



Città Metropolitana di Bologna

Via Zamboni, 13 - 40126 Bologna (BO)

IL RUP:

P.I.E. Stefano Romagnoli

IL DIRETTORE DELL'ESECUZIONE DEL CONTRATTO:

Ing. Jonathan Manzi

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

(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)

### PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA

### RILEVATI

#### Rilevati stradali

#### Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati

PROGETTAZIONE:  
Mandatara:

SYSTRA S.p.A.

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

Mandanti:



SETECO Ingegneria S.r.l.

ITEC Engineering S.r.l.

|                |                                             |                                                                                      |
|----------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| SCALA:<br>---  | IL PROGETTISTA:<br><br>Ing. Erica Calatizzo | IL RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:<br><br>Ing. Erica Calatizzo |
| FORMATO:<br>A4 |                                             |                                                                                      |

DATA:  
Mag 2026

| REV. | DESCRIZIONE | REDATTO                        | DATA     | VERIFICATO | DATA     | APPROVATO  | DATA     |
|------|-------------|--------------------------------|----------|------------|----------|------------|----------|
|      |             |                                |          |            |          |            |          |
|      |             |                                |          |            |          |            |          |
| r00  | Emissione   | A.Konstantinou<br>/ G. Puglisi | Mag 2026 | M. Palomba | Mag 2026 | M. Ravelli | Mag 2026 |

| CODICE PROGETTO | LIVELLO PROGETTAZIONE | TIPO DOC. | AMBITO | PROGRESSIVO | REV. |
|-----------------|-----------------------|-----------|--------|-------------|------|
| 24V25           | PF                    | R         | GT     | 720         | r00  |

|                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna<br>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)<br><br>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                                                                                 | CODICE PROGETTO<br>24V25<br>LIVELLO PROG.<br>PF<br>TIPO DOC.<br>R<br>AMBITO<br>GT<br>PROGRESSIVO<br>720<br>REV.<br>r00                                                                          |

## INDICE

|         |                                                               |    |
|---------|---------------------------------------------------------------|----|
| 1.      | PREMESSA                                                      | 4  |
| 1.1     | IDENTIFICAZIONE DEL PROGETTO                                  | 4  |
| 1.2     | DESCRIZIONE DELL'OPERA                                        | 5  |
| 2.      | NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO                          | 6  |
| 2.1     | NORMATIVA                                                     | 6  |
| 2.2     | ELABORATI DI RIFERIMENTO DEL DOCFAP                           | 6  |
| 2.3     | ELABORATI DI RIFERIMENTO DEL PFTE                             | 6  |
| 2.4     | DOCUMENTI DI RIFERIMENTO                                      | 6  |
| 3.      | INQUADRAMENTO GEOLOGICO E SISMICO                             | 7  |
| 4.      | CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE E VERIFICA                  | 8  |
| 4.1     | ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE                                  | 8  |
| 4.1.1   | METODOLOGIA DI CALCOLO                                        | 8  |
| 4.1.2   | FALDA                                                         | 9  |
| 4.1.3   | CARICHI STRADALI                                              | 9  |
| 4.1.4   | AZIONI SISMICHE                                               | 9  |
| 4.2     | VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI                                     | 11 |
| 4.2.1   | CRITERI DI VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI                          | 11 |
| 4.2.2   | DETERMINAZIONE DELLA ZONA COMPRESSIBILE Hc                    | 11 |
| 4.2.3   | DESCRIZIONE DEI FENOMENI                                      | 11 |
| 4.2.3.1 | Valutazione teorica dei vari tipi di cedimento                | 13 |
| 4.2.4   | PROCEDURA DI CALCOLO                                          | 14 |
| 4.2.5   | SCELTA DEI PARAMETRI DI CALCOLO                               | 14 |
| 5.      | INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO                      | 16 |
| 5.1     | MITIGAZIONE DELLA LIQUEFAZIONE MEDIANTE PALI IN GHIAIA        | 16 |
| 5.2     | CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI MEDIANTE PALI NON ARMATI CLS 25/30 | 19 |
| 5.2.1   | CARATTERISTICHE MODELLAZIONE INTERVENTO                       | 20 |
| 6.      | VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE                                 | 22 |
| 6.1     | SEZIONI DI CALCOLO                                            | 22 |
| 6.2     | RISULTATI VERIFICA SEZ. 29A SPONDA DESTRA – APPROCCIO SUD     | 24 |
| 6.1     | RISULTATI VERIFICA SEZ. 29B SPONDA DESTRA – APPROCCIO SUD     | 29 |
| 7.      | VERIFICA DEI CEDIMENTI                                        | 31 |
| 7.1     | SEZIONI DI CALCOLO                                            | 33 |
| 7.2     | RISULTATI VERIFICA 29A SPONDA DESTRA – APPROCCIO SUD          | 33 |

|                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna<br><br>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)<br><br>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                                                                                     | CODICE PROGETTO<br>24V25 LIVELLO PROG.<br>PF TIPO DOC.<br>R AMBITO<br>GT PROGRESSIVO<br>720 REV.<br>r00                                                                                         |

|     |                                                                       |    |
|-----|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 7.3 | RISULTATI VERIFICA 29B SPONDA DESTRA – APPROCCIO SUD                  | 35 |
| 7.4 | RISULTATI VERIFICA 29A SPONDA DESTRA – APPROCCIO SUD - CONSOLIDAMENTO | 37 |
| 7.5 | RISULTATI VERIFICA 29B SPONDA DESTRA – APPROCCIO SUD - CONSOLIDAMENTO | 39 |
| 8.  | CONCLUSIONI                                                           | 41 |

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                  |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div> |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <div>CODICE PROGETTO</div> <div>24V25</div>                                                                                                                                                                      | <div>LIVELLO PROG.</div> <div>PF</div> | <div>TIPO DOC.</div> <div>R</div> | <div>AMBITO</div> <div>GT</div> | <div>PROGRESSIVO</div> <div>720</div> | <div>REV.</div> <div>r00</div> |

## 1. PREMESSA

Il presente documento rappresenta la relazione geotecnica di calcolo dei rilevati del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica (PFTE) dei servizi di supporto alla progettazione e all'esecuzione dei lavori relativo all'intervento di "RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SULLA S.P. 6 AL KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA" - CUP C51B23000440001 (ALLUVIONE MAGGIO 2023 - 2024VIMASNC25).

Questa relazione è stata sviluppata sulla base della caratterizzazione geotecnica presentata nella relazione 24V25\_PF\_R\_GE\_102.

