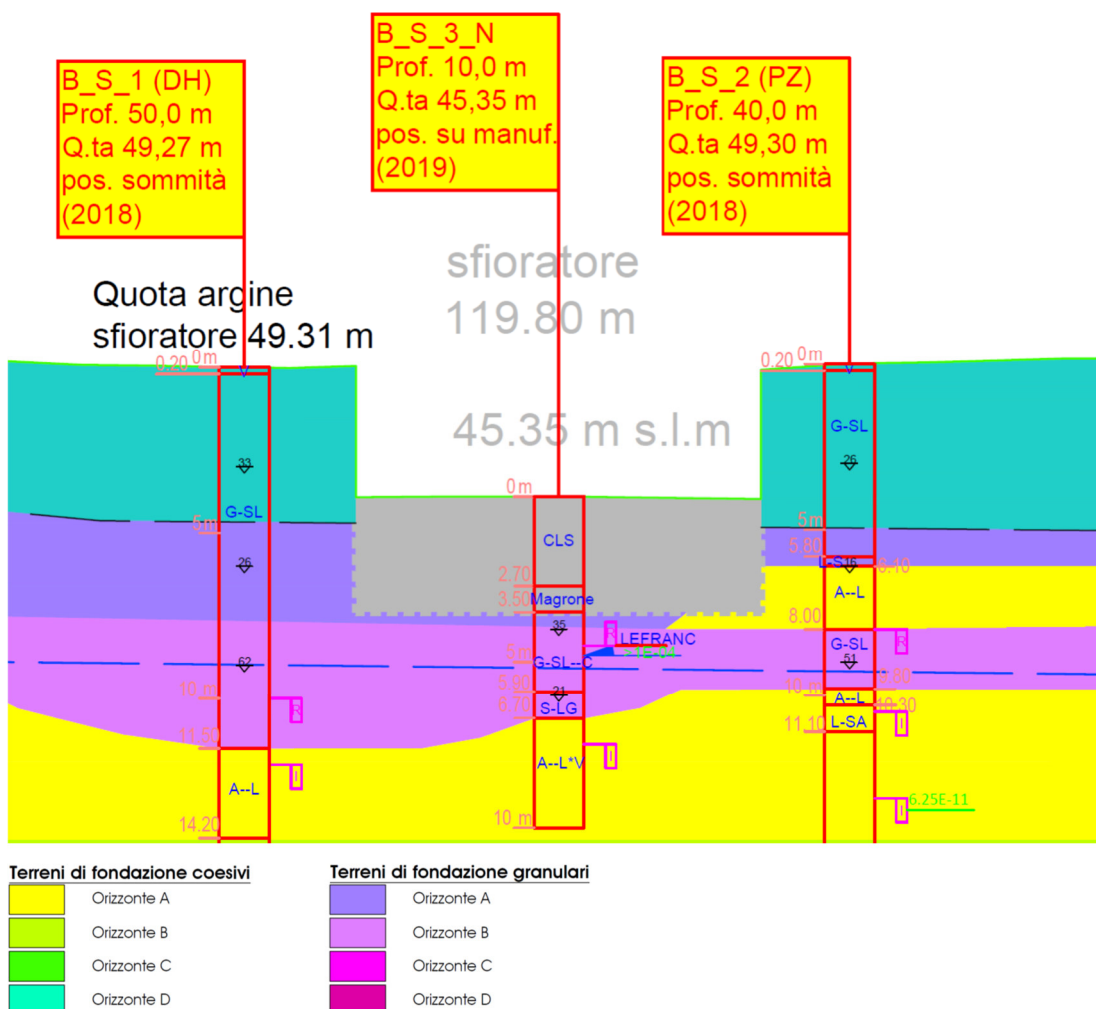
B	8.1	[m]	semilarghezza in sommità																
γt	19.0	[kN/m³]	peso di volume del terreno																
z_w	0	[m]	profondità della falda																
q_acc	0	[kPa]	carico accidentale																
x+B	8.1	[m]																	
x-B	-8.1	[m]																	
x	0	[m]	distanza dall'asse del rilevato della verticale di calcolo																
q	113.6	[kPa]	carico applicato																
s_tot	22.1	[cm]	cedimento atteso																
								Δσ											
z_i	(x+B)/z	(x-B)/z	σ'_{v_o}	φ'	σ'_{ho}	Δσ_{zi}	Δσ_{xi}	Δσ_{yi}	Δσ_v/σ'_{v_o}	E	v	s_i							
[m]	[-]	[-]	[kPa]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[kPa]	[-]	[cm]							
0.5	16.2	-16.2	25	38	9.45	113.59	104.69	65.48	4.62	80000	0.30	0.039							
1.0	8.1	-8.1	34	38	12.98	113.51	95.92	62.83	3.36	80000	0.30	0.041							
1.5	5.4	-5.4	38	38	14.75	113.31	87.41	60.21	2.95	5100	0.30	0.677							
2.0	4.1	-4.1	43	38	16.52	112.92	79.26	57.66	2.63	5100	0.30	0.704							
2.5	3.2	-3.2	48	38	18.28	112.33	71.57	55.17	2.36	5100	0.30	0.729							
3.0	2.7	-2.7	52	38	20.05	111.50	64.39	52.77	2.14	5100	0.30	0.749							
3.5	2.3	-2.3	57	26	31.88	110.44	57.77	50.46	1.95	5100	0.30	0.764							
4.0	2.0	-2.0	61	26	34.46	109.14	51.72	48.26	1.78	5100	0.30	0.776							
4.5	1.8	-1.8	66	26	37.04	107.63	46.22	46.16	1.63	5100	0.30	0.783							
5.0	1.6	-1.6	71	26	39.62	105.93	41.28	44.16	1.50	5100	0.30	0.787							
5.5	1.5	-1.5	75	26	42.20	104.07	36.85	42.28	1.39	5100	0.30	0.788							
6.0	1.4	-1.4	80	26	44.78	102.08	32.90	40.50	1.28	5100	0.30	0.785							
6.25	1.3	-1.3	82	26	46.07	101.05	31.09	39.64	1.23	5100	0.30	0.391							
7.0	1.2	-1.2	89	26	49.94	97.84	26.28	37.24	1.10	5500	0.30	1.074							
7.5	1.1	-1.1	94	26	52.52	95.63	23.53	35.75	1.02	5500	0.30	0.708							
8.0	1.0	-1.0	98	26	55.10	93.41	21.09	34.35	0.95	5500	0.30	0.698							
8.5	1.0	-1.0	103	26	57.68	91.18	18.94	33.03	0.89	5500	0.30	0.687							
9.0	0.9	-0.9	107	26	60.27	88.96	17.04	31.80	0.83	5500	0.30	0.676							
9.5	0.9	-0.9	112	26	62.85	86.76	15.35	30.64	0.78	5500	0.30	0.663							
10.0	0.8	-0.8	116	26	65.43	84.61	13.86	29.54	0.73	5500	0.30	0.651							
10.5	0.8	-0.8	121	26	68.01	82.50	12.54	28.51	0.68	5500	0.30	0.638							
11.0	0.7	-0.7	126	26	70.59	80.43	11.37	27.54	0.64	5500	0.30	0.625							
11.5	0.7	-0.7	130	26	73.17	78.43	10.33	26.63	0.60	5500	0.30	0.612							
12.0	0.7	-0.7	135	26	75.75	76.48	9.40	25.76	0.57	5500	0.30	0.599							
12.5	0.6	-0.6	139	26	78.33	74.59	8.58	24.95	0.53	5500	0.30	0.587							
13.0																			

7 VERIFICHE SFIORATORE LATERALE-

7.1 Capacità portante

La portata di base è verificata con gli stessi criteri esposti in precedenza.

