

CASSA DI ESPANSIONE DEL TORRENTE BAGANZA NEI COMUNI DI FELINO, SALA BAGANZA, COLLECCHIO E PARMA (PR-E-1047)

PROGETTO ESECUTIVO

02	24/07/2020	Revisione per osservazioni DGD e validazione	MAGLIOCCHETTI	CASSANI	BERTERO
01	29/02/2020	Seconda emissione	MAGLIOCCHETTI	CASSANI	BERTERO
00	15/07/2019	Prima emissione	MAGLIOCCHETTI	CASSANI	BERTERO
REV.	DATA	MODIFICHE	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZ.

GEOLOGIA, IDROGEOLOGIA E GEOTECNICA RELAZIONE CALCOLO CEDIMENTI

ASSOCIAZIONE TEMPORANEA DI IMPRESE

MANDATARIA:

MANDANTI:



IL R.U.P.:

 Dott. Ing. Mirella Vergnani
 (documento firmato digitalmente)

 Progettista responsabile integrazioni
 prestazioni specialistiche e Direttore Tecnico
 della mandataria.
 Hydrodata S.p.A.
 Ord. Ing. Torino N°7570L

 Dott. Ing. Roberto Bertero
 (documento firmato digitalmente)

 Progettista/Progettisti responsabili elaborato
 Rock Soil S.p.A.
 Dott. Ing. Giovanna Cassani
 Ord. Ing. Milano N°20997

 Dott. Ing. Giovanna Cassani
 (documento firmato digitalmente)


CODICE ELABORATO:

B	A	G	3	0	3	G	E	O	R	R	E	0	4	2
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

ID (1)

CAP. (2)

TIPO (3)

DOC. (4)

PROGR. (5-6) REV. (7)

SCALA

 LUGLIO
2020

INDICE

1	PREMESSA.....	4
1.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	6
2	INQUADRAMENTO GEOTECNICO.....	7
2.1	STRATIGRAFIE DI RIFERIMENTO.....	7
2.2	PARAMETRI GEOTECNICI	8
2.3	SEZIONE 1.....	8
2.4	SEZIONE 2.....	8
2.5	SEZIONE 3.....	9
2.6	SEZIONE 4.....	9
2.7	SEZIONE 5.....	9
2.8	SEZIONE 6.....	10
2.9	SEZIONE 7.....	10
2.10	SEZIONE S14.....	10
2.11	SEZIONE S2_PG/S7	11
2.1	PARAMETRI CARATTERISTICI DEI MATERIALI DA RILEVATO.....	11
2.2	PARAMETRI CARATTERISTICI DEL JET-GROUTING.....	11
3	CALCOLO DEI CEDIMENTI	12
3.1	TEORIA DELLA CONSOLIDAZIONE	12
3.1.1	<i>Calcolo analitico dei cedimenti di consolidazione.....</i>	<i>12</i>
3.1.1.1	Valutazione delle tensioni geostatiche iniziali	13
3.1.1.2	Valutazione delle sovratensioni indotte dal corpo del rilevato.....	13
3.1.1.3	Metodo edometrico per il calcolo dei cedimenti di consolidazione primaria	15
3.1.1.4	Evoluzione temporale dei cedimenti di consolidazione primaria	16
3.1.2	<i>Implementazione delle equazioni fondamentali per la consolidazione (PLAXIS 2D)</i>	<i>18</i>
3.2	SOFT SOIL CREEP MODEL (PLAXIS 2D)	19
3.2.1	<i>Teoria del creep monodimensionale (PLAXIS 2D)</i>	<i>19</i>
3.2.2	<i>Variabili τ_c e ϵ_c (PLAXIS 2D)</i>	<i>20</i>
3.2.3	<i>Legge differenziale per il creep monodimensionale (PLAXIS 2D).....</i>	<i>21</i>
3.2.4	<i>Modello tridimensionale (PLAXIS 2D)</i>	<i>23</i>
3.2.5	<i>Formulazione della condizione di rottura (PLAXIS 2D).....</i>	<i>25</i>
3.2.6	<i>Parametri del modello Soft Soil Creep (PLAXIS 2D).....</i>	<i>25</i>
4	DESCRIZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO.....	27

4.1	SEZIONE 1.....	28
4.1.1	<i>Fasi di calcolo – Sezione 1.....</i>	28
4.2	SEZIONE 2.....	29
4.2.1	<i>Fasi di calcolo – Sezione 2.....</i>	30
4.3	SEZIONE 3.....	31
4.3.1	<i>Fasi di calcolo – Sezione 3.....</i>	32
4.4	SEZIONE 4.....	33
4.4.1	<i>Fasi di calcolo – Sezione 4.....</i>	33
4.5	SEZIONE 5.....	34
4.5.1	<i>Fasi di calcolo – Sezione 5.....</i>	35
4.6	SEZIONE 6.....	36
4.6.1	<i>Fasi di calcolo – Sezione 6.....</i>	37
4.7	SEZIONE 7.....	38
4.7.1	<i>Fasi di calcolo – Sezione 7.....</i>	38
4.8	SEZIONE SU SONDAGGIO S14.....	39
4.8.1	<i>Fasi di calcolo – Sezione S14.....</i>	39
4.9	SEZIONE SU SONDAGGIO S2_PG/S7.....	40
4.9.1	<i>Fasi di calcolo – Sezione S2_PG/S7.....</i>	40
5	RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE	42
5.1	SEZIONE 1.....	42
5.2	SEZIONE 2.....	47
5.3	SEZIONE 3.....	52
5.4	SEZIONE 4.....	57
5.5	SEZIONE 5.....	62
5.6	SEZIONE 6.....	67
5.7	SEZIONE 7.....	72
5.8	SEZIONE S14.....	77
5.9	SEZIONE S2_PG/S7.....	82
6	CONFRONTO TRA MODELLO NUMERICO E CALCOLO ANALITICO.....	87
6.1	RISULTATI ANALISI NUMERICA	87
6.2	RISULTATI CALCOLO ANALITICO.....	87
7	CEDIMENTI SISMICI DEI RILEVATI	99
7.1	VALUTAZIONE DEL CEDIMENTO SISMICO DEL RILEVATO: SEZIONE 7	99

8	CEDIMENTI POST SISMA.....	100
8.1	METODO DI VALUTAZIONE DI IDRIS E BOULANGER (2008) – CEDIMENTI POST SISMICI.....	100
8.1.1	<i>Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica nei terreni granulari saturi.....</i>	<i>101</i>
8.1.2	<i>Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica nei terreni coesivi soffici</i>	<i>114</i>
8.2	METODO DI VALUTAZIONE DI IDRIS E BOULANGER (2008) – CEDIMENTI POST-LIQUEFAZIONE.....	114
9	VERIFICA DEL FRANCO NETTO	117
10	VALUTAZIONE DEL DANNO SULLE PREESISTENZE	119
10.1	TEORIE PER LA VALUTAZIONE DEL DANNO	119
10.2	EDIFICI OGGETTO DI STUDIO.....	122
10.3	RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE	124
10.4	VALUTAZIONE DEL DANNO.....	126
10.4.1	<i>Edificio 1</i>	<i>126</i>
10.4.2	<i>Edificio 2</i>	<i>127</i>
10.4.3	<i>Edificio 3</i>	<i>128</i>
10.4.4	<i>Edificio 4</i>	<i>129</i>
11	CONSIDERAZIONI FINALI.....	131

1 PREMESSA

La presente Relazione Tecnica – Calcolo dei cedimenti si articola nello specifico nei seguenti capitoli:

- INQUADRAMENTO GEOTECNICO
- TEORIA PER IL CALCOLO DEI CEDIMENTI
- DESCRIZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO
- RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE
- CEDIMENTI POST LIQUEFAZIONE
- VALUTAZIONE DEL DANNO SULLE PREESISTENZE
- CONSIDERAZIONI FINALI

La presente relazione riporta la descrizione della teoria utilizzata per valutare i cedimenti di breve e lungo termine e mostra i risultati così ottenuti dalle analisi numeriche in riferimento ai rilevati arginali della cassa di espansione del Torrente Baganza in località Sala Baganza, a sud ovest della città di Parma. Inoltre si è valutata l'eventuale classe di danno sulle preesistenze più prossime ai rilevati arginali di progetto.

I centri abitati più vicini sono:

- Sala Baganza, a sud-ovest dell'area di progetto;
- Casale di Felino (Comune di Felino), a sud-est dell'area di progetto;
- Carignano (Comune di Parma), a est dell'area di progetto.



Figura 1 – Inquadramento territoriale



Figura 2 – Inserimento dell'opera

1.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- “Norme tecniche per le costruzioni” Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008;
- CIRCOLARE 2 febbraio 2009 , n. 617 C.S.LL.PP. Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008;
- UNI EN 1997-1:2013 Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 1: Regole generali;
- UNI EN 1997-2:2007 Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 2: Indagini e prove nel sottosuolo;
- UNI EN 1998-5:2005 Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici;
- Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche. 1977 AGI – Associazione Geotecnica Italiana;
- Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica - Linee guida 2005 AGI – Associazione Geotecnica Italiana;
- D.M. 26 giugno 2014 n.91 “Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (Dighe e Traverse)”.

2 INQUADRAMENTO GEOTECNICO

Per quanto riguarda il dettaglio approfondito dell'inquadramento geotecnico si rimanda alla documentazione dedicata di progetto esecutivo, rappresentata nello specifico sia dagli elaborati grafici, sia dalla Relazione Geotecnica Generale (BAG303GEORRE030).

2.1 STRATIGRAFIE DI RIFERIMENTO

Le stratigrafie di riferimento inerenti alle sezioni esaminate da 1 a 7 sono le medesime utilizzate per l'analisi della stabilità dei rilevati arginali, le cui verifiche sono presentate all'interno della relazione specifica "Relazione geotecnica – Fondazioni rilevati e verifiche di stabilità" BAG307ARGRRE020.

Per quanto riguarda le sezioni S14 e S2_PG/S7 si riportano di seguito le stratigrafie utilizzate:

Tabella 1 – Modello geotecnico per Sezione S14

Profondità in m da P.C.			Unità Geotecnica
0.0	÷	5.0	UG1A
5.0	÷	8.0	UG2A
8.0	÷	9.5	UG2B
9.5	÷	20.0	UG2A
20.0	÷	37.0	UG2B
37.0	÷	50.0	UG2A

Tabella 2 – Modello geotecnico per Sezione S2_PG/S7

Profondità in m da P.C.			Unità Geotecnica
0.0	÷	5.0	UG1A
5.0	÷	9.0	UG2B
9.0	÷	15.0	UG2A
15.0	÷	16.0	UG2B
16.0	÷	20.0	UG2A
20.0	÷	29.0	UG2B
29.0	÷	50.0	UG2A

2.2 PARAMETRI GEOTECNICI

I parametri geotecnici dei terreni sono i medesimi di quelli utilizzati per le analisi di stabilità dei pendii dei rilevati arginali, le cui verifiche sono presentate all'interno della relazione specifica "Relazione geotecnica – Fondazioni rilevati e verifiche di stabilità" BAG307ARGRRE020.

Al fine di effettuare il calcolo dei cedimenti di lungo termine per gli strati argillosi si rende necessario effettuare analisi di consolidazione per più step temporali, si riportano quindi nel seguito i valori considerati per ogni modello numerico di coefficienti di consolidazione primaria e secondaria e indice dei vuoti iniziale, suddivisi per sezione di calcolo e stratigrafia.

2.3 SEZIONE 1

Tabella 3 – Modello geotecnico Sezione 1

Profondità in m da P.C.		Unità Geotecnica	c' [kPa]	ϕ' [°]	E' [MPa]	Cc	Cs	Ca	e ₀	OCR
0	6,0	UG1A	0	38	70	-	-	-	-	-
6,0	8,0	UG2A	0	36	50	-	-	-	-	-
8,0	9,0	UG2B	5	25	80	0.26	0.04	0.009	0.84	4
9,0	17,5	UG2A	0	36	65	-	-	-	-	-
17,5	27,0	UG2B	5	25	80	0.25	0.05	0.009	0.76	2
27,0	40,0	UG2A	0	36	80	-	-	-	-	-

2.4 SEZIONE 2

Tabella 4 – Modello geotecnico Sezione 2

Profondità in m da P.C.		Unità Geotecnica	c' [kPa]	ϕ' [°]	E' [MPa]	Cc	Cs	Ca	e ₀	OCR
0,0	5,5	UG1A	0	38	70	-	-	-	-	-
5,5	8,0	UG2A	0	36	50	-	-	-	-	-
8,0	9,5	UG2B	41	17	80	0.25	0.05	0.0065	0.75	4
9,5	19,5	UG2A	0	36	65	-	-	-	-	-

19,5	24,0	UG2B	41	17	80	0.26	0.05	0.0065	0.75	2
24,0	29,0	UG2A	0	36	80	-	-	-	-	-
29,0	36,5	UG2B	41	17	80	0.26	0.05	0.0065	0.75	1
36,5	41,5	UG2A	0	36	95	-	-	-	-	-

2.5 SEZIONE 3

Tabella 5 – Modello geotecnico Sezione 3

Profondità in m da P.C.		Unità Geotecnica	c' [kPa]	φ' [°]	E' [MPa]	Cc	Cs	Ca	e ₀	OCR
0,0	1,5	UG2B	10	25	80	0.26	0.04	0.003	0.625	4
1,5	9,5	UG2A	0	36	50	-	-	-	-	-
9,5	11,0	UG2B	10	25	80	0.26	0.04	0.003	0.625	2
11,0	21,0	UG2A	0	36	65	-	-	-	-	-
21,0	23,0	UG2B	10	25	80	0.26	0.04	0.003	0.625	1
23,0	39,0	UG2A	0	36	80	-	-	-	-	-

2.6 SEZIONE 4

Tabella 6 – Modello geotecnico Sezione 4

Profondità in m da P.C.		Unità Geotecnica	c' [kPa]	φ' [°]	E' [MPa]	Cc	Cs	Ca	e ₀	OCR
0,0	6,0	UG2A	0	36	55	-	-	-	-	-
6,0	7,0	UG2B	10	25	80	0.23	0.04	0.009	0.65	4
7,0	18,0	UG2A	0	36	80	-	-	-	-	-
18,0	30,0	UG2B	10	25	80	0.22	0.03	0.009	0.73	2
30,0	35,5	UG2A	0	36	80	-	-	-	-	-
35,5	47,0	UG2B	10	25	80	0.26	0.03	0.005	0.60	1
47,0	50,0	UG2A	0	36	90	-	-	-	-	-

2.7 SEZIONE 5

Tabella 7 – Modello geotecnico Sezione 5

Profondità in m da P.C.		Unità Geotecnica	c' [kPa]	φ' [°]	E' [MPa]	Cc	Cs	Ca	e ₀	OCR
0,0	2,5	UG1A	0	38	70	-	-	-	-	-

2,5	10,5	UG2A	0	36	60	-	-	-	-	-
10,5	21,0	UG2B	10	25	80	0.24	0.045	0.009	0.75	2
21,0	40,0	UG2A	0	36	80	-	-	-	-	-

2.8 SEZIONE 6

Tabella 8 – Modello geotecnico Sezione 6

Profondità in m da P.C.		Unità Geotecnica	c' [kPa]	ϕ' [°]	E' [MPa]	Cc	Cs	Ca	e ₀	OCR
0,0	5,5	UG1A	0	38	70	-	-	-	-	-
5,5	8,0	UG2B	10	25	80	0.24	0.045	0.009	0.75	4
8,0	18,5	UG2A	0	36	60	-	-	-	-	-
18,5	29,5	UG2B	10	25	80	0.24	0.045	0.009	0.75	2
29,5	40,0	UG2A	0	36	95	-	-	-	-	-

2.9 SEZIONE 7

Tabella 9 – Modello geotecnico per Sezione 7

Profondità in m da P.C.		Unità Geotecnica	c' [kPa]	ϕ' [°]	E' [MPa]	Cc	Cs	Ca	e ₀	OCR
0,0	5,5	UG1A	0	38	70	-	-	-	-	-
5,5	8,0	UG2A	0	36	50	-	-	-	-	-
8,0	9,5	UG2B	5	25	80	0.20	0.03	0.005	0.641	4
9,5	19,5	UG2A	0	36	60	-	-	-	-	-
19,5	37,0	UG2B	5	25	80	0.20	0.03	0.005	0.641	2
37,0	45,0	UG2A	0	36	90	-	-	-	-	-

2.10 SEZIONE S14

Tabella 10 – Modello geotecnico per Sezione S14

Profondità in m da P.C.		Unità Geotecnica	c' [kPa]	ϕ' [°]	E' [MPa]	Cc	Cs	Ca	e ₀	OCR
0.0	5.0	UG1A	0	38	70	-	-	-	-	-
5.0	8.0	UG2A	0	36	50	-	-	-	-	-
8.0	9.5	UG2B	41	17	80	0.25	0.05	0.0065	0.75	4

9.5	20.0	UG2A	0	36	65	-	-	-	-	-
20.0	37.0	UG2B	41	17	80	0.26	0.05	0.0065	0.75	2
37.0	50.0	UG2A	0	36	80	-	-	-	-	-

2.11 SEZIONE S2_PG/S7

Tabella 11 – Modello geotecnico per Sezione S2_PG/S7

Profondità in m da P.C.		Unità Geotecnica	c' [kPa]	φ' [°]	E' [MPa]	Cc	Cs	Ca	e ₀	OCR
0.0	5.0	UG1A	0	38	70	-	-	-	-	-
5.0	9.0	UG2B	10	25	80	0.24	0.045	0.009	0.75	4
9.0	15.0	UG2A	0	36	60	-	-	-	-	-
15.0	16.0	UG2B	10	25	80	0.24	0.045	0.009	0.75	2
16.0	20.0	UG2A	0	36	90	-	-	-	-	-
20.0	29.0	UG2B	10	25	80	0.24	0.045	0.009	0.75	1
29.0	50.0	UG2A	0	36	90	-	-	-	-	-

2.1 PARAMETRI CARATTERISTICI DEI MATERIALI DA RILEVATO

Si riportano nel seguito i parametri dei terreni che compongono il rilevato, utilizzati all'interno delle analisi di stabilità.

Tabella 12 – Parametri geotecnici materiali da rilevato

Unità Geotecnica	c' [kPa]	φ' [°]	E' [MPa]	γ [kN/m³]	Cc	Cs	Ca	e ₀
NUCLEO	-	-	-	19	0.02	3E-3	0.05E-3	0.5
A1-A2	5	35	25	20	-	-	-	-

2.2 PARAMETRI CARATTERISTICI DEL JET-GROUTING

Si riportano nel seguito i parametri del trattamento in jet grouting che compone i taglianti idraulici, utilizzati all'interno delle analisi di stabilità.

Tabella 13 – Parametri geotecnici jet grouting

Unità Geotecnica	c' [kPa]	φ' [°]	E' [MPa]	k [m/s]	γ [kN/m³]
Diaframma in jet- grouting	50	35	100	1x10-8	24

3 CALCOLO DEI CEDIMENTI

3.1 TEORIA DELLA CONSOLIDAZIONE

L'applicazione di un carico su un terreno comporta l'insorgere di sovrappressione dell'acqua interstiziale, la cui entità varia da punto a punto all'interno del volume individuato dal bulbo tensionale. Al di fuori del bulbo tensionale l'acqua conserva il valore di equilibrio iniziale u_0 . Il gradiente Δu innesca un moto di filtrazione (transitorio) la cui durata dipende dalla permeabilità e dalla deformabilità del terreno.

Nei terreni a grana fine la durata del processo di dissipazione delle pressioni è maggiore.

Le principali conseguenze della trasmissione di carico dalla fase liquida allo scheletro solido è una riduzione di volume con conseguente sviluppo di deformazioni volumetriche, variazione dell'indice dei vuoti e cedimenti.

Dopo un breve cenno teorico e la formulazione analitica per il calcolo dei cedimenti, si mostra come viene implementata la teoria della consolidazione all'interno del software numerico PLAXIS 2D.

3.1.1 Calcolo analitico dei cedimenti di consolidazione

L'applicazione di un carico di dimensioni finite su un deposito costituito da materiali coesivi saturi determina un processo deformativo nel terreno che tradizionalmente viene come segue.

1. In relazione alla bassa permeabilità (k) del terreno coesivo, la fase di carico avviene in condizioni non drenate con generazione di sovrappressioni interstiziali; i materiali coesivi si deformano a volume costante e si sviluppa il cedimento immediato (la determinazione di tale componente immediata del cedimento è stata condotta secondo le procedure operative di cui al paragrafo precedente).
2. Il trasferimento del carico dall'acqua allo scheletro solido comporta ulteriori cedimenti, la cui velocità nel tempo è legata principalmente alle caratteristiche di permeabilità del terreno e alle condizioni di drenaggio; tale componente di consolidazione primaria del cedimento globale è oggetto del presente paragrafo. Il reale decorso dei cedimenti di consolidazione sarà influenzato dalle tempistiche di realizzazione del corpo dei rilevati, tuttavia, in fase progettuale, le calcolazioni sono state effettuate assumendo che il processo si instauri a completamento della fase di carico (ovvero a costruzione del rilevato ultimata), pur essendo in realtà ad essa contestuale. La valutazione del cedimento di consolidazione primaria è stata effettuata nell'ambito del presente documento, applicando il classico metodo edometrico.
3. Esauritosi il cedimento di consolidazione primaria, si assiste all'evoluzione nel tempo di un ulteriore fenomeno di natura plastico-viscosa identificato come cedimento secondario. Nell'ambito della presente progettazione, si è ritenuto di scarso interesse tecnico il calcolo della suddetta componente, visti i lunghi tempi di mobilitazione completa previsti per la sola aliquota di consolidazione primaria.

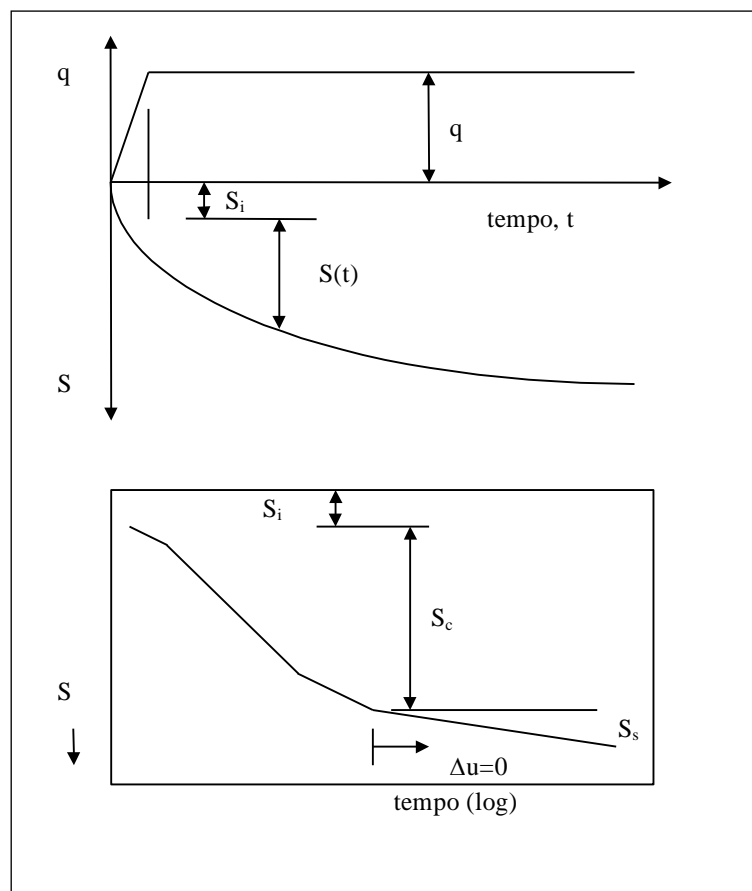


Figura 3 – Decorso del cedimento di consolidazione nel tempo

Ai fini del calcolo del cedimento di consolidazione con metodo edometrico, secondo le formulazioni esposte nel seguito, si è pertanto adottato un valore dell'OCR compatibile con la caratterizzazione geotecnica.

3.1.1.1 Valutazione delle tensioni geostatiche iniziali

La valutazione delle tensioni geostatiche esistenti prima della costruzione del rilevato è stata condotta assumendo che la direzione verticale sia direzione principale di tensione, secondo la nota relazione che esprime le tensioni efficaci (il metodo di calcolo edometrico per sua natura si riferisce alle condizioni drenate) in relazione alla profondità da p.c., definita la falda alla quota di progetto.

$$\sigma'_{vo} = \gamma' \cdot z$$

essendo:

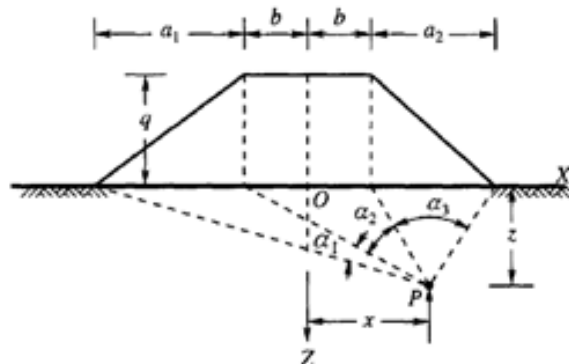
- σ'_{vo} = pressione geostatica verticale efficace;
- γ' = peso di volume efficace del terreno.

3.1.1.2 Valutazione delle sovratensioni indotte dal corpo del rilevato

La determinazione delle tensioni indotte dai carichi esterni, σ_{vo}' , è stata effettuata utilizzando la teoria dell'elasticità, assimilando il terreno di fondazione ad un mezzo continuo, lineare, isotropo ed omogeneo e l'area di carico di forma trapezia asimmetrica ed applicando la soluzione analitica di Osterberg (1975).

Ai fini del calcolo dei cedimenti di consolidazione nei terreni di appoggio dei rilevati in progetto, si fa ricorso la soluzione di Osterberg è fondata sulla teoria dell'elasticità; in particolare, per un carico di forma trapezoidale, rappresentativo dei corpi di rilevato da costruirsi, l'incremento di tensione verticale indotto in un generico punto P all'interno del terreno di appoggio ($\Delta\sigma_z$) è esprimibile nella forma:

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi} \left[(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + \frac{b}{a_1} (\alpha_1 + R \cdot \alpha_3) + \frac{x}{a_1} (\alpha_1 - R \cdot \alpha_3) \right]$$



- α_1 , α_2 ed α_3 sono gli angoli sottesi dal punto P all'area di carico
- a_1 , a_2 e b sono i parametri geometrici del rilevato in progetto
- $q = \gamma \cdot h$ è l'entità del carico di progetto, essendo γ il peso di volume del terreno di riporto costituente il corpo del rilevato ($\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$) ed h l'altezza del rilevato stesso
- R = metà del valore della base del rilevato in esame;

Si riporta nel seguito nomogramma implementato per il calcolo delle sovratensioni indotte (a supporto della formulazione analitica).

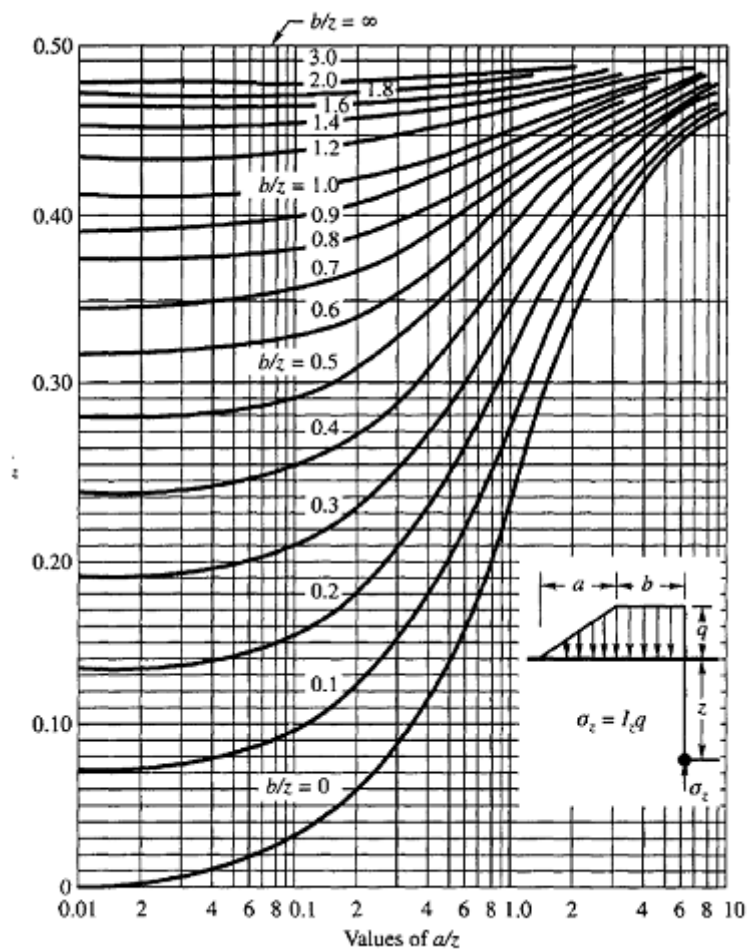


Figura 4 – Schema di carico trapezoidale su terreno di appoggio e nomogramma per il calcolo delle tensioni indotte in asse al corpo di carico

La sovratensione calcolata secondo la procedura sopra esposta è riferita al corpo di carico a sezione trapezia nastriforme.

3.1.1.3 Metodo edometrico per il calcolo dei cedimenti di consolidazione primaria

Si descrive nel seguito il metodo monodimensionale (o metodo edometrico), proposto da Terzaghi (1943). La procedura di calcolo è costituita dalle seguenti operazioni:

- suddivisione il banco di terreno comprimibile in un numero di strati aventi spessore iniziale (nel caso specifico, $H_i = 0.3\text{m}$);
- calcolo della tensione efficace geostatica in corrispondenza della mezzeria di ciascuno di tali strati e contestuale definizione della tensione di preconsolidazione:

$$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$$

con OCR il grado di sovraconsolidazione, definito sulla scorta dei risultati di prove edometriche, secondo le valutazioni espresse in precedenza.

- calcolo, alle medesime profondità, dell'incremento $\Delta\sigma_z$ prodotto dalla costruzione del rilevato
- calcolo del cedimento di ciascuno strato, ΔH_i , assumendo che le deformazioni dell'elemento di volume siano esclusivamente monodimensionali.

Per depositi sovraconsolidati si adotta la relazione seguente:

$$\Delta H_i = H_i \left(RR \cdot \log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} + CR \cdot \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_z}{\sigma'_p} \right)$$

dove:

$$RR = \frac{C_r}{1 + e_0} \quad (\text{rapporto di ricompressione})$$

$$CR = \frac{C_c}{1 + e_0} \quad (\text{rapporto di compressione}), \text{ Me}$$

essendo C_r e C_c rispettivamente l'indice di ricompressione e compressione, determinati sulla base dei risultati di prove edometriche,

e_0 l'indice naturale dei vuoti del terreno in situ.

Nel caso in cui i depositi si trovino in condizioni normal-consolidate, la relazione di cui sopra si riduce alla seguente:

$$\Delta H_i = H_i \left(CR \cdot \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_z}{\sigma'_{v0}} \right)$$

- calcolo del cedimento totale come somma dei cedimenti associati ai singoli n strati:

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n \Delta H_i$$

Nel merito della selezione dei parametri RR e CR, la valutazione è condotta sulla scorta dei risultati forniti dalle prove edometriche condotte in laboratorio.

3.1.1.4 Evoluzione temporale dei cedimenti di consolidazione primaria

La valutazione dell'andamento nel tempo del cedimento di consolidazione primaria dei terreni coesivi è stata condotta con riferimento alla teoria della consolidazione monodimensionale di Terzaghi.

Si calcola il tempo "t" necessario allo sviluppo dei cedimenti corrispondenti al grado di consolidazione U scelto tramite la seguente espressione:

$$t = \frac{T \cdot H_0^2}{c_v}$$

Dove:

- T = fattore adimensionale del tempo corrispondente al grado di consolidazione;
- H = massimo percorso di drenaggio delle particelle d'acqua all'interno degli strati coesivi;
- c_v = coefficiente di consolidazione verticale primaria = $\frac{k}{\gamma_w \cdot m_v}$, in cui k è il coefficiente di permeabilità, γ_w è il peso di volume dell'acqua e m_v è il coefficiente di compressibilità edometrica.

I valori dei coefficienti di consolidazione sono stati definiti coerentemente con le determinazioni esplicitate nella Relazione di Caratterizzazione Geotecnica. Gli stessi derivano dall'elaborazione dei risultati delle prove edometriche di laboratorio.

All'atto pratico l'evoluzione del cedimento è valutata calcolando il grado di consolidazione medio U_m , definito come rapporto fra il cedimento del banco al tempo t ed il cedimento di consolidazione finale. Esso è derivato dalla soluzione dell'equazione della consolidazione per isocrone progressive proposta da Jambu et Al. (1956), alla quale si riferisce il seguente diagramma. L'evoluzione del grado di consolidazione è riferita al fattore tempo adimensionale T_m espresso come $t^* c_v / H^2$ ed è fornita per tre distribuzioni tipiche delle sovrappressioni interstiziali agenti all'imposizione del carico a piano campagna, corrispondenti ad altrettante differenti isocrone iniziali.

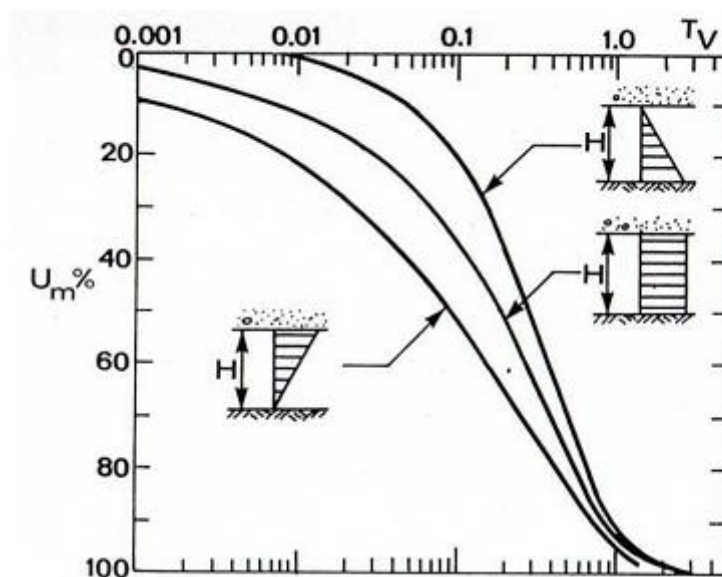


Figura 5 – Grado medio di consolidazione per differenti isocrone iniziali

3.1.2 Implementazione delle equazioni fondamentali per la consolidazione (PLAXIS 2D)

All'interno di PLAXIS 2S le equazioni governanti per la consolidazione seguono la teoria di Biot (1956). Si assume inoltre la legge di Darcy per quanto riguarda i fluidi e il comportamento elastico per lo scheletro solido. La teoria si basa sulla teoria delle piccole deformazioni.

In accordo con il principio di Terzaghi lo stato di sforzo si può suddividere in una componente efficace e la pressione dell'acqua, quest'ultima a sua volta vede due componenti, la pressione in eccesso e la pressione assegnata come dato di input.

$$\underline{\sigma} = \underline{\sigma'} + \underline{m}(p_{steady} + p_{excess})$$

Tale pressione di input deriva appunto dalla pressione generata dalla linea di falda assegnata al programma numerico come dato iniziale, e si ottiene alla fine del processo di consolidazione.

L'equazione può essere dunque riscritta in forma incrementale.

$$\underline{\dot{\sigma'}} = \underline{M}\underline{\dot{\epsilon}}$$

Dove M è la matrice di rigidezza del materiale considerato.

3.2 SOFT SOIL CREEP MODEL (PLAXIS 2D)

Per simulare il comportamento di terreni compressibili soffici che mostrano un comportamento di compressione secondaria si implementa all'interno di PLAXIS 2D il modello "Soft Soil Creep", ovvero un modello che considera il comportamento di dipendenza dal tempo di tali terreni in termini di deformazioni sviluppate.

Il problema del creep è importante per i problemi che riguardano la costruzione di rilevati, quindi risulta fondamentale valutare tali cedimenti indotti tramite modelli numerici FEM.

3.2.1 Teoria del creep monodimensionale (PLAXIS 2D)

Al fine di descrivere il comportamento viscoso del materiale si fa riferimento alla prova edometrica. Buisman (1936) è il primo che considera la prova edometrica e propone la seguente equazione al fine di descrivere il comportamento viscoso di un provino sottoposto ad uno stato di sforzo costante nel tempo:

$$\varepsilon = \varepsilon_c - C_B \log \left(\frac{t}{t_c} \right) \quad \text{for: } t > t_c$$

Dove ε_c è la deformazione alla fine della consolidazione, t è il tempo misurato dall'inizio del carico, t_c è il tempo finale del ramo di consolidazione primaria e C_B è una costante del materiale.

Assumendo quindi $t' = t - t_c$ l'equazione si può riscrivere come:

$$\varepsilon = \varepsilon_c - C_B \log \left(\frac{t_c + t'}{t_c} \right) \quad \text{for: } t' > 0$$

Basandosi quindi sul lavoro di Bjerrum sul comportamento viscoso pubblicato nel 1967, Garlanger (1972) propose una equazione nella forma seguente:

$$e = e_c - C_\alpha \log \left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c} \right) \quad \text{with: } C_\alpha = C_B(1 + e_0) \quad \text{for: } t' > 0$$

A differenza di Buisman, Garlanger sostituisce le deformazioni verticali con l'indice dei vuoti e il tempo di consolidazione t_c è sostituito dal parametro τ_c .

Una ulteriore formulazione al fine di descrivere la compressione secondaria è quella di Butterfield (1979):

$$\varepsilon^H = \varepsilon_c^H - c \ln \left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c} \right)$$

Dove ε^H è la deformazione logaritmica definita come:

$$\varepsilon^H = \ln \left(\frac{V}{V_0} \right) = \ln \left(\frac{1 + e}{1 + e_0} \right)$$

Il pedice "0" indica i parametri iniziali, mentre l'apice "H" è usato al fine di definire la deformazione logaritmica.

E per piccole deformazioni è possibile mostrare che:

$$c = \frac{C_{\alpha}}{(1 + e_0) \cdot \ln 10} = \frac{C_B}{\ln 10}$$

3.2.2 Variabili τ_c e ϵ_c (PLAXIS 2D)

In tale paragrafo si mostra come ricavare i parametri τ_c e ϵ_c da risultati sperimentali.

Differenziando l'equazione di Butterfield (1979) precedentemente mostrata rispetto al tempo si ottiene:

$$-\dot{\epsilon} = \frac{c}{\tau_c + t'}$$

Tale forma permette di sfruttare la costruzione grafica sviluppata da Janbu (1969) al fine di valutare i parametri c e τ_c da dati sperimentali.

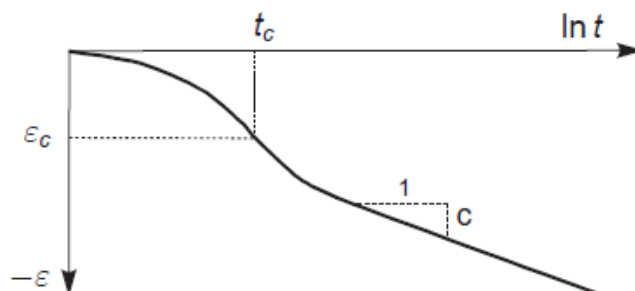


Figura 6 – Deformazione viscosa, parametro c ricavato con metodo grafico tradizionale

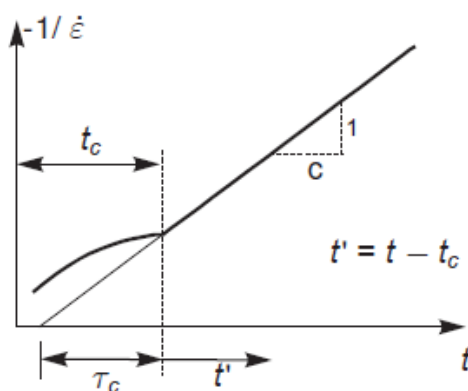


Figura 7 – Inverso dell'incremento di deformazione viscosa, parametro c ricavato con metodo di Janbu (1969)

L'uso del metodo di Janbu permette quindi di ottenere entrambi i parametri sopra citati direttamente interpolando con una linea retta i dati a disposizione. Infatti τ_c è l'intercetta con l'asse non logaritmico del tempo della retta del creep.

Dalla letteratura classica è quindi possibile descrivere la fine della consolidazione ε_c tramite l'equazione:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_c^e + \varepsilon_c^c = -a \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_{p0}}\right) - (b-a) \ln\left(\frac{\sigma_{pc}}{\sigma_{p0}}\right)$$

σ'_{p0} rappresenta lo sforzo efficace iniziale prima del carico, mentre σ' rappresenta lo sforzo efficace post imposizione del carico. Mentre σ_{p0} e σ_{pc} rappresentano la pressione di pre consolidazione corrispondenti alla condizione pre-carico e post-carico. Le costanti "a" e "b" sono espresse come:

$$a = \frac{C_s}{(1 + e_0) \cdot \ln 10} \qquad b = \frac{C_c}{(1 + e_0) \cdot \ln 10}$$

Combinando dunque le equazioni mostrate sopra si ottiene:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^c = -a \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_{p0}}\right) - (b-a) \ln\left(\frac{\sigma_{pc}}{\sigma_{p0}}\right) - c \ln\left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c}\right)$$

Si esprime quindi la deformazione logaritmica dovuta all'incremento di sforzo efficace dovuto al carico e riferita ad un periodo di tempo $t_c + t'$.

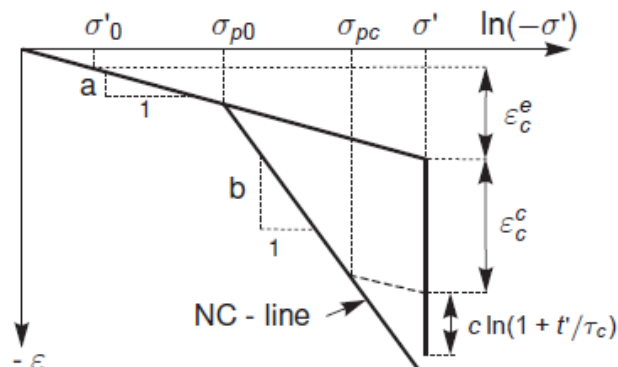


Figura 8 – Curva sforzo-deformazione idealizzata da una prova edometrica, divisione tra le componenti elastica e viscosa degli incrementi di deformazione

Fino a questo punto non si sono trattate le condizioni in cui le condizioni di carico siano variabili nel tempo, al fine di fare questo bisogna introdurre una forma differenziale del modello viscoso.

3.2.3 Legge differenziale per il creep monodimensionale (PLAXIS 2D)

Al fine di risolvere problemi in cui il carico applicato non è costante è necessario formulare una legge costitutiva in una forma differente.

Come prima ipotesi si ha che tutte le deformazioni anelastiche sono dipendenti dal tempo. Quindi le deformazioni totali saranno date dalla somma tra una parte elastica ε^e ed una parte dipendente dal tempo ε^c . Si introduce quindi l'equazione:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^c = -a \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_{i0}}\right) - (b-a) \ln\left(\frac{\sigma_{pc}}{\sigma_{p0}}\right)$$

Dove si ha:

$$\sigma_p = \sigma_{p0} \exp\left(\frac{-\varepsilon^c}{b-a}\right)$$

Combinando le due precedenti equazioni si ottiene:

$$\varepsilon^c - \varepsilon_c^c = -(b-a) \ln\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{pc}}\right) = -c \ln\left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c}\right)$$

Tale equazione può essere dunque usata al fine di comprendere meglio la natura di τ_c . In una prova edometrica convenzionale il carico è applicato per step ed ogni step di carico è mantenuto per un determinato periodo $t_c + t' = \tau$. In tale condizione di carico per step si ottiene la linea di normal consolidazione con $\sigma_p = \sigma'$. Quindi se all'interno dell'equazione precedente si sostituisce:

- $\sigma_p = \sigma'$
- $t' = \tau - t_c$.

Si ha:

$$(b-a) \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma_{pc}}\right) = c \ln\left(\frac{\tau_c + \tau_c}{\tau_c}\right) \quad \text{for: } OCR = 1$$

E quindi si ottiene:

$$\frac{\tau}{\tau_c} = \left(\frac{\sigma'}{\sigma_{pc}}\right)^{\frac{b-a}{c}} \quad \text{or: } \tau_c = \tau \left(\frac{\sigma_{pc}}{\sigma'}\right)^{\frac{b-a}{c}}$$

Ottenuta l'espressione per τ_c è possibile ora formulare l'equazione differenziale per il creep.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^c = -a \frac{\dot{\sigma}'}{\sigma'} - \frac{c}{\tau_c + t'}$$

e quindi:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^c = -a \frac{\dot{\sigma}'}{\sigma'} - \frac{c}{\tau_c} \left(\frac{\sigma_{pc}}{\sigma_p}\right)^{\frac{b-a}{c}}$$

Se si assume quindi:

$$\sigma_p = \sigma_{p0} \exp\left(\frac{-\varepsilon^c}{b-a}\right)$$

Si ottiene infine:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^c = -a \frac{\dot{\sigma}'}{\sigma'} - \frac{c}{\tau} \left(\frac{\sigma'}{\sigma_p}\right) \frac{b-a}{c}$$

3.2.4 Modello tridimensionale (PLAXIS 2D)

Estendendo quindi il modello 1D ad uno stato di sforzo e deformazione generalizzato, si adottano gli invarianti di sforzo p isotropo e q deviatorico. Tali invarianti sono utilizzati per definire p^{eq} :

$$p^{eq} = p' + \frac{\tilde{q}^2}{M^2(p' + c \cot \varphi)}$$

Tale variabile q è simile allo sforzo deviatorico e si mostra come p^{eq} è costante all'interno del piano p - q . Si ottiene dunque l'ellisse derivata dal Cam-Clay modificato come introdotto da Roscoe & Burland (1968).

Il parametro M rappresenta la pendenza della linea di stato critico.

$$M = \frac{6 \sin \varphi_{cv}}{3 - \sin \varphi_{cv}}$$

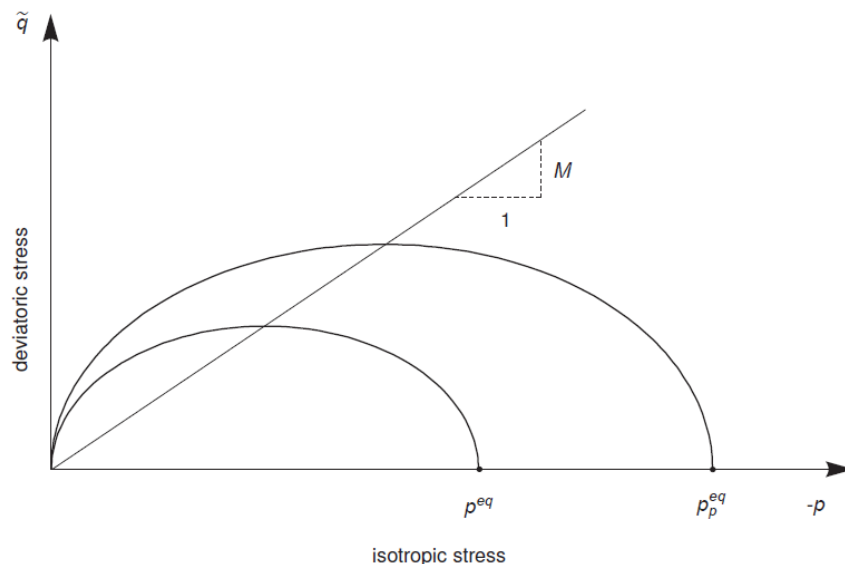


Figura 9 – Diagramma dell'ellisse p^{eq} nel piano p - q

Il parametro ϕ_{cv} è l'angolo di attrito dello stato critico critico. La pressione equivalente è costante lungo l'ellissoide nello spazio in termini di sforzi efficaci. Nella condizione di stato di sforzo normalmente consolidato si ha che la plasticizzazione avviene per:

$$\sigma'_2 = \sigma'_3 = K_0^{NC} \sigma'_1$$

$$p^{eq} = \sigma'_1 \left[\frac{1 + 2K_0^{nc}}{3} + \frac{3(1 - K_0^{nc})^2}{M^2(1 + 2K_0^{nc})} \right],$$

$$p_p^{eq} = \sigma_p \left[\frac{1 + 2K_0^{nc}}{3} + \frac{3(1 - K_0^{nc})^2}{M^2(1 + 2K_0^{nc})} \right]$$

Dove p_p^{eq} è la pressione di pre-consolidazione generalizzata e per valori noti di K_0^{NC} e p^{eq} si può calcolare σ'_1 , mentre p_p^{eq} si ottiene a partire da σ_p .

Omettendo le deformazioni elastiche si può calcolare:

$$-\dot{\varepsilon}_v^c = \frac{c}{\tau} \left(\frac{p^{eq}}{p_p^{eq}} \right)^{\frac{b-a}{c}} \quad \text{where} \quad p_p^{eq} = p_{p0}^{eq} \exp \left(\frac{-\varepsilon_v^c}{b-a} \right)$$

In questo caso si modificano i coefficienti a, b, c delle equazioni monodimensionali del creep:

$$\kappa^* \approx 2a \qquad b = \lambda^* \qquad \mu^* = c$$

Si specifica come la stima di κ^* sia una approssimazione, in quanto durante scarico e ricarico in condizioni edometriche il rapporto tra le componenti normali di sforzo cambia e quindi i cambiamenti in p' portano ad una deviazione di σ'_1 .

Usando dunque i nuovi parametri si ha:

$$-\dot{\varepsilon}_v^c = \frac{\mu^*}{\tau} \left(\frac{p^{eq}}{p_p^{eq}} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \quad \text{with} \quad p_p^{eq} = p_{p0}^{eq} \exp \left(\frac{-\varepsilon_v^c}{\lambda^* - \kappa^*} \right)$$

Al fine di introdurre deformazioni viscosi generalizzate, si assume che tali deformazioni siano semplicemente deformazioni plastiche dipendenti dal tempo.

Al fine di formulare la legge di flusso necessaria è conveniente adottare la notazione vettoriale:

$$\underline{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & \sigma_2 & \sigma_3 \end{pmatrix}^T \quad \text{and} \quad \underline{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & \varepsilon_2 & \varepsilon_3 \end{pmatrix}^T$$

Dove T identifica la trasposta. Similmente a quanto fatto per la formulazione monodimensionale, in cui convivevano deformazioni elastiche e viscosi, si usa la legge di Hooke per la parte elastica e la legge di flusso per la parte viscosa:

$$\underline{\dot{\varepsilon}} = \underline{\dot{\varepsilon}}^e + \underline{\dot{\varepsilon}}^c = \underline{D}^{-1} \underline{\dot{\sigma}}' + \lambda \frac{\partial g^c}{\partial \underline{\sigma}'}$$

Dove la matrice di elasticità e la funzione potenziale sono definite come:

$$\underline{D}^{-1} = \frac{1}{E_{ur}} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_{ur} & -\nu_{ur} \\ -\nu_{ur} & 1 & -\nu_{ur} \\ -\nu_{ur} & -\nu_{ur} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad g^c = p^{eq}$$

Dove E_{ur} si relaziona all'indice di rigonfiamento modificato. Si usa la pressione equivalente come una funzione del potenziale plastico per derivare le componenti di incremento deformativo viscoso. Il pedice "ur" identifica il fatto che si sta descrivendo il comportamento di scarico e ricarico.

$$\dot{\varepsilon}_v^c = \dot{\varepsilon}_1^c + \dot{\varepsilon}_2^c + \dot{\varepsilon}_3^c = \lambda \cdot \left(\frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_1} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_2} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_3} \right) = \lambda \cdot \frac{\partial p^{eq}}{\partial p'} = \lambda \cdot \alpha$$

Inoltre è possibile definire $\alpha = \partial p^{eq} / \partial p'$:

$$\underline{\dot{\varepsilon}} = \underline{D}^{-1} \underline{\dot{\sigma}}' + \frac{\dot{\varepsilon}_v^c}{\alpha} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \underline{\sigma}'} = \underline{D}^{-1} \underline{\dot{\sigma}}' - \frac{1}{\alpha} \frac{\mu^*}{\tau} \left(\frac{p^{eq}}{p_p^{eq}} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \underline{\sigma}'}$$

Dove:

$$p_p^{eq} = p_{p0}^{eq} \exp \left(\frac{-\varepsilon_v^c}{\lambda^* - \kappa^*} \right)$$

3.2.5 Formulazione della condizione di rottura (PLAXIS 2D)

La formulazione del creep non include la rottura del materiale. Si utilizza quindi un criterio di rottura alla Mohr-Coulomb, che si aggiunge al modello "soft soil creep", generando deformazioni plastiche appena la condizione di rottura è raggiunta.

