

## 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 COMPENSIVO 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 Bonelli, 19 – 20133 MILANO Tel. 02-70600125  
server@dezetaingegneria.it Fax 02-70600014

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

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

**MAJONE&PARTNERS**  
ENGINEERING

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



**ENGEO** S.r.l.  
ENGINEERING GEOLOGY  
www.engeo.it

GEOL. CARLO CALEFFI  
GEOL. FRANCESCO CERUTTI

MANDANTE  
ASPETTI AMBIENTALI



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

MANDANTE  
ASPETTI PAESAGGISTICI

**STUDIO PANDAKOVIC**

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

**colleselli & p.**  
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					
02					

## INDICE

<b>1</b>	<b>Premessa</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Documenti di riferimento</b>	<b>5</b>
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
<b>3</b>	<b>DESCRIZIONE DELLE OPERE</b>	<b>8</b>
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
<b>4</b>	<b>Criteri normativi di verifica</b>	<b>14</b>
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
<b>5</b>	<b>MODALITA', CRITERI E ASSUNZIONI DI CALCOLO</b>	<b>22</b>
5.1	Situazioni progettuali e combinazione delle azioni	22
5.2	Modalità e criteri di calcolo	24
5.2.1	<i>Capacità portante e scorrimento</i>	24
5.2.2	<i>Ribaltamento</i>	26

<b>5.2.3 Cedimenti</b>	<b>26</b>
<b>6 VERIFICHE MANUFATTO DI REGOLAZIONE</b>	<b>28</b>
<b>6.1 Stratigrafia e parametri di calcolo</b>	<b>28</b>
<b>6.1.1 Risultati delle verifiche</b>	<b>30</b>
6.1.1.1 Combinazione fondamentale - Fine costruzione e serbatoio vuoto	30
6.1.1.2 Combinazione fondamentale – $Q_w = 48.75$ m s.l.m.	33
6.1.1.3 Combinazione eccezionale – Piena duecentennale	38
6.1.1.4 Combinazione sismica	41
<b>6.1.2 Manufatto esistente</b>	<b>45</b>
6.1.2.1 Criteri e assunzioni di verifica	45
6.1.2.2 Combinazione fondamentale – $Q_w = 48.75$ m s.l.m.	47
6.1.2.3 Combinazione eccezionale - Piena di riferimento ( $T_R = 200$ anni)	50
6.1.2.4 Combinazione sismica	53
<b>7 VERIFICHE SFIORATORE LATERALE</b>	<b>57</b>
<b>7.1 Capacità portante</b>	<b>57</b>
<b>7.1.1 Combinazione frequente</b>	<b>58</b>
<b>7.1.2 Condizioni sismiche</b>	<b>61</b>
<b>7.2 Cedimenti</b>	<b>62</b>
<b>8 MURI DI SOSTEGNO DEI RILEVATI ARGINALI</b>	<b>64</b>
<b>8.1 Descrizione delle opere</b>	<b>64</b>
<b>8.2 Criteri e combinazioni di verifica</b>	<b>65</b>
<b>8.3 Risultati delle verifiche</b>	<b>67</b>

**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)



### **8.3.1 Capacità portante**

**70**





## 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 taglione) – 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 m<sup>3</sup>, 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

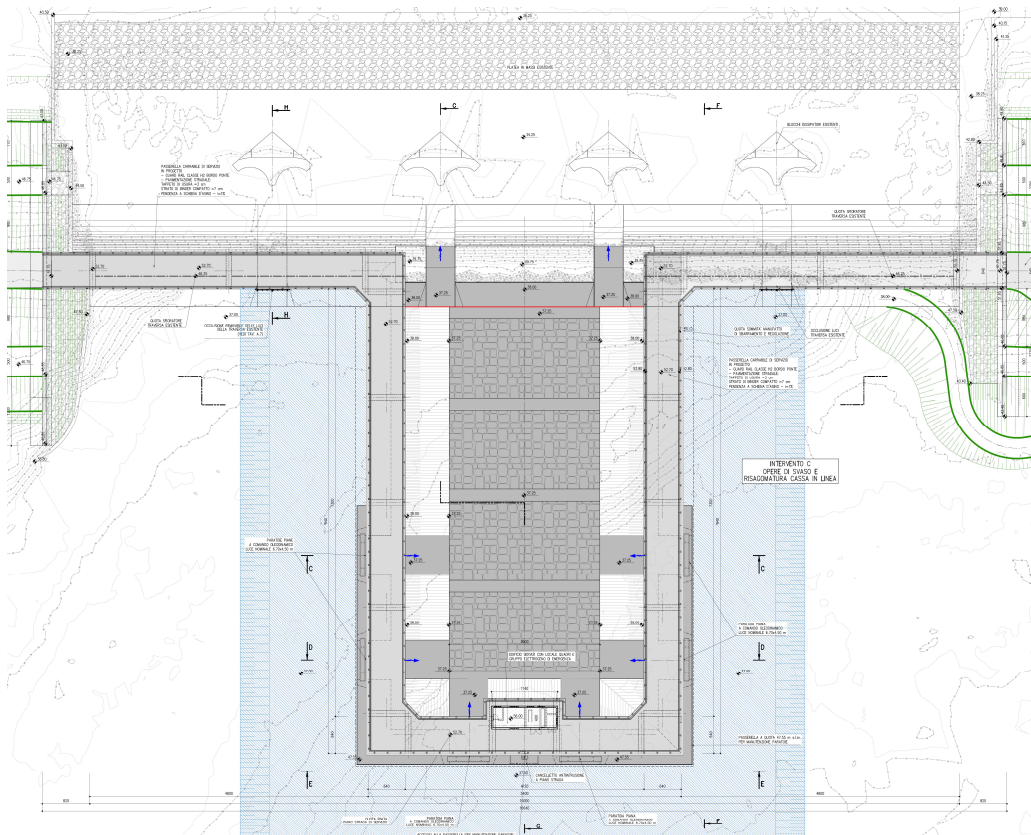
Con specifico ed esclusivo riferimento al manufatto regolatore in linea e allo sfioratore laterale per il deflusso nella cassa di espansione fuori linea, il progetto prevede la configurazione delle opere descritta nel seguito.

### 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.

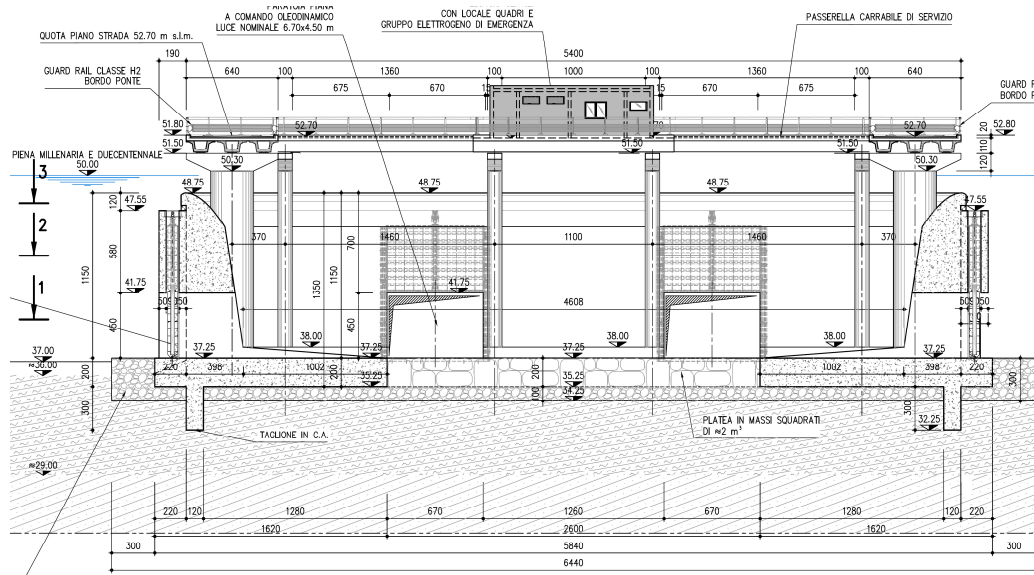
La traversa sarà sormontata, lungo l’intera estensione da una passerella di coronamento carrabile, a quota 52.70 m s.l.m. (esclusi i parapetti e altre opere accessorie); il punto più depresso dei paramenti, in particolare di quello di monte, è a quota 37.00 m s.l.m., ciò che conferisce alla traversa,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



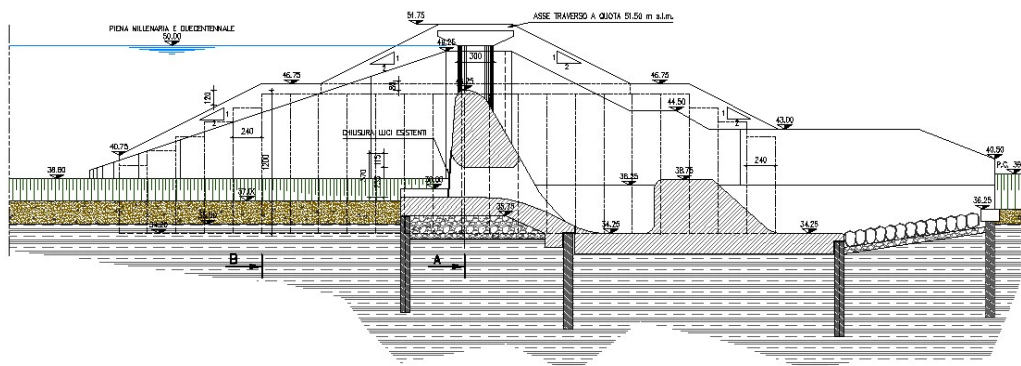
**MO-E-1357** - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) 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.).



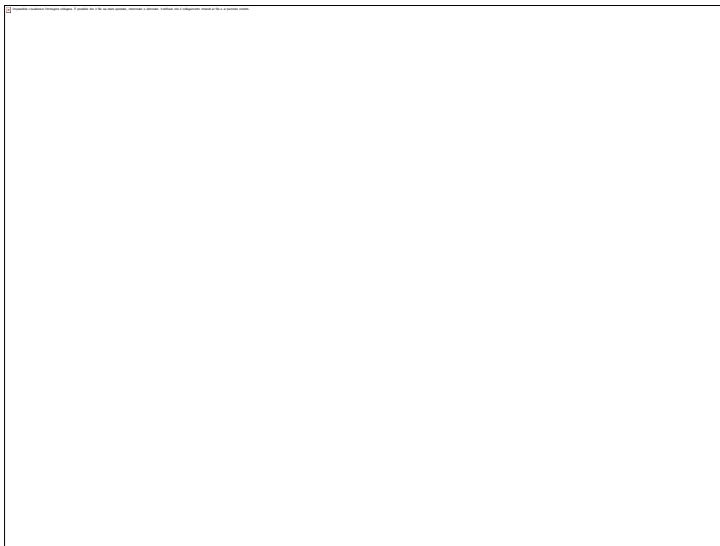
**Figura 2 – Adeguamento manufatto di regolazione – Sezione tratti longitudinali e vista tratto trasversale**



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



Il tratto di nuova realizzazione del manufatto presenta inoltre un dente in fondazione, di dimensioni 1.2x3.0m, atto a garantire la stabilità a scorrimento e ribaltamento in condizioni sismiche.



### **3.2.2 Manufatto di sfioro**

Il manufatto sfioratore laterale esistente sarà demolito e sostituito per intero da una nuova struttura.

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.