La stratigrafia in corrispondenza dello sfioratore e a partire dalla fondazione dello stesso (39.5m s.l.m.) vede, per quasi tutto lo sviluppo longitudinale del manufatto l'orizzonte coesivo "A", sovrastato da circa 1m di spessore di terreno granulare "B", cautelativamente trascurato nelle verifiche di capacità portante.



I valori caratteristici dei parametri geotecnici di tale orizzonte sono i seguenti.

$\phi'_k = 28^\circ$ angolo di resistenza a taglio in condizioni drenate

$c'_k = 10$ coesione intercetta in condizioni drenate

$c_{u,k} = 55 \text{ kPa}$ coesione in condizioni non drenate

$\phi_{u,k} = 0$ angolo di resistenza a taglio in condizioni non drenate

7.1.1 Combinazione fondamentale statica

Di seguito sono riportati i calcoli della portata di base in condizioni rispettivamente drenate e non drenate.

Condizioni drenate

$q_{es,d} = 81 \text{ kPa}$

carico medio agente sulla fondazione

$q_{lim,k} = 933 \text{ kPa}$

portata limite caratteristica sulla fondazione

$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 405 \text{ kPa}$ portata limite di calcolo sulla fondazione

$q_{lim,d} / q_{es,d} = 5.0 > 1.0$

B	9,1	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	10388,5	[kN]
L	13,0	[m]	ϕ_{PS}	28,0	[°]	N*	10388,5	[kN]
A	118,3	[m ²]	ϕ_{TR}		[°]	M _B	0,0	[kNm]
H	1,5	[m]	ϕ_{CV}		[°]	M _L	-5606,0	[kNm]
D	1,50	[m]	c'	10,0	[kPa]	H _B	0,0	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	818,4	[kN]
h _w	1,5	[m]	$\gamma_{cB'}$	9,36	[kN/m ³]	σ'_{ave}	87,81	[kPa]
B'	9,10	[m]	$\gamma_{cL'}$	9,30	[kN/m ³]	e _B	0,000	[m]
L'	14,08	[m]	G	699	[kPa]	e _L	-0,540	[m]
A'	128,12	[m ²]				σ_1	119,06	[kPa]
						σ_2	119,06	[kPa]
q'	13,8	[kPa]	$\sigma_v (B/2)$	41,8		σ_3	56,57	[kPa]
			p(B/2)	27,0		σ_4	56,57	[kPa]
			I _R	49				
q_{es,d}	81,1	[kPa]						
γ_R	=	2,3		A1+M1+R3				
q_{lim,k}	=	933 [kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim,\gamma i} + q_{lim,qi} + q_{lim,ci}$				
q_{lim,d}	=	405 [kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$				
FS_{calc}	=	5,00		$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$				

Condizioni non drenate

$$q_{es,d} = 81 \text{ kPa}$$

carico medio agente sulla fondazione

$$q_{lim,k} = 325 \text{ kPa}$$

portata limite caratteristica sulla fondazione

$$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 142 \text{ kPa}$$

portata limite di calcolo sulla fondazione

$$q_{lim,d} / q_{es,d} = 1.75 > 1.0$$

B	9,1	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	10388,5	[kN]
L	13,0	[m]	c_u	55,0	[kPa]	N*	10388,5	[kN]
A	118,3	[m ²]				M _B	0,0	[kNm]
H	1,5	[m]	N _{c,s}	5,14	[-]	M _L	-5606,0	[kNm]
D	1,50	[m]				H _B	0,0	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	818,4	[kN]
B'	9,10	[m]				σ'_{ave}	87,81	[kPa]
L'	14,08	[m]				e _B	0,000	[m]
A'	128,12	[m ²]				e _L	-0,540	[m]
						σ_1	119,06	[kPa]
q	28,5	[kPa]				σ_2	119,06	[kPa]
						σ_3	56,57	[kPa]
						σ_4	56,57	[kPa]
q_{es,d}	81,1	[kPa]						
γ_R	=	2,3			A1+M1+R3			
q_{lim,k}	=	325	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim,\gamma_i} + q_{lim,q_i} + q_{lim,ci}$			
q_{lim,d}	=	142	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
FS_{calc}	=	1,75			$FS_{calc} = q_{lim,k} / q_{es,d}$			

Le verifiche sono dunque soddisfatte.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)



7.1.2 Combinazioni sismiche SLV-SLC-SLD

I coefficienti sismici assunti per lo sfioratore laterale sono:

$$k_h = a_{\max}/g = 0.495 \quad \text{SLV}$$

$$k_h = a_{\max}/g = 0.562 \quad \text{SLC}$$

$$k_h = a_{\max}/g = 0.231 \quad \text{SLD}$$

Di seguito si riportano le verifiche, secondo quanto già visto in precedenza.

SLV Condizioni non drenate

$q_{es,d} = 45.1 \text{ kPa}$

carico medio agente sulla fondazione

$q_{lim,k} = 153 \text{ kPa}$

portata limite caratteristica sulla fondazione

$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 66 \text{ kPa}$

portata limite di calcolo sulla fondazione

$q_{lim,d} / q_{es,d} = 1.47 > 1.0$

B	9,1	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	7843,6	[kN]
L	13,0	[m]	ϕ_{PS}	28,0	[°]	N*	7843,6	[kN]
A	118,3	[m ²]	ϕ_{TR}		[°]	M _B	0,0	[kNm]
H	1,5	[m]	ϕ_{CV}		[°]	M _L	-23975,4	[kNm]
D	1,50	[m]	c'		[kPa]	H _B	0,0	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	4029,0	[kN]
h _w	1,5	[m]	$\gamma_{cB'}$	9,36	[kN/m ³]	σ'_{ave}	66,30	[kPa]
B'	9,10	[m]	$\gamma_{cL'}$	9,27	[kN/m ³]	e _B	0,000	[m]
L'	19,11	[m]	G	699	[kPa]	e _L	-3,057	[m]
A'	173,93	[m ²]				σ_1	199,93	[kPa]
						σ_2	199,93	[kPa]
q'	13,8	[kPa]	$\sigma_v (B/2)$	41,8		σ_3	-67,32	[kPa]
			p(B/2)	27,0		σ_4	-67,32	[kPa]
			I _R	49				
q_{es,d}	45,1	[kPa]						
γ_R	=	2,3		A1+M1+R3				
q_{lim,k}	=	153 [kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim,yi} + q_{lim,qi} + q_{lim,ci}$				
q_{lim,d}	=	66 [kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$				
FS_{calc}	=	1,47		$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$				