Nella presente relazione sono trattati i seguenti argomenti:

- Nel capitolo 2 sono elencate le normative e i documenti di riferimento;
- Nel capitolo 3 è riportata una sintesi del quadro geologico e sismico di riferimento;
- Nel capitolo 4 sono riportati i criteri generali di progettazione e le verifiche eseguite per le opere oggetto del presente documento;
- Nel capitolo 5 si presentano gli interventi di consolidamento considerati per la velocizzazione dei tempi della consolidazione e la mitigazione degli effetti della liquefazione;
- Nel capitolo 6 si presentano le verifiche di stabilità globale dei rilevati della sponda sinistra e destra. Viene altresì condotta la verifica a capacità portante della sponda sud per la sistemazione temporanea del rilevato per il varo del ponte;
- Nel capitolo 7 si presenta la verifica dei cedimenti del rilevato.

### 1.1 Identificazione del progetto

I dati principali del progetto sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 1: Identificazione del progetto

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

|                                                                                                   |                                                                                                                                               |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna                                              | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) |                     |                |              |                    |             |
| PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA                                                                                                    |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                         | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                      | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

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

PFTE

## 1.2 Descrizione dell'opera

Nella presente relazione vengono descritte le soluzioni progettuali previste per i rilevati di approccio al Ponte Motta-Budrio, con specifico riferimento alle problematiche geotecniche connesse alla realizzazione delle opere in progetto e agli interventi di miglioramento e consolidamento del terreno di fondazione.

Il rilevato dell'approccio nord si sviluppa da inizio tracciato (km 0+000) fino alla spalla in km 0+314, per un'estensione complessiva di circa 314m. Nella tratta iniziale, caratterizzato da altezze di rilevato contenute, l'intervento previsto consiste sostanzialmente nell'allargamento e nel sopralzo del rilevato esistente. Nei tratti a maggiore rilevanza altimetrica, sul lato di via Zagno, è prevista la realizzazione di un muro di sostegno in c.a., da km 0+030 fino alla spalla in km 0+306 circa, per un'estensione complessiva di circa 276m, per cui si rimanda alla relazione di dettaglio (Doc. Rif. 16).

Il rilevato dell'approccio sud si sviluppa da km 0+825 circa con altezze molto contenute via via crescenti, fino alla spalla (km 0+522), per uno sviluppo complessivo di 300m circa.

Il rilevato di approccio sud è inoltre destinato a svolgere la funzione di area di varo dell'impalcato. A tal fine, in fase costruttiva, si rende necessaria la predisposizione di una piattaforma piana di dimensioni pari a circa 80m x 50m, con conseguente ampliamento del rilevato rispetto alla configurazione prevista in fase di esercizio, solo durante la fase di costruzione.

La realizzazione del nuovo rilevato richiede la preventiva rimozione di una porzione significativa del rilevato esistente. Tale operazione risulta necessaria al fine di predisporre un piano di posa regolare e omogeneo, opportunamente trattato e compattato, nonché superfici operative orizzontali idonee all'esecuzione degli interventi di miglioramento e consolidamento previsti.

Per i volumi di terreno derivanti dalle operazioni di scavo e per i materiali aggiuntivi necessari alla costruzione del nuovo rilevato, i quali possono essere ricavati dagli accumuli di terreno esondato nelle particelle prossime al cantiere, è previsto il ricorso al trattamento a calce, subordinatamente alla verifica di idoneità geotecnica e ambientale dei materiali, da effettuarsi sulla base delle risultanze delle prove previste nell'ambito della presente fase progettuale.

Considerando la presenza di terreni compressibili e soggetti a rischio liquefazione, è necessario utilizzare misure di consolidamento. In prossimità alle spalle, dove i rilevati hanno l'altezza maggiore, si usano pali non armati di diametro 1m e profondità 15m con maglia 4m x 4m per limitare i cedimenti di breve e lungo termine, e trasferire il carico negli strati più profondi, mitigando anche il fenomeno della liquefazione degli strati più superficiali. Inoltre, limitando i cedimenti in prossimità alle spalle, si mitiga il fenomeno di attrito negativo sulle fondazioni delle spalle.

Nella zona estesa del rilevato di varo nell'approccio sud, i pali vengono estesi fino a coprire il terreno di fondazione del nuovo tombino. In questo modo, si evitano anche cedimenti eccessivi che potrebbero altrimenti danneggiare la nuova struttura del tombino.

|                                                                                                   |                                                                                                                                               |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna                                              | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) |                     |                |              |                    |             |
| PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA                                                                                                    |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                         | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                      | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

## 2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Normativa

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

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

### 2.2 Elaborati di riferimento del DOCFAP

Si riporta di seguito l'elenco degli elaborati di riferimento della precedente fase progettuale, ovvero riferita alla documentazione DOCFAP:

5. 2347R6010P0 (Relazione geologica)
6. 2347R6011P0 (Rapporti di indagine)
7. 2347R6020P1 (Relazione geotecnica)
8. 2347R6030P0 (Relazione sismica)
9. 2347G6010P0 (Ubicazione indagini e sezione stratigrafica)

### 2.3 Elaborati di riferimento del PFTE

10. 24V25\_PF\_R\_GE\_102: "Relazione geotecnica di caratterizzazione"
11. 24V25\_PF\_R\_GE\_101: "Relazione geologica"
12. 24V25\_PF\_R\_GT\_101: "Relazione sismica"
13. 24V25\_PF\_T\_GE\_400: "Planimetria ubicazione indagini e profilo geologico"
14. 24V25\_PF\_T\_PS\_301: "Planimetria di progetto"
15. 24V25\_PF\_T\_GT\_721: "Planimetria e sezioni interventi di consolidamento dei rilevati"
16. 24V25\_PF\_R\_GT\_722: "Relazione geotecnica di calcolo del muro di sostegno in spalla SX"
17. 24V25\_PF\_R\_ST\_712: "Relazione di calcolo spalle e fondazioni"

### 2.4 Documenti di riferimento

18. Regione Emilia-Romagna, Atti amministrativi, Giunta Regionale. Servizio geologico, sismico e dei suoli, Direzione generale ambiente e difesa del suolo e della costa. DPG/2012/13201 del 2/10/2012 "Approvazione degli elaborati cartografici concernenti la delimitazione delle aree nelle quali si sono manifestati gravi effetti di liquefazione a seguito degli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012 e degli Indirizzi per interventi di consolidamenti dei terreni"

|                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna<br><br>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)<br><br>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                                                                                     | CODICE PROGETTO<br>24V25<br>LIVELLO PROG.<br>PF<br>TIPO DOC.<br>R<br>AMBITO<br>GT<br>PROGRESSIVO<br>720<br>REV.<br>r00                                                                          |

### 3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E SISMICO

Per l'inquadramento geologico e sismico di dettaglio si rimanda alla relazione geologica 24V25\_PF\_R\_GE\_101, la relazione geotecnica di caratterizzazione 24V25\_PF\_R\_GE\_102\_R00 e la relazione sismica 24V25\_PF\_R\_GT\_101.