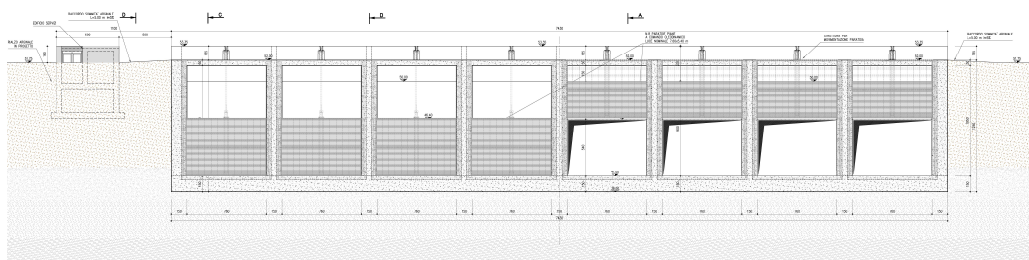
L'opera avrà lunghezza complessiva di 74.30 m.

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.

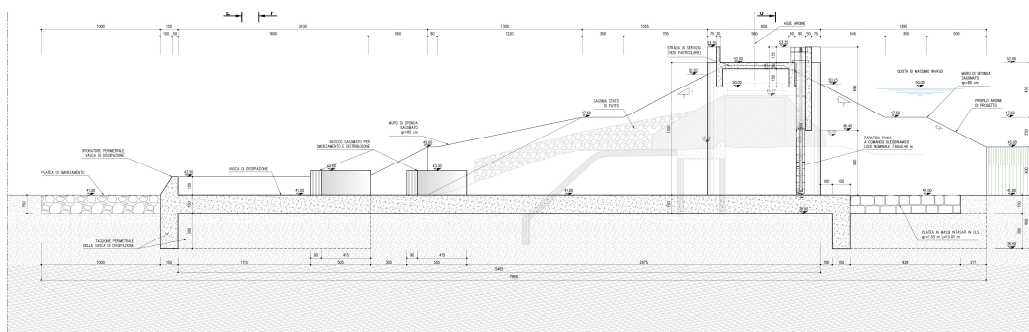
La platea di fondazione ha spessore di 1.5m e presenta lungo il perimetro un dente in calcestruzzo armato di profondità pari a 3m da intradosso platea.

**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 4 – Sfioratore laterale – Sezione longitudinale dell’opera**



**Figura 5 – Sfioratore 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 dire<sup>1</sup>:

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

prescrivendo di adottare per i coefficienti  $\gamma_R$  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 $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti $G_1$	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	$\gamma_{Qi}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

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

<sup>1</sup> 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.

**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)



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

**Tabella 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  $\gamma_R$  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  $\gamma_R$  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  $\gamma_R$  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  $\gamma_R$  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  $\gamma_R$  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 $\gamma_R$
Carico limite	1.2
Scorrimento	1.0
Ribaltamento	1.0
Resistenza del terreno a valle	1.2

**Tabella 6. Coefficienti parziali  $\gamma_R$  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 solo con riferimento allo Stato Limite Di Vita SLV, assumendo tuttavia  $\beta = 1.0$ , sia per le opere di sbarramento che per i muri arginali. Si è infatti considerato che tutte le opere considerate, data la loro configurazione, difficilmente potranno subire spostamenti, se non molto limitati.

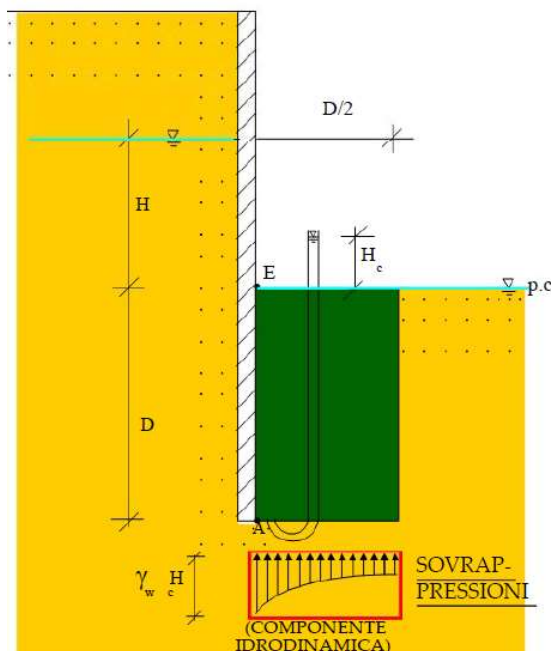
È facile verificare che la condizione SLV con  $\beta = 1$  risulta più gravosa della SLD, che per tale motivo non è stata analizzata.

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 $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	SOLLEVAMENTO (UPL)
Permanenti	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9
	Sfavorevole		1,1
Permanenti non strutturali <sup>(1)</sup>	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,0
	Sfavorevole		1,5
Variabili	Favorevole	$\gamma_{Q1}$	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 taglio, pari a metà dell'infissione del taglio stesso.



**Figura 6 – 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 m<sup>3</sup> 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>	$\geq 100$		2,0	200	
<i>rilevanti</i>	$\geq 50^{(1)}$	$\geq 100^{(2)}$	1,5	75 <sup>(1)</sup>	150 <sup>(2)</sup>
<i>Imp. normale</i>	$\geq 50$		1	50	

<sup>(1)</sup> dighe di dimensioni contenute

<sup>(2)</sup> 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:

$$a_{max}/g = 0.49 \quad \text{manufatto regolatore}$$

$$a_{max}/g = 0.35 \quad \text{sfioratore laterale}$$

## 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 <sup>(1)</sup>	SI <sup>(2)</sup>	SI <sup>(1)</sup>	SI <sup>(1)</sup>
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

<sup>(1)</sup> quota massima regolazione e livelli inferiori nonché serbatoio vuoto

<sup>(2)</sup> 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
Massima regolazione con bocche aperte (frequente)	46.25	44.11
Massima regolazione con bocche chiuse	48.75	44.11
Piena duecentennale	49.80	44.53
Piena millenaria	49.97	45.25

**Tabella 9. Situazioni progettuali: manufatto regolatore**

Situazione progettuale	Monte	Valle
Frequente	48.75	-

**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
	Esercizio normale (massima regolazione)	Capacità portante
		Scorrimento
Eccezionale	Piena duecentennale	Ribaltamento
		Capacità portante
		Scorrimento
		Ribaltamento
Sisma	SLV	Capacità portante
		Scorrimento
		Ribaltamento

**Tabella 11. Situazioni progettuali analizzate**

Non è stata analizzata la piena millenaria perché, come si vede dalla tabella soprastante, la quota dell'acqua di monte è solo di pochissimo (17 cm) superiore a quella in corrispondenza della piena duecentennale, mentre l'acqua a valle risulta a una quota superiore di circa 75cm, fermo restando tutto il resto: lo sbilanciamento delle spinte idrostatiche monte-valle risulta dunque minore e quindi la situazione progettuale meno gravosa.

Per la parte di sbarramento esistente che rimane in opera, saranno considerate le seguenti situazioni progettuali:

Combinazione di carico	Situazione progettuale
SLU Fondamentale/SLE	Massima regolazione con bocche chiuse
Sismica	Assenza di acqua
Eccezionale	Piena duecentennale

**Tabella 12. Situazioni progettuali analizzate per il manufatto esistente**

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

Per quanto riguarda il sisma, come anticipato in precedenza, si è analizzato il solo stato limite di vita, poiché anche per questo si è assunto  $\beta = 1.0$ , e quindi tale SLU risulta più gravoso dello stato limite di danno SLD.

## 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

$\gamma$  = 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:

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

essendo  $H$  e  $N$  le risultanti rispettivamente delle azioni orizzontali e verticali in fondazione, e  $\varphi'$  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  $\gamma_R$  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

$\Delta h_i$  = 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

$\mu$  = coefficiente di Poisson = 0.30

Il calcolo è stato interrotto a una profondità tale che:

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

essendo:

$\sigma'_{v0}$  = 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 nastroformi rettangolari, secondo cui:

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

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

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

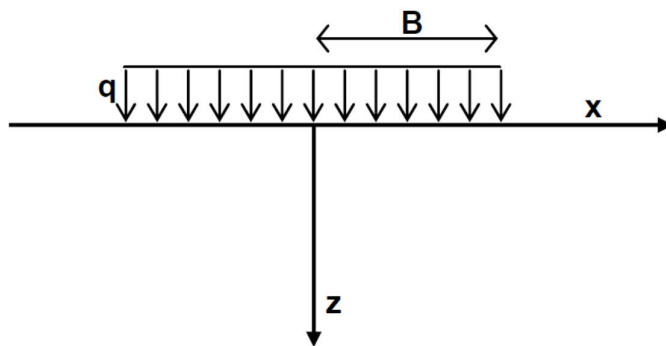
in cui:

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

$\mu$  = coefficiente di Poisson



**Figura 7 – Schema di carico uniforme e convenzioni**



## 6 VERIFICHE MANUFATTO DI REGOLAZIONE

### 6.1 Stratigrafia e parametri di calcolo

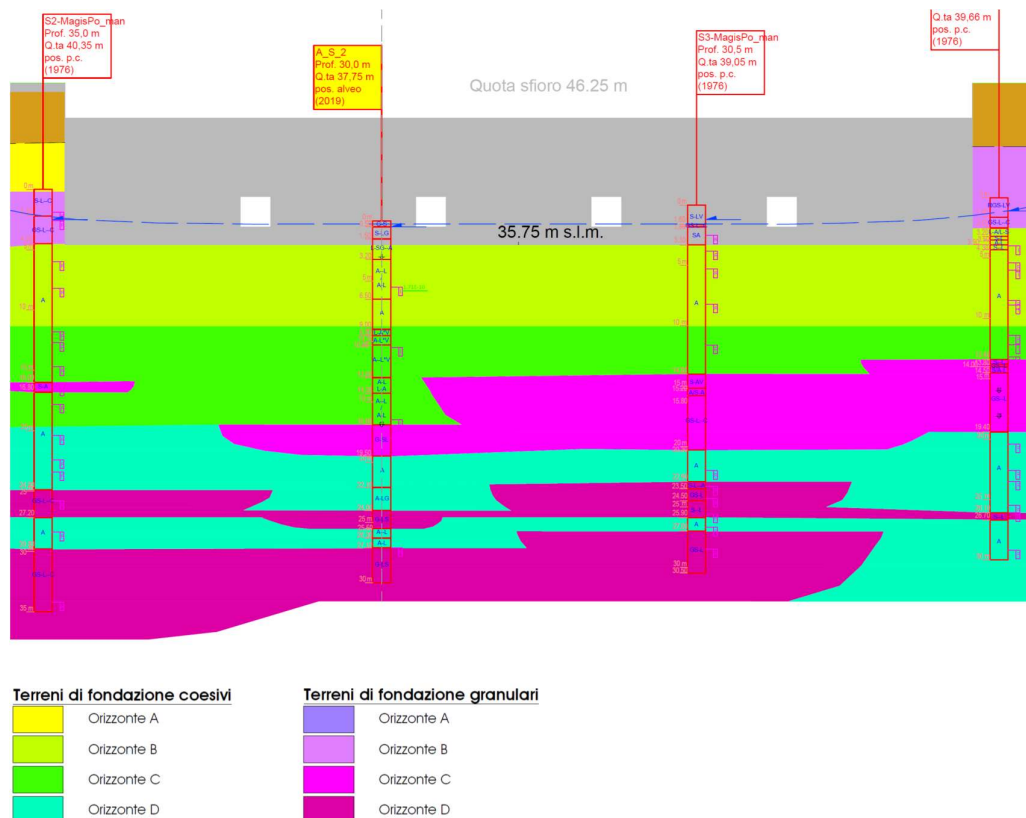
La stratigrafia di riferimento vede, nell'ambito delle profondità di interesse e procedendo dal piano di imposta alla quota 35.25 m s.l.m.:

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 delle verifiche

### 6.1.1.1 Combinazione fondamentale - Fine costruzione e serbatoio vuoto

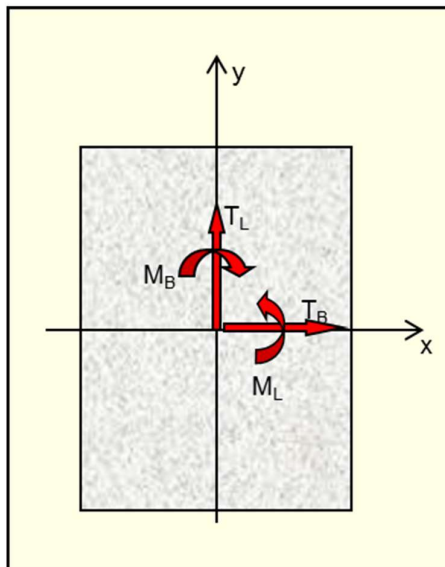
La traversa ha, in media, un volume per unità di lunghezza di circa  $73.6 \text{ m}^3/\text{m}$ , avendo considerato la presenza delle luci e del coronamento coi relativi montanti di sostegno e pulvini (i cui volumi sono ricavabili dagli elaborati di cui ai doc. rif. [5] e [6]).