Quindi appena il criterio di rottura alla Mohr-Coulomb è raggiunto si ha $f=0$, si sviluppano deformazioni plastiche istantanee in accordo con quanto espresso dalla legge di flusso.

$$\underline{\dot{\varepsilon}}^p = \lambda \partial g / \partial \underline{\sigma}' \text{ with } g = g(\sigma', \psi)$$

3.2.6 Parametri del modello Soft Soil Creep (PLAXIS 2D)

Come conclusione dei paragrafi precedenti i parametri del modello soft soil creep sono i seguenti:

c : coesione efficace [kPa]

ϕ : angolo di attrito [°]

k^* : indice di rigonfiamento modificato [-]

λ^* : indice di compressione modificato [-]

μ^* : indice viscoso modificato [-]

Cc: Indice di compressione [-]

Cs: Indice di rigonfiamento [-]

Ca: Indice viscoso per la compressione secondaria [-]

e_{init} : indice dei vuoti iniziale [-]

4 DESCRIZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO

Nel presente capitolo si riporta la descrizione delle sezioni di calcolo esaminate e le fasi di calcolo effettuate.



Figura 10 – Sezioni di calcolo e tratti in jet-grouting

Le sezioni in cui è presente il taglione in jet grouting sono la sezione 1, la sezione 2 e la sezione 7.

4.1 SEZIONE 1

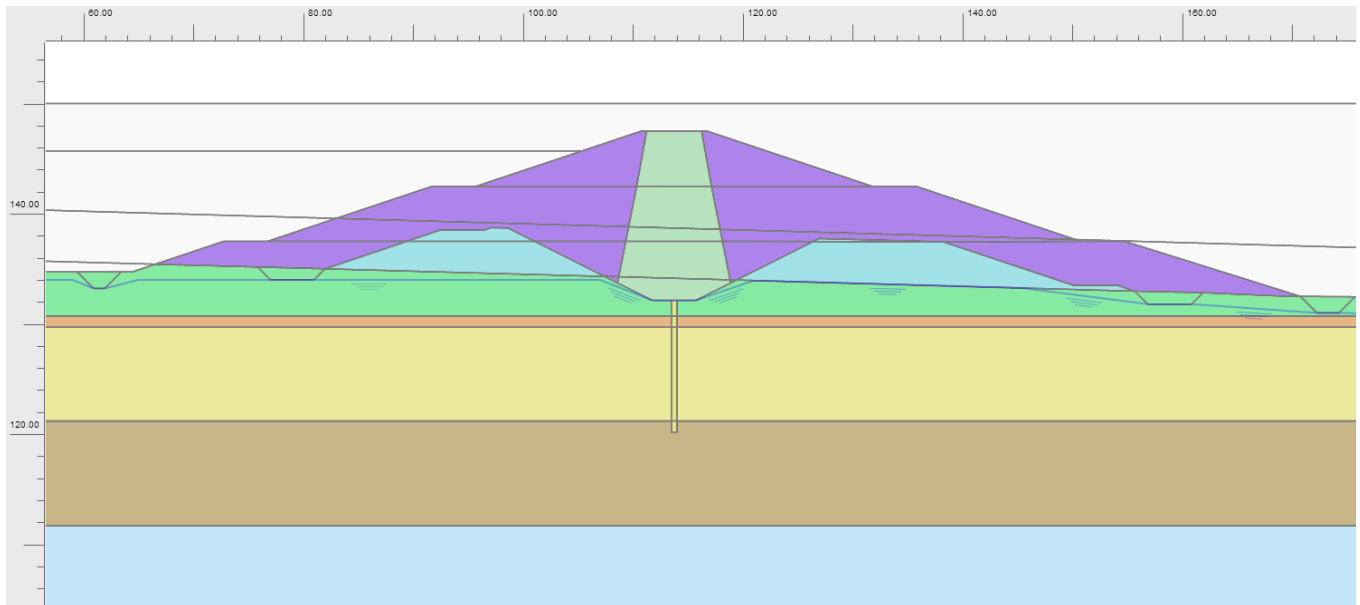


Figura 11 – Sezione di calcolo 1

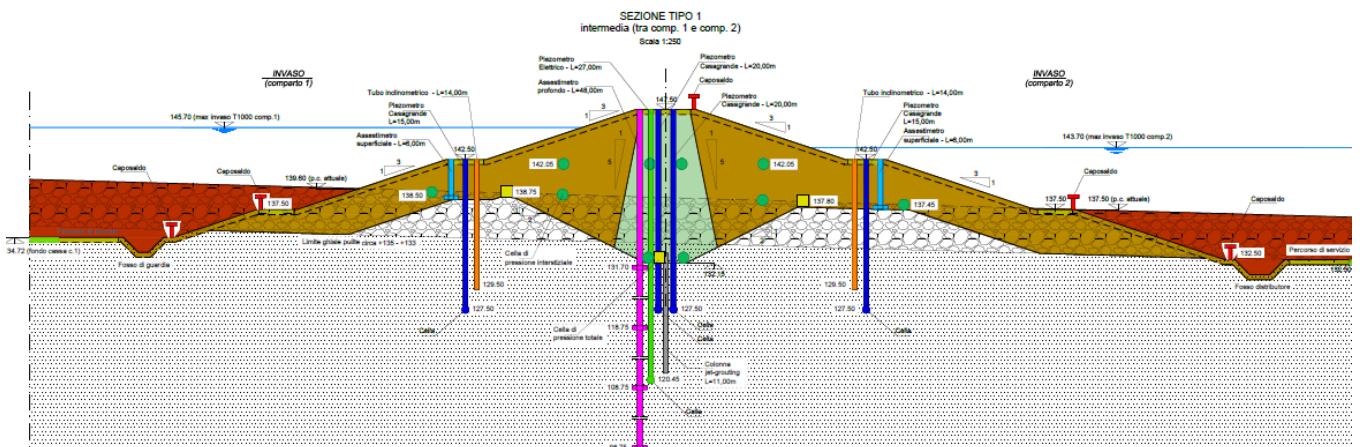


Figura 12 – Sezione tipologica – Sezione 1

4.1.1 Fasi di calcolo – Sezione 1

- 1) Geostatico;
- 2) Azzeramento degli spostamenti sviluppati nella fase geostatica;
- 3) Scavo e sbancamenti;
- 4) Costruzione del primo livello del rilevato (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);

- 5) Costruzione del secondo livello del rilevato (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 6) Costruzione del terzo livello del rilevato (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 7) Inizio della fase di consolidazione fino a 7 giorni;
- 8) Fase di consolidazione fino a 30 giorni;
- 9) Fase di consolidazione fino a 90 giorni;
- 10) Fase di consolidazione fino a 180 giorni;
- 11) Fase di consolidazione fino a 360 giorni;
- 12) Fase di consolidazione fino a 840 giorni;
- 13) Fase di consolidazione fino a 100 anni;

4.2 SEZIONE 2

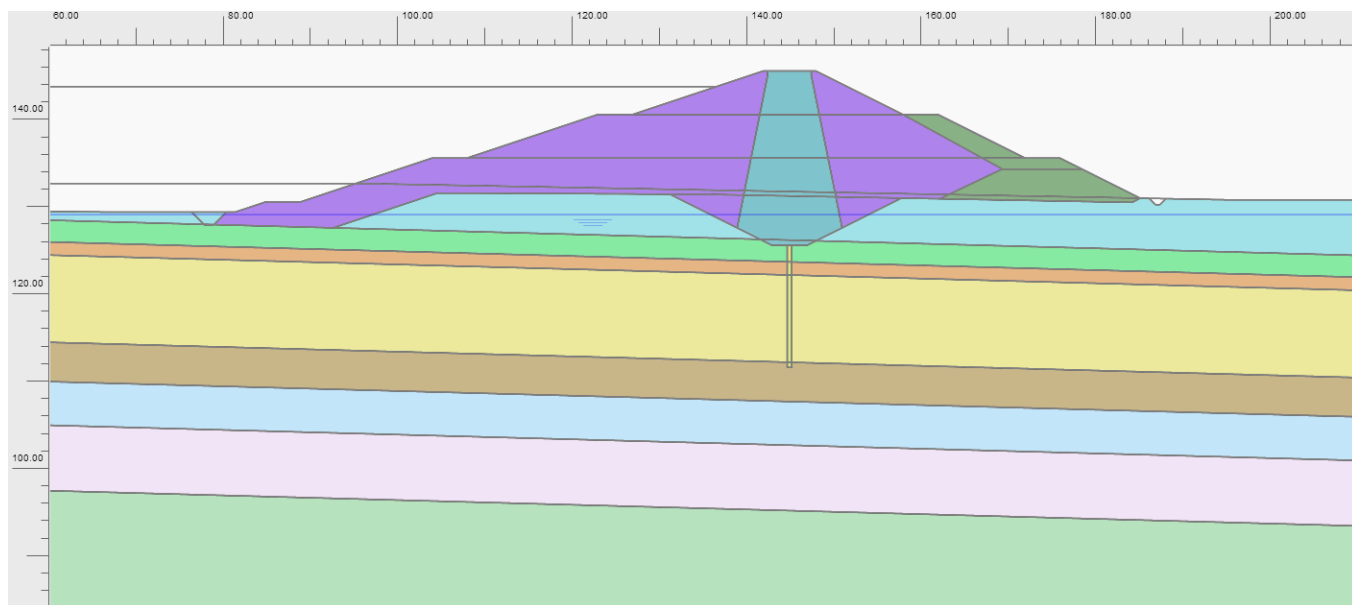


Figura 13 – Sezione di calcolo 2

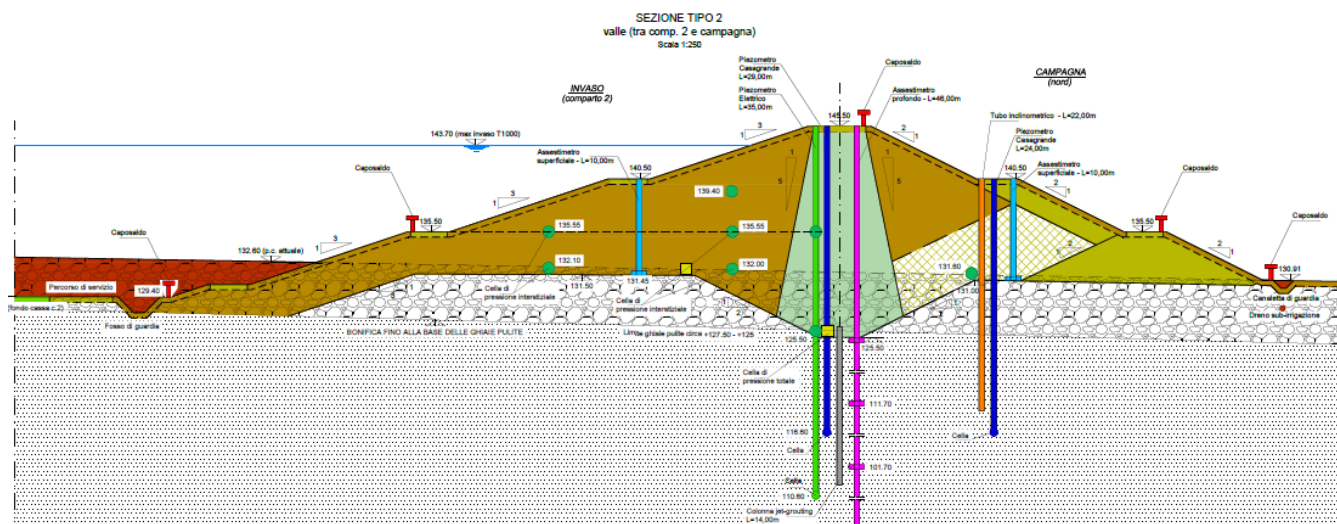


Figura 14 – Sezione tipologica – Sezione 2

4.2.1 Fasi di calcolo – Sezione 2

- 1) Geostatico;
- 2) Azzeramento degli spostamenti sviluppati nella fase geostatica;
- 3) Scavo e sbancamenti;
- 4) Costruzione del primo livello del rilevato (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);

- 5) Costruzione del secondo livello del rilevato (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 6) Costruzione del terzo livello del rilevato (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 7) Inizio della fase di consolidazione fino a 7 giorni;
- 8) Fase di consolidazione fino a 30 giorni;
- 9) Fase di consolidazione fino a 90 giorni;
- 10) Fase di consolidazione fino a 180 giorni;
- 11) Fase di consolidazione fino a 360 giorni;
- 12) Fase di consolidazione fino a 840 giorni;
- 13) Fase di consolidazione fino a 100 anni;

4.3 SEZIONE 3

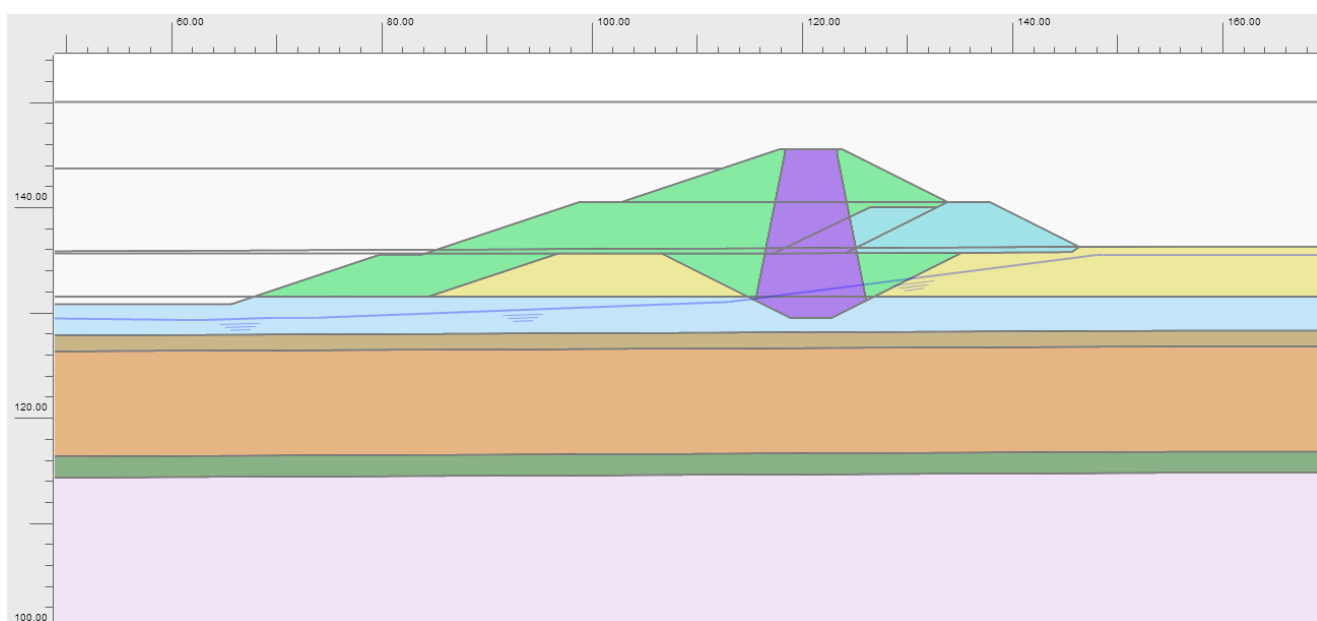


Figura 15 – Sezione di calcolo 3

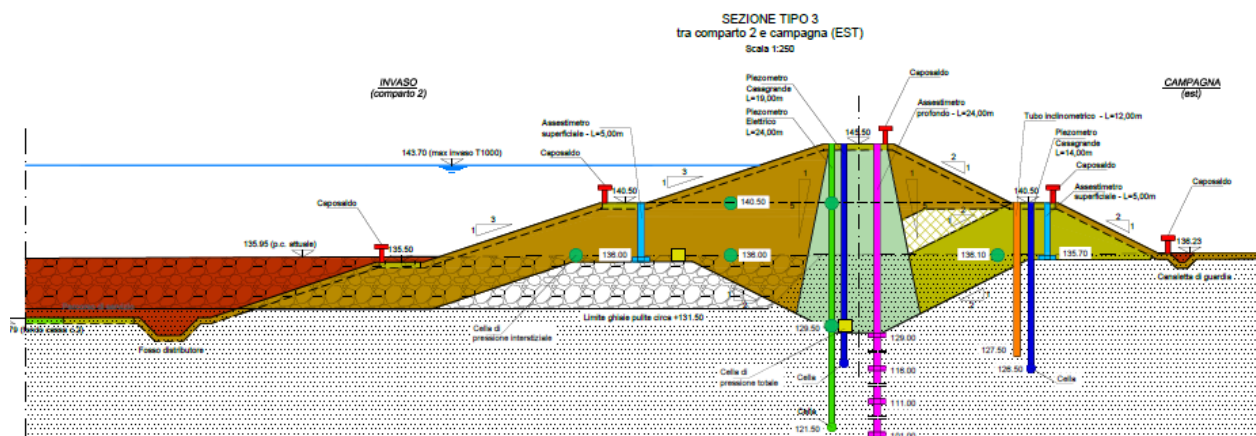


Figura 16 – Sezione tipologica – Sezione 3

4.3.1 Fasi di calcolo – Sezione 3

- 1) Geostatico;
- 2) Azzeramento degli spostamenti sviluppati nella fase geostatica;
- 3) Scavo e sbancamenti;
- 4) Costruzione del primo livello del rilevato (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 5) Costruzione del secondo livello del rilevato (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 6) Costruzione del terzo livello del rilevato (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 7) Inizio della fase di consolidazione fino a 7 giorni;
- 8) Fase di consolidazione fino a 30 giorni;
- 9) Fase di consolidazione fino a 90 giorni;
- 10) Fase di consolidazione fino a 180 giorni;
- 11) Fase di consolidazione fino a 360 giorni;
- 12) Fase di consolidazione fino a 840 giorni;
- 13) Fase di consolidazione fino a 100 anni;

4.4 SEZIONE 4

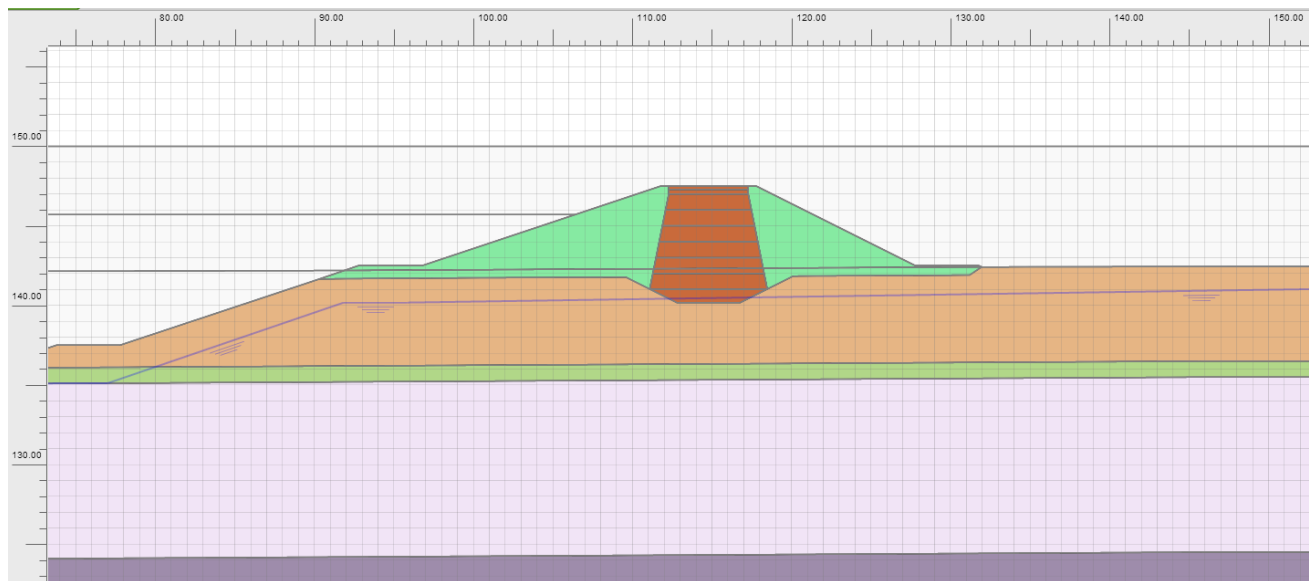


Figura 17 – Sezione di calcolo 4

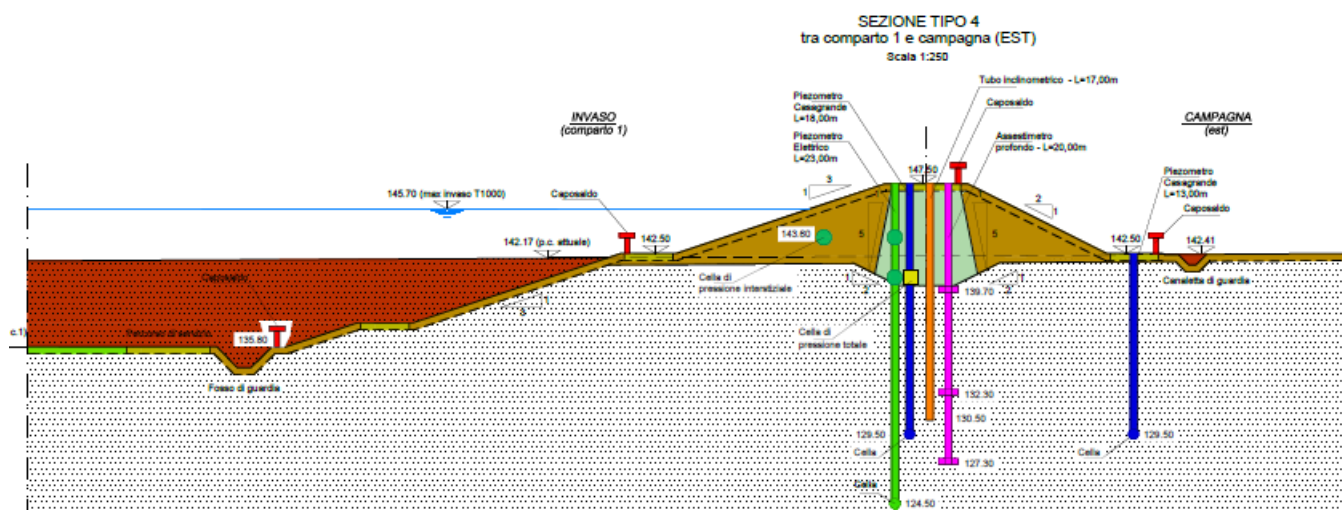


Figura 18 – Sezione tipologica – Sezione 4

4.4.1 Fasi di calcolo – Sezione 4

- 1) Geostatico;
- 2) Azzeramento degli spostamenti sviluppati nella fase geostatica;
- 3) Scavo e sbancamenti;

- 4) Costruzione del rilevato, dato la sua altezza ridotta si esegue in un unico step di calcolo (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 5) Inizio della fase di consolidazione fino a 7 giorni;
- 6) Fase di consolidazione fino a 30 giorni;
- 7) Fase di consolidazione fino a 90 giorni;
- 8) Fase di consolidazione fino a 180 giorni;
- 9) Fase di consolidazione fino a 360 giorni;
- 10) Fase di consolidazione fino a 840 giorni;
- 11) Fase di consolidazione fino a 100 anni;

4.5 SEZIONE 5

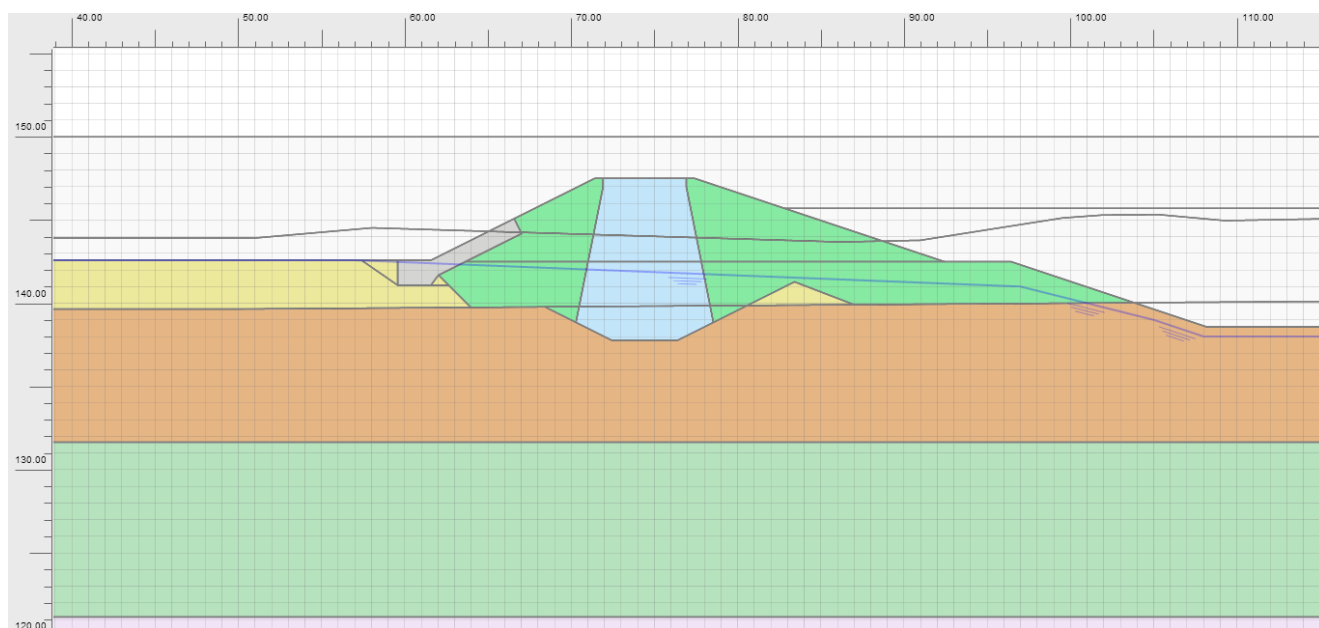


Figura 19 – Sezione di calcolo 5

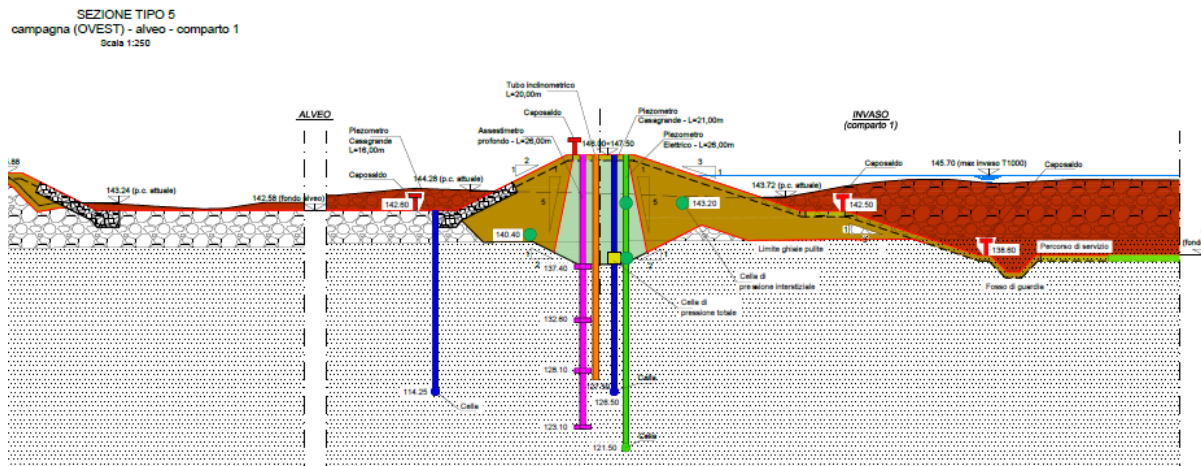


Figura 20 – Sezione tipologica – Sezione 5

4.5.1 Fasi di calcolo – Sezione 5

- 1) Geostatico;
- 2) Azzeramento degli spostamenti sviluppati nella fase geostatica;
- 3) Scavo e sbancamenti;
- 4) Costruzione del rilevato, dato la sua altezza ridotta si esegue in un unico step di calcolo (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 5) Inizio della fase di consolidazione fino a 7 giorni;
- 6) Fase di consolidazione fino a 30 giorni;
- 7) Fase di consolidazione fino a 90 giorni;
- 8) Fase di consolidazione fino a 180 giorni;
- 9) Fase di consolidazione fino a 360 giorni;
- 10) Fase di consolidazione fino a 840 giorni;
- 11) Fase di consolidazione fino a 100 anni;

4.6 SEZIONE 6

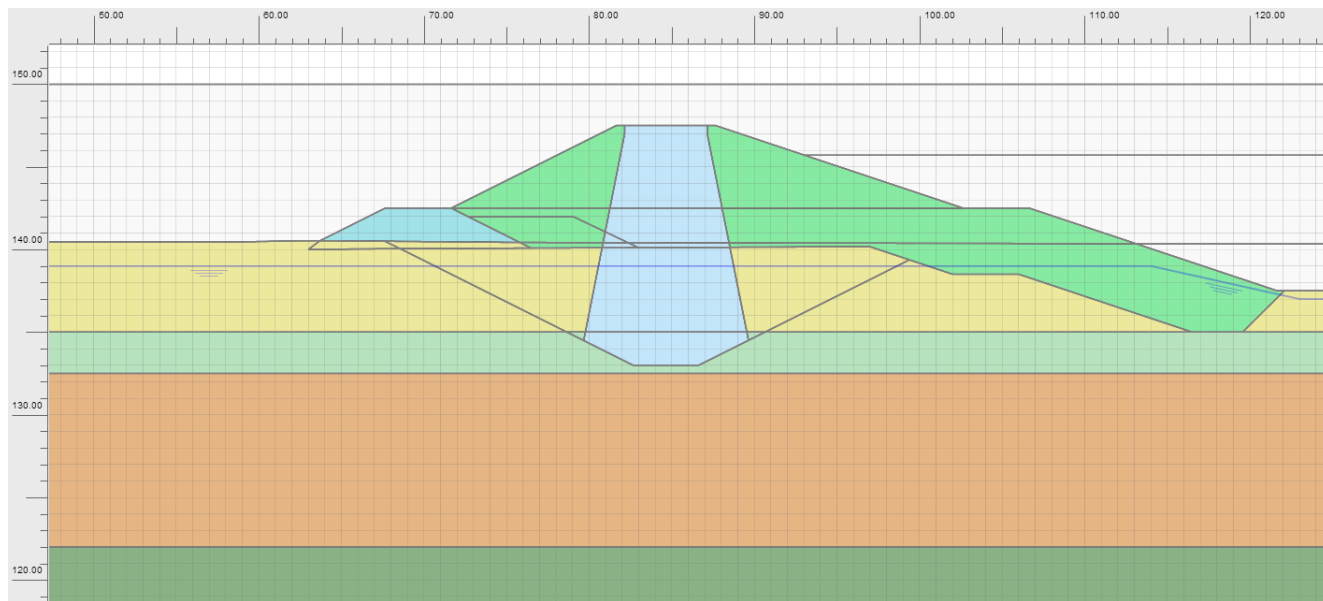


Figura 21 – Sezione di calcolo 6

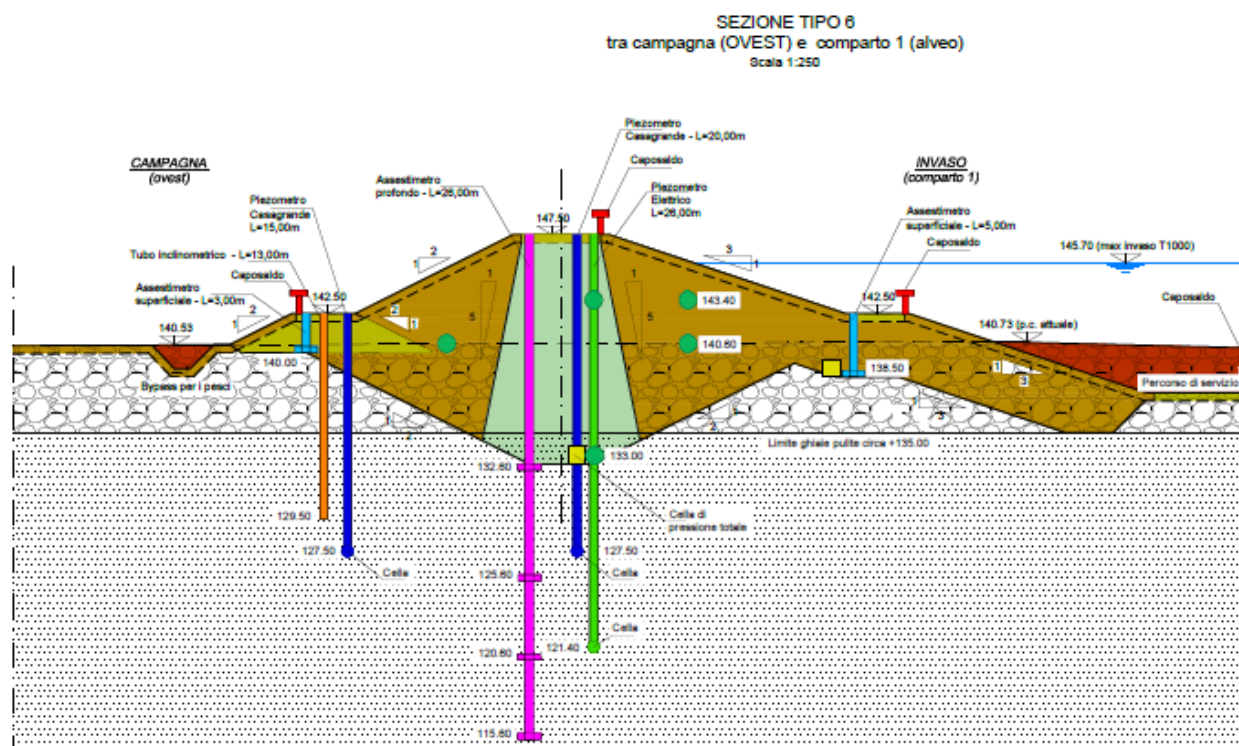


Figura 22 – Sezione tipologica – Sezione 6

4.6.1 Fasi di calcolo – Sezione 6

- 1) Geostatico;
- 2) Azzeramento degli spostamenti sviluppati nella fase geostatica;
- 3) Scavo e sbancamenti;
- 4) Costruzione del rilevato, dato la sua altezza ridotta si esegue in un unico step di calcolo (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 5) Inizio della fase di consolidazione fino a 7 giorni;
- 6) Fase di consolidazione fino a 30 giorni;
- 7) Fase di consolidazione fino a 90 giorni;
- 8) Fase di consolidazione fino a 180 giorni;
- 9) Fase di consolidazione fino a 360 giorni;
- 10) Fase di consolidazione fino a 840 giorni;
- 11) Fase di consolidazione fino a 100 anni;

4.7 SEZIONE 7

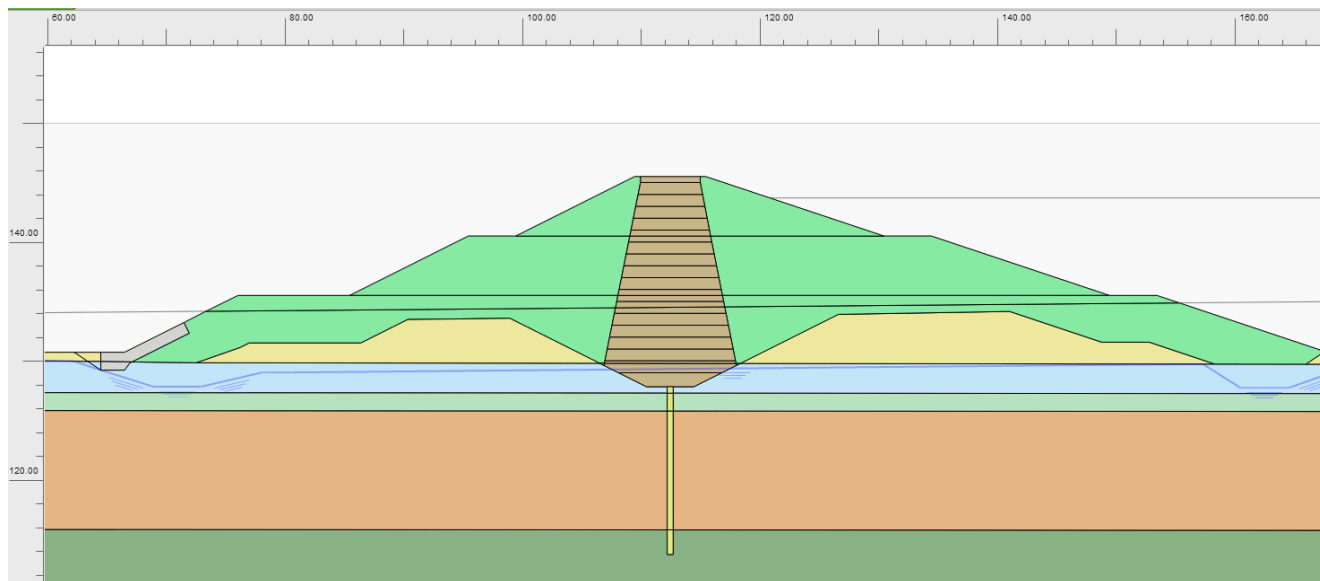


Figura 23 – Sezione di calcolo 7

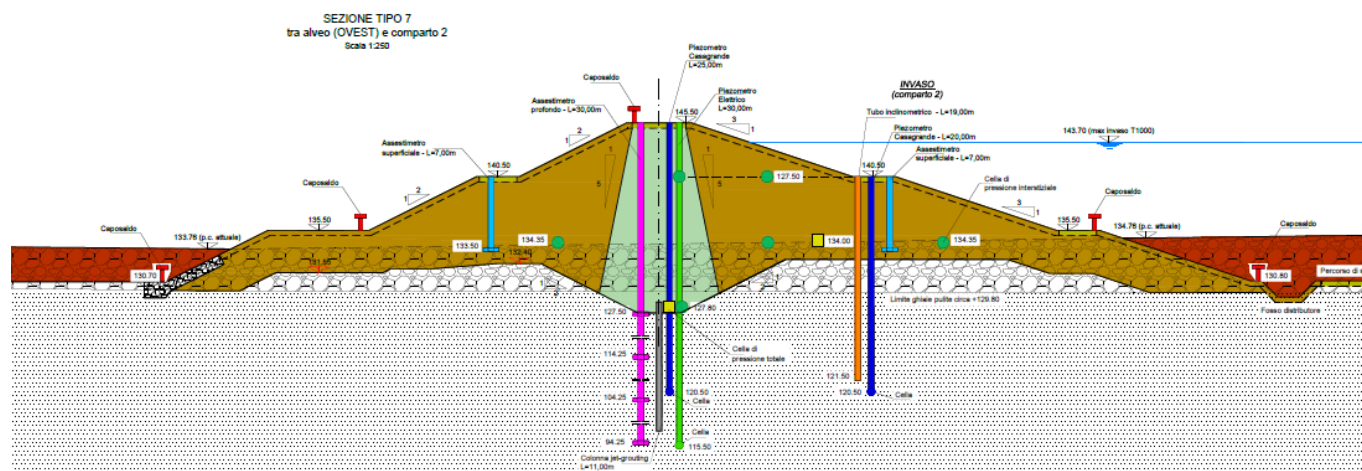


Figura 24 – Sezione tipologica – Sezione 7

4.7.1 Fasi di calcolo – Sezione 7

- 1) Geostatico;
- 2) Azzeramento degli spostamenti sviluppati nella fase geostatica;
- 3) Scavo e sbancamenti;
- 4) Costruzione del primo livello del rilevato (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);

- 5) Costruzione del secondo livello del rilevato (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 6) Costruzione del terzo livello del rilevato (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 7) Inizio della fase di consolidazione fino a 7 giorni;
- 8) Fase di consolidazione fino a 30 giorni;
- 9) Fase di consolidazione fino a 90 giorni;
- 10) Fase di consolidazione fino a 180 giorni;
- 11) Fase di consolidazione fino a 360 giorni;
- 12) Fase di consolidazione fino a 840 giorni;
- 13) Fase di consolidazione fino a 100 anni;

4.8 SEZIONE SU SONDAGGIO S14

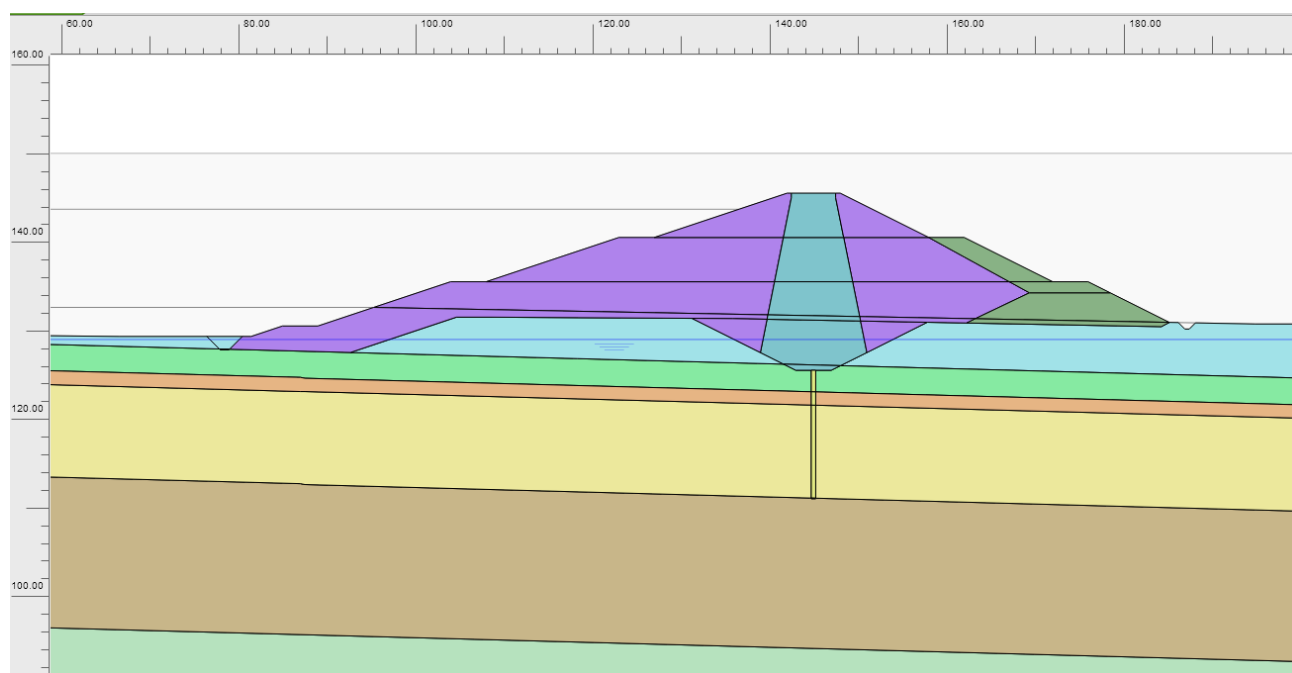


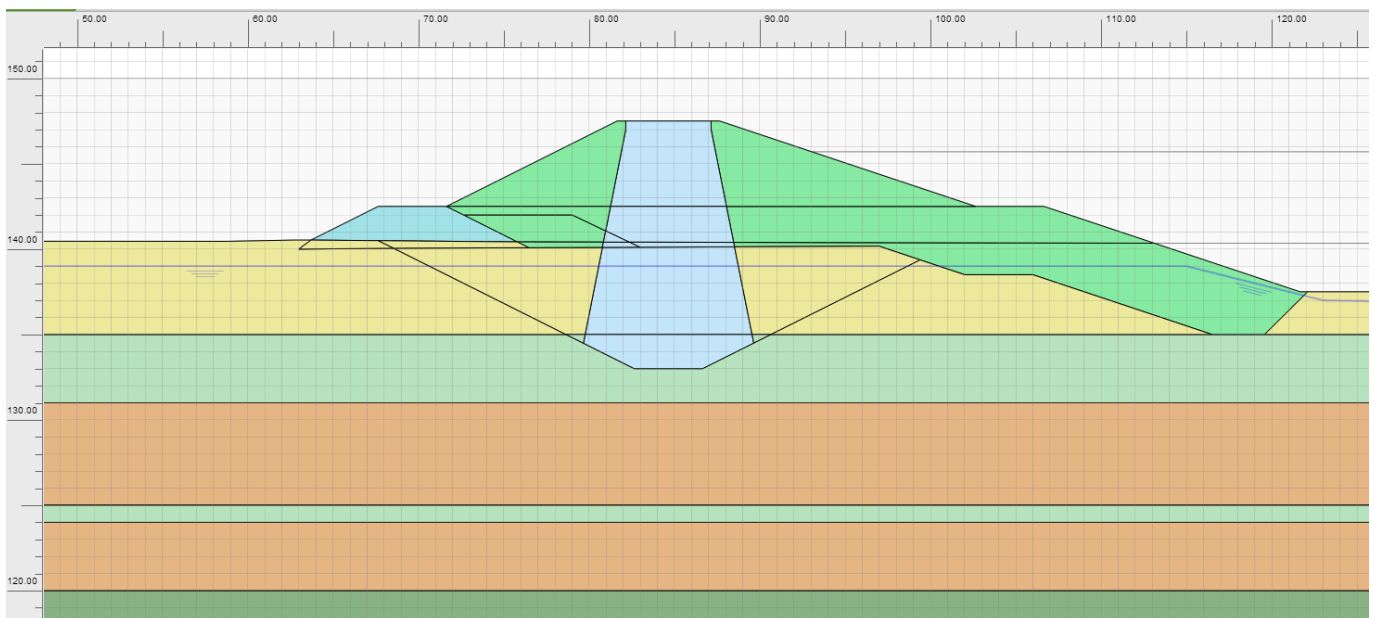
Figura 25 – Sezione di calcolo su sondaggio S14

4.8.1 Fasi di calcolo – Sezione S14

- 1) Geostatico
- 2) Azzeramento degli spostamenti sviluppati nella fase geostatica

- 3) Scavo e sbancamenti
- 4) Costruzione del primo livello del rilevato (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 5) Costruzione del secondo livello del rilevato (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 6) Costruzione del terzo livello del rilevato (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 7) Inizio della fase di consolidazione fino a 7 giorni;
- 8) Fase di consolidazione fino a 30 giorni;
- 9) Fase di consolidazione fino a 90 giorni;
- 10) Fase di consolidazione fino a 180 giorni;
- 11) Fase di consolidazione fino a 360 giorni;
- 12) Fase di consolidazione fino a 840 giorni;
- 13) Fase di consolidazione fino a 100 anni;

4.9 SEZIONE SU SONDAGGIO S2_PG/S7



4.9.1 Fasi di calcolo – Sezione S2_PG/S7

- 12) Geostatico;

- 13) Azzeramento degli spostamenti sviluppati nella fase geostatica;
- 14) Scavo e sbancamenti;
- 15) Costruzione del rilevato, dato la sua altezza ridotta si esegue in un unico step di calcolo (calcolo effettuato in condizioni non drenate per gli strati limo-argillosi);
- 16) Inizio della fase di consolidazione fino a 7 giorni;
- 17) Fase di consolidazione fino a 30 giorni;
- 18) Fase di consolidazione fino a 90 giorni;
- 19) Fase di consolidazione fino a 180 giorni;
- 20) Fase di consolidazione fino a 360 giorni;
- 21) Fase di consolidazione fino a 840 giorni;
- 22) Fase di consolidazione fino a 100 anni;

5 RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE

5.1 SEZIONE 1

Per quanto riguarda la Sezione 1 di calcolo si mostrano i cedimenti totali ottenuti a 180 giorni dall'inizio della costruzione del rilevato che è il tempo ipotizzato per la costruzione del rilevato. A questa data le sovrappressioni generate dall'applicazione del carico dovuto alla costruzione del rilevato sono già completamente dissipate, per cui l'effetto post-costruzione che ci si aspetta è eventualmente connesso con il comportamento viscoso degli strati argillosi e del nucleo del corpo del rilevato

A 180gg, quindi a consolidazione avvenuta, si ottiene quindi un cedimento massimo in testa al rilevato di circa 0.66 m, mentre al piano di fondazione il cedimento massimo raggiunto è di 0.52 m.

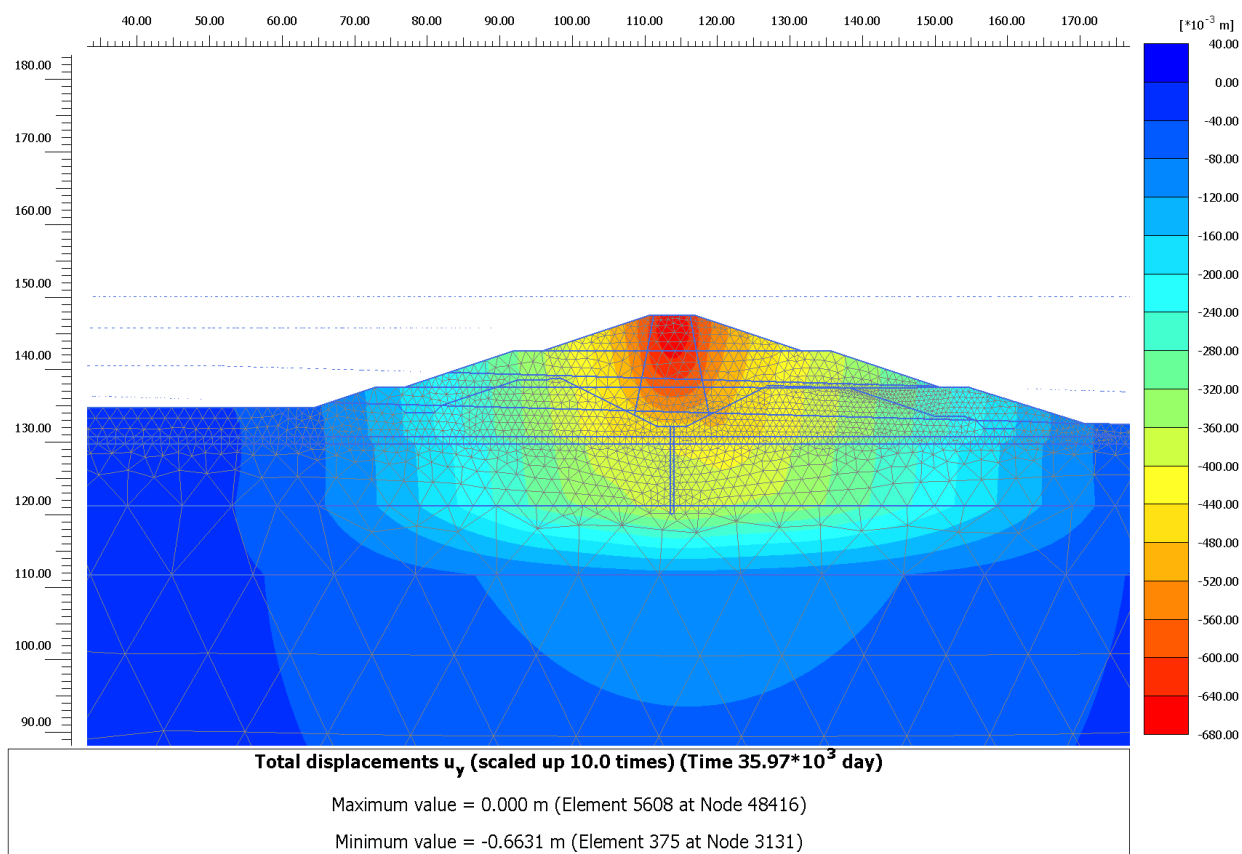


Figura 26 – Cedimenti 180 giorni

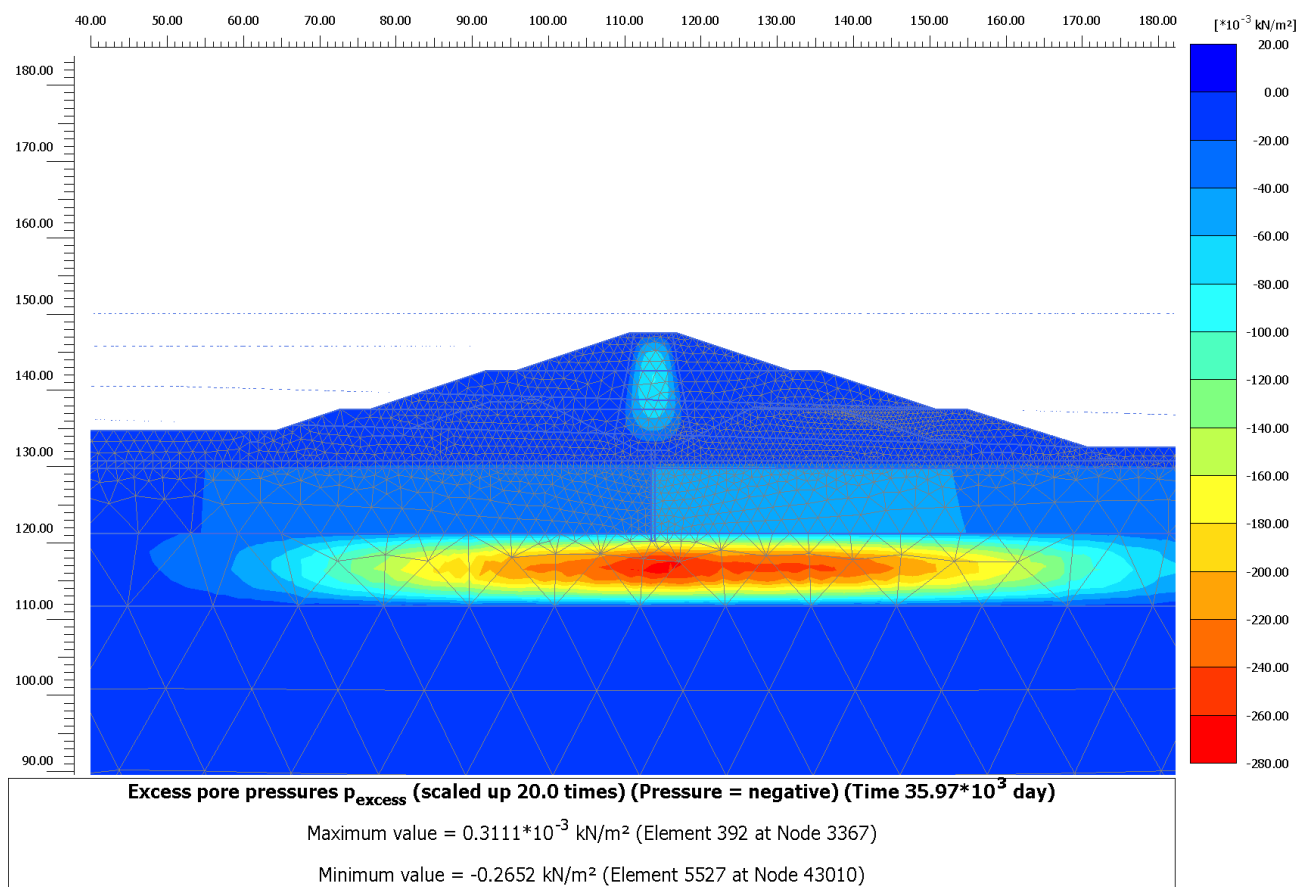


Figura 27 – Sovrapressioni trascurabili a 180 giorni

A fine costruzione dell'intera opera della cassa di espansione, periodo corrispondente a 480 giorni dalla fine della costruzione del rilevato in esame (FASE 7 del cronoprogramma), si ottiene invece un cedimento massimo in testa pari a 0.7030 m, mentre alla base fondazione si ottiene un valore di cedimento pari a 0.55 m.