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

Le unità geotecniche individuate sono le seguenti:

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

La stratigrafia è presentata nell'elaborato 24V25\_PF\_T\_GE\_400 "Planimetria ubicazione indagini e profilo geologico e geotecnico".

I parametri geotecnici riferiti alla sponda destra sono riassunti nella Tabella 2.

Tabella 2: Parametri geotecnici sponda destra

| Sponda destra |        |                               |             |            |            |             |            |                     |
|---------------|--------|-------------------------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|---------------------|
| Unità         | z (m)  | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $c_u$ (kPa) | $c'$ (kPa) | $\phi$ (°) | $E_0$ (MPa) | $E'$ (MPa) | k (m/s)             |
| R             | -      | 17 – 19                       | -           | 0 – 5      | 28 – 32    | 80 – 200    | 8 – 20     | $10^{-7} - 10^{-5}$ |
| SL            | <20    | 18 – 20                       | -           | 0 – 5      | 30 – 34    | 200 – 300   | 20 – 30    | $10^{-7} - 10^{-5}$ |
| SG            | -      |                               |             | 0          | 32 – 36    |             |            |                     |
| LSA           | <20    | 18 – 20                       | 70 – 170    | 10 – 20    | 22 – 26    | 200 – 300   | 20 – 30    | $10^{-9} - 10^{-7}$ |
|               | z > 20 |                               |             |            |            | 300 – 400   | 30 – 40    |                     |

I parametri geotecnici riferiti alla sponda sinistra sono riassunti nella Tabella 3.

Tabella 3: Parametri geotecnici sponda sinistra

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

|                                                                                                   |                                                                                                                                               |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna                                              | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) |                     |                |              |                    |             |
| PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA                                                                                                    |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                         | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                      | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

## 4. CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE E VERIFICA

### 4.1 Analisi di stabilità globale

#### 4.1.1 Metodologia di calcolo

Le verifiche di stabilità per le scarpate definitive sono state svolte sia in condizioni statiche che sismiche in accordo a quanto previsto da normativa vigente.

L'esame delle condizioni di stabilità è stato condotto utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite. Per la valutazione dei fattori di sicurezza alla stabilità globale si è impiegato il codice di calcolo denominato Slide2 (versione 9.0.3.7) della RocScience, in cui la ricerca delle superfici critiche viene svolta attraverso la generazione automatica di un elevato numero di superfici di potenziale scivolamento. Sono state cautelativamente considerate ipotesi di deformazione piana. In particolare, in questa sede si fa riferimento al metodo di Morgenstern & Price.

Nelle analisi sono state ovviamente tralasciate le superfici più corticali in quanto poco significative e per le quali non risulta idonea una analisi convenzionale all'equilibrio limite.

Il coefficiente di sicurezza FS a rottura lungo la superficie di scorrimento viene definito come rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie S e quella effettivamente mobilitata lungo la stessa superficie:

$$FS = \frac{\int_S \tau_{disp}}{\int_S \tau_{mob}}$$

In accordo alla normativa vigente per rilevati in materiali sciolti e fronti di scavo, le analisi di stabilità, in condizioni statiche, vengono condotte secondo la combinazione A2+M2+R2 (l'Approccio 1 - Combinazione 2).

Le verifiche in condizioni sismiche sono state condotte con riferimento allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV), con riferimento alla configurazione finale dell'opera. Per le verifiche in condizioni sismiche i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geo-tecnici sono pari all'unità.

Secondo la normativa quindi i parametri di resistenza del terreno devono essere abbattuti a mezzo dei coefficienti parziali di seguito riportati.

- $\gamma_\phi' = 1.25$  coefficiente parziale per l'angolo di resistenza al taglio
- $\gamma_c' = 1.25$  coefficiente parziale per la coesione drenata

L'analisi viene quindi condotta con i seguenti parametri geotecnici di calcolo:

$$\tan(\phi'_k) = \tan(\phi'_k) / \gamma_\phi' \quad \text{angolo di resistenza al taglio}$$

$$c'_k = c'_k / \gamma_c' \quad \text{coesione drenata}$$

Il coefficiente di sicurezza minimo per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e fronti di scavo è pari ad 1,2 in condizioni statiche e 1,1 in condizioni sismiche.

|                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                 |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna<br><br>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)<br><br>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                                                                                     | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                                                                        | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

#### 4.1.2 Falda

Per quanto concerne la quota falda, le letture disponibili alla data di stesura del presente documento indicano valori di profondità variabili. Considerando i dati disponibili, come riportato nel report di caratterizzazione geotecnica, nelle analisi si è assunto un livello di falda pari a:

- +8.6 m s.l.m. per i rilevati di Sponda Destra
- +8.2 m s.l.m. per i rilevati di Sponda Sinistra.

#### 4.1.3 Carichi stradali

Per le analisi di stabilità è stato considerato il sovraccarico accidentale per il passaggio dei mezzi di 20 kPa già fattorizzato ( $\gamma_F = 1,3$ , Tabella 5.2.V NTC 2018).

#### 4.1.4 Azioni sismiche

In generale, il metodo pseudo-statico modella l'azione sismica considerando in luogo delle azioni dinamiche azioni statiche equivalenti ovvero forze statiche orizzontali  $f_h$  e verticali  $f_v$  per unità di volume, d'intensità pari al prodotto fra il peso specifico del corpo  $\gamma$  sottoposto all'azione dinamica ed un coefficiente sismico:

- $f_h = \gamma \cdot k_h$  forza orizzontale per unità di volume
- $f_v = \gamma \cdot k_v$  forza verticale per unità di volume

dove:

- $\gamma$  = peso specifico del volume considerato.

In accordo alla normativa vigente per le analisi in esame, la componente orizzontale ( $a_h$ ) dell'accelerazione può essere legata all'accelerazione massima attraverso la seguente relazione:

$$k_h = \beta_s \cdot a_{max} / g$$

$$k_v = \pm k_h / 2$$

dove:

- $k_h$  = coefficiente sismico in direzione orizzontale;
- $k_v$  = coefficiente sismico in direzione verticale;
- $\beta_s$  = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;
- $a_{max}$  = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;
- $g$  = accelerazione di gravità.