SLC Condizioni non drenate

$q_{es,d} = 42.3 \text{ kPa}$

carico medio agente sulla fondazione

$q_{lim,k} = 111 \text{ kPa}$

portata limite caratteristica sulla fondazione

$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 48 \text{ kPa}$

portata limite di calcolo sulla fondazione

$q_{lim,d} / q_{es,d} = 1.14 > 1.0$

B	9,1	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	7697,0	[kN]
L	13,0	[m]	ϕ_{PS}	28,0	[°]	N*	7697,0	[kN]
A	118,3	[m ²]	ϕ_{TR}		[°]	M _B	0,0	[kNm]
H	1,5	[m]	ϕ_{CV}		[°]	M _L	-26956,1	[kNm]
D	1,50	[m]	c'		[kPa]	H _B	0,0	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	4517,9	[kN]
h _w	1,5	[m]	$\gamma_{cB'}$	9,36	[kN/m ³]	σ'_{ave}	65,06	[kPa]
B'	9,10	[m]	$\gamma_{cL'}$	9,27	[kN/m ³]	e _B	0,000	[m]
L'	20,00	[m]	G	699	[kPa]	e _L	-3,502	[m]
A'	182,04	[m ²]				σ_1	215,30	[kPa]
						σ_2	215,30	[kPa]
q'	13,8	[kPa]	$\sigma_v (B/2)$	41,8		σ_3	-85,18	[kPa]
			$p(B/2)$	27,0		σ_4	-85,18	[kPa]
			I _R	49				
q_{es,d}	42,3	[kPa]						
γ_R	=	2,3		A1+M1+R3				
q_{lim,k}	=	111 [kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim,\gamma i} + q_{lim,qi} + q_{lim,ci}$				
q_{lim,d}	=	48 [kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$				
FS_{calc}	=	1,14		$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$				

SLD Condizioni non drenate

B	9,1	[m]	γ	19,0	[kN/m ³]	N	8421,6	[kN]
L	13,0	[m]	ϕ_{PS}	28,0	[°]	N*	8421,6	[kN]
A	118,3	[m ²]	ϕ_{TR}		[°]	M _B	0,0	[kNm]
H	1,5	[m]	ϕ_{CV}		[°]	M _L	-12098,0	[kNm]
D	1,50	[m]	c'		[kPa]	H _B	0,0	[kN]
Z _w	0,00	[m]				H _L	2059,8	[kN]
h _w	1,5	[m]	$\gamma_{CB'}$	9,36	[kN/m ³]	σ'_{ave}	71,19	[kPa]
B'	9,10	[m]	$\gamma_{CL'}$	9,29	[kN/m ³]	e _B	0,000	[m]
L'	15,87	[m]	G	699	[kPa]	e _L	-1,437	[m]
A'	144,45	[m ²]				σ_1	138,62	[kPa]
						σ_2	138,62	[kPa]
q'	13,8	[kPa]	$\sigma_{v(B/2)}$	41,8		σ_3	3,76	[kPa]
			p(B/2)	27,0		σ_4	3,76	[kPa]
			I _R	49				
q_{es,d}	58,3	[kPa]						
γ_R	=	2,3		A1+M1+R3				
q_{lim,k}	=	384	[kPa]	$q_{lim,k} = q_{lim,\gamma i} + q_{lim,qi} + q_{lim,ci}$				
q_{lim,d}	=	167	[kPa]	$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$				
FS_{calc}	=	2,87		$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$				

Le verifiche sono dunque soddisfatte.

I risultati delle verifiche sismiche sono riportati nella seguente tabella riassuntiva:

Condizione	Monte	Valle	Fs
	Qw (m s.l.m)		Non drenata
Sismica SLV (amax/g = 0.492)	46,25	-	1.47
Sismica SLC (amax/g = 0.558)	46,25	-	1.14
Sismica SLD (amax/g = 0.247)	46,25	-	2.87

7.2 Cedimenti

I cedimenti sono stati calcolati mediante la stessa formulazione e adottando gli stessi criteri già descritti a proposito del manufatto di regolazione.

La stratigrafia di calcolo vede, sotto ~1m di terreno granulare dell'orizzonte "B", uno spessore di circa 2.7 m di terreno fine (orizzonte "A" coesivo) caratterizzato da un modulo elastico di $E = 5.1$ MPa seguito da un secondo orizzonte fine ("B" coesivo) con $E = 5.5$ MPa e quindi terreni granulari (orizzonti "C" e "D" granulari) aventi rispettivamente modulo $E = 53$ MPa e $E = 47$ MPa.

Il cedimento atteso è dell'ordine di 13-14cm.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