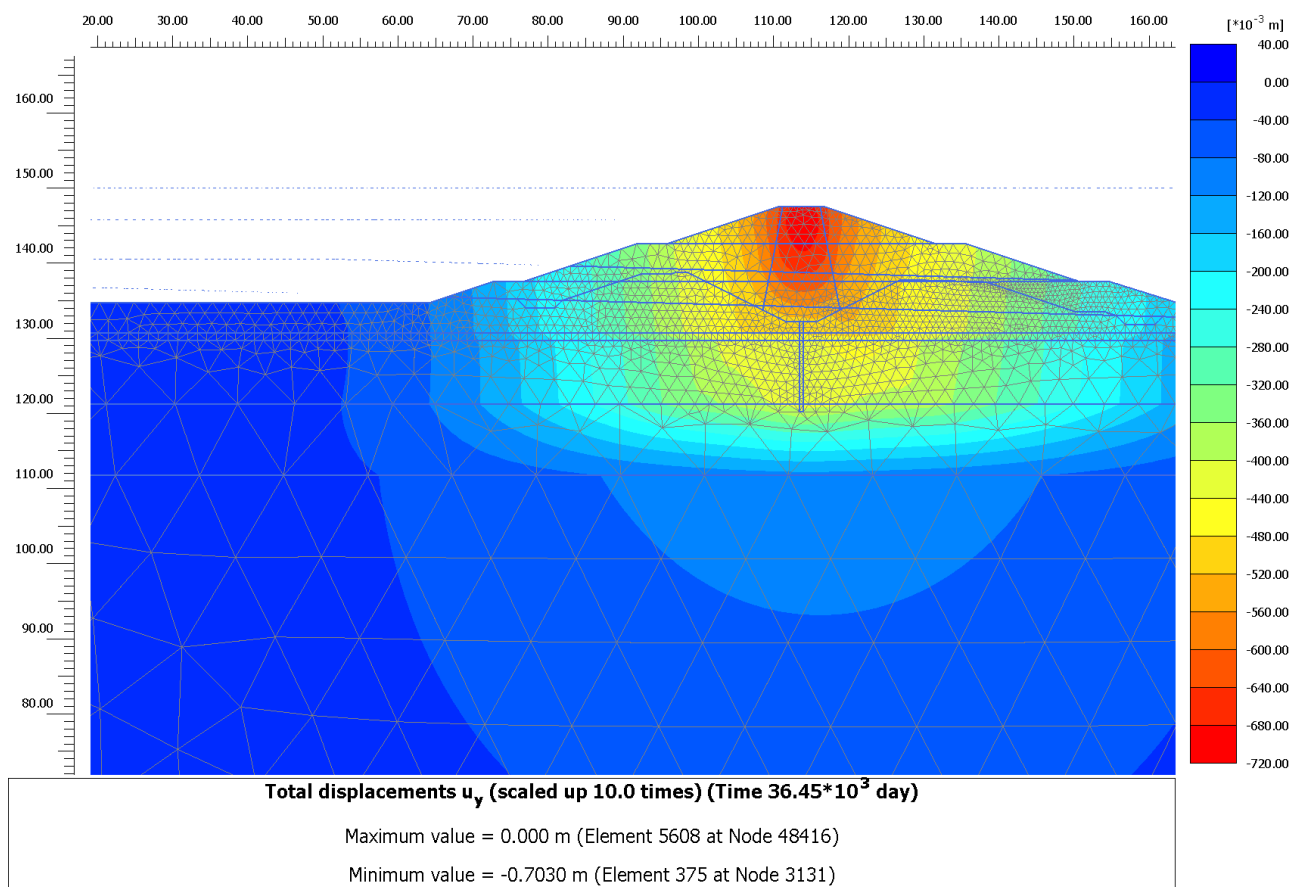


Figura 28 – Cedimenti 480 giorni

Nel lungo periodo, equivalente a 100 anni, si ottiene, ipotizzando un comportamento viscoso delle argille in base all'esito delle prove edometriche (consolidazione secondaria), un cedimento totale (considerando anche i cedimenti a 180gg e a 480gg) in testa al rilevato di circa 0.8274 m, mentre a piano fondazione si raggiunge un valore di 0.68 m.

La differenza tra i cedimenti a lungo termine e quelli a fine costruzione dell'intera opera (480 gg) forniscono il cedimento effettivo esibito dal rilevato nel corso della sua vita durante l'esercizio delle sue funzioni. Tale differenza risulta essere, per la testa del rilevato stesso pari a circa 0.1274 m, mentre alla sua base si ha una differenza di circa 0.13 m.

Il cedimento così valutato, ritenuto comunque cautelativo, è compatibile con il franco stabilito per il progetto dei rilevati arginali in esame, in quanto tali abbassamenti non determinano una possibile tracimazione dell'invaso per qualsiasi tempo di ritorno considerato.

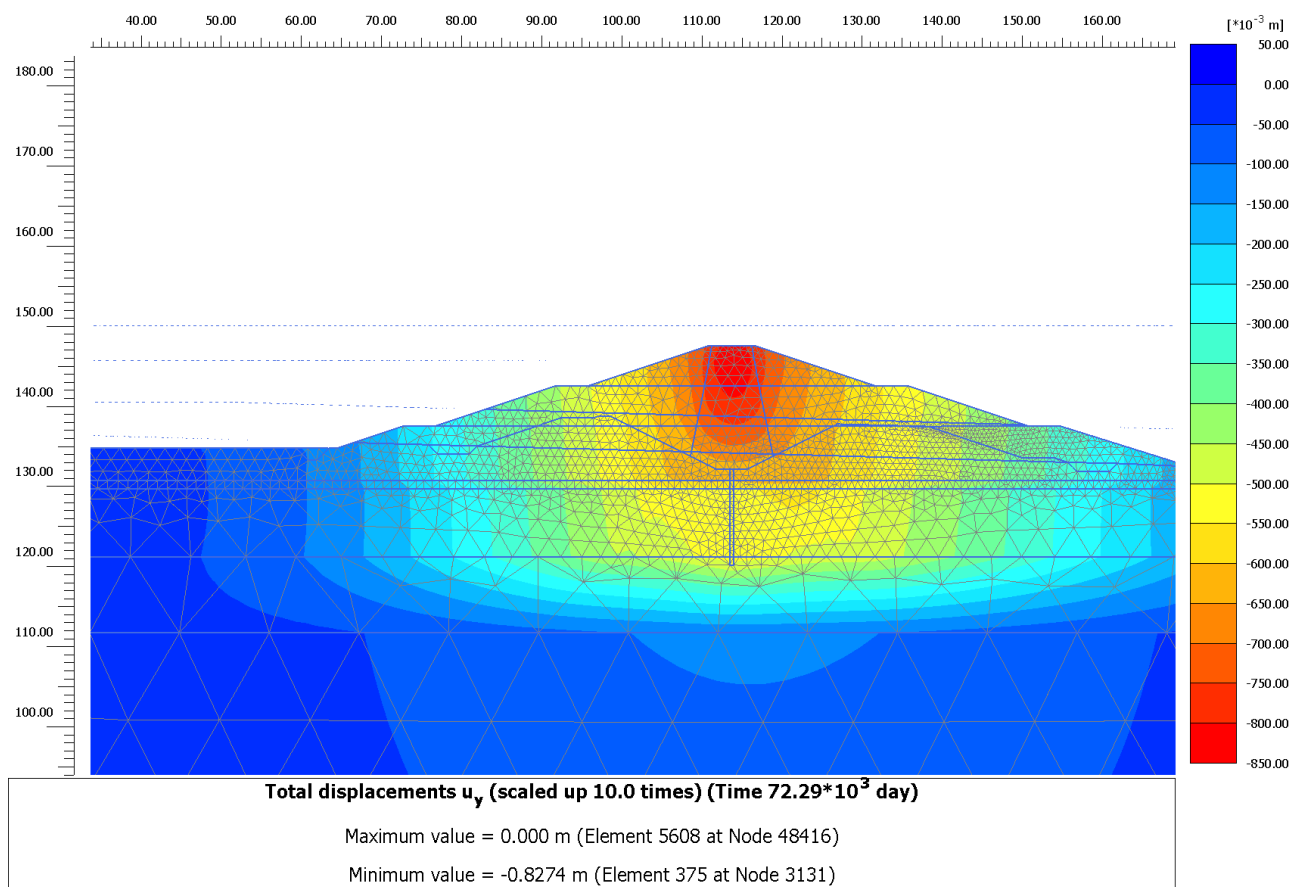


Figura 29 – Cedimenti 100 anni

Si mostra nella figura seguente come non siano presenti consistenti plasticizzazioni nella zona tra il nucleo di argilla e il materiale da rilevato grossolano, questo porta infatti ad escludere la presenza di cedimenti differenziali all'interno del rilevato zonato.

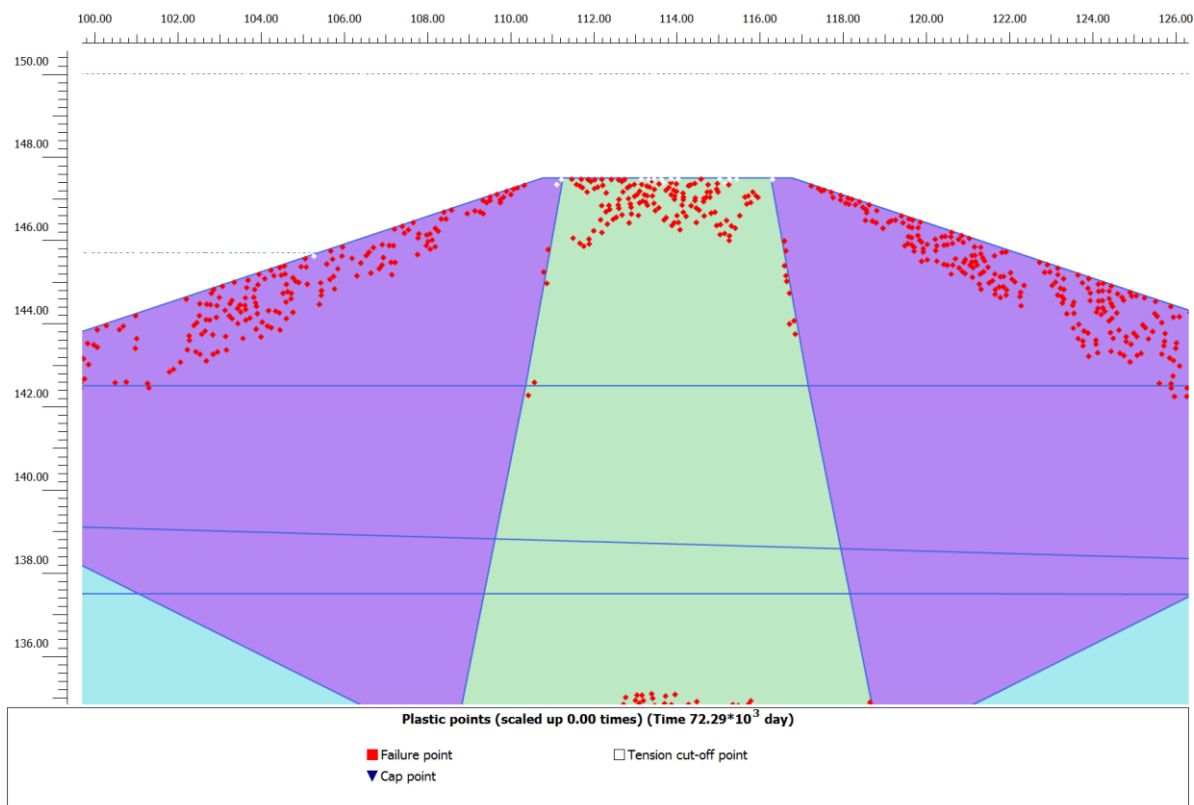


Figura 30 – Plasticizzazioni a lungo termine all'interno del rilevato zonato

5.2 SEZIONE 2

Per quanto riguarda la Sezione 2 di calcolo si mostrano i cedimenti totali ottenuti a 180 giorni dall'inizio della costruzione del rilevato che è il tempo ipotizzato per la costruzione del rilevato. A questa data le sovrappressioni generate dall'applicazione del carico dovuto alla costruzione del rilevato sono già completamente dissipate, per cui l'effetto post-costruzione che ci si aspetta è eventualmente connesso con il comportamento viscoso degli strati argillosi e del nucleo del corpo del rilevato

Si ottiene quindi un cedimento massimo in testa al rilevato di circa 1.27 m, mentre al piano di fondazione il cedimento massimo raggiunto è di 0.91 m.

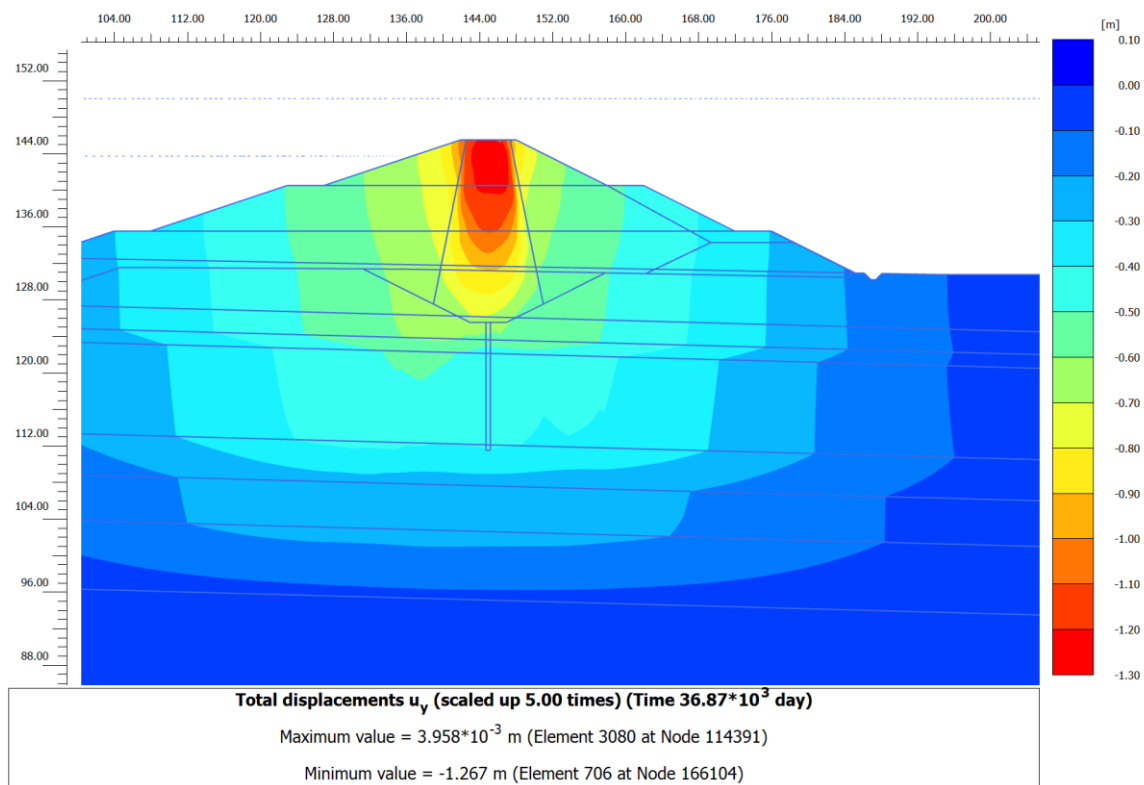


Figura 31 – Cedimenti 180 giorni

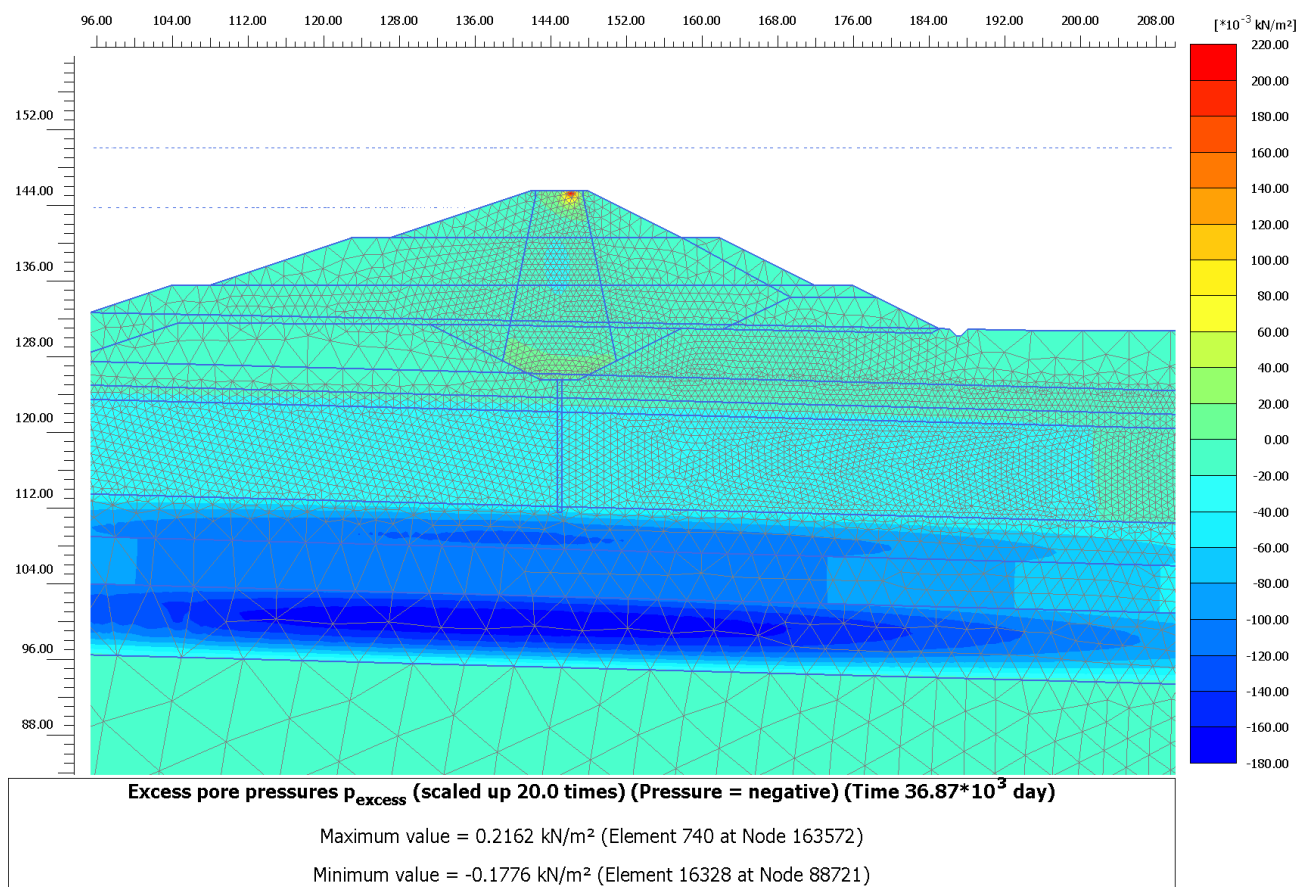


Figura 32 – Sovrapressioni trascurabili a 180 giorni

A fine costruzione dell'intera opera della cassa di espansione, periodo corrispondente a 270 giorni dalla fine della costruzione del rilevato in esame (FASE 10 del cronoprogramma), si ottiene invece un cedimento massimo in testa pari a 1.279 m, mentre alla base fondazione si ottiene un valore di cedimento pari a 0.92 m.

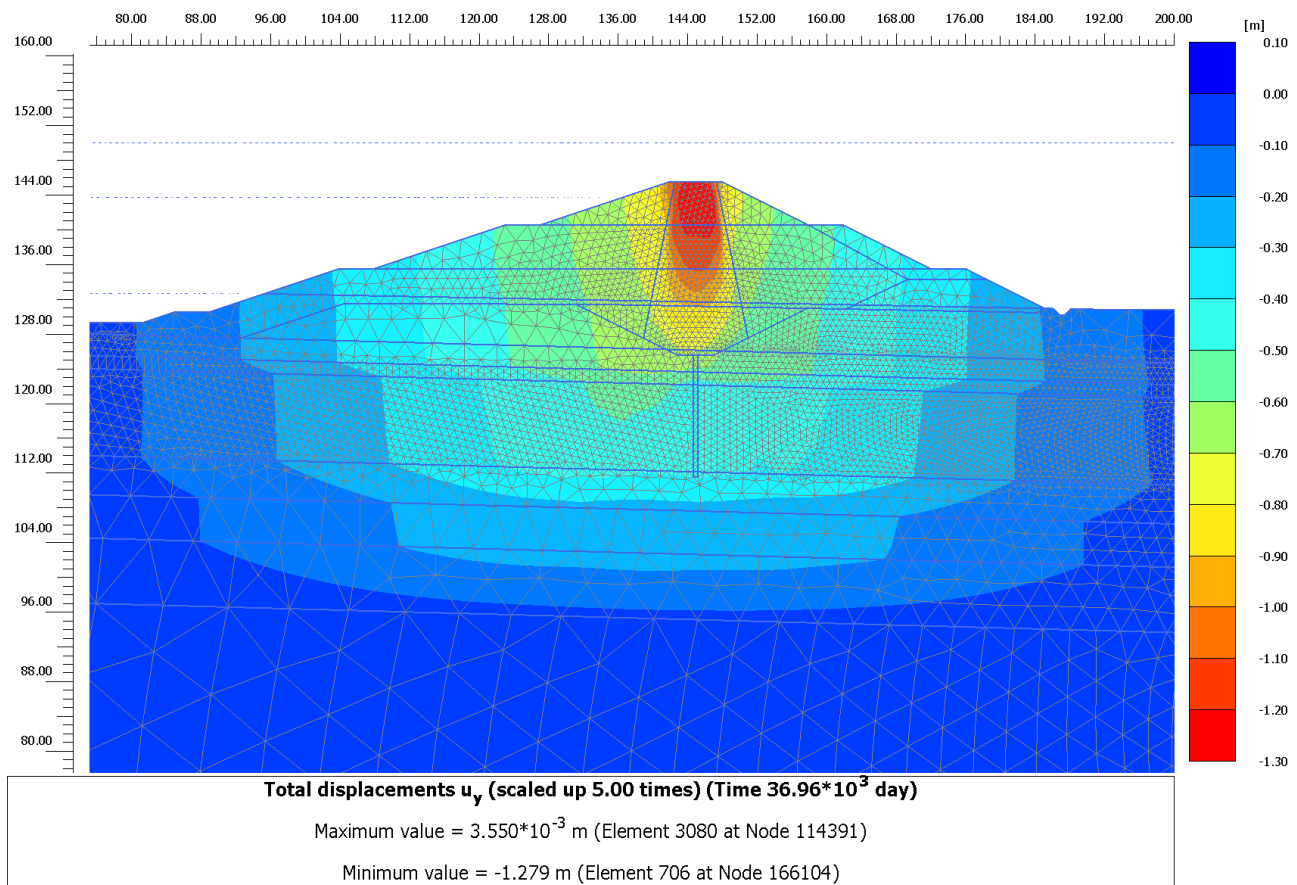


Figura 33 – Cedimento a 270 giorni

Nel lungo periodo, equivalente a 100 anni, si ottiene, ipotizzando un comportamento viscoso delle argille in base all'esito delle prove edometriche (consolidazione secondaria), un cedimento totale (considerando anche i cedimenti a 180gg e a 270 gg) in testa al rilevato di circa 1.42 m, mentre a piano fondazione si raggiunge un valore di 1.05 m.

La differenza tra i cedimenti a lungo termine e quelli a fine costruzione dell'intera opera (270 gg) forniscono il cedimento effettivo esibito dal rilevato nel corso della sua vita durante l'esercizio delle sue funzioni.

Tale differenza risulta essere, per la testa del rilevato stesso pari a circa 0.14 m, mentre alla sua base si ha una differenza di circa 0.13 m.

Il cedimento così valutato, ritenuto comunque cautelativo, è compatibile con il franco stabilito per il progetto dei rilevati arginali in esame, in quanto tali abbassamenti non determinano una possibile tracimazione dell'invaso per qualsiasi tempo di ritorno considerato.

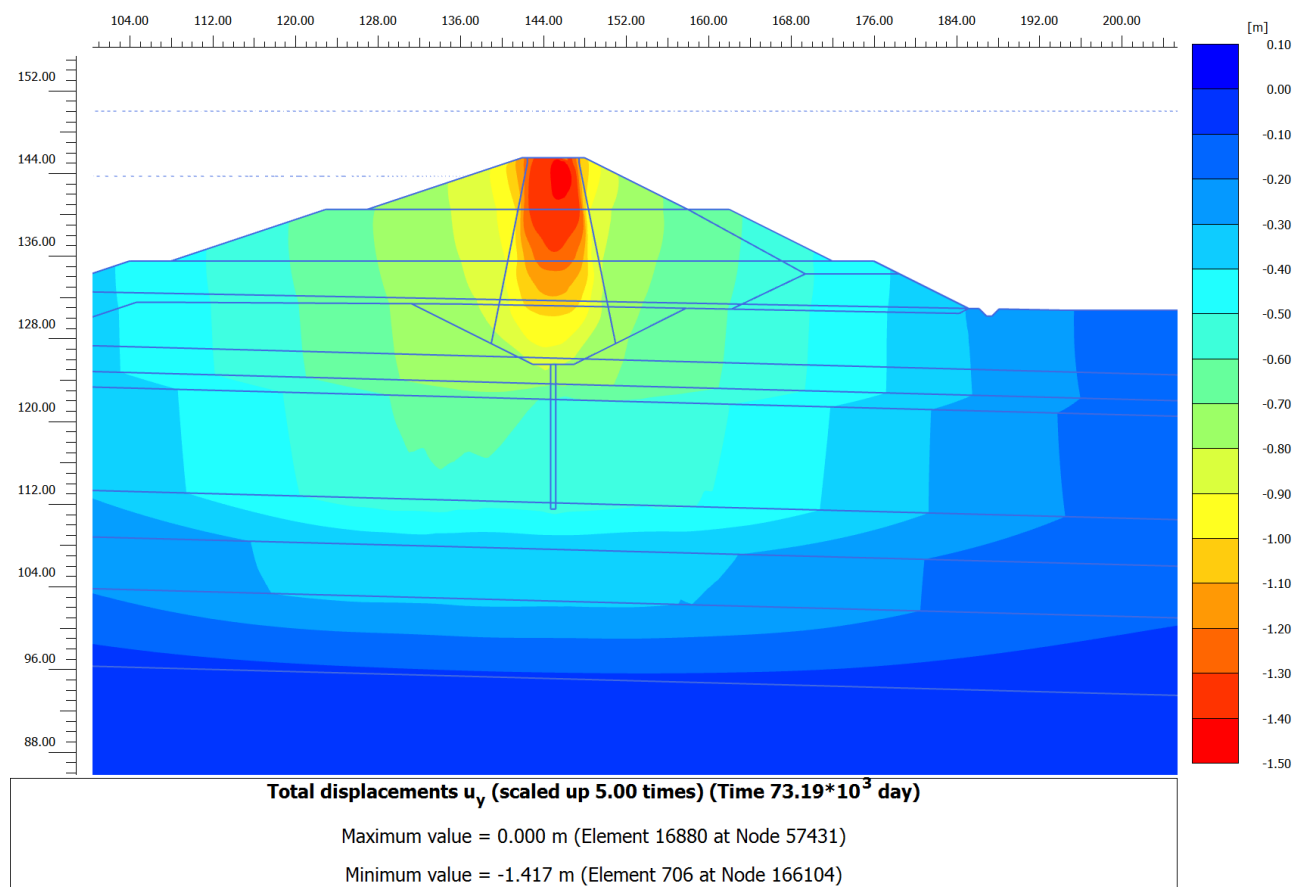


Figura 34 – Cedimenti 100 anni

Si mostra nella figura seguente come non siano presenti consistenti plasticizzazioni nella zona tra il nucleo di argilla e il materiale da rilevato grossolano, questo porta infatti ad escludere la presenza di cedimenti differenziali all'interno del rilevato zonato.

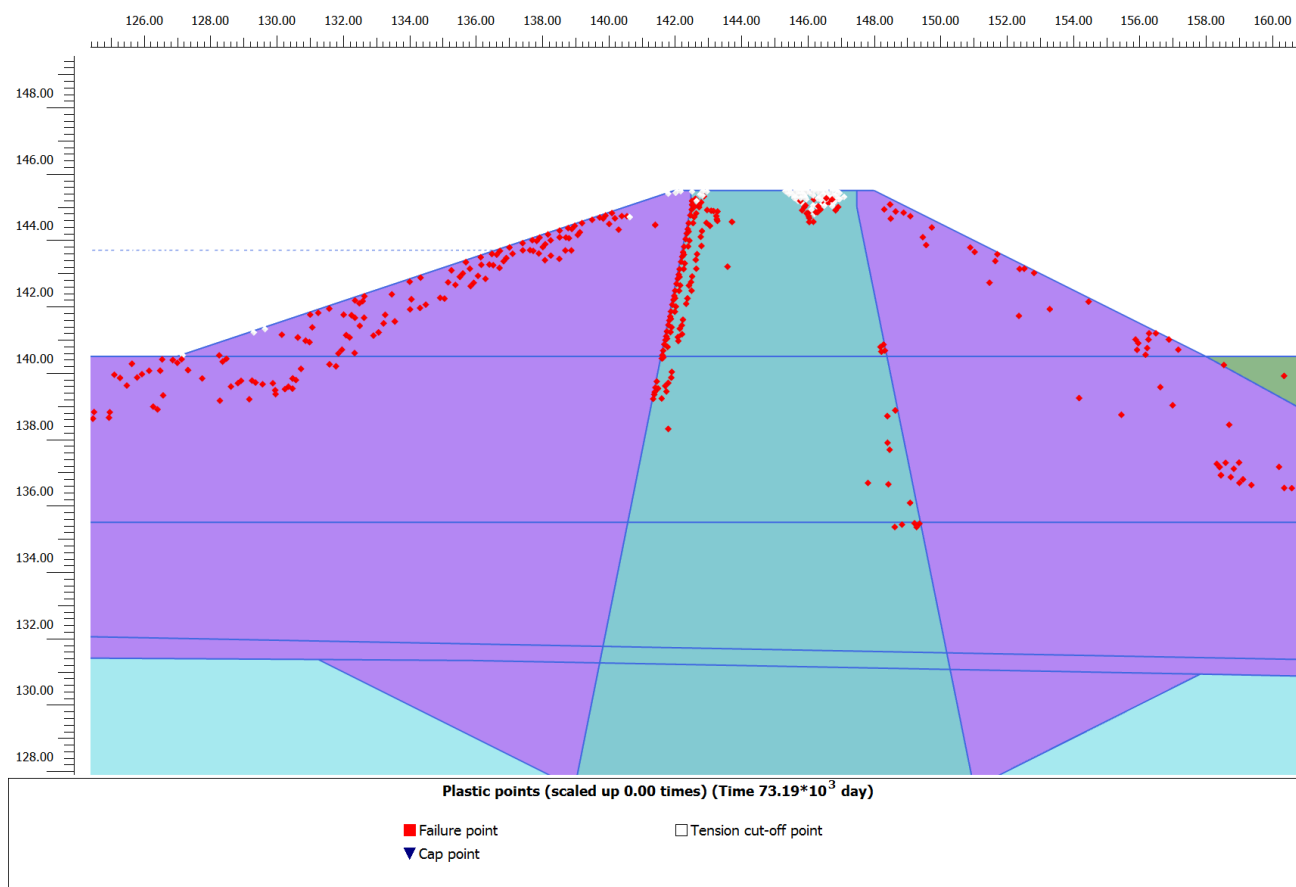


Figura 35 – Plasticizzazioni a lungo termine all'interno del rilevato zonato

5.3 SEZIONE 3

Per quanto riguarda la Sezione 3 di calcolo si mostrano i cedimenti totali ottenuti a 90 giorni dall'inizio della costruzione del rilevato che è il tempo ipotizzato per la costruzione del rilevato. A questa data le sovrappressioni generate dall'applicazione del carico dovuto alla costruzione del rilevato sono già completamente dissipate, per cui l'effetto post-costruzione che ci si aspetta è eventualmente connesso con il comportamento viscoso degli strati argillosi e del nucleo del corpo del rilevato

Si ottiene quindi un cedimento massimo in testa al rilevato di circa 0.53 m, mentre al piano di fondazione il cedimento massimo raggiunto è di 0.46 m.

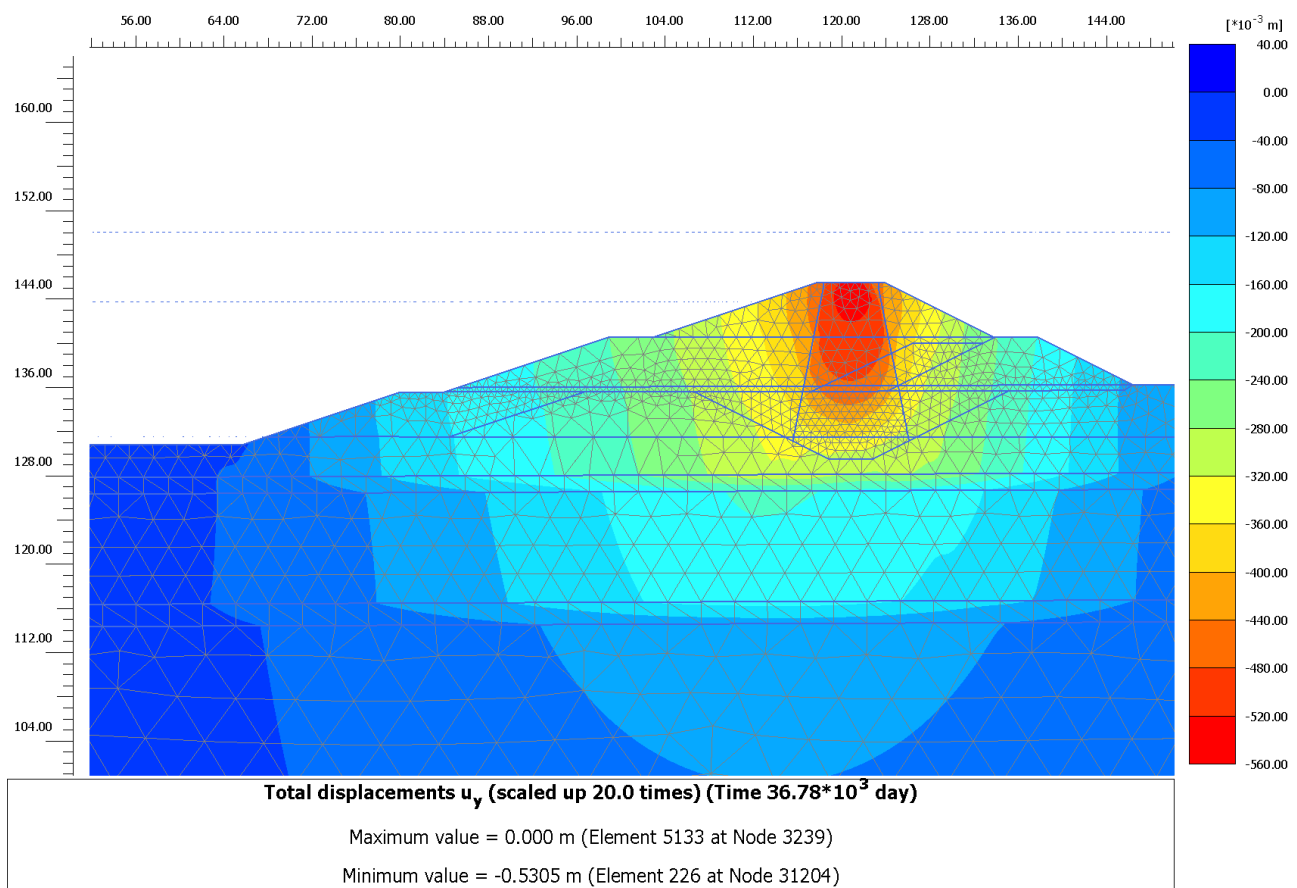


Figura 36 – Cedimenti 90 giorni

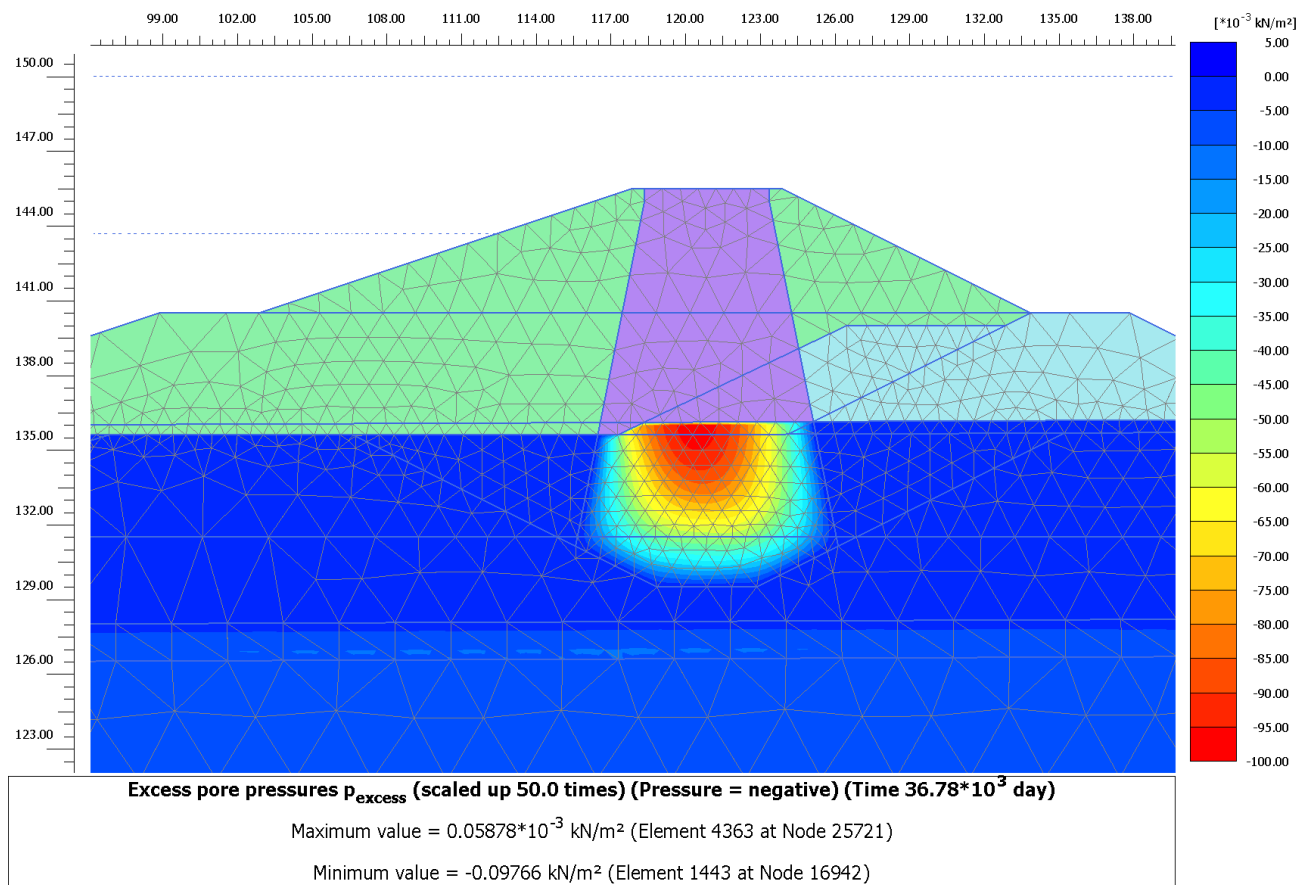


Figura 37 – Sovrapressioni trascurabili a 90 giorni

A fine costruzione dell'intera opera della cassa di espansione, periodo corrispondente a 600 giorni dalla fine della costruzione del rilevato in esame (FASE 6 del cronoprogramma), si ottiene invece un cedimento massimo in testa pari a 0.5396 m, mentre alla base fondazione si ottiene un valore di cedimento pari a 0.47m.

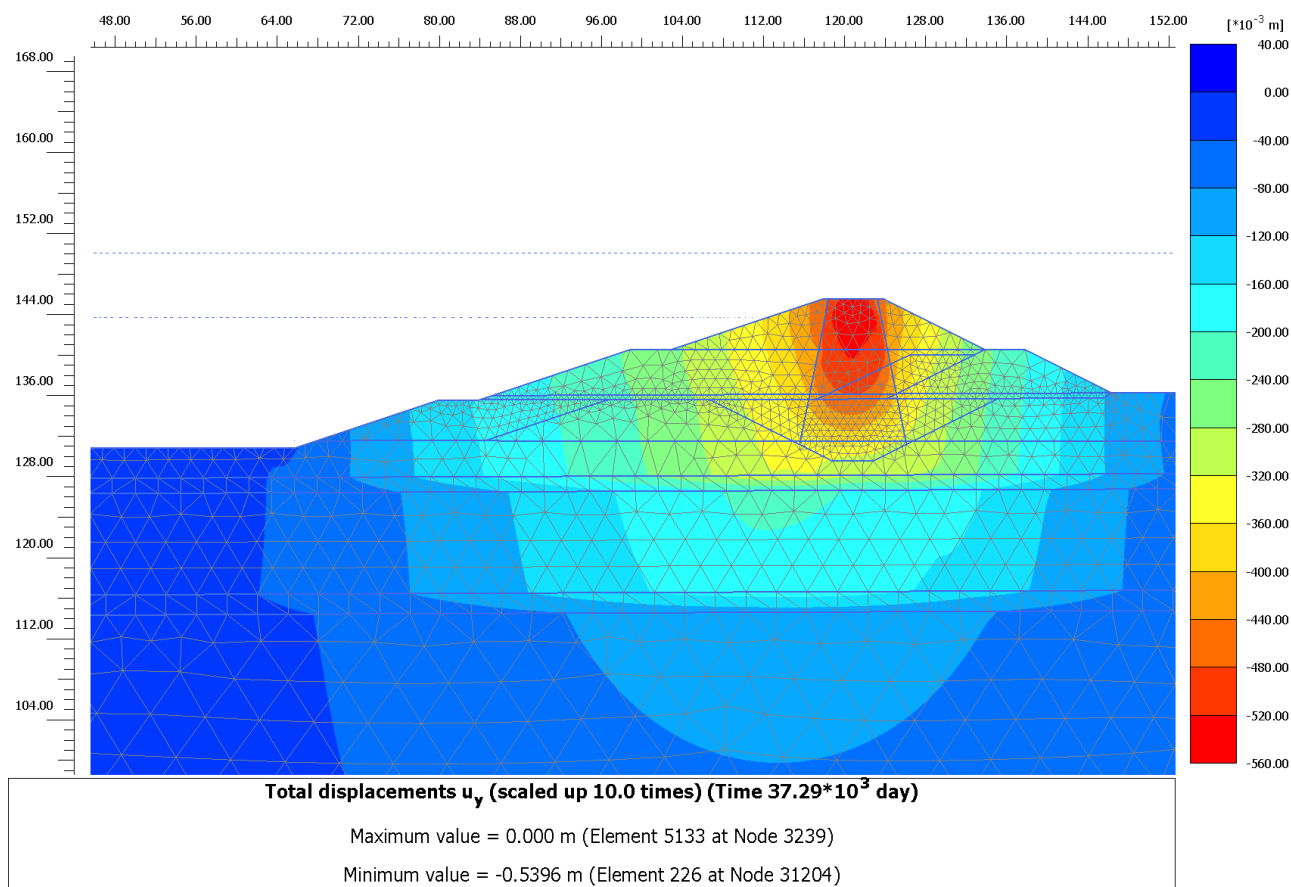


Figura 38 – Cedimenti a 600 giorni

Nel lungo periodo, equivalente a 100 anni, si ottiene, ipotizzando un comportamento viscoso delle argille in base all'esito delle prove edometriche (consolidazione secondaria), un cedimento totale (considerando anche i cedimenti a 180gg e a 600 gg) in testa al rilevato di circa 0.56 m, mentre a piano fondazione si raggiunge un valore di 0.49 m.

La differenza tra i cedimenti a lungo termine e quelli a fine costruzione dell'intera opera (600 gg) forniscono il cedimento effettivo esibito dal rilevato nel corso della sua vita durante l'esercizio delle sue funzioni.

Tale differenza risulta essere, per la testa e in corrispondenza del piano di fondazione del rilevato stesso pari a circa 0.02 m.

Il cedimento così valutato, ritenuto comunque cautelativo, è compatibile con il franco stabilito per il progetto dei rilevati arginali in esame, in quanto tali abbassamenti non determinano una possibile tracimazione dell'invaso per qualsiasi tempo di ritorno considerato.

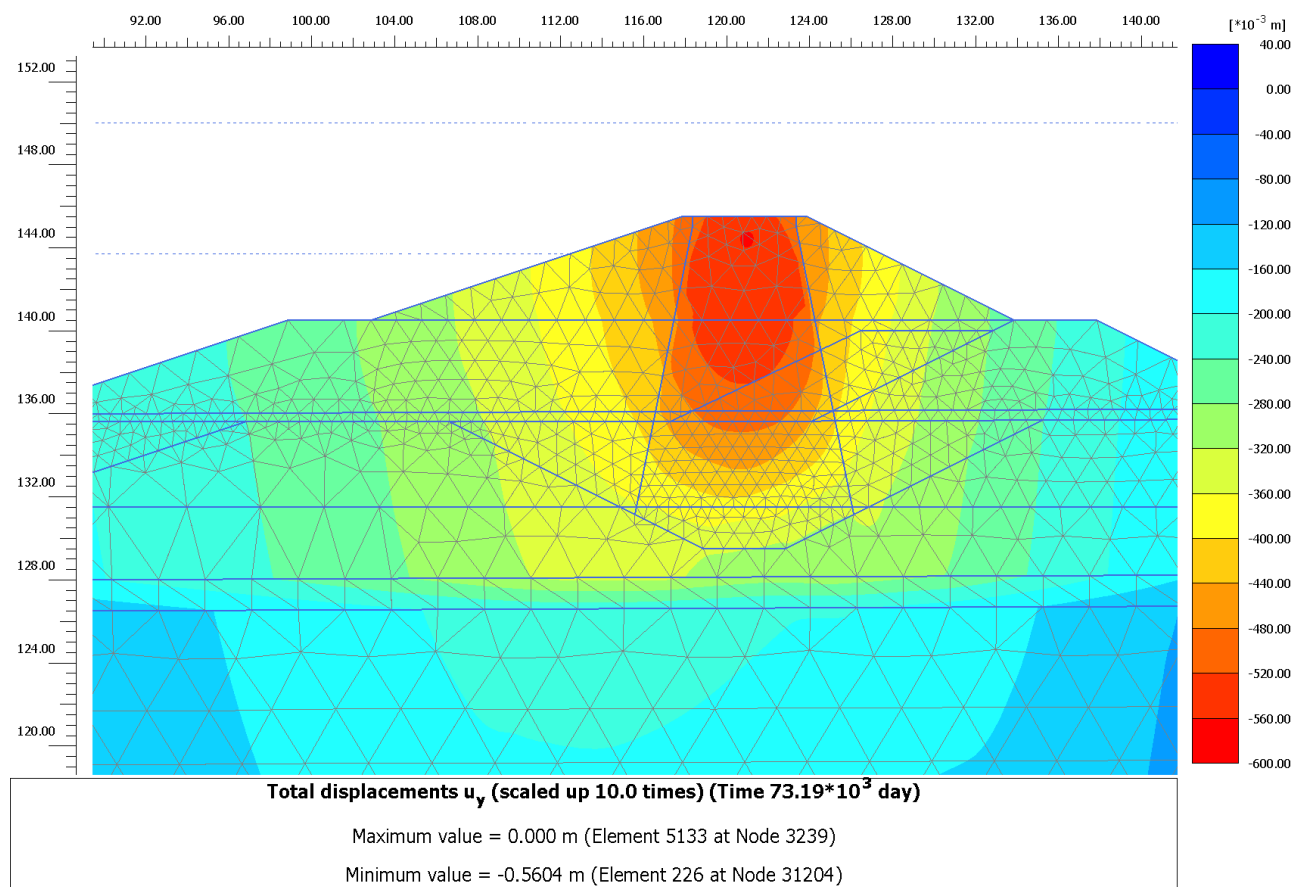


Figura 39 – Cedimenti 100 anni

Si mostra nella figura seguente come non siano presenti consistenti plasticizzazioni nella zona tra il nucleo di argilla e il materiale da rilevato grossolano, questo porta infatti ad escludere la presenza di cedimenti differenziali all'interno del rilevato zonato.