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

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 8. 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]	$\gamma$	19.0	[kN/m <sup>3</sup> ]	N	166514.4
L	54.0	[m]	$c_u$	81.4	[kPa]	N*	166514.4
A	955.8	[m <sup>2</sup> ]				M <sub>B</sub>	248137.3
H	1.5	[m]	Nc,s	5.14	[-]	M <sub>L</sub>	0.0
D	3.00	[m]				H <sub>B</sub>	0.0
Z <sub>w</sub>	0.00	[m]				H <sub>L</sub>	0.0
B'	14.72	[m]				$\sigma'_{ave}$	174.21
L'	54.00	[m]				e <sub>B</sub>	1.490
A'	794.86	[m <sup>2</sup> ]				e <sub>L</sub>	0.000
						$\sigma_1$	66.85
q	57.0	[kPa]				$\sigma_2$	105.57
						$\sigma_3$	242.86
						$\sigma_4$	281.58
<b>q<sub>es,d</sub></b>	<b>209.5</b>	<b>[kPa]</b>					
$\gamma_R$	=	2.3			A1+M1+R3		
<b>q<sub>lim,k</sub></b>	=	<b>589</b> [kPa]			$q_{lim,k} = q_{lim, \gamma_i} + q_{lim, q_i} + q_{lim, c_i}$		
<b>q<sub>lim,d</sub></b>	=	<b>256</b> [kPa]			$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$		
<b>FS<sub>calc</sub></b>	=	<b>1.22</b>			$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$		

### 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]	$\gamma$	19.0	[kN/m <sup>3</sup> ]	N	166514.4	[kN]
L	54.0	[m]	$\phi_{PS}$	28.5	[°]	N*	166514.4	[kN]
A	955.8	[m <sup>2</sup> ]	$\phi_{TR}$		[°]	M <sub>B</sub>	248137.3	[kNm]
H	1.5	[m]	$\phi_{cv}$		[°]	M <sub>L</sub>	0.0	[kNm]
D	3.00	[m]	c'	9.0	[kPa]	H <sub>B</sub>	0.0	[kN]
Z <sub>w</sub>	0.00	[m]				H <sub>L</sub>	0.0	[kN]
h <sub>w</sub>	3	[m]	$\gamma_{cB'}$	9.40	[kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma'_{ave}$	174.21	[kPa]
B'	14.72	[m]	$\gamma_{cL'}$	9.25	[kN/m <sup>3</sup> ]	e <sub>B</sub>	1.490	[m]
L'	54.00	[m]				e <sub>L</sub>	0.000	[m]
A'	794.86	[m <sup>2</sup> ]				$\sigma_1$	145.37	[kPa]
						$\sigma_2$	203.06	[kPa]
q'	27.6	[kPa]	$\sigma_v (B/2)$	81.4		$\sigma_3$	145.37	[kPa]
			$p(B/2)$	53.0		$\sigma_4$	203.06	[kPa]
<b>q<sub>es,d</sub></b>	<b>209.5</b>	<b>[kPa]</b>						
$\gamma_R$	=	2.3			A1+M1+R3			
<b>q<sub>lim,k</sub></b>	=	<b>1535</b>	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim, \gamma i} + q_{lim, q i} + q_{lim, c i}$			
<b>q<sub>lim,d</sub></b>	=	<b>667</b>	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
<b>FS<sub>calc</sub></b>	=	<b>3.19</b>			$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$			

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 – $Q_w = 48.75 \text{ m s.l.m.}$

Si è considerata solo la situazione di massima regolazione e bocche chiuse, nella quale si ha un dislivello dell'acqua maggiore rispetto a quella di massima regolazione a bocche aperte; 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 44.11 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

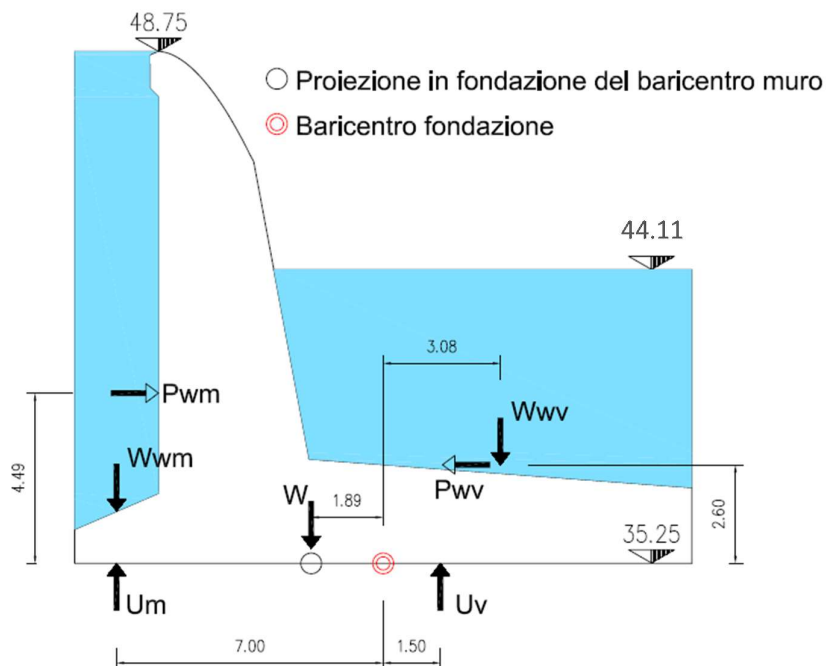
$U_v$  = sottospinta alla base della zattera di valle

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 dente in c.a. e il terreno fine alla base della fondazione, in cui è immerso.

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.

**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 9 – Man. regolatore: schema per capacità portante e scorrimento: fondamentale massima regolazione  $Q_w = 48.75$  m s.l.m / bocche chiuse**

V	W	1841.1 kN/m
	Wwm	257 kN/m
	Wwv	665 kN/m
	Um	-291 kN/m
	Uv	-1113 kN/m
	$\Sigma$	1360 kN/m

H	Pwm	894 kN/m
	Pwv	-385 kN/m
	$\Sigma$	509 kN/m

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

**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

$q_{es,d} = 136.1 \text{ kPa}$  carico medio agente sulla fondazione ideale  
 $q_{lim,k} = 1666 \text{ kPa}$  portata limite caratteristica sulla fondazione ideale  
 $q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 724 \text{ kPa}$  portata limite di calcolo sulla fondazione ideale  
 $q_{lim,d} / q_{s,d} = 5.32 > 1.0$

B	17.7	[m]	$\gamma$	19.0	[kN/m <sup>3</sup> ]	N	132720.1	[kN]
L	54.0	[m]	$\phi_{PS}$	28.5	[°]	N*	132720.1	[kN]
A	955.8	[m <sup>2</sup> ]	$\phi_{TR}$		[°]	M <sub>B</sub>	-23763.3	[kNm]
H	1.5	[m]	$\phi_{CV}$		[°]	M <sub>L</sub>	0.0	[kNm]
D	3.00	[m]	c'	9.0	[kPa]	H <sub>B</sub>	509.0	[kN]
Z <sub>w</sub>	0.00	[m]				H <sub>L</sub>	0.0	[kN]
h <sub>w</sub>	3	[m]	$\gamma_{cB'}$	9.36	[kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma'_{ave}$	138.86	[kPa]
B'	18.06	[m]	$\gamma_{cL'}$	9.25	[kN/m <sup>3</sup> ]	e <sub>B</sub>	-0.179	[m]
L'	54.00	[m]				e <sub>L</sub>	0.000	[m]
A'	975.14	[m <sup>2</sup> ]				$\sigma_1$	141.62	[kPa]
						$\sigma_2$	136.10	[kPa]
q'	27.6	[kPa]	$\sigma_v (B/2)$	81.4		$\sigma_3$	141.62	[kPa]
			$p_{(B/2)}$	53.0		$\sigma_4$	136.10	[kPa]
			$l_R$	0				
<b>q<sub>es,d</sub></b>	<b>136.1</b>	<b>[kPa]</b>						
$\gamma_R$	=	2.3		A1+M1+R3				
<b>q<sub>lim,k</sub></b>	=	<b>1666</b>	[kPa]	$q_{lim,k} = q_{lim, \gamma_i} + q_{lim, q_i} + q_{lim, c_i}$				
<b>q<sub>lim,d</sub></b>	=	<b>724</b>	[kPa]	$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$				
<b>FS<sub>calc</sub></b>	=	<b>5.32</b>		$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$				



### Condizioni non drenate

$q_{es,d} = 136.1 \text{ kPa}$  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  
 $q_{lim,d} / q_{s,d} = 1.88 > 1.0$

B	17.7	[m]	$\gamma$	19.0	[kN/m <sup>3</sup> ]	N	132720.1	[kN]
L	54.0	[m]	$c_u$	81.4	[kPa]	N*	132720.1	[kN]
A	955.8	[m <sup>2</sup> ]				M <sub>B</sub>	-23763.3	[kNm]
H	1.5	[m]	Nc,s	5.14	[-]	M <sub>L</sub>	0.0	[kNm]
D	3.00	[m]				H <sub>B</sub>	509.0	[kN]
Z <sub>w</sub>	0.00	[m]				H <sub>L</sub>	0.0	[kN]
B'	18.06	[m]				$\sigma'_{ave}$	138.86	[kPa]
L'	54.00	[m]				e <sub>B</sub>	-0.179	[m]
A'	975.14	[m <sup>2</sup> ]				e <sub>L</sub>	0.000	[m]
						$\sigma_1$	141.62	[kPa]
q	57.0	[kPa]				$\sigma_2$	136.10	[kPa]
						$\sigma_3$	141.62	[kPa]
						$\sigma_4$	136.10	[kPa]
<b>q<sub>es,d</sub></b>	<b>136.1</b>	<b>[kPa]</b>						
$\gamma_R$	=	2.3			A1+M1+R3			
<b>q<sub>lim,k</sub></b>	=	<b>589</b>	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim,\gamma} + q_{lim,qi} + q_{lim,ci}$			
<b>q<sub>lim,d</sub></b>	=	<b>256</b>	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
<b>FS<sub>calc</sub></b>	=	<b>1.88</b>			$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$			

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:

