



# CONSORZIO di BONIFICA dell' EMILIA CENTRALE

Corso Garibaldi n. 42 42121 Reggio Emilia - [www.emiliacentrale.it](http://www.emiliacentrale.it) - [protocollo@pec.emiliacentrale.it](mailto:protocollo@pec.emiliacentrale.it)  
Tel. 0522-443211 Fax. 0522-443254 C.F. 91149320359

M - PRG.  
18.01

Rev. 3  
del  
01.04.2019

**Titolo:** Legge n°205/2017 art.1 comma 518. Primo Stralcio del Piano Nazionale degli interventi  
nel settore idrico – sezione "invasi"

## REALIZZAZIONE DI UNA CASSA DI ESPANSIONE PER LAMINAZIONE DELLE PIENE E ACCUMULO IDRICO A SCOPO IRRIGUO CAVO BONDENO IN COMUNE DI NOVELLARA (RE) - CODICE 518/5

**Importo:**  
**€. 10.000.000,00**

**Ente Finanziatore:**  
**Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti**

Tipologia Progetto				Riferimento Legislativo	Comune
Fattibilità	Definitivo	Esecutivo	Contabilità	<b>Legge n.205/2017 e Legge n. 145/2018</b>	<b>NOVELLARA (RE)</b>
	<b>X</b>				

### ALLEGATI:

Allegato n.	Titolo:
<b>2</b>	<b>RELAZIONI SPECIALISTICHE</b>
Tavola:	Oggetto:
<b>.3</b>	<b>RELAZIONE GEOTECNICA</b>
Scala:	

Il Progettista Generale:

**Dott. Ing. Matteo Giovanardi**

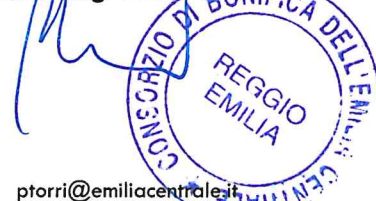


Collaboratori alla Progettazione:

<b>Geom. Andrea Autunni</b>	<b>Dott. Ing. Elena Mocci</b>
<b>Geom. Stefano Bernardi</b>	<b>Dott. Agr. Aronne Ruffini</b>
<b>Geom. Riccardo Nicolini</b>	<b>Dott. Ing. Preti Valentina</b>
<b>P.I. Mauro Bigliardi</b>	<b>Dott. Agr. Baricca Matteo</b>
<b>P.I. Guido Ruini</b>	<b>Dott. Geol. Alessandro Fontanesi</b>
<b>P.I. Roberto Pinotti</b>	

Il Responsabile del Procedimento:

**Dott. Ing. Pietro Torri**



<b>Area Progettazione:</b> <b>SLPP</b>	<b>Codice Progetto:</b> <b>105/18/00</b>	<b>Codice CUP:</b> <b>G33H18000060001</b>	<b>Codice CIG:</b>
---	---	--	--------------------

Redatto:	Verificato:	Nome File:	Note:

**Data Progetto Originale:** **16-12-2019** **Data Aggiornamento:** REV.01 - 12/03/2021

UNI EN ISO 9001:2015

UNI EN ISO 14001:2015

OHSAS 18001:2007



## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

**SOMMARIO**

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>DESCRIZIONE DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E SISMICHE EFFETTUATE .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>SUCCESSIONE STRATIGRAFICA, MODELLO GEOTECNICO E CLASSIFICAZIONE DEL SUOLO .....</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>VERIFICA DELLA SICUREZZA E DELLE PRESTAZIONI DELLE OPERE DA REALIZZARE .....</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>VERIFICHE SLU E SLV .....</b>	<b>19</b>
5.1	SLU e SLV - VERIFICA GEO della capacità portante della fondazione superficiale .....	20
5.2	UPL - verifiche di galleggiamento .....	33
<b>6</b>	<b>VERIFICHE SLU E SLV .....</b>	<b>38</b>
6.8	VERIFICA AL SIFONAMENTO (HYD) .....	55
<b>7</b>	<b>VERIFICHE SLE E SLO .....</b>	<b>57</b>
7.1	VERIFICA DEI CEDIMENTI (SLE).....	58
7.2	CEDIMENTI DEI MANUFATTI IN TERRA .....	67
7.3	LIQUEFAZIONE.....	70

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## 1 PREMESSA

Con riferimento:

- alla relazione di caratterizzazione sismica del suolo, datata 22 Maggio 2018, redatta dallo studio Pro-Geo con sede a Modena, a firma del Dott. Geol. Cesare Sandoni,
- alla relazione geologica, del 30 Ottobre 2020, redatta dallo studio Pro-Geo con sede a Modena, a firma del Dott. Geol. Cesare Sandoni,
- alla relazione idrogeologica, del 30 Ottobre 2020, redatta dallo studio Pro-Geo con sede a Modena, a firma del Dott. Geol. Cesare Sandoni,
  
- ai manufatti in c.a. in progetto ovvero:
  - la **chiavica di invaso della cassa in c.a.**, posta nel vertice Sud-Ovest dell'area della cassa di espansione,
  - la **chiavica di svaso della cassa in c.a.**, posta nel vertice Nord-Ovest dell'area della cassa di espansione,
  - il **manufatto di scarico in c.a. della cassa** a valle della chiavica di svaso,
  - la **vasca di scarico** in c.a. sita a monte dell'attraversamento esistente sotto alla ferrovia Reggio Guastalla,
  - i **pozzetti** in c.a. posti ad inizio e fine della botte a sifone della deviazione del Cavo Baciocca,
  
- alle opere in terra in progetto:
  - il **nuovo rilevato arginale** in terra lungo i lati Ovest e Nord che in sommità prevede il passaggio dei mezzi di manutenzione,
  - il **ringrosso arginale** lungo la scarpata esterna in destra idraulica del Cavo Bondeno,
  - il **ringrosso** dell'argine in destra idraulica dell'Allacciante Cartoccio,
  
- alla normativa in vigore ed in particolare al D.M. 17/01/2018 - Norme Tecniche sulle Costruzioni, e la Circolare esplicativa n.7 del 21 Gennaio 2019.

la presente relazione geotecnica si propone di:

- a) descrivere le indagini e le prove geotecniche in sito,
- b) caratterizzare e modellare il terreno dal punto di vista geotecnico e sismico,
- c) verificare la sicurezza e le prestazioni delle opere da realizzare sopra descritte.

PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI  
Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno Comune di Novellara (RE)



Mappa illustrativa delle opere in progetto

- |  |  |
|--|--|
|                                 |                            |
|  Chiavica di invaso             |  Rilevato arginale         |
|  Chiavica di svaso              |  Ringrosso arginale        |
|  Manufatto scatolare di scarico |  Regularizzazione arginale |
|  Vasca di scarico cassa         |  |

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

Si precisa che per tutte le opere progettate sono stati considerati i seguenti dati al fine del calcolo dell'azione sismica:

Vita nominale $V_N$	Classe d'uso	Coefficiente d'uso $C_u$	Periodo di riferimento per l'azione sismica $V_R$	Verifiche di sicurezza agli stati limite sismici	Tempo di ritorno dell'azione sismica - $T_R$
100	III°	1,50	150 anni	SLV SLO	1425 anni (SLV) 90 anni (SLO)

## 2 DESCRIZIONE DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E SISMICHE EFFETTUATE

Indagini e prove geotecniche in situ	Indagine sismica	Prove di laboratorio
<p>N. 20 CPT (4 di verifica pre-fattibilità e 16 successive) eseguite lungo il perimetro dell'area in analisi e con profondità fino a 20 m dal p.c.</p> <p>N.4 CPTU Seguite da altrettante prove di dissipazione fino ad una profondità di 30m dal p.c.</p> <p>N.1 SONDAGGIO A carotaggio continuo, fino ad una profondità di 20m dal p.c. che ha permesso di eseguire 2 prove di PERMEABILITÀ in sito e il prelievo di 2 campioni indisturbati</p> <p>N.12 TRINCEE Profonde mediamente 1.5 m con conseguente prelievo di di 12 campioni rimaneggiati e 6 campioni indisturbati</p>	<p>N. 4 MASW Stendimenti di 24 geofoni aventi interasse di 1.5 m</p>	<p>Sui campioni prelevati durante le indagini in situ, sono stati eseguiti:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 12 limiti <math>W_L</math></li> <li>• 12 limiti <math>W_p</math></li> <li>• 4 prove Proctor</li> <li>• 4 prove edometriche</li> <li>• 4 prove triassiali CIU</li> <li>• 3 prove triassiali UU</li> </ul>

Si rimanda alla relazione geologica e richiamata in premessa per una descrizione della caratterizzazione e modellazione geologica del sito.

Di seguito si mostrano in planimetria la localizzazione delle indagini e prove geotecniche in situ.





PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI  
Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno Comune di Novellara (RE)



Ubicazione prove penetrometriche - CPT

-  Prove CPT di pre-fattibilità
-  Prove CPT definitive

PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI  
Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno Comune di Novellara (RE)



Ubicazione prove penetrometriche CPTU + sondaggio

 Prove CPTU

 Sondaggio



PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI  
Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno Comune di Novellara (RE)



Ubicazione trincee





Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

### Ubicazione indagini di tipo MASW

Nell'immagine seguente si mostra la posizione delle indagini di cui alla relazione di caratterizzazione sismica del suolo, datata 22 Maggio 2018, redatta dallo studio Pro-Geo con sede a Modena, a firma del Dott. Geol. Cesare Sandoni.



Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

### 3 SUCCESSIONE STRATIGRAFICA, MODELLO GEOTECNICO E CLASSIFICAZIONE DEL SUOLO

Sulla base di quanto ottenuto dalle indagini geotecniche in situ ed in laboratorio, lo scrivente progettista assume il seguente **modello geotecnico** per il dimensionamento e verifica delle opere di progetto:

Denominazione e livelli dello strato	Litologia dello strato	Angolo di attrito interno $\phi_k$ [°]	Resistenza al taglio non drenata [kPa] $Cu_k$	Coesione efficace [kPa] $c'_k$	Peso specifico [kN/m <sup>3</sup> ] $\gamma_k$	Modulo Edometrico [Mpa] $M_{edk}$
<b>Nuovo argine</b> Da 21,5 a 18,75 m.s.l.m.	Argille Limose	18	38	30	19,65	–
<b>T1+T2</b> 18,75 a 8,75 m.s.l.m.	Argille limose che degradano a limi argillosi	18	54	19	18,45	4,6
<b>T3</b> Da 8,75 a 5,75 m.s.l.m.	Limi e limi sabbiosi sovra consolidati	18	~ 110	37	19,76	8,1
<b>T4</b> Da 5,75 a -1,25 m.s.l.m.	Sabbie fini limose, sabbie	-	~ 60	-	18,50	~7,5
<b>T5</b> Da -1,25 a -11 m.s.l.m.	Sabbie a varia granulometria	-	-	-	18,50	-

\*\*\*

#### Livello medio di falda freatica

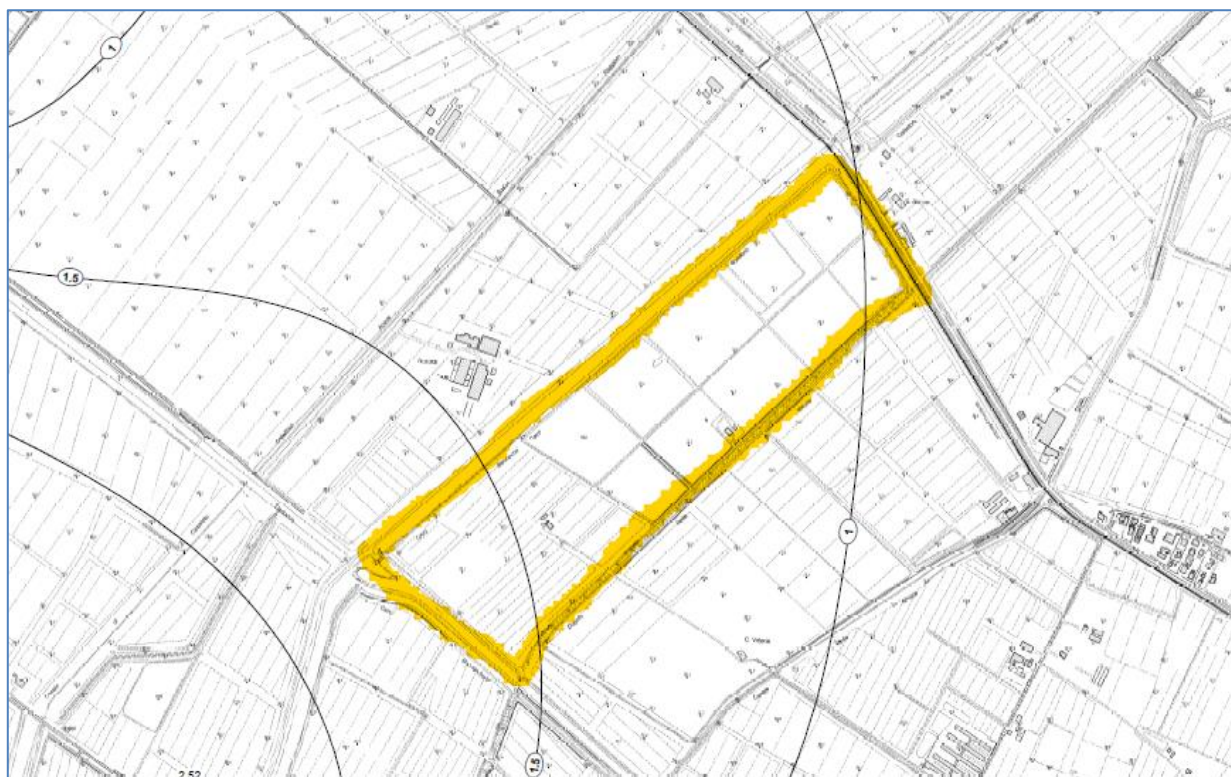
Il sondaggio eseguito durante la campagna di indagini ha intercettato la falda a 5 m dal p.c.

Tuttavia, secondo la Carta della soggiacenza di falda della Regione Emilia - Romagna all'interno del quadro conoscitivo del PSC del Comune di Novellara (2017) nell'areale in questione la falda varia da **1-1.5m dal p.c.**

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)



\*\*\*

**Classificazione o categoria sismica del sottosuolo**

Dal punto di vista sismico i terreni presenti presso la chiavica di svaso e l'argine lato Nord e Sud appartengono alla **categoria di sottosuolo C**.

I terreni lungo Strada della Vittoria (argine lato Est) ed al di sotto della Chiavica di invaso appartengono invece alla **categoria di sottosuolo D**.

Si rimanda alla relazione sismica del Dott. Sandoni per una descrizione dettagliata.

\*\*\*

Di seguito si espone come si è proceduto a determinare la degradazione ciclica della coesione non drenata  $c_u$  finalizzata alle verifiche in presenza di sisma delle opere in oggetto.

**Comportamento a rottura dei terreni a grana fine: resistenza ciclica in tensioni totali**

La valutazione della resistenza ciclica è di interesse per tutti i problemi che fanno riferimento alle condizioni ultime (es. stabilità dei pendii)

La resistenza ciclica di un terreno a grana fine in condizioni non drenate può essere espressa in termini di tensioni totali con il criterio di Tresca:

$$\tau_{stat} = c_u$$

$$\tau_{cyc}(N) = c_u(N)$$



## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

dove  $c_u(N)$  è il valore della coesione non drenata al termine dell' $N$ -simo ciclo di carico valutato tenendo conto della degradazione della resistenza con il numero di cicli (prescindendo dall'incremento dovuto alla velocità)  $c_u(N)$  può essere espresso utilizzando l'**indice di degradazione ciclica  $\delta_{cu}$**  mediante la relazione:

$$c_u(N) = \delta_{cu} \cdot c_u(1)$$

essendo  $c_u(1)$  il valore della coesione non drenata statica.