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

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

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                         |                 |               |             |        |             |      |       |    |   |    |     |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|-------------|--------|-------------|------|-------|----|---|----|-----|-----|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div>        |                 |               |             |        |             |      |       |    |   |    |     |     |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GT</td><td>720</td><td>r00</td></tr></table> | CODICE PROGETTO | LIVELLO PROG. | TIPO DOC.   | AMBITO | PROGRESSIVO | REV. | 24V25 | PF | R | GT | 720 | r00 |
| CODICE PROGETTO                                                                                                                                                                | LIVELLO PROG.                                                                                                                                                                                                           | TIPO DOC.       | AMBITO        | PROGRESSIVO | REV.   |             |      |       |    |   |    |     |     |
| 24V25                                                                                                                                                                          | PF                                                                                                                                                                                                                      | R               | GT            | 720         | r00    |             |      |       |    |   |    |     |     |

dove:

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

Nella precedente espressione, il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito è pari a  $\beta_m = 0,38$  (§7.11.4 NTC18) nelle verifiche allo stato limite ultimo (SLV).

Per il tracciato in esame si distingue:

- o  $k_h = \beta_s \cdot a_{max} / g = 0,38 \cdot 0,339 = 0,128$
- o  $k_v = \pm k_h / 2 = \pm 0,064$

|                                                                                                   |                                                                                                                                               |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna                                              | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) |                     |                |              |                    |             |
| PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA                                                                                                    |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                         | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                      | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

## 4.2 Valutazione dei cedimenti

### 4.2.1 Criteri di valutazione dei cedimenti

Si riportano nel seguito le metodologie ed i criteri di calcolo adottati per le analisi dei cedimenti.

Il calcolo dei cedimenti dei rilevati di progetto in condizioni di esercizio sarà eseguito in corrispondenza di sezioni rappresentative di tratte in cui l'altezza massima di rilevato e la compressibilità stimata dei terreni di fondazione, delineano delle condizioni di rischio per il funzionamento della viabilità.

L'analisi dei cedimenti è stata condotta tramite il software *Settle3* (versione 5.0.2.5) della Rocscience Inc.

Il programma, per la modellazione tridimensionale dei cedimenti nei terreni dovuti a carichi esterni, si basa sui principi della teoria dell'elasticità e della consolidazione di Terzaghi, consentendo una valutazione avanzata dei cedimenti sia immediati che nel tempo.

Il software permette di modellare in modo dettagliato stratigrafie complesse, con proprietà geotecniche variabili per ciascun livello, e di applicare carichi di forma e distribuzione arbitraria. È possibile considerare effetti idrogeologici quali la presenza della falda acquifera, nonché interventi di precarico, drenaggio verticale e miglioramento del terreno, con la possibilità di simulare il comportamento tempo-dipendente del sistema.

Tramite il codice di calcolo, è stato possibile:

- Modellare tridimensionalmente i carichi applicati e la geometria del sistema;
- Calcolare i cedimenti elastici e della consolidazione primaria secondo Terzaghi;
- Effettuare analisi del cedimento nel tempo, mediante definizione dei coefficienti di consolidazione verticale e orizzontale ( $c_v$  e  $c_h$ );
- Valutare degli effetti indotti da precarichi, sistemi di drenaggio e interventi di consolidazione.

### 4.2.2 Determinazione della zona compressibile $H_c$

Viene definita convenzionalmente zona compressibile ( $H_c$ ) la profondità oltre la quale l'incremento delle tensioni verticali ( $\delta\sigma_z$ ) risulti inferiore al 10% della tensione verticale efficace litostatica ( $\sigma'_{v0}$ ) e il contributo al cedimento può essere considerato trascurabile.

### 4.2.3 Descrizione dei fenomeni

L'applicazione di un carico su un terreno genera una serie di fenomeni deformativi che portano al cedimento del piano di appoggio del carico e degli orizzonti di terreno ad esso sottostanti. Le modalità e le caratteristiche di questi cedimenti sono estremamente variabili e dipendono dalla tipologia di terreno, dalle sue caratteristiche fisico-meccaniche, dalle condizioni di drenaggio e dal tempo trascorso dall'applicazione del carico.

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                  |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div> |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <div>CODICE PROGETTO</div> <div>24V25</div>                                                                                                                                                                      | <div>LIVELLO PROG.</div> <div>PF</div> | <div>TIPO DOC.</div> <div>R</div> | <div>AMBITO</div> <div>GT</div> | <div>PROGRESSIVO</div> <div>720</div> | <div>REV.</div> <div>r00</div> |

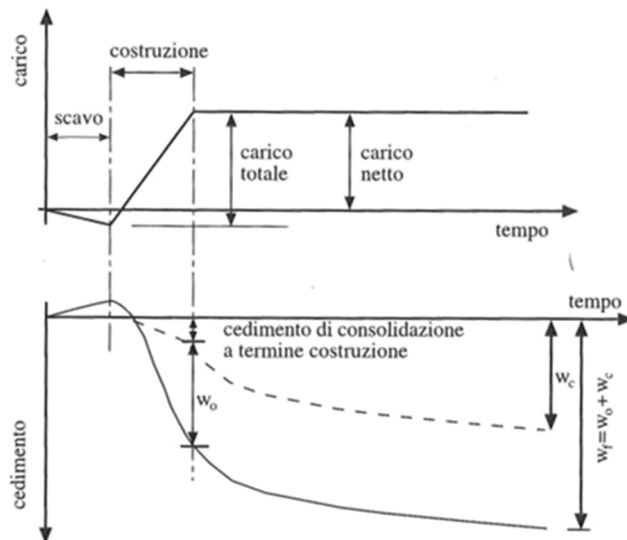


Figura 1: Decorso nel tempo del cedimento per terreni a grana fine (da Viggiani 2013)

All'atto di applicazione di un carico, il terreno si deforma istantaneamente producendo un cedimento immediato dipendente dalle caratteristiche di deformabilità del mezzo (Lancellotta 2004).

Se il terreno ha una elevata permeabilità le sovrappressioni vengono dissipate istantaneamente e il cedimento immediato diviene la componente predominante della deformazione indotta.