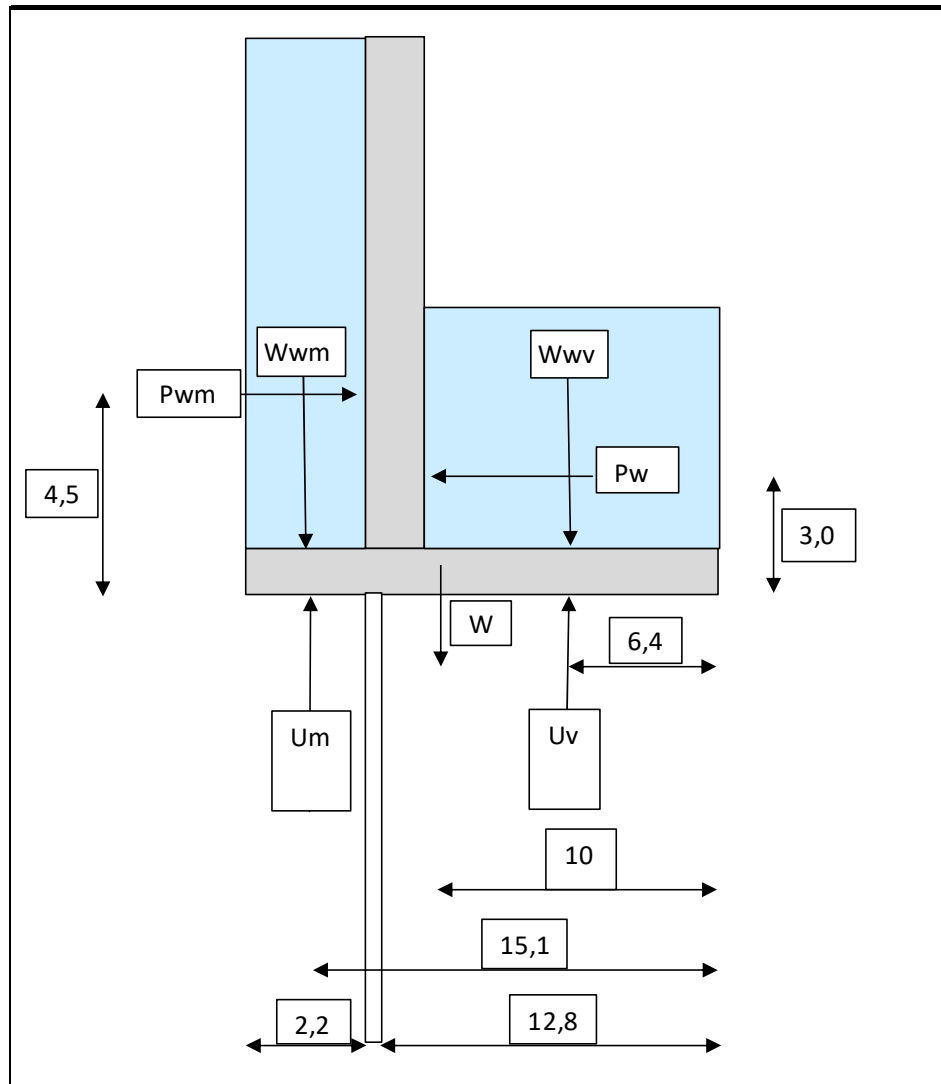
$\Sigma H = 509 \text{ kN/m}$  risultante delle azioni orizzontali

$\Sigma V = 1360 \text{ kN/m}$  risultante delle azioni verticali

$$(\Sigma V \cdot \tan \phi / \gamma_M) / \Sigma H \cdot \gamma_E = 1062 / 662 = 1.61 > 1.15 = \gamma_R$$

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.



**Figura 10 – Man. regolatore: schema verifica a ribaltamento – Fondamentale  $Q_w = 48.75$  m slm**

$$M_{rib} = U_m \cdot 15.10 + U_v \cdot 6.60 + P_{wm} \cdot 4.50 = 15537 \text{ kNm/m}$$

$$M_{stab} = W_{wm} \cdot 15.10 + W_{wv} \cdot 5.02 + W \cdot 9.99 + P_{wv} \cdot 2.60 = 26888 \text{ kNm/m}$$

$$FS_{rib} = (M_{stab} / 1.15) / M_{rib} = 1.50 > 1.0$$

La verifica è dunque soddisfatta.

### 6.1.1.3 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 49.80 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.

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

$$W_{wm} = 279 \text{ kN/m}$$

$$W_{wv} = 711 \text{ kN/m}$$

$$P_{wm1} = 139 \text{ kN/m} \quad \text{componente rettangolare della spinta dell'acqua di monte}$$

$$P_{wm2} = 894 \text{ kN/m} \quad \text{componente triangolare della spinta dell'acqua di monte}$$

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

$$U_m = 314 \text{ kN/m}$$

$$U_v = 1165 \text{ kN/m}$$

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

**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	17.7	[m]	$\gamma$	19.0	[kN/m <sup>3</sup> ]	N	132165.5	[kN]
L	54.0	[m]	$\phi_{PS}$	28.5	[°]	N*	132165.5	[kN]
A	955.8	[m <sup>2</sup> ]	$\phi_{TR}$		[°]	M <sub>B</sub>	-32380.1	[kNm]
H	1.5	[m]	$\phi_{CV}$		[°]	M <sub>L</sub>	0.0	[kNm]
D	3.25	[m]	c'	9.0	[kPa]	H <sub>B</sub>	42844.4	[kN]
Z <sub>w</sub>	0.00	[m]				H <sub>L</sub>	0.0	[kN]
h <sub>w</sub>	3.25	[m]	$\gamma_{cB'}$	9.37	[kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma'_{ave}$	138.28	[kPa]
B'	18.19	[m]	$\gamma_{cL'}$	9.25	[kN/m <sup>3</sup> ]	e <sub>B</sub>	-0.245	[m]
L'	54.00	[m]				e <sub>L</sub>	0.000	[m]
A'	982.26	[m <sup>2</sup> ]				$\sigma_1$	142.04	[kPa]
						$\sigma_2$	134.51	[kPa]
q'	29.9	[kPa]	$\sigma_v (B/2)$	81.4		$\sigma_3$	142.04	[kPa]
			p(B/2)	53.0		$\sigma_4$	134.51	[kPa]
<b>q<sub>es,d</sub></b>	<b>134.6</b>	<b>[kPa]</b>						
$\gamma_R$	=	2.3			A1+M1+R3			
<b>q<sub>lim,k</sub></b>	=	<b>601</b>	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim\ \gamma i} + q_{lim\ qi} + q_{lim\ ci}$			
<b>q<sub>lim,d</sub></b>	=	<b>261</b>	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
<b>FS<sub>calc</sub></b>	=	<b>1.94</b>			$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$			

$q_{es,d} = 134.6$  kPa

carico medio agente sulla fondazione ideale

$q_{lim, k} = 601$  kPa

portata limite caratteristica sulla fondazione ideale

$q_{lim, d} = q_{lim, k} / \gamma_R (R3) = 261$  kPa

portata limite di calcolo sulla fondazione ideale

$q_{lim, d} / q_{es,d} = 1.94 > 1.0$

**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	17.7	[m]	$\gamma$	19.0	[kN/m <sup>3</sup> ]	N	132165.5	[kN]
L	54.0	[m]	$c_u$	81.4	[kPa]	N*	132165.5	[kN]
A	955.8	[m <sup>2</sup> ]				M <sub>B</sub>	-32380.1	[kNm]
H	1.5	[m]	Nc,s	5.14	[-]	M <sub>L</sub>	0.0	[kNm]
D	3.25	[m]				H <sub>B</sub>	42844.4	[kN]
Z <sub>w</sub>	0.00	[m]				H <sub>L</sub>	0.0	[kN]
B'	18.19	[m]				$\sigma'_{ave}$	138.28	[kPa]
L'	54.00	[m]				e <sub>B</sub>	-0.245	[m]
A'	982.26	[m <sup>2</sup> ]				e <sub>L</sub>	0.000	[m]
						$\sigma_1$	142.04	[kPa]
q	61.8	[kPa]				$\sigma_2$	134.51	[kPa]
						$\sigma_3$	142.04	[kPa]
						$\sigma_4$	134.51	[kPa]
q <sub>es,d</sub>	134.6	[kPa]						
$\gamma_R$	=	2.3			A1+M1+R3			
q <sub>lim,k</sub>	=	619	[kPa]		q <sub>lim,k</sub> = q <sub>lim,γt</sub> + q <sub>lim,qi</sub> + q <sub>lim,ci</sub>			
q <sub>lim,d</sub>	=	344	[kPa]		q <sub>lim,d</sub> = q <sub>lim,k</sub> / $\gamma_R$			
FS <sub>calc</sub>	=	2.56			FS <sub>calc</sub> = q <sub>lim,d</sub> / q <sub>es,d</sub>			

$$q_{es,d} = 134.6 \text{ kPa}$$

carico medio agente sulla fondazione ideale

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

portata limite caratteristica sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 344 \text{ kPa}$$

portata limite di calcolo sulla fondazione ideale

$$q_{lim,d} / q_{s,d} = 2.56 > 1.0$$

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:

$$\Sigma H = 263 \text{ kN/m}$$

risultante delle azioni orizzontali

$$\Sigma V = 918 \text{ kN/m}$$

risultante delle azioni verticali

$$(\Sigma V \cdot \tan \varphi / \gamma_M) / \Sigma H \cdot \gamma_E = 700 / 263 = 2.66 > 1.15 = \gamma_R$$

La verifica è dunque soddisfatta.

Per la verifica a ribaltamento si ha:

$$M_{rib} = U_m \cdot 15.10 + U_v \cdot 6.40 + P_{wm1} \cdot 6.8 + P_{wm2} \cdot 4.50 = 17159 \text{ kNm/m}$$

$$M_{stab} = W_{wm} \cdot 15.10 + W_{wv} \cdot 5.16 + W \cdot 10.02 + P_{wv} \cdot 3.1 = 27647 \text{ kNm/m}$$

$$FS_{rib} = (M_{stab} / 1.15) / M_{rib} = 1.40 > 1.0$$

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:

$$\Sigma U = 1479 \text{ kN/m}$$

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

$$FS_{upl} = 0.9 \cdot \Sigma W / (1.1 \cdot \Sigma U) = 1.57 > 1.0$$

E anche in questo caso la verifica risulta soddisfatta.

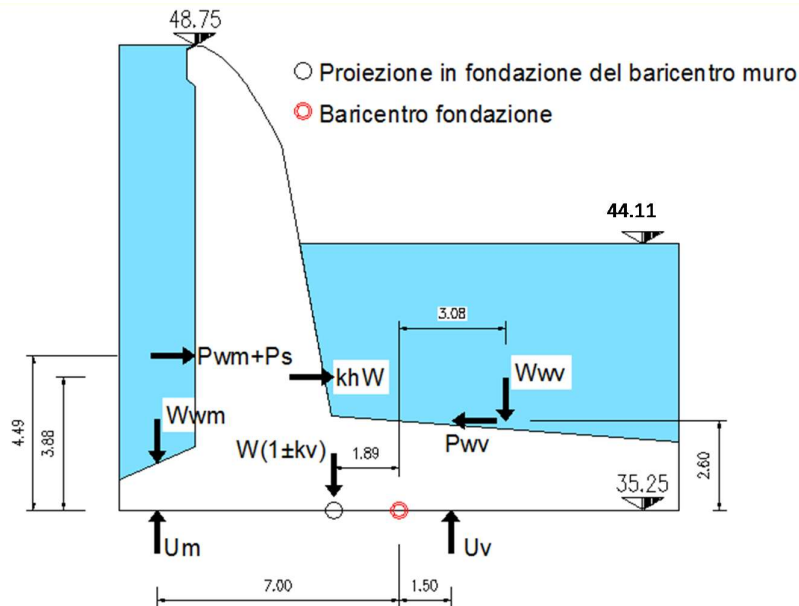
#### 6.1.1.4 Combinazione sismica

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.

**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 11 - Man. regolatore: schema per capacità portante: sisma SLV**

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 si assume:

$$k_h = a_{\max}/g = 0.49$$

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 = 13.5 m

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

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

$\alpha$  = 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 315 kN/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.