L'indice di degradazione  $\delta_{cu}$  viene generalmente espresso come:

$$\delta_{cu} = N^{-t}$$

Dove  $N$  è il numero di cicli equivalenti del sisma e  $t$  rappresenta il parametro di degradazione ciclica. Entrambe i valori possono essere ricavati mediante correlazione con  $OCR$ ,  $I_p$  e  $\gamma_c(t)$  e  $ag(N)$  come illustrato nelle tabelle sottostante:

Determinazione di  $t$

$\gamma_c$ [%]	$I_p$ [%]	OCR=1	OCR=2	OCR=4
1	10÷15	<b>0,2 ÷ 0,25</b>		
1	25÷60	<b>0,06 ÷ 0,07</b>	<b>0,05 ÷ 0,06</b>	<b>0,04</b>
2	10÷25	<b>0,3 ÷ 0,35</b>		
2	25÷60	<b>0,07 ÷ 0,09</b>	<b>0,07</b>	<b>0,04</b>

Determinazione di  $N$

M	N	a [g]
5,25	2 ÷ 3	0,15
6,0	5	0,25
6,5	8	0,30
7,0	12	0,35
7,5	15	0,45

Date le precedenti premesse si è proceduto a calcolare la resistenza ciclica non drenata del rilevato arginale e dello strato T1+T2, utilizzate in seguito per le verifiche di stabilità globale.

Strato	Ag/g	OCR	$I_p$	$\gamma_c$	N	t	$\delta_{cu}$	$c_u(1)$	$c_u(N)$
Argine	0,25	1	40	2	5	0,08	0,88	38	<b>33,4</b>
T1+T2	0,25	1	40	2	5	0,08	0,88	54	<b>47,5</b>

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

#### 4 VERIFICA DELLA SICUREZZA E DELLE PRESTAZIONI DELLE OPERE DA REALIZZARE

Nella presente relazione verranno eseguite, per le seguenti opere, le verifiche:

##### **Chiavica di invaso**

- **GEO** - SLU e SLV di tipo geotecnico per quanto riguarda il collasso per carico limite dell'insieme fondazione superficiale e terreno,
- **GEO** – SLE di tipo geotecnico per quanto attiene i cedimenti,
- **UPL** – SLU di tipo idraulico per quanto riguarda il sollevamento dell'opera in particolare durante la fase di costruzione.

##### **Chiavica di svaso**

- **GEO** - SLU e SLV di tipo geotecnico per quanto riguarda il collasso per carico limite dell'insieme fondazione superficiale - terreno,
- **GEO** – SLE di tipo geotecnico per quanto attiene i cedimenti,
- **UPL** – SLU di tipo idraulico per quanto riguarda il sollevamento idraulico dell'opera in particolare durante la fase di costruzione.

##### **Manufatto scatolare di scarico della vasca**

- **GEO** - SLU e SLV di tipo geotecnico per quanto riguarda il collasso per carico limite dell'insieme fondazione superficiale - terreno,
- **GEO** – SLE di tipo geotecnico per quanto attiene i cedimenti,
- **UPL** – SLU di tipo idraulico per quanto riguarda il sollevamento idraulico dell'opera in particolare durante la fase di costruzione.

##### **Vasca allo scarico della cassa**

- **GEO** - SLU e SLV di tipo geotecnico per quanto riguarda il collasso per carico limite dell'insieme fondazione superficiale terreno – si vedano i § 11.9 e 12.9 della relazione STR.

##### **Pozzetti posti ad inizio e fine della botte a sifone della deviazione del Cavo Baciocca**

- **GEO** - SLU e SLV di tipo geotecnico per quanto riguarda il collasso per carico limite dell'insieme fondazione superficiale terreno,
- **UPL** – SLU di tipo idraulico per quanto riguarda il sollevamento idraulico dell'opera in particolare durante la fase di costruzione.

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

**Nuovo rilevato arginale (lato Nord e Est della cassa)**

- **GEO** – SLU e SLV di tipo geotecnico della stabilità globale della scarpata esterna di progetto,
- **GEO** – SLU e SLV di tipo geotecnico del collasso per carico limite dell'insieme fondazione argine – terreno di base,
- **HYD** – SLU di tipo idraulico per quanto riguarda la verifica al sifonamento
- **GEO** – SLE di tipo geotecnico per quanto attiene i cedimenti.

**Ringrosso dell'argine in destra idraulica del Cavo Bondeno(lato Ovest della cassa)**

- **GEO** – SLU e SLV di tipo geotecnico della stabilità globale della scarpata esterna di progetto,
- **GEO** – SLU e SLV di tipo geotecnico del collasso per carico limite dell'insieme fondazione argine – terreno di base,
- **HYD** – SLU di tipo idraulico per quanto riguarda la verifica al sifonamento.

**Regolarizzazione arginale del Canale Allacciante Cartoccio (lato Sud della cassa)**

- **GEO** – SLU e SLV di tipo geotecnico della stabilità globale della scarpata esterna di progetto,

\*\*\*

Ai sensi del punto 7.11.3.4 delle NTC 2018 è stata effettuata la verifica a liquefazione sotto il rilievo arginale e i manufatti di progetto.

\*\*\*

Entrando nello specifico e riportando in anteprima gli esiti delle verifiche per ciascun manufatto ed opera:

**Chiavica di invaso****SLU e SLV – verifica GEO del collasso per carico limite dell'insieme fondazione superficiale - terreno**

Tipo di approccio: 2 (A1+M1+R3)

La verifica è stata condotta in condizioni non drenate; in caso di evento sismico si sono ridotti i fattori di stabilità della formula trinomia.

Esito della verifica: soddisfatta.

**SLE e SLO – verifica agli stati limite di esercizio mediante il calcolo dei cedimenti della fondazione superficiale**

Metodo di calcolo: Si è adottato il modello di Winkler.

Esito della verifica: soddisfatta



---

PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

---

### **Chiavica di svaso**

**SLU e SLV – verifica GEO del collasso per carico limite dell'insieme fondazione superficiale - terreno**

Tipo di approccio: 2 (A1+M1+R3)

La verifica è stata condotta in condizioni non drenate; in caso di evento sismico si sono ridotti i fattori di stabilità della formula trinomia.

Esito della verifica: soddisfatta

**SLE e SLO – verifica agli stati limite di esercizio mediante il calcolo dei cedimenti della fondazione superficiale**

Metodo di calcolo: Si è adottato il modello di Winkler.

Esito della verifica: soddisfatta

### **Manufatto scatolare di scarico della vasca**

**SLU e SLV – verifica GEO del collasso per carico limite dell'insieme fondazione superficiale - terreno**

Tipo di approccio: 2 (A1+M1+R3)

La verifica è stata condotta in condizioni non drenate; in caso di evento sismico si sono ridotti i fattori di stabilità della formula trinomia.

Esito della verifica: soddisfatta

**SLE e SLO – verifica agli stati limite di esercizio mediante il calcolo dei cedimenti della fondazione superficiale**

Metodo di calcolo: Si è adottato il modello di Winkler.

Esito della verifica: soddisfatta

### **Vasca allo scarico della cassa**

**SLU e SLV – verifica GEO del collasso per carico limite dell'insieme fondazione superficiale - terreno**

Tipo di approccio: 2 (A1+M1+R3)

La verifica è stata condotta in condizioni drenate; in caso di evento sismico si sono ridotti i fattori di stabilità della formula trinomia.

Esito della verifica: soddisfatta

PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

---

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno Comune di Novellara (RE)

**Rilevati o argini in terra**ovvero per il nuovo rilevato arginale (Nord e Est), ringrosso arginale (Ovest), regolarizzazione arginale (Sud)**SLU e SLV – verifica GEO di tipo geotecnico della stabilità globale della scarpata interna alla cassa di progetto**Tipo di approccio: 1 combinazione 2 (A2+M2+R2)

Le condizioni con le quali si sono svolte le verifiche per tutti e 4 gli argini della cassa (Lato Nord, Lato Est, Ringrosso del lato Ovest, Lato Sud già esistente) sono rappresentate nella tabella.

Esito delle verifiche: soddisfatte



# CASSA DI ESPANSIONE

## INVASO PIENO

Falda in moto di filtrazione  
stazionario

Quota invaso:  
**20 m.s.l.m.**

AZIONE SISMICA	NO AZIONE SISMICA
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drenate</li> <li>• Non Drenate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drenate</li> <li>• Non Drenate</li> <li>• Post Sisma</li> </ul>

## SVASO

Falda in moto di filtrazione  
stazionario

Quota invaso:  
**da 20,8 m.s.l.m. a fondo cassa**

AZIONE SISMICA	NO AZIONE SISMICA
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drenate</li> <li>• Non Drenate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drenate</li> <li>• Non Drenate</li> <li>• Post Sisma</li> </ul>

## INVASO VUOTO

Falda a quota del piano campagna

AZIONE SISMICA	NO AZIONE SISMICA
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drenate</li> <li>• Non Drenate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drenate</li> <li>• Non Drenate</li> <li>• Post Sisma</li> </ul>

PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

---

Inoltre:

Nuovo rilevato arginale (Nord e Est)

**SLE – verifica agli stati limite di esercizio mediante il calcolo dei cedimenti degli argini di progetto**

Metodo di calcolo: modello edometrico lineare

Esito della verifica: soddisfatta

Nuovo rilevato arginale (Nord e Est), Ringrosso arginale (Ovest)

**HYD – verifica agli stati limite ultimi del sifonamento degli argini in fase di esercizio**

Esito della verifica: soddisfatta

PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

---

## **5.VERIFICHE SLU e SLV**

**dei manufatti in c.a.**

**CHIAVICA DI INVASO**

**CHIAVICA DI SVASO**

**MANUFATTO DI SCARICO**

**POZZETTI PER DEVIAZIONE CAVO BACIOCCA**

PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

---

### **5.1 SLU E SLV - VERIFICA GEO DELLA CAPACITÀ PORTANTE DELLA FONDAZIONE SUPERFICIALE**

La verifica al collasso struttura-terreno è stata condotta in condizioni non drenate e secondo l'approccio 2 (A1+M1+R3).

#### **CHIAVICA DI INVASO**

##### **SLU - Condizioni statiche**

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

CARICHI PERMANENTI						
Peso manufatto in c.a. (G1)						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
soletta di fondazione	10	10,5	0,5	1	25	1312,5
muri laterali	10	0,5	4,1	3	25	1537,5
base sup.	10	6,5	0,5	1	25	812,5
TOT. G1						3.663

PESO PROPRIO DEL TERRENO ( G1 - elementi in terra )						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
Terra a fianco spalle laterali	10	2	4,1	2	19,65	3222,6
TOT. G1						3.223

TOTALE CARICHI PERMANENTI - G1						
						6.885 KN

G2 - peso acqua	10	2,5	2	2	10	1.000
-----------------	----	-----	---	---	----	-------

CARICHI VARIABILI						
PESO CARICO STRADALE diminuito del 20% (Q1)						

Elemento	Carico Asse Q <sub>ik</sub> [kN]	q <sub>ik</sub> [kN/m2]	Peso Totale [kN]
Schema di carico 1-tandem	480		480
Schema di carico 1-distribuito		7,2	468
TOTALE CARICHI VARIABILI - Q1			948

SLU - Verifica di capacità portante della fondazione superficiale - approccio 2 - (A1-M1-R3)

Dimensioni della piastra di fondazione	
Base (+soletta di magrone )	10,5 m.
Lunghezza	10 m.
Quota argine	21,5 mslm
Quota terreno appoggio fondazione	16,4 mslm
Altezza argine sopra alla fondazione	5,1 m.
Quota falda	18 mslm
Altezza Falda sopra fondazione	1,6 m
q (sovraccarico laterale per h fianco)	78,095 kPa

Parametri geotecnici	
γ t (peso specifico terreno)	18,45 kN/m3
φ <sup>k</sup> (angolo di resistenza taglio)	18 °
σ <sup>v</sup> (tensione verticale efficace)	0,2259 MPa
Cu,k (coesione non drenata)	54 kPa

Calcolo di Ed	
Azioni di calcolo	Ed [kN]
Ed=γ <sub>s</sub> Gk+γ <sub>a</sub> Qk	11.872,63

Calcolo di Rd	
sc 0	1,21
Q <sub>lim</sub> [kPa]	413,94
Q <sub>lim,d</sub> [kN]	18.897,38

ESITO VERIFICA

VERIFICATO

## SLV - Sisma



## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

CARICHI PERMANENTI						
Peso manufatto in c.a. (G1) e acqua (G2)						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
soletta di fondazione	10	10,5	0,5	1	25	1312,5
muri	10	0,5	4,1	3	25	1537,5
base sup.	10	6,5	0,5	1	25	812,5
G2-peso acqua	10	2,5	2	2	10	1.000
TOT.						4.663

PESO PROPRIO DEL TERRENO (G1 - elementi in terra )						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
Spalle laterali	10	2	4,1	2	19,65	3222,6
TOT.						3.223

TOTALE CARICHI PERMANENTI - G1+G2	7.885 KN
-----------------------------------	----------

CARICHI VARIABILI			
PESO CARICO STRADALE diminuito del 20% (Q1)			
Elemento	Carico Asse Q <sub>ik</sub> [kN]	q <sub>ik</sub> [kN/m2]	Peso Totale [kN]
Schema di carico 1-tandem	480		0
Schema di carico - distribuito		468	0
TOTALE CARICHI VARIABILI - Q1			0

SLV- Verifica di capacità portante della fondazione superficiale			
Dimensioni della piastra di fondazione			
Base (+soletta di magrone )	10,5	m.	
Lunghezza	10	m.	
Quota argine	21,5	mslm	
Quota terreno appoggio fondazione	16,4	mslm	
Altezza argine sopra alla fondazione	5,1	m.	
Quota falda	18	mslm	
Altezza Falda sopra fondazione	1,6	m	
q (pressione litostatica totale )	78,095	kPa	

Parametri geotecnici	
γ t (peso specifico terreno)	18,45 kN/m3
φ'k (angolo di resistenza taglio)	18 °
σ'v (tensione verticale efficace)	0,2259 MPa
Cu,k (coesione non drenata ridotta)	47,5 kPa

Calcolo di Ed	
Azioni di calcolo	Ed [kN]
Ed=Gk	7.885,10

Calcolo di Rd	
sc 0	1,21
Q <sub>LIM</sub> [kPa]	373,52
Q <sub>LIM,d</sub> [kN]	17.051.84

ESITO VERIFICA	
VERIFICATO	

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## CHIAVICA DI SVASO

## SLU - Condizioni statiche

CARICHI PERMANENTI						
Peso manufatto in c.a. (G1) e acqua (G2)						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
soletta di fondazione	5	11	0,5	1	25	687,5
muri	5	0,5	5,5	5	25	1718,75
base sup.	5	11	0,5	1	25	687,5
TOT.						3.094
G2 - peso acqua	5	2	2	2	10	400
PESO PROPRIO DEL TERRENO ( G1 - elementi in terra )						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
Spalle laterali	0	0	0	0	19,65	0
TOT.						-
TOTALE CARICHI PERMANENTI	3.494 KN					
CARICHI VARIABILI						
PESO CARICO STRADALE diminuito del 20% (Q1)						
Elemento	Carico Asse Q <sub>ik</sub> [kN]		q <sub>ik</sub> [kN/m2]	Peso Totale [kN]		
Schema di carico 1-tandem	480			480		
Schema di carico - distribuito			396	396		
TOTALE CARICHI VARIABILI - Q1				876		
SLU - Verifica di capacità portante della fondazione superficiale - approccio 2 - (A1-M1-R3)						
Dimensioni della piastra di fondazione						
Base (+soletta di magrone )			11 m.			
Lunghezza			5 m.			
Quota argine			21,5 mslm			
Quota terreno appoggio fondazione			15 mslm			
Altezza argine sopra alla fondazione			6,5 m.			
Quota falda			18 mslm			
Altezza Falda sopra fondazione			3 m			
q (sovraccarico laterale per h fianco)			89,925 kPa			
Parametri geotecnici						
γ t (peso specifico terreno)			18,45 kN/m3			
φ'k (angolo di resistenza taglio)			18 °			
σ'v (tensione verticale efficace)			0,2385 MPa			
Cu,k (coesione non drenata)			54 kPa			
Calcolo di Ed				Calcolo di Rd		
Azioni di calcolo			Ed [kN]	sc 0	1,44	VERIFICATO
Ed=γ <sub>G</sub> Gk+γ <sub>Q</sub> Qk			5.935,88	Q <sub>LIM</sub> [kPa]	489,61	
				Q <sub>LIM,d</sub> [kN]	#####	