B	4.6	[m]	semilarghezza in sommità									
γ _t	18.0	[kN/m³]	peso di volume del terreno									
z _w	0	[m]	profondità della falda									
q _{acc}	0	[kPa]	carico accidentale									
x+B	4.55	[m]										
x-B	-4.55	[m]										
x	0	[m]	distanza dall'asse del rilevato della verticale di calcolo									
q	122.0	[kPa]	carico applicato									
s _{tot}	13.3	[cm]	cedimento atteso									
Δσ												
z _i	(x+B)/z	(x-B)/z	σ' _{vo}	φ'	σ' _{ho}	Δσ _{zi}	Δσ _{xi}	Δσ _{yi}	Δσ _v /σ' _{vo}	E	v	s _i
[m]	[-]	[-]	[kPa]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[kPa]	[-]	[cm]
98.316												
0.5	9.1	-9.1	102	38	39.36	121.93	105.07	68.10	1.19	35000	0.30	0.100
1.0	4.6	-4.6	111	38	42.51	121.48	88.91	63.12	1.10	35000	0.30	0.108
1.5	3.0	-3.0	115	38	44.08	120.36	74.17	58.36	1.05	5100	0.30	0.790
2.0	2.3	-2.3	119	38	45.66	118.45	61.22	53.90	1.00	5100	0.30	0.823
2.5	1.8	-1.8	123	38	47.23	115.76	50.20	49.79	0.94	5100	0.30	0.841
3.0	1.5	-1.5	127	38	48.80	112.42	41.03	46.04	0.89	5100	0.30	0.846
3.7	1.2	-1.2	133	26	74.54	106.99	30.96	41.38	0.81	5100	0.30	1.171
4.0	1.1	-1.1	135	26	75.92	104.50	27.48	39.59	0.77	5500	0.30	0.460
4.5	1.0	-1.0	139	26	78.22	100.26	22.60	36.86	0.72	5500	0.30	0.749
5.0	0.9	-0.9	143	26	80.52	96.00	18.68	34.41	0.67	5500	0.30	0.728
5.5	0.8	-0.8	147	26	82.82	91.83	15.53	32.21	0.62	5500	0.30	0.705
6.0	0.8	-0.8	152	26	85.12	87.79	13.00	30.24	0.58	5500	0.30	0.680
6.5	0.7	-0.7	156	26	87.42	83.92	10.95	28.46	0.54	5500	0.30	0.655
7.0	0.7	-0.7	160	26	89.72	80.26	9.28	26.86	0.50	5500	0.30	0.631
7.5	0.6	-0.6	164	36	67.54	76.79	7.91	25.41	0.47	5500	0.30	0.607
8.0	0.6	-0.6	168	36	69.22	73.54	6.79	24.10	0.44	5500	0.30	0.584
8.5	0.5	-0.5	172	36	70.91	70.49	5.86	22.90	0.41	5500	0.30	0.562
9.0	0.5	-0.5	176	36	72.60	67.63	5.08	21.81	0.38	5500	0.30	0.541
9.7	0.5	-0.5	182	36	74.96	63.93	4.20	20.44	0.35	5500	0.30	0.720
10.0	0.5	-0.5	184	36	75.98	62.44	3.89	19.90	0.34	53000	0.30	0.031
10.5	0.4	-0.4	188	36	77.66	60.09	3.42	19.06	0.32	53000	0.30	0.050
11.0	0.4	-0.4	193	36	79.35	57.89	3.03	18.28	0.30	53000	0.30	0.049
11.5	0.4	-0.4	197	36	81.04	55.83	2.69	17.56	0.28	53000	0.30	0.047
12.0	0.4	-0.4	201	36	82.73	53.90	2.40	16.89	0.27	53000	0.30	0.045
12.5	0.4	-0.4	205	36	84.42	52.08	2.15	16.27	0.25	53000	0.30	0.044
13.0	0.4	-0.4	209	36	86.10	50.37	1.93	15.69	0.24	53000	0.30	0.043
13.5	0.3	-0.3	213	36	87.79	48.75	1.74	15.15	0.23	53000	0.30	0.041
14.0	0.3	-0.3	217	36	89.48	47.24	1.58	14.64	0.22	53000	0.30	0.040
14.5	0.3	-0.3	221	36	91.17	45.80	1.43	14.17	0.21	53000	0.30	0.039
15.0	0.3	-0.3	225	36	92.86	44.45	1.30	13.72	0.20	53000	0.30	0.038
15.5	0.3	-0.3	229	36	94.54	43.17	1.19	13.31	0.19	53000	0.30	0.037
16.0	0.3	-0.3	233	36	96.23	41.95	1.08	12.91	0.18	53000	0.30	0.036
16.5	0.3	-0.3	238	36	97.92	40.80	0.99	12.54	0.17	53000	0.30	0.035
17.0	0.3	-0.3	242	36	99.61	39.71	0.91	12.19	0.16	53000	0.30	0.034
17.5	0.3	-0.3	246	36	101.30	38.67	0.84	11.85	0.16	53000	0.30	0.033
18.0	0.3	-0.3	250	36	102.98	37.68	0.78	11.54	0.15	53000	0.30	0.032
18.5	0.2	-0.2	254	36	104.67	36.74	0.72	11.24	0.14	53000	0.30	0.031
19.0	0.2	-0.2	258	36	106.36	35.85	0.66	10.95	0.14	53000	0.30	0.031
19.5	0.2	-0.2	262	36	108.05	34.99	0.62	10.68	0.13	53000	0.30	0.030
20.0	0.2	-0.2	266	36	109.74	34.17	0.57	10.42	0.13	53000	0.30	0.029
20.5	0.2	-0.2	270	36	111.42	33.39	0.53	10.18	0.12	47000	0.30	0.032
21.0	0.2	-0.2	274	36	113.11	32.65	0.50	9.94	0.12	47000	0.30	0.031
21.5	0.2	-0.2	278	36	114.80	31.93	0.47	9.72	0.11	47000	0.30	0.031
22.0	0.2	-0.2	283	36	116.49	31.24	0.44	9.50	0.11	47000	0.30	0.030
22.5	0.2	-0.2	287	36	118.18	30.59	0.41	9.30	0.11	47000	0.30	0.029
23.0	0.2	-0.2	291	36	119.86	29.95	0.38	9.10	0.10	47000	0.30	0.029
23.5	0.2	-0.2	295	36	121.55	29.35	0.36	8.91	0.10	47000	0.30	0.000
24.0	0.2	-0.2	299	36	123.24	28.77	0.34	8.73	0.10	47000	0.30	0.000

8 MURI DI SOSTEGNO DEI RILEVATI ARGINALI

Il presente progetto prevede la sopraelevazione dei rilevati arginali a seguito della revisione delle condizioni idrologiche e quindi delle quote di pelo libero nelle combinazioni di riferimento già indicate in precedenza per le verifiche delle opere di sbarramento e regolazione.

Per raccordare geometricamente tale sopraelevazione alle spalle esistenti delle opere, sono previsti appositi muri di sostegno, dei quali in questo capitolo si riportano le verifiche geotecniche, con riferimento ai muri di sponda del manufatto regolatore (intervento A). Le verifiche strutturali sono riportate in una separata relazione di verifica delle opere in progetto, alla quale si rimanda per ogni dettaglio in merito.

8.1 Descrizione delle opere

Per la geometria dei muri in progetto si è fatto riferimento alle tavole di progetto A.5.3.3 “Muri di sponda, viste e sezioni” e A.4.1 “Sezioni da A-A a C-C”.

L'allineamento dei muri in progetto segue gran parte quello dei muri esistenti, consentendo il rialzo del rilevato a tergo; a valle dei nuovi muri si ha un rinterro che li raccorda con la testa dei muri esistenti: ciò fa sì che la quasi totalità dei muri in progetto presenti il paramento di valle coperto per buona parte dell'altezza (muri immersi nel terreno sia a monte che a valle).

Nella zona corrispondente al manufatto regolatore, i muri sono dotati di un diaframma strutturale in fondazione, di lunghezza 10m, che ha la funzione di raccordare, in alcuni tratti, i nuovi muri in progetto con le opere di spalla (muri e berme retrostanti) esistenti, che non saranno demolite. Per i dettagli in merito si rimanda agli elaborati di progetto di cui ai doc. rif. [4]÷[6]. In corrispondenza della passerella al coronamento, i muri fanno da spalla alla stessa.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