B	17.7	[m]	$\gamma$	19.0	[kN/m <sup>3</sup> ]	N	87635.1	[kN]
L	54.0	[m]	$c_u$	81.4	[kPa]	N*	87635.1	[kN]
A	955.8	[m <sup>2</sup> ]				$M_B$	161881.7	[kNm]
H	1.5	[m]	$N_{c,s}$	5.14	[-]	$M_L$	0.0	[kNm]
D	3.00	[m]				$H_B$	77359.9	[kN]
$Z_w$	0.00	[m]				$H_L$	0.0	[kN]
B'	14.01	[m]				$\sigma'_{ave}$	91.69	[kPa]
L'	54.00	[m]				$e_B$	1.847	[m]
A'	756.30	[m <sup>2</sup> ]				$e_L$	0.000	[m]
						$\sigma_1$	72.87	[kPa]
q	57.0	[kPa]				$\sigma_2$	110.51	[kPa]
						$\sigma_3$	72.87	[kPa]
						$\sigma_4$	110.51	[kPa]
<b><math>q_{es,d}</math></b>	<b>115.9</b>	<b>[kPa]</b>						
$\gamma_R$	=	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]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
<b><math>FS_{calc}</math></b>	<b>=</b>	<b>2.21</b>			$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$			

$$q_{es,d} = 115.9 \text{ kPa}$$

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

$$q_{lim,d} / q_{d} = 2.21 > 1.0$$

È possibile verificare che la capacità portante è garantita anche in condizioni di serbatoio vuoto, con fattore di sicurezza maggiore.

Per la verifica a scorrimento e ribaltamento si è considerata la sezione con dente 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	1794 kN/m
W <sub>wm</sub>	201 kN/m
W <sub>wv</sub>	648 kN/m
kvW	-264 kN/m
W <sub>d</sub> (1-kv)	75 kN/m
W <sub>t</sub> (1-kv)	319 kN/m
U <sub>m</sub>	-231 kN/m
U <sub>v</sub>	-1084 kN/m
Σ	1458 kN/m

VT	
W	-414 kN/m
W <sub>wm</sub>	-46 kN/m
W <sub>wv</sub>	-150 kN/m
kvW	61 kN/m
W <sub>d</sub> (1-kv)	-17 kN/m
W <sub>t</sub> (1-kv)	-74 kN/m
U <sub>m</sub>	53 kN/m
U <sub>v</sub>	-250 kN/m
Σ	-837 kN/m

HN	
P <sub>wm</sub>	134 kN/m
P <sub>s</sub>	72 kN/m
khW <sub>d</sub>	10 kN/m
khW <sub>t</sub>	42 kN/m
k <sub>h</sub> W	203 kN/m
P <sub>wv</sub>	-87 kN/m
Σ	375 kN/m

HT	
P <sub>wm</sub>	578 kN/m
P <sub>s</sub>	314 kN/m
khW <sub>d</sub>	43 kN/m
khW <sub>t</sub>	183 kN/m
k <sub>h</sub> W	879 kN/m
P <sub>wv</sub>	-375 kN/m
Σ	1622 kN/m

Nelle tabelle:

W<sub>d</sub> = massa del dente in c.a. in fondazione

W<sub>t</sub> = massa del terreno interposto fra la fondazione e la linea tratteggiata sulla quale si analizza il possibile scorrimento

P<sub>s</sub> = 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:

$$N = \Sigma VN + \Sigma HN = 1832 \text{ kN/m}$$

$$T = \Sigma VT + \Sigma HT = 785 \text{ kN/m}$$

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

La verifica è dunque soddisfatta.

Per quanto riguarda la verifica a ribaltamento, si ha:

$$M_{rib} = U_m \cdot 15.20 + U_v \cdot 6.40 + P_{wm1} \cdot 6.75 + (P_{wm} + P_s) \cdot 3.7 + k_h W \cdot 3.88 + k_h W \cdot 10.02 = 20273 \text{ kNm/m}$$

$$M_{stab} = W_{wm} \cdot 15.20 + W_{wv} \cdot 5.14 + W \cdot 10.02 + W_d(1-k_v) \cdot 13.4 + P_{wv} \cdot 3.00 = 27148 \text{ kNm/m}$$

$$FS_{rib} = (M_{stab} / 1.0) / M_{rib} = 134 > 1.0$$

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.

### 6.1.2 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):

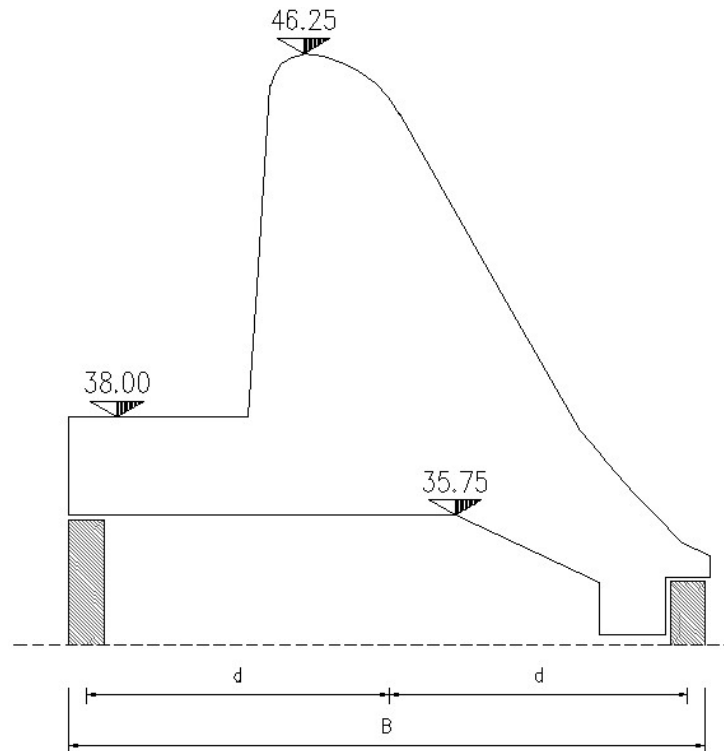
Verifica	Fattore parziale (R3)
Capacità portante	$\gamma_R = 2.30$

**Tabella 13 – 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.

**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 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:

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

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

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

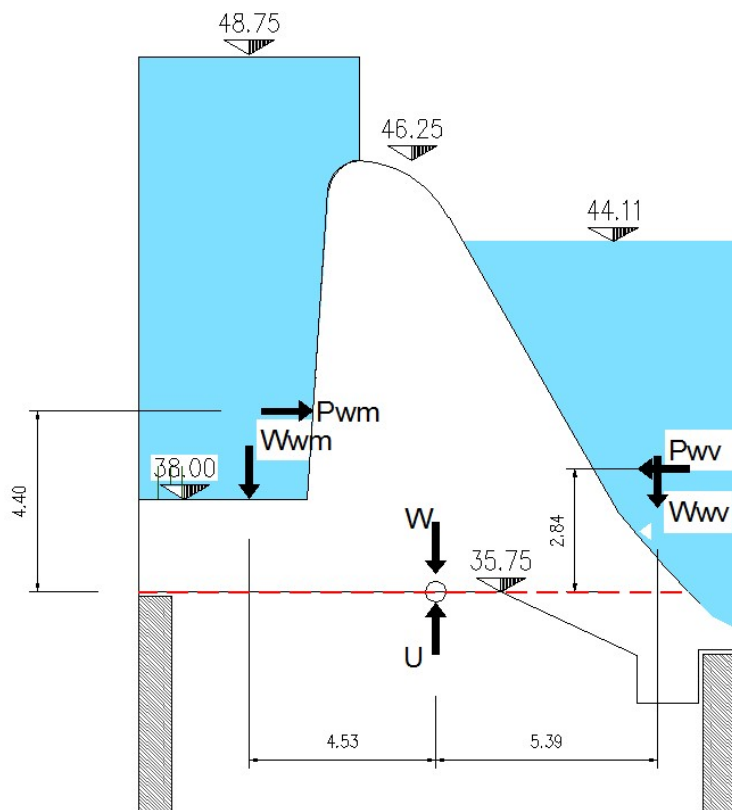
$$c_{u,k} = 81.4 \text{ kPa.}$$

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

Lo schema di calcolo è riportato nella figura seguente.

**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 12 – Manufatto regolatore esistente – Combinazione fondamentale: schema azioni**

I valori calcolati delle azioni considerate sono i seguenti:

V		H	
W	1780 kN/m	Pwm	829 kN/m
Wwm	485 kN/m	Pwv	-375 kN/m
Wwv	280 kN/m	$\Sigma$	453 kN/m
U	-215 kN/m		
$\Sigma$	2330 kN/m		

**Tabella 14 – Valori caratteristici delle azioni**

Il momento rispetto al baricentro della fondazione è pari a:

$$M_G = 1944.25 \text{ kN/m}$$

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	13.0	[m]		$\gamma$	20.0	[kN/m <sup>3</sup> ]		N	25377.1	[kN]
L	47.7	[m]		$\phi_{PS}$	28.5	[°]		N*	25377.1	[kN]
A	620.1	[m <sup>2</sup> ]		$\phi_{TR}$		[°]		M <sub>B</sub>	92740.7	[kNm]
H	0.0	[m]		$\phi_{CV}$		[°]		M <sub>L</sub>	0.0	[kNm]
D	2.00	[m]		c'	9.0	[kPa]		H <sub>B</sub>	0.0	[kN]
Z <sub>w</sub>	0.00	[m]						H <sub>L</sub>	0.0	[kN]
h <sub>w</sub>	2	[m]		$\gamma_{CB'}$	10.54	[kN/m <sup>3</sup> ]		$\sigma'_{ave}$	40.92	[kPa]
B'	5.69	[m]		$\gamma_{CL'}$	10.23	[kN/m <sup>3</sup> ]		e <sub>B</sub>	3.654	[m]
L'	47.70	[m]						e <sub>L</sub>	0.000	[m]
A'	271.46	[m <sup>2</sup> ]						$\sigma_1$	22.11	[kPa]
								$\sigma_2$	59.74	[kPa]
q'	20.4	[kPa]						$\sigma_3$	22.11	[kPa]
								$\sigma_4$	59.74	[kPa]
q <sub>es,d</sub>	93.5	[kPa]								
$\gamma_R$	=	2.3				A1+M1+R3				
q <sub>lim,k</sub>	=	992	[kPa]			q <sub>lim,k</sub> = q <sub>lim,γi</sub> + q <sub>lim,qi</sub> + q <sub>lim,ci</sub>				
q <sub>lim,d</sub>	=	431	[kPa]			q <sub>lim,d</sub> = q <sub>lim,k</sub> /γ <sub>R</sub>				
FS <sub>calc</sub>	=	10.61				FS <sub>calc</sub> = q <sub>lim,k</sub> /q <sub>es,d</sub>				



**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	13.0	[m]	$\gamma$	20.0	[kN/m <sup>3</sup> ]	N	25377.1	[kN]
L	47.7	[m]	$c_u$	81.4	[kPa]	N*	25377.1	[kN]
A	620.1	[m <sup>2</sup> ]				M <sub>B</sub>	92740.7	[kNm]
H	0.0	[m]	Nc,s	5.14	[-]	M <sub>L</sub>	0.0	[kNm]
D	2.00	[m]				H <sub>B</sub>	0.0	[kN]
Z <sub>w</sub>	0.00	[m]				H <sub>L</sub>	0.0	[kN]
B'	5.69	[m]				$\sigma'_{ave}$	40.92	[kPa]
L'	47.70	[m]				e <sub>B</sub>	3.654	[m]
A'	271.46	[m <sup>2</sup> ]				e <sub>L</sub>	0.000	[m]
						$\sigma_1$	22.11	[kPa]
q	40.0	[kPa]				$\sigma_2$	59.74	[kPa]
						$\sigma_3$	22.11	[kPa]
						$\sigma_4$	59.74	[kPa]
<b>q<sub>es,d</sub></b>	<b>93.5</b>	<b>[kPa]</b>						
$\gamma_R$	=	2.3			A1+M1+R3			
<b>q<sub>lim,k</sub></b>	=	<b>498</b>	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim, \gamma_i} + q_{lim, q_i} + q_{lim, c_i}$			
<b>q<sub>lim,d</sub></b>	=	<b>217</b>	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
<b>FS<sub>calc</sub></b>	=	<b>2.32</b>			$FS_{calc} = q_{lim,k} / q_{es,d}$			