Al contrario, in presenza di terreni a bassa permeabilità e sufficientemente saturi, l'espulsione dell'acqua interstiziale risulta rallentata, e la deformazione si sviluppa in condizioni di volume quasi costante, ovvero in regime non drenato. Nei terreni a grana fine, l'applicazione del carico induce inizialmente un cedimento immediato, seguito dalla progressiva dissipazione delle sovrappressioni interstiziali. Questo processo genera un cedimento di consolidazione, associato al trasferimento graduale delle tensioni dalla fase fluida allo scheletro solido. Il cedimento di consolidazione rappresenta l'aliquota predominante di deformazione in terreni a grana fine e si verifica con velocità dipendenti dalle condizioni di drenaggio. In definitiva il cedimento totale (o finale) risultante dall'applicazione di un carico risulta composto da:

$$w_f = w_0 + w_c$$

in cui  $w_0$  è il cedimento immediato,  $w_c$  è il cedimento di consolidazione primaria.

|                                                                                                   |                                                                                                                                               |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna                                              | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) |                     |                |              |                    |             |
| PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA                                                                                                    |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                         | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                      | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

#### 4.2.3.1 Valutazione teorica dei vari tipi di cedimento

##### Cedimento immediato

Con riferimento alla teoria dell'elasticità il cedimento immediato in argille viene stimato con la seguente espressione:

$$s_i = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta\sigma_z - \nu_u \cdot (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)) \cdot h_i}{E_{ui}}$$

essendo:

$s_i$  = cedimento immediato

$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$  = tensioni indotte dal carico

$h_i$  = altezza dello strato i-esimo

$n$  = numero di strati in cui è suddivisa la zona compressibile ( $H_c$ )

$E_{ui}$  = modulo di deformazione non drenato dello strato i-esimo

$\nu_u$  = rapporto di Poisson = 0,5

##### Cedimento totale (immediato e di consolidazione primaria)

Con riferimento alla teoria dell'elasticità il cedimento immediato e di consolidazione primaria nei terreni coesivi viene stimato con la seguente espressione:

$$s_t = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta\sigma_z - \nu \cdot (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)) \cdot h_i}{E_i'}$$

essendo:

$s_t$  = cedimento immediato e di consolidazione primaria

$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$  = tensioni indotte dal carico

$h_i$  = altezza dello strato i-esimo

$n$  = numero di strati in cui è suddivisa la zona compressibile ( $H_c$ )

$E_i'$  = modulo di deformazione elastico drenato dello strato i-esimo

$\nu$  = rapporto di Poisson = 0,3

Per definizione il cedimento di consolidazione primaria è dato dalla differenza tra  $s_t$  e  $s_i$ .

|                                                                                                   |                                                                                                                                               |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna                                              | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) |                     |                |              |                    |             |
| PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA                                                                                                    |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                         | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                      | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

#### 4.2.4 Procedura di calcolo

L'analisi dei cedimenti dei rilevati è stata svolta in accordo alle metodologie di calcolo precedentemente esposte. Sono stati valutati i cedimenti istantanei e di consolidazione primaria, oltre al loro andamento nel tempo, in funzione delle caratteristiche dei terreni che costituiscono il sottosuolo. Il modello geotecnico di sottosuolo assunto nei calcoli è stato definito a partire dalla caratterizzazione generale, specializzando i valori di compressibilità (e/o rigidità) in base ai dati ottenuti dalle prove edometriche, in accordo a quanto esposto nella relazione di caratterizzazione geotecnica.

Il calcolo dei cedimenti differiti nel tempo deve essere effettuato tenendo conto solo dei carichi e sovraccarichi permanenti e, in base alle caratteristiche dei terreni di fondazione dei rilevati, in fase di progettazione va definito il programma di costruzione dei rilevati stessi in modo che gli assestamenti residui, a far data dal completamento del piano di posa, siano non superiori al 10% dei cedimenti teorici totali e siano comunque inferiori a 5 cm (valore imposto come limite tecnologico dell'infrastruttura, essendo un'aliquota non compensabile prima della posa in opera dell'armamento).

#### 4.2.5 Scelta dei parametri di calcolo

Come per le analisi di stabilità, anche in questo tipo di analisi si è assunto un livello di falda pari a circa 8m da p.c.

Per le unità "Limo argilloso ed argilla limosa" e "Limo sabbioso" si è ritenuto opportuno calibrare i parametri di deformabilità dell'unità sulla base dei risultati delle prove geofisiche disponibili. Nel dettaglio, a partire dalla caratterizzazione proposta nella presente relazione geotecnica, è possibile assumere i seguenti parametri:

- Modulo edometrico:  $E_{Ed} = \frac{(1-\nu) E}{(1+\nu) (1-\nu)}$
- Coefficiente di compressibilità volumetrica:  $m_v = \frac{1}{E_{Ed}}$
- Coefficiente di permeabilità:  $K=10^{-6}$  cm/s

Nella tabella seguente sono riportati per completezza tutti i parametri utilizzati nelle analisi:

|                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                 |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna<br><br>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)<br><br>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                                                                                     | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                                                                        | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

Tabella 4: Parametri geotecnici utilizzati nelle analisi

| PARAMETRI TERRENI                  |                               | Unità Limo argilloso<br>ed argilla limosa_1 | Unità Limo argilloso<br>ed argilla limosa_2 | Unità<br>Limo<br>sabbioso |
|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------|
| Proprietà<br>fisico-<br>meccaniche | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 19                                          |                                             |                           |
|                                    | $k_0$ (-)                     | 0,59                                        | 0,56                                        | 0,59                      |
|                                    | K (cm/s)                      | 1E-06                                       | 1E-06                                       | 1E-06                     |
| Resistenza<br>(Criterio MC)        | $c'$ (kPa)                    | 15                                          | 20                                          | 15                        |
|                                    | $\phi'$ (°)                   | 24                                          | 24                                          | 24                        |
|                                    | Su (kPa)                      | 120                                         | 170                                         | 120                       |
| Deformabilità                      | E <sub>u</sub> (MPa)          | 84                                          | 119                                         | 84                        |
|                                    | E <sub>Ed</sub> (MPa)         | 333                                         | 444                                         | 389                       |
|                                    | $m_v$ (m <sup>2</sup> /kN)    | 3,00E-05                                    | 2,25E-05                                    | 2,57E-05                  |
| PARAMETRI TERRENI                  |                               | Rilevato esistente                          | Sabbia e Sabbia<br>limosa                   | Sabbia e<br>Ghiaia        |
| Proprietà<br>fisico-<br>meccaniche | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 18                                          | 19                                          | 19                        |
|                                    | $k_0$ (-)                     | 0,50                                        | 0,47                                        | 0,44                      |
|                                    | K (cm/s)                      | -                                           | -                                           | -                         |
| Resistenza<br>(Criterio MC)        | $c'$ (kPa)                    | 3                                           | 3                                           | 0                         |
|                                    | $\phi'$ (°)                   | 30                                          | 32                                          | 34                        |
|                                    | Su (kPa)                      | -                                           | -                                           | -                         |
| Deformabilità                      | E'(MPa)                       | 15                                          | 25                                          | 30                        |
|                                    | E <sub>Ed</sub> (MPa)         | -                                           | -                                           | -                         |
|                                    | $m_v$ (m <sup>2</sup> /kN)    | -                                           | -                                           | -                         |

|                                                                                                   |                                                                                                                                               |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna                                              | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) |                     |                |              |                    |             |
| PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA                                                                                                    |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                         | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                      | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