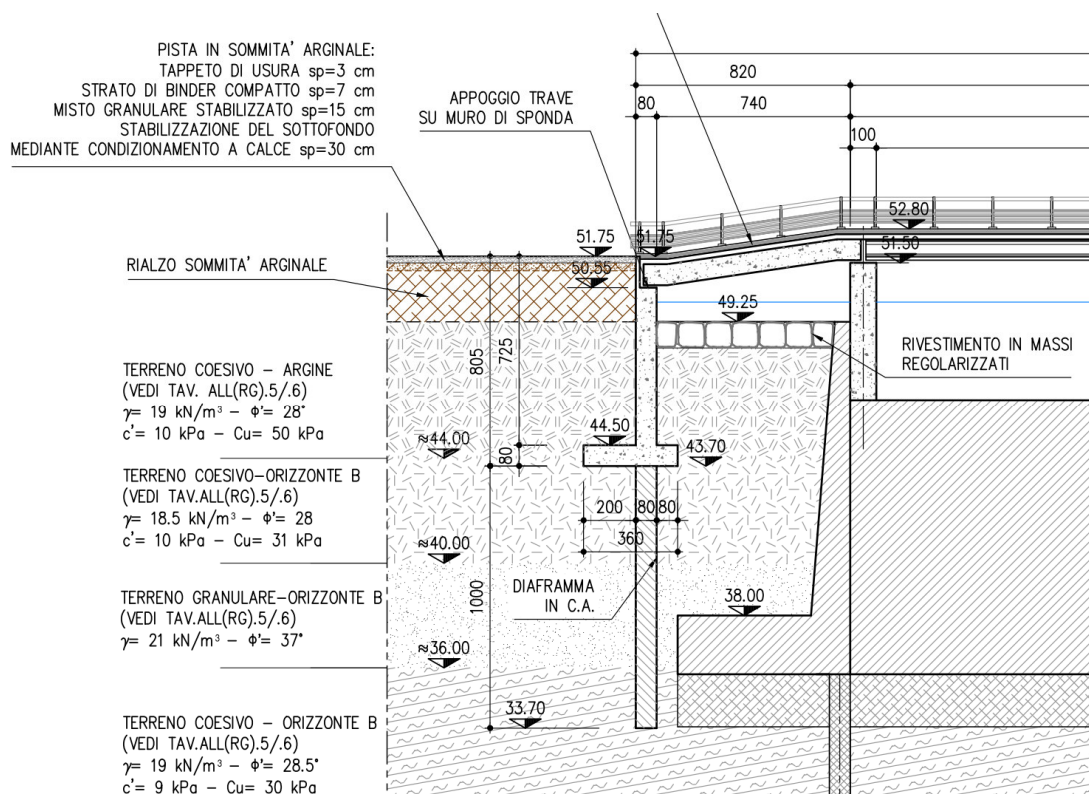


Figura 15 – Sezione in corrispondenza della passerella al coronamento

Nel seguito si analizzano due sezioni tipologiche, individuate come soggette alle condizioni più gravose:

- sezione 4-4, corrispondente alle massime altezze di muro fuori dalla spalla della passerella (le altezze sono simili, ma con una parte a sbalzo più bassa e con la passerella che agisce come elemento stabilizzante nei confronti delle azioni orizzontali);
- sezione 7-7, che, sia pure per un breve tratto, presenta un rinterro a valle di altezza molto ridotta o nulla (assunta nulla nelle verifiche)

Le figure seguenti, stralciate dalla citata tavola A.5.3.3, rappresentano la geometria delle sezioni considerate.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

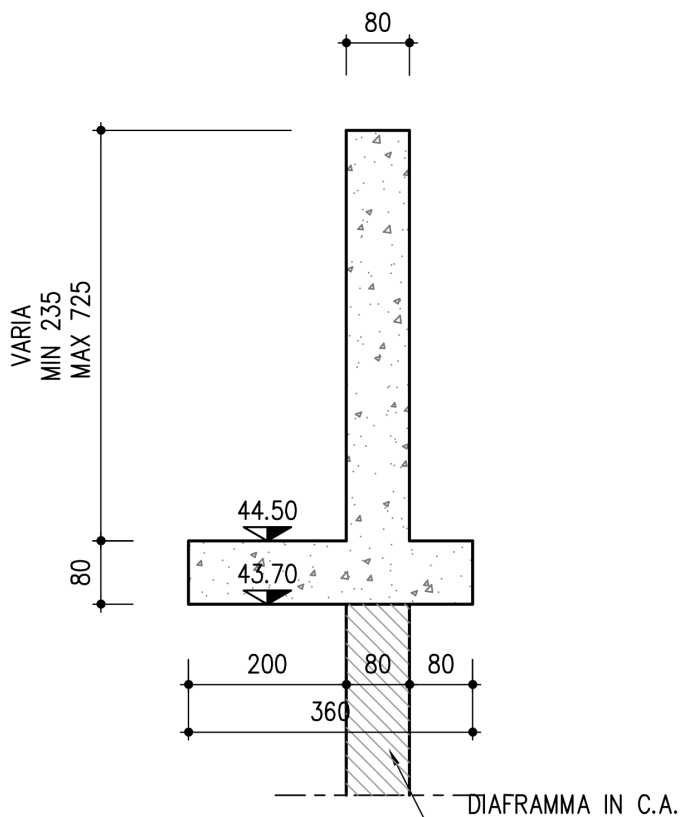


Figura 16. Sezione tipo 4-4

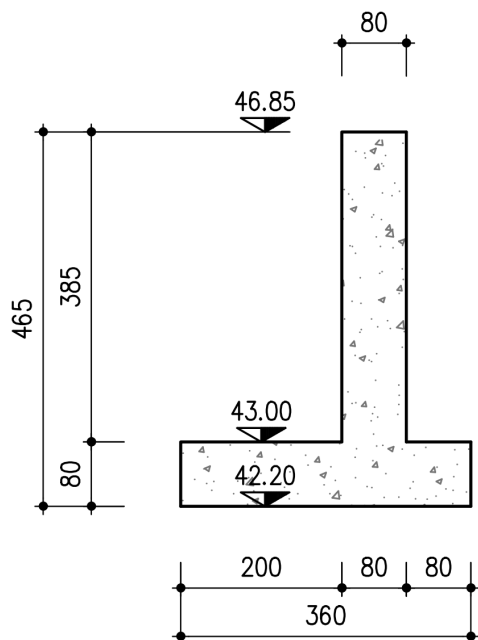


Figura 17. Sezione tipo 4-4

8.2 Criteri e combinazioni di verifica

Data la presenza del diaframma in continuità col paramento e le dimensioni relativamente ridotte della zattera di fondazione, la sezione 4-4 è stata analizzata come una paratia, trascurando del tutto la zattera di fondazione stessa, in via cautelativa.

La sezione 7-7 è stata invece analizzata secondo i criteri classici dei muri di sostegno. I criteri normativi di verifica sono quelli dettati dalla normativa di riferimento per i due casi considerati. In particolare, per la sezione 4-4 si è fatto riferimento, oltre che a un'analisi degli spostamenti orizzontali in condizioni SLE, alla verifica nei confronti del collasso intorno a un punto dell'opera (superamento della resistenza disponibile del terreno), in condizioni statiche e sismiche, secondo la Combinazione 2 dell'Approccio 1 di verifica, ai sensi delle NTC 2018:

A2+M2+R1

Le verifiche per questa sezione sono state svolte mediante il programma "ParatiePlus 2021" commercializzato dalla CeAS di Milano.