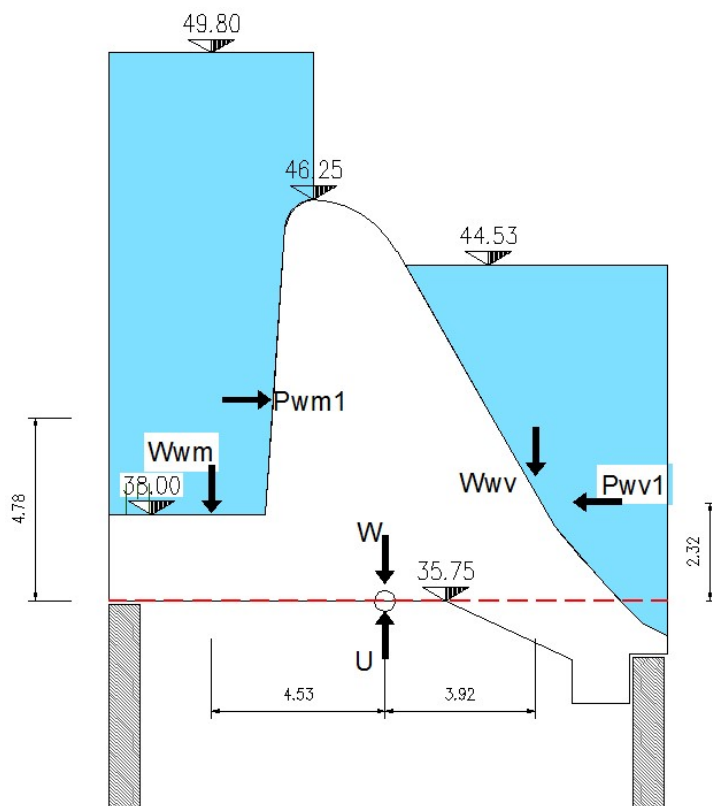
La fondazione risulta dunque verificata nella combinazione in esame.

#### 6.1.2.3 Combinazione eccezionale - Piena di riferimento ( $T_R = 200$ anni)

Lo schema delle azioni considerate e i valori calcolati per le stesse sono riportati nella figura e nella tabella sottostanti.

**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 13– Manufatto regolatore esistente – Combinazione eccezionale: schema azioni**

V		H	
W	1780 kN/m	Pwm1	968 kN/m
Wwm	544 kN/m	Pwv1	-461 kN/m
Wwv	376 kN/m	Σ	507 kN/m
U	-215 kN/m		
Σ	2486 kN/m		

**Tabella 15– Manufatto regolatore esistente – Combinazione eccezionale: azioni in fondazione**

**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	13.0	[m]	$\gamma$	20.0	[kN/m <sup>3</sup> ]	N	139975.7	[kN]
L	47.7	[m]	$\phi_{PS}$	28.5	[°]	N*	139975.7	[kN]
A	620	[m <sup>2</sup> ]	$\phi_{TR}$		[°]	M <sub>B</sub>	122525.0	[kNm]
H	0.0	[m]	$\phi_{CV}$		[°]	M <sub>L</sub>	0.0	[kNm]
D	2.00	[m]	c'	9.0	[kPa]	H <sub>B</sub>	0.0	[kN]
Z <sub>w</sub>	0.00	[m]				H <sub>L</sub>	0.0	[kN]
h <sub>w</sub>	2	[m]	$\gamma_{CB'}$	10.37	[kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma'_{ave}$	225.73	[kPa]
B'	11.25	[m]	$\gamma_{CL'}$	10.23	[kN/m <sup>3</sup> ]	e <sub>B</sub>	0.875	[m]
L'	47.70	[m]				e <sub>L</sub>	0.000	[m]
A'	536.59	[m <sup>2</sup> ]				$\sigma_1$	200.88	[kPa]
						$\sigma_2$	250.58	[kPa]
q'	20.4	[kPa]				$\sigma_3$	200.88	[kPa]
						$\sigma_4$	250.58	[kPa]
q <sub>es,d</sub>	260.9	[kPa]						
$\gamma_R$	=	2.3			A2+M2+R2			
q <sub>lim,k</sub>	=	1281	[kPa]		q <sub>lim,k</sub> = q <sub>lim,γi</sub> + q <sub>lim,qi</sub> + q <sub>lim,ci</sub>			
q <sub>lim,d</sub>	=	557	[kPa]		q <sub>lim,d</sub> = q <sub>lim,k</sub> /γ <sub>R</sub>			
FS <sub>calc</sub>	=	4.91			FS <sub>calc</sub> = q <sub>lim,k</sub> /q <sub>es,d</sub>			

**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	13.0	[m]	$\gamma$	20.0	[kN/m <sup>3</sup> ]	N	139975.7	[kN]
L	47.7	[m]	$c_u$	81.40	[kPa]	N*	139975.7	[kN]
A	620.1	[m <sup>2</sup> ]				M <sub>B</sub>	122525.0	[kNm]
H	0.0	[m]	Nc,s	5.14	[-]	M <sub>L</sub>	0.0	[kNm]
D	2.00	[m]				H <sub>B</sub>	0.0	[kN]
Z <sub>w</sub>	0.00	[m]				H <sub>L</sub>	0.0	[kN]
B'	11.25	[m]				$\sigma'_{ave}$	225.73	[kPa]
L'	47.70	[m]				e <sub>B</sub>	0.875	[m]
A'	536.59	[m <sup>2</sup> ]				e <sub>L</sub>	0.000	[m]
						$\sigma_1$	200.88	[kPa]
q	40.0	[kPa]				$\sigma_2$	250.58	[kPa]
						$\sigma_3$	200.88	[kPa]
						$\sigma_4$	250.58	[kPa]
q <sub>es,d</sub>	260.9	[kPa]						
$\gamma_R$	=	2.3			A2+M2+R2			
q <sub>lim,k</sub>	=	458	[kPa]		q <sub>lim,k</sub> = q <sub>lim,γi</sub> + q <sub>lim,qi</sub> + q <sub>lim,ci</sub>			
q <sub>lim,d</sub>	=	199	[kPa]		q <sub>lim,d</sub> = q <sub>lim,k</sub> /γ <sub>R</sub>			
FS <sub>calc</sub>	=	1.76			FS <sub>calc</sub> = q <sub>lim,k</sub> /q <sub>es,d</sub>			

La fondazione è dunque verificata anche nella combinazione eccezionale.

#### 6.1.2.4 Combinazione sismica

Lo schema delle azioni considerate è lo stesso del manufatto a fine costruzione, serbatoio vuoto, a cui si aggiungono le inerzie.

Si osserva che i pesi della struttura sono stati distinti, nel calcolo, a seconda che fossero sopra o sotto il piano di imposta della fondazione considerata, per tenere conto della diversa influenza delle azioni inerziali orizzontali in termini di momento rispetto al baricentro fondazione.

**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		H	
W	1780 kN/m	$P_{wm1}$	0 kN/m
$W_{wm}$	0 kN/m	$P_{wm2}$	0 kN/m
$W_{wv}$	0 kN/m	$P_s$	0 kN/m
$k_v W$	-262 kN/m	$k_h W$	872.2 kN/m
$U_m$	0 kN/m	$P_{wv}$	0 kN/m
$U_v$	0 kN/m	totale	872 kN/m
totale	1518 kN/m		

**Tabella 16 - Manufatto regolatore esistente – Combinazione sismica: azioni in fondazione**

Il momento rispetto al baricentro fondazione è pari a:

$$M_G = 3201 \text{ kNm/m}$$

Di seguito si riporta la verifica in combinazione sismica, solo condizione non drenata.

#### Condizione non drenata

B	14.6	[m]	$\gamma$	20.0	[kN/m <sup>3</sup> ]	N	93317.4	[kN]
L	47.7	[m]	$c_u$	81.4	[kPa]	$N^*$	93317.4	[kN]
A	696.42	[m <sup>2</sup> ]				$M_B$	152686.5	[kNm]
H	0.0	[m]	$N_{c,s}$	5.14	[-]	$M_L$	0.0	[kNm]
D	3.50	[m]				$H_B$	41603.9	[kN]
$Z_w$	0.00	[m]				$H_L$	0.0	[kN]
B'	11.33	[m]				$\sigma'_{ave}$	134.00	[kPa]
L'	47.70	[m]				$e_B$	1.636	[m]
A'	540.33	[m <sup>2</sup> ]				$e_L$	0.000	[m]
						$\sigma_1$	106.42	[kPa]
q	70.0	[kPa]				$\sigma_2$	161.57	[kPa]
						$\sigma_3$	106.42	[kPa]
						$\sigma_4$	161.57	[kPa]
$q_{es,d}$	172.7	[kPa]						
$\gamma_R$	=	2.3			A2+M2+R2			
$q_{lim,k}$	=	663	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim \gamma t} + q_{lim q i} + q_{lim c i}$			
$q_{lim,d}$	=	288	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
$FS_{calc}$	=	1.67			$FS_{calc} = q_{lim,k} / q_{es,d}$			