ESITO VERIFICA

VERIFICATO

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## SLV - Sisma

CARICHI PERMANENTI						
Peso manufatto in c.a. (G1) e acqua (G2)						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m³]	peso [kN]
soletta di fondazione	5	11	0,5	1	25	687,5
muri	5	0,5	5,5	5	25	1718,75
base sup.	5	11	0,5	1	25	687,5
TOT. G1						3.094
G2 - peso acqua	5	2	2	2	10	400
PESO PROPRIO DEL TERRENO (G1 - elementi in terra)						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m³]	peso [kN]
Spalle laterali	0	0	0	0	19,65	0
TOT.						-
TOTALE CARICHI PERMANENTI - G1+G2	3.494 KN					
CARICHI VARIABILI						
PESO CARICO STRADALE diminuito del 20% (Q1)						
Elemento	Carico Asse Q <sub>ik</sub> [kN]		q <sub>ik</sub> [kN/m²]	Peso Totale [kN]		
Schema di carico 1-tandem	0			0		
Schema di carico distribuito			0	0		
TOTALE CARICHI VARIABILI - Q1				0		
SLV - Verifica di capacità portante della fondazione superficiale - approccio 2 - (A1-M1-R3)						
Dimensioni della piastra di fondazione						
Base (+soletta di magrone )			11 m.			
Lunghezza			5 m.			
Quota argine			21,5 mslm			
Quota terreno appoggio fondazione			15 mslm			
Altezza argine sopra alla fondazione			6,5 m.			
Quota falda			18 mslm			
Altezza Falda sopra fondazione			3 m			
q (sovraccarico laterale per h fianco)			89,925 kPa			
Parametri geotecnici						
γ t (peso specifico terreno)		18,45 kN/m³				
φ'k (angolo di resistenza taglio)		18 °				
σ'v (tensione verticale efficace)		0,2385 MPa				
Cu,k (coesione non drenata)		47,5 kPa				
Calcolo di Ed				Calcolo di Rd		
Azioni di calcolo		Ed [kN]		sc 0	1,44	
Ed=γ <sub>G</sub> Gk+γ <sub>Q</sub> Qk		3.493,75		Q <sub>lim</sub> [kPa]	441,50	
				Q <sub>lim,d</sub> [kN]	10.557,63	
ESITO VERIFICA						
VERIFICATO						

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## POZZETTO A MONTE DELLA DEVIAZIONE DEL CAVO BACIOCCA

## SLU - Condizioni statiche

CARICHI PERMANENTI						
PESO DEL MANUFATTO (G1 - elementi in cemento armato )						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m³]	peso [kN]
magrone	5,6	5,6	0,2	1	24	150,528
soletta di fondazione	5,4	5,4	0,8	1	25	583,2
muri larghi	5,4	0,8	9,35	2	25	2019,6
muri stretti	4	0,8	9,35	2	25	1496
TOT.						4.249
peso acqua	4	4	1,5	1	10	240
PESO PROPRIO DEL TERRENO (G1 - elementi in terra )						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m³]	peso [kN]
Spalle laterali	0	0	0	0	19,5	0
TOT.						-
TOTALE CARICHI PERMANENTI - G1+G2	4.489 KN					
SLU - Verifica di capacità portante della fondazione superficiale - approccio 2 - (A1-M1-R3)						
Dimensioni della piastra di fondazione						
Base (pari alla soletta di magrone )			5,6	m.		
Lunghezza (pari alla soletta di magrone )			5,6	m.		
Quota argine			21,55	mslm		
Quota terreno appoggio fondazione			11,2	mslm		
Altezza argine sopra alla fondazione			10,35	m.		
Quota falda			18	mslm		
Altezza Falda sopra fondazione			6,8	m		
q (sovraccarico laterale per h fianco)			128,65	kPa		
Parametri geotecnici						
γ t (peso specifico terreno)			19	kN/m3		
φ 'k (angolo di resistenza taglio)			18	°		
σ'v (tensione verticale efficace)			0,27315	MPa		
Cu,k (coesione non drenata)			54	kPa		
</						

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## SLV - Sisma

CARICHI PERMANENTI						
PESO DEL MANUFATTO (G1 - elementi in cemento armato )						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
magrone	5,6	5,6	0,2	1	24	150,528
soletta di fondazione	5,4	5,4	0,8	1	25	583,2
muri larghi	5,4	0,8	9,35	2	25	2019,6
muri stretti	4	0,8	9,35	2	25	1496
TOT.						4.249
G2-peso acqua	4	4	2	1	10	320

PESO PROPRIO DEL TERRENO (G1 - elementi in terra)						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
Spalle laterali	0	0	0	0	19,5	0
TOT.						-

TOTALE CARICHI PERMANENTI - G1+G2	4.569 KN
-----------------------------------	----------

SLU - Verifica di capacità portante della fondazione superficiale - approccio 2 - (A1-M1-R3)	
--	--

Dimensioni della piastra di fondazione	
Base (pari alla soletta di magrone )	5,6 m.
Lunghezza (pari alla soletta di magrone )	5,6 m.
Quota argine	21,5 mslm
Quota terreno appoggio fondazione	11,2 mslm
Altezza argine sopra alla fondazione	10,3 m.
Quota falda	18 mslm
Altezza Falda sopra fondazione	6,8 m
q (sovraccarico laterale per h fianco)	127,7 kPa

Parametri geotecnici	
γ t (peso specifico terreno)	19 kN/m3
φ°k (angolo di resistenza taglio)	18 °
σ°v (tensione verticale efficace)	0,2727 MPa
Cu,k SISMICA	45,9 kPa

Calcolo di Ed	
Azioni di calcolo	Ed [kN]
Ed=γG Gk	4.569,33

Calcolo di Rd	
sc 0	1,2
qLim [kPa]	410,81
QLim,d [kN]	5.601,32

ESITO VERIFICA	
VERIFICATO	



PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

---

## **POZZETTO A VALLE DELLA DEVIAZIONE DEL CAVO BACIOCCA**

### **SLU - Condizioni statiche**

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

CARICHI PERMANENTI						
Peso manufatto in c.a. (G1) e acqua (G2)						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
magrone	5,8	5,8	0,2	1	24	161,472
soletta di fondazione	5,6	5,6	0,8	1	25	627,2
muri larghi	5,6	0,8	9,35	2	25	2094,4
muri stretti	4	0,8	9,35	2	25	1496
TOT.						4.379
G2-peso acqua	4	4	2	1	10	320

PESO PROPRIO DEL TERRENO ( G1 - elementi in terra )						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
Spalle laterali	0	0	0	0	19,65	0
TOT.						-

TOTALE CARICHI PERMANENTI - G1+G2	4.699 KN
-----------------------------------	----------

SLU - Verifica di capacità portante della fondazione superficiale - approccio 2 - (A1-M1-R3)

Dimensioni della piastra di fondazione		
Base (soletta di magrone )	5,8	m.
Lunghezza (soletta magrone)	5,8	m.
Quota argine	21,55	mslm
Quota terreno appoggio fondazione	11,2	mslm
Altezza argine sopra alla fondazione	10,35	m.
Quota falda	18	mslm
Altezza Falda sopra fondazione	6,8	m
q (sovraccarico laterale per h fianco)	122,9575	kPA

Parametri geotecnici	
$\gamma$ t (peso specifico terreno)	18,45 kN/m3
$\phi$ 'k (angolo di resistenza taglio)	18 °
$\sigma$ 'v (tensione verticale efficace)	0,27315 MPa
Cu,k (coesione non drenata)	54 kPa

Calcolo di Ed	
Azioni di calcolo	Ed [kN]
Ed= $\gamma_6$ Gk	6.172,79

Calcolo di Rd	
sc 0	1,2
q <sub>lim</sub> [kPa]	456,03
Q <sub>lim,d</sub> [kN]	6.669,93

ESITO VERIFICA

VERIFICATO

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## SLV - Sisma

CARICHI PERMANENTI						
Peso manufatto in c.a. (G1) e acqua (G2)						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
magrone	5,8	5,8	0,2	1	24	161,472
soletta di fondazione	5,6	5,6	0,8	1	25	627,2
muri larghi	5,6	0,8	9,35	2	25	2094,4
muri stretti	4	0,8	9,35	2	25	1496
G2-peso acqua	4	4	2	1	10	320
TOT.						4.699

PESO PROPRIO DEL TERRENO ( G1 - elementi in terra )						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
Spalle laterali	0	0	0	0	19,5	0
TOT.						-

TOTALE CARICHI PERMANENTI - G1+G2	4.699 KN
-----------------------------------	----------

SLV - Verifica di capacità portante della fondazione superficiale - approccio 2 - (A1-M1-R3)	
--	--

Dimensioni della piastra di fondazione	
Base (soletta di magrone )	5,8 m.
Lunghezza (soletta magrone)	5,8 m.
Quota argine	21,5 mslm
Quota terreno appoggio fondazione	11,2 mslm
Altezza argine sopra alla fondazione	10,3 m.
Quota falda	18 mslm
Altezza Falda sopra fondazione	6,8 m
q (sovraccarico laterale per h fianco)	122,035 kPa

Parametri geotecnici	
γ t (peso specifico terreno)	18,45 kN/m3
ϕ°k (angolo di resistenza taglio)	18 °
σ°v (tensione verticale efficace)	0,2727 MPa
Cu,k (coesione non drenata)	47,5 kPa

Calcolo di Ed	
Azioni di calcolo	Ed [kN]
Ed=γ <sub>G</sub> Gk	4.699,07

Calcolo di Rd	
sc 0	1,2
Q <sub>LIM</sub> [kPa]	415,02
Q <sub>LIM,d</sub> [kN]	6.070,05

ESITO VERIFICA	
VERIFICATO	

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## MANUFATTO DI SCARICO DELLA CASSA

## SLU - Condizioni statiche

CARICHI PERMANENTI						
Peso manufatto in c.a. (G1) e acqua (G2)						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
magrone	1	5,2	0,1	1	24	12
soletta di fondazione	1	5	0,4	1	25	50
muri	1	0,4	3	2	25	60
base sup.	1	3,3	0,4	1	25	33
TOT.						155
G2-peso acqua	1	2,5	2	1	10	50

PESO PROPRIO DEL TERRENO ( G1 - elementi in terra )						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
Spalle laterali	1	0,85	5	2	19,65	167
Colonna superiore	1	3,3	1,6	1	19,65	104
TOT.						271

TOTALE CARICHI PERMANENTI - G1+G2	476 KN
-----------------------------------	--------

CARICHI VARIABILI			
PESO CARICO STRADALE diminuito del 20% (Q1)			
Elemento	Carico Asse Q <sub>ik</sub> [kN]	q <sub>ik</sub> [kN/m2]	Peso Totale [kN]
Schema di carico 1-tandem	480		480
Schema di carico distribuito		23,76	23,76
TOTALE CARICHI VARIABILI - Q1			503,76

SLU - Verifica di capacità portante della fondazione superficiale - approccio 2 - (A1-M1-R3)	
Dimensioni della piastra di fondazione	
Base (+soletta di magrone )	5,2 m.
Lunghezza	1 m.
Quota argine	21,5 mslm
Quota terreno appoggio fondazione	17,7 mslm
Altezza argine sopra alla fondazione	3,8 m.
Quota falda	18 mslm
Altezza Falda sopra fondazione	0,3 m
q (sovraccarico laterale per h fianco)	67,11 kPa
Parametri geotecnici	
γ t (peso specifico terreno)	18,45 kN/m3
φ'k (angolo di resistenza taglio)	18 °
σ'v (tensione verticale efficace)	0,2142 MPa
Cu,k (coesione non drenata)	54 kPa

Calcolo di Ed	
Azioni di calcolo	Ed [kN]
Ed=γ <sub>G</sub> Gk+γ <sub>Q</sub> Qk	1.384,77

Calcolo di Rd	
sc 0	2,04
Q <sub>lim</sub> [kPa]	633,33
Q <sub>lim,d</sub> [kN]	1.431,88

ESITO VERIFICA	
VERIFICATO	

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## SLV - Sisma

CARICHI PERMANENTI						
Peso manufatto in c.a. (G1) e acqua (G2)						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
magrone	1	5,2	0,1	1	24	12
soletta di fondazione	1	5	0,4	1	25	50
muri	1	0,4	3	2	25	60
base sup.	1	3,3	0,4	1	25	33
peso acqua	1	2,5	2	1	10	50
TOT.						205
PESO PROPRIO DEL TERRENO (G1 - elementi in terra)						
Elemento	lungh. [m]	largh. [m]	altezza [m]	N° elementi	p.s. [kN/m3]	peso [kN]
Spalle laterali	1	0,85	5	2	19,65	167
Colonna superiore	1	3,3	1,6	1	19,65	104
TOT.						271
TOTALE CARICHI PERMANENTI - G1+G2	476 KN					
CARICHI VARIABILI						
PESO CARICO STRADALE diminuito del 20% (Q1)						
Elemento	Carico Asse Q <sub>ik</sub> [kN]		q <sub>ik</sub> [kN/m2]	Peso Totale [kN]		
Schema di carico 1-tandem	0			0		
Schema di carico distribuito			0	0		
TOTALE CARICHI VARIABILI - Q1				0		
SLU - Verifica di capacità portante della fondazione superficiale - approccio 2 - (A1-M1-R3)						
Dimensioni della piastra di fondazione						
Base (+soletta di magrone )			5,2 m.			
Lunghezza			1 m.			
Quota argine			21,5 mslm			
Quota terreno appoggio fondazione			17,7 mslm			
Altezza argine sopra alla fondazione			3,8 m.			
Quota falda			18 mslm			
Altezza Falda sopra fondazione			0,3 m			
q (sovraccarico laterale per h fianco)			69,2 kPa			
Parametri geotecnici						
γ t (peso specifico terreno)		19 kN/m3				
φ'k (angolo di resistenza taglio)		18 °				
σ'v (tensione verticale efficace)		0,2142 MPa				
Cu,k (coesione non drenata)		45,9 kPa				
Calcolo di Ed				Calcolo di Rd		
Azioni di calcolo		Ed [kN]		sc 0	2,04	
Ed=γ <sub>G</sub> Gk+γ <sub>Q</sub> Qk		476,26		Q <sub>LIM</sub> [kPa]	550,49	
				Q <sub>LIM,d</sub> [kN]	1.244,58	
ESITO VERIFICA						
VERIFICATO						



PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

---

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## 5.2 UPL - VERIFICHE DI GALLEGGIAMENTO

### CHIAVICA DI INVASO

#### SLU di tipo idraulico per quanto riguarda il sollevamento idraulico dell'opera

Si verifica lo stato limite di galleggiamento o di tipo idraulico (HYD) per quanto attiene l'intero manufatto

La quota della falda nell'area di intervento riportata dalla Carta della soggiacenza (RER, Comune di Novellara) indica un livello medio stagionale di 18 m.s.l.m.

Dato che la platea di fondazione giace a quota 17 m.s.l.m. la sottospinta idraulica è generata da una colonna d'acqua di altezza  $H_{h20} = 1,00$  m.

Considerando il coefficiente di sicurezza per la spinta idraulica (permanete sfavorevole) pari a  $\gamma_{Q1} = 1,1$  (tabella 6.2.III) ottengo che:

$$V_{inst,d} = \gamma_w \gamma_{Q1} B H_{h20} = 113,31 \text{ kN} \quad (\text{Valori per metro lineare})$$

Dove B è la base della fondazione.

L'azione stabilizzante data dal peso proprio della fondazione che si oppone al galleggiamento, è calcolata moltiplicando il predetto peso proprio con  $\gamma_G = 0,9$  (tabella 6.2.III):

$$G_{st,d} = \gamma_{c.a.} V \gamma_G = 329,63 \text{ kN}$$

Dove V è il volume del manufatto in c.a.

Essendo  $G_{st,d} > V_{inst,d}$  la fondazione non avrà problemi di sollevamento.

### CHIAVICA DI SVASO

#### SLU di tipo idraulico per quanto riguarda il sollevamento idraulico dell'opera

Si verifica lo stato limite di galleggiamento o di tipo idraulico (HYD) per quanto attiene l'intero manufatto

La quota della falda nell'area di intervento riportata dalla Carta della soggiacenza (RER, Comune di Novellara) indica un livello medio stagionale di 17,5 m.s.l.m.

Dato che la platea di fondazione giace a quota 15,5 m.s.l.m. la sottospinta idraulica è generata da una colonna d'acqua di altezza  $H_{h20} = 2$  m.

Considerando il coefficiente di sicurezza per la spinta idraulica (permanete sfavorevole) pari a  $\gamma_{Q1} = 1,1$  (tabella 6.2.III) ottengo che:

$$V_{inst,d} = \gamma_w \gamma_{Q1} B H_{h20} = 283,26 \text{ kN} \quad (\text{Valori per metro lineare})$$

Dove B è la base della fondazione.

PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

---

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

L'azione stabilizzante data dal peso proprio della fondazione che si oppone al galleggiamento, è calcolata moltiplicando il predetto peso proprio con  $\gamma_G = 0,9$  (tabella 6.2.III):

$$G_{st,d} = \gamma_{c.a.} \cdot V \cdot \gamma_G = 331,88 \text{ kN}$$

Dove V è il volume del manufatto in c.a.