Per la sezione 7-7, non vincolata al piede, sono state condotte verifiche di capacità portante, di sicurezza nei confronti di scorrimento e ribaltamento, applicando l'Approccio di verifica 2, ai sensi delle NTC 2018:

A1+M1+R3

Le verifiche per questa sezione sono state svolte mediante un apposito foglio di calcolo a cura di M.Mancina, R.Nori, P.Iasiello e pubblicato e commercializzato dalla casa editrice DEI.

Per i muri di sostegno, i coefficienti parziali γ_R di sicurezza sulle resistenze assumono i valori già indicati nel cap. 4.

Le combinazioni analizzate sono la statica fondamentale di invaso sperimentale e la sismica SLV con gli stessi livelli di acqua, quindi con acqua a quota 46.25 m s.l.m. a monte, e assente a valle (per congruenza con le condizioni di riferimento delle opere idrauliche).

In condizioni sismiche, i coefficienti parziali di sicurezza sulle azioni sono tutti unitari, in accordo alle NTC 2018.

I parametri sismici di riferimento sono stati derivati dall'analisi modale condotta negli elaborati di carattere strutturale, dai quali risulta:

$$a_g = 0.233$$

$$S_S = 1.35$$

$$S_T = 1.00$$

$$\Rightarrow a_{\max} = 0.233 \cdot 1.35 \cdot 1.00 = 0.314$$

Per i coefficienti α (paratie) e β (paratia e muri) si è assunto quanto segue:

$$\alpha = 1 \quad (\text{cautelativo})$$

$\beta = 0.8265$ calcolato automaticamente dal codice di calcolo per la paratia in corrispondenza di uno spostamento orizzontale di 1cm (valutato mediante approssimazioni successive coi risultati delle analisi)

$\beta = 0.38$ per i muri su fondazione diretta, secondo NTC2018

Per il materiale costituente il rilevato arginale sono stati assunti la stratigrafia e i parametri indicati in Figura 15. Per i moduli elastici, si è fatto riferimento all'Allegato RGT1 alla relazione geotecnica stessa; in dettaglio:

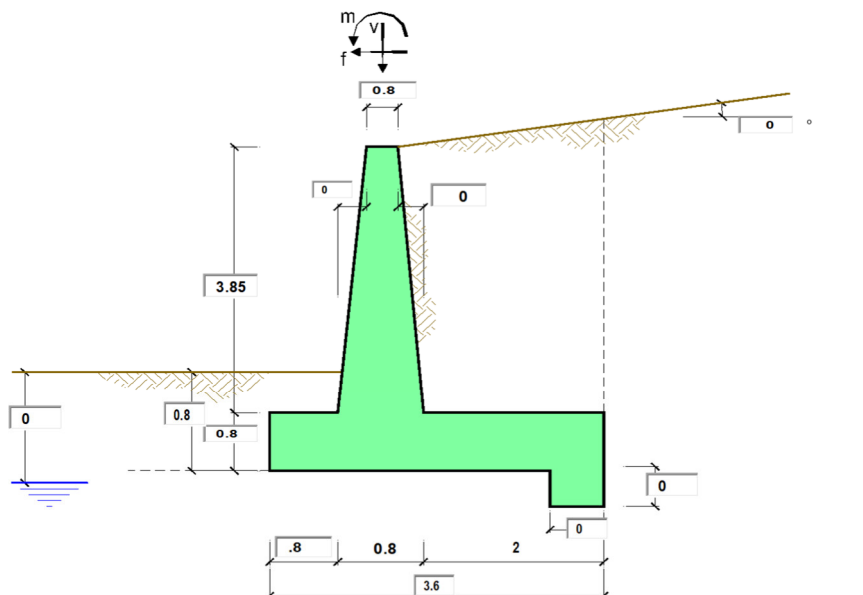
$E = 8 \text{ MPa}$ per tutti i livelli coesivi presenti nel corpo arginale

$E = 40 \text{ MPa}$ per il livello granulare nel corpo arginale

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

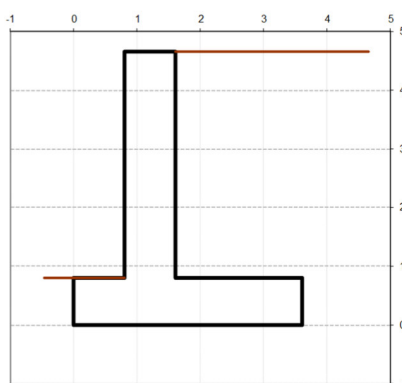
8.3 Risultati delle verifiche: sezione 7-7



OPERA Esempio

Combinazioni coefficienti parziali di verifica

SLU	Approccio 1	comb. 1	A1+M1+R1 EQU+M2	<input type="radio"/>
		comb. 2	A2+M2+R2 EQU+M2	<input type="radio"/>
	Approccio 2		A1+M1+R3 EQU+M2	<input checked="" type="radio"/>
	SLE (DM88)			<input type="radio"/>
altro				<input type="radio"/>



Peso Specifico del Calcestruzzo γ_{cls} = 25.00 (kN/m3)

Carichi	Effetto	Coeff. Parziale	EQU	A1 (STR)	A2 (GEO)	SLE	altro
Permanenti	favorevole	γ_G	0.90	1.00	1.00	1.00	1.10
	sfavorevole		1.10	1.30	1.00	1.00	1.10
Variabili	favorevole	γ_Q	0.00	0.00	0.00	0.00	1.10
	sfavorevole		1.50	1.50	1.30	1.00	1.10

Parametro	Coeff. Parziale	M1	M2	SLE	altro
angolo d'attrito	γ_{ϕ}	1.00	1.25	1.00	1.00
coesione	γ_c	1.00	1.25	1.00	1.00
resistenza non drenata	γ_{cu}	1.00	1.40	1.00	1.00
peso unità di volume	γ	1.00	1.00	1.00	1.00

Verifica	Coeff. Parziale	R1	R2	R3	SLE	altro
Capacità portante fondazione	γ_R	1.00	1.00	1.40	2.00	1.00
Scorrimento		1.00	1.00	1.10	1.30	1.00
Ribaltamento		1.00	1.00	1.00	1.50	1.00

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Dati Geotecnici				valori caratteristici SLE	valori di progetto	
					STR/GEO	EQU
Dati Terrapieno	Angolo di attrito del terrapieno	(°)	ϕ'	28.00	28.00	23.04
	Peso Unità di Volume del terrapieno	(kN/m ³)	γ'	19.00	19.00	19.00
	Angolo di attrito terreno-superficie ideale	(°)	δ	28.00	28.00	23.04
Dati Terreno Fondazione	Condizioni		<input checked="" type="radio"/> drenate <input type="radio"/> Non Drenate			
	Coesione Terreno di Fondazione	(kPa)	c_1'	10.00	10.00	8.00
	Angolo di attrito del Terreno di Fondazione	(°)	ϕ_1'	28.00	28.00	23.04
	Peso Unità di Volume del Terreno di Fondazione	(kN/m ³)	γ_1	18.50	18.50	18.50
	Peso Unità di Volume del Rinterro della Fondazione	(kN/m ³)	γ_d	18.50	18.50	18.50
	Profondità "Significativa" (n.b.: consigliata H = 2*B)	(m)	Hs	7.50		
	Modulo di deformazione	(kN/m ²)	E	20000		