## 5. INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO

L'analisi delle opere, in relazione alla medio-bassa deformabilità delle unità intercettate e alle complesse fasi realizzative tra loro interferenti, ha richiesto la progettazione di specifici interventi di consolidamento dei terreni al fine di avere cedimenti compatibili con la funzionalità delle opere stesse e con i requisiti richiesti.

Vista la suscettibilità del terreno alla liquefazione e la bassa permeabilità degli strati limosi/argillosi che può comportare tempi di consolidazione molto lunghi, risulta necessario prevedere misure di mitigazione di entrambi gli effetti. Il consolidamento sarà effettuato tramite pali in ghiaia di diametro 350mm.

### 5.1 Mitigazione della liquefazione mediante pali in ghiaia

L'installazione dei dreni facilita lo smaltimento delle sovrappressioni interstiziali durante l'evento sismico. Nel seguito viene presentato il dimensionamento dei medesimi.

Facendo riferimento alla relazione sismica 24V25PFRGT101, il valore della magnitudo assunta è  $M_w=5.8$ .

Facendo riferimento alla relazione geotecnica 24V25PFRGE102 il valore della permeabilità considerato per gli strati SL e SG è la seguente  $10^{-7} - 10^{-5}$ . In questa fase della progettazione si tiene in considerazione il range di permeabilità più alta di  $10^{-5}$  che è più compatibile con il carattere granulare di uno strato liquefacibile. Per la permeabilità orizzontale, che è il fattore determinante nel dimensionamento del sistema di drenaggio, si tiene in considerazione un valore più alto di 10, ovvero  $10^{-4}$ .

La compressibilità volumetrica  $m_v$  è calcolata considerando l'inverso del modulo edometrico.

Il numero di cicli associato a una magnitudo di 5.8 è calcolato in accordo con il grafico seguente, secondo il quale si sceglie un valore di  $N_{eq}$  pari a 5.

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                  |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div> |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <div>CODICE PROGETTO</div> <div>24V25</div>                                                                                                                                                                      | <div>LIVELLO PROG.</div> <div>PF</div> | <div>TIPO DOC.</div> <div>R</div> | <div>AMBITO</div> <div>GT</div> | <div>PROGRESSIVO</div> <div>720</div> | <div>REV.</div> <div>r00</div> |

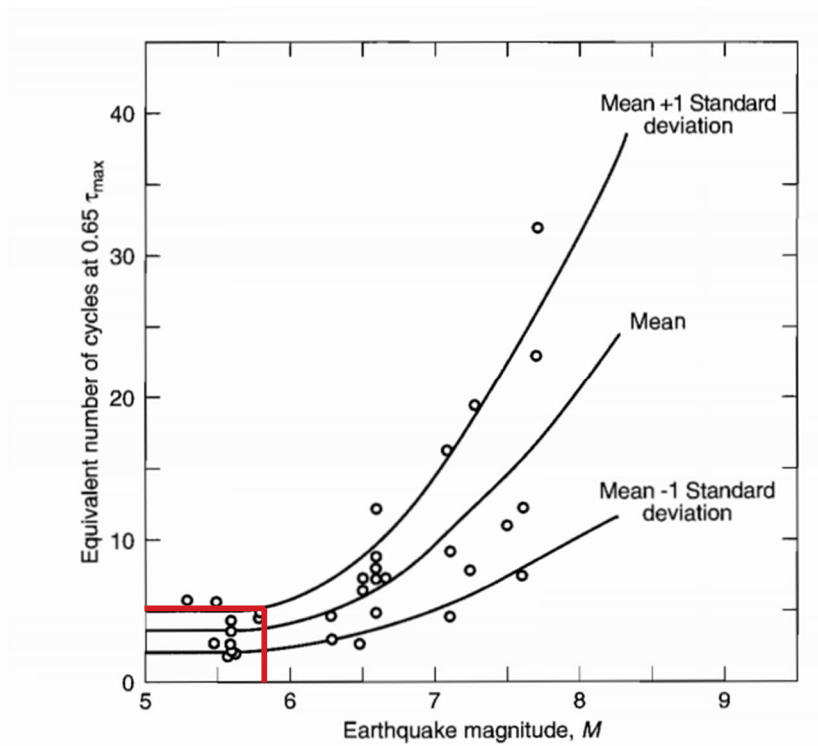


Figura 2: Numero di cicli di riferimento,  $N_{eq}$  (Seed, H.B., Mori, K., Chan, C.K. 1975. Influence of seismic history on the liquefaction characteristics of sands" Report EERC 75-25, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley).

La durata dell'evento sismico è definita con il grafico seguente.

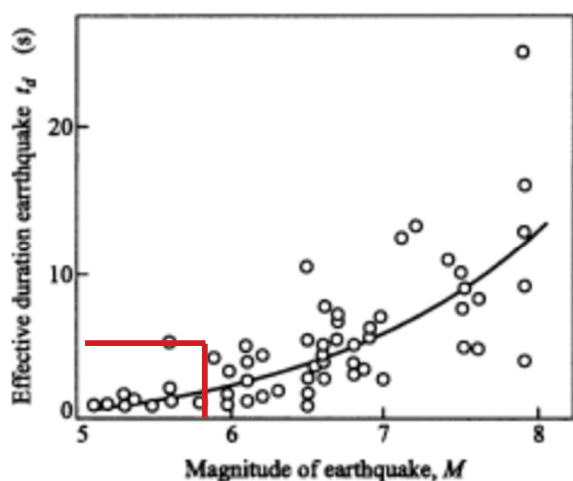


Figure 8.9. Relationship between magnitude of earthquake and duration [19].