Essendo  $G_{st,d} > V_{inst,d}$  la fondazione non avrà problemi di sollevamento.

**POZZETTI****SLU di tipo idraulico per quanto riguarda il sollevamento idraulico dell'opera**

Si verifica lo stato limite di galleggiamento o di tipo idraulico (HYD) per quanto attiene l'intero manufatto

La quota della falda nell'area di intervento riportata dalla Carta della soggiacenza (RER, Comune di Novellara) indica un livello medio stagionale di 18 m.s.l.m.

Dato che la platea di fondazione giace a quota 14 m.s.l.m. la sottospinta idraulica è generata da una colonna d'acqua di altezza  $H_{h20} = 4 \text{ m}$ .

Considerando il coefficiente di sicurezza per la spinta idraulica (permanete sfavorevole) pari a  $\gamma_{Q1} = 1,1$  (tabella 6.2.III) ottengo che:

$$V_{inst,d} = \gamma_w \cdot \gamma_{Q1} \cdot A \cdot H_{h20} = 2486,61 \text{ kN}$$

Dove A è l'area della fondazione.

L'azione stabilizzante data dal peso proprio della fondazione che si oppone al galleggiamento, è calcolata moltiplicando il predetto peso proprio con  $\gamma_G = 0,9$  (tabella 6.2.III):

$$G_{st,d} = \gamma_{c.a.} \cdot V \cdot \gamma_G = 3947,22 \text{ kN}$$

Dove V è il volume del manufatto in c.a.

Essendo  $G_{st,d} > V_{inst,d}$  la fondazione non avrà problemi di sollevamento.

**MANUFATTO DI SVASO****SLU di tipo idraulico per quanto riguarda il sollevamento idraulico dell'opera**

Si verifica lo stato limite di galleggiamento o di tipo idraulico (HYD) per quanto attiene l'intero manufatto

La quota della falda nell'area di intervento riportata dalla Carta della soggiacenza (RER, Comune di Novellara) indica un livello medio stagionale di 18 m.s.l.m.

Dato che la platea di fondazione giace a quota 17,7 m.s.l.m. la sottospinta idraulica è generata da una colonna d'acqua di altezza  $H_{h20} = 0,3 \text{ m}$ .

PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

---



## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

Considerando il coefficiente di sicurezza per la spinta idraulica (permanete sfavorevole) pari a  $\gamma_{Q1} = 1,1$  (tabella 6.2.III) ottengo che:

$$V_{inst,d} = \gamma_w \gamma_{Q1} B H_{h20} = 37,77 \text{ kN} \quad (\text{Valori per metro lineare})$$

Dove B è la base della fondazione.

L'azione stabilizzante data dal peso proprio della fondazione che si oppone al galleggiamento, è calcolata moltiplicando il predetto peso proprio con  $\gamma_G = 0,9$  (tabella 6.2.III):

$$G_{st,d} = \gamma_{c.a.} V \gamma_G = 128,7 \text{ kN}$$

Dove V è il volume del manufatto in c.a.

Essendo  $G_{st,d} > V_{inst,d}$  la fondazione non avrà problemi di sollevamento.

PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

---

## **6 VERIFICHE SLU e SLV**

**delle opere in terra**

**NUOVO RILEVATO ARGINALE (lati Nord, Est)**

**RINGROSSO ARGINALE Cavo Bondeno (lato Ovest)**

**REGOLARIZZAZIONE ARGINALE Allacciante Cartoccio (Sud)**

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## 6.1 PREMESSA

Gli argini della cassa verranno realizzati prelevando il materiale a partire dal piano campagna dell'area di progetto della cassa dopo aver asportato il scotico erboso. Lo scavo avverrà per una profondità di circa 2,00 m. e consentirà la realizzazione della vasca di accumulo irriguo ai piedi ed in destra idraulica al Cavo Bondeno.

Si rimanda alla relazione geologica redatta dal Dott. Cesare Sandoni per ogni approfondimento in merito alla conoscenza geologica dei terreni presenti nell'area di intervento.

Di seguito verranno esposti i risultati di:

- GEO- verifica di stabilità globale ai sensi delle NTC 2018 (§ 6.8 e § 7) secondo l'approccio 1, combinazione 2 (A2+M2+R2).
- GEO - Verifica al carico limite secondo l'approccio 2 (A1+M1+R3).
- HYD - Verifica al sifonamento ai sensi del § 6. delle NTC 2018.

## 6.2 MODELLO GEOTECNICO

I parametri geotecnici caratteristici sono quelli relativi al terreno di fondazione (T1+T2) e dell'argine stesso utilizzati nelle verifiche.

Strato e livelli	Litologia dello strato	Angolo di attrito interno [°]	Resistenza al taglio non drenata [kPa]	Coesione efficace [kPa]	Peso specifico [kN/m³]
<b>Nuovo Argine</b> Da 21,5 a 18,75 m.s.l.m.	Argille Limose	18	38	30	19,65
<b>T1+T2</b> 18,75 a 8,75 m.s.l.m.	Argille limose che degradano a limi argillosi	18	54	19	18,45

Il metodo di analisi di equilibrio limite con superficie di rottura ipotizzata e circolare è quello di Bishop.

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

I programmi di calcolo utilizzati sono SLOPE 2012 e SEEP 2012 della software GEOSLOPE con sede a Calgary, Alberta, Canada di cui si è in possesso di regolare licenza.

I programmi sono stati utilizzati in modo intrinseco: SEEP è servito a modellare l'andamento della falda mentre SLOPE a verificare la stabilità degli argini.

Per quanto riguarda le tabelle dei risultati delle verifiche, è bene specificare che:

- **Presenza di falda freatica**  
La falda è stata posta a piano campagna.
- **Quota invaso in cassa**
  - 20,00 mslm - quota dell'invaso a fini irrigui indicativamente presente da Ottobre ad Aprile;
  - 20,80 mslm - quota di massimo invaso della cassa per laminazione delle piene.
- **Svaso della cassa di espansione**  
lo svuotamento della cassa avviene circa nell'arco di 2 giorni.
- **Carichi dovuto al passaggio di mezzi di manutenzione**  
in tutte le verifiche svolte, eccetto per quelle sottoposte ad azione sismica, è presente un carico variabile dovuto al passaggio di mezzi pari a 20 KN/m<sup>2</sup> posto sulla sommità arginale.
- **Azione sismica:**  
ai fini dell'analisi in condizioni sismiche, il corpo arginale è stato classificato in Classe d'Uso III e con Vita Nominale pari a 100 anni.  
Il parametro  $K_h$ , calcolato ai sensi del § 7.11.3.5.2 delle NTC 2018 è risultato pari a 0,1.  
Vengono condotte analisi post sismiche utilizzando la  $C_{U \text{ post-sisma}}$  calcolata in precedenza e riportata qui sotto:

Strato	Resistenza al taglio non drenata [kPa]	Resistenza al taglio non drenata post Sisma [kPa]
Nuovo Argine	38	33,4
T1+T2	54	47,5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

### 6.3 NUOVO ARGINE NORD

Il rilevato di progetto verrà a collocarsi parallelo alla ferrovia Reggio-Guastalla e con il ciglio inferiore lato Nord a 5 m. dal ciglio superiore del Dugale della Vittoria.

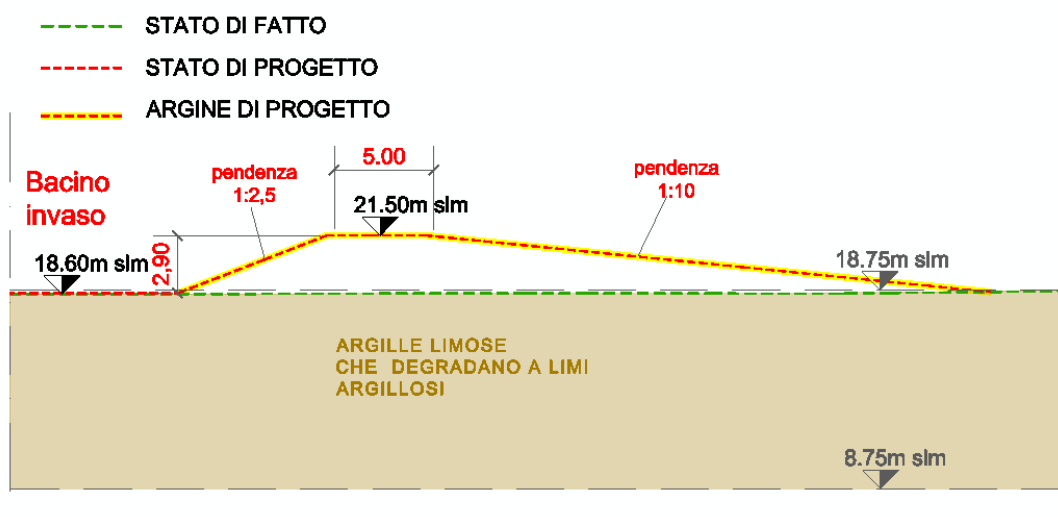
Nello specifico la sezione tipo interessata dal calcolo è quella indicata nella sezione in figura (lato bacino di invaso) che rappresenta una sezione dove è massima l'altezza del rilevato rispetto al piano di campagna di appoggio.

La scarpata lato cassa (interna), oggetto delle successive verifiche, ha pendenza 1:2,5.

La scarpata lato Ferrovia (esterna) ha pendenza 1:10.

La sommità arginale è larga 5 m.

#### ARGINE NORD est

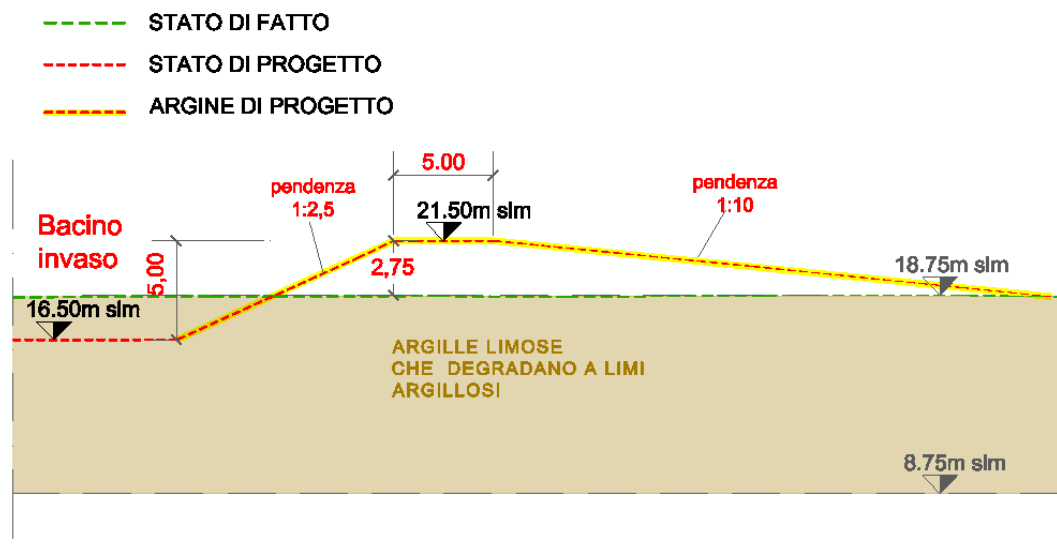


## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## ARGINE NORD ovest



## Verifiche

Con riferimento alle condizioni descritte al §4, nella tabella sottostante, sono riportate le differenti verifiche svolte ed i fattori di sicurezza:



## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

CONDIZIONE	QUOTA FALDA/INVASO	SISMA	DRENATE	NON DRENATE	Riduzione PARMATRI GEOTECNICI	SVASO	Metodo di BISHOP FS MINIMO
<b>1</b>	Falda a p.c.		V				<b>1,48</b>
<b>2</b>	Falda a p.c.			V	V		<b>1,21</b>
<b>3</b>	Falda a p.c.			V			<b>1,37</b>
<b>4</b>	Falda a p.c.	V	V				<b>1,49</b>
<b>5</b>	Falda a p.c.	V		V			<b>1,71</b>
<b>6</b>	Invaso a 20 m.s.l.m.		V				<b>1,66</b>
<b>7</b>	Invaso a 20 m.s.l.m.			V	V		<b>1,26</b>
<b>8</b>	Invaso a 20 m.s.l.m.			V			<b>1,42</b>
<b>9</b>	Invaso a 20 m.s.l.m.	V	V				<b>1,81</b>
<b>10</b>	Invaso a 20 m.s.l.m.	V		V			<b>2,29</b>
<b>11</b>	Invaso a 20,8 m.s.l.m.		V			V	<b>1,24</b>
<b>12</b>	Invaso a 20,8 m.s.l.m.			V	V	V	<b>1,22</b>
<b>13</b>	Invaso a 20,8 m.s.l.m.			V		V	<b>1,37</b>
<b>14</b>	Invaso a 20,8 m.s.l.m.	V	V			V	<b>1,39</b>
<b>15</b>	Invaso a 20,8 m.s.l.m.	V		V		V	<b>1,71</b>

Essendo il coefficiente di sicurezza  $\gamma R2$  pari a **1,10** in condizioni statiche e **1,20** in condizioni simiche, la verifica di sicurezza è soddisfatta per tutte le combinazioni.

Come si evince dal grafico sottostante, il F.S. aumenta gradualmente nelle settimane successive fino a tornare in zona di sicurezza.

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

#### 6.4 NUOVO ARGINE EST

Il corpo arginale di progetto verrà a collocarsi parallelo a Strada della Vittoria.

Nello specifico la sezione tipo interessata dal calcolo è quella indicata nella sezione in figura che rappresenta una sezione dove è massima l'altezza del rilevato rispetto al piano di campagna di appoggio.

La scarpata lato cassa (o interna), oggetto delle successive verifiche, ha pendenza 1:2,5; medesima è la scarpata lato strada (o esterna).

La sommità arginale è larga 5m.



## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## Verifiche

Con riferimento alle condizioni descritte al §4. nella tabella sottostante sono riportate le differenti verifiche svolte ed i fattori di sicurezza:

CONDIZIONE	QUOTA FALDA/INVASO	SISMA	DRENATE	NON DRENATE	Riduzione PARMATRI GEOTECNICI	SVASO	Metodo di BISHOP FS MINIMO
<b>1</b>	Falda a p.c.		V				<b>1,61</b>
<b>2</b>	Falda a p.c.			V	V		<b>1,33</b>
<b>3</b>	Falda a p.c.			V			<b>1,61</b>
<b>4</b>	Falda a p.c.	V	V				<b>2,06</b>
<b>5</b>	Falda a p.c.	V		V			<b>2,7</b>
<b>6</b>	Invaso a 20 m.s.l.m.		V				<b>1,73</b>
<b>7</b>	Invaso a 20 m.s.l.m.			V	V		<b>1,34</b>
<b>8</b>	Invaso a 20 m.s.l.m.			V			<b>1,62</b>
<b>9</b>	Invaso a 20 m.s.l.m.	V	V				<b>2,39</b>
<b>10</b>	Invaso a 20 m.s.l.m.	V		V			<b>3,18</b>
<b>11</b>	Invaso a 20,8 m.s.l.m.		V			V	<b>1,50</b>
<b>12</b>	Invaso a 20,8 m.s.l.m.			V	V	V	<b>1,35</b>
<b>13</b>	Invaso a 20,8 m.s.l.m.			V		V	<b>1,52</b>
<b>14</b>	Invaso a 20,8 m.s.l.m.	V		V		V	<b>2,70</b>
<b>15</b>	Invaso a 20,8 m.s.l.m.	V		V		V	<b>4,10</b>

Essendo il coefficiente di sicurezza  $\gamma_{R2}$  pari a **1,10** in condizioni statiche e **1,20** in condizioni simiche, la verifica di sicurezza è soddisfatta per tutte le combinazioni.

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

### 6.5 RINGROSSO ARGINALE OVEST della cassa (Cavo Bondeno)

Il rilevato di progetto è relativo alla risagomatura dell'argine esistente del Cavo Bondeno (lato cassa).

Nello specifico la sezione tipo interessata dal calcolo è quella indicata nella sezione in figura che rappresenta una sezione dove è massima l'altezza del rilevato rispetto al piano di campagna di appoggio.