La verifica è dunque soddisfatta

### 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.

**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	8.1	[m]	semilarghezza in sommità										
γ <sub>t</sub>	19.0	[kN/m³]	peso di volume del terreno										
z <sub>w</sub>	0	[m]	profondità della falda										
q <sub>acc</sub>	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 <sub>tot</sub>	22.1	[cm]	cedimento atteso										
z <sub>i</sub>	(x+B)/z	(x-B)/z	σ' <sub>vo</sub>	φ'	σ' <sub>ho</sub>	Δσ		Δσ <sub>z1</sub>	Δσ <sub>z2</sub>	Δσ <sub>v</sub> /σ' <sub>vo</sub>	E	v	s <sub>i</sub>
[m]	[-]	[-]	[kPa]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[kPa]	[-]	[cm]
20													
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	0.6	-0.6	144	26	80.91	72.76	7.84	24.18	0.51	5500	0.30	0.574	
13.5	0.6	-0.6	149	26	83.49	70.99	7.18	23.45	0.48	5500	0.30	0.562	
14.0	0.6	-0.6	153	26	86.07	69.28	6.58	22.76	0.45	5500	0.30	0.550	
14.25	0.6	-0.6	156	26	87.36	68.45	6.31	22.43	0.44	5500	0.30	0.272	
15.0	0.5	-0.5	162	26	91.23	66.04	5.57	21.48	0.41	53000	0.30	0.082	
15.5	0.5	-0.5	167	26	93.81	64.51	5.14	20.90	0.39	53000	0.30	0.053	
16.0	0.5	-0.5	172	26	96.40	63.03	4.75	20.34	0.37	53000	0.30	0.052	
16.5	0.5	-0.5	176	26	98.98	61.61	4.39	19.80	0.35	53000	0.30	0.051	
17.0	0.5	-0.5	181	26	101.56	60.24	4.07	19.29	0.33	53000	0.30	0.050	
17.5	0.5	-0.5	185	26	104.14	58.92	3.78	18.81	0.32	53000	0.30	0.049	
18.0	0.5	-0.5	190	26	106.72	57.64	3.52	18.35	0.30	8000	0.30	0.319	
18.5	0.4	-0.4	195	26	109.30	56.42	3.28	17.91	0.29	8000	0.30	0.313	
19.0	0.4	-0.4	199	26	111.88	55.23	3.05	17.49	0.28	8000	0.30	0.307	
19.5	0.4	-0.4	204	26	114.46	54.09	2.85	17.08	0.27	8000	0.30	0.301	
20.0	0.4	-0.4	208	26	117.04	52.99	2.67	16.70	0.25	8000	0.30	0.295	
20.5	0.4	-0.4	213	36	87.80	51.93	2.50	16.33	0.24	8000	0.30	0.289	
21.0	0.4	-0.4	218	36	89.69	50.91	2.34	15.97	0.23	8000	0.30	0.284	
21.5	0.4	-0.4	222	36	91.59	49.92	2.20	15.63	0.22	8000	0.30	0.279	
22.0	0.4	-0.4	227	36	93.48	48.96	2.06	15.31	0.22	8000	0.30	0.273	
22.5	0.4	-0.4	231	36	95.37	48.04	1.94	14.99	0.21	47000	0.30	0.046	
23.0	0.4	-0.4	236	36	97.27	47.15	1.83	14.69	0.20	47000	0.30	0.045	
23.5	0.3	-0.3	241	36	99.16	46.29	1.72	14.40	0.19	47000	0.30	0.044	
24.0	0.3	-0.3	245	36	101.06	45.45	1.63	14.12	0.19	47000	0.30	0.043	
24.5	0.3	-0.3	250	36	102.95	44.65	1.54	13.86	0.18	47000	0.30	0.043	
25.0	0.3	-0.3	254	36	104.84	43.87	1.45	13.60	0.17	47000	0.30	0.042	
25.5	0.3	-0.3	259	36	106.74	43.11	1.38	13.35	0.17	47000	0.30	0.041	
26.0	0.3	-0.3	264	36	108.63	42.38	1.30	13.10	0.16	47000	0.30	0.040	
26.5	0.3	-0.3	268	36	110.53	41.67	1.24	12.87	0.16	47000	0.30	0.040	
27.0	0.3	-0.3	273	36	112.42	40.98	1.17	12.65	0.15	47000	0.30	0.039	
27.5	0.3	-0.3	277	36	114.32	40.32	1.11	12.43	0.15	47000	0.30	0.039	
28.0	0.3	-0.3	282	36	116.21	39.67	1.06	12.22	0.14	47000	0.30	0.038	
28.5	0.3	-0.3	287	36	118.10	39.04	1.01	12.02	0.14	47000	0.30	0.037	
29.0	0.3	-0.3	291	36	120.00	38.44	0.96	11.82	0.13	47000	0.30	0.037	
29.5	0.3	-0.3	296	36	121.89	37.84	0.91	11.63	0.13	47000	0.30	0.036	
30.0	0.3	-0.3	300	36	123.79	37.27	0.87	11.44	0.12	47000	0.30	0.036	
30.5	0.3	-0.3	305	36	125.68	36.71	0.83	11.26	0.12	47000	0.30	0.035	
31.0	0.3	-0.3	309	36	127.57	36.17	0.79	11.09	0.12	47000	0.30	0.035	
31.5	0.3	-0.3	314	36	129.47	35.65	0.76	10.92	0.11	47000	0.30	0.034	
32.0	0.3	-0.3	319	36	131.36	35.13	0.73	10.76	0.11	47000	0.30	0.034	
32.5	0.2	-0.2	323	36	133.26	34.63	0.69	10.60	0.11	47000	0.30	0.033	
33.0	0.2	-0.2	328	36	135.15	34.15	0.66	10.44	0.10	47000	0.30	0.033	
33.5	0.2	-0.2	332	36	137.04	33.68	0.64	10.29	0.10	47000	0.30	0.032	
34.0	0.2	-0.2	337	36	138.94	33.22	0.61	10.15	0.10	47000	0.30	0.000	
34.5	0.2	-0.2	342	36	140.83	32.77	0.59	10.01	0.10	47000	0.30	0.000	
35.0	0.2	-0.2	346	36	142.73	32.33	0.56	9.87	0.09	47000	0.30	0.000	
35.5	0.2	-0.2	351	36	144.62	31.91	0.54	9.73	0.09	47000	0.30	0.000	
36.0	0.2	-0.2	355	36	146.52	31.49	0.52	9.60	0.09	47000	0.30	0.000	



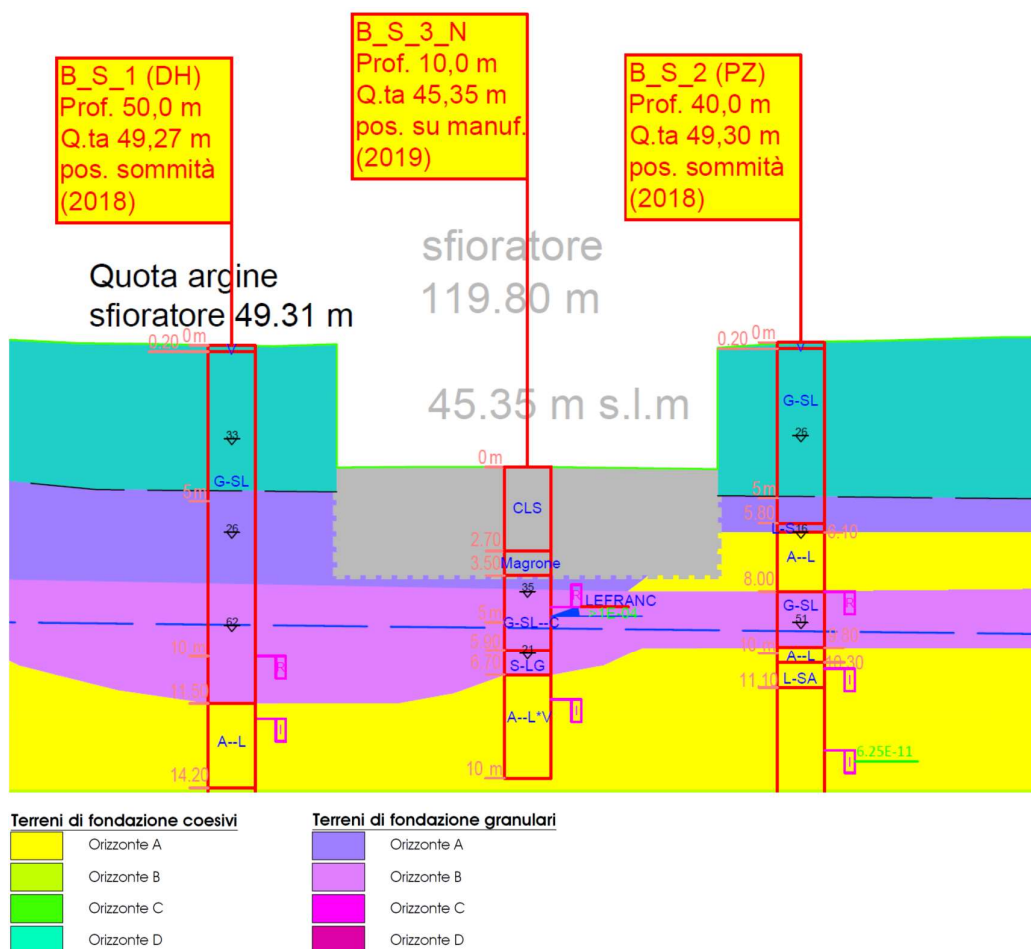


## 7 VERIFICHE SFIORATORE LATERALE

## 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 frequente**

Di seguito è riportato il calcolo della portata di base in condizioni rispettivamente drenate e non 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)

### Condizioni drenate

B	9.1	[m]	$\gamma$	19.0	[kN/m <sup>3</sup> ]	N	14470.4	[kN]
L	13.0	[m]	$\phi_{PS}$	28.0	[°]	N*	14470.4	[kN]
A	118.3	[m <sup>2</sup> ]	$\phi_{TR}$		[°]	M <sub>B</sub>	0.0	[kNm]
H	1.5	[m]	$\phi_{CV}$		[°]	M <sub>L</sub>	-5600.5	[kNm]
D	1.50	[m]	c'	10.0	[kPa]	H <sub>B</sub>	0.0	[kN]
Z <sub>w</sub>	0.00	[m]				H <sub>L</sub>	818.4	[kN]
h <sub>w</sub>	1.5	[m]	$\gamma_{CB'}$	9.36	[kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma'_{ave}$	122.32	[kPa]
B'	9.10	[m]	$\gamma_{CL'}$	9.30	[kN/m <sup>3</sup> ]	e <sub>B</sub>	0.000	[m]
L'	13.77	[m]				e <sub>L</sub>	-0.387	[m]
A'	125.34	[m <sup>2</sup> ]				$\sigma_1$	153.53	[kPa]
						$\sigma_2$	153.53	[kPa]
q'	13.8	[kPa]				$\sigma_3$	91.11	[kPa]
						$\sigma_4$	91.11	[kPa]
<b>q<sub>es,d</sub></b>	<b>115.4</b>	<b>[kPa]</b>						
$\gamma_R$	=	2.3			A1+M1+R3			
<b>q<sub>lim,k</sub></b>	=	<b>951</b>	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim,yi} + q_{lim,qi} + q_{lim,ci}$			
<b>q<sub>lim,d</sub></b>	=	<b>413</b>	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
<b>FS<sub>calc</sub></b>	=	<b>3.58</b>			$FS_{calc} = q_{lim,d} / q_{es,d}$			

$$q_{es,d} = 115.4 \text{ kPa}$$

carico medio agente sulla fondazione

$$q_{lim,k} = 951 \text{ kPa}$$

portata limite caratteristica sulla fondazione

$$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R (R3) = 413 \text{ kPa}$$

portata limite di calcolo sulla fondazione

$$q_{lim,d} / q_{es,d} = 3.58 > 1.0$$

**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	9.1	[m]	$\gamma$	19.0	[kN/m <sup>3</sup> ]	N	14470.4	[kN]
L	13.0	[m]	$c_u$	55.0	[kPa]	N*	14470.4	[kN]
A	118.3	[m <sup>2</sup> ]				$M_B$	0.0	[kNm]
H	1.5	[m]	$N_{c,s}$	5.14	[-]	$M_L$	-5600.5	[kNm]
D	1.50	[m]				$H_B$	0.0	[kN]
$Z_w$	0.00	[m]				$H_L$	818.4	[kN]
B'	9.10	[m]				$\sigma'_{ave}$	122.32	[kPa]
L'	13.77	[m]				$e_B$	0.000	[m]
A'	125.34	[m <sup>2</sup> ]				$e_L$	-0.387	[m]
						$\sigma_1$	153.53	[kPa]
q	28.5	[kPa]				$\sigma_2$	153.53	[kPa]
						$\sigma_3$	91.11	[kPa]
						$\sigma_4$	91.11	[kPa]
<b><math>q_{es,d}</math></b>	<b>115.4</b>	<b>[kPa]</b>						
$\gamma_R$	=	2.3			A2+M2+R2			
$q_{lim,k}$	=	325	[kPa]		$q_{lim,k} = q_{lim, \gamma i} + q_{lim, q i} + q_{lim, c i}$			
$q_{lim,d}$	=	142	[kPa]		$q_{lim,d} = q_{lim,k} / \gamma_R$			
<b><math>FS_{calc}</math></b>	<b>=</b>	<b>1.23</b>			$FS_{calc} = q_{lim,k} / q_{es,d}$			

$$q_{es,d} = 115.4 \text{ kPa}$$

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

$$q_{lim,d} / q_{s,d} = 1.23 > 1.0$$

Le verifiche sono dunque soddisfatte.

## 7.1.2 Condizioni sismiche

Le verifiche in condizioni sismiche sono state condotte solo in condizioni non drenate e in assenza di acqua sia a monte che a valle.