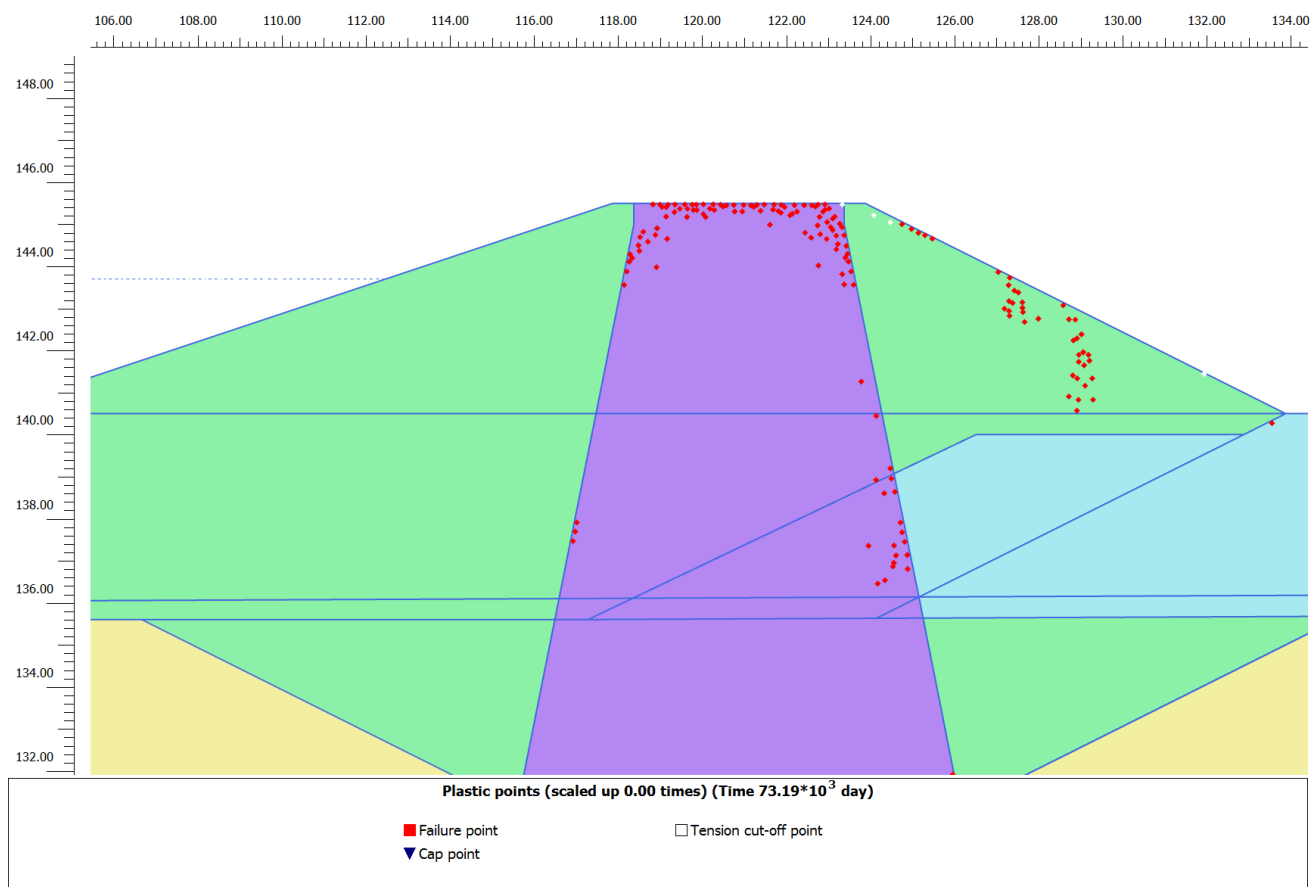


Figura 40 – Plasticizzazioni a lungo termine all'interno del rilevato zonato

5.4 SEZIONE 4

Per quanto riguarda la Sezione 4 di calcolo si mostrano i cedimenti totali ottenuti a 90 giorni dall'inizio della costruzione del rilevato che è il tempo ipotizzato per la costruzione del rilevato. A questa data le sovrappressioni generate dall'applicazione del carico dovuto alla costruzione del rilevato sono già completamente dissipate, per cui l'effetto post-costruzione che ci si aspetta è eventualmente connesso con il comportamento viscoso degli strati argillosi e del nucleo del corpo del rilevato

Si ottiene quindi un cedimento massimo in testa al rilevato di circa 0.1453 m, mentre al piano di fondazione il cedimento massimo raggiunto è di 0.11 m.

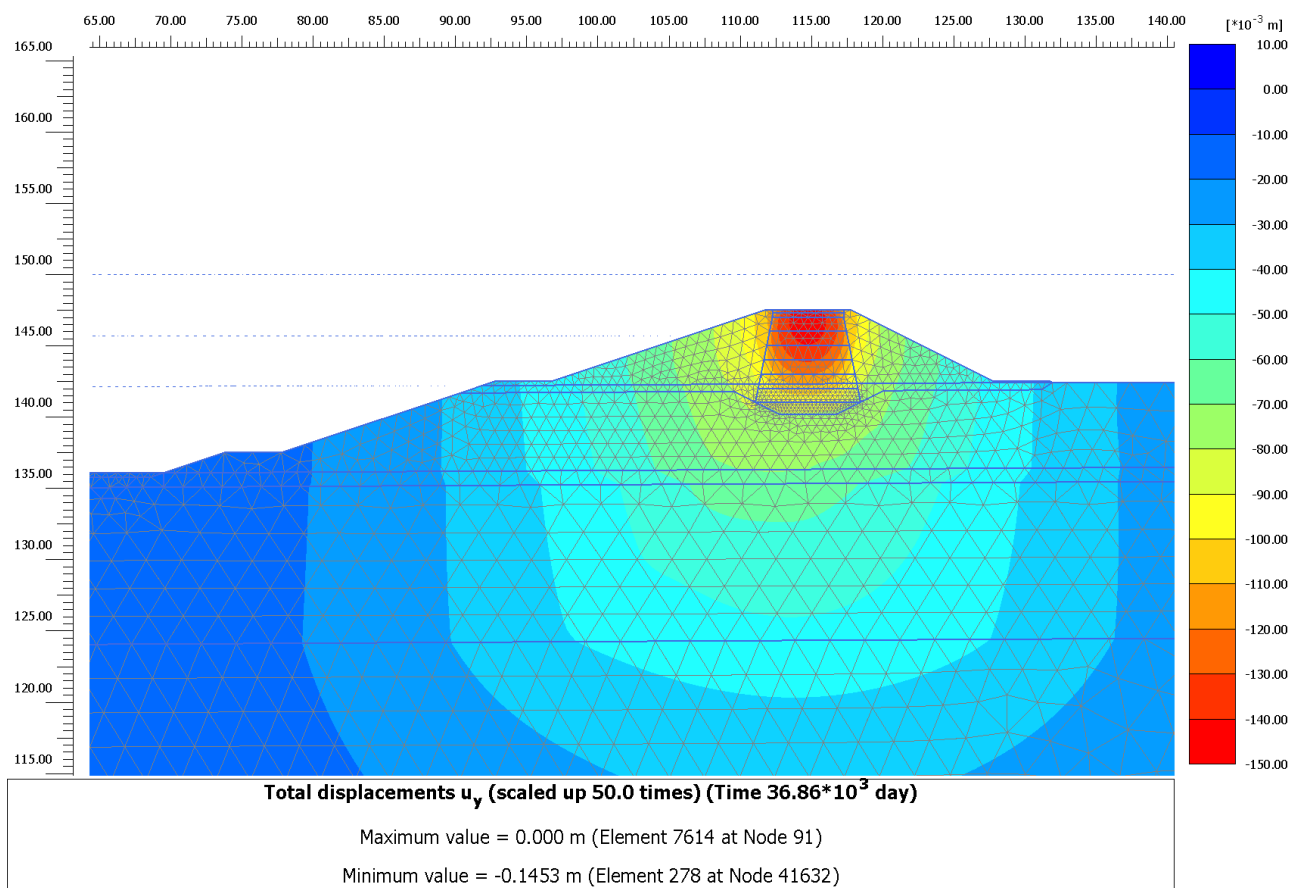


Figura 41 – Cedimenti 90 giorni

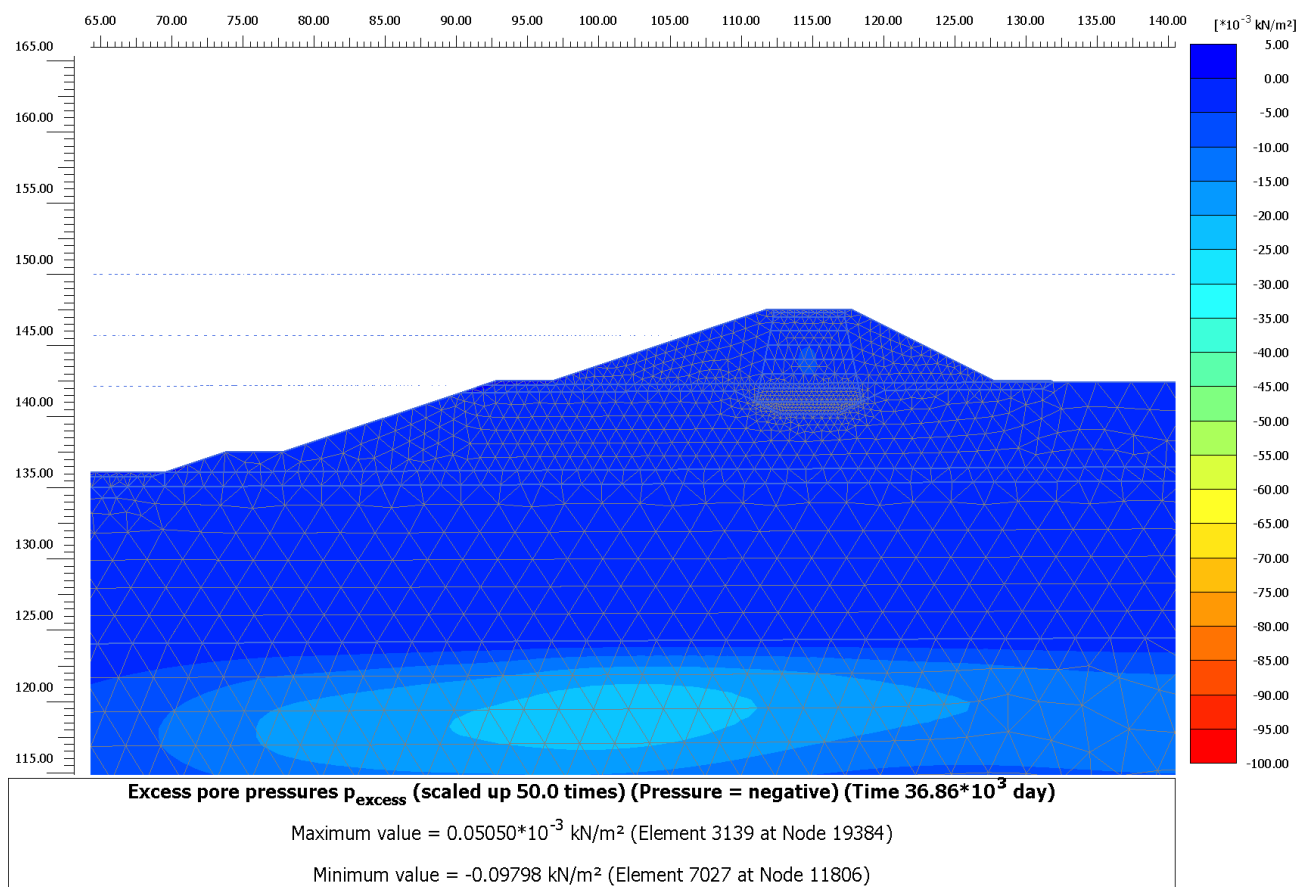


Figura 42 – Sovrapressione trascurabili a 90 giorni

A fine costruzione dell'intera opera della cassa di espansione, periodo corrispondente a 600 giorni dalla fine della costruzione del rilevato in esame (FASE 6 del cronoprogramma), si ottiene invece un cedimento massimo in testa pari a 0.1481 m, mentre alla base fondazione si ottiene un valore di cedimento pari a 0.1150 m.

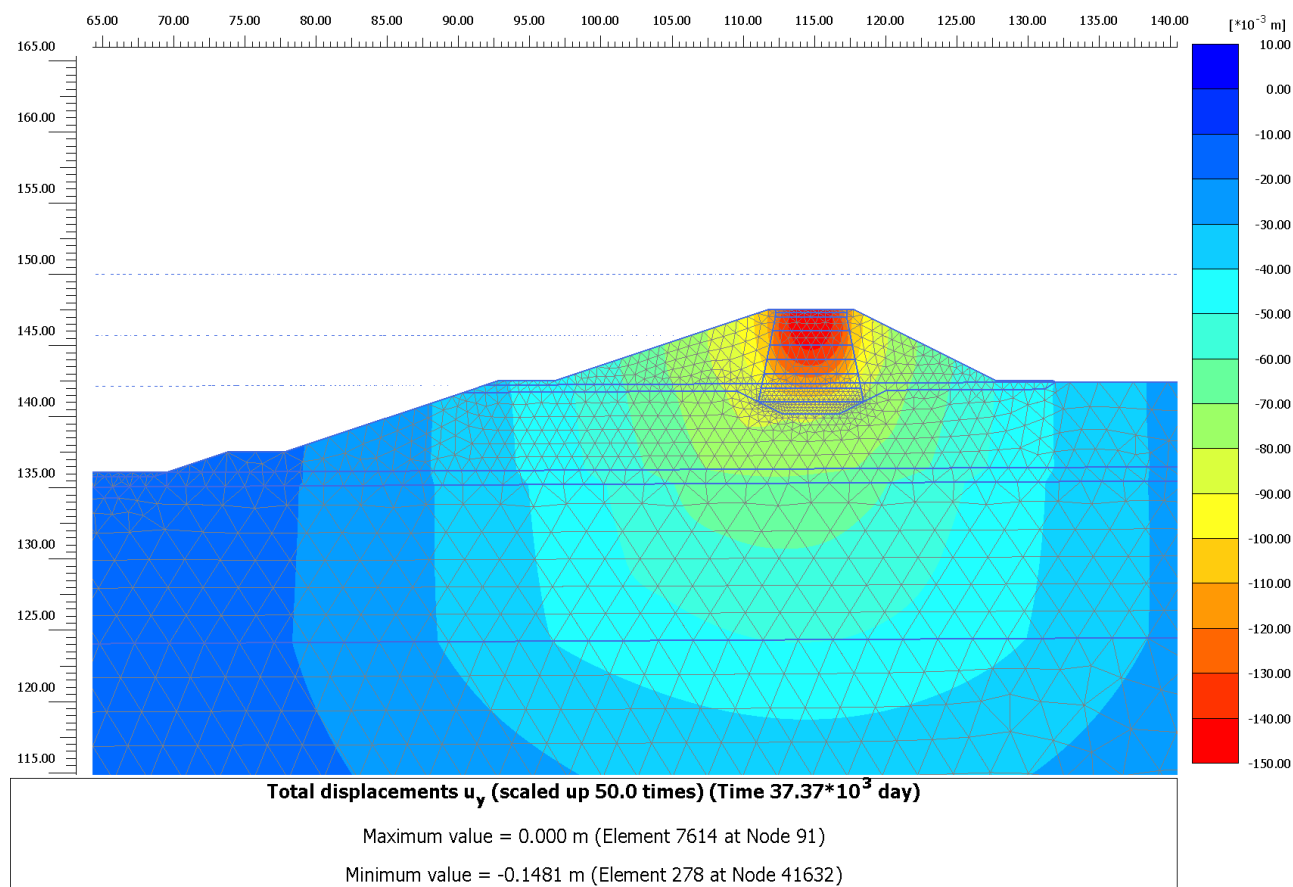


Figura 43 – Cedimenti a 600 giorni

Nel lungo periodo, equivalente a 100 anni, si ottiene, ipotizzando un comportamento viscoso delle argille in base all'esito delle prove edometriche (consolidazione secondaria), un cedimento totale (considerando anche i cedimenti a 90 gg e a 600 gg) in testa al rilevato di circa 0.2023 m, mentre a piano fondazione si raggiunge un valore di 0.1650 m.

La differenza tra i cedimenti a lungo termine e quelli a fine costruzione dell'intera opera (600 gg) forniscono il cedimento effettivo esibito dal rilevato nel corso della sua vita durante l'esercizio delle sue funzioni.

Tale differenza risulta essere, per la testa del rilevato e in corrispondenza del piano di fondazione pari a circa 0.054 m.

Il cedimento così valutato, ritenuto comunque cautelativo, è compatibile con il franco stabilito per il progetto dei rilevati arginali in esame, in quanto tali abbassamenti non determinano una possibile tracimazione dell'invaso per qualsiasi tempo di ritorno considerato.

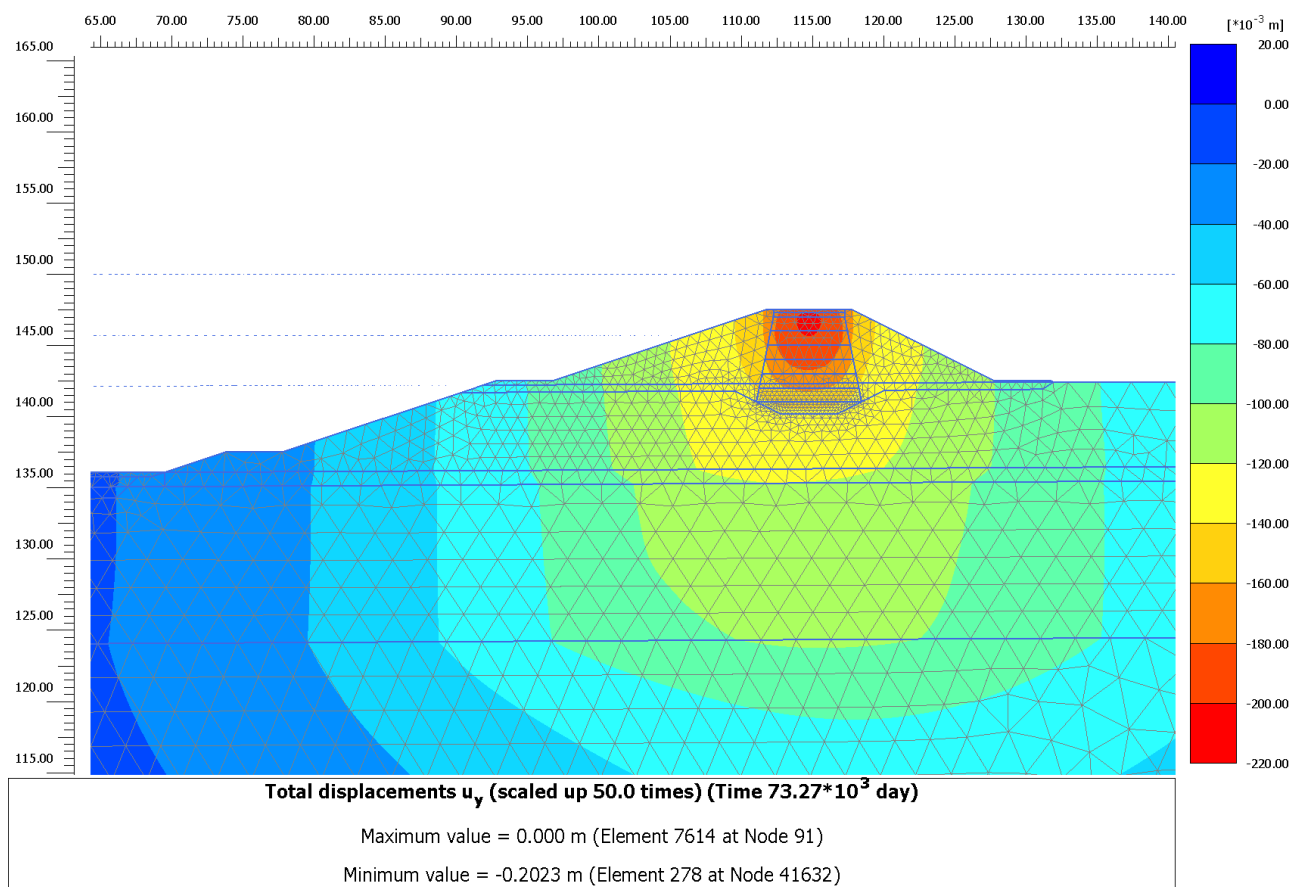


Figura 44 – Cedimenti 100 anni

Si mostra nella figura seguente come non siano presenti consistenti plasticizzazioni nella zona tra il nucleo di argilla e il materiale da rilevato grossolano, questo porta infatti ad escludere la presenza di cedimenti differenziali all'interno del rilevato zonato.

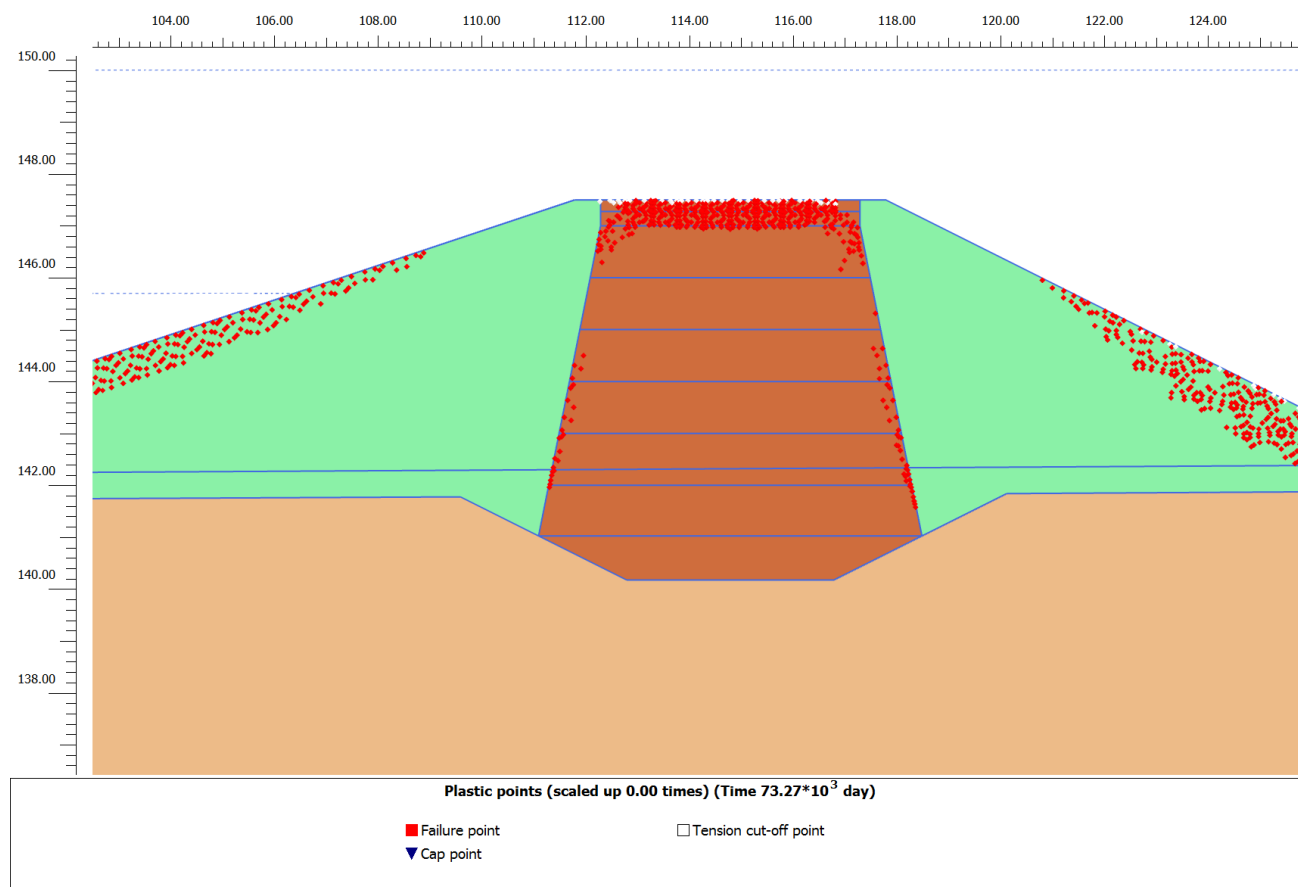


Figura 45 – Plasticizzazioni a lungo termine all'interno del rilevato zonato

5.5 SEZIONE 5

Per quanto riguarda la Sezione 5 di calcolo si mostrano i cedimenti totali ottenuti a 180 giorni dall'inizio della costruzione del rilevato che è il tempo ipotizzato per la costruzione del rilevato. A questa data le sovrappressioni generate dall'applicazione del carico dovuto alla costruzione del rilevato sono già completamente dissipate, per cui l'effetto post-costruzione che ci si aspetta è eventualmente connesso con il comportamento viscoso degli strati argillosi e del nucleo del corpo del rilevato

Si ottiene quindi un cedimento massimo in testa al rilevato di circa 0.3069 m, mentre al piano di fondazione il cedimento massimo raggiunto è di 0.28 m.

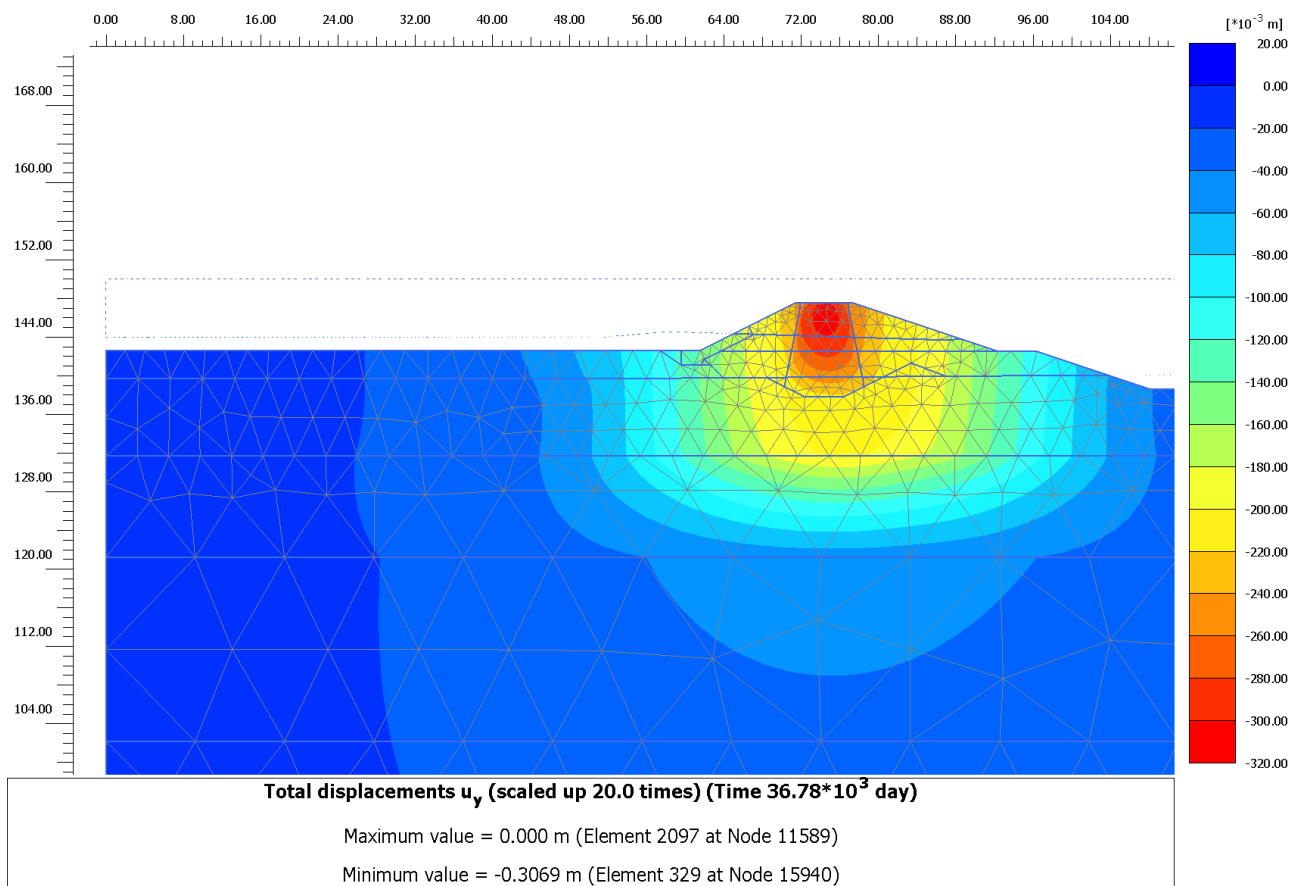


Figura 46 – Cedimenti 90 giorni

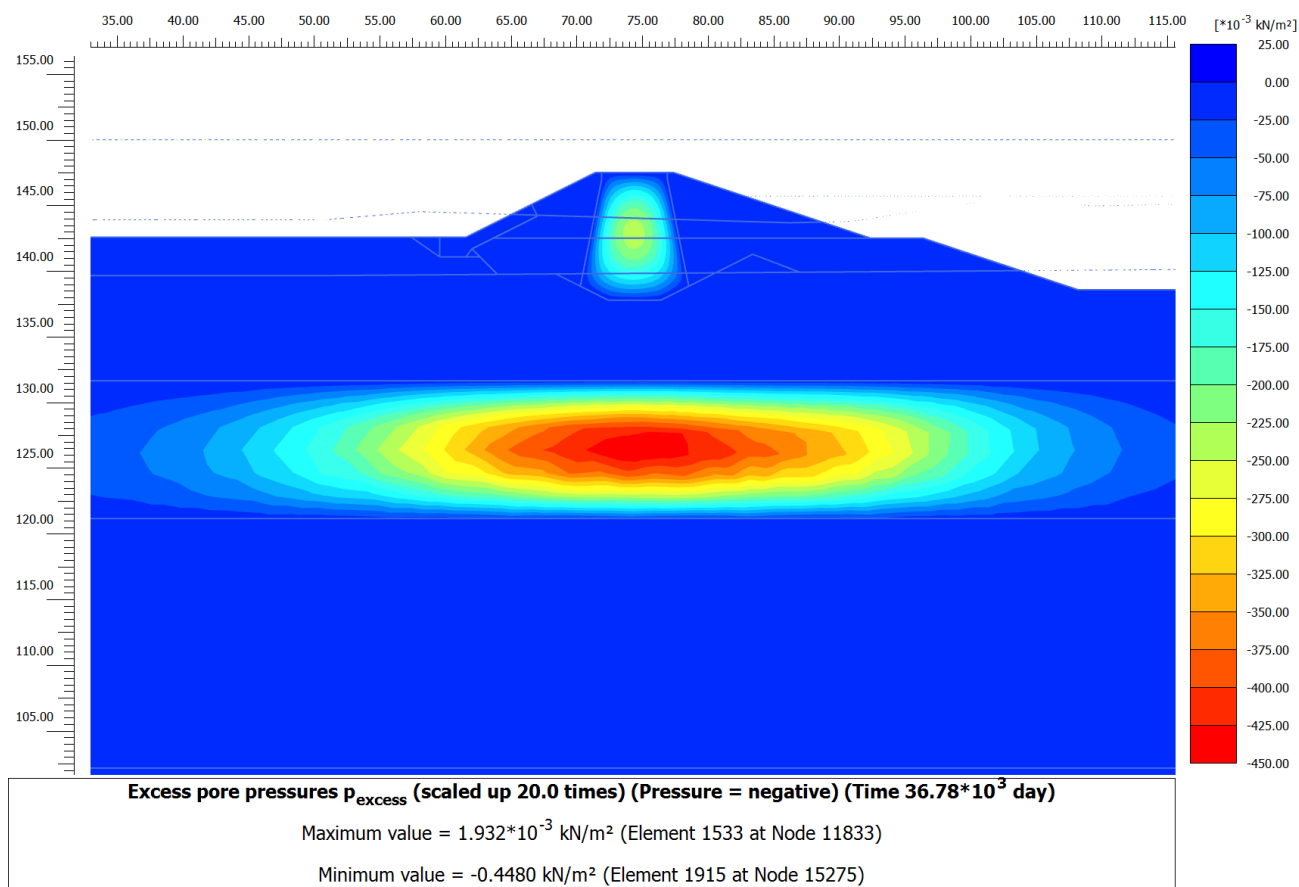


Figura 47 – Sovrapressioni trascurabili a 90 giorni

A fine costruzione dell'intera opera della cassa di espansione, periodo corrispondente a 720 giorni dalla fine della costruzione del rilevato in esame (FASE 3 del cronoprogramma), si ottiene invece un cedimento massimo in testa pari a 0.3655 m, mentre alla base fondazione si ottiene un valore di cedimento pari a 0.34 m.

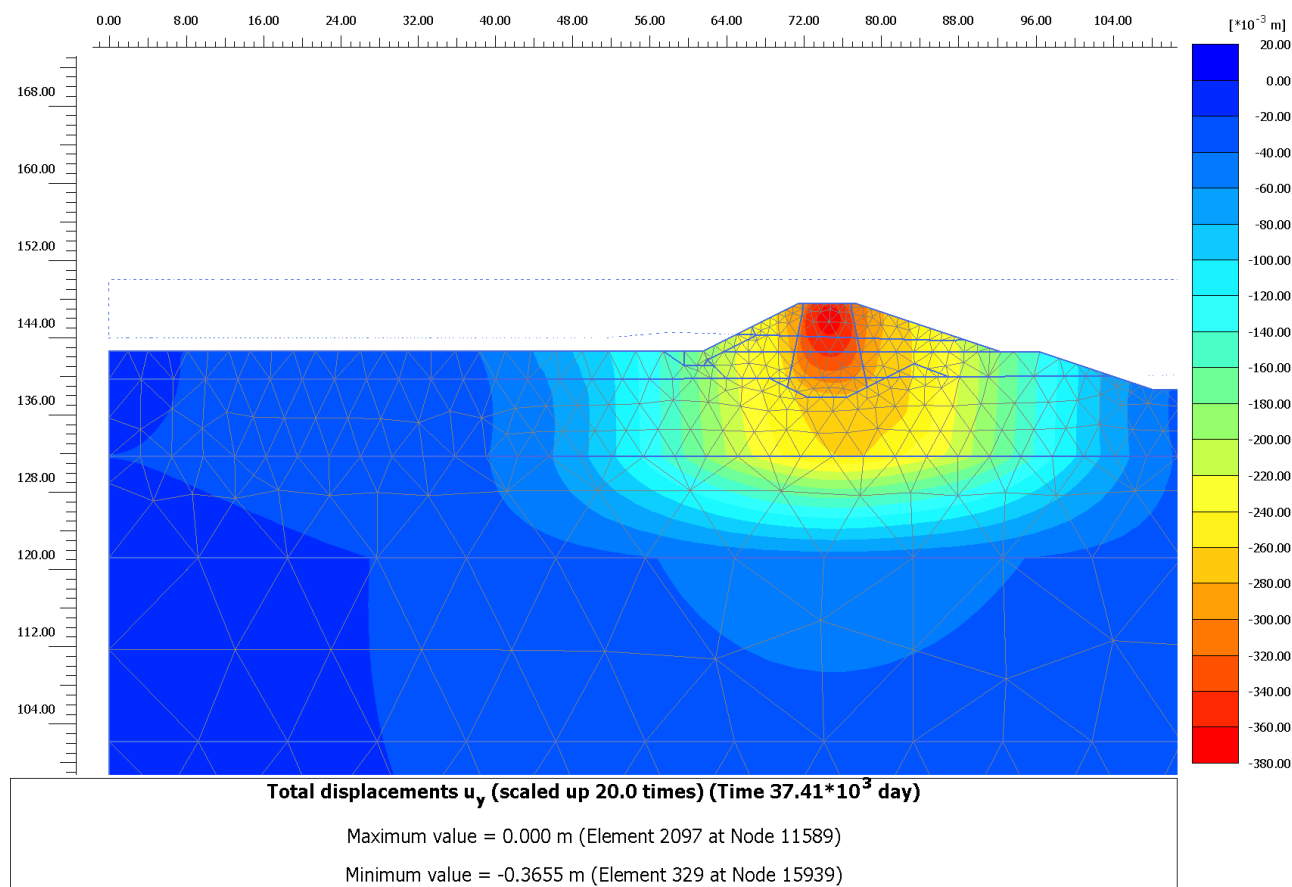


Figura 48 – Cedimento a 720 giorni

Nel lungo periodo, equivalente a 100 anni, si ottiene, ipotizzando un comportamento viscoso delle argille in base all'esito delle prove edometriche (consolidazione secondaria), un cedimento totale (considerando anche i cedimenti a 90 gg e a 720 gg) in testa al rilevato di circa 0.4344 m, mentre a piano fondazione si raggiunge un valore di 0.41 m.

La differenza tra i cedimenti a lungo termine e quelli a fine costruzione dell'intera opera (720 gg) forniscono il cedimento effettivo esibito dal rilevato nel corso della sua vita durante l'esercizio delle sue funzioni.

Tale differenza risulta essere, per la testa del rilevato stesso pari a circa 0.07 m, mentre alla sua base si ha una differenza di circa 0.07 m.

Il cedimento così valutato, ritenuto comunque cautelativo, è compatibile con il franco stabilito per il progetto dei rilevati arginali in esame, in quanto tali abbassamenti non determinano una possibile tracimazione dell'invaso per qualsiasi tempo di ritorno considerato.

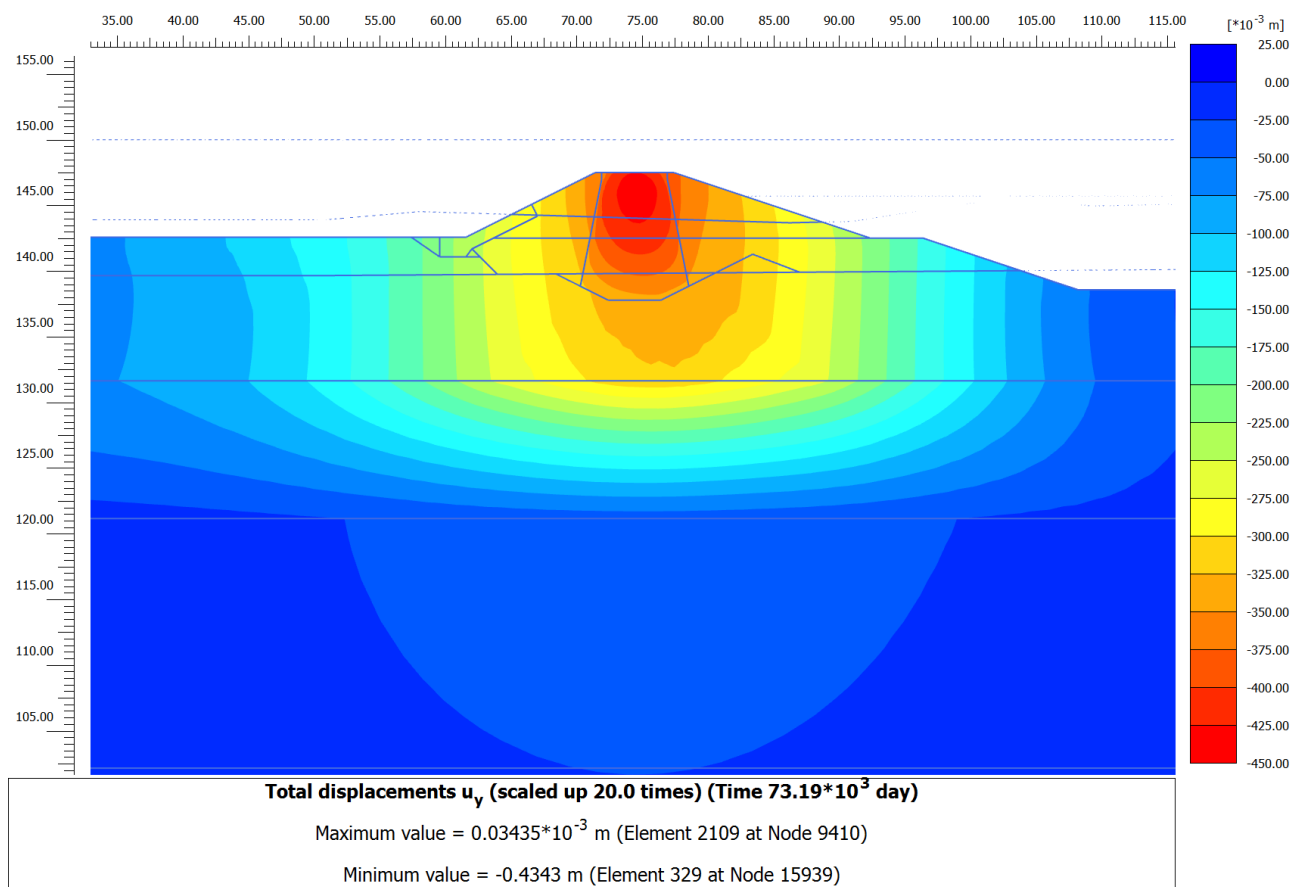


Figura 49 – Cedimenti 100 anni

Si mostra nella figura seguente come non siano presenti consistenti plasticizzazioni nella zona tra il nucleo di argilla e il materiale da rilevato grossolano, questo porta infatti ad escludere la presenza di cedimenti differenziali all'interno del rilevato zonato.

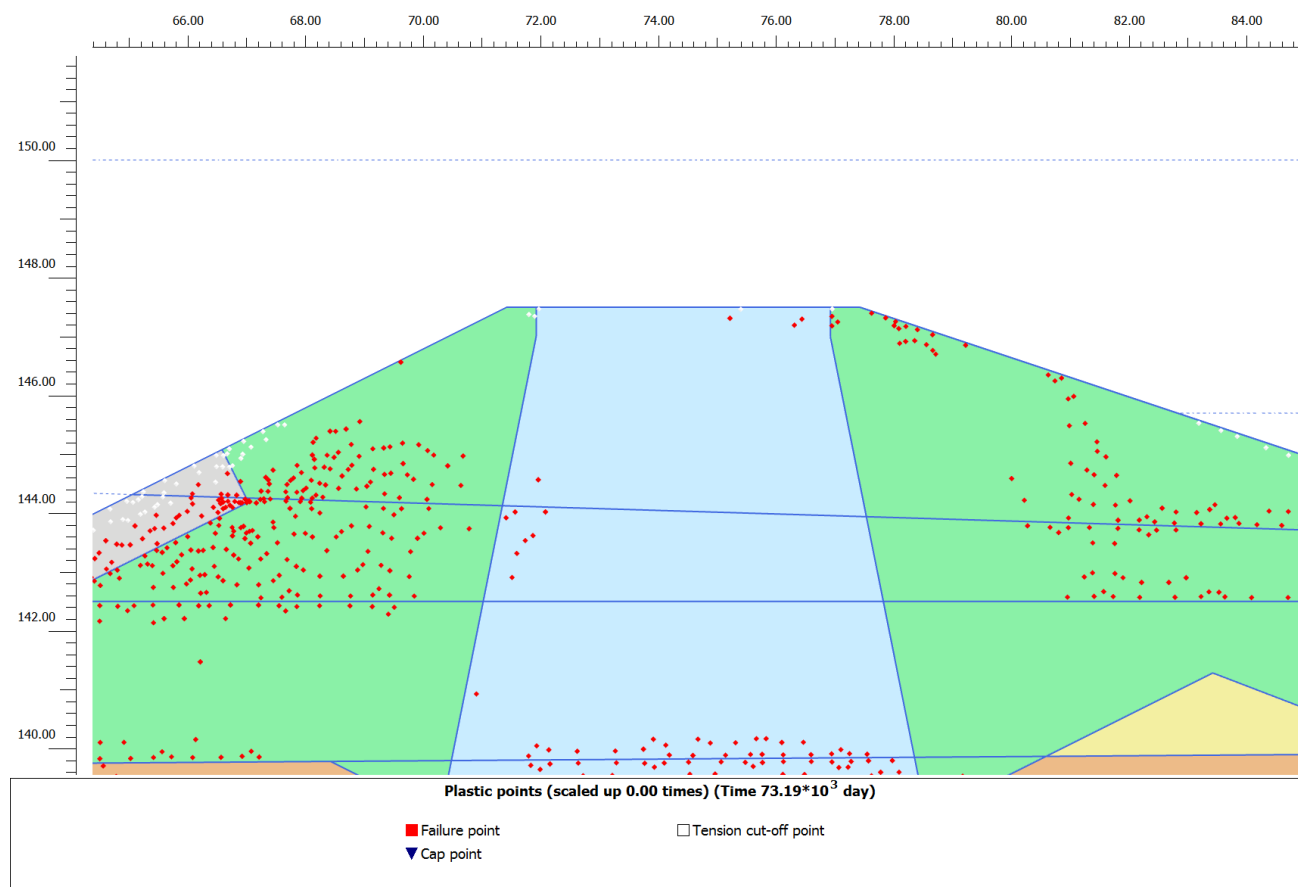


Figura 50 – Plasticizzazioni a lungo termine all'interno del rilevato zonato

5.6 SEZIONE 6

Per quanto riguarda la Sezione 1 di calcolo si mostrano i cedimenti totali ottenuti a 90 giorni dall'inizio della costruzione del rilevato che è il tempo ipotizzato per la costruzione del rilevato. A questa data le sovrappressioni generate dall'applicazione del carico dovuto alla costruzione del rilevato sono già completamente dissipate, per cui l'effetto post-costruzione che ci si aspetta è eventualmente connesso con il comportamento viscoso degli strati argillosi e del nucleo del corpo del rilevato

Si ottiene quindi un cedimento massimo in testa al rilevato di circa 0.6473 m, mentre al piano di fondazione il cedimento massimo raggiunto è di 0.63 m.

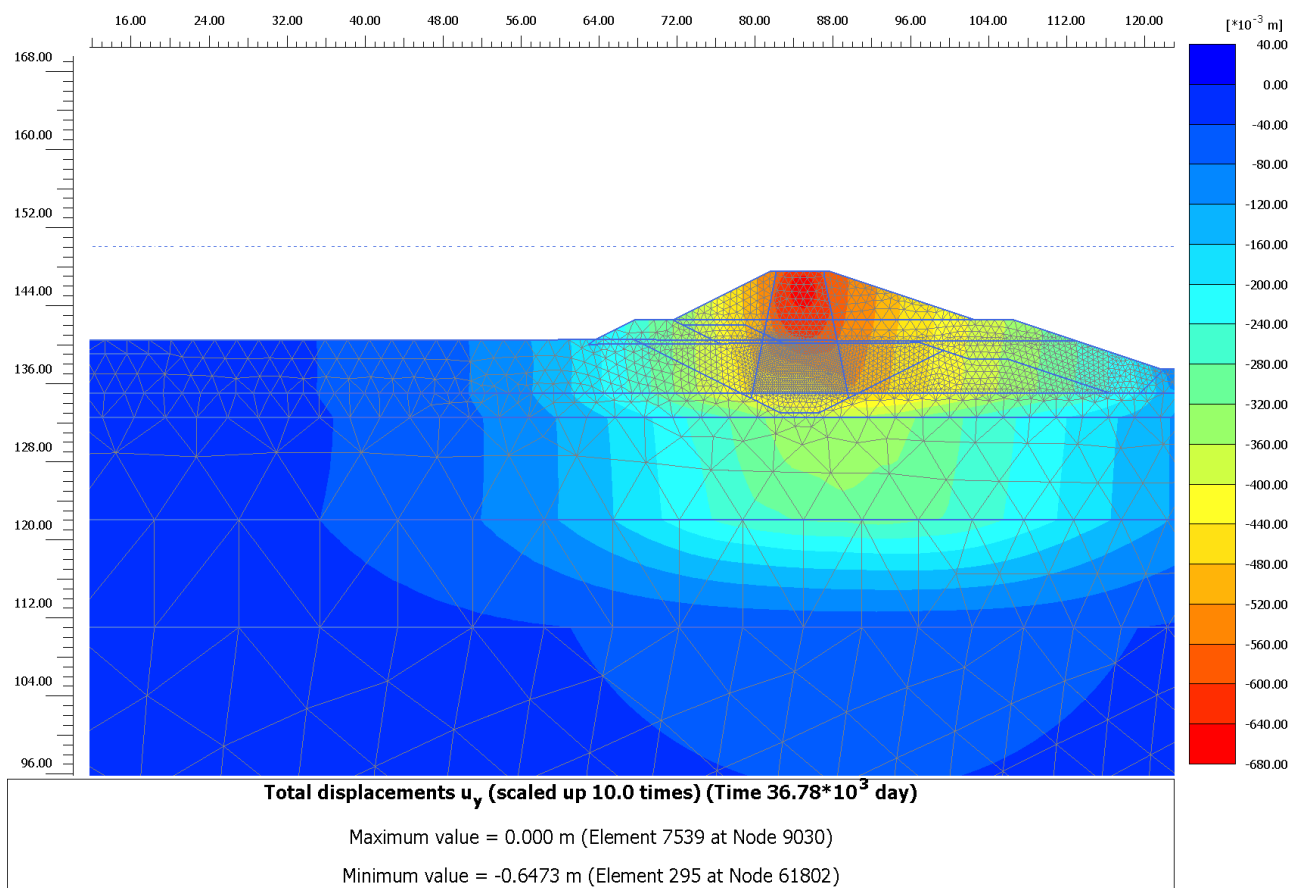


Figura 51 – Cedimenti 90 giorni

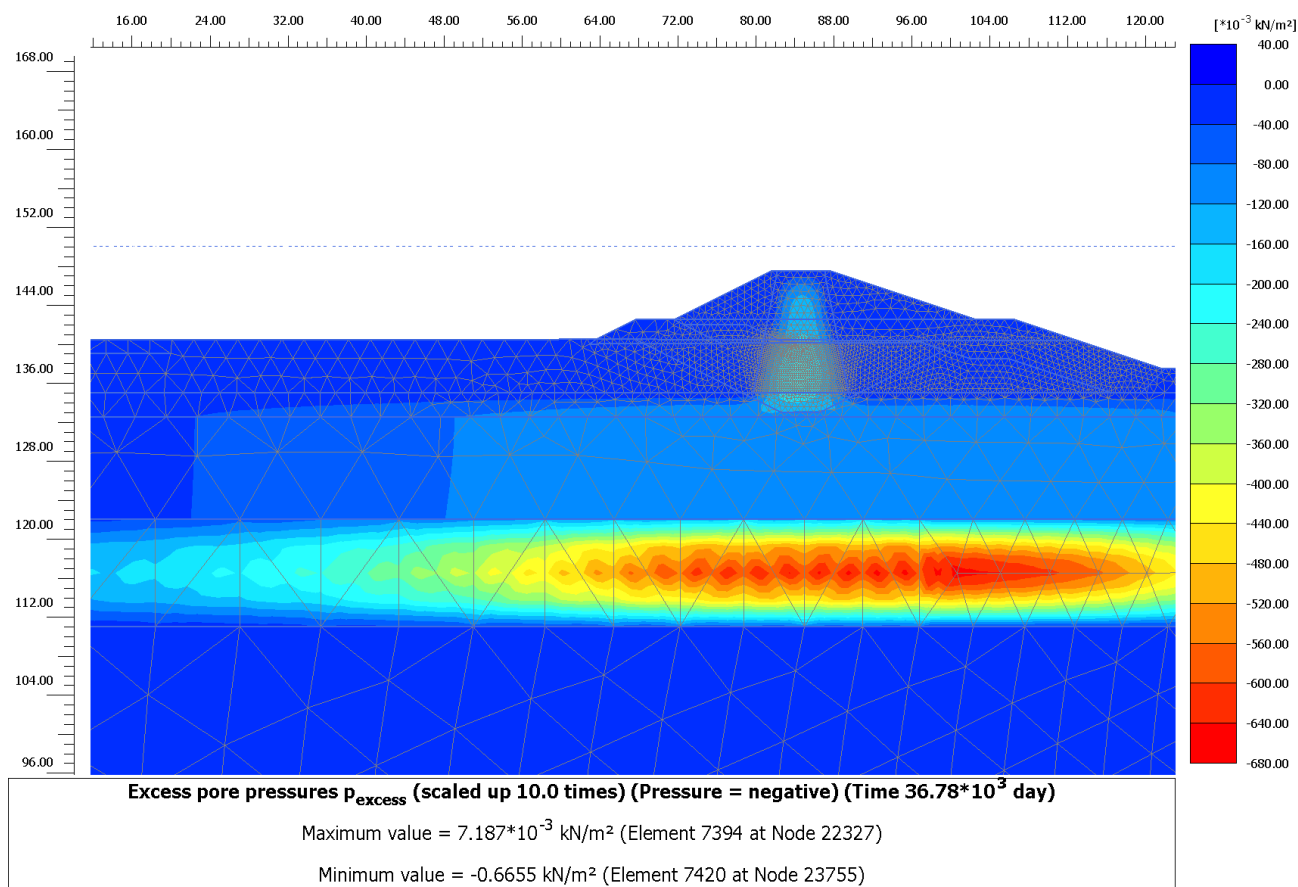


Figura 52 – Sovrapressione trascurabili a 90 giorni

A fine costruzione dell'intera opera della cassa di espansione, periodo corrispondente a 720 giorni dalla fine della costruzione del rilevato in esame (FASE 3 del cronoprogramma), si ottiene invece un cedimento massimo in testa pari a 0.7366 m, mentre alla base fondazione si ottiene un valore di cedimento pari a 0.67 m.