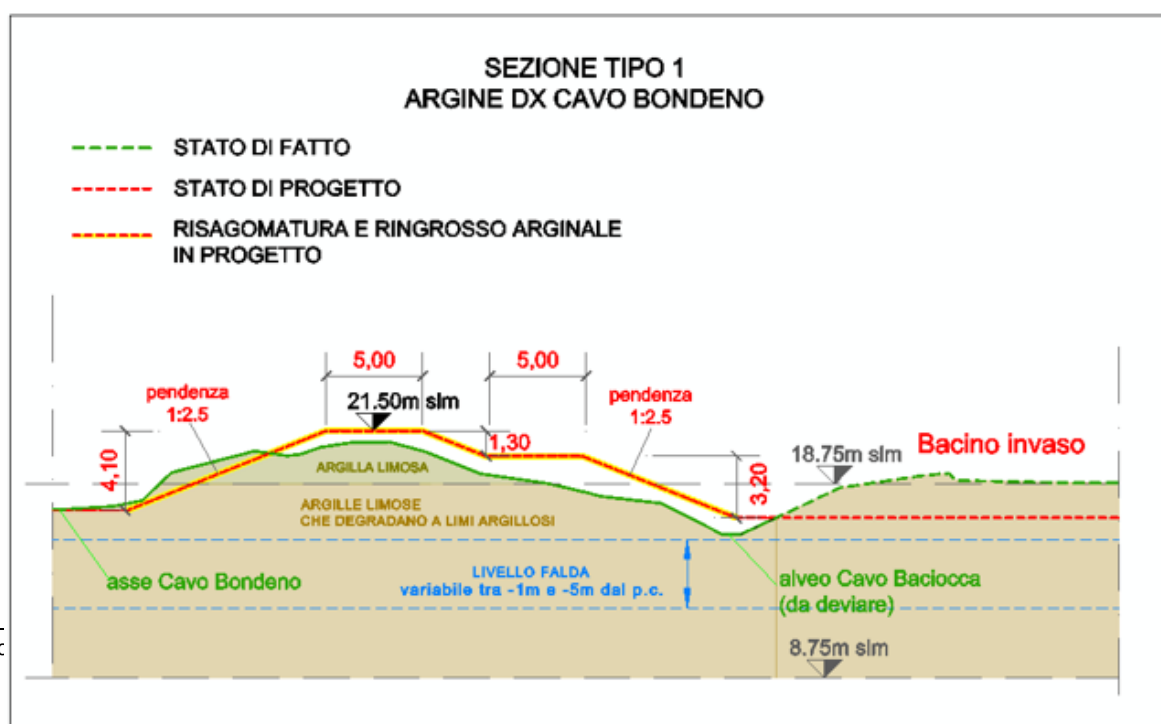
Oggetto delle successive verifiche sono:

- la scarpata lato cassa avente pendenza 1:2,5 e dotata di sottobanca (le combinazioni indicate nella tabella successiva con "sottobanca")
- la scarpata lato Cavo Bondeno avente pendenza 1:2,5.

La sommità arginale e la sottobanca sono larghe 5 m.



Visuale Nord-Sud dell'argine in destra idraulica del Cavo Bondeno (sulla sinistra), dell'attuale Cavo Baciocca (al centro) e del futuro areale di cassa (sulla destra)



PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

---

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## Verifiche

CONDIZIONE	QUOTA FALDA/INVASO	SISMA	DRENATE	NON DRENATE	Riduzione PARMATRI GEOTECNICI	SVASO	Metodo di BISHOP FS MINIMO
1	Falda a p.c.		V				1,55
2	Falda a p.c.		V		V		1,23
3 SOTTOBANCA	Falda a p.c.		V				1,54
4 SOTTOBANCA	Falda a p.c.		V		V		1,30
5	Falda a p.c.			V			1,38
6 SOTTOBANCA	Falda a p.c.			V			1,46
7	Falda a p.c.	V	V				1,64
8 SOTTOBANCA	Falda a p.c.	V	V				1,75
9	Falda a p.c.	V		V			1,92
10 SOTTOBANCA	Falda a p.c.	V		V			2,25
11	Invaso a 20 m.s.l.m.		V				1,86
12	Invaso a 20 m.s.l.m.		V		V		1,36
13 SOTTOBANCA	Invaso a 20 m.s.l.m.		V				1,42
14 SOTTOBANCA	Invaso a 20 m.s.l.m.		V		V		1,30
15	Invaso a 20 m.s.l.m.			V			1,53
16 SOTTOBANCA	Invaso a 20 m.s.l.m.			V			1,46
17	Invaso a 20 m.s.l.m.	V	V				2,11
18 SOTTOBANCA	Invaso a 20 m.s.l.m.	V	V				1,63
19	Invaso a 20 m.s.l.m.	V		V			2,68
20 SOTTOBANCA	Invaso a 20 m.s.l.m.	V		V			2,25
21	Invaso a 20,8 m.s.l.m.		V			V	1,42
22	Invaso a 20,8 m.s.l.m.		V		V	V	1,23
23 SOTTOBANCA	Invaso a 20,8 m.s.l.m.		V			V	1,43
24 SOTTOBANCA	Invaso a 20,8 m.s.l.m.		V		V	V	1,23
25	Invaso a 20,8 m.s.l.m.			V		V	1,43
26 SOTTOBANCA	Invaso a 20,8 m.s.l.m.			V		V	1,46
27	Invaso a 20,8 m.s.l.m.	V	V			V	1,46
28 SOTTOBANCA	Invaso a 20,8 m.s.l.m.	V	V			V	1,63
29	Invaso a 20,8 m.s.l.m.	V		V		V	1,95
30 SOTTOBANCA	Invaso a 20,8 m.s.l.m.	V		V		V	2,25

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

Essendo il coefficiente di sicurezza  $\gamma_{R2}$  pari a 1,10 in condizioni statiche e 1,20 in condizioni simiche, la verifica di sicurezza è soddisfatta per tutte le combinazioni.

\*\*\*

**6.6 ARGINE SUD della cassa (regolarizzazione argine Allacciante Cartoccio)**

Il rilevato è costituito dall'argine dell'Allacciante Cartoccio (Lato Cassa), che subirà un intervento minore di rinterro e addolcimento del versante arginale lato cassa.

Nello specifico la sezione tipo interessata dal calcolo è quella indicata nella sezione in figura che rappresenta una sezione dove è massima l'altezza del rilevato rispetto al piano di campagna di appoggio.

La scarpata lato Cassa (interna), oggetto delle successive verifiche, ha pendenza 1:2.5.

La sommità arginale di progetto è larga circa 7 m.



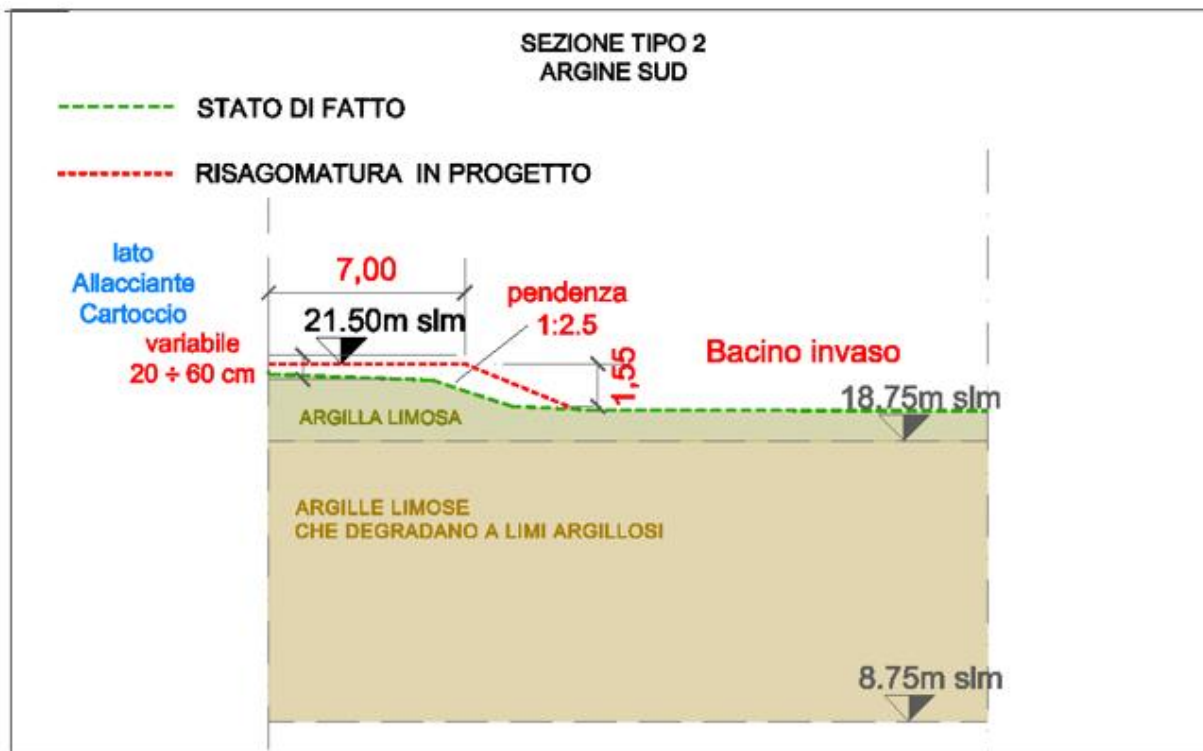
*Visuale Est-Ovest dell'attuale argine dell'Allacciante Cartoccio*



## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)



CONDIZIONE	QUOTA FALDA/INVASO	SISMA	DRENATE	NON DRENATE	Riduzione PARMATRI GEOTECNICI	SVASO	Metodo di BISHOP FS MINIMO
1	Falda a p.c.		V				1,64
2	Falda a p.c.			V	V		1,57
3	Falda a p.c.			V			1,77
4	Falda a p.c.	V	V				2,63
5	Falda a p.c.	V		V			3,75
6	Invaso a 20,8 m.s.l.m.		V			V	1,58
7	Invaso a 20,8 m.s.l.m.			V	V	V	1,57
8	Invaso a 20,8 m.s.l.m.			V		V	1,77
9	Invaso a 20,8 m.s.l.m.	V	V			V	2,54
10	Invaso a 20,8 m.s.l.m.	V		V		V	3,75

PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

---

Essendo il coefficiente di sicurezza  $\gamma_{R2}$  pari a 1,10 in condizioni statiche e 1,20 in condizioni sismiche, la verifica di sicurezza è soddisfatta per tutte le combinazioni.

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## 6.7 SLU e SLV - VERIFICA GEO al carico limite dei rilevati in terra

### PREMESSA

Il rapporto fra il carico limite in fondazione e la componente normale della risultante dei carichi trasmessi sul terreno di fondazione deve essere superiore a  $\eta_q$  detto *fattore di sicurezza* pari 2,3.

Cioè, detto  $P_d$ , il carico limite e  $V_d$  la risultante verticale dei carichi in fondazione, deve essere:

$$P_d/V_d \geq \eta_q$$

Le espressioni di Brinch-Hansen per il calcolo della capacità portante si differenziano a seconda se siamo in presenza di un terreno puramente coesivo ( $\phi=0$ ) o meno e si esprimono nel modo seguente:

Caso generale:

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

Caso di terreno puramente coesivo  $\phi=0$

$$q_u = C_u N_c s_c d_c i_c b_c g_c + q$$

in cui  $d_c, d_q, d_\gamma$ , sono i fattori di profondità;  $s_c, s_q, s_\gamma$ , sono i fattori di forma;  $i_c, i_q, i_\gamma$ , sono i fattori di inclinazione del carico;  $b_c, b_q, b_\gamma$ , sono i fattori di inclinazione del piano di posa;  $g_c, g_q, g_\gamma$ , sono i fattori che tengono conto del fatto che la fondazione poggia su un terreno in pendenza.

### Verifiche SLU e SLV

Di seguito vengono riportati i risultati delle analisi, svolte utilizzando il programma di calcolo CARL 14 della software AZTEC INFORMATICA con sede a Casali del Manco in provincia di Cosenza, di cui si è in possesso di regolare licenza.

Le analisi sono state svolte in condizioni drenate ovvero a regime.

La verifica al collasso struttura arginale-terreno di fondazione è stata condotta secondo l'approccio 1, combinazione 2 (A2+M2+R2) - § 6.8.2.

### Argine NORD

Dato il modello geotecnico del terreno ed i dati della fondazione (base arginale) di progetto:

Cmb	Fnd	B' [m]	L' [m]	I <sub>RC</sub>
1-SLU	1	46,50	1,00	80.51
2-SLV	1	46,50	1,00	80.51

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

dove:

*Cmb* Indice della combinazione*Fnd* Indice della fondazione*B'* Base ridotta per effetto dell'eccentricità del carico ( $B'=B-2e_x$ ), espressa in [m]*L'* Lunghezza ridotta per effetto dell'eccentricità del carico ( $L'=L-2e_y$ ), espressa in [m]*I<sub>RC</sub>* Indice di rigidezza critico dato da

$$I_{r,crit} = \frac{1}{2} \exp \left[ \left( 3.3 - 0.45 \frac{B}{L} \right) \cot \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2} \right) \right]$$

si sono ottenuti i seguenti fattori di sicurezza  $\eta$  tutti maggiori di  $R2= 1,1$  (condizioni statiche) e 1,2 (condizioni sismiche):

Cmb	Fnd	PF	$q_u$ [kPa]	$q_d$ [kPa]	$P_u$ [kN]	$P_d$ [kN]	V [kN]	$\eta$
1-SLU	1	SI	613	266	28495,79	12389,47	3288,92	3.77
2-SLV	1	SI	506	220	23540,61	10235,05	2529,94	4.05

dove:

*Cmb* Indice della combinazione*Fnd* Indice della fondazione*PF* Rottura per punzonamento in presenza di falda*q<sub>u</sub>* Portanza ultima, espressa in [kPa]*q<sub>d</sub>* Portanza di progetto, espressa in [kPa]*P<sub>u</sub>* Portanza ultima, espressa in [kN]*P<sub>d</sub>* Portanza di progetto, espressa in [kN]*V* Carico ortogonale al piano di posa, espresso in [kN]

$\eta$  Fattore di sicurezza a carico limite ( $\eta=P_d/V$ ) che deve essere maggiore di  $R2 = 1,1$  in condizioni statiche e 1,2 per le condizioni sismiche

\*\*\*

**Argine EST**

Date le seguenti caratteristiche del terreno e della fondazione di progetto:

Cmb	Fnd	<i>B'</i> [m]	<i>L'</i> [m]	<i>I<sub>RC</sub></i>
1-SLU	1	18,50	1,00	46.94
2-SLV	1	18,50	1,00	46.94

Si sono ottenuti i seguenti fattori di sicurezza  $\eta$  tutti maggiori di  $R2= 1,1$  (condizioni statiche) e 1,2 (condizioni sismiche):

Cmb	Fnd	PF	$q_u$ [kPa]	$q_d$ [kPa]	$P_u$ [kN]	$P_d$ [kN]	V [kN]	$\eta$
1-SLU	1	SI	345	150	6388,85	2777,76	825,42	3.37

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

2-SLV	1	SI	292	127	5398,70	2347,26	634,94	3.70
-------	---	----	-----	-----	---------	---------	--------	------

Dove:

<i>Cmb</i>	<i>Indice della combinazione</i>
<i>Fnd</i>	<i>Indice della fondazione</i>
<i>PF</i>	<i>Rottura per punzonamento in presenza di falda</i>
<i>q<sub>u</sub></i>	<i>Portanza ultima, espressa in [kPa]</i>
<i>q<sub>d</sub></i>	<i>Portanza di progetto, espressa in [kPa]</i>
<i>P<sub>u</sub></i>	<i>Portanza ultima, espressa in [kN]</i>
<i>P<sub>d</sub></i>	<i>Portanza di progetto, espressa in [kN]</i>
<i>V</i>	<i>Carico ortogonale al piano di posa, espresso in [kN]</i>
<i>η</i>	<i>Fattore di sicurezza a carico limite (<math>\eta=P_d/V</math>)</i>

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## 6.8 VERIFICA AL SIFONAMENTO (HYD)

Ai sensi del § 6.2.4.2 delle NTC 2018, Le opere geotecniche devono essere verificate nei confronti dei possibili stati limite di sollevamento o di sifonamento.

A tal fine, nella valutazione delle pressioni interstiziali e delle quote piezometriche caratteristiche, si devono assumere le condizioni più sfavorevoli, considerando i possibili effetti delle condizioni stratigrafiche.