Dati Sismici	Accelerazione sismica	a_g/g	0.233	(-)
	Coefficiente Amplificazione Stratigrafico	S_S	1.35	(-)
	Coefficiente Amplificazione Topografico	S_T	1	(-)
	Coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima	β_s	0.38	(-)
	Coefficiente sismico orizzontale	k_h	0.119529	(-)
	Coefficiente sismico verticale	k_v	0.0598	(-)
	Muro libero di traslare o ruotare		<input checked="" type="radio"/> si <input type="radio"/> no	

		SLE		STR/GEO		EQU	
Coefficienti di Spinta	Coeff. di Spinta Attiva Statico	ka	0.319		0.319		0.381
	Coeff. Di Spinta Attiva Sismica sisma +	kas+	0.408		0.408		0.481
	Coeff. Di Spinta Attiva Sismica sisma -	kas-	0.422		0.422		0.496
	Coeff. Di Spinta Passiva	kp	2.770		2.770		2.286
	Coeff. Di Spinta Passiva Sismica sisma +	kps+	2.575		2.575		2.106
	Coeff. Di Spinta Passiva Sismica sisma -	kps-	2.548		2.548		2.082

Carichi Agenti				valori caratteristici SLE - sisma	valori di progetto	
					STR/GEO	EQU
Carichi permanenti	Sovraccarico permanente	<input type="radio"/> si <input checked="" type="radio"/> no	(kN/m ²)	qp	0.00	0.00
	Sovraccarico su zattera di monte					
	Forza Orizzontale in Testa permanente		(kN/m)	fp	0.00	0.00
	Forza Verticale in Testa permanente		(kN/m)	vp	0.00	0.00
Condizioni Statiche	Momento in Testa permanente		(kNm/m)	mp	0.00	0.00
	Sovraccarico Accidentale in condizioni statiche		(kN/m ²)	q	20.00	30.00
	Forza Orizzontale in Testa accidentale in condizioni statiche		(kN/m)	f	0.00	0.00
	Forza Verticale in Testa accidentale in condizioni statiche		(kN/m)	v	0.00	0.00
	Momento in Testa accidentale in condizioni statiche		(kNm/m)	m	0.00	0.00
Condizioni Sismiche	Coefficienti di combinazione condizione frequente Ψ_1		0.75	condizione quasi permanente Ψ_2	0.00	0.00
	Sovraccarico Accidentale in condizioni sismiche		(kN/m ²)	qs	0.00	
	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	

Coefficienti di sicurezza			
	<u>Scorrimento</u>	<u>Ribaltamento</u>	<u>Carico limite</u>
Statico	1.65	13.44	2.36
Sismico	1.57	5.29	2.55

Le verifiche per la sezione in esame risultano dunque soddisfatte sia in condizioni statiche sia in condizioni sismiche, con margini di sicurezza sempre eccedenti i minimi richiesti dalla normativa vigente.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

8.4 Risultati delle verifiche: sezione 4-4

La figura seguente rappresenta gli spostamenti della sezione, in condizioni SLE.

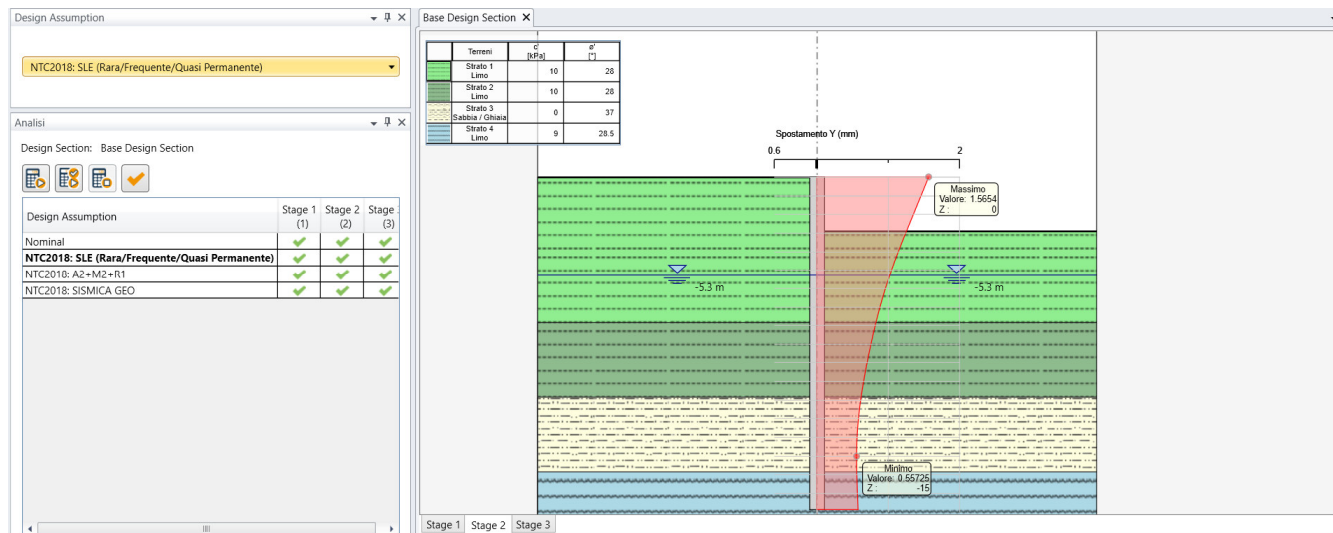


Figura 18. Sez. 4-4 – Spostamenti orizzontali SLE

Lo spostamento in testa è dell'ordine di circa 2mm, che appare del tutto compatibile con la funzionalità in esercizio delle opere in progetto, stante la tipologia delle opere stesse (rilevati non molto sensibili allo spostamento).

La figura successiva riporta le spinte del terreno in condizioni SLU GEO A2+M2: la spinta mobilitata risulta ampiamente inferiore a quella disponibile.