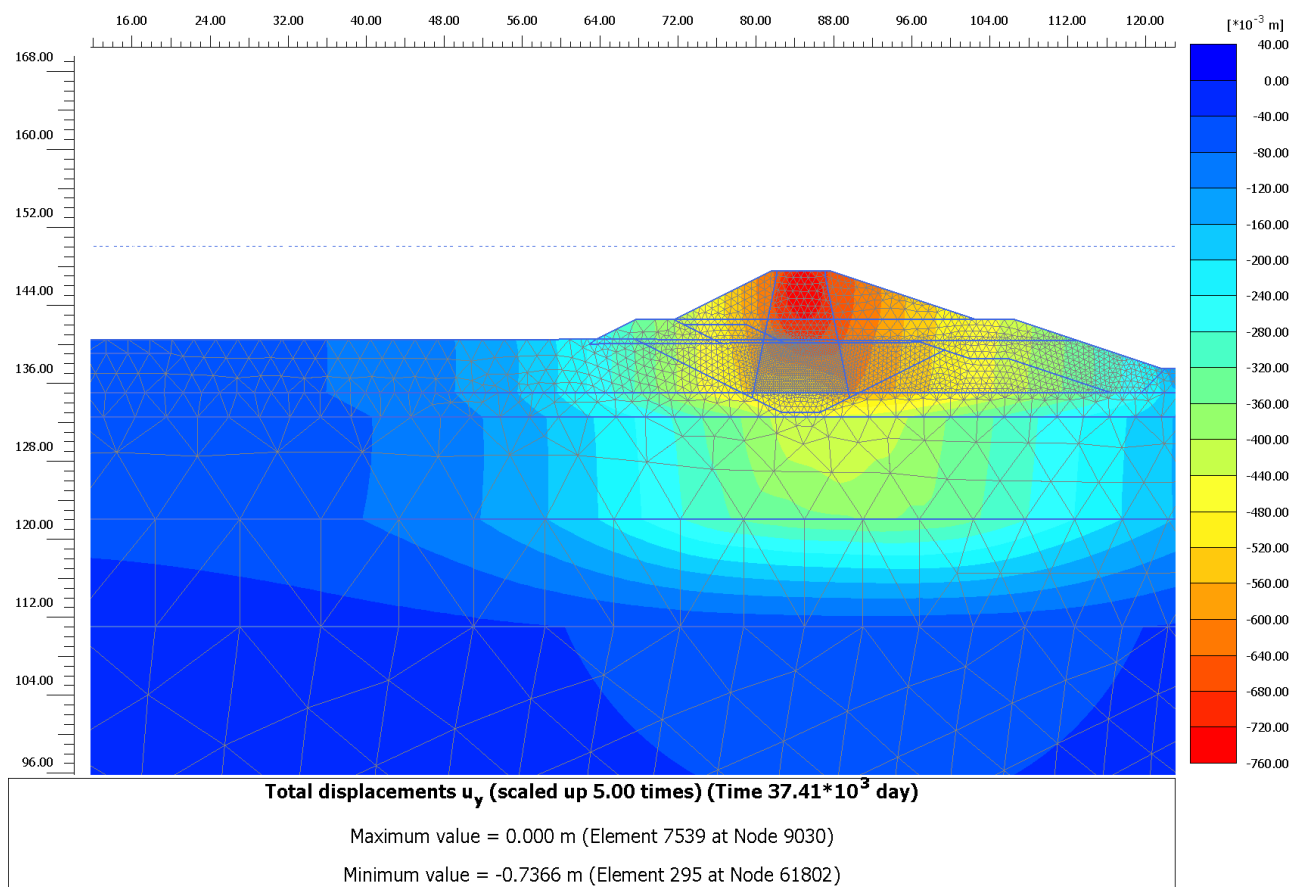


Figura 53 – Cedimenti 720 giorni

Nel lungo periodo, equivalente a 100 anni, si ottiene, ipotizzando un comportamento viscoso delle argille in base all'esito delle prove edometriche (consolidazione secondaria), un cedimento totale (considerando anche i cedimenti a 90 gg e a 720 gg) in testa al rilevato di circa 0.89 m, mentre a piano fondazione si raggiunge un valore di 0.82 m.

La differenza tra i cedimenti a lungo termine e quelli a fine costruzione dell'intera opera (720 gg) forniscono il cedimento effettivo esibito dal rilevato nel corso della sua vita durante l'esercizio delle sue funzioni.

Tale differenza risulta essere, per la testa del rilevato stesso pari a circa 0.15 m, mentre alla sua base si ha una differenza di circa 0.15 m.

Il cedimento così valutato, ritenuto comunque cautelativo, è compatibile con il franco stabilito per il progetto dei rilevati arginali in esame, in quanto tali abbassamenti non determinano una possibile tracimazione dell'invaso per qualsiasi tempo di ritorno considerato.

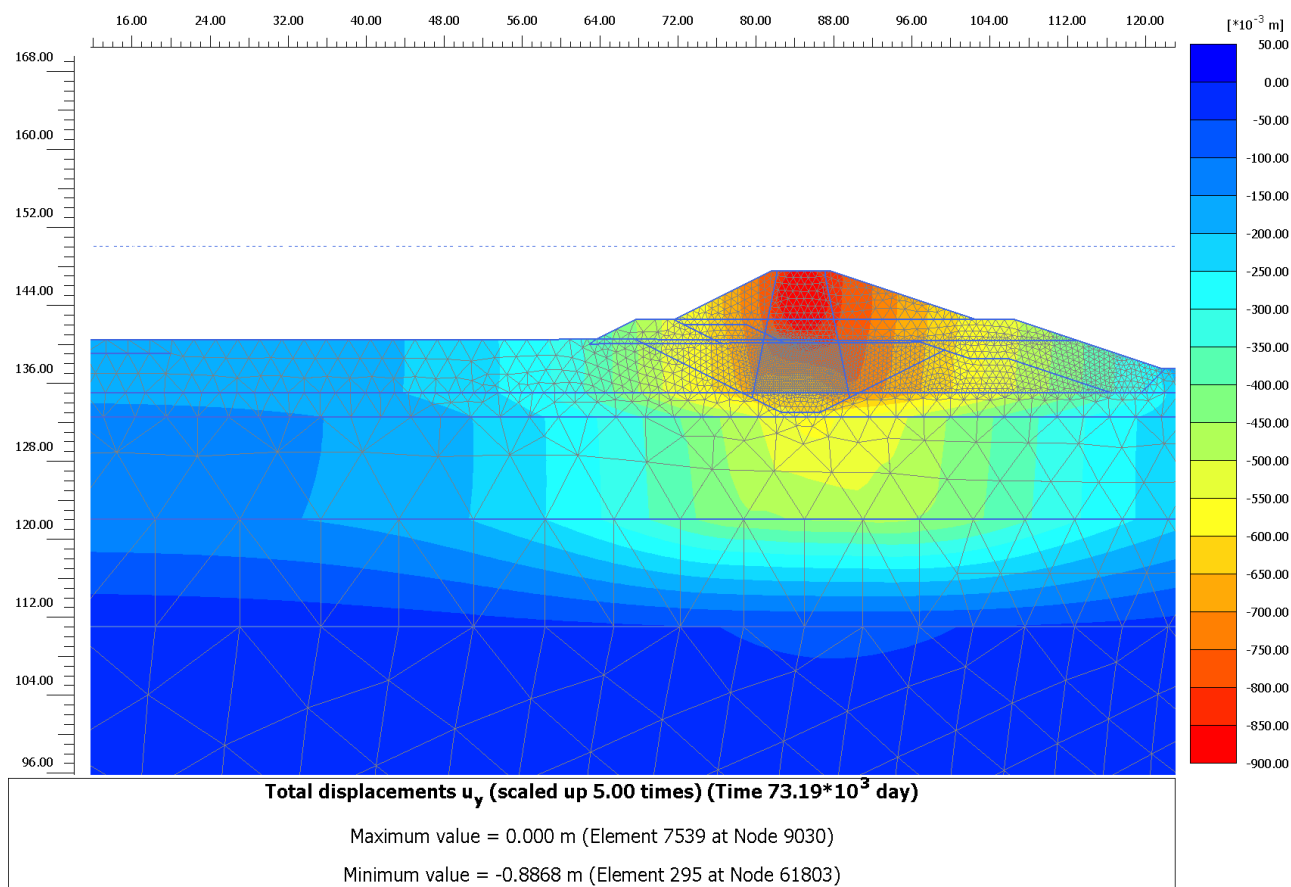


Figura 54 – Cedimenti 100 anni

Si mostra nella figura seguente come non siano presenti consistenti plasticizzazioni nella zona tra il nucleo di argilla e il materiale da rilevato grossolano, questo porta infatti ad escludere la presenza di cedimenti differenziali all'interno del rilevato zonato.

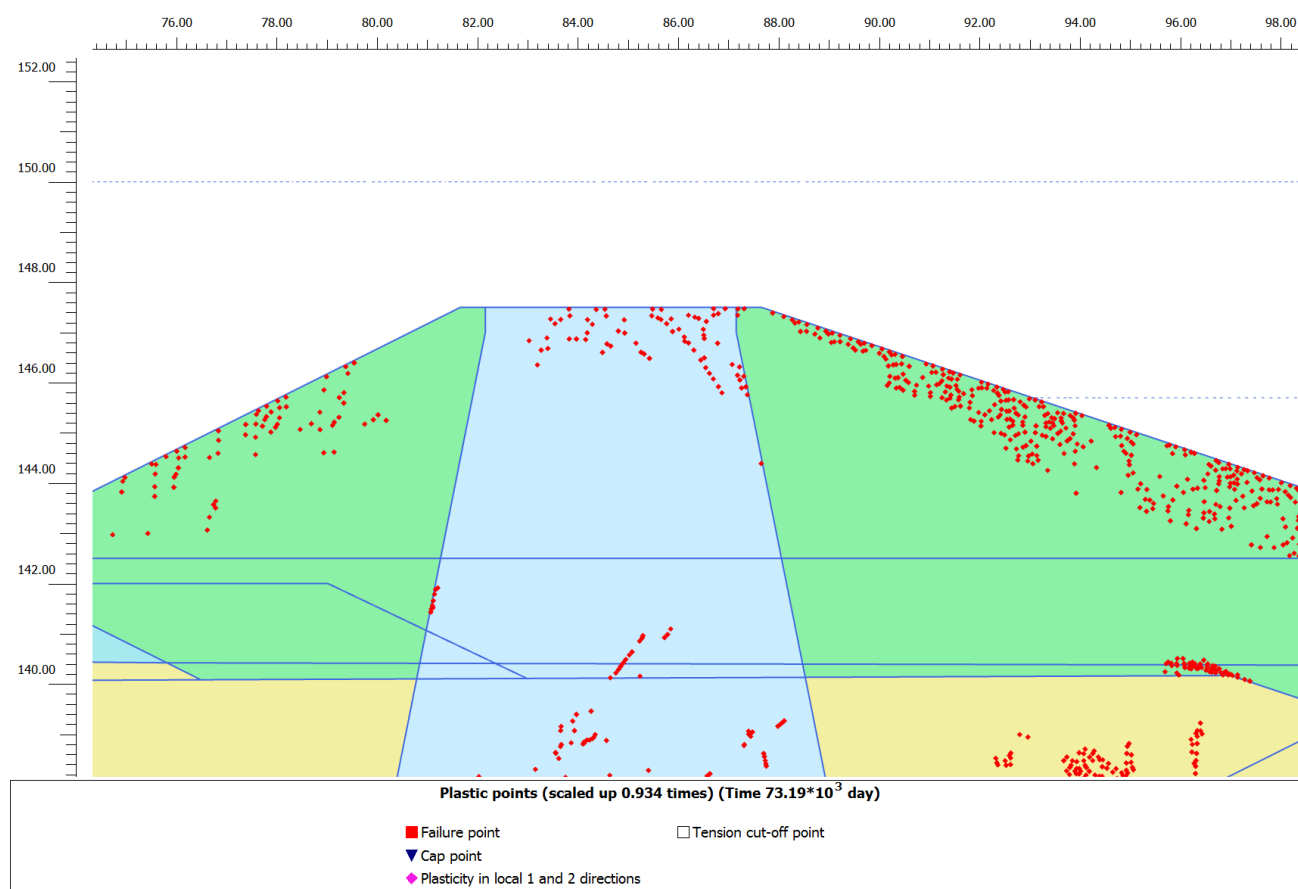


Figura 55 – Plasticizzazioni a lungo termine all'interno del rilevato zonato

5.7 SEZIONE 7

Per quanto riguarda la Sezione 7 di calcolo si mostrano i cedimenti totali ottenuti a 180 giorni dall'inizio della costruzione del rilevato che è il tempo ipotizzato per la costruzione del rilevato. A questa data le sovrappressioni generate dall'applicazione del carico dovuto alla costruzione del rilevato sono già completamente dissipate, per cui l'effetto post-costruzione che ci si aspetta è eventualmente connesso con il comportamento viscoso degli strati argillosi e del nucleo del corpo del rilevato

Si ottiene quindi un cedimento massimo in testa al rilevato di circa 0.4469 m, mentre al piano di fondazione il cedimento massimo raggiunto è di 0.26 m.

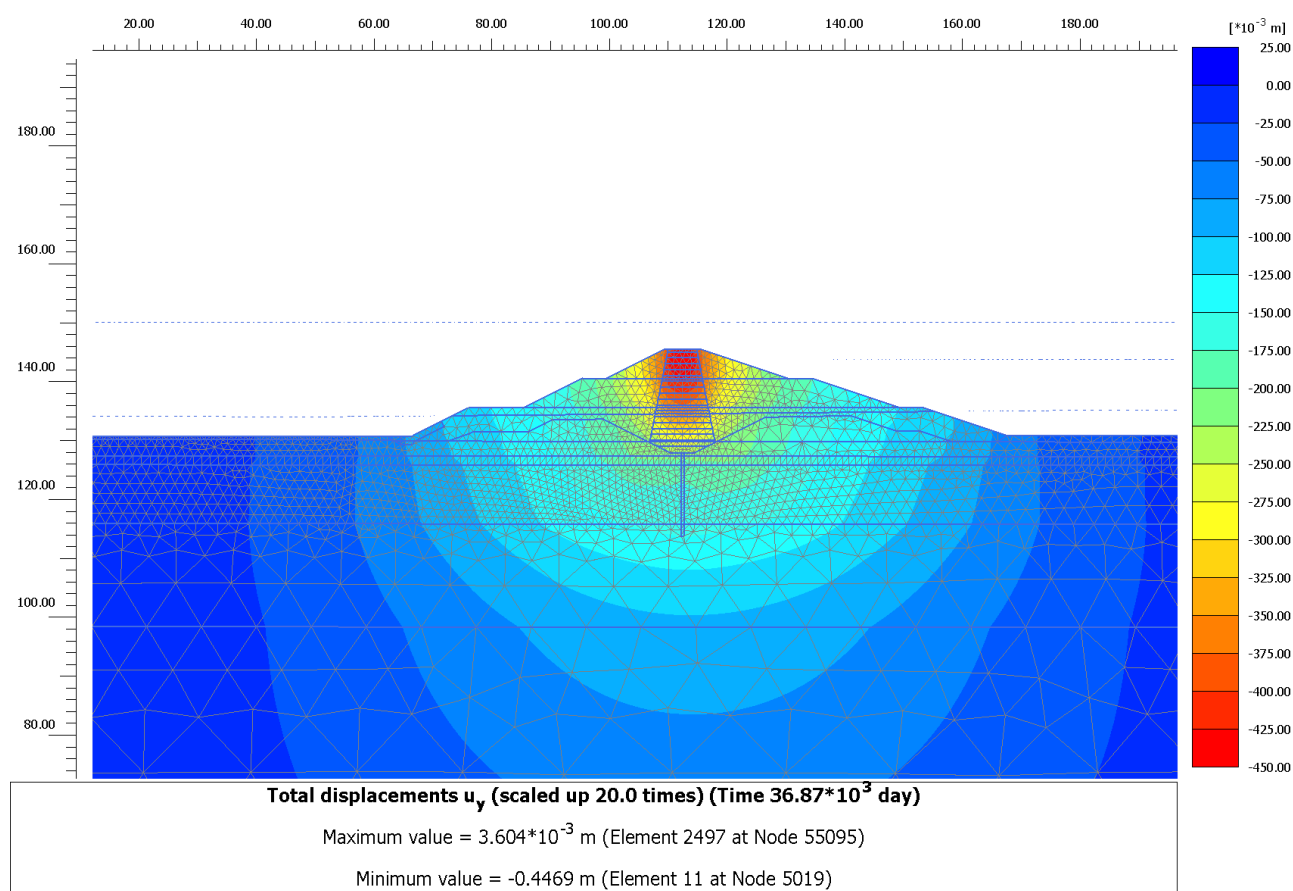


Figura 56 – Cedimenti 180 giorni

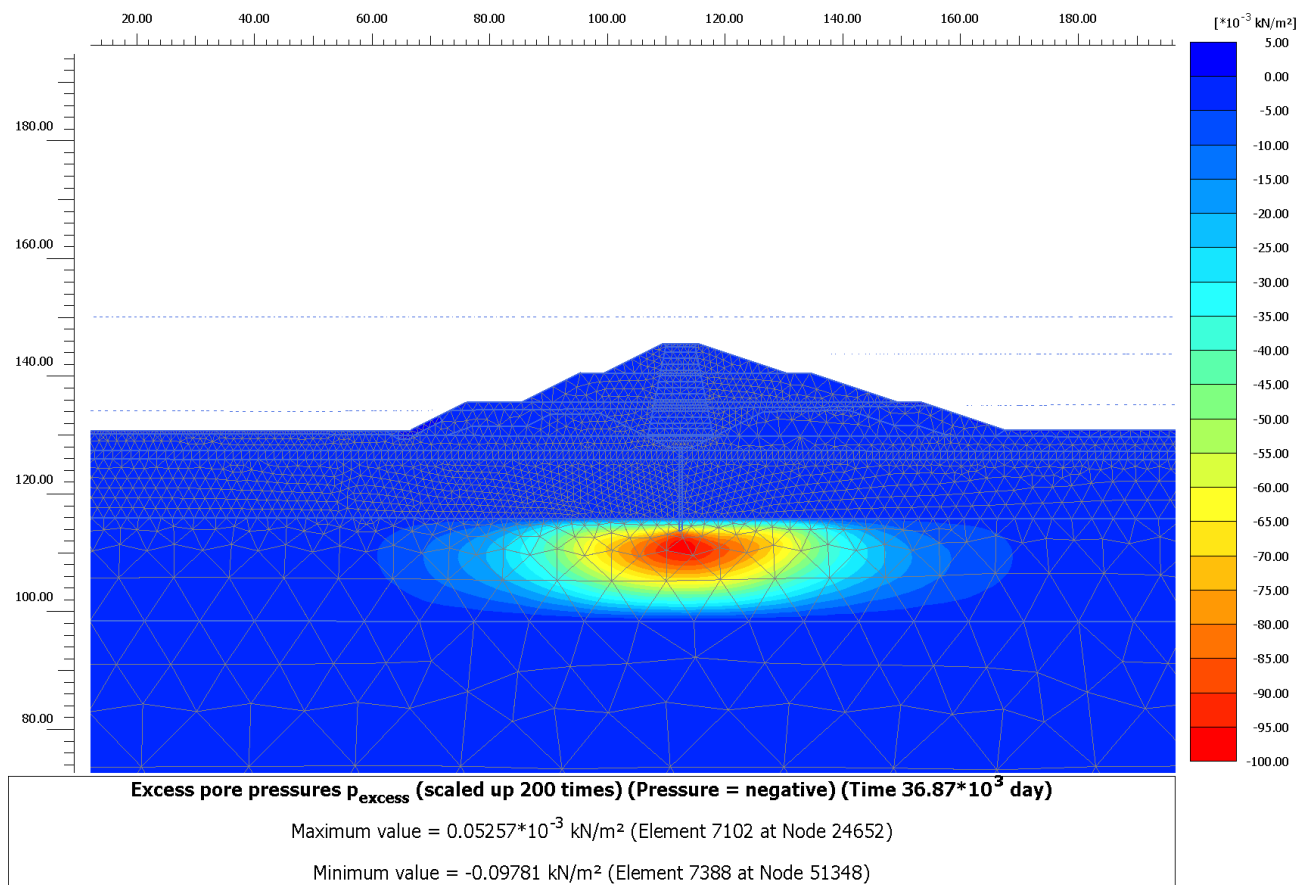


Figura 57 – Sovrapressioni trascurabili a 180 giorni

A fine costruzione dell'intera opera della cassa di espansione, periodo corrispondente a 270 giorni dalla fine della costruzione del rilevato in esame (FASE10 del cronoprogramma), si ottiene invece un cedimento massimo in testa pari a 0.4473 m, mentre alla base fondazione si ottiene un valore di cedimento pari a 0.2650 m.

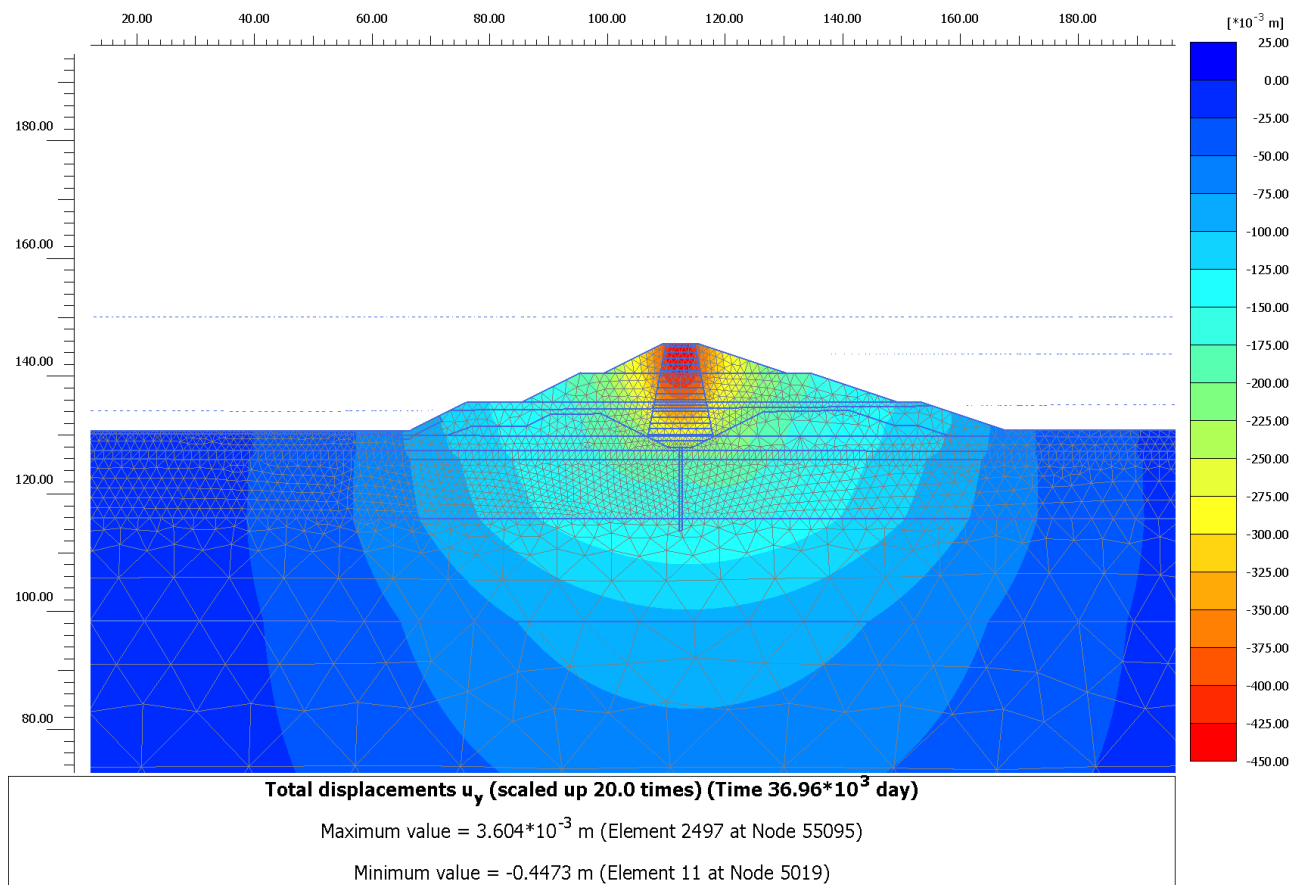


Figura 58 – Cedimenti 270 giorni

Nel lungo periodo, equivalente a 100 anni, si ottiene, ipotizzando un comportamento viscoso delle argille in base all'esito delle prove edometriche (consolidazione secondaria), un cedimento totale (considerando anche i cedimenti a 180 gg e a 270 gg) in testa al rilevato di circa 0.4743 m, mentre a piano fondazione si raggiunge un valore di 0.30 m.

La differenza tra i cedimenti a lungo termine e quelli a fine costruzione dell'intera opera (270 gg) forniscono il cedimento effettivo esibito dal rilevato nel corso della sua vita durante l'esercizio delle sue funzioni.

Tale differenza risulta essere, per la testa del rilevato stesso pari a circa 0.027 m, mentre alla sua base si ha una differenza di circa 0.03 m.

Il cedimento così valutato, ritenuto comunque cautelativo, è compatibile con il franco stabilito per il progetto dei rilevati arginali in esame, in quanto tali abbassamenti non determinano una possibile tracimazione dell'invaso per qualsiasi tempo di ritorno considerato.

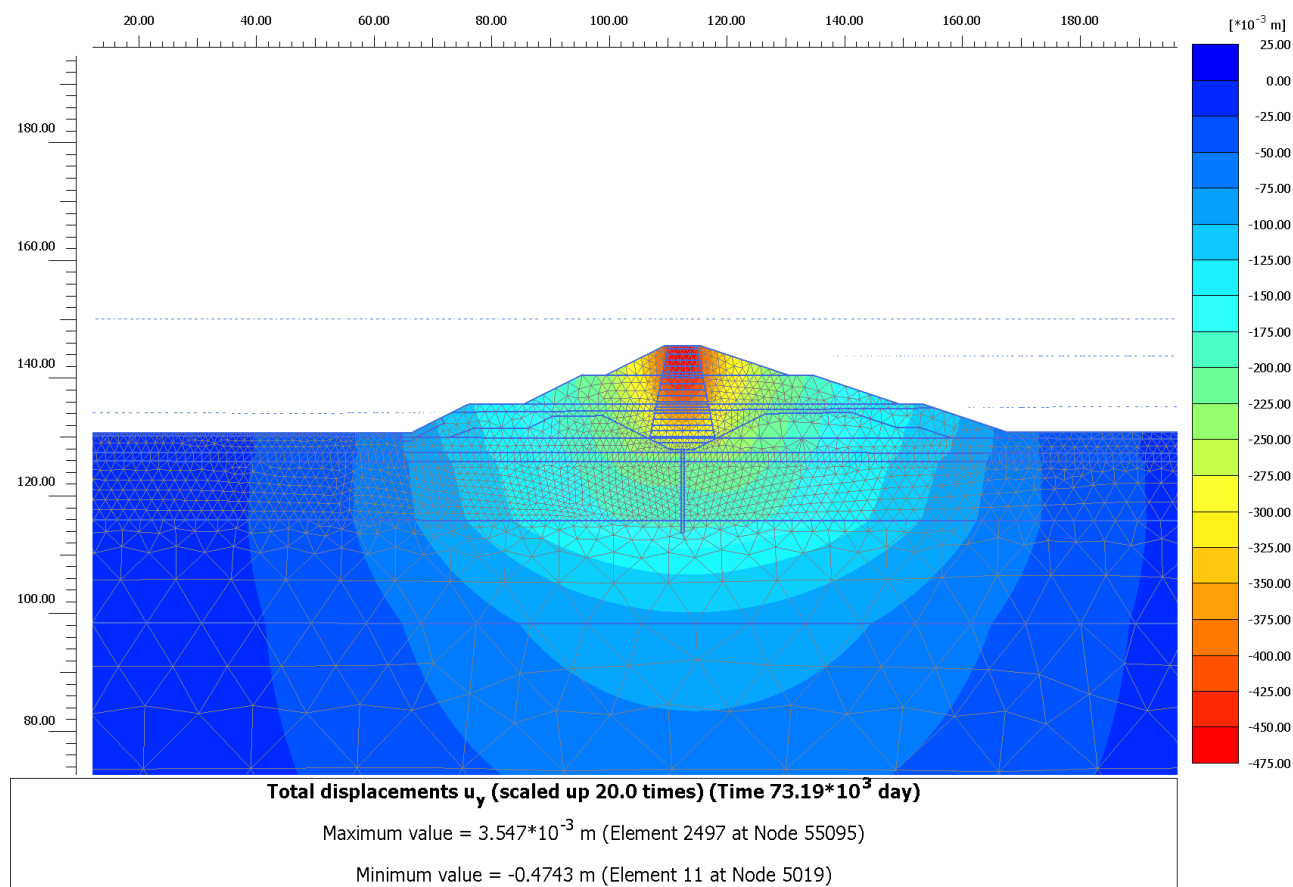


Figura 59 – Cedimenti 100 anni

Si mostra nella figura seguente come non siano presenti consistenti plasticizzazioni nella zona tra il nucleo di argilla e il materiale da rilevato grossolano, questo porta infatti ad escludere la presenza di cedimenti differenziali all'interno del rilevato zonato.

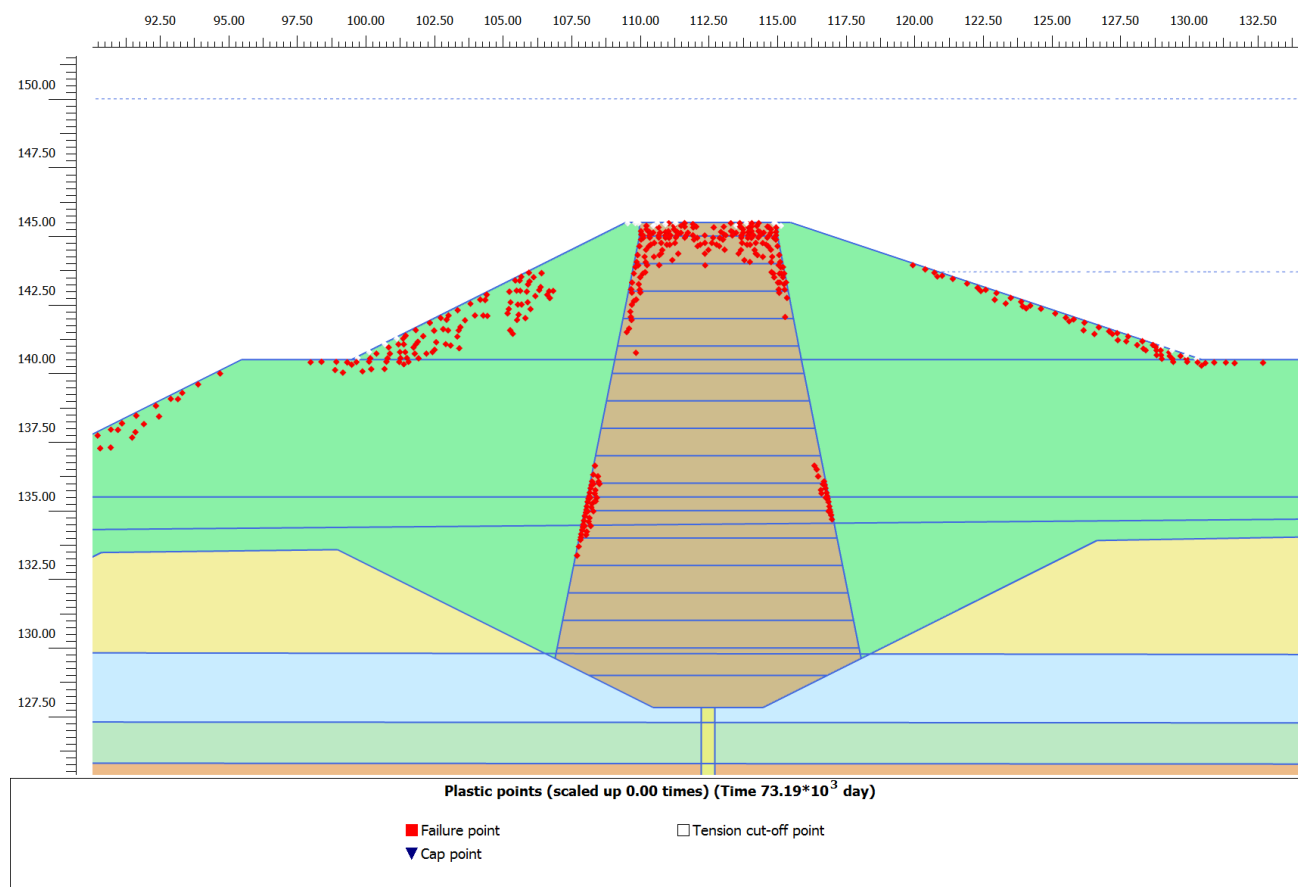


Figura 60 – Plasticizzazioni a lungo termine all'interno del rilevato zonato

5.8 SEZIONE S14

Per quanto riguarda la Sezione S14 di calcolo si mostrano i cedimenti totali ottenuti a 180 giorni dall'inizio della costruzione del rilevato che è il tempo ipotizzato per la costruzione del rilevato. A questa data le sovrappressioni generate dall'applicazione del carico dovuto alla costruzione del rilevato sono già completamente dissipate, per cui l'effetto post-costruzione che ci si aspetta è eventualmente connesso con il comportamento viscoso degli strati argillosi e del nucleo del corpo del rilevato

Si ottiene quindi un cedimento massimo in testa al rilevato di circa 0.99 m, mentre al piano di fondazione il cedimento massimo raggiunto è di 0.87 m.

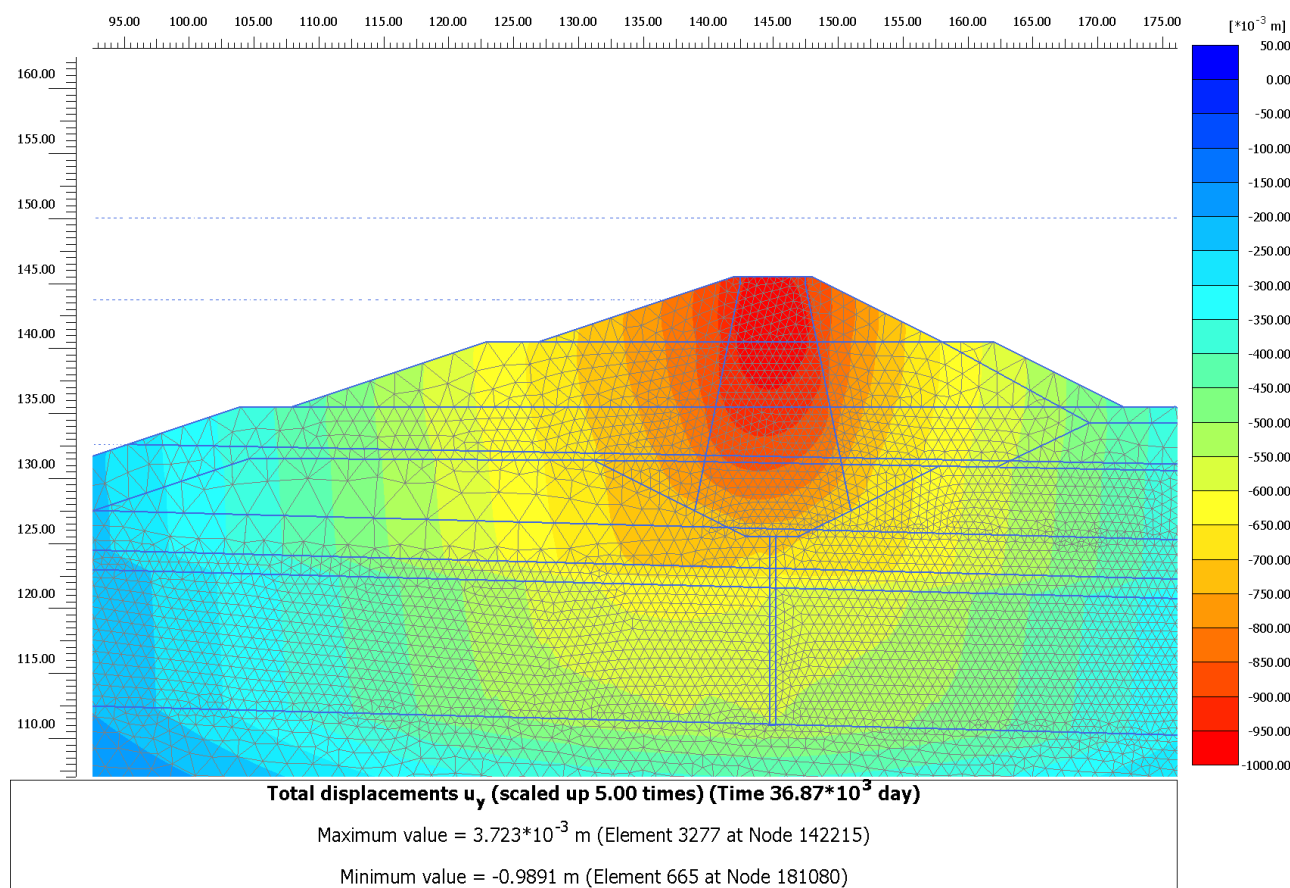


Figura 61 – Cedimenti 180 giorni

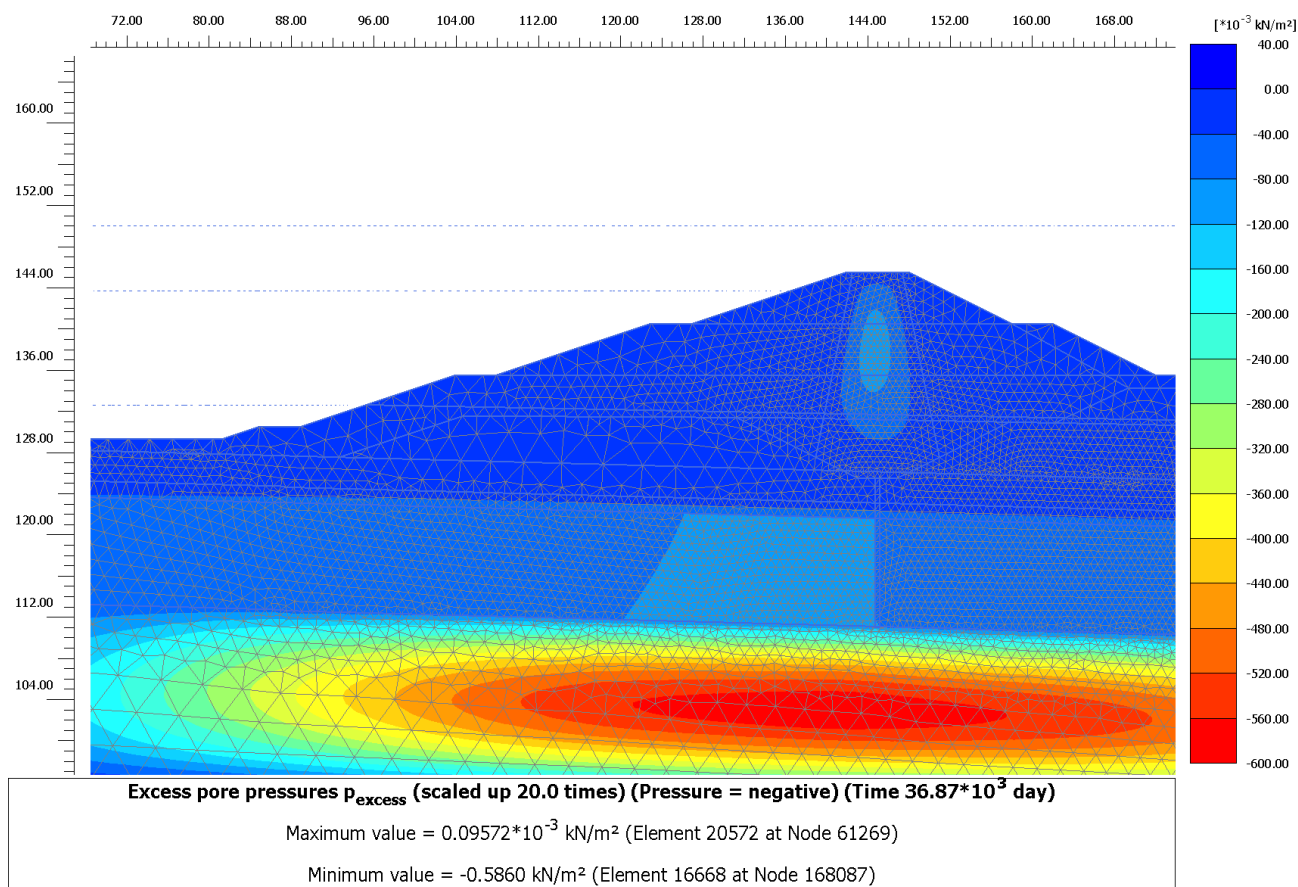


Figura 62 – Sovrapressioni trascurabili a 180 giorni

A fine costruzione dell'intera opera della cassa di espansione, periodo corrispondente a 270 giorni dalla fine della costruzione del rilevato in esame (FASE10 del cronoprogramma), si ottiene invece un cedimento massimo in testa pari a 1.00 m, mentre alla base fondazione si ottiene un valore di cedimento pari a 0.88 m.

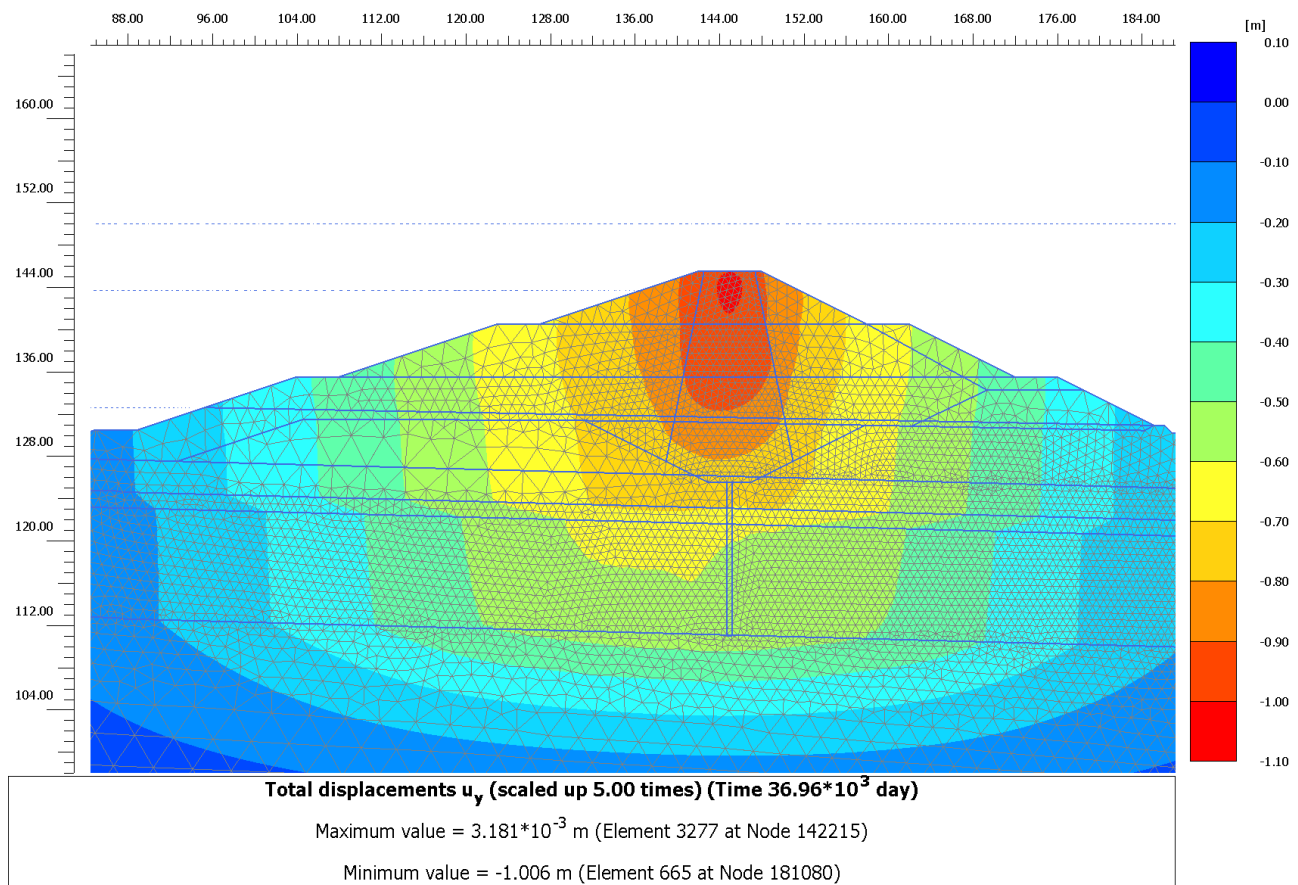


Figura 63 – Cedimenti 270 giorni

Nel lungo periodo, equivalente a 100 anni, si ottiene, ipotizzando un comportamento viscoso delle argille in base all'esito delle prove edometriche (consolidazione secondaria), un cedimento totale (considerando anche i cedimenti a 180 gg e a 270 gg) in testa al rilevato di circa 1.12 m, mentre a piano fondazione si raggiunge un valore di 1.00 m.

La differenza tra i cedimenti a lungo termine e quelli a fine costruzione dell'intera opera (270 gg) forniscono il cedimento effettivo esibito dal rilevato nel corso della sua vita durante l'esercizio delle sue funzioni.

Tale differenza risulta essere, per la testa del rilevato stesso pari a circa 0.12 m, mentre alla sua base si ha una differenza di circa 0.12 m.

Il cedimento così valutato, ritenuto comunque cautelativo, è compatibile con il franco stabilito per il progetto dei rilevati arginali in esame, in quanto tali abbassamenti non determinano una possibile tracimazione dell'invaso per qualsiasi tempo di ritorno considerato.

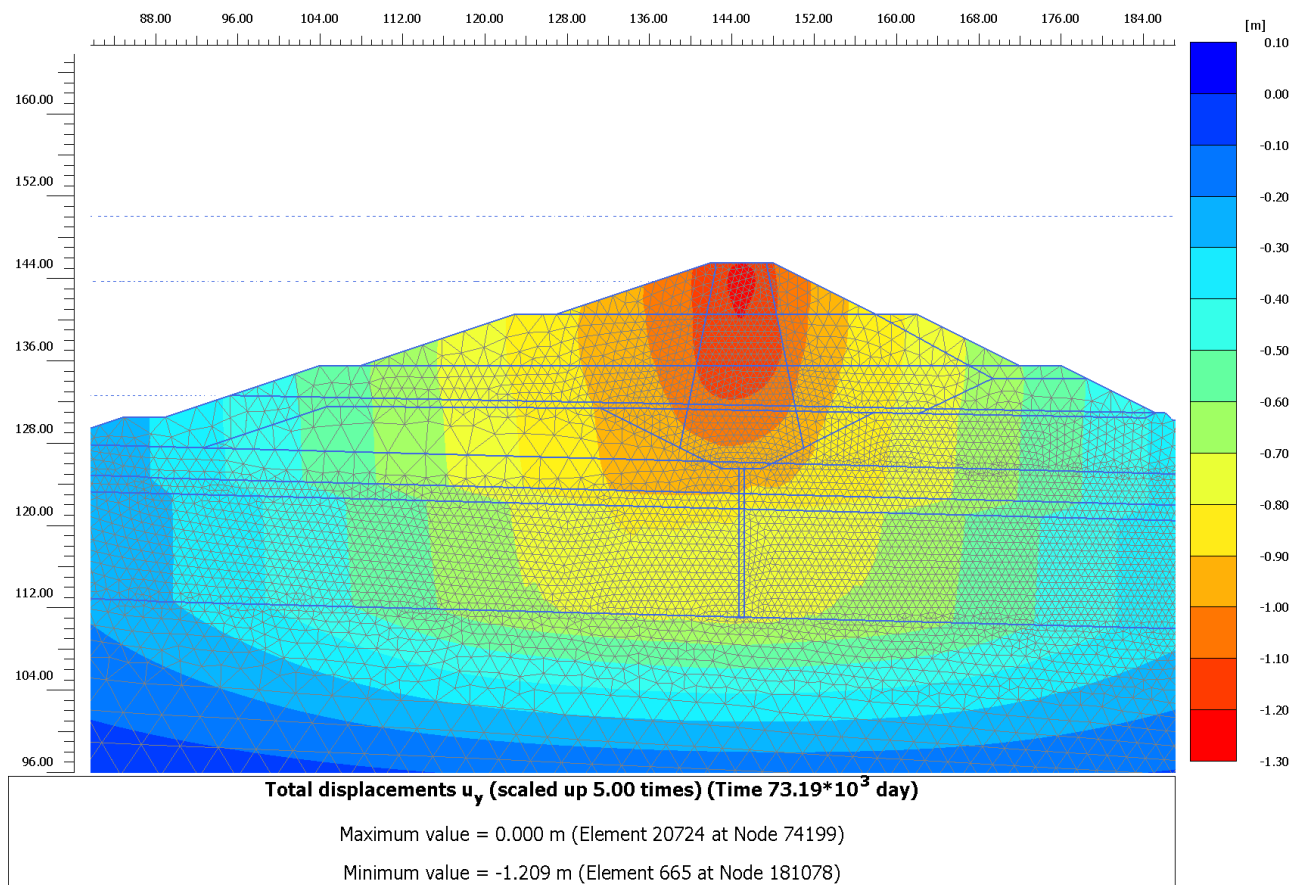


Figura 64 – Cedimenti 100 anni

Si mostra nella figura seguente come non siano presenti consistenti plasticizzazioni nella zona tra il nucleo di argilla e il materiale da rilevato grossolano, questo porta infatti ad escludere la presenza di cedimenti differenziali all'interno del rilevato zonato.

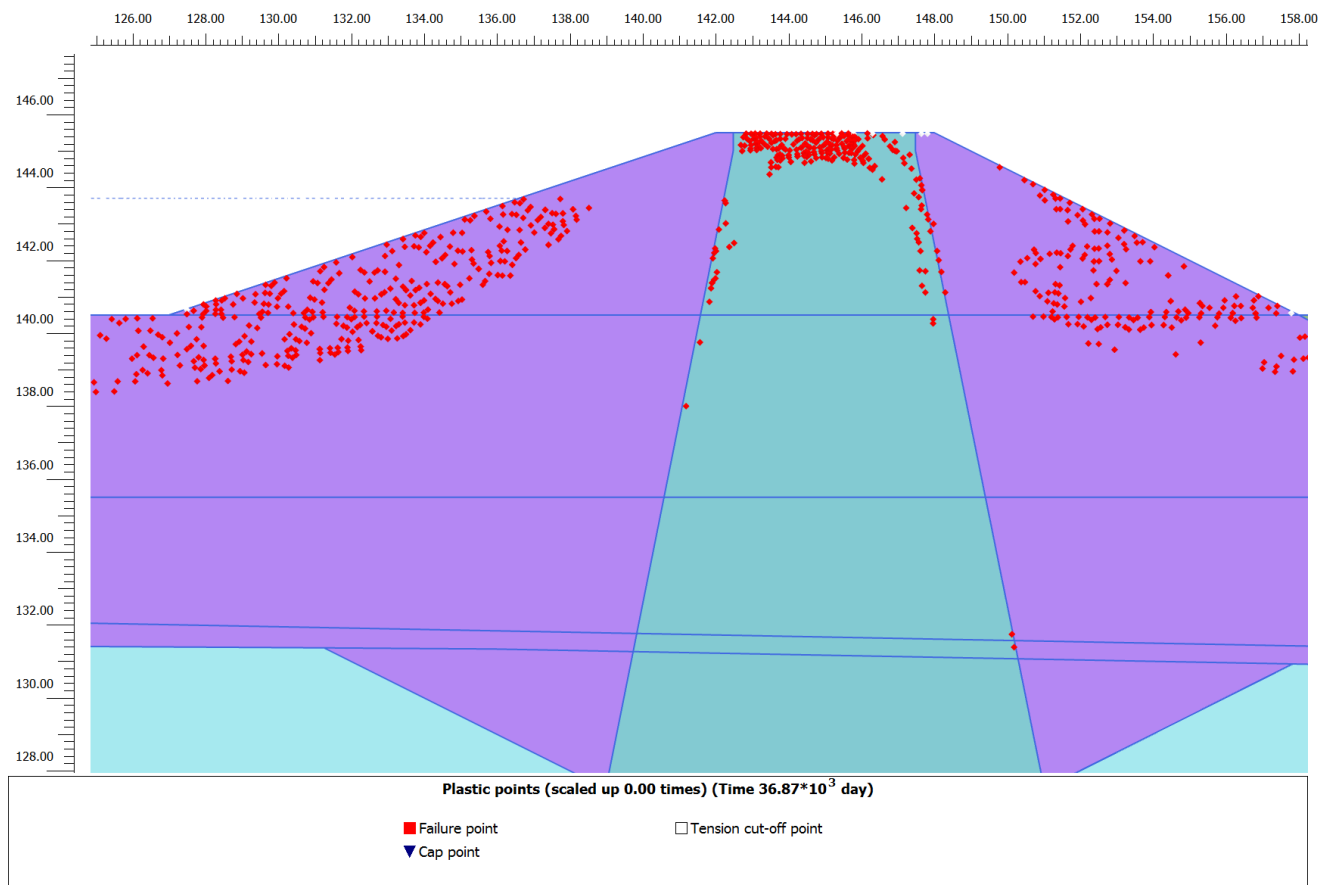


Figura 65 – Plasticizzazioni a lungo termine all'interno del rilevato zonato

5.9 SEZIONE S2_PG/S7

Per quanto riguarda la Sezione S2_PG/S7 di calcolo si mostrano i cedimenti totali ottenuti a 180 giorni dall'inizio della costruzione del rilevato che è il tempo ipotizzato per la costruzione del rilevato. A questa data le sovrappressioni generate dall'applicazione del carico dovuto alla costruzione del rilevato sono già completamente dissipate, per cui l'effetto post-costruzione che ci si aspetta è eventualmente connesso con il comportamento viscoso degli strati argillosi e del nucleo del corpo del rilevato

Si ottiene quindi un cedimento massimo in testa al rilevato di circa 0.7818 m, mentre al piano di fondazione il cedimento massimo raggiunto è di 0.73 m.