Per quanto riguarda le verifiche al sifonamento, in condizioni di flusso prevalentemente verticale:

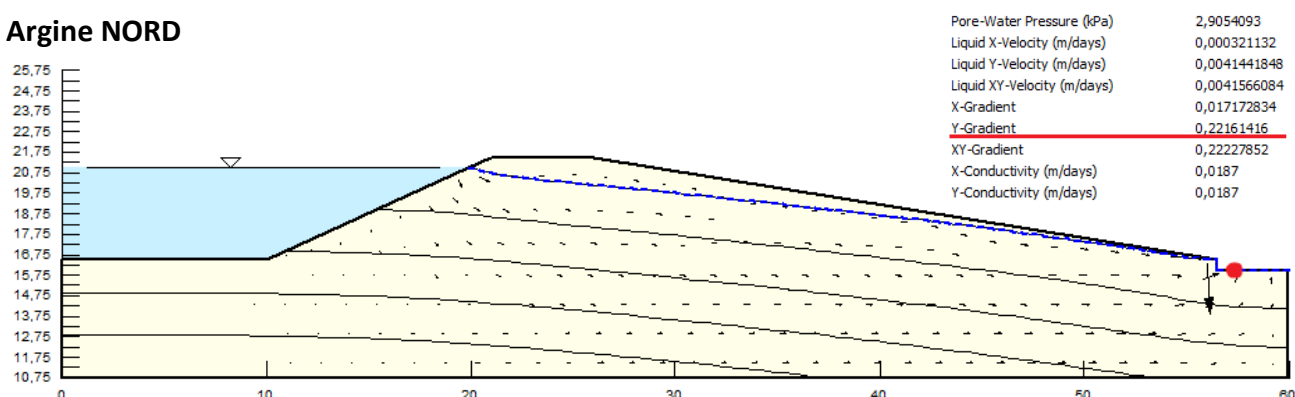
1. nel caso di frontiera di efflusso libera, la verifica a sifonamento si esegue controllando che il gradiente idraulico risulti non superiore al gradiente idraulico critico  $i_c$  diviso per un coefficiente parziale  $\gamma_R = 3$ , se si assume come effetto delle azioni il gradiente idraulico medio, e per un coefficiente parziale  $\gamma_R = 2$  nel caso in cui si consideri il gradiente idraulico di efflusso;
2. in presenza di un carico imposto sulla frontiera di efflusso, la verifica si esegue controllando che la pressione interstiziale in eccesso rispetto alla condizione idrostatica risulti non superiore alla tensione verticale efficace calcolata in assenza di filtrazione, divisa per un coefficiente parziale  $\gamma_R = 2$ .

Ai fini della verifica è stato calcolato il gradiente idraulico di efflusso in una situazione di frontiera di efflusso libera ( $\gamma_R = 2$ ).

Il programma di calcolo utilizzato è SEEP 2012 della software GEOSLOPE con sede a Calgary, Alberta, Canada di cui si è in possesso di regolare licenza.

Le misure sono state effettuate direttamente al piede della scarpata arginale (si veda il punto rosso nelle figure successive), dove il gradiente risulta maggiore e considerando il livello di invaso massimo di 20,8m.s.l.m. , sia per la cassa (lati NORD, EST) che per il Cavo Bondeno (lato OVEST).

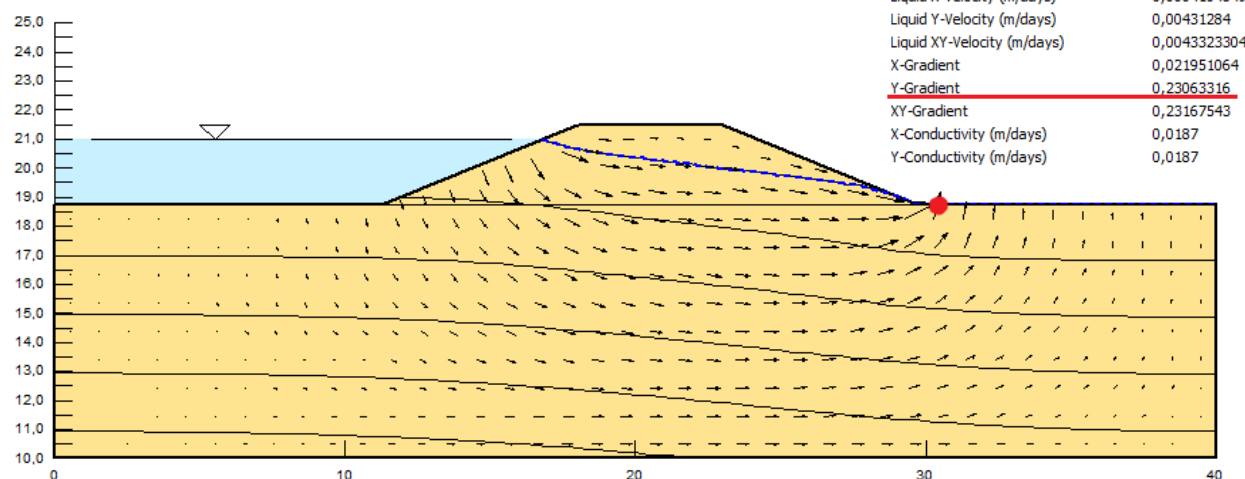
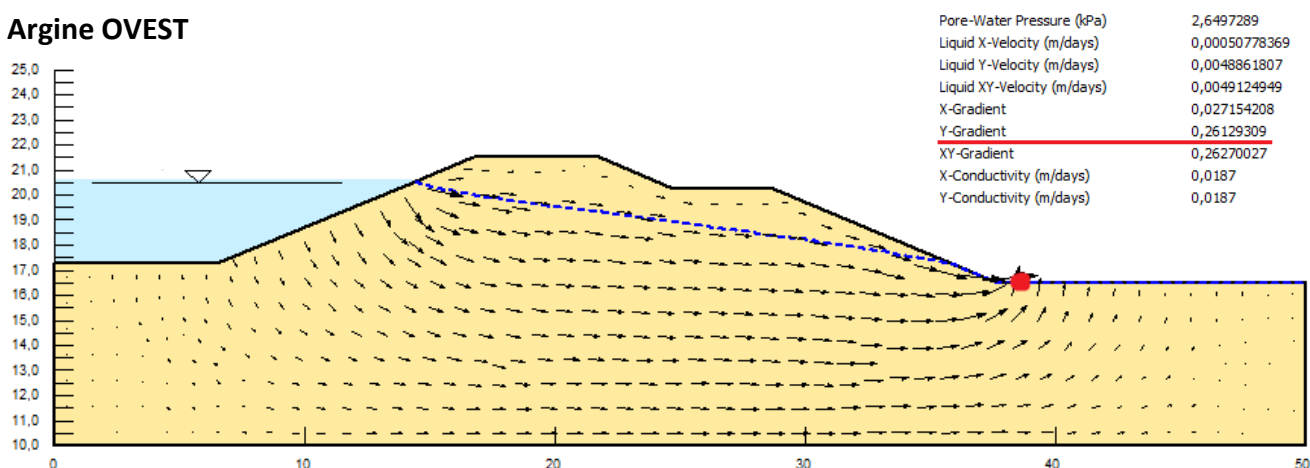
### Argine NORD



## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

**Argine EST****Argine OVEST**

L'argine SUD non è stato preso in esame in quanto non sono presenti dati storici che riportino fenomeni legati al sifonamento ed è da ritenersi quindi stabile.

Nella tabella seguente è indicato l'esito delle verifiche:

Argine	$I_c$	$I_c/2$	$I_e$	Esito verifica
NORD	1,9	0,8	0,22	VERIFICATO
EST	1,9	0,8	0,23	VERIFICATO
OVEST	1,9	0,8	0,26	VERIFICATO

Dove

$I_c$  Gradiente idraulico critico, che corrisponde a:  $I_c = \gamma' / \gamma_w$  ( $\gamma' = 19 \text{ KN/m}^3$ ,  $\gamma_w = 10 \text{ KN/m}^3$ )

$I_e$  Gradiente idraulico di efflusso

**Esito verifica** verificato secondo:  $I_e \leq I_c / 2$



## **7 VERIFICHE SLE e SLO**

**delle opere in c.a. e in terra**

**1. CHIAVICA DI INVASO**

**2. CHIAVICA DI SVASO**

**3. MANUFATTO DI SCARICO**

**4. NUOVO RILEVATO ARGINALE (Nord, Est)**

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## 7.1 VERIFICA DEI CEDIMENTI (SLE)

### CEDIMENTI DELLE OPERE IN CEMENTO ARMATO

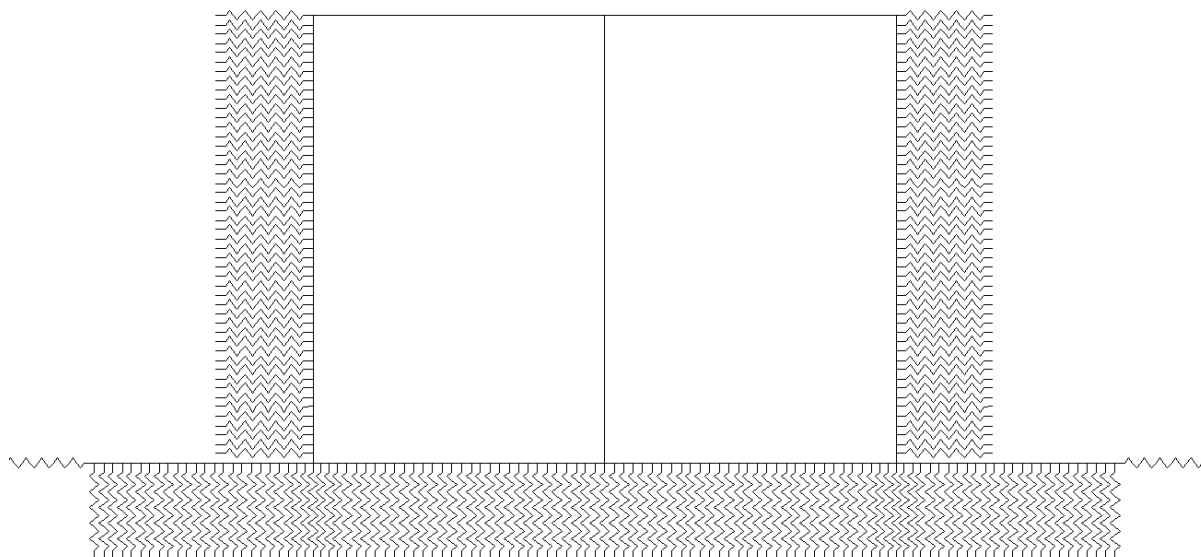
#### Cedimenti fondazione: modello di Winkler

Per simulare il comportamento del terreno di fondazione ed il terreno di rinfiango vengono inserite delle molle alla Winkler non reagenti a trazione.

L'area delle molle è proporzionale alla costante di Winkler del terreno di base (per le molle in fondazione) e del terreno di rinfiango (per le molle sui piedritti).

L'analisi così condotta fornisce i risultati in termini di spostamenti.

Dagli spostamenti si risale alle sollecitazioni nodali ed alle pressioni sul terreno.



*Schema strutturale della chiavica di invaso secondo il modello di Winkler*

Di seguito vengono riportati i risultati delle analisi, svolte utilizzando il programma di calcolo SCAT 14 della software AZTEC INFORMATICA con sede a Casali del Manco in provincia di Cosenza, di cui si è in possesso di regolare licenza.

PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

---

Le analisi sono state condotte in condizioni drenate.

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

**7.1.1 Chiavica di invaso**Inviluppo spostamenti fondazione

X [m]	u <sub>xmin</sub> [cm]	u <sub>xmax</sub> [cm]	u <sub>ymin</sub> [cm]	u <sub>ymax</sub> [cm]
0,00	-0,1652	0,1669	0,2531	0,5988
2,50	-0,1654	0,1668	0,2263	0,5750
5,10	-0,1673	0,1653	0,2121	0,5036
7,60	-0,1688	0,1636	0,2275	0,4430
10,10	-0,1689	0,1632	0,2547	0,4820

Inviluppo spostamenti traverso

X [m]	u <sub>xmin</sub> [cm]	u <sub>xmax</sub> [cm]	u <sub>ymin</sub> [cm]	u <sub>ymax</sub> [cm]
2,25	-0,1602	0,1657	0,2285	0,5896
3,68	-0,1608	0,1653	0,2176	0,5665
5,13	-0,1614	0,1648	0,2139	0,5135
6,60	-0,1618	0,1642	0,2182	0,4695
7,95	-0,1622	0,1636	0,2304	0,4446

Inviluppo spostamenti piedritto sinistro

Y [m]	u <sub>xmin</sub> [cm]	u <sub>xmax</sub> [cm]	u <sub>ymin</sub> [cm]	u <sub>ymax</sub> [cm]
0,25	-0,1653	0,1670	0,2275	0,5819
2,55	-0,1451	0,1762	0,2282	0,5860
4,85	-0,1602	0,1657	0,2285	0,5896

Inviluppo spostamenti piedritto centrale

Y [m]	u <sub>xmin</sub> [cm]	u <sub>xmax</sub> [cm]	u <sub>ymin</sub> [cm]	u <sub>ymax</sub> [cm]
0,25	-0,1674	0,1652	0,2124	0,5013
2,55	-0,1666	0,1689	0,2134	0,5054

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

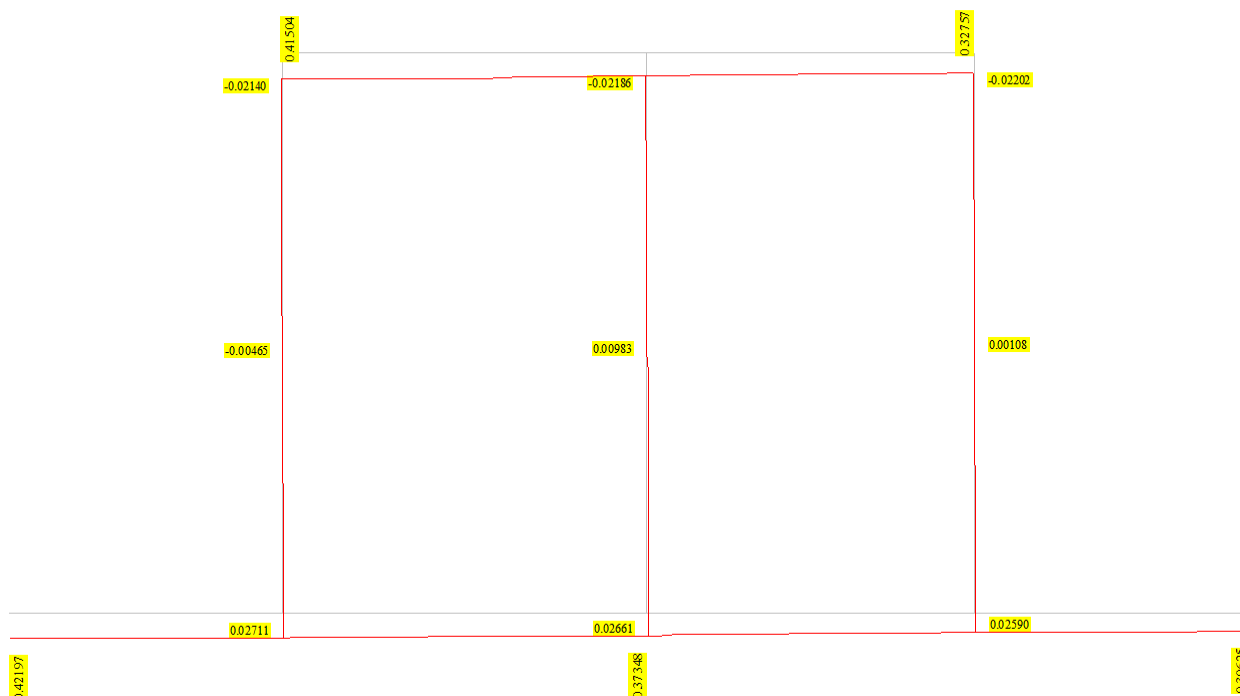
Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

4,85	-0,1614	0,1648	0,2141	0,5090
------	---------	--------	--------	--------

Inviluppo spostamenti piedritto destro

Y [m]	u <sub>Xmin</sub> [cm]	u <sub>Xmax</sub> [cm]	u <sub>Ymin</sub> [cm]	u <sub>Ymax</sub> [cm]
0,25	-0,1690	0,1633	0,2295	0,4435
2,55	-0,1767	0,1449	0,2301	0,4443
4,85	-0,1622	0,1636	0,2304	0,4446

*Deformazioni massime assolute nella combinazione rara (n.17)*

Per maggiore sicurezza sono inoltre stati calcolati i cedimenti a lungo termine della fondazione utilizzando il metodo edometrico e nel caso specifico tali cedimenti ammontano a **9,2 cm**.