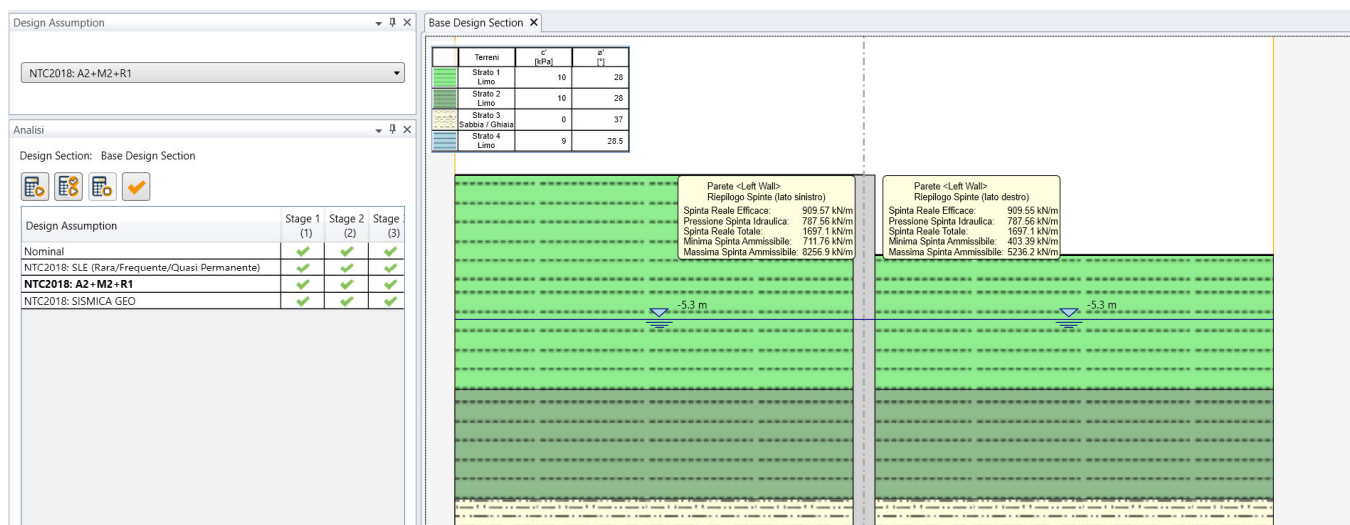


Figura 19. Sez. 4-4. SLU GEO - Spinte mobilitate e disponibili

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Le ultime due figure riportano la stessa sintesi delle spinte, in condizioni sismiche SLV, e lo spostamento orizzontale nelle stesse condizioni.

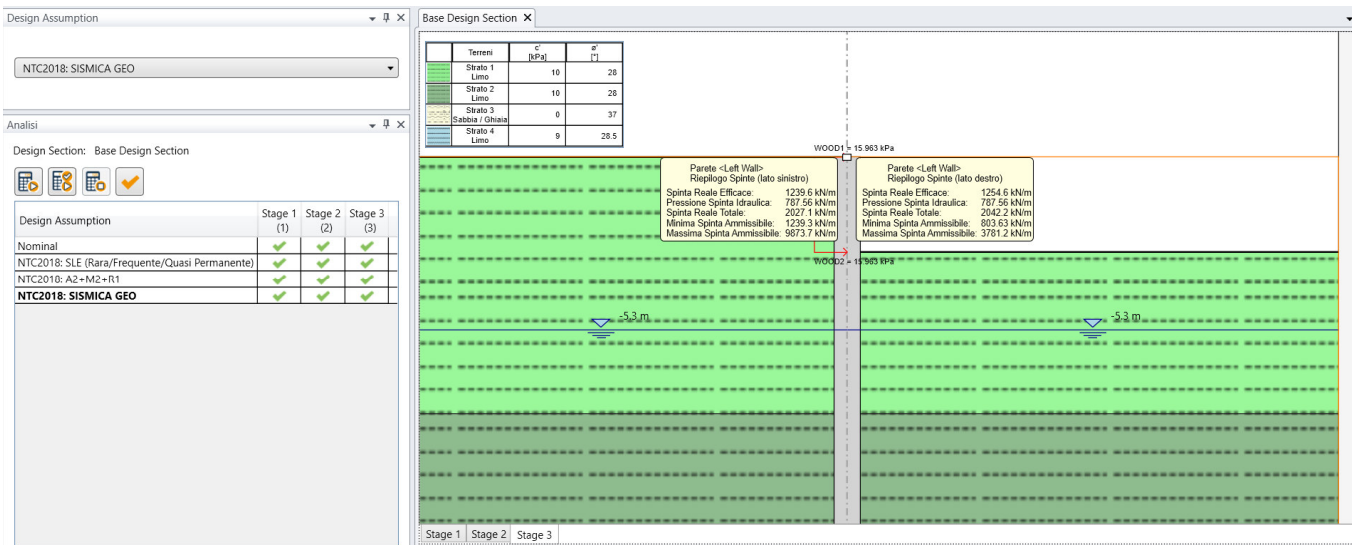


Figura 20. Sez. 4-4. SLV - Spinte mobilitate e disponibili

La verifica risulta dunque soddisfatta con buon margine.

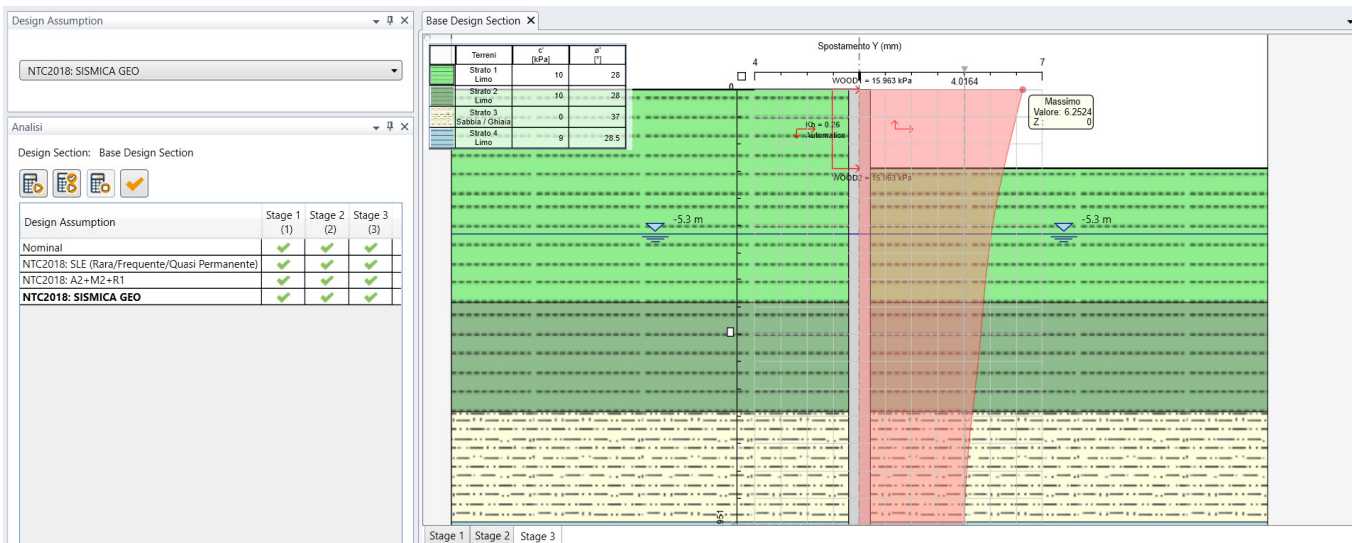


Figura 21 Sez. 4-4. SLV – Spostamenti orizzontali

Gli spostamenti calcolati in queste condizioni sono dell'ordine di 6-7mm, prossimi a quelli assunti per il calcolo di β .

Le verifiche geotecniche di riferimento risultano dunque soddisfatte per entrambe le sezioni analizzate.