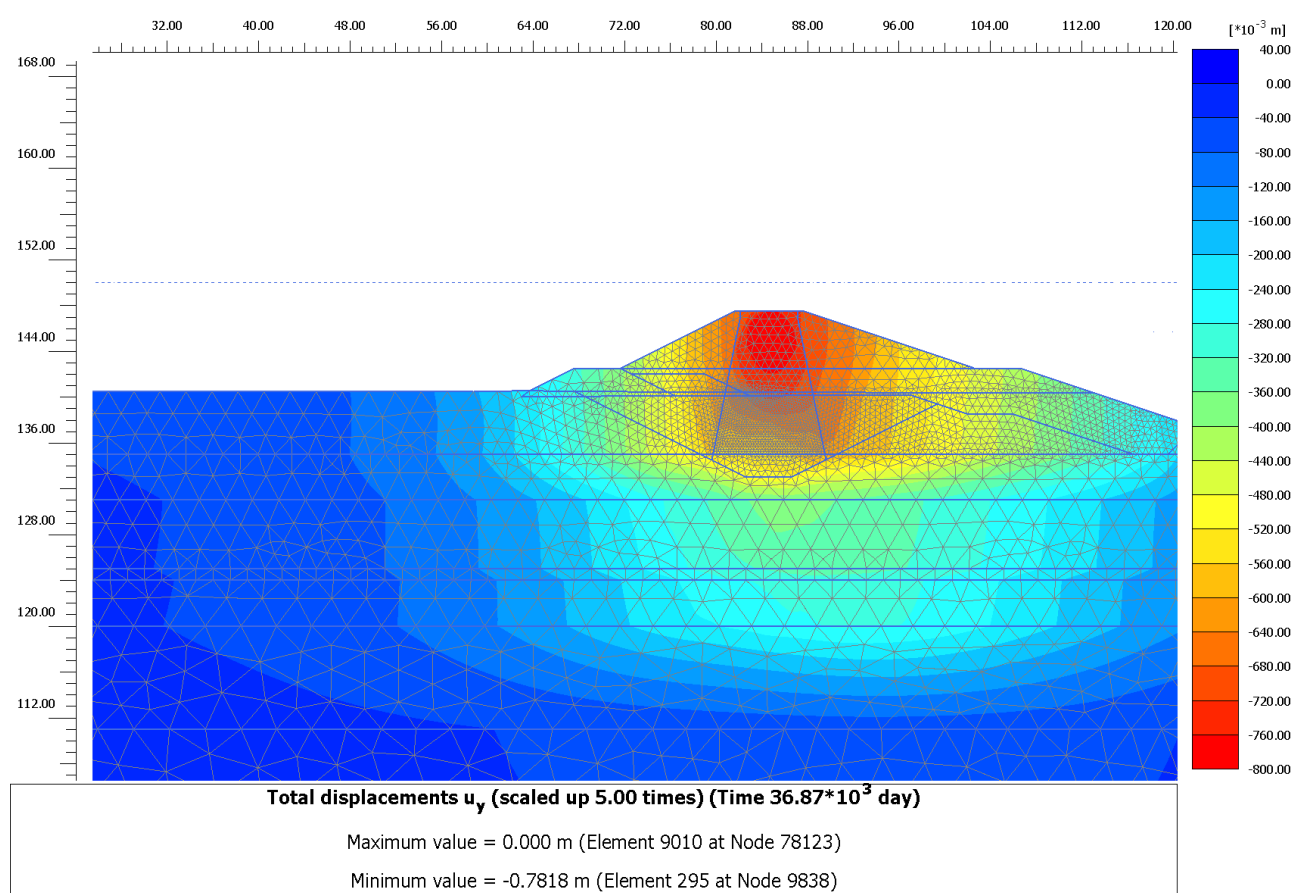


Figura 66 – Cedimenti 180 giorni

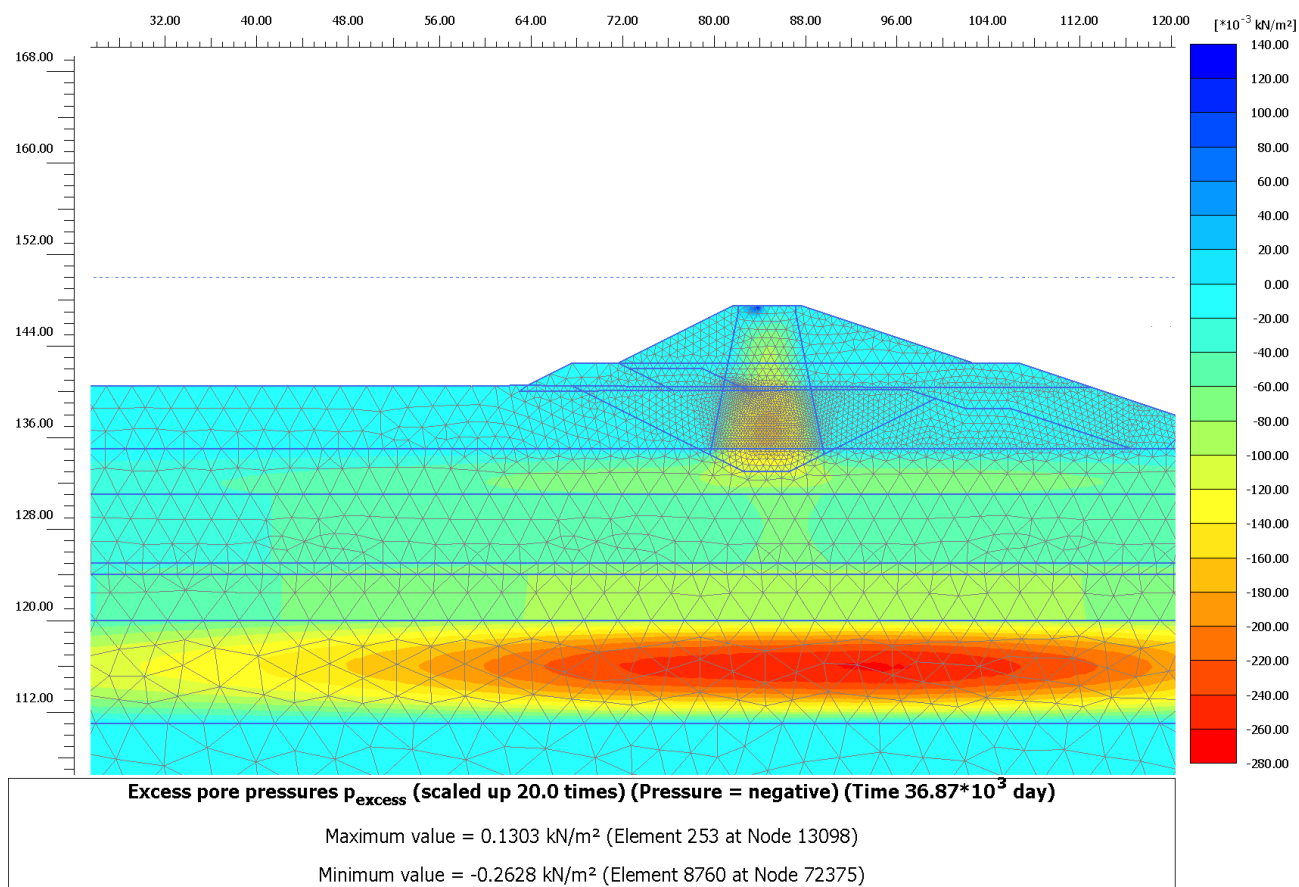


Figura 67 – Sovrapressioni trascurabili a 180 giorni

A fine costruzione dell'intera opera della cassa di espansione, periodo corrispondente a 720 giorni dalla fine della costruzione del rilevato in esame (FASE 3 del cronoprogramma), si ottiene invece un cedimento massimo in testa pari a 0.8442 m, mentre alla base fondazione si ottiene un valore di cedimento pari a 0.79 m.

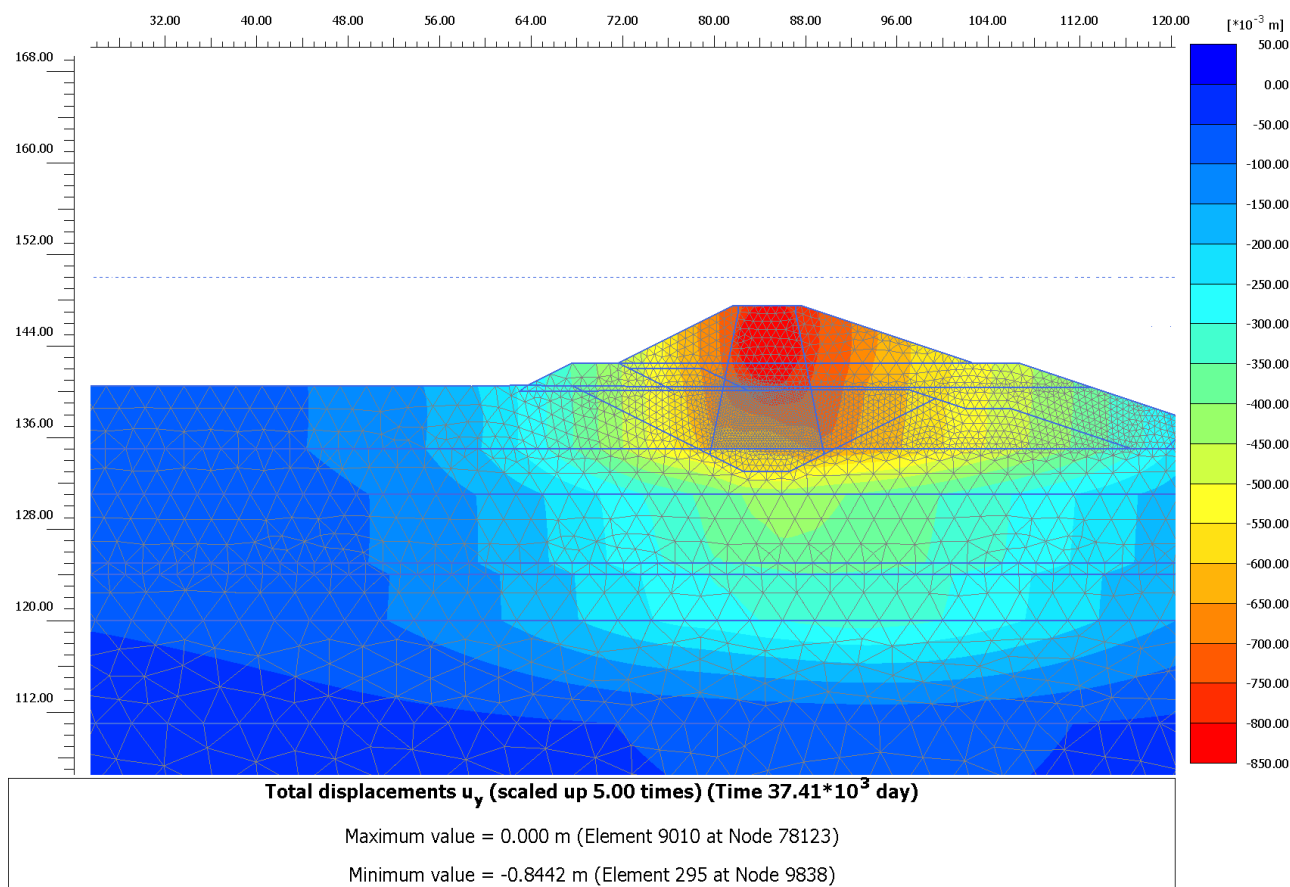


Figura 68 – Cedimenti 720 giorni

Nel lungo periodo, equivalente a 100 anni, si ottiene, ipotizzando un comportamento viscoso delle argille in base all'esito delle prove edometriche (consolidazione secondaria), un cedimento totale (considerando anche i cedimenti a 180 gg e a 720 gg) in testa al rilevato di circa 0.9924 m, mentre a piano fondazione si raggiunge un valore di 0.92 m.

La differenza tra i cedimenti a lungo termine e quelli a fine costruzione dell'intera opera (720 gg) forniscono il cedimento effettivo esibito dal rilevato nel corso della sua vita durante l'esercizio delle sue funzioni.

Tale differenza risulta essere, per la testa del rilevato stesso pari a circa 0.1482 m, mentre alla sua base si ha una differenza di circa 0.13 m.

Il cedimento così valutato, ritenuto comunque cautelativo, è compatibile con il franco stabilito per il progetto dei rilevati arginali in esame, in quanto tali abbassamenti non determinano una possibile tracimazione dell'invaso per qualsiasi tempo di ritorno considerato.

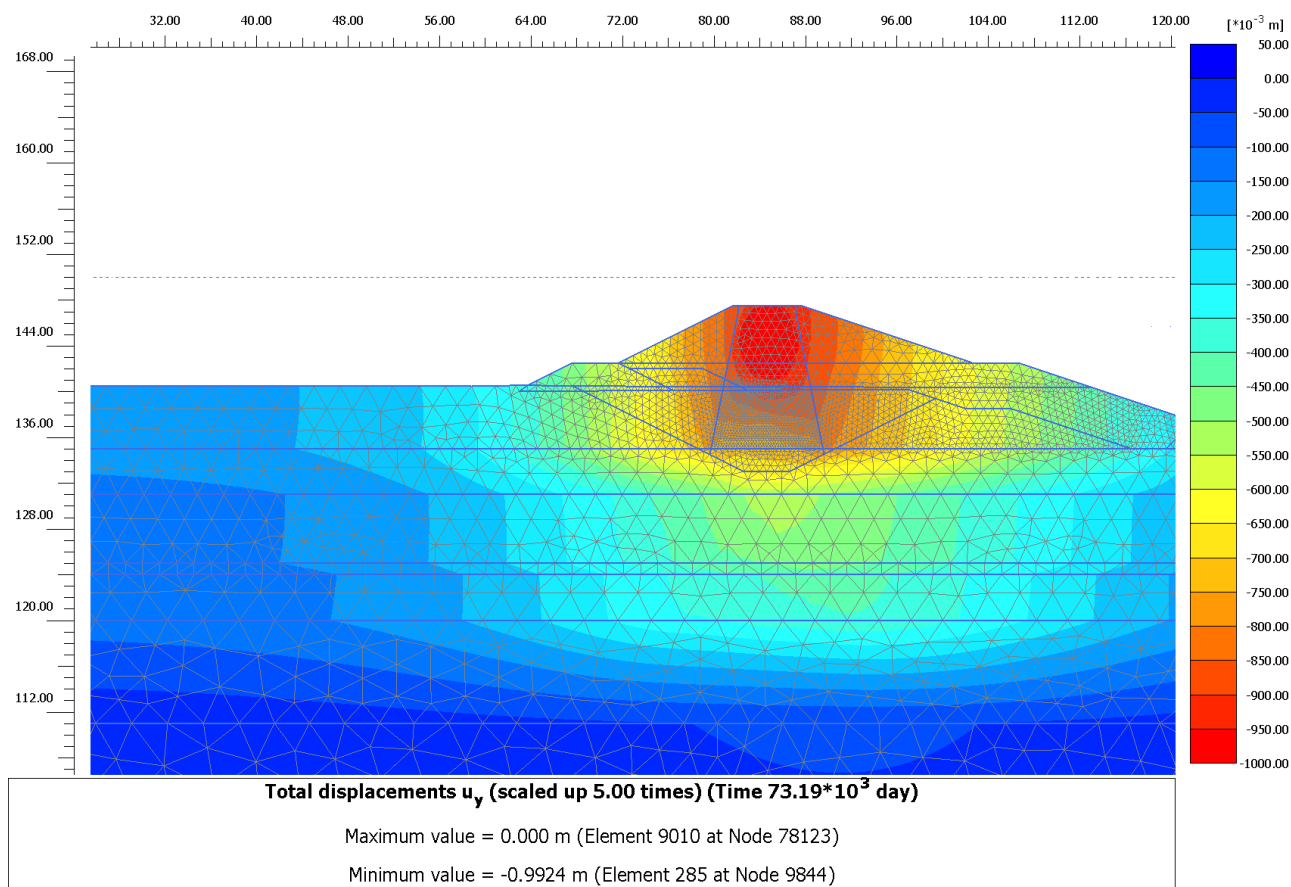


Figura 69 – Cedimenti 100 anni

Si mostra nella figura seguente come non siano presenti consistenti plasticizzazioni nella zona tra il nucleo di argilla e il materiale da rilevato grossolano, questo porta infatti ad escludere la presenza di cedimenti differenziali all'interno del rilevato zonato.

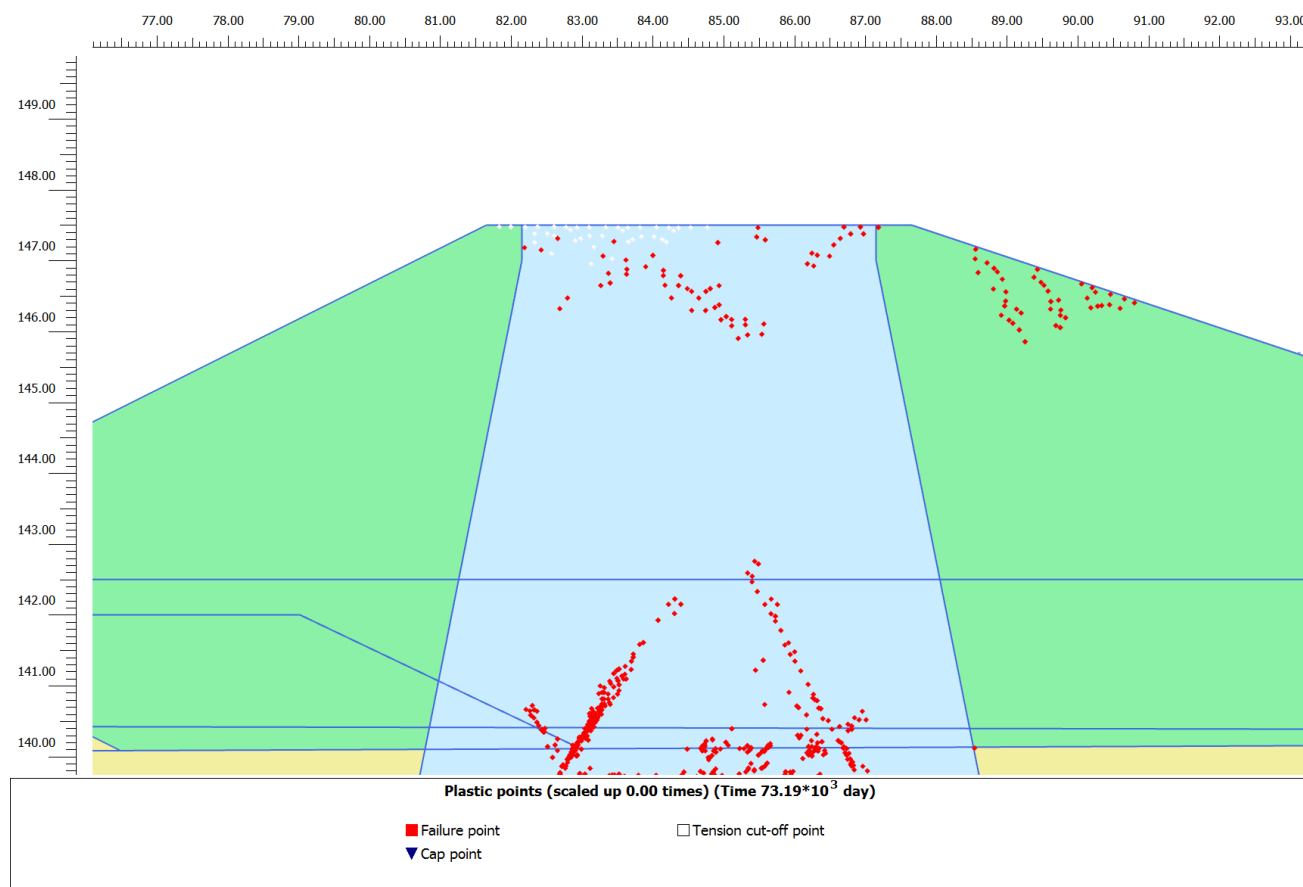


Figura 70 – Plasticizzazioni a lungo termine all'interno del rilevato zonato

6 CONFRONTO TRA MODELLO NUMERICO E CALCOLO ANALITICO

In questo capitolo si vuole mostrare il confronto tra la valutazione dei cedimenti tramite modello numerico e tramite calcolo analitico, secondo quanto riportato nel rispettivo capitolo introduttivo alla presente relazione.

Per tale confronto si mostrano i risultati inerenti alla Sezione 7.

6.1 RISULTATI ANALISI NUMERICA

Si riportano nella seguente tabella i cedimenti totali del rilevato in corrispondenza del piano di fondazione al centro dello stesso, sia nella condizione di breve termine che di lungo termine.

Tabella 14 – Risultati dell'analisi numerica

Sezione di calcolo	Cedimento a 180gg al centro del rilevato	Cedimento Totale al centro del rilevato
[-]	[m]	[m]
7	-0.26	-0.30

6.2 RISULTATI CALCOLO ANALITICO

Si riportano i cedimenti ottenuti dall'applicazione delle formulazioni analitiche per ogni strato di terreno al disotto della striscia di carico trapezoidale.

Dove:

$z_C = z_N$ = profondità rispetto al piano campagna;

$\Delta\sigma_v/q$ = in tale casistica è stato posto uguale a $\Delta\sigma_v$;

$\sigma_f = \sigma_{v0} + \Delta\sigma_v$ (stato di sforzo iniziale + incremento di carico);

σ'_f = sforzo efficace = $\sigma_f - u$;

$k_R = \text{MIN}(\sigma'_f; \sigma'_p)/\sigma_{v0}$;

$k_C = \text{MAX}(\sigma'_f/\sigma'_p, 1)$;

Per l'unità geotecnica 2B il valore di indice dei vuoti adottato è $e_0=0.641$.

2B_3																		
i	pot. [m]	z C [m]	γ [N/m³]	u0 [N/m²]	zN [m]	$\Delta\sigma_v/q$	$\Delta\sigma_v$ [N/m²]	$\sigma v0$ [N/m²]	$\sigma'v0$ [N/m²]	σf [N/m²]	$\sigma'f$ [N/m²]	OCR	$\sigma'p$ [N/m²]	Cc	Cr	kR	kC	Δw_i [m]
1	0.1	2.5	19000	25000	2.5	225305	225305	47500	22500	272805	247805	4	90000	0.2	0.03	4.00	2.753	0.0065
2	0.1	2.6	19000	26000	2.6	225177	225177	49400	23400	274577	248577	4	93600	0.2	0.03	4.00	2.656	0.0063
3	0.1	2.7	19000	27000	2.7	225044	225044	51300	24300	276344	249344	4	97200	0.2	0.03	4.00	2.565	0.0061
4	0.1	2.8	19000	28000	2.8	224905	224905	53200	25200	278105	250105	4	100800	0.2	0.03	4.00	2.481	0.0059
5	0.1	2.9	19000	29000	2.9	224760	224760	55100	26100	279860	250860	4	104400	0.2	0.03	4.00	2.403	0.0057
6	0.1	3	19000	30000	3	224610	224610	57000	27000	281610	251610	4	108000	0.2	0.03	4.00	2.330	0.0056
7	0.1	3.1	19000	31000	3.1	224455	224455	58900	27900	283355	252355	4	111600	0.2	0.03	4.00	2.261	0.0054
8	0.1	3.2	19000	32000	3.2	224296	224296	60800	28800	285096	253096	4	115200	0.2	0.03	4.00	2.197	0.0053
9	0.1	3.3	19000	33000	3.3	224131	224131	62700	29700	286831	253831	4	118800	0.2	0.03	4.00	2.137	0.0051
10	0.1	3.4	19000	34000	3.4	223962	223962	64600	30600	288562	254562	4	122400	0.2	0.03	4.00	2.080	0.0050
11	0.1	3.5	19000	35000	3.5	223789	223789	66500	31500	290289	255289	4	126000	0.2	0.03	4.00	2.026	0.0048
12	0.1	3.6	19000	36000	3.6	223612	223612	68400	32400	292012	256012	4	129600	0.2	0.03	4.00	1.975	0.0047
13	0.1	3.7	19000	37000	3.7	223430	223430	70300	33300	293730	256730	4	133200	0.2	0.03	4.00	1.927	0.0046
14	0.1	3.8	19000	38000	3.8	223245	223245	72200	34200	295445	257445	4	136800	0.2	0.03	4.00	1.882	0.0044
15	0.1	3.9	19000	39000	3.9	223055	223055	74100	35100	297155	258155	4	140400	0.2	0.03	4.00	1.839	0.0043
16	0.1	4	19000	40000	4	222863	222863	76000	36000	298863	258863	4	144000	0.2	0.03	4.00	1.798	0.0042
													CEDIMENTO TOTALE					0.08

Tabella 16 – Cedimenti totali nello strato UG2B più profondo

2B 5																			
i	pot. [m]	z C [m]	γ [N/m³]	u0 [N/m²]	zN [m]	Δσv /q	Δσv [N/m²]	σv0 [N/m²]	σ'v0 [N/m²]	σf [N/m²]	σ'f [N/m²]	OCR	σ'p [N/m²]	Cc	Cr	kR	kC	Δwi [m]	
1	0.3	14	19000	140000	14	197201	197201	266000	126000	463201	323201	2	252000	0.2	0.03	2.00	1.283	0.0056	
2	0.3	14.3	19000	143000	14.3	196388	196388	271700	128700	468088	325088	2	257400	0.2	0.03	2.00	1.263	0.0054	
3	0.3	14.6	19000	146000	14.6	195576	195576	277400	131400	472976	326976	2	262800	0.2	0.03	2.00	1.244	0.0051	
4	0.3	14.9	19000	149000	14.9	194766	194766	283100	134100	477866	328866	2	268200	0.2	0.03	2.00	1.226	0.0049	
5	0.3	15.2	19000	152000	15.2	193957	193957	288800	136800	482757	330757	2	273600	0.2	0.03	2.00	1.209	0.0047	
6	0.3	15.5	19000	155000	15.5	193149	193149	294500	139500	487649	332649	2	279000	0.2	0.03	2.00	1.192	0.0044	
7	0.3	15.8	19000	158000	15.8	192343	192343	300200	142200	492543	334543	2	284400	0.2	0.03	2.00	1.176	0.0042	
8	0.3	16.1	19000	161000	16.1	191539	191539	305900	144900	497439	336439	2	289800	0.2	0.03	2.00	1.161	0.0040	
9	0.3	16.4	19000	164000	16.4	190737	190737	311600	147600	502337	338337	2	295200	0.2	0.03	2.00	1.146	0.0038	
10	0.3	16.7	19000	167000	16.7	189936	189936	317300	150300	507236	340236	2	300600	0.2	0.03	2.00	1.132	0.0036	
11	0.3	17	19000	170000	17	189138	189138	323000	153000	512138	342138	2	306000	0.2	0.03	2.00	1.118	0.0034	
12	0.3	17.3	19000	173000	17.3	188341	188341	328700	155700	517041	344041	2	311400	0.2	0.03	2.00	1.105	0.0032	
13	0.3	17.6	19000	176000	17.6	187547	187547	334400	158400	521947	345947	2	316800	0.2	0.03	2.00	1.092	0.0030	
14	0.3	17.9	19000	179000	17.9	186755	186755	340100	161100	526855	347855	2	322200	0.2	0.03	2.00	1.080	0.0029	
15	0.3	18.2	19000	182000	18.2	185965	185965	345800	163800	531765	349765	2	327600	0.2	0.03	2.00	1.068	0.0027	
16	0.3	18.5	19000	185000	18.5	185178	185178	351500	166500	536678	351678	2	333000	0.2	0.03	2.00	1.056	0.0025	
17	0.3	18.8	19000	188000	18.8	184393	184393	357200	169200	541593	353593	2	338400	0.2	0.03	2.00	1.045	0.0023	
18	0.3	19.1	19000	191000	19.1	183610	183610	362900	171900	546510	355510	2	343800	0.2	0.03	2.00	1.034	0.0022	
19	0.3	19.4	19000	194000	19.4	182830	182830	368600	174600	551430	357430	2	349200	0.2	0.03	2.00	1.024	0.0020	
20	0.3	19.7	19000	197000	19.7	182053	182053	374300	177300	556353	359353	2	354600	0.2	0.03	2.00	1.013	0.0019	
21	0.3	20	19000	200000	20	181278	181278	380000	180000	561278	361278	2	360000	0.2	0.03	2.00	1.004	0.0017	
22	0.3	20.3	19000	203000	20.3	180506	180506	385700	182700	566206	363206	2	365400	0.2	0.03	1.99	1.000	0.0016	
23	0.3	20.6	19000	206000	20.6	179737	179737	391400	185400	571137	365137	2	370800	0.2	0.03	1.97	1.000	0.0016	
24	0.3	20.9	19000	209000	20.9	178970	178970	397100	188100	576070	367070	2	376200	0.2	0.03	1.95	1.000	0.0016	
25	0.3	21.2	19000	212000	21.2	178206	178206	402800	190800	581006	369006	2	381600	0.2	0.03	1.93	1.000	0.0016	
26	0.3	21.5	19000	215000	21.5	177445	177445	408500	193500	585945	370945	2	387000	0.2	0.03	1.92	1.000	0.0016	
27	0.3	21.8	19000	218000	21.8	176687	176687	414200	196200	590887	372887	2	392400	0.2	0.03	1.90	1.000	0.0015	
28	0.3	22.1	19000	221000	22.1	175932	175932	419900	198900	595832	374832	2	397800	0.2	0.03	1.88	1.000	0.0015	
29	0.3	22.4	19000	224000	22.4	175180	175180	425600	201600	600780	376780	2	403200	0.2	0.03	1.87	1.000	0.0015	
30	0.3	22.7	19000	227000	22.7	174431	174431	431300	204300	605731	378731	2	408600	0.2	0.03	1.85	1.000	0.0015	
31	0.3	23	19000	230000	23	173685	173685	437000	207000	610685	380685	2	414000	0.2	0.03	1.84	1.000	0.0015	
32	0.3	23.3	19000	233000	23.3	172942	172942	442700	209700	615642	382642	2	419400	0.2	0.03	1.82	1.000	0.0014	
33	0.3	23.6	19000	236000	23.6	172202	172202	448400	212400	620602	384602	2	424800	0.2	0.03	1.81	1.000	0.0014	
34	0.3	23.9	19000	239000	23.9	171466	171466	454100	215100	625566	386566	2	430200	0.2	0.03	1.80	1.000	0.0014	
35	0.3	24.2	19000	242000	24.2	170732	170732	459800	217800	630532	388532	2	435600	0.2	0.03	1.78	1.000	0.0014	
36	0.3	24.5	19000	245000	24.5	170002	170002	465500	220500	635502	390502	2	441000	0.2	0.03	1.77	1.000	0.0014	
37	0.3	24.8	19000	248000	24.8	169274	169274	471200	223200	640474	392474	2	446400	0.2	0.03	1.76	1.000	0.0013	
38	0.3	25.1	19000	251000	25.1	168550	168550	476900	225900	645450	394450	2	451800	0.2	0.03	1.75	1.000	0.0013	
39	0.3	25.4	19000	254000	25.4	167830	167830	482600	228600	650430	396430	2	457200	0.2	0.03	1.73	1.000	0.0013	
40	0.3	25.7	19000	257000	25.7	167112	167112	488300	231300	655412	398412	2	462600	0.2	0.03	1.72	1.000	0.0013	
41	0.3	26	19000	260000	26	166398	166398	494000	234000	660398	400398	2	468000	0.2	0.03	1.71	1.000	0.0013	
42	0.3	26.3	19000	263000	26.3	165687	165687	499700	236700	665387	402387	2	473400	0.2	0.03	1.70	1.000	0.0013	
43	0.3	26.6	19000	266000	26.6	164979	164979	505400	239400	670379	404379	2	478800	0.2	0.03	1.69	1.000	0.0012	
44	0.3	26.9	19000	269000	26.9	164275	164275	511100	242100	675375	406375	2	484200	0.2	0.03	1.68	1.000	0.0012	
45	0.3	27.2	19000	272000	27.2	163574	163574	516800	244800	680374	408374	2	489600	0.2	0.03	1.67	1.000	0.0012	
46	0.3	27.5	19000	275000	27.5	162876	162876	522500	247500	685376	410376	2	495000	0.2	0.03	1.66	1.000	0.0012	
47	0.3	27.8	19000	278000	27.8	162182	162182	528200	250200	690382	412382	2	500400	0.2	0.03	1.65	1.000	0.0012	
48	0.3	28.1	19000	281000	28.1	161491	161491	533900	252900	695391	414391	2	505800	0.2	0.03	1.64	1.000	0.0012	
49	0.3	28.4	19000	284000	28.4	160803	160803	539600	255600	700403	416403	2	511200	0.2	0.03	1.63	1.000	0.0012	
50	0.3	28.7	19000	287000	28.7	160119	160119	545300	258300	705419	418419	2	516600	0.2	0.03	1.62	1.000	0.0011	
51	0.3	29	19000	290000	29	159438	159438	551000	261000	710438	420438	2	522000	0.2	0.03	1.61	1.000	0.0011	
52	0.3	29.3	19000	293000	29.3	158760	158760	556700	263700	715460	422460	2	527400	0.2	0.03	1.60	1.000	0.0011	
53	0.3	29.6	19000	296000	29.6	158086	158086	562400	266400	720486	424486	2	532800	0.2	0.03	1.59	1.000	0.0011	
54	0.3	29.9	19000	299000	29.9	157416	157416	568100	269100	725516	426516	2	538200	0.2	0.03	1.58	1.000	0.0011	
55	0.3	30.2	19000	302000	30.2	156748	156748	573800	271800	730548	428548	2	543600	0.2	0.03	1.58	1.000	0.0011	
56	0.3	30.5	19000	305000	30.5	156084	156084	579500	274500	735584	430584	2	549000	0.2	0.03	1.57	1.000	0.0011	
57	0.3	30.8	19000	308000	30.8	155424	155424	585200	277200	740624	432624	2	554400	0.2	0.03	1.56	1.000	0.0011	
58	0.4	31.1	19000	311000	31.1	154767	154767	590900	279900	745667	434667	2	559800	0.2	0.03	1.55	1.000	0.0010	
59	0.3	31.5	19000	315000	31.5	153896	153896	598500	283500	752396	437396	2	567000	0.2	0.03	1.54	1.000	0.0010	

Tabella 17 – Cedimenti all'interno dello strato UG2A più superficiale

2A_2								
i	pot. [m]	z C [m]	γ [N/m³]	u0 [N/m²]	zN [m]	$\Delta\sigma_v / q$	$\Delta\sigma_v$ [N/m²]	$\Delta\delta$ [m]
1	0.3	0	20000	0	0			
2	0.3	0.3	20000	3000	0.3	226571.9604	226572	0.001259
3	0.3	0.6	20000	6000	0.6	226551.1094	226551	0.001259
4	0.3	0.9	20000	9000	0.9	226496.6414	226497	0.001258
5	0.3	1.2	20000	12000	1.2	226396.2302	226396	0.001258
6	0.3	1.5	20000	15000	1.5	226241.6859	226242	0.001257
7	0.3	1.8	20000	18000	1.8	226028.8303	226029	0.001256
8	0.3	2.1	20000	21000	2.1	225756.8445	225757	0.001254
9	0.3	2.4	20000	24000	2.4	225427.3958	225427	0.001252
		CEDIMENTO TOTALE					0.01	

Tabella 18 – Cedimenti all'interno dello strato UG2A intermedio

2A_4								
i	pot. [m]	z C [m]	γ [N/m³]	u0 [N/m²]	zN [m]	$\Delta\sigma_v / q$	$\Delta\sigma_v$ [N/m²]	$\Delta\delta$ [m]
1	0.3	4.05	20000	40500	4.05	222765.0598	222765	1.07E-03
2	0.3	4.35	20000	43500	4.35	222162.0087	222162	1.07E-03
3	0.3	4.65	20000	46500	4.65	221532.1338	221532	1.06E-03
4	0.3	4.95	20000	49500	4.95	220878.5852	220879	1.06E-03
5	0.3	5.25	20000	52500	5.25	220204.1560	220204	1.06E-03
6	0.3	5.55	20000	55500	5.55	219511.3121	219511	1.05E-03
7	0.3	5.85	20000	58500	5.85	218802.2258	218802	1.05E-03
8	0.3	6.15	20000	61500	6.15	218078.8102	218079	1.05E-03
9	0.3	6.45	20000	64500	6.45	217342.7499	217343	1.04E-03
10	0.3	6.75	20000	67500	6.75	216595.5306	216596	1.04E-03
11	0.3	7.05	20000	70500	7.05	215838.4649	215838	1.04E-03
12	0.3	7.35	20000	73500	7.35	215072.7144	215073	1.03E-03
13	0.3	7.65	20000	76500	7.65	214299.3103	214299	1.03E-03
14	0.3	7.95	20000	79500	7.95	213519.1698	213519	1.02E-03
15	0.3	8.25	20000	82500	8.25	212733.1115	212733	1.02E-03
16	0.3	8.55	20000	85500	8.55	211941.8677	211942	1.02E-03
17	0.3	8.85	20000	88500	8.85	211146.0959	211146	1.01E-03
18	0.3	9.15	20000	91500	9.15	210346.3874	210346	1.01E-03
19	0.3	9.45	20000	94500	9.45	209543.2765	209543	1.01E-03
20	0.3	9.75	20000	97500	9.75	208737.2464	208737	1.00E-03
21	0.3	10.05	20000	100500	10.05	207928.7362	207929	9.98E-04
22	0.3	10.35	20000	103500	10.35	207118.1454	207118	9.94E-04
23	0.3	10.65	20000	106500	10.65	206305.8390	206306	9.90E-04
24	0.3	10.95	20000	109500	10.95	205492.1507	205492	9.86E-04
25	0.3	11.25	20000	112500	11.25	204677.3872	204677	9.82E-04
26	0.3	11.55	20000	115500	11.55	203861.8304	203862	9.79E-04
27	0.3	11.85	20000	118500	11.85	203045.7403	203046	9.75E-04
28	0.3	12.15	20000	121500	12.15	202229.3574	202229	9.71E-04
29	0.3	12.45	20000	124500	12.45	201412.9044	201413	9.67E-04
30	0.3	12.75	20000	127500	12.75	200596.5880	200597	9.63E-04
31	0.3	13.05	20000	130500	13.05	199780.6007	199781	9.59E-04
32	0.3	13.35	20000	133500	13.35	198965.1218	198965	9.55E-04
33	0.3	13.65	20000	136500	13.65	198150.3188	198150	9.51E-04
34	0.3	13.95	20000	139500	13.95	197336.3485	197336	9.47E-04
35	0.3	14.25	20000	142500	14.25	196523.3577	196523	9.43E-04
CEDIMENTO TOTALE								0.035

Tabella 19 – Cedimenti all'interno dello strato UG2A più profondo

2A_6								
i	pot. [m]	z C [m]	γ [N/m ³]	u0 [N/m ²]	zN [m]	$\Delta\sigma_v/q$	$\Delta\sigma_v$ [N/m ²]	$\Delta\delta$ [m]
1	0.5	31.52	20000	315200	31.52	153852.6059	153853	8.14E-04
2	0.5	32.02	20000	320200	32.02	152773.0177	152773	8.08E-04
3	0.5	32.52	20000	325200	32.52	151702.8998	151703	8.03E-04
4	0.5	33.02	20000	330200	33.02	150642.2440	150642	7.97E-04
5	0.5	33.52	20000	335200	33.52	149591.0373	149591	7.91E-04
6	0.5	34.02	20000	340200	34.02	148549.2627	148549	7.86E-04
7	0.5	34.52	20000	345200	34.52	147516.8991	147517	7.81E-04
8	0.5	35.02	20000	350200	35.02	146493.9217	146494	7.75E-04
9	0.5	35.52	20000	355200	35.52	145480.3018	145480	7.70E-04
10	0.5	36.02	20000	360200	36.02	144476.0077	144476	7.64E-04
11	0.5	36.52	20000	365200	36.52	143481.0040	143481	7.59E-04
12	0.5	37.02	20000	370200	37.02	142495.2526	142495	7.54E-04
13	0.5	37.52	20000	375200	37.52	141518.7124	141519	7.49E-04
14	0.5	38.02	20000	380200	38.02	140551.3396	140551	7.44E-04
15	0.5	38.52	20000	385200	38.52	139593.0876	139593	7.39E-04
16	0.5	39.02	20000	390200	39.02	138643.9078	138644	7.34E-04
17	0.5	39.52	20000	395200	39.52	137703.7490	137704	7.29E-04
18	0.5	40.02	20000	400200	40.02	136772.5580	136773	7.24E-04
19	0.5	40.52	20000	405200	40.52	135850.2797	135850	7.19E-04
20	0.5	41.02	20000	410200	41.02	134936.8571	134937	7.14E-04
21	0.5	41.52	20000	415200	41.52	134032.2312	134032	7.09E-04
22	0.5	42.02	20000	420200	42.02	133136.3419	133136	7.04E-04
23	0.5	42.52	20000	425200	42.52	132249.1272	132249	7.00E-04
24	0.5	43.02	20000	430200	43.02	131370.5238	131371	6.95E-04
25	0.5	43.52	20000	435200	43.52	130500.4672	130500	6.90E-04
26	0.5	44.02	20000	440200	44.02	129638.8918	129639	6.86E-04
27	0.5	44.52	20000	445200	44.52	128785.7308	128786	6.81E-04
28	0.5	45.02	20000	450200	45.02	127940.9163	127941	6.77E-04
29	0.5	45.52	20000	455200	45.52	127104.3798	127104	6.73E-04
30	0.5	46.02	20000	460200	46.02	126276.0519	126276	6.68E-04
31	0.5	46.52	20000	465200	46.52	125455.8623	125456	6.64E-04
32	0.5	47.02	20000	470200	47.02	124643.7402	124644	6.59E-04
33	0.5	47.52	20000	475200	47.52	123839.6143	123840	6.55E-04
34	0.5	48.02	20000	480200	48.02	123043.4127	123043	6.51E-04
35	0.5	48.52	20000	485200	48.52	122255.0631	122255	6.47E-04
36	0.5	49.02	20000	490200	49.02	121474.4928	121474	6.43E-04
37	0.5	49.52	20000	495200	49.52	120701.6289	120702	6.39E-04
38	0.5	50.02	20000	500200	50.02	119936.3983	119936	6.35E-04
39	0.5	50.52	20000	505200	50.52	119178.7274	119179	6.31E-04
40	0.5	51.02	20000	510200	51.02	118428.5428	118429	6.27E-04
41	0.5	51.52	20000	515200	51.52	117685.7710	117686	6.23E-04
42	0.5	52.02	20000	520200	52.02	116950.3382	116950	6.19E-04
43	0.5	52.52	20000	525200	52.52	116222.1710	116222	6.15E-04
44	0.5	53.02	20000	530200	53.02	115501.1958	115501	6.11E-04
45	0.5	53.52	20000	535200	53.52	114787.3391	114787	6.07E-04
46	0.5	54.02	20000	540200	54.02	114080.5276	114081	6.04E-04
47	0.5	54.52	20000	545200	54.52	113380.6883	113381	6.00E-04
48	0.5	55.02	20000	550200	55.02	112687.7483	112688	5.96E-04
49	0.5	55.52	20000	555200	55.52	112001.6348	112002	5.93E-04
50	0.5	56.02	20000	560200	56.02	111322.2755	111322	5.89E-04
51	0.5	56.52	20000	565200	56.52	110649.5984	110650	5.85E-04
52	0.5	57.02	20000	570200	57.02	109983.5317	109984	5.82E-04
53	0.5	57.52	20000	575200	57.52	109324.0039	109324	5.78E-04
54	0.5	58.02	20000	580200	58.02	108670.9442	108671	5.75E-04
55	0.5	58.52	20000	585200	58.52	108024.2819	108024	5.72E-04
56	0.5	59.02	20000	590200	59.02	107383.9468	107384	5.68E-04
57	0.5	59.52	20000	595200	59.52	106749.8692	106750	5.65E-04
58	0.5	60.02	20000	600200	60.02	106121.9799	106122	5.61E-04
59	0.5	60.52	20000	605200	60.52	105500.2101	105500	5.58E-04
60	0.5	61.02	20000	610200	61.02	104884.4915	104884	5.55E-04
61	0.5	61.52	20000	615200	61.52	104274.7563	104275	5.52E-04
62	0.5	62.02	20000	620200	62.02	103670.9373	103671	5.49E-04
63	0.5	62.52	20000	625200	62.52	103072.9678	103073	5.45E-04
64	0.5	63.02	20000	630200	63.02	102480.7815	102481	5.42E-04
65	0.5	63.52	20000	635200	63.52	101894.3130	101894	5.39E-04
66	0.5	64.02	20000	640200	64.02	101313.4971	101313	5.36E-04

2A_6								
i	pot. [m]	z C [m]	γ [N/m ³]	u0 [N/m ²]	zN [m]	$\Delta\sigma_v/q$	$\Delta\sigma_v$ [N/m ²]	$\Delta\delta$ [m]

66	0.5	64.02	20000	640200	64.02	101313.4971	101313	5.36E-04
67	0.5	64.52	20000	645200	64.52	100738.2694	100738	5.33E-04
68	0.5	65.02	20000	650200	65.02	100168.5660	100169	5.30E-04
69	0.5	65.52	20000	655200	65.52	99604.3237	99604	5.27E-04
70	0.5	66.02	20000	660200	66.02	99045.4797	99045	5.24E-04
71	0.5	66.52	20000	665200	66.52	98491.9719	98492	5.21E-04
72	0.5	67.02	20000	670200	67.02	97943.7389	97944	5.18E-04
73	0.5	67.52	20000	675200	67.52	97400.7197	97401	5.15E-04
74	0.5	68.02	20000	680200	68.02	96862.8542	96863	5.13E-04
75	0.5	68.52	20000	685200	68.52	96330.0826	96330	5.10E-04
76	0.5	69.02	20000	690200	69.02	95802.3459	95802	5.07E-04
77	0.5	69.52	20000	695200	69.52	95279.5857	95280	5.04E-04
78	0.5	70.02	20000	700200	70.02	94761.7443	94762	5.01E-04
79	0.5	70.52	20000	705200	70.52	94248.7643	94249	4.99E-04
80	0.5	71.02	20000	710200	71.02	93740.5894	93741	4.96E-04
81	0.5	71.52	20000	715200	71.52	93237.1634	93237	4.93E-04
82	0.5	72.02	20000	720200	72.02	92738.4312	92738	4.91E-04
83	0.5	72.52	20000	725200	72.52	92244.3380	92244	4.88E-04
84	0.5	73.02	20000	730200	73.02	91754.8298	91755	4.85E-04
85	0.5	73.52	20000	735200	73.52	91269.8530	91270	4.83E-04
86	0.5	74.02	20000	740200	74.02	90789.3549	90789	4.80E-04
87	0.5	74.52	20000	745200	74.52	90313.2831	90313	4.78E-04
88	0.5	75.02	20000	750200	75.02	89841.5861	89842	4.75E-04
89	0.5	75.52	20000	755200	75.52	89374.2127	89374	4.73E-04
90	0.5	76.02	20000	760200	76.02	88911.1127	88911	4.70E-04
91	0.5	76.52	20000	765200	76.52	88452.2360	88452	4.68E-04
92	0.5	77.02	20000	770200	77.02	87997.5336	87998	4.66E-04
93	0.5	77.52	20000	775200	77.52	87546.9568	87547	4.63E-04
94	0.5	78.02	20000	780200	78.02	87100.4574	87100	4.61E-04
95	0.5	78.52	20000	785200	78.52	86657.9881	86658	4.59E-04
96	0.5	79.02	20000	790200	79.02	86219.5019	86220	4.56E-04
97	0.5	79.52	20000	795200	79.52	85784.9524	85785	4.54E-04
98	0.5	80.02	20000	800200	80.02	85354.2940	85354	4.52E-04
99	0.5	80.52	20000	805200	80.52	84927.4815	84927	4.49E-04
100	0.5	81.02	20000	810200	81.02	84504.4701	84504	4.47E-04
101	0.5	81.52	20000	815200	81.52	84085.2159	84085	4.45E-04
102	0.5	82.02	20000	820200	82.02	83669.6752	83670	4.43E-04
103	0.5	82.52	20000	825200	82.52	83257.8052	83258	4.41E-04
104	0.5	83.02	20000	830200	83.02	82849.5634	82850	4.38E-04
105	0.5	83.52	20000	835200	83.52	82444.9078	82445	4.36E-04
106	0.5	84.02	20000	840200	84.02	82043.7970	82044	4.34E-04
107	0.5	84.52	20000	845200	84.52	81646.1903	81646	4.32E-04
108	0.5	85.02	20000	850200	85.02	81252.0473	81252	4.30E-04
109	0.5	85.52	20000	855200	85.52	80861.3281	80861	4.28E-04
110	0.5	86.02	20000	860200	86.02	80473.9934	80474	4.26E-04
111	0.5	86.52	20000	865200	86.52	80090.0044	80090	4.24E-04
112	0.5	87.02	20000	870200	87.02	79709.3228	79709	4.22E-04
113	0.5	87.52	20000	875200	87.52	79331.9107	79332	4.20E-04
114	0.5	88.02	20000	880200	88.02	78957.7308	78958	4.18E-04
115	0.5	88.52	20000	885200	88.52	78586.7463	78587	4.16E-04
116	0.5	89.02	20000	890200	89.02	78218.9207	78219	4.14E-04
117	0.5	89.52	20000	895200	89.52	77854.2181	77854	4.12E-04
118	0.5	90.02	20000	900200	90.02	77492.6031	77493	4.10E-04
119	0.5	90.52	20000	905200	90.52	77134.0406	77134	4.08E-04
120	0.5	91.02	20000	910200	91.02	76778.4962	76778	4.06E-04
121	0.5	91.52	20000	915200	91.52	76425.9356	76426	4.04E-04
122	0.5	92.02	20000	920200	92.02	76076.3252	76076	4.03E-04
123	0.5	92.52	20000	925200	92.52	75729.6319	75730	4.01E-04
124	0.5	93.02	20000	930200	93.02	75385.8227	75386	3.99E-04
125	0.5	93.52	20000	935200	93.52	75044.8654	75045	3.97E-04
126	0.5	94.02	20000	940200	94.02	74706.7280	74707	3.95E-04
127	0.5	94.52	20000	945200	94.52	74371.3789	74371	3.93E-04
128	0.5	95.02	20000	950200	95.02	74038.7871	74039	3.92E-04
129	0.5	95.52	20000	955200	95.52	73708.9217	73709	3.90E-04
130	0.5	96.02	20000	960200	96.02	73381.7525	73382	3.88E-04
131	0.5	96.52	20000	965200	96.52	73057.2496	73057	3.87E-04
132	0.5	97.02	20000	970200	97.02	72735.3833	72735	3.85E-04
133	0.5	97.52	20000	975200	97.52	72416.1246	72416	3.83E-04
134	0.5	98.02	20000	980200	98.02	72099.4446	72099	3.81E-04

2A_6								
i	pot. [m]	z C [m]	γ [N/m ³]	u0 [N/m ²]	zN [m]	$\Delta\sigma_v / q$	$\Delta\sigma_v$ [N/m ²]	$\Delta\delta$ [m]

134	0.5	98.02	20000	980200	98.02	72099.4446	72099	3.81E-04
135	0.5	98.52	20000	985200	98.52	71785.3150	71785	3.80E-04
136	0.5	99.02	20000	990200	99.02	71473.7077	71474	3.78E-04
137	0.5	99.52	20000	995200	99.52	71164.5950	71165	3.77E-04
138	0.5	100	20000	1E+06	100.02	70857.9497	70858	3.75E-04
139	0.5	100.5	20000	1E+06	100.52	70553.7447	70554	3.73E-04
140	0.5	101	20000	1E+06	101.02	70251.9535	70252	3.72E-04
141	0.5	101.5	20000	1E+06	101.52	69952.5497	69953	3.70E-04
142	0.5	102	20000	1E+06	102.02	69655.5075	69656	3.69E-04
143	0.5	102.5	20000	1E+06	102.52	69360.8012	69361	3.67E-04
144	0.5	103	20000	1E+06	103.02	69068.4056	69068	3.65E-04
145	0.5	103.5	20000	1E+06	103.52	68778.2958	68778	3.64E-04
146	0.5	104	20000	1E+06	104.02	68490.4471	68490	3.62E-04
147	0.5	104.5	20000	1E+06	104.52	68204.8352	68205	3.61E-04
148	0.5	105	20000	1E+06	105.02	67921.4363	67921	3.59E-04
149	0.5	105.5	20000	1E+06	105.52	67640.2265	67640	3.58E-04
150	0.5	106	20000	1E+06	106.02	67361.1825	67361	3.56E-04
151	0.5	106.5	20000	1E+06	106.52	67084.2812	67084	3.55E-04
152	0.5	107	20000	1E+06	107.02	66809.4999	66809	3.53E-04
153	0.5	107.5	20000	1E+06	107.52	66536.8161	66537	3.52E-04
154	0.5	108	20000	1E+06	108.02	66266.2076	66266	3.51E-04
155	0.5	108.5	20000	1E+06	108.52	65997.6525	65998	3.49E-04
156	0.5	109	20000	1E+06	109.02	65731.1291	65731	3.48E-04
157	0.5	109.5	20000	1E+06	109.52	65466.6161	65467	3.46E-04
158	0.5	110	20000	1E+06	110.02	65204.0924	65204	3.45E-04
159	0.5	110.5	20000	1E+06	110.52	64943.5372	64944	3.44E-04
160	0.5	111	20000	1E+06	111.02	64684.9300	64685	3.42E-04
161	0.5	111.5	20000	1E+06	111.52	64428.2504	64428	3.41E-04
162	0.5	112	20000	1E+06	112.02	64173.4784	64173	3.40E-04
163	0.5	112.5	20000	1E+06	112.52	63920.5943	63921	3.38E-04
164	0.5	113	20000	1E+06	113.02	63669.5786	63670	3.37E-04
165	0.5	113.5	20000	1E+06	113.52	63420.4118	63420	3.36E-04
166	0.5	114	20000	1E+06	114.02	63173.0751	63173	3.34E-04
167	0.5	114.5	20000	1E+06	114.52	62927.5496	62928	3.33E-04
168	0.5	115	20000	1E+06	115.02	62683.8168	62684	3.32E-04
169	0.5	115.5	20000	1E+06	115.52	62441.8583	62442	3.30E-04
170	0.5	116	20000	1E+06	116.02	62201.6560	62202	3.29E-04
171	0.5	116.5	20000	1E+06	116.52	61963.1921	61963	3.28E-04
172	0.5	117	20000	1E+06	117.02	61726.4489	61726	3.27E-04
173	0.5	117.5	20000	1E+06	117.52	61491.4090	61491	3.25E-04
174	0.5	118	20000	1E+06	118.02	61258.0551	61258	3.24E-04
175	0.5	118.5	20000	1E+06	118.52	61026.3704	61026	3.23E-04
176	0.5	119	20000	1E+06	119.02	60796.3380	60796	3.22E-04
177	0.5	119.5	20000	1E+06	119.52	60567.9413	60568	3.20E-04
178	0.5	120	20000	1E+06	120.02	60341.1639	60341	3.19E-04
179	0.5	120.5	20000	1E+06	120.52	60115.9898	60116	3.18E-04
180	0.5	121	20000	1E+06	121.02	59892.4029	59892	3.17E-04
181	0.5	121.5	20000	1E+06	121.52	59670.3874	59670	3.16E-04
182	0.5	122	20000	1E+06	122.02	59449.9278	59450	3.15E-04
183	0.5	122.5	20000	1E+06	122.52	59231.0087	59231	3.13E-04
184	0.5	123	20000	1E+06	123.02	59013.6150	59014	3.12E-04
185	0.5	123.5	20000	1E+06	123.52	58797.7315	58798	3.11E-04
186	0.5	124	20000	1E+06	124.02	58583.3435	58583	3.10E-04
187	0.5	124.5	20000	1E+06	124.52	58370.4363	58370	3.09E-04
188	0.5	125	20000	1E+06	125.02	58158.9954	58159	3.08E-04
189	0.5	125.5	20000	1E+06	125.52	57949.0067	57949	3.07E-04
190	0.5	126	20000	1E+06	126.02	57740.4558	57740	3.06E-04
191	0.5	126.5	20000	1E+06	126.52	57533.3290	57533	3.04E-04
192	0.5	127	20000	1E+06	127.02	57327.6124	57328	3.03E-04
193	0.5	127.5	20000	1E+06	127.52	57123.2924	57123	3.02E-04
194	0.5	128	20000	1E+06	128.02	56920.3556	56920	3.01E-04
195	0.5	128.5	20000	1E+06	128.52	56718.7887	56719	3.00E-04
196	0.5	129	20000	1E+06	129.02	56518.5785	56519	2.99E-04
197	0.5	129.5	20000	1E+06	129.52	56319.7121	56320	2.98E-04
198	0.5	130	20000	1E+06	130.02	56122.1767	56122	2.97E-04
			CEDIMENTO TOTALE				0.096	

Tabella 20 – Somma dei contributi e cedimento totale del rilevato in corrispondenza del punto centrale (ipotesi di simmetria del carico)

Centro	
Strato	Cedimento
2B_3	0.08
2B_5	0.12
2A_2	0.01
2A_4	0.04
2A_6	0.10
tot	0.35

Risultano quindi essere equiparabili i cedimenti ottenuti al centro della fondazione del rilevato, in quanto il modello numerico fornisce un valore di cedimento pari a circa 30 cm, mentre dal modello analitico si ottiene un valore di cedimento totale pari a 35 cm.