Figura 3: Durata effettiva  $t_d$  (Tokimatsu, K. & Yoshimi, Y 1980. Effects of Vertical Drains on the Bearing Capacity of Saturated Sand during Earthquakes, Proc. International Conference on Engineering for Protection from Natural Disasters, pp. 643-655.).

Da cui è scelto cautelativamente un valore di  $t_d$  (durata) pari a 8 sec.

|                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna<br><br>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)<br><br>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                                                                                     | CODICE PROGETTO<br>24V25<br>LIVELLO PROG.<br>PF<br>TIPO DOC.<br>R<br>AMBITO<br>GT<br>PROGRESSIVO<br>720<br>REV.<br>r00                                                                          |

Il valore del massimo rapporto di sovrappressione interstiziale dipende da "PL", il potenziale di liquefazione.

$$r_g = -0,01 \cdot PL + 0,55 \text{ per } PL < 15$$

$$r_g = 0,4 \text{ per } PL > 15.$$

Il potenziale di liquefazione è stato calcolato in accordo a Iwasaki, 1978 nella relazione sismica 24V25PFRGT101.

- 5,52 per la spalla destra (30.55 con la prova MASW)
- 6,58 per la spalla sinistra

Si ricavano i valori di 0,495 e 0,484 rispettivamente, arrotondando a un quindi un valore di  $r_g$  pari a 0,48.

Di seguito si ricava il valore  $T_{AD}$  di Seede e Booker con la formula

$$T_{AD} = \frac{k_h}{\gamma_w} \left[ \frac{t_d}{m_v(\alpha^2)} \right]$$

| strato              |                    | Rilevato<br>esistente | SL          |             |
|---------------------|--------------------|-----------------------|-------------|-------------|
| $k_h$ , orizzontale | m/s                | 1.00E-04              | 1.00E-04    | 1.00E-04    |
| $m_v$               | m <sup>2</sup> /kN | 6.00000E-05           | 3.60000E-05 | 3.00000E-05 |
|                     |                    |                       |             |             |
| N (n. cicli)        |                    | 5                     | 5           | 5           |
| M (magnitudo)       |                    | 5,8                   | 5,8         | 5,8         |
| $t_d$ (durata)      | sec                | 8                     | 8           | 8           |
| $r_g$               |                    | 0,48                  | 0,48        | 0,48        |
|                     |                    |                       |             |             |
| $T_{AD}$            |                    | 11,1                  | 18,5        | 22,2        |

Utilizzando i grafici di Seed & Booker modificati da Bouckovalas (2009), per  $N / N_{eq}$ :

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                  |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div> |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <div>CODICE PROGETTO</div> <div>24V25</div>                                                                                                                                                                      | <div>LIVELLO PROG.</div> <div>PF</div> | <div>TIPO DOC.</div> <div>R</div> | <div>AMBITO</div> <div>GT</div> | <div>PROGRESSIVO</div> <div>720</div> | <div>REV.</div> <div>r00</div> |

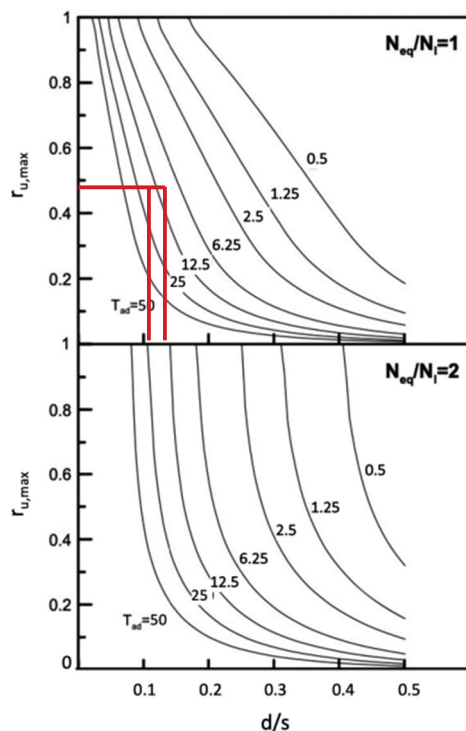


Fig. 26 – Design charts for improvement of liquefiable sites using infinitely permeable drains (modified after BOUCKOVALAS *et al.*, 2009).

Fig. 26 – Abachi di progetto per il consolidamento di siti liquefacibili usando dreni infinitamente permeabili (modificato da BOUCKOVALAS *et al.*, 2009).

Il rapporto  $d/s$  (diametro del dreno rapportato all'interasse dei pali) risulta dell'ordine di 0,1-0,15. Considerando un diametro di 350mm, l'interasse corrispondente è pari a circa 2,3m. In questa fase progettuale si sceglie un interasse di 2x2m.

## 5.2 Consolidamento dei terreni mediante pali non armati CLS 25/30

L'adozione di consolidamenti, mediante l'utilizzo di pali non armati, è stata determinata proprio dalla necessità di avere un decorso dei cedimenti nel tempo compatibili con i tempi realizzativi, oltre a mitigare gli effetti di interazione tra infrastrutture adiacenti.

A partire dalle indagini geotecniche disponibili, e dalle ricostruzioni stratigrafiche longitudinali, la lunghezza dei pali è stata definita in modo tale che questi raggiungano sempre la profondità del terreno più consistente. In tal modo l'intervento avrà il doppio effetto benefico di migliorare le caratteristiche meccaniche del terreno superficiale e di trasferire i carichi delle nuove costruzioni agli strati più profondi.

Il layout della soluzione, in termini di diametro e interasse, è stato progettato per avere un cedimento residuo al termine costruzione compatibile con la funzionalità delle opere.

Il layout studiato è il seguente:

- Maglia a quinconce 4x4 m per pali  $\phi 1000$  di lunghezza 15m;

|                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                 |                     |                |              |                    |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna<br>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)<br><br>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                                                                                 | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                                                                        | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

Di seguito si riporta il dettaglio della maglia adottata.

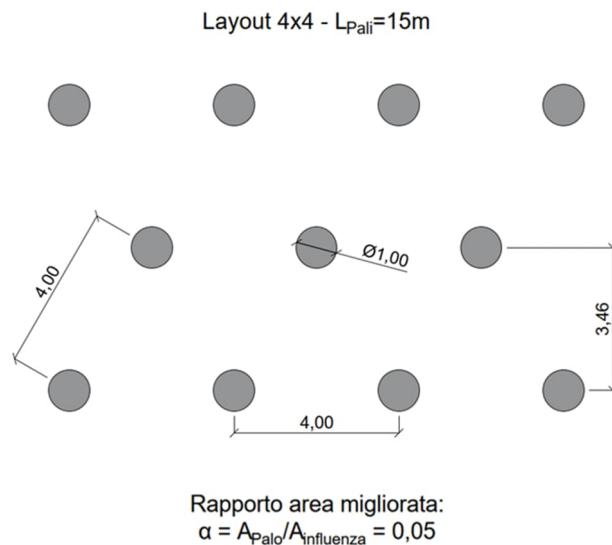


Figura 4: Layout di progetto maglia 4x4 dei pali di consolidamento

I pali verranno realizzati mediante calcestruzzo tipo C25/30 e non sarà prevista alcun tipo di armatura, per ogni ulteriore dettaglio si rimanda agli elaborati grafici degli interventi in oggetto.