Sia a breve che a lungo termine i cedimenti sono compatibili con le prestazioni richieste dalla struttura in riferimento alle sue esigenze statiche e funzionali.

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## 7.1.2 Chiavica di svaso

Inviluppo spostamenti fondazione

X [m]	u <sub>xmin</sub> [cm]	u <sub>xmax</sub> [cm]	u <sub>ymin</sub> [cm]	u <sub>ymax</sub> [cm]
0,25	-0,1957	0,2021	0,1950	0,8690
1,78	-0,1974	0,2006	0,2024	0,7139
3,25	-0,1991	0,1991	0,2019	0,6026
4,72	-0,2006	0,1974	0,2024	0,5145
6,17	-0,2021	0,1957	0,1950	0,4510

Inviluppo spostamenti traverso

X [m]	u <sub>xmin</sub> [cm]	u <sub>xmax</sub> [cm]	u <sub>ymin</sub> [cm]	u <sub>ymax</sub> [cm]
0,25	-0,2241	0,2284	0,1980	0,8787
1,80	-0,2253	0,2274	0,1942	0,7555
3,25	-0,2265	0,2265	0,2013	0,6134
4,85	-0,2275	0,2252	0,1934	0,5056
6,25	-0,2284	0,2241	0,1980	0,4539

Inviluppo spostamenti piedritto sinistro

Y [m]	u <sub>xmin</sub> [cm]	u <sub>xmax</sub> [cm]	u <sub>ymin</sub> [cm]	u <sub>ymax</sub> [cm]
0,25	-0,1957	0,2021	0,1950	0,8690
3,25	-0,1340	0,2862	0,1968	0,8743
6,25	-0,2241	0,2284	0,1980	0,8787

Inviluppo spostamenti piedritto centrale

Y [m]	u <sub>xmin</sub> [cm]	u <sub>xmax</sub> [cm]	u <sub>ymin</sub> [cm]	u <sub>ymax</sub> [cm]
-------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

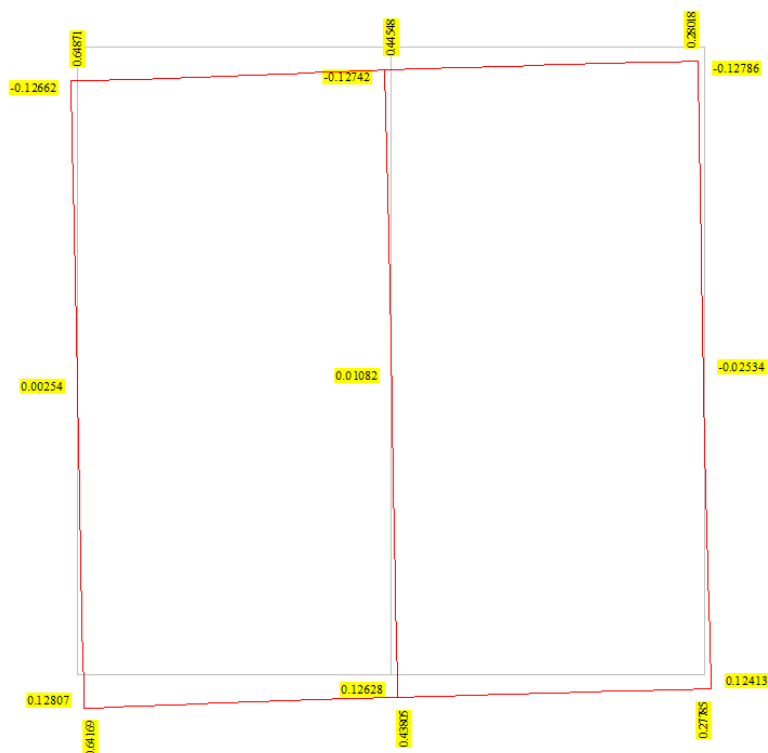
Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

0,25	-0,1991	0,1991	0,2019	0,6026
3,25	-0,2194	0,2194	0,2019	0,6084
6,25	-0,2265	0,2265	0,2013	0,6134

Inviluppo spostamenti piedritto destro

Y [m]	u <sub>Xmin</sub> [cm]	u <sub>Xmax</sub> [cm]	u <sub>Ymin</sub> [cm]	u <sub>Ymax</sub> [cm]
0,25	-0,2021	0,1957	0,1950	0,4510
3,25	-0,2862	0,1340	0,1968	0,4529
6,25	-0,2284	0,2241	0,1980	0,4539



Deformazioni massime assolute nella combinazione rara (n.17)

Per maggiore sicurezza sono inoltre stati calcolati i cedimenti a lungo termine della fondazione utilizzando il metodo edometrico e nel caso specifico tali cedimenti ammontano a **5,7 cm**.

PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

---

Sia a breve che a lungo termine i cedimenti sono compatibili con le prestazioni richieste dalla struttura in riferimento alle sue esigenze statiche e funzionali.



## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

**7.1.3 Manufatto di scarico**Inviluppo spostamenti fondazione

<b>X [m]</b>	<b>u<sub>Xmin</sub> [cm]</b>	<b>u<sub>Xmax</sub> [cm]</b>	<b>u<sub>Ymin</sub> [cm]</b>	<b>u<sub>Ymax</sub> [cm]</b>
0,00	-0,0847	0,0855	0,2359	0,7903
1,25	-0,0848	0,0855	0,2325	0,7078
2,50	-0,0851	0,0851	0,2292	0,6097
3,75	-0,0855	0,0848	0,2325	0,6287
4,91	-0,0855	0,0847	0,2359	0,6507

Inviluppo spostamenti traverso

<b>X [m]</b>	<b>u<sub>Xmin</sub> [cm]</b>	<b>u<sub>Xmax</sub> [cm]</b>	<b>u<sub>Ymin</sub> [cm]</b>	<b>u<sub>Ymax</sub> [cm]</b>
1,05	-0,0818	0,0823	0,2336	0,7301
1,78	-0,0819	0,0822	0,2335	0,7160
2,50	-0,0821	0,0821	0,2341	0,6903
3,26	-0,0822	0,0819	0,2335	0,6715
3,95	-0,0823	0,0818	0,2336	0,6389

Inviluppo spostamenti piedritto sinistro

<b>Y [m]</b>	<b>u<sub>Xmin</sub> [cm]</b>	<b>u<sub>Xmax</sub> [cm]</b>	<b>u<sub>Ymin</sub> [cm]</b>	<b>u<sub>Ymax</sub> [cm]</b>
0,20	-0,0847	0,0855	0,2329	0,7229
1,90	-0,0802	0,0859	0,2334	0,7266
3,60	-0,0818	0,0823	0,2336	0,7301

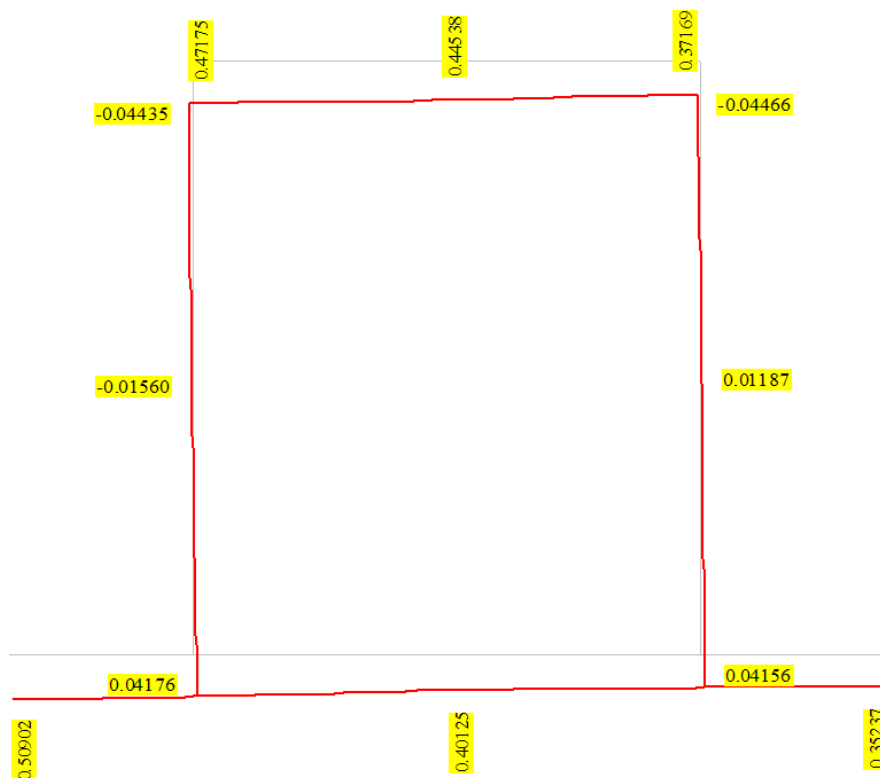
Inviluppo spostamenti piedritto destro

<b>Y [m]</b>	<b>u<sub>Xmin</sub> [cm]</b>	<b>u<sub>Xmax</sub> [cm]</b>	<b>u<sub>Ymin</sub> [cm]</b>	<b>u<sub>Ymax</sub> [cm]</b>
0,20	-0,0855	0,0847	0,2329	0,6334
1,90	-0,0859	0,0802	0,2334	0,6363
3,60	-0,0823	0,0818	0,2336	0,6389

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)



*Deformazioni massime assolute nella combinazione frequente (n.9)*

Per maggiore sicurezza sono inoltre stati calcolati i cedimenti a lungo termine della fondazione utilizzando il metodo edometrico e nel caso specifico tali cedimenti ammontano a **2,6 cm**.

Sia a breve che a lungo termine i cedimenti sono compatibili con le prestazioni richieste dalla struttura in riferimento alle sue esigenze statiche e funzionali.

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## 7.2 CEDIMENTI DEI MANUFATTI IN TERRA

### 7.2.1 Metodo Edometrico

Il metodo edometrico è il classico procedimento per il calcolo dei cedimenti in terreni a grana fina, proposto da Terzaghi negli anni '20.

L'ipotesi edometrica è verificata con approssimazione tanto migliore quanto più ridotto è il valore del rapporto tra lo spessore dello strato compressibile e la dimensione in pianta della fondazione.

Tuttavia, il metodo risulta dotato di ottima approssimazione anche nei casi di strati deformabili di grande spessore.

L'implementazione del metodo è espressa secondo la seguente espressione:

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \sigma_i}{E_{ed,i}} \Delta z_i$$

dove:

$\Delta \sigma_i$  è la tensione indotta nel terreno, alla profondità  $z$ , dalla pressione di contatto della fondazione

$E_{ed}$  è il modulo elastico determinato attraverso la prova edometrica e relativa allo strato  $i$ -esimo

$\Delta z$  rappresenta lo spessore dello strato  $i$ -esimo in cui è stato suddiviso lo strato compressibile e per il quale si conosce il modulo elastico

### 7.2.2 Calcolo delle tensioni indotte con il Metodo di Boussinesq

Il metodo di Boussinesq considera il terreno come un mezzo omogeneo elastico ed isotropo. Dato un carico concentrato  $Q$ , applicato in superficie, la relazione di Boussinesq fornisce la seguente espressione della tensione verticale indotta in un punto  $P(x,y,z)$  posto alla profondità  $z$ :

$$q_v = \frac{3Qz^3}{2\pi R^5}$$

dove:

$$R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$$

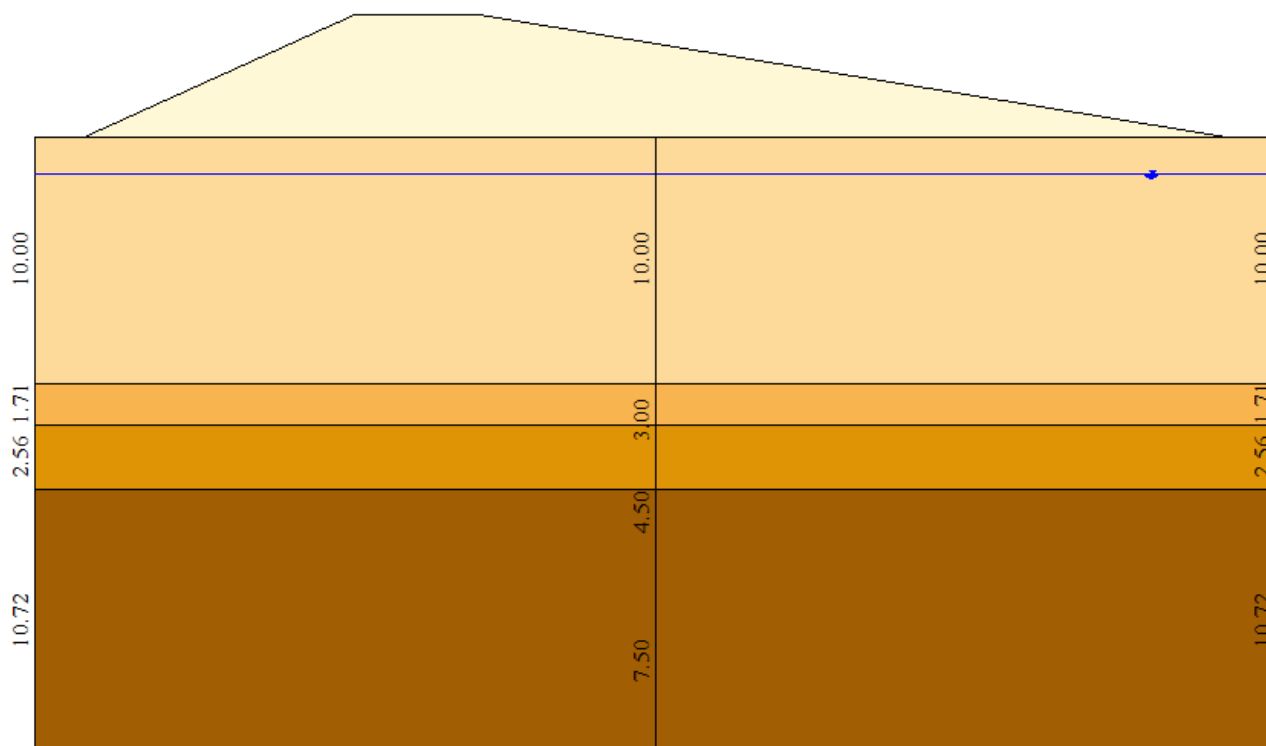
Per ottenere la pressione indotta da un carico distribuito occorre integrare tale espressione su tutta l'area di carico, considerando il carico  $Q$  come un carico infinitesimo agente su una areola  $dA$ . L'integrazione analitica di questa espressione si presenta estremamente complessa specialmente nel caso di carichi distribuiti in modo non uniforme. Pertanto, si ricorre a metodi di soluzione numerica. Dato il carico agente sulla fondazione, si calcola il diagramma delle pressioni indotte sul piano di posa della fondazione. Si divide l'area di carico in un elevato numero di areole rettangolari a ciascuna delle quali compete un carico  $dQ$ : la tensione indotta in un punto  $P(x,y,z)$ , posto alla profondità  $z$ , si otterrà sommando i contributi di tutte le areole di carico calcolati come nella formula di Boussinesq.