7 CEDIMENTI SISMICI DEI RILEVATI

Secondo quanto riportato all'interno della normativa NTD2014 al paragrafo C.1:

“...Ai valori sopra indicati sono da aggiungere, per le dighe di materiali sciolti, i previsti abbassamenti del coronamento derivanti dai cedimenti del terreno e del rilevato dopo il termine della costruzione, nonché quelli derivanti dalle azioni sismiche, da calcolarsi con adeguati modelli; questi ultimi non dovranno comunque essere assunti inferiori a 0,5 cm per metro di altezza della diga...”

Al fine di valutare quindi la verifica del soddisfacimento del franco netto per i rilevati arginali si utilizzerà il limite inferiore imposto da Normativa citata, quindi 0.5 cm per ogni metro di altezza della diga, di seguito si riporta una tabella contenente i valori di abbassamento considerati in condizioni sismiche.

Tabella 21 – Cedimenti dovuti ad azioni sismiche sul rilevato arginale

		COMPARTO 1					COMPARTO 2				
	U.M.	SEZ 1	SEZ 4	SEZ 5	SEZ 6	SEZ S2_PG/S7	SEZ 1	SEZ 2	SEZ 3	SEZ 7	SEZ S14
hmax rilevato	m	15	5.1	4.9	10	10	15	16	14.7	14.7	16
cedimenti azioni sismiche (minimo NTD2014)	m	0.075	0.0255	0.0245	0.05	0.05	0.075	0.08	0.074	0.0735	0.08

Si è validato tale limite di prescrizione tramite l'implementazione di una analisi di Newmark sul rilevato considerato maggiormente conservativo, ovvero la Sezione 7. Infatti tale sezione presenta il valore minimo di F.S. in condizioni sismiche valutato con metodo pseudostatico.

L'analisi di Newmark viene dunque eseguita tramite il software SLOPE/W e QUAKE di GeoSlope, la comunione di tali due applicazioni permette di svolgere una analisi dinamica con modello lineare equivalente (QUAKE) per il rilevato in esame e successivamente applicare il metodo di Newmark (SLOPE/W) per valutare gli spostamenti sismici del corpo del rilevato.

L'analisi è riportata all'interno della “Relazione geotecnica – Fondazione rilevati e verifiche di stabilità” al paragrafo 6.8.5, inerente il calcolo del Metodo di Newmark per la Sezione 7.

7.1 VALUTAZIONE DEL CEDIMENTO SISMICO DEL RILEVATO: SEZIONE 7

Alla luce di quanto desunto dalle analisi precedentemente citate, si è potuto ottenere un valore medio di spostamento permanente indotto dall'azione sismica sia orizzontale che verticale per la Sezione 7 esaminata.

Tale valore medio di spostamento verticale (associabile quindi al valore di cedimento sismico del rilevato arginale) corrisponde a 0.0517 m per la Sezione 7. La normativa NTD2014 prescrive che il valore minimo di cedimento dovuto al sisma per un rilevato avente altezza di circa 15 m corrisponde a 0.0735 m, valore superiore a quello desunto dalle analisi numeriche.

Valutato quindi conservativo il limite di normativa, al fine di verificare il Franco Netto per i manufatti arginali, si utilizzerà il limite imposto da normativa NTD2014 a favore di sicurezza.

8 CEDIMENTI POST SISMA

Nel presente capitolo si andranno a stimare sia i cedimenti post sismici, sia i cedimenti a seguito dello sviluppo del fenomeno di liquefazione.

La stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica è affetta da notevoli incertezze. I valori che si ottengono applicando le procedure nel seguito descritte devono intendersi solo orientativi. Per cedimento si intende l'abbassamento del piano campagna, ovvero l'integrale della deformazione del terreno in direzione verticale, o anche la sommatoria dei prodotti della deformazione verticale media per lo spessore di ciascuno degli strati deformati. In condizioni edometriche, ovvero in presenza di strati di terreno orizzontali ed omogenei, e con tensione costante in direzione orizzontale, le deformazioni laterali sono nulle e pertanto la deformazione verticale coincide con la deformazione volumetrica. Per semplicità e con approssimazione accettabile, salvo casi di morfologia con forti pendenze e stratigrafie molto variabili in direzione orizzontale, per la stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica si può fare riferimento alle condizioni edometriche. Il cedimento permanente indotto a seguito dell'azione sismica in corrispondenza di una verticale di esplorazione si ottiene dalla somma dei contributi al cedimento stimati per i diversi strati del sottosuolo, fino alla profondità alla quale tali contributi non sono più significativi. Il cedimento permanente post-sismico può dunque essere stimato con l'equazione:

$$s = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{vi} \Delta z_i$$

In cui ε_{vi} è la deformazione volumetrica (e verticale) dello strato i-esimo e Δz_i il suo spessore.

Il fenomeno della liquefazione è da escludersi, come affrontato e concluso per il progetto in esame all'interno della Relazione geotecnica generale "BAG303GEORRE040"; nel caso in cui si ipotizzi che sottili livelli relativamente più deboli, nelle condizioni di verifica già esaminate, possano subire comunque fenomeni locali di liquefazione, pur non comportando l'instabilità globale, potrebbero generarsi dei cedimenti. Tali cedimenti post-liquefazione possono in questo scenario, seppur remoto, interessare le fondazioni dei rilevati.

Dalle analisi di rischio nei riguardi della liquefazione sono stati estratti i profili verticali in cui sono stati rilevati valori di F.S. (fattore di sicurezza alla liquefazione) inferiori a 1.00. Le sezioni che presentano tale eventualità sono:

- Sezione 2 (affidente al profilo geotecnico 1);
- Sezione 6 (affidente al profilo geotecnico 4);
- Sezione 7 (affidente al profilo geotecnico 3);

Vengono scartati gli stati con F.S. inferiore all'unità appartenenti a profondità superiori a 10-15 m, ovvero dove il rischio di liquefazione è nullo.

8.1 METODO DI VALUTAZIONE DI IDRISS E BOULANGER (2008) – CEDIMENTI POST SISMICI

Nel presente paragrafo si vogliono valutare i cedimenti sviluppati dai terreni di fondazione dei rilevati arginali e dei manufatti nella condizione post sismica.

8.1.1 Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica nei terreni granulari saturi

La deformazione volumetrica (e quindi verticale considerando il caso di condizioni edometriche) nei terreni granulari saturi può essere stimata da prove SPT in funzione della resistenza SPT normalizzata e corretta $(N_1)_{60,cs}$. Secondo la formulazione di Idriss e Boulanger, 2008, tale espressione risulta essere pari a:

$$\varepsilon_v = 1.5 \exp\left(-0.369\sqrt{(N_1)_{60,cs}}\right) \cdot \min(0.08, \gamma_{max})$$

In cui γ_{max} è la deformazione di taglio indotta dall'azione sismica, determinabile in prima approssimazione con la relazione empirica:

$$\gamma_{max} = \frac{amax}{g} \sigma_{v0} r_d \frac{1}{G}$$

Dove G è il modulo di taglio dinamico corrispondente al livello stratigrafico trattato, $amax=0.361$ g, σ_{v0} è lo stato tensionale totale in situ e r_d è espresso come:

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z)M]$$

Dove M è la magnitudo pari a 6.05 e:

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.133\right)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$$

Implementando le formule precedenti è possibile quindi dedurre i cedimenti post sismici degli strati granulari (UG2A, mentre UG1A è trascurabile dato il numero esiguo di prove NSPT eseguite su tale terreno e lo spessore esiguo di tali strati), si sono presi in considerazione tutti i profili di Nspt disponibili all'interno del progetto.

Informazioni stratigrafiche									
sondaggio	granulometria	LITOLOGIA	Profilo geologico	Sezione di calcolo	z	Nspt	γ	σ_v	σ'_v
					[m]				
SIG1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	6.3	100	20	172	20
SIG1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	8.0	100	20	206	37
SIG1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	9.5	39	20	236	52
SIG1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	11.4	69	20	274	71
SIG1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	13.0	100	20	307	87
SIG1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	14.7	55	20	341	104
SIG1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	16.2	100	20	371	119
SIG1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	19.5	62	20	437	152

Informazioni stratigrafiche									
sondaggio	granulometria	LITOLOGIA	Profilo geologico	Sezione di calcolo	z	Nspt	γ	σ_v	σ'_v
					[m]	[-]	[kN/m ³]	[kPa]	[kPa]
SIG1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	22.5	77	20	497	182
SIG1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	24.0	62	20	528	197
SIG1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	26.0	49	20	568	218
SIG1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	28.1	58	20	610	239
SIG1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	38.0	47	20	809	338
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	6.3	83	20	200	26
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	8.2	63	20	238	45
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	9.5	100	20	264	59
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	10.9	100	20	293	73
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	12.3	83	20	321	87
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	13.7	72	20	349	102
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	15.1	87	20	378	116
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	16.7	100	20	410	132
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	18.0	49	20	436	146
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	19.6	43	20	468	162
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	21.3	81	20	502	179
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	22.7	73	20	531	194
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	26.8	71	20	613	235
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	28.6	100	20	650	254
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	30.5	64	20	689	273
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	33.0	80	20	739	299
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	34.7	41	20	774	316
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	36.8	63	20	816	338
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	38.0	66	20	840	350
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	40.1	46	20	883	371
SIG2	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	42.2	58	20	925	393
SIG3	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	6.0	26	20	120	-20
SIG3	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	8.5	53	20	170	5
SIG3	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	11.5	51	20	230	35
SIG3	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	13.0	50	20	260	50
SIG3	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	15.5	22	20	310	75
SIG3	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	17.0	35	20	340	90

Informazioni stratigrafiche									
sondaggio	granulometria	LITOLOGIA	Profilo geologico	Sezione di calcolo	z	Nspt	γ	σ_v	σ'_v
					[m]	[-]	[kN/m ³]	[kPa]	[kPa]
SIG3	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	21.5	39	20	430	135
SIG3	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	25.0	41	20	500	170
SIG3	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	28.0	80	20	560	200
SIG3	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	30.0	77	20	600	220
SIG3	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	34.5	50	20	690	265
SIG3	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	36.0	81	20	720	280
SIG4	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	6.7	63	20	109	7
SIG4	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	8.7	100	20	149	27
SIG4	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	10.0	60	20	175	40
SIG4	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	11.8	81	20	211	58
SIG4	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	13.5	33	20	245	75
SIG4	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	20.5	43	20	386	145
SIG4	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	22.6	81	20	428	166
SIG4	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	25.0	74	20	476	190
SIG4	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	27.2	100	20	520	212
SIG4	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	30.2	39	20	580	242
SIG4	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	32.4	72	20	624	264
SIG4	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	34.6	83	20	668	286
SIG4	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	36.0	82	20	696	301
SIG4	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	37.5	69	20	726	316
S1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	7.0	17	20	186	26
S1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	10.0	24	20	246	57
S1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	12.0	100	20	287	77
S1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	21.0	78	20	467	167
S1	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	24.0	90	20	528	197
S2	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	7.0	57	20	186	26
S2	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	10.0	100	20	246	57
S2	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	12.0	100	20	287	77
S2	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	21.0	78	20	467	167
S2	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	27.0	80	20	588	228
S3	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	3.0	23	20	0	0
S3	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	7.0	18	20	186	26

Informazioni stratigrafiche									
sondaggio	granulometria	LITOLOGIA	Profilo geologico	Sezione di calcolo	z	Nspt	γ	σ_v	σ'_v
					[m]	[-]	[kN/m ³]	[kPa]	[kPa]
S3	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	10.0	57	20	246	57
S3	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	12.0	100	20	287	77
S3	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	21.0	81	20	467	167
S3	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	25.0	100	20	548	208
S4	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	7.0	9	20	186	26
S4	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	10.0	27	20	246	57
S4	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	12.5	70	20	297	82
S4	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	21.0	58	20	467	167
S4	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	25.0	100	20	548	208
S5	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	7.0	21	20	186	26
S5	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	10.0	100	20	246	57
S5	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	12.0	82	20	287	77
S5	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	21.0	64	20	467	167
S5	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	25.5	71	20	558	213
S6	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	7.0	88	20	186	26
S6	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	10.4	12	20	254	61
S6	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	12.0	35	20	287	77
S6	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	21.0	63	20	467	167
S6	GHIAIA E SABBIA	2A	3	7	25.0	71	20	548	208
S7	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	7.1	6	20	117	11
S7	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	10.1	56	20	177	41
S7	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	12.1	73	20	217	61
S7	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	21.0	18	20	396	150
S7	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	25.0	34	20	476	190
S8	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	7.0	18	20	115	10
S8	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	10.0	61	20	175	40
S8	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	12.0	55	20	215	60
S8	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	20.5	35	20	386	145
S8	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	25.0	21	20	476	190
S9	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	7.0	36	20	140	-10
S9	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	10.0	96	20	200	20
S9	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	12.0	31	20	240	40
S9	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	21.0	51	20	420	130

Informazioni stratigrafiche									
sondaggio	granulometria	LITOLOGIA	Profilo geologico	Sezione di calcolo	z	Nspt	γ	σ_v	σ'_v
					[m]	[-]	[kN/m ³]	[kPa]	[kPa]
S9	GHIAIA E SABBIA	2A	7	Scavo lato Sud	25.0	34	20	500	170
S10	GHIAIA E SABBIA	2A	5	4	7.0	34	20	110	25
S10	GHIAIA E SABBIA	2A	5	4	10.0	34	20	170	56
S10	GHIAIA E SABBIA	2A	5	4	12.0	66	20	210	76
S10	GHIAIA E SABBIA	2A	5	4	21.0	85	20	390	166
S10	GHIAIA E SABBIA	2A	5	4	25.6	34	20	482	212
S11	GHIAIA E SABBIA	2A	6	3	7.0	27	20	165	46
S11	GHIAIA E SABBIA	2A	6	3	10.0	9	20	225	76
S11	GHIAIA E SABBIA	2A	6	3	12.0	30	20	265	96
S11	GHIAIA E SABBIA	2A	6	3	21.0	41	20	445	186
S11	GHIAIA E SABBIA	2A	6	3	25.0	71	20	525	250
S12	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	7.0	37	20	214	33
S12	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	10.0	34	20	275	64
S12	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	12.0	19	20	315	84
S12	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	21.0	20	20	497	176
S12	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	25.5	31	20	588	222
S13	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	7.0	54	20	214	33
S13	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	9.0	13	20	254	53
S13	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	12.0	47	20	315	84
S13	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	21.0	20	20	497	176
S13	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	24.0	43	20	557	207
S14	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	7.0	24	20	214	33
S14	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	10.0	50	20	275	64
S14	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	12.0	62	20	315	84
S14	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	21.0	100	20	497	176
S14	GHIAIA E SABBIA	2A	1	2	25.0	17	20	578	217
S2_PG	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	6.1	24	20	0	0
S2_PG	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	12.1	43	20	217	61
S2_PG	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	16.6	49	20	307	106
S2_PG	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	30	100	20	576	240
S3_PG	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	5	29	20	0	0
S3_PG	GHIAIA E SABBIA	2A	4	6	8	64	20	125	15

Informazioni stratigrafiche	Liao e Whitman 1986	Percentuale di fino	Youd e Idriss 2001			amax/g	M
sondaggio	N ₁₆₀	FC	α	β	N _{160cs}		
	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
SIG1	100	20	3.61	1.08	100	0.36	6.05
SIG1	100	20	3.61	1.08	100	0.36	6.05
SIG1	40	20	3.61	1.08	47	0.36	6.05
SIG1	64	20	3.61	1.08	73	0.36	6.05
SIG1	86	20	3.61	1.08	97	0.36	6.05
SIG1	44	20	3.61	1.08	51	0.36	6.05
SIG1	76	20	3.61	1.08	86	0.36	6.05
SIG1	43	20	3.61	1.08	50	0.36	6.05
SIG1	49	20	3.61	1.08	56	0.36	6.05
SIG1	38	20	3.61	1.08	45	0.36	6.05
SIG1	29	20	3.61	1.08	35	0.36	6.05
SIG1	33	20	3.61	1.08	39	0.36	6.05
SIG1	22	20	3.61	1.08	28	0.36	6.05
SIG2	100	20	3.61	1.08	100	0.36	6.05
SIG2	70	20	3.61	1.08	80	0.36	6.05
SIG2	100	20	3.61	1.08	100	0.36	6.05
SIG2	95	20	3.61	1.08	100	0.36	6.05
SIG2	74	20	3.61	1.08	83	0.36	6.05
SIG2	60	20	3.61	1.08	69	0.36	6.05
SIG2	69	20	3.61	1.08	78	0.36	6.05
SIG2	75	20	3.61	1.08	85	0.36	6.05
SIG2	35	20	3.61	1.08	42	0.36	6.05
SIG2	29	20	3.61	1.08	35	0.36	6.05
SIG2	53	20	3.61	1.08	61	0.36	6.05
SIG2	46	20	3.61	1.08	53	0.36	6.05
SIG2	41	20	3.61	1.08	48	0.36	6.05
SIG2	56	20	3.61	1.08	64	0.36	6.05
SIG2	34	20	3.61	1.08	41	0.36	6.05
SIG2	41	20	3.61	1.08	48	0.36	6.05
SIG2	20	20	3.61	1.08	26	0.36	6.05
SIG2	30	20	3.61	1.08	36	0.36	6.05
SIG2	31	20	3.61	1.08	37	0.36	6.05
SIG2	21	20	3.61	1.08	26	0.36	6.05
SIG2	26	20	3.61	1.08	32	0.36	6.05

Informazioni stratigrafiche	Liao e Whitman 1986	Percentuale di fino	Youd e Idriss 2001			amax/g	M
sondaggio	N ₁₆₀	FC	α	β	N _{160cs}		
	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
SIG3	35	20	3.61	1.08	41	0.36	6.05
SIG3	58	20	3.61	1.08	66	0.36	6.05
SIG3	47	20	3.61	1.08	55	0.36	6.05
SIG3	43	20	3.61	1.08	50	0.36	6.05
SIG3	17	20	3.61	1.08	22	0.36	6.05
SIG3	26	20	3.61	1.08	32	0.36	6.05
SIG3	25	20	3.61	1.08	31	0.36	6.05
SIG3	25	20	3.61	1.08	30	0.36	6.05
SIG3	45	20	3.61	1.08	52	0.36	6.05
SIG3	42	20	3.61	1.08	49	0.36	6.05
SIG3	25	20	3.61	1.08	31	0.36	6.05
SIG3	40	20	3.61	1.08	46	0.36	6.05
SIG4	79	20	3.61	1.08	89	0.36	6.05
SIG4	100	20	3.61	1.08	100	0.36	6.05
SIG4	60	20	3.61	1.08	68	0.36	6.05
SIG4	74	20	3.61	1.08	83	0.36	6.05
SIG4	28	20	3.61	1.08	34	0.36	6.05
SIG4	29	20	3.61	1.08	35	0.36	6.05
SIG4	51	20	3.61	1.08	59	0.36	6.05
SIG4	44	20	3.61	1.08	51	0.36	6.05
SIG4	57	20	3.61	1.08	65	0.36	6.05
SIG4	21	20	3.61	1.08	26	0.36	6.05
SIG4	37	20	3.61	1.08	44	0.36	6.05
SIG4	41	20	3.61	1.08	48	0.36	6.05
SIG4	40	20	3.61	1.08	47	0.36	6.05
SIG4	33	20	3.61	1.08	39	0.36	6.05
S1	21	20	3.61	1.08	26	0.36	6.05
S1	24	20	3.61	1.08	30	0.36	6.05
S1	90	20	3.61	1.08	100	0.36	6.05
S1	51	20	3.61	1.08	59	0.36	6.05
S1	55	20	3.61	1.08	63	0.36	6.05
S2	70	20	3.61	1.08	79	0.36	6.05
S2	100	20	3.61	1.08	100	0.36	6.05
S2	90	20	3.61	1.08	100	0.36	6.05

Informazioni stratigrafiche	Liao e Whitman 1986	Percentuale di fino	Youd e Idriss 2001			amax/g	M
sondaggio	N ₁₆₀	FC	α	β	N _{160cs}		
	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
S2	51	20	3.61	1.08	59	0.36	6.05
S2	46	20	3.61	1.08	53	0.36	6.05
S3	45	20	3.61	1.08	52	0.36	6.05
S3	22	20	3.61	1.08	27	0.36	6.05
S3	57	20	3.61	1.08	65	0.36	6.05
S3	90	20	3.61	1.08	100	0.36	6.05
S3	53	20	3.61	1.08	61	0.36	6.05
S3	60	20	3.61	1.08	68	0.36	6.05
S4	11	20	3.61	1.08	15	0.36	6.05
S4	27	20	3.61	1.08	33	0.36	6.05
S4	62	20	3.61	1.08	70	0.36	6.05
S4	38	20	3.61	1.08	45	0.36	6.05
S4	60	20	3.61	1.08	68	0.36	6.05
S5	26	20	3.61	1.08	31	0.36	6.05
S5	100	20	3.61	1.08	100	0.36	6.05
S5	74	20	3.61	1.08	84	0.36	6.05
S5	42	20	3.61	1.08	49	0.36	6.05
S5	42	20	3.61	1.08	49	0.36	6.05
S6	100	20	3.61	1.08	100	0.36	6.05
S6	12	20	3.61	1.08	16	0.36	6.05
S6	32	20	3.61	1.08	38	0.36	6.05
S6	42	20	3.61	1.08	48	0.36	6.05
S6	43	20	3.61	1.08	49	0.36	6.05
S7	7	20	3.61	1.08	11	0.36	6.05
S7	56	20	3.61	1.08	64	0.36	6.05
S7	66	20	3.61	1.08	74	0.36	6.05
S7	12	20	3.61	1.08	16	0.36	6.05
S7	20	20	3.61	1.08	26	0.36	6.05
S8	22	20	3.61	1.08	27	0.36	6.05
S8	61	20	3.61	1.08	69	0.36	6.05
S8	50	20	3.61	1.08	57	0.36	6.05
S8	23	20	3.61	1.08	29	0.36	6.05
S8	13	20	3.61	1.08	17	0.36	6.05
S9	44	20	3.61	1.08	51	0.36	6.05

Informazioni stratigrafiche	Liao e Whitman 1986	Percentuale di fino	Youd e Idriss 2001			amax/g	M
sondaggio	N ₁₆₀	FC	α	β	N _{160cs}		
	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
S9	96	20	3.61	1.08	100	0.36	6.05
S9	28	20	3.61	1.08	34	0.36	6.05
S9	34	20	3.61	1.08	40	0.36	6.05
S9	20	20	3.61	1.08	26	0.36	6.05
S10	42	20	3.61	1.08	48	0.36	6.05
S10	34	20	3.61	1.08	40	0.36	6.05
S10	60	20	3.61	1.08	68	0.36	6.05
S10	56	20	3.61	1.08	64	0.36	6.05
S10	20	20	3.61	1.08	25	0.36	6.05
S11	33	20	3.61	1.08	39	0.36	6.05
S11	9	20	3.61	1.08	13	0.36	6.05
S11	27	20	3.61	1.08	33	0.36	6.05
S11	27	20	3.61	1.08	33	0.36	6.05
S11	43	20	3.61	1.08	49	0.36	6.05
S12	45	20	3.61	1.08	52	0.36	6.05
S12	34	20	3.61	1.08	40	0.36	6.05
S12	17	20	3.61	1.08	22	0.36	6.05
S12	13	20	3.61	1.08	18	0.36	6.05
S12	18	20	3.61	1.08	23	0.36	6.05
S13	66	20	3.61	1.08	75	0.36	6.05
S13	14	20	3.61	1.08	19	0.36	6.05
S13	42	20	3.61	1.08	49	0.36	6.05
S13	13	20	3.61	1.08	18	0.36	6.05
S13	26	20	3.61	1.08	32	0.36	6.05
S14	29	20	3.61	1.08	35	0.36	6.05
S14	50	20	3.61	1.08	58	0.36	6.05
S14	56	20	3.61	1.08	64	0.36	6.05
S14	66	20	3.61	1.08	75	0.36	6.05
S14	10	20	3.61	1.08	15	0.36	6.05
S2_PG	32	20	3.61	1.08	38	0.36	6.05
S2_PG	39	20	3.61	1.08	45	0.36	6.05
S2_PG	37	20	3.61	1.08	43	0.36	6.05
S2_PG	54	20	3.61	1.08	62	0.36	6.05
S3_PG	45	20	3.61	1.08	53	0.36	6.05

Informazioni stratigrafiche	Liao e Whitman 1986	Percentuale di fino	Youd e Idriss 2001			amax/g	M
sondaggio	N ₁₆₀	FC	α	β	N _{160cs}		
	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]		
S3_PG	75	20	3.61	1.08	85	0.36	6.05

Info. Strat.	Deformazione a taglio massima							Def. verticale	Cedimenti indotti dall'azione sismica		
sondaggio	α (rd)	β (rd)	γ max	rd	Vs	G0	E'	ϵ_v	s	Σs	Σs
	[-]	[-]	[%]	[-]	[m/s]	[kPa]	[MPa]	[-]	[m]	[m]	[mm]
SIG1	-1.12	0.12	0.0206	0.6630	316	200000	50	7.73E-06	1.16E-05	1.16E-05	0.01
SIG1	-1.13	0.12	0.0247	0.6623	316	200000	50	9.23E-06	1.39E-05	2.54E-05	0.03
SIG1	-1.13	0.12	0.0235	0.6618	346	240000	60	2.82E-05	4.22E-05	6.77E-05	0.07
SIG1	-1.13	0.12	0.0273	0.6610	346	240000	60	1.76E-05	2.63E-05	9.40E-05	0.09
SIG1	-1.13	0.12	0.0305	0.6604	346	240000	60	1.21E-05	1.82E-05	1.12E-04	0.11
SIG1	-1.14	0.12	0.0338	0.6598	346	240000	60	3.59E-05	5.39E-05	1.66E-04	0.17
SIG1	-1.14	0.12	0.0368	0.6592	346	240000	60	1.80E-05	2.70E-05	1.93E-04	0.19
SIG1	-1.15	0.12	0.0433	0.6580	346	240000	60	4.82E-05	7.23E-05	2.65E-04	0.27
SIG1	-1.15	0.12	0.0491	0.6569	346	240000	60	4.61E-05	6.92E-05	3.35E-04	0.33
SIG1	-1.15	0.12	0.0521	0.6563	346	240000	60	6.64E-05	9.97E-05	4.34E-04	0.43
SIG1	-1.16	0.12	0.0560	0.6556	346	240000	60	9.59E-05	1.44E-04	5.78E-04	0.58
SIG1	-1.16	0.12	0.0601	0.6548	346	240000	60	9.07E-05	1.36E-04	7.14E-04	0.71
SIG1	-1.18	0.12	0.0528	0.6512	424	360000	90	1.14E-04	1.71E-04	8.85E-04	0.88
SIG2	-1.12	0.12	0.0239	0.6630	316	200000	50	8.96E-06	1.34E-05	1.34E-05	0.01
SIG2	-1.13	0.12	0.0219	0.6622	361	260000	65	1.22E-05	1.83E-05	3.17E-05	0.03
SIG2	-1.13	0.12	0.0243	0.6618	361	260000	65	9.10E-06	1.37E-05	4.54E-05	0.05
SIG2	-1.13	0.12	0.0269	0.6612	361	260000	65	1.01E-05	1.51E-05	6.05E-05	0.06
SIG2	-1.13	0.12	0.0294	0.6607	361	260000	65	1.52E-05	2.28E-05	8.33E-05	0.08
SIG2	-1.14	0.12	0.0320	0.6602	361	260000	65	2.25E-05	3.38E-05	1.17E-04	0.12
SIG2	-1.14	0.12	0.0346	0.6597	361	260000	65	1.99E-05	2.98E-05	1.47E-04	0.15
SIG2	-1.14	0.12	0.0375	0.6591	361	260000	65	1.89E-05	2.83E-05	1.75E-04	0.18
SIG2	-1.14	0.12	0.0399	0.6586	361	260000	65	5.53E-05	8.29E-05	2.58E-04	0.26
SIG2	-1.15	0.12	0.0428	0.6580	361	260000	65	7.13E-05	1.07E-04	3.65E-04	0.37
SIG2	-1.15	0.12	0.0458	0.6574	361	260000	65	3.85E-05	5.78E-05	4.23E-04	0.42

Info. Strat.	Deformazione a taglio massima							Def. verticale	Cedimenti indotti dall'azione sismica		
sondaggio	α (rd)	β (rd)	γ_{max}	rd	Vs	G0	E'	ϵ_v	s	Σs	Σs
	[-]	[-]	[%]	[-]	[m/s]	[kPa]	[MPa]	[-]	[m]	[m]	[mm]
SIG2	-1.15	0.12	0.0484	0.6568	361	260000	65	4.90E-05	7.35E-05	4.96E-04	0.50
SIG2	-1.16	0.12	0.0453	0.6553	400	320000	80	5.30E-05	7.95E-05	5.76E-04	0.58
SIG2	-1.16	0.12	0.0480	0.6546	400	320000	80	3.80E-05	5.70E-05	6.33E-04	0.63
SIG2	-1.16	0.12	0.0508	0.6539	400	320000	80	7.26E-05	1.09E-04	7.42E-04	0.74
SIG2	-1.17	0.12	0.0545	0.6530	400	320000	80	6.36E-05	9.54E-05	8.37E-04	0.84
SIG2	-1.17	0.12	0.0569	0.6524	400	320000	80	1.32E-04	1.98E-04	1.03E-03	1.03
SIG2	-1.17	0.12	0.0505	0.6516	436	380000	95	8.18E-05	1.23E-04	1.16E-03	1.16
SIG2	-1.18	0.12	0.0520	0.6512	436	380000	95	8.18E-05	1.23E-04	1.28E-03	1.28
SIG2	-1.18	0.12	0.0545	0.6504	436	380000	95	1.23E-04	1.84E-04	1.46E-03	1.46
SIG2	-1.18	0.12	0.0571	0.6496	436	380000	95	1.08E-04	1.62E-04	1.63E-03	1.63
SIG3	-1.12	0.12	0.0144	0.6631	316	200000	50	2.03E-05	3.05E-05	3.05E-05	0.03
SIG3	-1.13	0.12	0.0203	0.6621	316	200000	50	1.51E-05	2.27E-05	5.31E-05	0.05
SIG3	-1.13	0.12	0.0229	0.6610	346	240000	60	2.25E-05	3.37E-05	8.69E-05	0.09
SIG3	-1.13	0.12	0.0258	0.6604	346	240000	60	2.84E-05	4.25E-05	1.29E-04	0.13
SIG3	-1.14	0.12	0.0308	0.6595	346	240000	60	8.11E-05	1.22E-04	2.51E-04	0.25
SIG3	-1.14	0.12	0.0337	0.6589	346	240000	60	6.33E-05	9.50E-05	3.46E-04	0.35
SIG3	-1.15	0.12	0.0364	0.6573	374	280000	70	7.00E-05	1.05E-04	4.51E-04	0.45
SIG3	-1.15	0.12	0.0423	0.6560	374	280000	70	8.37E-05	1.26E-04	5.77E-04	0.58
SIG3	-1.16	0.12	0.0473	0.6549	374	280000	70	4.94E-05	7.41E-05	6.51E-04	0.65
SIG3	-1.16	0.12	0.0506	0.6541	374	280000	70	5.80E-05	8.71E-05	7.38E-04	0.74
SIG3	-1.17	0.12	0.0508	0.6524	400	320000	80	9.90E-05	1.48E-04	8.86E-04	0.89
SIG3	-1.17	0.12	0.0530	0.6519	400	320000	80	6.45E-05	9.68E-05	9.83E-04	0.98
SIG4	-1.12	0.12	0.0130	0.6628	316	200000	50	6.05E-06	9.08E-06	9.08E-06	0.01
SIG4	-1.13	0.12	0.0178	0.6621	316	200000	50	6.67E-06	1.00E-05	1.91E-05	0.02
SIG4	-1.13	0.12	0.0174	0.6616	346	240000	60	1.24E-05	1.85E-05	3.76E-05	0.04
SIG4	-1.13	0.12	0.0210	0.6609	346	240000	60	1.09E-05	1.63E-05	5.39E-05	0.05
SIG4	-1.14	0.12	0.0244	0.6603	346	240000	60	4.29E-05	6.43E-05	1.18E-04	0.12
SIG4	-1.15	0.12	0.0327	0.6576	374	280000	70	5.58E-05	8.38E-05	2.02E-04	0.20
SIG4	-1.15	0.12	0.0362	0.6569	374	280000	70	3.19E-05	4.79E-05	2.50E-04	0.25
SIG4	-1.15	0.12	0.0402	0.6560	374	280000	70	4.28E-05	6.42E-05	3.14E-04	0.31
SIG4	-1.16	0.12	0.0439	0.6551	374	280000	70	3.34E-05	5.01E-05	3.64E-04	0.36
SIG4	-1.16	0.12	0.0360	0.6540	436	380000	95	8.15E-05	1.22E-04	4.86E-04	0.49
SIG4	-1.17	0.12	0.0387	0.6532	436	380000	95	5.05E-05	7.57E-05	5.62E-04	0.56
SIG4	-1.17	0.12	0.0414	0.6524	436	380000	95	4.78E-05	7.17E-05	6.34E-04	0.63

Info. Strat.	Deformazione a taglio massima							Def. verticale	Cedimenti indotti dall'azione sismica		
sondaggio	α (rd)	β (rd)	γ max	rd	Vs	G0	E'	ϵ_v	s	Σs	Σs
	[-]	[-]	[%]	[-]	[m/s]	[kPa]	[MPa]	[-]	[m]	[m]	[mm]
SIG4	-1.17	0.12	0.0431	0.6519	436	380000	95	5.18E-05	7.77E-05	7.11E-04	0.71
SIG4	-1.18	0.12	0.0449	0.6513	436	380000	95	6.70E-05	1.00E-04	8.12E-04	0.81
S1	-1.12	0.12	0.0223	0.6627	316	200000	50	5.08E-05	1.53E-04	1.53E-04	0.15
S1	-1.13	0.12	0.0245	0.6616	346	240000	60	4.95E-05	1.49E-04	3.01E-04	0.30
S1	-1.13	0.12	0.0285	0.6608	346	240000	60	1.07E-05	3.20E-05	3.33E-04	0.33
S1	-1.15	0.12	0.0462	0.6575	346	240000	60	4.05E-05	1.22E-04	4.55E-04	0.45
S1	-1.15	0.12	0.0521	0.6563	346	240000	60	4.16E-05	1.25E-04	5.80E-04	0.58
S2	-1.12	0.12	0.0223	0.6627	316	200000	50	1.26E-05	3.79E-05	3.79E-05	0.04
S2	-1.13	0.12	0.0245	0.6616	346	240000	60	9.18E-06	2.76E-05	6.55E-05	0.07
S2	-1.13	0.12	0.0285	0.6608	346	240000	60	1.07E-05	3.20E-05	9.75E-05	0.10
S2	-1.15	0.12	0.0462	0.6575	346	240000	60	4.05E-05	1.22E-04	2.19E-04	0.22
S2	-1.16	0.12	0.0579	0.6552	346	240000	60	5.90E-05	1.77E-04	3.96E-04	0.40
S3	-1.12	0.12	0.0000	0.6642	316	200000	50	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00
S3	-1.12	0.12	0.0186	0.6627	346	240000	60	4.04E-05	1.21E-04	1.21E-04	0.12
S3	-1.13	0.12	0.0245	0.6616	346	240000	60	1.87E-05	5.61E-05	1.77E-04	0.18
S3	-1.13	0.12	0.0285	0.6608	346	240000	60	1.07E-05	3.20E-05	2.09E-04	0.21
S3	-1.15	0.12	0.0462	0.6575	346	240000	60	3.85E-05	1.16E-04	3.25E-04	0.33
S3	-1.15	0.12	0.0540	0.6560	346	240000	60	3.85E-05	1.15E-04	4.40E-04	0.44
S4	-1.12	0.12	0.0223	0.6627	316	200000	50	7.82E-05	2.35E-04	2.35E-04	0.23
S4	-1.13	0.12	0.0245	0.6616	346	240000	60	4.45E-05	1.33E-04	3.68E-04	0.37
S4	-1.13	0.12	0.0295	0.6606	346	240000	60	2.00E-05	6.01E-05	4.28E-04	0.43
S4	-1.15	0.12	0.0462	0.6575	346	240000	60	5.84E-05	1.75E-04	6.03E-04	0.60
S4	-1.15	0.12	0.0540	0.6560	346	240000	60	3.85E-05	1.15E-04	7.19E-04	0.72
S5	-1.12	0.12	0.0223	0.6627	316	200000	50	4.24E-05	1.27E-04	1.27E-04	0.13
S5	-1.13	0.12	0.0245	0.6616	346	240000	60	9.18E-06	2.76E-05	1.55E-04	0.15
S5	-1.13	0.12	0.0285	0.6608	346	240000	60	1.47E-05	4.40E-05	1.99E-04	0.20
S5	-1.15	0.12	0.0462	0.6575	346	240000	60	5.21E-05	1.56E-04	3.55E-04	0.35
S5	-1.16	0.12	0.0550	0.6558	346	240000	60	6.24E-05	1.87E-04	5.42E-04	0.54
S6	-1.12	0.12	0.0223	0.6627	316	200000	50	8.34E-06	2.50E-05	2.50E-05	0.03
S6	-1.13	0.12	0.0253	0.6614	346	240000	60	8.56E-05	2.57E-04	2.82E-04	0.28
S6	-1.13	0.12	0.0285	0.6608	346	240000	60	4.43E-05	1.33E-04	4.15E-04	0.41
S6	-1.15	0.12	0.0462	0.6575	346	240000	60	5.31E-05	1.59E-04	5.74E-04	0.57
S6	-1.15	0.12	0.0540	0.6560	346	240000	60	6.04E-05	1.81E-04	7.55E-04	0.76
S7	-1.12	0.12	0.0117	0.6627	346	240000	60	5.02E-05	1.51E-04	1.51E-04	0.15

Info. Strat.	Deformazione a taglio massima							Def. verticale	Cedimenti indotti dall'azione sismica		
sondaggio	α (rd)	β (rd)	γ_{max}	rd	Vs	G0	E'	ϵ_v	s	Σs	Σs
	[-]	[-]	[%]	[-]	[m/s]	[kPa]	[MPa]	[-]	[m]	[m]	[mm]
S7	-1.13	0.12	0.0176	0.6615	346	240000	60	1.39E-05	4.17E-05	1.92E-04	0.19
S7	-1.13	0.12	0.0216	0.6608	346	240000	60	1.34E-05	4.03E-05	2.32E-04	0.23
S7	-1.15	0.12	0.0391	0.6575	346	240000	60	1.31E-04	3.94E-04	6.27E-04	0.63
S7	-1.15	0.12	0.0469	0.6560	346	240000	60	1.09E-04	3.27E-04	9.54E-04	0.95
S8	-1.12	0.12	0.0115	0.6627	346	240000	60	2.50E-05	7.49E-05	7.49E-05	0.07
S8	-1.13	0.12	0.0174	0.6616	346	240000	60	1.21E-05	3.62E-05	1.11E-04	0.11
S8	-1.13	0.12	0.0214	0.6608	346	240000	60	1.97E-05	5.91E-05	1.70E-04	0.17
S8	-1.15	0.12	0.0381	0.6576	346	240000	60	7.87E-05	2.36E-04	4.06E-04	0.41
S8	-1.15	0.12	0.0469	0.6560	346	240000	60	1.53E-04	4.58E-04	8.64E-04	0.86
S9	-1.12	0.12	0.0167	0.6627	316	200000	50	1.80E-05	5.39E-05	5.39E-05	0.05
S9	-1.13	0.12	0.0199	0.6616	346	240000	60	7.45E-06	2.24E-05	7.63E-05	0.08
S9	-1.13	0.12	0.0239	0.6608	346	240000	60	4.18E-05	1.26E-04	2.02E-04	0.20
S9	-1.15	0.12	0.0356	0.6575	374	280000	70	5.18E-05	1.56E-04	3.57E-04	0.36
S9	-1.15	0.12	0.0423	0.6560	374	280000	70	9.81E-05	2.94E-04	6.52E-04	0.65
S10	-1.12	0.12	0.0119	0.6627	332	220000	55	1.37E-05	4.11E-05	4.11E-05	0.04
S10	-1.13	0.12	0.0127	0.6616	400	320000	80	1.82E-05	5.47E-05	9.58E-05	0.10
S10	-1.13	0.12	0.0156	0.6608	400	320000	80	1.12E-05	3.36E-05	1.29E-04	0.13
S10	-1.15	0.12	0.0289	0.6575	400	320000	80	2.26E-05	6.77E-05	1.97E-04	0.20
S10	-1.16	0.12	0.0317	0.6557	424	360000	90	7.43E-05	2.23E-04	4.20E-04	0.42
S11	-1.12	0.12	0.0198	0.6627	316	200000	50	2.94E-05	8.82E-05	8.82E-05	0.09
S11	-1.13	0.12	0.0269	0.6616	316	200000	50	1.05E-04	3.15E-04	4.03E-04	0.40
S11	-1.13	0.12	0.0243	0.6608	361	260000	65	4.40E-05	1.32E-04	5.35E-04	0.53
S11	-1.15	0.12	0.0406	0.6575	361	260000	65	7.36E-05	2.21E-04	7.56E-04	0.76
S11	-1.15	0.12	0.0389	0.6560	400	320000	80	4.35E-05	1.30E-04	8.86E-04	0.89
S12	-1.12	0.12	0.0256	0.6627	316	200000	50	2.66E-05	7.97E-05	7.97E-05	0.08
S12	-1.13	0.12	0.0252	0.6616	361	260000	65	3.63E-05	1.09E-04	1.89E-04	0.19
S12	-1.13	0.12	0.0289	0.6608	361	260000	65	7.64E-05	2.29E-04	4.18E-04	0.42
S12	-1.15	0.12	0.0453	0.6575	361	260000	65	1.43E-04	4.29E-04	8.47E-04	0.85
S12	-1.16	0.12	0.0391	0.6558	422	356000	89	9.83E-05	2.95E-04	1.14E-03	1.14
S13	-1.12	0.12	0.0256	0.6627	316	200000	50	1.58E-05	4.74E-05	4.74E-05	0.05
S13	-1.13	0.12	0.0234	0.6619	361	260000	65	7.17E-05	2.15E-04	2.62E-04	0.26
S13	-1.13	0.12	0.0289	0.6608	361	260000	65	3.24E-05	9.71E-05	3.60E-04	0.36
S13	-1.15	0.12	0.0453	0.6575	361	260000	65	1.43E-04	4.29E-04	7.89E-04	0.79
S13	-1.15	0.12	0.0413	0.6563	400	320000	80	7.67E-05	2.30E-04	1.02E-03	1.02

Info. Strat.	Deformazione a taglio massima							Def. verticale	Cedimenti indotti dall'azione sismica		
sondaggio	$\alpha(\text{rd})$	$\beta(\text{rd})$	γ_{max}	rd	V_s	G_0	E'	ϵ_v	s	Σs	Σs
	[-]	[-]	[%]	[-]	[m/s]	[kPa]	[MPa]	[-]	[m]	[m]	[mm]
S14	-1.12	0.12	0.0256	0.6627	316	200000	50	4.29E-05	1.29E-04	1.29E-04	0.13
S14	-1.13	0.12	0.0252	0.6616	361	260000	65	2.30E-05	6.90E-05	1.98E-04	0.20
S14	-1.13	0.12	0.0289	0.6608	361	260000	65	2.26E-05	6.79E-05	2.66E-04	0.27
S14	-1.15	0.12	0.0453	0.6575	361	260000	65	2.79E-05	8.38E-05	3.49E-04	0.35
S14	-1.15	0.12	0.0427	0.6560	400	320000	80	1.57E-04	4.70E-04	8.19E-04	0.82
S2_PG	-1.12	0.12	0.0000	0.6630	346	240000	60	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00
S2_PG	-1.13	0.12	0.0216	0.6608	346	240000	60	2.70E-05	1.08E-04	1.08E-04	0.11
S2_PG	-1.14	0.12	0.0305	0.6591	346	240000	60	4.02E-05	1.61E-04	2.69E-04	0.27
S2_PG	-1.16	0.12	0.0358	0.6541	436	380000	95	2.94E-05	1.18E-04	3.86E-04	0.39
S3_PG	-1.12	0.12	0.0000	0.6636	346	240000	60	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00
S3_PG	-1.13	0.12	0.0125	0.6625	346	240000	60	6.25E-06	1.88E-05	1.88E-05	0.02

Come si vede dalla tabella precedente, il valore dedotto di cedimenti post sismici per ogni singolo profilo verticale investigato non supera i 2 mm, per cui tali cedimenti possono considerarsi trascurabili.

8.1.2 Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica nei terreni coesivi soffici

I cedimenti post sismici possono insorgere anche in terreni coesivi considerati soffici o altamente plastici, nel caso in esame la prevalenza degli strati argillosi appartenenti alla UG2B presentano un valore di Cudi molto superiore a 70 kPa e valori di V_s , velocità delle onde di taglio rilevate tramite prove MASW e Down-Hole, superiori a 180 m/s, per tale motivo si può escludere la presenza di depositi coesivi soffici a meno di alcuni dati puntuali non considerati significativi.

Inoltre l'indice di plasticità medio del complesso di tali strati argillosi risulta essere di poco inferiore al 30%, livello per il quale si può escludere il comportamento altamente plastico di tali terreni.

A valle delle deduzioni sopra riportate si può affermare che si possono trascurare gli eventuali cedimenti post sismici degli strati argillosi appartenenti alla UG2B.

8.2 METODO DI VALUTAZIONE DI IDRISSE E BOULANGER (2008) – CEDIMENTI POST-LIQUEFAZIONE

La stima dei cedimenti verticali post-liquefazione S_v è stata eseguita a partire dai risultati delle prove CPT ed SPT secondo le procedure proposte da Idriss and Boulanger (2008) sulla base delle relazioni inizialmente sviluppate da Ishihara e Yoshimine (1992) che, sulla base di numerose prove di laboratorio, osservarono come le deformazioni

volumetriche ε_v , che hanno luogo durante la riconsolidazione post-liquefazione dei campioni di sabbia siano correlabili direttamente alle deformazioni di taglio massime sopportate dal campione durante lo scuotimento (carico ciclico non drenato) γ_{\max} e alla densità relativa D_R del campione. Gli stessi autori hanno inoltre osservato come le deformazioni di taglio massime sopportate dal campione durante lo scuotimento siano correlabili al coefficiente di sicurezza alla liquefazione FL e alla densità relativa del terreno.

Combinando tali relazioni si ha (Yoshimine et al., 2006; Idriss and Boulanger, 2008):

$$\varepsilon_v = 1.5 \cdot \exp(-0.369 \cdot ((N_1)_{60cs})^{0.5}) \cdot \min(0.08; \gamma_{\max})$$

dove, posti

$$F_\alpha = 0.032 + 0.69 \cdot ((N_1)_{60cs})^{0.5} - 0.13 \cdot (N_1)_{60cs}$$

$$\gamma_{lim} = 1.859 \left(1.1 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{46} \right)^{0.5} \right)^3 \geq 0$$

per $FL > 2$ $\gamma_{\max} = 0$; per $FL < F_\alpha$ $\gamma_{\max} = \gamma_{lim}$ e per $2 > FL > F_\alpha$ γ_{\max} è dato dalla seguente espressione:

$$\gamma_{\max} = \min \left(\gamma_{lim}; 0.035(2 - FL) \left(\frac{1 - F_\alpha}{FL - F_\alpha} \right) \right)$$

I cedimenti post-liquefazione sono dati dall'integrazione lungo la verticale considerata delle deformazioni verticali, calcolate con le relazioni sopra esposte:

$$ced_{tot} = \sum_{j=1}^n (\varepsilon_v / 100) \cdot h_j$$

Dove h_j è lo spessore di ciascuno degli strati potenzialmente liquefacibili in metri.