B	9.1	[m]	$\gamma$	19.0	[kN/m <sup>3</sup> ]	N	10079.7	[kN]
L	13.0	[m]	$c_u$	55.0	[kPa]	N*	10079.7	[kN]
A	118.3	[m <sup>2</sup> ]				M <sub>B</sub>	0.0	[kNm]
H	1.5	[m]	N <sub>c,s</sub>	5.14	[-]	M <sub>L</sub>	-19292.6	[kNm]
D	1.50	[m]				H <sub>B</sub>	0.0	[kN]
Z <sub>w</sub>	0.00	[m]				H <sub>L</sub>	2553.9	[kN]
B'	9.10	[m]				$\sigma'_{ave}$	85.20	[kPa]
L'	16.83	[m]				e <sub>B</sub>	0.000	[m]
A'	153.13	[m <sup>2</sup> ]				e <sub>L</sub>	-1.914	[m]
						$\sigma_1$	192.73	[kPa]
q	28.5	[kPa]				$\sigma_2$	192.73	[kPa]
						$\sigma_3$	-22.32	[kPa]
						$\sigma_4$	-22.32	[kPa]
q <sub>es,d</sub>	65.8	[kPa]						
$\gamma_R$	=	2.3			A1+M1+R3			
q <sub>lim,k</sub>	=	325	[kPa]		q <sub>lim,k</sub> = q <sub>lim,γi</sub> + q <sub>lim,qi</sub> + q <sub>lim,ci</sub>			
q <sub>lim,d</sub>	=	142	[kPa]		q <sub>lim,d</sub> = q <sub>lim,k</sub> / γ <sub>R</sub>			
FS <sub>calc</sub>	=	2.15			FS <sub>calc</sub> = q <sub>lim,k</sub> / q <sub>es,d</sub>			

$$q_{es,d} = 65.8 \text{ kPa}$$

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

$$q_{lim,d} / q_{d} = 2.15 > 1.0$$

Le verifiche sono dunque soddisfatte.

## 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  $E = 5.1 \text{ MPa}$  seguito da un secondo orizzonte fine ("B" coesivo) con  $E = 5.5 \text{ MPa}$  e quindi terreni granulari (orizzonti "C" e "D" granulari) aventi rispettivamente modulo  $E = 53 \text{ MPa}$  e  $E = 47 \text{ MPa}$ .

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									
$\gamma_t$	18.0	[kN/m <sup>3</sup> ]	peso di volume del terreno									
z <sub>w</sub>	0	[m]	profondità della falda									
q <sub>acc</sub>	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 <sub>tot</sub>	13.3	[cm]	cedimento atteso									
z <sub>i</sub>	(x+B)/z	(x-B)/z	σ' <sub>vo</sub>	φ'	σ' <sub>ho</sub>	Δσ <sub>zi</sub>	Δσ <sub>xi</sub>	Δσ <sub>yi</sub>	Δσ <sub>v</sub> /σ' <sub>vo</sub>	E	v	s <sub>i</sub>
[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



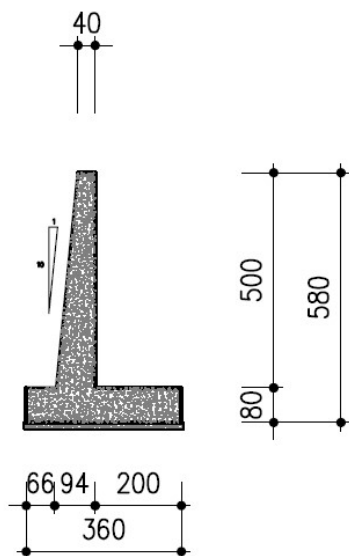
## 8 MURI DI SOSTEGNO DEI RILEVATI ARGINALI

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 (massima regolazione e massima piena di riferimento).

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.

### 8.1 Descrizione delle opere

I muri in progetto hanno la geometria riportata nella figura seguente.



**Figura 14 – Sezione tipo carpenteria muri**

La fondazione del muro poggia su un diaframma strutturale 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].

È stata analizzata la sezione del muro in sommità del rilevato: in questa sezione, il paramento di valle del muro in progetto è parzialmente interrato; in sommità del muro passa la strada che porta al coronamento della traversa.

## 8.2 Criteri e combinazioni di verifica

I criteri normativi di verifica sono analoghi a quelli già visti: 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

tenendo conto della presenza del diaframma che collabora alla resistenza per gli stati limite ultimi geotecnici elencati e trattando quindi la fondazione come mista.

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

Le combinazioni di riferimento per i muri sono la statica a serbatoio vuoto (quindi senza acqua a livello dei muri), la statica con portata massima (acqua a 49.8m s.l.m.), più gravosa della statica a massima regolazione, e la sismica a massima regolazione del serbatoio, quindi con acqua a quota 48.75 m s.l.m. (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.

Per il materiale costituente il rilevato arginale si è assunto:

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\phi = 38^\circ$$

$$c = 0$$

Le azioni sui muri considerate nel calcolo sono le seguenti.

### Carichi verticali

$W = 156 \text{ kN/m}$  peso proprio del muro

$W_t = 200 \text{ kN/m}$  peso proprio del terreno sulla zattera di monte

$W_{wm}$  peso dell'acqua sulla zattera di monte (quando presente)



**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

Le schede nel seguito riportano le verifiche condotte per i muri nelle varie condizioni di riferimento.

Combinazione frequente - Assenza di acqua					
Ribaltamento			Scivolamento		
		braccio		caratteristico	design
Wm	155.75	1.50	T resist	302.39	
W trave a g	80	1.4	T agente	99.01	128.72
Sa orizz	81.9	1.93			
Sa vert	32.0	3.6			
Wtm	190	2.6			
Sq orizz	17.14	2.9	Fs	2.35	
Sq vert	6.70	3.6			
M stab	840.03				
M ribalt	68.8				
Fs	10.62				

Combinazione frequente - Piena duecentennale									
Ribaltamento			Scivolamento						
		braccio		caratteristico	design				
Wm	155.75	1.5	T resist	219.65			Wwv	braccio	
W trave a g	80	1.4	T agente	78.40	101.92		2.145	0.33	
Sa orizz	61.3	1.93					0.56	0.777	
Sa vert	23.92	3.6	Fs	2.16					
Wtm	190	2.6					W	2.71	
Wwv	26.54	0.42					M	1.14	
Ews m	80.45	1.35					e	1.38	
Ews v	80.45	1.35							
Uw	143.03	1.8							
Sq orizz	17.14	2.9							
Sq vert	6.70	3.6							
M stab	959.5								
M ribalt	424.0								
Fs	1.97								



	Combinazione sismica +kv						
	kh	0.49					
	kv	0.245					
sopra falda	kh/(1+kv)	0.39		θ	0.375	rad	
sotto falda	γd/(γ-γw)*	0.64		θ	0.571	rad	
			sopra falda	Kae	0.68	0.68	
				Kae	1.42		
			sotto falda	Kae		2.02	
				Kae	2.02		
	Ribaltamento			Scivolamento			
			braccio			caratteristico	design
	Wm	155.75	1.5	T resist	497.56		
	W trave a g	80	1.4	T agente	559.75	559.75	
	Sa orizz	81.8	1.93				
	Sa vert	31.9	3.60	Fs	0.89		
	Wtm	190.0	2.6				
	Wwv	0.0	0.00				
	Uw	10.59	1.80				
	Sq orizz	14.86	2.9				
	Sq vert	5.80	3.6				
	Ews	0.44	0.10				
	kvWm	38.16	1.50				
	khWm	76.32	1.12				
	kvWtrave	19.6	1.4				
	khWtrave	39.2	5.8				
	kvWtm	46.55	2.6				
	khWtm	93.1	3.3				
	Dsa,E+ oriz	218.30	1.93				
	Dsa,E+ vert	85.26	3.60				
	Dsq,E+ oriz	35.34	2.9				
	Dsq,E+ vert	13.80	3.6				
	Ewd,v	0.25	0.12				
	Ewd,m	0.18	0.12				
	M stab	1537.811					
	M ribalt	1365.0					
	Fs	1.13					



Combinazione sismica -kv						
	kh	0.49				
	0.245					
sopra falda	(kh/(1-kv))	0.65		θ	0.576 rad	
sotto falda	(γd/(γ-γw)*)	1.06		θ	0.814 rad	
			sopra falda	Kae	2.04	
				Kae	2.04	
			sotto falda	Kae	3.64	
				Kae	3.64	
	Ribaltamento			Scivolamento		
			braccio		caratteristi design	
	Wm	155.75	1.5	T resist	283.27	
	W trave a g	80	1.4	T agente	800.53	800.53
	Sa orizz	81.8	1.93			
	Sa vert	31.9	3.60	Fs	0.35	
	Wtm	190.0	2.6			
	Wwv	0.0	0.00	T diaframma	517.26	
	Uw	10.59	1.80	M diaframma	395.5	
	Sq orizz	14.85831	2.9			
	Sq vert	5.802973	3.6			
	Ews	0.44	0.10			
	kvw m	38.15875	1.50			
	kh w m	76.3175	1.12			
	kw W trave	19.6	1.40			
	kh W trave	39.2	5.80			
	kw W tm	46.55	2.6			
	kh W tm	93.1	3.3			
	Dsa,E+ orizz	412.4301	1.93			
	Dsa,E+ vert	161.0762	3.60			
	Dsq,E+ orizz	71.84617	2.9			
	Dsq,E+ vert	28.05981	3.6			
	Ewd,v	0.25	0.12			
	Ewd,m	0.18	0.12			
	M stab	1656.368				
	M ribalt	2051.9				
	Fs	0.81				

Si osserva che le verifiche a ribaltamento e scivolamento in condizioni sismiche non risultano soddisfatte, dal solo muro in elevazione, senza cioè invocare la collaborazione del diaframma in fondazione.

Per garantire le verifiche a scorrimento e ribaltamento, il diaframma dovrà essere dimensionato, dal punto di vista strutturale, in modo da essere in grado di fornire le seguenti azioni resistenti:

$$T = 1.0 \cdot (\Sigma H - \Sigma V \cdot \tan \varphi_{\text{fond}}) \cong 517.3 \text{ kN/m}$$

$$M = 1.0 \cdot \Sigma M_{\text{rib}} - \Sigma M_{\text{stab}} \cong 395.5 \text{ kNm/m}$$

valori che appaiono compatibili, quando si tenga anche conto che il diaframma è completamente interrato, quindi riceve anche il contributo stabilizzante del terreno a valle.

### **8.3.1 Capacità portante**

I carichi verticali in fondazione risultano, nelle varie condizioni analizzate, pari a:

combinazione frequente, serbatoio vuoto:  $V = 425.7 \text{ kN/m}$

combinazione eccezionale, piena duecentennale:  $V = 309.3 \text{ kN/m}$

combinazione sismica SLV  $V = 519.5 \text{ kN/m}$

La capacità portante è data dalla somma della portata del diaframma e di quella della fondazione diretta; tuttavia si può verificare che il diaframma è di per sé sufficiente a garantire la capacità portante necessaria; si ha infatti, considerando la portata in condizioni non drenate (che per quanto visto in precedenza risultano più cautelative):

$$Q_{\text{dfr, d}} = b_{\text{dfr}} \cdot (5.14 \cdot c_u + \gamma D) / \gamma_R + \cdot 2 \cdot H_{\text{dfr}} \cdot \alpha \cdot c_u / \gamma_R = 0.8 \cdot (5.14 \cdot 81.4 + 12 \cdot 20) / 1.4 + (2 \cdot 12 \cdot 0.25 \cdot 81.4) / 1.4 = 1074 \text{ kN/m}$$

$$\Rightarrow Q_{\text{dfr, d}} = 1074 \text{ kN/m} > 519.5 \text{ kN/m} = \Sigma V \text{ max (combinazione sismica SLV)}$$

Le verifiche sono dunque soddisfatte.