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## Argine Nord



Strato terreno	$\Delta H$ [m]	$\Delta w$ [cm]
T1+T2	10,0	15,4
T3	3,0	2,5
T4	4,5	0,4
T5	36,2	2,0
<b>Totale cedimenti</b>	<b>53,7</b>	<b>20,3</b>

Dove:

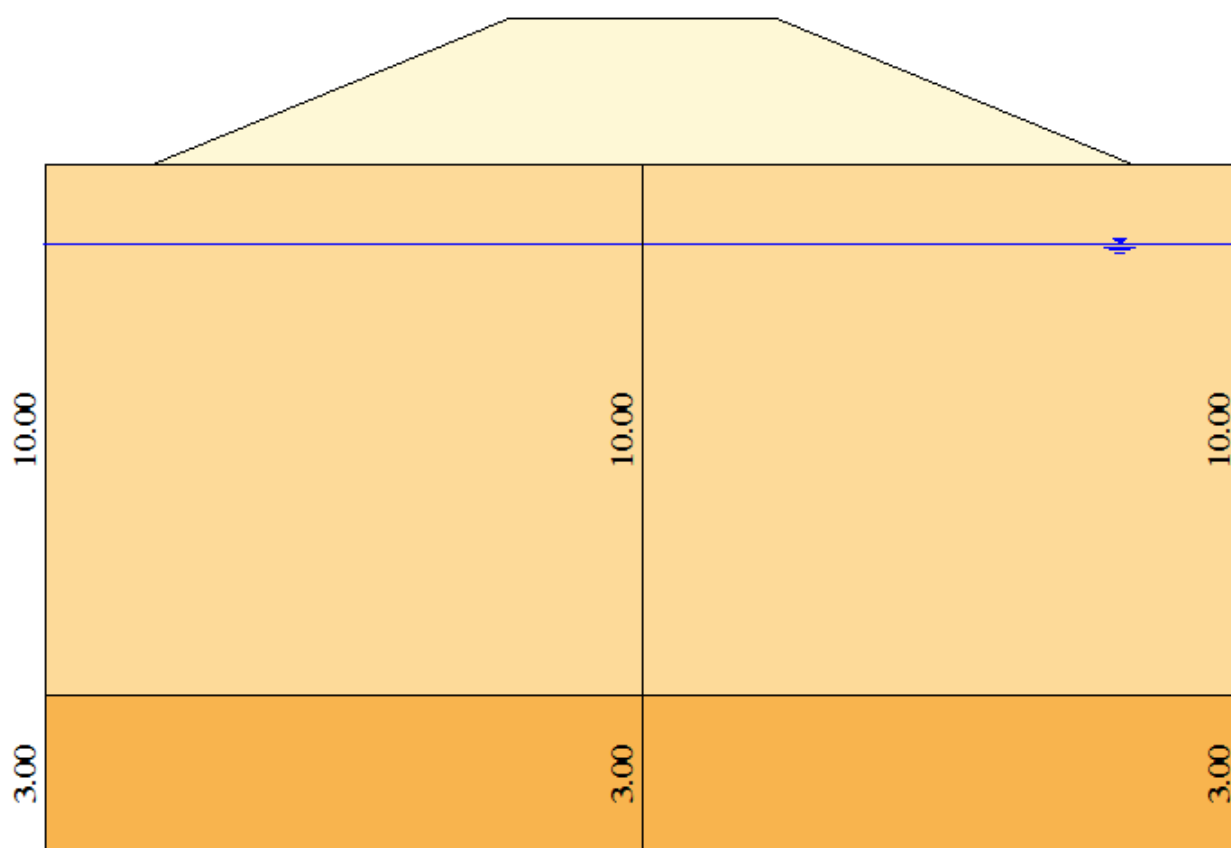
**Terreno** Strato nel modello geotecnico **$\Delta H$**  Spessore dello strato espresso in [m] **$\Delta w$**  Cedimento dello strato espresso in [cm]

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

## Argine Est



Terreno	$\Delta H$ [m]	$\Delta w$ [cm]
T1+T2	10,0	9,5
T3	17,1	4,5
<b>Totale ce</b>	<b>27,1</b>	<b>14,0</b>

Dove:

**Terreno** Strato nel modello geotecnico **$\Delta H$**  Spessore dello strato espresso in [m] **$\Delta w$**  Cedimento dello strato espresso in [cm]

### 7.3 LIQUEFAZIONE

Ai sensi del § 7.11.3.4 delle NTC 2018 il sito presso il quale è ubicato il manufatto deve essere stabile nei confronti della liquefazione, intendendo con tale termine quei fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, sollecitati da azioni cicliche e dinamiche che agiscono in condizioni non drenate.

Se il terreno risulta suscettibile di liquefazione e gli effetti conseguenti appaiono tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorre procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o trasferire il carico a strati di terreno non suscettibili di liquefazione.

#### 7.3.1 Esclusione della verifica a liquefazione

La verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di  $0,1g$ ;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N1)_{60} > 30$  oppure  $qc_{1N} > 180$  dove  $(N1)_{60}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e  $qc_{1N}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Fig. 7.11.1 (a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3,5$  e in Fig. 7.11.1(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c > 3,5$ .

Verificando questi parametri con quelli presenti nell'area di intervento:

1. Accelerazione massima attese al piano campagna uguale a  $0,297g$ ;
2. Profondità media stagionale della falda uguale a 1,5-5 m dal piano campagna;
3. Valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test)  $qc_{1N}$  uguale a 134,52;
4. Non sono disponibili analisi granulometriche sui depositi sabbiosi in loco.

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

Dato che nessuna delle precedenti condizioni risulta soddisfatta e il terreno di fondazione comprende strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda, occorre valutare il coefficiente di sicurezza alla liquefazione (metodi semplificati) alle profondità in cui sono presenti i terreni potenzialmente liquefacibili:

$$FSL = CRR / CSR$$

Dove:

CSR = sforzo di taglio indotto dal terremoto (normalizzato rispetto a  $\sigma'_0$ ) ad una data profondità

CRR = resistenza al taglio ciclica del terreno (normalizzata rispetto a  $\sigma'_0$ ) alla stessa profondità

Nell'areale di intervento della cassa d'espansione, riscontriamo solo nell'area dell'argine NORD e della chiavica emissaria uno strato di sabbie con tetto a quota inferiore ai 15-20 m dal p.c. , profondità oltre la quale possono escludersi fenomeni di liquefazione.

E' stato quindi sottoposto alla verifica di liquefazione uno strato al di sotto del corpo arginale lato Nord di circa 2m di spessore (da 18 m dal p.c. a 19 m dal p.c.).

Di seguito si illustra il metodo di verifica.

\*\*\*

### 7.3.2 Metodi semplificati – fasi della procedura

#### Fase 1: Valutazione di CSR (rapporto di sforzo critico)

L'espressione più diffusa per CSR è la seguente (Seed & Idriss, 1971):

$$CSR = 0,65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v0}{\sigma'_v0} r_d$$

Dove:

$a_{max}$  accelerazione massima in superficie

$\sigma_v0$  tensione litostatica totale

$\sigma'_v0$  tensione litostatica efficace

$r_d$  fattore di profondità, calcolato secondo le formule:  $r_d = 1 - 0.00765 \cdot z$  per  $z \leq 9.15m$   
 $r_d = 1.174 - 0.0267 \cdot z$  per  $9.15 < z \leq 23m$

$z$  profondità misura prova penetrometrica

#### Fase 2: Correzione delle misure in situ

Gli abachi di liquefazione impiegati per la valutazione della resistenza (fase 3) si basano sui seguenti indicatori: numero di colpi SPT, resistenza alla punta CPT, velocità delle onde di taglio VS opportunamente

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

normalizzati e corretti per tener conto della pressione efficace, eventualmente normalizzata alla pressione atmosferica.

	SPT	CPT	Geofisiche
Parametro di origine	$N_{60}$	$q_c$	$V_S$
Fattore di normalizzazione	$C_N = \frac{1.7}{\sigma'_{v0} + 0.7}$ $C_N = \left( \frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.5}$	$C_q = \left( \frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n$ $n = 0.5 \div 1.0$	$C_V = \left( \frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n$ $n = 0.25 \div 0.33$
Valore normalizzato	$(N_1)_{60} = C_N N_{60}$	$q_{cIN} = C_q \cdot (q_c / p_a)$	$V_{S1} = C_V V_S$

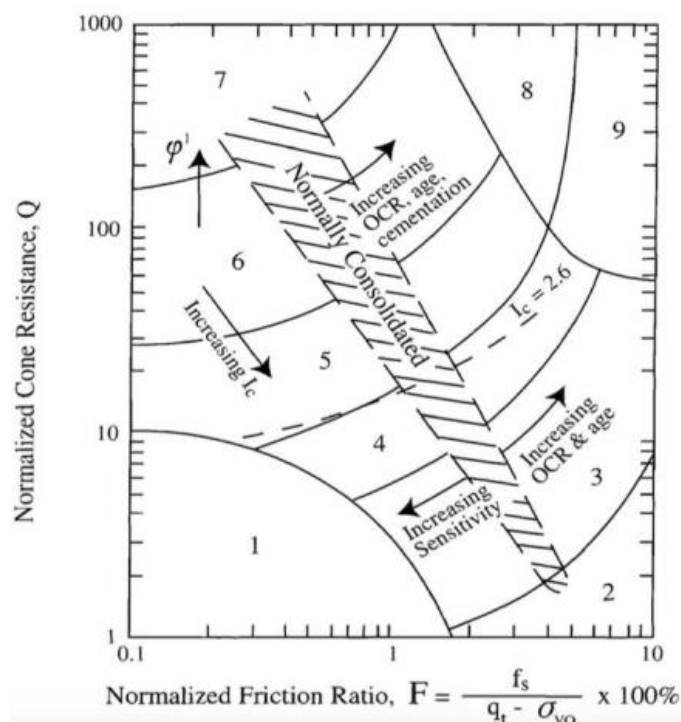


Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

### Fase 3: Valutazione di CRR (rapporto di resistenza ciclica)

Avendo dati provenienti da prove penetrometriche statiche (CPT) è stato applicato il Metodo di Robertson e Wride (1997): è un metodo basato su prove CPT, dove la resistenza alla punta normalizzata rispetto alla tensione efficace verticale ( $q_{c1n}$ ), viene normalizzata rispetto a prove CPT in siti precedentemente colpiti da terremoti di magnitudo 7.5 e caratterizzati dallo stesso tipo di terreno (sabbie pulite) ( $q_{c1n}$ )<sub>cs</sub>.

Si utilizza il diagramma di Robertson & Wride (1998) per la valutazione dei vari tipi di suolo :



Nelle ascisse è riportato il rapporto di attrito normalizzato adimensionale (F) e nelle ordinate la resistenza alla punta normalizzata adimensionale (Q), i quali verranno poi illustrati 20 successivamente. Il rapporto di attrito normalizzato (F/Q) solitamente cresce all'aumentare del contenuto di fini e della plasticità del suolo. Secondo il diagramma sopra descritto la classificazione dei terreni si divide in 6 zone principali a seconda dell'indice di comportamento:

Zona	Tipo di suolo	Indice Ic
2	Terreni organici (torbe)	$I_c > 3,60$
3	Argilla (da argilla limosa a argilla)	$2,95 < I_c < 3,60$
4	Miscele di limo (da limo argilloso a argilla limosa)	$2,60 < I_c < 2,95$
5	Miscele di sabbie (da sabbia limosa a limo sabbioso)	$2,05 < I_c < 2,60$
6	Sabbie (da pulite a limose)	$1,31 < I_c < 2,05$
7	Sabbia ghiaiosa	$I_c < 1,31$

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

I raggi dei cerchi del grafico definiscono le varie tipologie di terreno attraverso l'indice di comportamento del suolo ( $I_c$ ). Secondo il metodo di Robertson & Wride (1998)  $I_c$  viene determinato usando i due fattori adimensionali,  $F$  e  $Q$ :

$$Q = [(q_c - \sigma_{v0})/P_a] [(P_a / \sigma'_{v0})^n]$$

$$F = [f_s / (q_c - \sigma_{v0})] 100\%$$

dove

**$q_c$**  resistenza alla punta misurata (Mpa);

**$f_s$**  restitività all'attrito laterale del manicotto (Mpa);

**$\sigma_{v0}$**  sforzo totale verticale (Mpa);

**$\sigma'_{v0}$**  sforzo efficace verticale (Mpa);

**$P_a$**  pressione atmosferica (Mpa);

**$n$**  esponente che dipende dal tipo di suolo

Per determinare il tipo di terreno, all'interno del calcolo dell' $I_c$  si deve cambiare di volta in volta il valore dell'esponente ( $n$ ) in base al risultato dell'indice di comportamento. Inizialmente si assume che l'esponente abbia valore 1, come se fosse un suolo argilloso, e si procede con il calcolo:

$$I_c = [(3,47 - \log Q)^2 + (1,22 + \log F)^2]^{0,5}$$

Se  $I_c > 2,6$  il suolo è probabilmente di tipo argilloso e l'analisi viene conclusa, dato che il suolo non è a rischio liquefazione.

Se  $I_c < 2,6$  significa che il suolo è di natura essenzialmente granulare.  $I_c$  viene quindi ricalcolato assumendo che ( $n$ ) sia uguale a 0,5 per poter verificare l'effettiva assenza di fini all'interno del deposito. In questo caso, se  $I_c$  ricalcolato risulta  $< 2,6$  il suolo sarà probabilmente non plastico e granulare mentre se  $I_c > 2,6$  il suolo è limoso e possibilmente plastico. In questo caso l' $I_c$  dovrà essere ricalcolato un'ultima volta con il valore dell'esponente uguale 0,7.

Successivamente, si trasforma la resistenza alla punta statica normalizzata ( $q_{1cN}$ ) per sabbie con all'interno una componente fine nell'equivalente per le sabbie pulite:

$$(q_{1cN})_{cs} = K_c (q_{1cN})$$

dove

$K_c$  = fattore di correzione per le caratteristiche granulometriche.

Definito dalla seguente relazione: Se  $I_c \leq 1,64$   $K_c = 1,0$

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

---


$$\text{Se } I_c > 1,64 \quad K_c = -0,403 \quad I_c^4 + 5,581 \quad I_c^3 - 21,63 \quad I_c^2 + 33,75 \quad I_c - 17,88$$

Viene quindi calcolato il CRR per un terremoto di riferimento di magnitudo 7.5:

$$\text{Se } (q_{c1N})_{cs} < 50 \quad \mathbf{CRR}_{7.5} = 0,833 [(q_{c1N}) / 1000] + 0,05$$

$$\text{Se } 50 \leq (q_{c1N})_{cs} < 160 \quad \mathbf{CRR}_{7.5} = 93 [(q_{c1N})_{cs} / 1000]^3 + 0,08$$

Il  $\mathbf{CRR}_{7.5}$  viene successivamente scalato in funzione della magnitudo attesa nel sito in esame:

$$\mathbf{CRR}_M = \mathbf{CRR}_{7.5} \text{ MSF}$$

dove

$$\text{MSF} = 10^{2,84 / M^{3,24}} \quad (\text{fattore correttivo per calcolare il } \mathbf{CRR}_m \text{ per terremoti con magnitudo differente da 7.5})$$

M è la magnitudo del terremoto di riferimento.

#### Fase 4: Valutazione di FS e $IP_L$ (fattore di sicurezza alla liquefazione e potenziale di liquefazione)

Il risultato che si ottiene è l'FS, ovvero il fattore di sicurezza alla liquefazione, che è il rapporto tra la resistenza alla liquefazione del terreno ed il carico indotto dal sisma, espressi in base al rapporto di tensione di taglio ciclica (Facciorusso, 2003):

$$\mathbf{FS} = \mathbf{CRR}_M / \text{CSR}$$

Se FS risulta maggiore di 1 il rischio di liquefazione viene considerato nullo, altrimenti si procede con il calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione ( $IP_L$ ) basato sul metodo di Iwasaki et al. (1982):

$$\mathbf{IP}_L = \int_0^{20} F(z) w(z) dz$$

dove

**F(z)** funzione del fattore sicurezza: se  $FSL < 1$  il valore della funzione sarà 1-FS  
se  $FSL > 1$  avrà valore di 0

**w(z)** spessore del suolo tra i vari intervalli registrati dalla prova;

**dz** incremento differenziale della profondità.

## PRIMO STRALCIO DEL PIANO NAZIONALE PER GLI INTERVENTI NEL SETTORE IDRICO – SEZIONE INVASI

Codice intervento 518/5

Realizzazione di una cassa di espansione per laminazione delle piene e accumulo idrico a scopo irriguo Cavo Bondeno  
Comune di Novellara (RE)

L'indice di pericolosità del terreno viene calcolato proporzionalmente a diversi fattori:

- spessore dello strato liquefacibile
- vicinanza dello strato liquefattibile alla superficie
- il fattore di sicurezza dello strato liquefattibile deve essere minore di 1

Si divide in cinque classi di pericolosità:

IPL	Rischio di liquefazione
$IPL = 0$	Non liquefacibile
$0 < IPL \leq 2$	Basso
$2 < IPL \leq 5$	Moderato
$5 < IPL \leq 15$	Alto
$IPL > 15$	Molto alto

Secondo Riga (2007), il parametro consente di calcolare una stima di quanto un sito possa essere soggetto alla pericolosità liquefattiva.

Esso sta a indicare gli effetti della liquefazione “basata sulla larghezza e profondità delle zone liquefacibili”. Questo indice è valutato fino a un massimo di 20 metri di profondità.

### Risultati

Le analisi hanno restituito valori di **FS** che variano da 1,68 a 1,69 pertanto non sussiste **nessun rischio di liquefazione** del terreno al di sotto delle opere in progetto.