Si ottiene dunque:

Tabella 22 – Profilo geotecnico 1 – stima dei cedimenti post liquefazione

PROFILO	1	Idriss and Boulanger (2008)						
z(m)	F.L.	N1(60)	F α	γ_{lim}	γ_{\max}	ε_v (%)	Δced_{tot} (cm)	ced,tot (cm)
12	0.48	22.13	0.40	0.12	0.12	0.02	0.021147	
21	0.685831	17.86	0.63	0.20	0.20	0.03	0.025226	
9	0.28	18.50	0.59	0.19	0.12	0.00	0	
21	0.685831	17.86	0.63	0.20	0.20	0.03	0.025226	0.08

Tabella 23 – Profilo geotecnico 3 – stima dei cedimenti post liquefazione

PROFILO	3	Idriss and Boulanger (2008)						
z(m)	F.L.	N1(60)	F α	γ_{lim}	γ_{max}	ε_v (%)	$\Delta_{ced,tot}$ (cm)	ced,tot (cm)
6	0.39	25.00	0.23	0.09	0.09	0.02	0.018963	
7	0.53	25.00	0.23	0.09	0.09	0.02	0.018963	
8	0.69	25.00	0.23	0.09	0.08	0.02	0.018428	
9	0.96	25.00	0.23	0.09	0.04	0.01	0.009017	0.07

Tabella 24 – Profilo geotecnico 4 – stima dei cedimenti post liquefazione

PROFILO	4	Idriss and Boulanger (2008)						
z(m)	F.L.	N1(60)	F α	γ_{lim}	γ_{max}	ε_v (%)	$\Delta_{ced,tot}$ (cm)	ced,tot (cm)
7.1	0.08	11.00	0.89	0.42	0.09	0.00	0	
21	0.67	16.00	0.71	0.25	0.09	0.00	0	
7	0.19	27.00	0.11	0.07	0.07	0.02	0.045763	
25	0.84	17.00	0.67	0.22	0.08	0.03	0.182485	0.23

Tali cedimenti sono considerati ammissibili per l'opera in esame.

9 VERIFICA DEL FRANCO NETTO

Secondo la normativa NTD2014, la definizione di Franco netto è la seguente:

“La differenza tra la quota del piano di coronamento e quella di massimo invaso incrementata della semialtezza della maggiore tra l’onda generata dal vento ovvero quella di massima regolazione incrementata della semialtezza dell’onda da sisma di progetto, calcolate come all’art. C2. Per il calcolo del franco netto dovranno essere, inoltre, considerati i fenomeni di interazione tra moto ondoso e diga: “riflessione” e “risalita” (run-up). Per queste due ultime componenti, ai fini del mantenimento del franco previsto, si potrà anche ricorrere ad un idoneo muro paraonde, di altezza non superiore a 1,4 m.”

Poiché trattasi di opera di ritenuta “composita” in quanto costituita da una sequenza di manufatti limitatori e di sfioro aventi caratteristiche dimensionali e costruttive proprie di “dighe di calcestruzzo a gravità ordinarie” e da rilevati arginali aventi caratteristiche dimensionali e costruttive proprie di “dighe di materiali sciolti” si è ritenuto opportuno adottare un valore di franco netto proprio delle dighe di materiali sciolti pari a 1.50 metri in relazione al fatto che l’altezza della diga da considerare non è superiore a 15 m, in quanto si fa riferimento alle massime altezze rispetto al piano di campagna e non a quelle rispetto al piede interno che è sempre in scavo, a quota inferiore rispetto al piano di campagna.

Definizione delle onde da vento e da sisma:

- a) **Comparto 1:** Fetch=633m; Vento di riferimento 25 m/s pari a 90 km/s; Ampiezza d’onda=0.15 m; Runup=0.021 m; da cui semialtezza (=ampiezza) + runup=0.084.
- b) **Comparto 2:** Fetch=530m; Vento di riferimento 25 m/s pari a 90 km/s; Ampiezza d’onda=0.12 m; Runup=0.017 m; da cui semialtezza (=ampiezza) + runup=0.070.

Nella tabella seguente si riporta il valore del franco netto e la sua conseguente verifica come stabilito dalla norma NTD2014 al paragrafo C.1 per ogni sezione di calcolo.

La verifica del franco netto viene prima eseguita con i valori di cedimenti dovuti all’azione sismica derivanti dal metodo di Newmark semplificato tramite correlazione di Ambraseys e Menu (1988), riportati nella Relazione geotecnica – Fondazioni rilevati e verifiche di stabilità - BAG307ARGRRE021, al capitolo “5. RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE – VALUTAZIONE SPOSTAMENTI PERMANENTI”.

I cedimenti post sismici del terreno di fondazione dei rilevati arginali, come discusso all’interno del precedente capitolo 8, sono considerati trascurabili, essendo di pochi millimetri, pertanto non vengono presi in considerazione all’interno della verifica del Franco Netto.

Tabella 25 – Valutazione del valore di franco netto secondo NTD2014 e verifica (cedimenti sismici permanenti derivati da Newmark semplificato)

		COMPARTO 1					COMPARTO 2				
	U.M.	SEZ 1	SEZ 4	SEZ 5	SEZ 6	SEZ S2_PG/S7	SEZ 1	SEZ 2	SEZ 3	SEZ 7	SEZ S14
quota coronamento	m.s.l.m.	147.5	147.5	147.5	147.5	147.5	145.5	145.5	145.5	145.5	145.5
quota max invaso	m.s.l.m.	145.7	145.7	145.7	145.7	145.7	143.7	143.7	143.7	143.7	143.7
Franco	m	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Semiampiezza onda vento	m	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
Run up	m	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017
Semiampiezza + runup	m	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Franco Netto	m	1.716	1.716	1.716	1.716	1.716	1.730	1.730	1.730	1.730	1.730
Franco netto regolamento	m	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Cedimenti terreno+rilevati	m	0.1274	0.0542	0.0689	0.15	0.1482	0.127	0.14	0.02	0.027	0.12
hmax rilevato	m	15	5.1	4.9	10	10	15	16	14.7	14.7	16
cedimenti azioni sismiche (Newmark semplificato)	m	0.0592	0.0729	0.0635	0.0592	0.0592	0.059	0.059	0.084	0.068	0.0592
franco netto minimo	m	1.6866	1.6271	1.6324	1.709	1.707	1.687	1.699	1.604	1.595	1.6792
Franco netto > Franco netto minimo		SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Successivamente si riporta la verifica del Franco Netto secondo le prescrizioni di NTD2014 con il valore minimo di cedimento sismico relazionato all'altezza del rilevato in terra considerato.

Tabella 26 – Valutazione del valore di franco netto secondo NTD2014 e verifica (cedimenti sismici permanenti derivati da limite minimo NTD2014)

		COMPARTO 1					COMPARTO 2				
	U.M.	SEZ 1	SEZ 4	SEZ 5	SEZ 6	SEZ S2_PG/S7	SEZ 1	SEZ 2	SEZ 3	SEZ 7	SEZ S14
quota coronamento	m.s.l.m.	147.5	147.5	147.5	147.5	147.5	145.5	145.5	145.5	145.5	145.5
quota max invaso	m.s.l.m.	145.7	145.7	145.7	145.7	145.7	143.7	143.7	143.7	143.7	143.7
Franco	m	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Semiampiezza onda vento	m	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
Run up	m	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017
Semiampiezza + runup	m	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Franco Netto	m	1.716	1.716	1.716	1.716	1.716	1.730	1.730	1.730	1.730	1.730
Franco netto regolamento	m	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Cedimenti terreno+rilevati	m	0.1274	0.0542	0.0689	0.15	0.1482	0.127	0.14	0.02	0.027	0.12
hmax rilevato	m	15	5.1	4.9	10	10	15	16	14.7	14.7	16
cedimenti azioni sismiche (minimo NTD2014)	m	0.075	0.0255	0.0245	0.05	0.05	0.075	0.08	0.074	0.0735	0.08
franco netto minimo	m	1.7024	1.5797	1.5934	1.700	1.698	1.702	1.72	1.594	1.6005	1.700
Franco netto > Franco netto minimo		SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Le verifiche risultano essere soddisfatte.

10 VALUTAZIONE DEL DANNO SULLE PREESISTENZE

Il criterio utilizzato per la valutazione del danno atteso sui fabbricati/edifici pre-esistenti interferenti con la cassa di espansione in esame è quello proposto da Boscarding & Cording, dettagliatamente descritto al paragrafo successivo, che mette in correlazione il danno potenziale alle deformazioni di trazione subite dai manufatti a causa dei cedimenti provocati dai processi di consolidazione dei rilevati in terra della cassa di espansione in esame.

Ai fini di tale valutazione è necessario determinare preliminarmente gli spostamenti verticali ed orizzontali indotti dall'opera alla quota delle fondazioni dei fabbricati, valutando i bacini di subsidenza generati dai rilevati in esame.

Il calcolo dei cedimenti e degli spostamenti orizzontali indotti e la distribuzione planimetrica dei cedimenti e degli spostamenti orizzontali forniti dai modelli numerici esposti nei capitoli precedenti, insieme alle caratteristiche geometrico - strutturali dei fabbricati ed alla loro relativa posizione all'interno delle conche di subsidenza, consentono di valutarne la classe di danno secondo il criterio esposto al paragrafo seguente.

10.1 TEORIE PER LA VALUTAZIONE DEL DANNO

La valutazione del danno atteso sui manufatti esistenti interessati dai cedimenti indotti dalle operazioni di scavo richiede, oltre alle conoscenze relative alla configurazione geometrico-strutturale ed alla ricostruzione del processo realizzativo della costruzione, la stima delle deformazioni indotte al piano delle fondazioni.

I criteri per l'individuazione dei valori massimi ammissibili dei movimenti di un edificio sono molteplici in quanto basati sull'introduzione di grandezze cinematiche diverse (spostamento assoluto, spostamento differenziale, rotazione, inflessione, etc.).

Numerosi ricercatori (Meyerhof, 1947; Skempton & MacDonald, 1955; Polshin & Tokar, 1957; Bjerrum, 1963; Grant et al., 1974; Burland & Wroth, 1974; Burland et al., 1977; Boscardin & Cording, 1989; Boone, 1996) hanno raccolto dati sperimentali derivanti dall'osservazione del comportamento esibito da varie tipologie di opere e, in funzione del verificarsi di danni di varia natura e tipo, hanno elaborato criteri che, con terminologia moderna, potrebbero essere assunti come valori da non superare per il rispetto delle verifiche allo Stato Limite di Servizio (SLS) sancite dalle recenti Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC, 2008).

Un contributo particolarmente importante in questo campo è stato quello fornito inizialmente da Burland & Wroth (1974). In tale lavoro è stato messo in evidenza che l'uso di un singolo criterio di soglia, quale ad esempio quello basato sulla distorsione angolare, per la valutazione del danno potenziale subito da un edificio non può ritenersi adeguato in quanto esclude altri fattori che svolgono un ruolo determinante nel definire i meccanismi di danno. Senza entrare nel dettaglio analitico del metodo sviluppato, è importante evidenziare che, tra i numerosi fattori in gioco, alcuni dei quali di difficile valutazione, quelli che maggiormente influenzano i risultati sono:

- la rigidità globale dell'organismo strutturale,
- la resistenza alla fessurazione dei materiali con cui la struttura è realizzata.

Con riferimento al primo fattore, attraverso un semplice modello di trave equivalente all'intera struttura, è stata evidenziata l'importanza assunta dal rapporto tra i moduli di elasticità normale (E) e trasversale (G) necessari a rappresentare sinteticamente e semplicemente la rigidezza longitudinale (a flessione) e verticale (a taglio) dell'intero organismo strutturale. E' evidente quindi che essi non vanno confusi con i relativi valori di rigidezza del materiale con cui è realizzata la struttura.

I valori suggeriti di tale rapporto sono:

- $E/G = 2.6$ per edifici in muratura
- $E/G = 12.5$ per edifici con struttura intelaiata in c.a.

Con riferimento al secondo fattore, viene introdotto un valore di "deformazione limite di trazione, ε_{lim} " corrispondente al valore di deformazione che è necessario subisca un assegnato materiale perché si inneschi un processo di fessurazione.

I valori delle deformazioni massime di allungamento vengono valutati distinguendo, all'interno del bacino di subsidenza, le zone contraddistinte dalla curvatura del profilo atteso in zone di hogging (concavità della deformata verso il basso) e zone di sagging (concavità della deformata verso l'alto).

Per ciascuna zona viene individuato il massimo rapporto di inflessione Δ/L , dove Δ rappresenta il massimo scostamento della curva di subsidenza dall'andamento linearizzato tra i punti estremi posti a distanza L della zona stessa.

È possibile quindi calcolare le deformazioni massime parallele all'asse dell'edificio dovute alle sollecitazioni di flessione (ε_b) e di taglio (ε_d) mediante le seguenti relazioni:

$$\varepsilon_b = \left(\frac{\Delta}{L} \right) \times \frac{1}{\left[\left(\frac{L}{12t} \right) + \left(\frac{3EI}{2tLHG} \right) \right]}$$

$$\varepsilon_d = \left(\frac{\Delta}{L} \right) \times \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{HL^2G}{18EI} \right) \right]}$$

dove H ed I sono l'altezza totale ed il momento di inerzia dell'edificio e t è la distanza dell'asse neutro dal lembo teso della trave.

Nelle zone di hogging

$$I = H^3/3 \quad t = H$$

mentre in quelle di sagging

$$I = H^3/12 \quad t = H/2$$

Componendo tali deformazioni di trazione con la deformazione orizzontale media sul piano fondazione dovuta agli spostamenti orizzontali connessi ai movimenti indotti dagli scavi, si ottengono le massime deformazioni di trazione:

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon_h + \varepsilon_b$$

$$\varepsilon_{\max} = 0.35\varepsilon_h + \sqrt{\left((0.65\varepsilon_h)^2 + \varepsilon_d^2\right)}$$

Boscardin & Cording (1989), sulla base dei dati sperimentali raccolti per edifici in muratura, hanno correlato il danno atteso per l'edificio ai valori di ε_{\lim} , secondo quanto riassunto nelle successive Tabelle.

Tabella 27 – Corrispondenza tra categorie di danno e deformazioni massime di trazione (Boscardin & Cording, 1989)

Category of damage	Normal degree of severity	Limiting tensile strain (ε_{\max}) (%)
0	Negligible	0÷0.05
1	Very slight	0.05÷0.075
2	Slight	0.075÷0.15
3	Moderate	0.15÷0.3
4 to 5	Severe to very severe	>0.3

Tabella 28 – Classificazione del danno per strutture in muratura (Boscardin & Cording, 1989)

Category of damage	Normal degree of severity	Description of typical damage
0	Negligible	Hairline cracks less than about 0.1mm
1	Very Slight	Fine cracks. Damage generally to internal wall. Typical crack widths up to 1mm
2	Slight	Cracks easily filled. Crack may be visible externally. Typical crack widths up to 5mm
3	Moderate	The cracks require some opening up and can be patched by a mason. Reporting to external brickwork and possibly a small amount of brickwork to be replaced. Typical crack widths are 5mm to 15mm.

4	Severe	Extensive repair work involving breaking-out and replacing sections of walls, especially over doors and windows. Typical crack widths are 15mm to 25mm.
5	Very Severe	This requires a major repair job involving partial or complete rebuilding. Typical crack widths are greater than 25mm.

I fabbricati ricadenti nel bacino di subsidenza degli scavi sono diversamente suscettibili al danno potenziale. A parità di cedimenti e distorsioni indotte, infatti, la minore o maggiore sensibilità al danno può dipendere ad esempio dall'esistenza di un danno strutturale pregresso o implicitamente dalla destinazione d'uso dei fabbricati (es: edifici pubblici).

10.2 EDIFICI OGGETTO DI STUDIO

Gli edifici oggetto di studio sono posti nella zona est della vasca di espansione, si trovano nelle vicinanze del bacino di subsidenza della cassa di espansione in esame e pertanto si ritiene opportuno valutare l'eventuale classe di danno per mettere in evidenza potenziali problematiche strutturali.

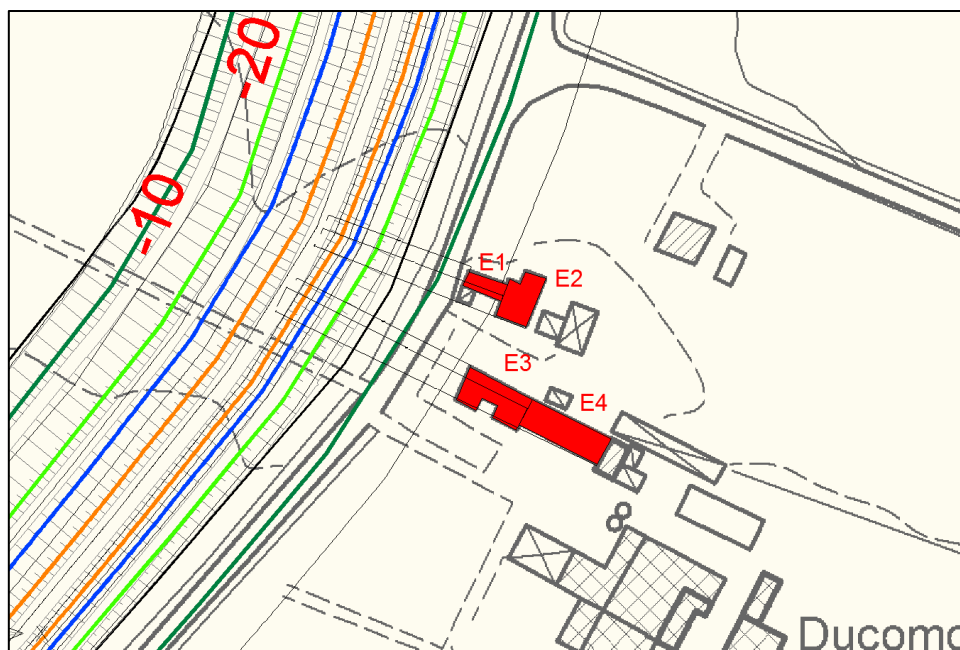


Figura 71 – Edifici limitrofi al bacino di subsidenza della vasca di espansione

Gli edifici sono in numero di 4, denominati E1, E2, E3 ed E4, e dalle foto riportate nel seguito si può dedurre il valore di altezza fuori terra di ciascuno di essi, nello specifico si adotta un valore di 7 m per l'edificio 1, mentre si ipotizza un valore di 10 m per i rimanenti edifici. L'approfondimento delle fondazioni si ipotizza nullo, quindi si studiano le deformazioni orizzontali e i cedimenti a piano campagna.

La struttura degli edifici si ipotizza realizzata in muratura, quindi si adotta un valore di $E/G = 2.6$.

Tabella 29 – Tabella riassuntiva dei dati inerenti i fabbricati indagati

SEZIONE DI RIFERIMENTO	FABBRICATO	DISTANZA DA ASSE RILEVATO [m]		Lunghezza edificio	Ascissa Asse Rilevato	Ascissa estremo interno	Ascissa estremo esterno	h fuori terra
		ESTREMO INTERNO	ESTREMO ESTERNO					
SEZIONE 3	E1	45.2	57.3	12	121	166.2	178.3	7
SEZIONE 3	E2	57.3	67.6	10	121	178.3	188.6	10
SEZIONE 3	E3	58.1	80.5	22	121	179.1	201.5	10
SEZIONE 3	E4	80.5	106.3	26	121	201.5	227.3	10

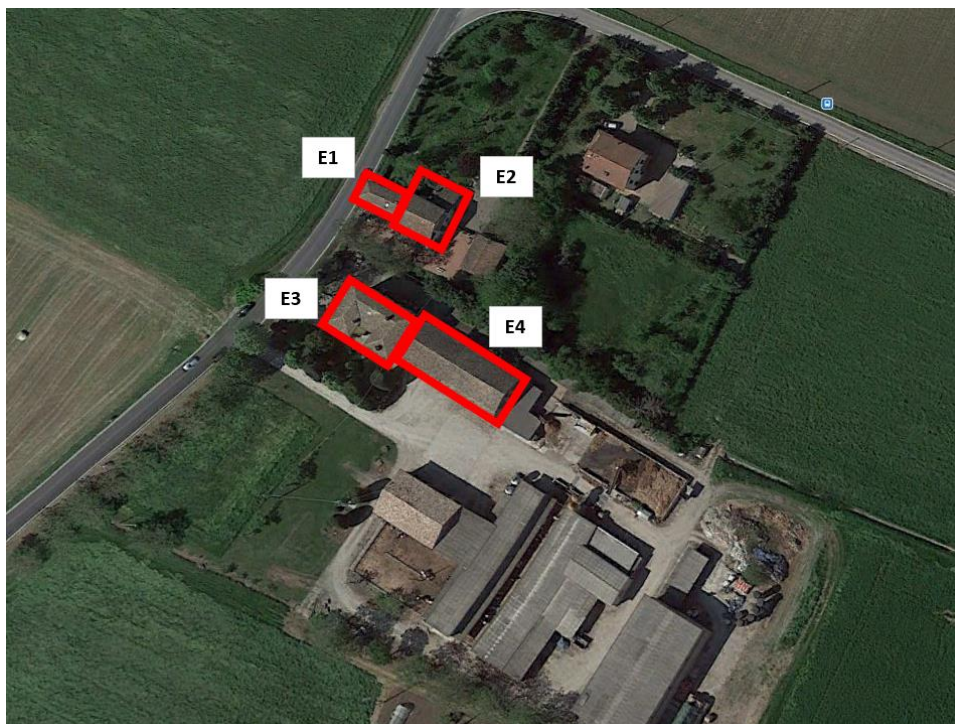


Figura 72 - Edifici limitrofi al bacino di subsidenza della vasca di espansione



Figura 73 – Visione frontale degli edifici denominati E1 ed E2



Figura 74 – Visione frontale degli edifici denominati E3 ed E4

10.3 RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE

Come risultato della analisi numerica inerente la zona in esame (Sezione 3) si ha lo sviluppo dei cedimenti e degli spostamenti orizzontali per una distanza compatibile con lo sviluppo del modello numerico e che ingloba gli edifici indagati.

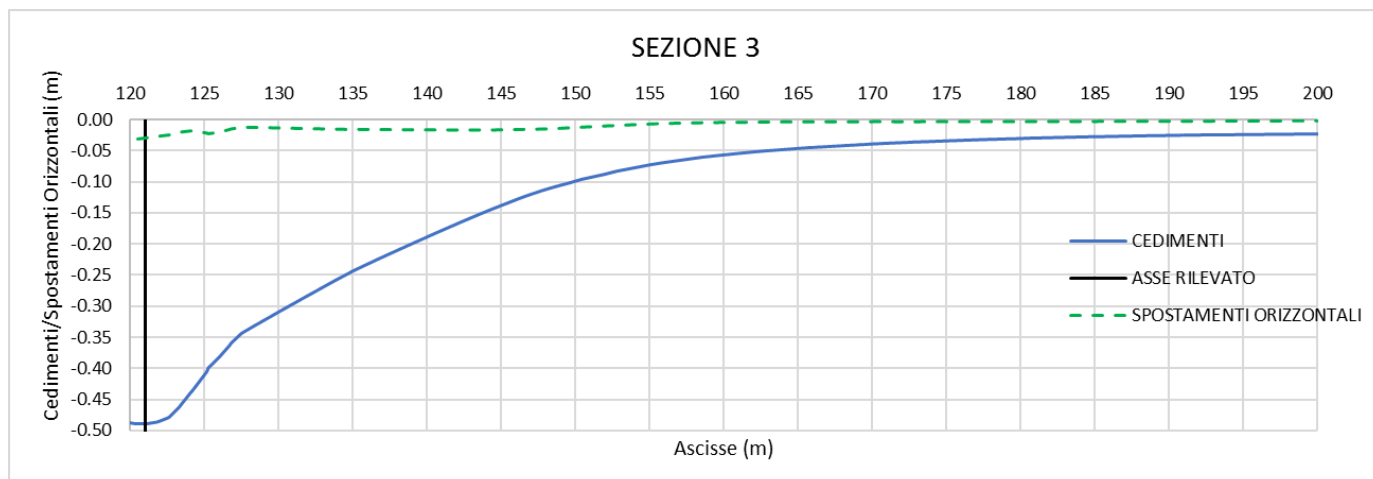


Figura 75 – Cedimenti e spostamenti orizzontali – Sezione 3

Nel seguito si mostrano le posizioni dei singoli edifici rispetto all'asse del rilevato.



Figura 76 – EDIFICIO 1 – distribuzione dei cedimenti – Sezione 3

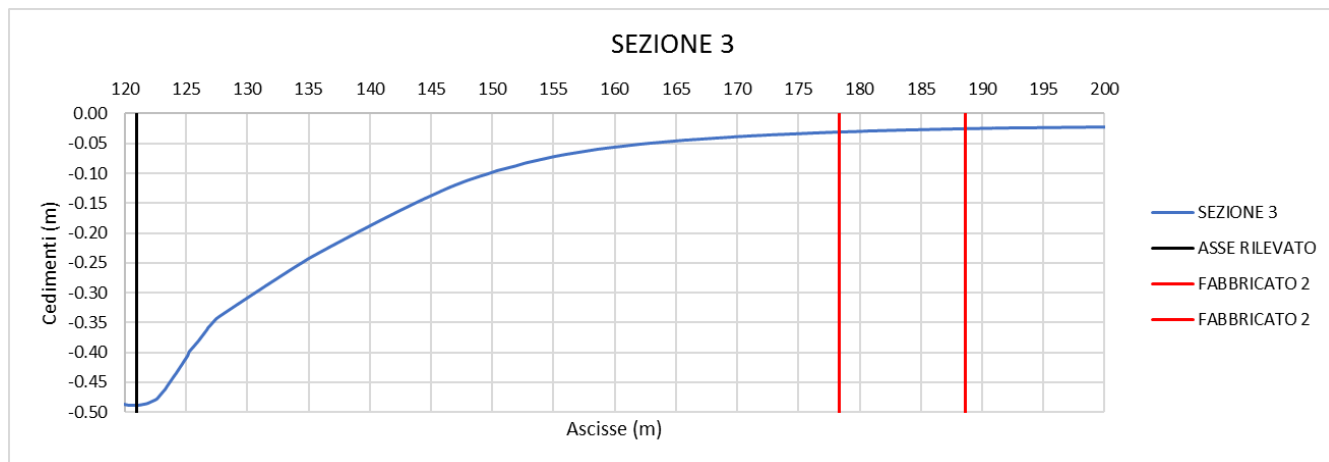


Figura 77 – EDIFICIO 2 – distribuzione dei cedimenti – Sezione 3

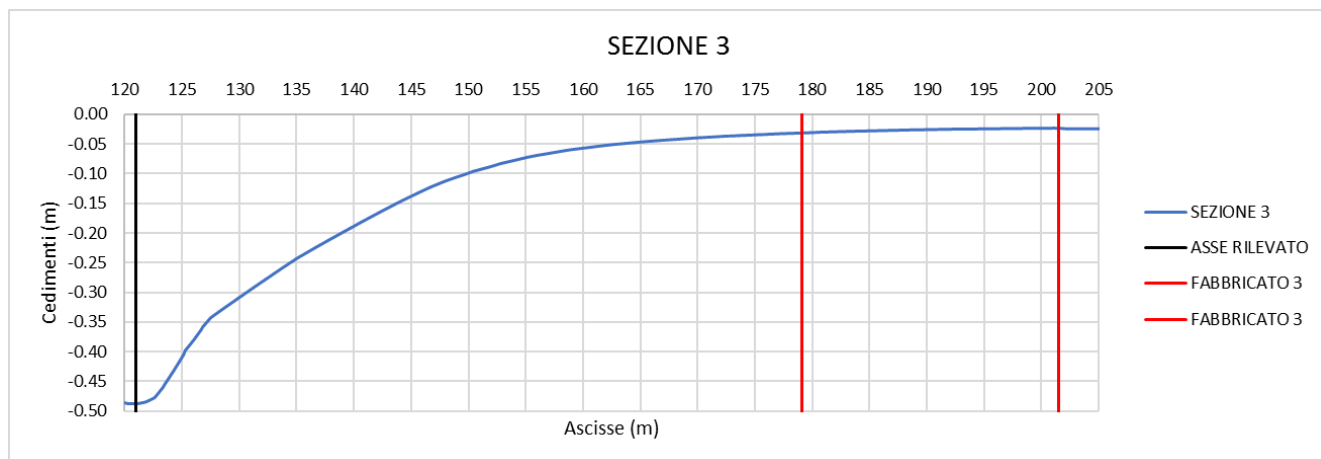


Figura 78 – EDIFICIO 3 – distribuzione dei cedimenti – Sezione 3

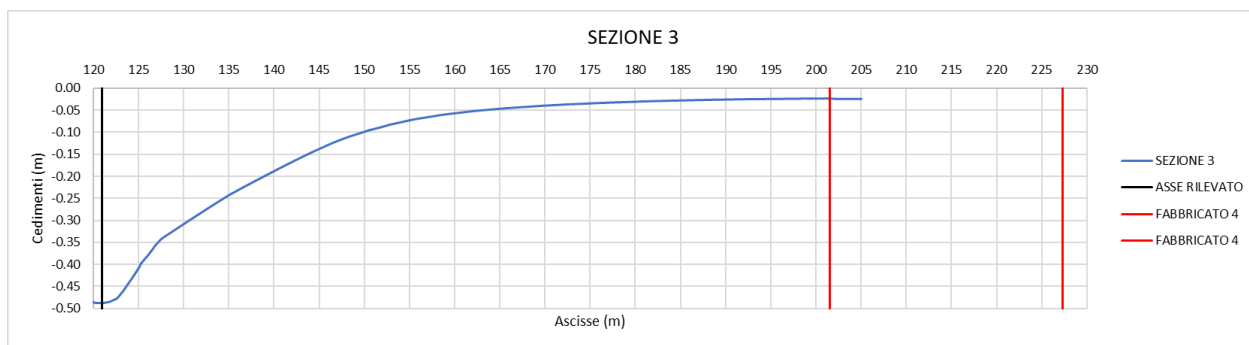


Figura 79 – EDIFICIO 4 – distribuzione dei cedimenti – Sezione 3

10.4 VALUTAZIONE DEL DANNO

10.4.1 Edificio 1

Si riportano di seguito le tabelle per la valutazione del danno sull'edificio 1.

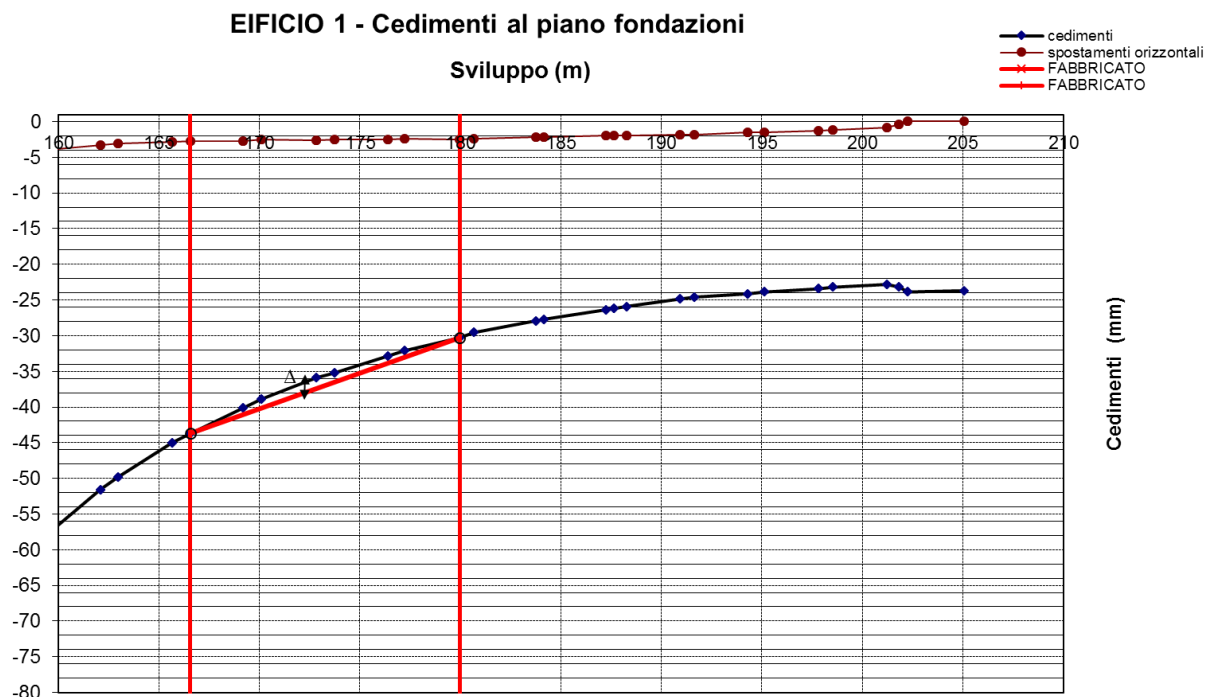


Figura 80 – Intervallo considerato per il calcolo del danno per l'edificio 1

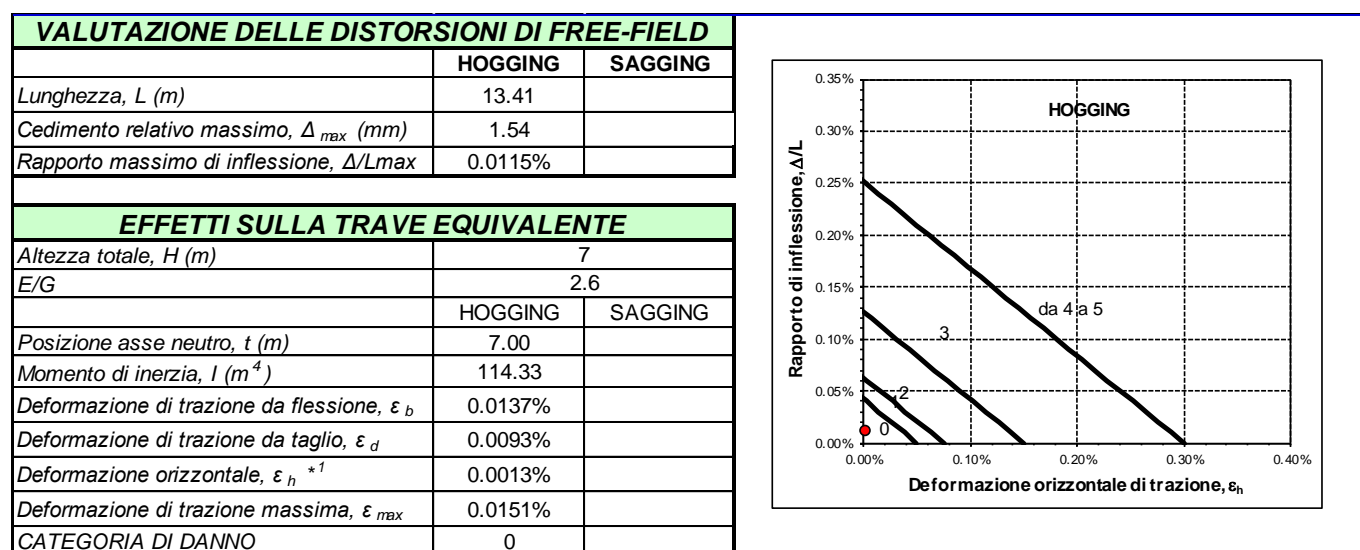


Figura 81 – Valutazione del danno per l'edificio 1

La categoria di danno è 0, quindi l'edificio non risente dell'effetto dei cedimenti a piano campagna provocati dal bacino di subsidenza dei rilevati arginali.

10.4.2 Edificio 2

Si riportano di seguito le tabelle per la valutazione del danno sull'edificio 2.

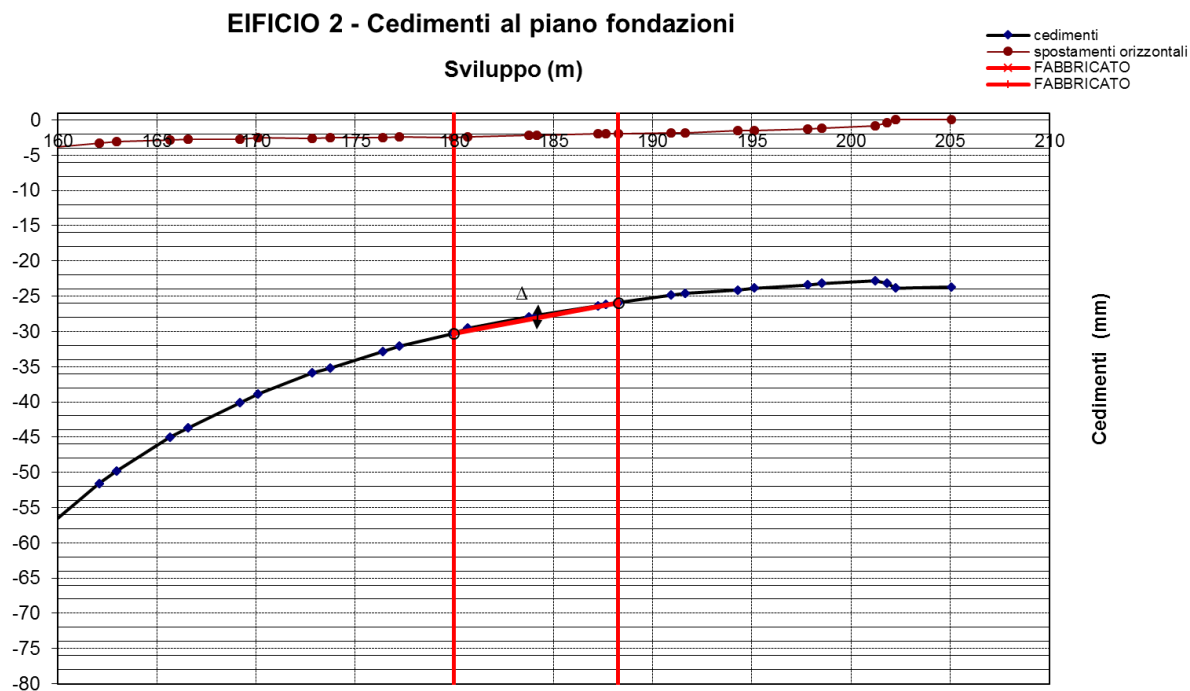


Figura 82 – Intervallo considerato per il calcolo del danno per l'edificio 2

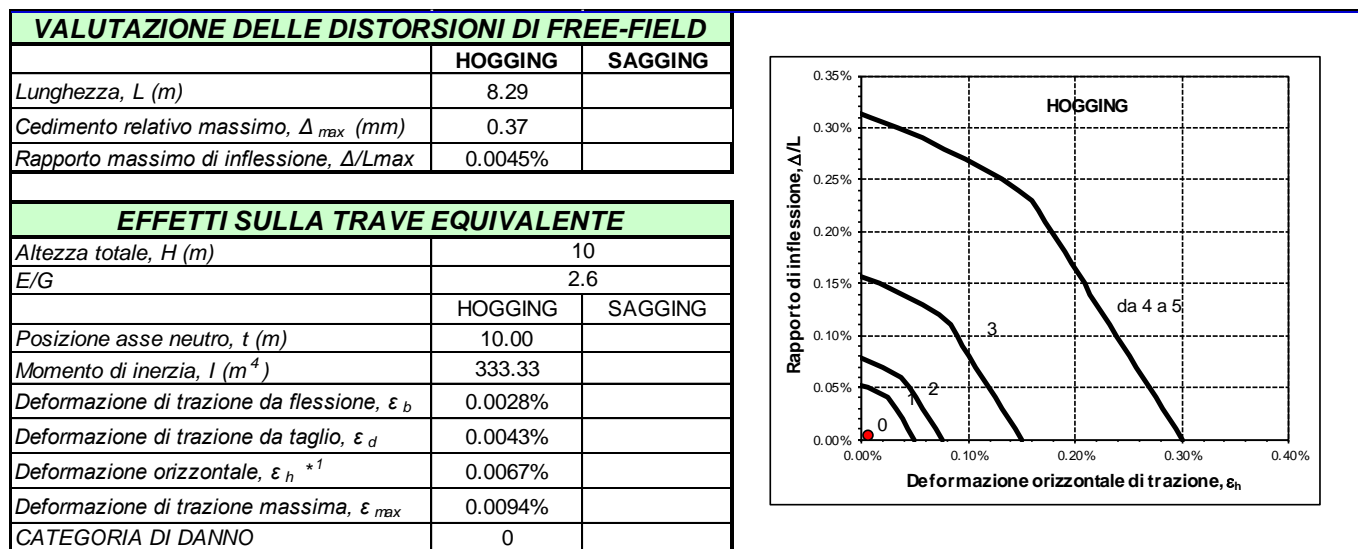


Figura 83 – Valutazione del danno per l'edificio 2

La categoria di danno è 0, quindi l'edificio non risente dell'effetto dei cedimenti a piano campagna provocati dal bacino di subsidenza dei rilevati arginali.

10.4.3 Edificio 3

Si riportano di seguito le tabelle per la valutazione del danno sull'edificio 3.

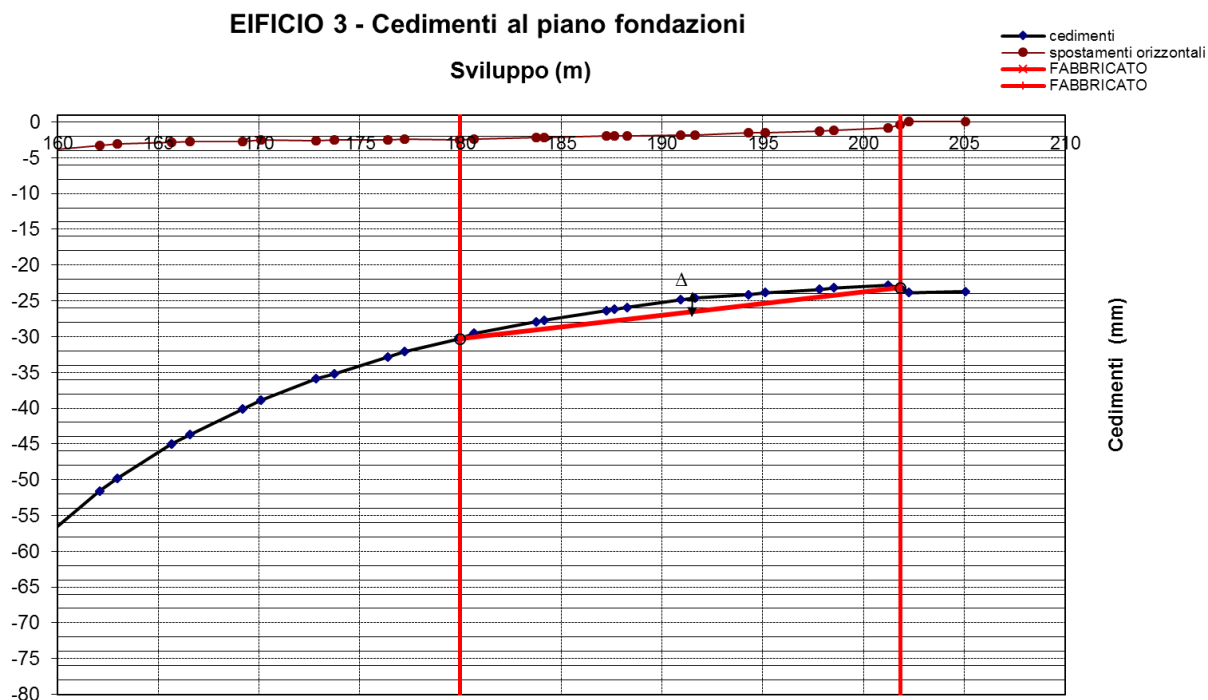


Figura 84 – Intervallo considerato per il calcolo del danno per l'edificio 3

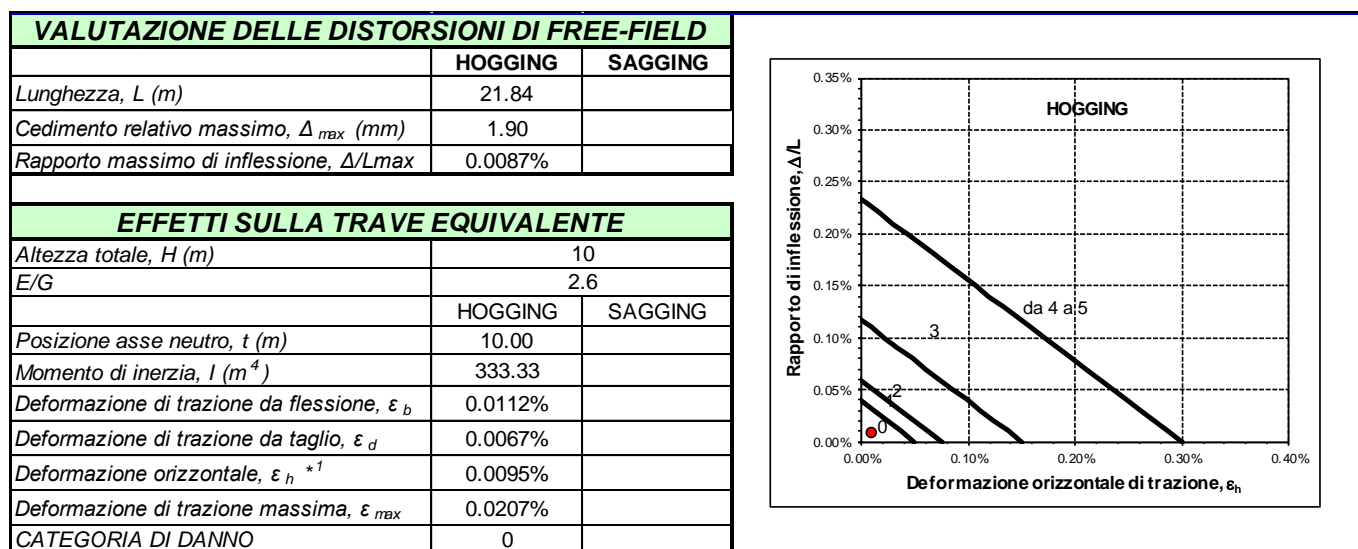


Figura 85 – Valutazione del danno per l'edificio 3

La categoria di danno è 0, quindi l'edificio non risente dell'effetto dei cedimenti a piano campagna provocati dal bacino di subsidenza dei rilevati arginali.

10.4.4 Edificio 4

Si riportano di seguito le tabelle per la valutazione del danno sull'edificio 4.

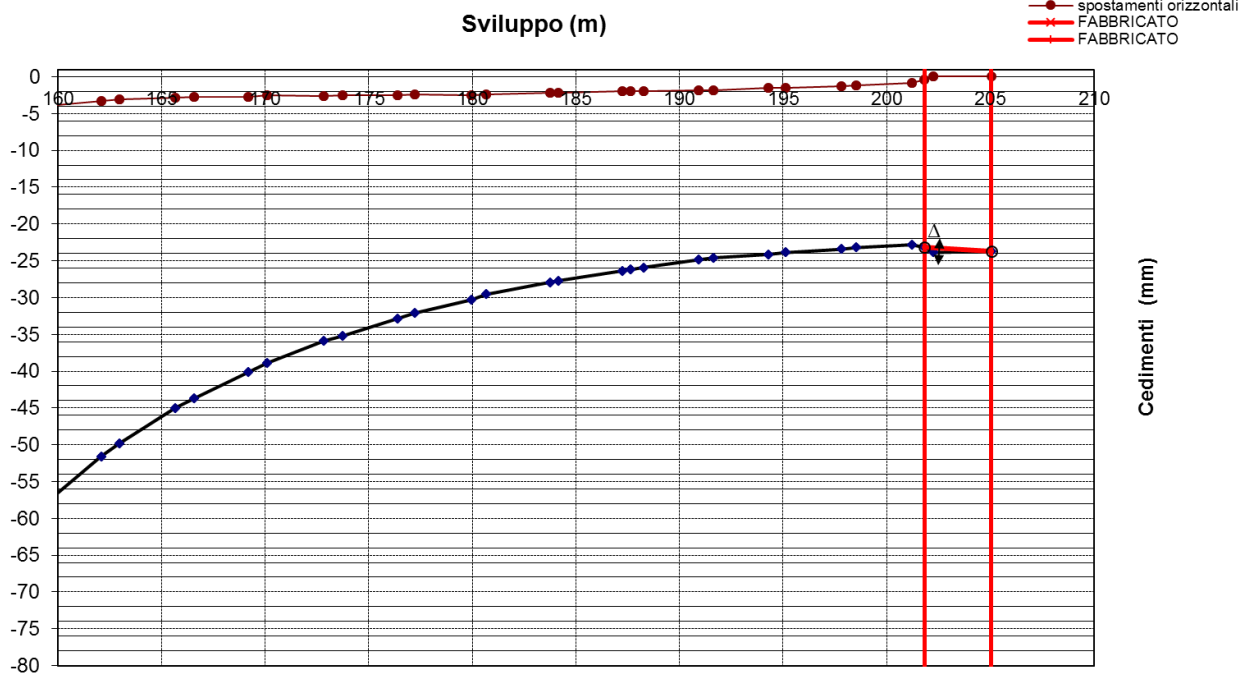
EIFICIO 4 - Cedimenti al piano fondazioni


Figura 86 – Intervallo considerato per il calcolo del danno per l'edificio 4

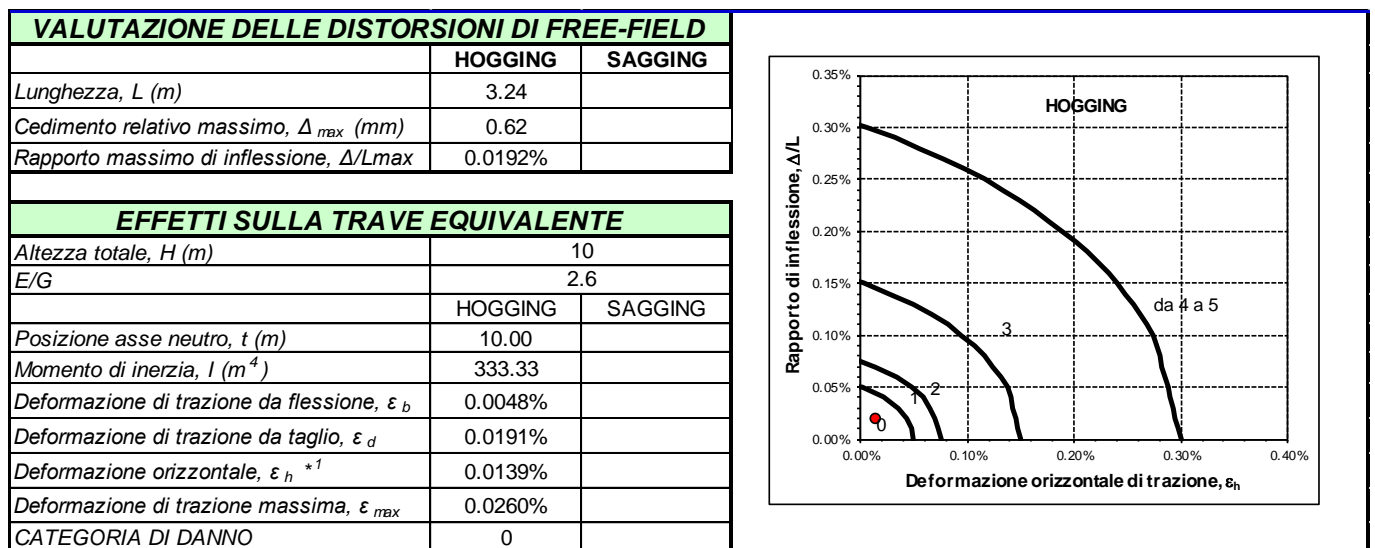


Figura 87 – Valutazione del danno per l'edificio 4

La categoria di danno è 0, quindi l'edificio non risente dell'effetto dei cedimenti a piano campagna provocati dal bacino di subsidenza dei rilevati arginali.

11 CONSIDERAZIONI FINALI

Nella presente relazione di calcolo si sono analizzati i cedimenti che andranno ad evolvere durante la costruzione dei rilevati e nella fase di esercizio a lungo termine, ovvero fino a 100 anni dalla costruzione.

Nella tabella seguente si riportano brevemente i risultati dell'analisi in termini di cedimenti massimi di lungo termine (calcolati al piano di fondazione dei rilevati), ovvero ricavati come la differenza tra i cedimenti totali e i cedimenti a consolidazione terminata, che coincide con i 180 giorni assunti per la costruzione dei rilevati arginali della cassa di espansione. La consolidazione analizzata è sia primaria che secondaria negli strati argillosi.

Sezione di calcolo	Cedimento Totale	Cedimento Breve Termine	Cedimento residuo stimato - fase di esercizio
[-]	[m]	[m]	[m]
1	-0.68	-0.52	-0.16
2	-1.05	-0.91	-0.14
3	-0.49	-0.46	-0.03
4	-0.17	-0.11	-0.06
5	-0.40	-0.28	-0.12
6	-0.82	-0.63	-0.19
7	-0.30	-0.26	-0.04
S14	-1.00	-0.87	-0.13
S2_PG/S7	-0.92	-0.73	-0.19
Manufatto C	-0.55	-0.38	-0.17

Come si vede i cedimenti in fase di esercizio (riferiti al piano di fondazione dei rilevati d'argine) si mantengono tutti compresi tra 0.03 e 0.19 m, valori che risultano essere accettabili in termini funzionali. Non si evincono inoltre cedimenti differenziali consistenti tra sezioni arginali adiacenti.

Inoltre si considerano ammissibili i cedimenti indotti dalla liquefazione.

Infine si è valutato il danno sui fabbricati più prossimi al bacino di subsidenza della vasca di espansione, tutti i fabbricati risultano appartenenti alla categoria 0 secondo la classificazione di Boscardin & Cording, 1989.