La seguente tabella riporta in sintesi le caratteristiche dell'intervento; la sezione tipo corrisponde al rilevato di altezza massima.

Tabella 5: Caratteristiche intervento consolidamento mediante pali in CLS non armato

|              | $i_{pali}$ | $\phi_{pali}$ | $L_{pali}$ |
|--------------|------------|---------------|------------|
| SEZIONE TIPO | [m]        | [m]           | [m]        |
| 29           | 4,0        | 1,0           | 15,0       |

### 5.2.1 Caratteristiche modellazione intervento

Considerando il layout riportato in Figura 4, in prima approssimazione, si definisce uno strato di terreno equivalente il cui modulo elastico e peso proprio vengono calcolati secondo la seguente procedura:

#### Layout di progetto maglia a quinconce 4x4

Nel caso della maglia 4x4, essendo l'area di base del palo il 5% dell'area totale di influenza, la restante area pari al 95% dell'area totale di influenza è costituita da terreno.

È possibile quindi affermare che:

$$E_{eq} = 0,95 \cdot E_{terreno} + 0,05 \cdot E_{CLS}$$

$$\gamma_{eq} = 0,95 \cdot \gamma_{terreno} + 0,05 \cdot \gamma_{CLS}$$

Ne derivano i seguenti valori, utilizzati nella modellazione dello strato equivalente:

Tabella 6: Parametri modellazione dello Strato equivalente - Layout maglia 4x4

|                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna<br><br>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)<br><br>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                                                                                     | CODICE PROGETTO<br>24V25 LIVELLO PROG.<br>PF TIPO DOC.<br>R AMBITO<br>GT PROGRESSIVO<br>720 REV.<br>r00                                                                                         |

| PARAMETRI TERRENI                  |                               | Rilevato esistente | Sabbia e Sabbia<br>limosa | Sabbia e<br>Ghiaia |
|------------------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|
| Proprietà<br>fisico-<br>meccaniche | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 18,35              | 19,3                      | 19,3               |
|                                    | $k_0$ (-)                     | 1,00               | 1,00                      | 1,00               |
|                                    | K (cm/s)                      | -                  | -                         | -                  |
| Deformabilità                      | E' (MPa)                      | 1589               | 1599                      | 1604               |
|                                    | E <sub>Ed</sub> (MPa)         | -                  | -                         | -                  |
|                                    | $m_v$ (m <sup>2</sup> /kN)    | -                  | -                         | -                  |

|                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                 |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna<br><br>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)<br><br>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                                                                                     | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                                                                        | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

6. VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE

6.1 Sezioni di calcolo

I rilevati di nuova realizzazione presentano altezze fino ad un massimo di circa 13m e si sviluppano su terreni con alternanze di limi e sabbie. In prossimità della spalla di sponda destra (approccio Sud), lato in cui sarà effettuato il varo del ponte, è inoltre previsto un rilevato provvisorio ampio 50 metri; mentre in prossimità della spalla di sponda sinistra (approccio Nord) è previsto un tratto di rilevato confinato mediante opere di sostegno.

Le scarpate presentano una pendenza 2 (verticale) / 3 (orizzontale).

Sono di seguito illustrate le sezioni tipo individuate per l’analisi dei rilevati per la sponda destra e per la sponda sinistra:

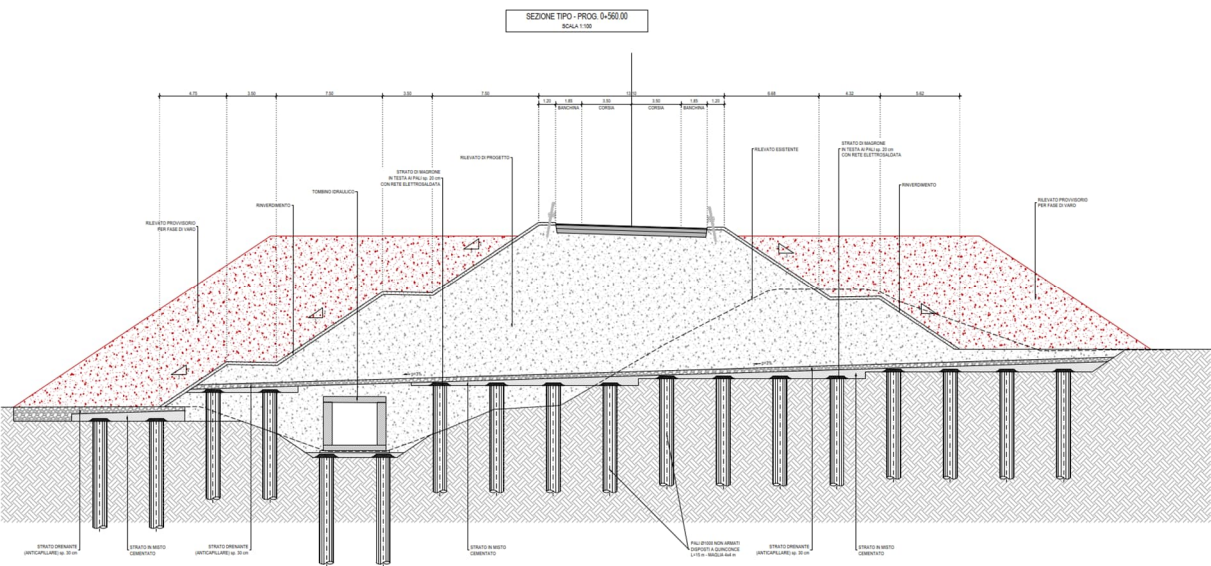


Figura 5: Sezione tipo approccio sud alla pk. 0+560 (in rosso il rilevato provvisorio di varo)

|                                                                                                   |                                                                                                                                               |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna                                              | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) |                     |                |              |                    |             |
| PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA                                                                                                    |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                         | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                      | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

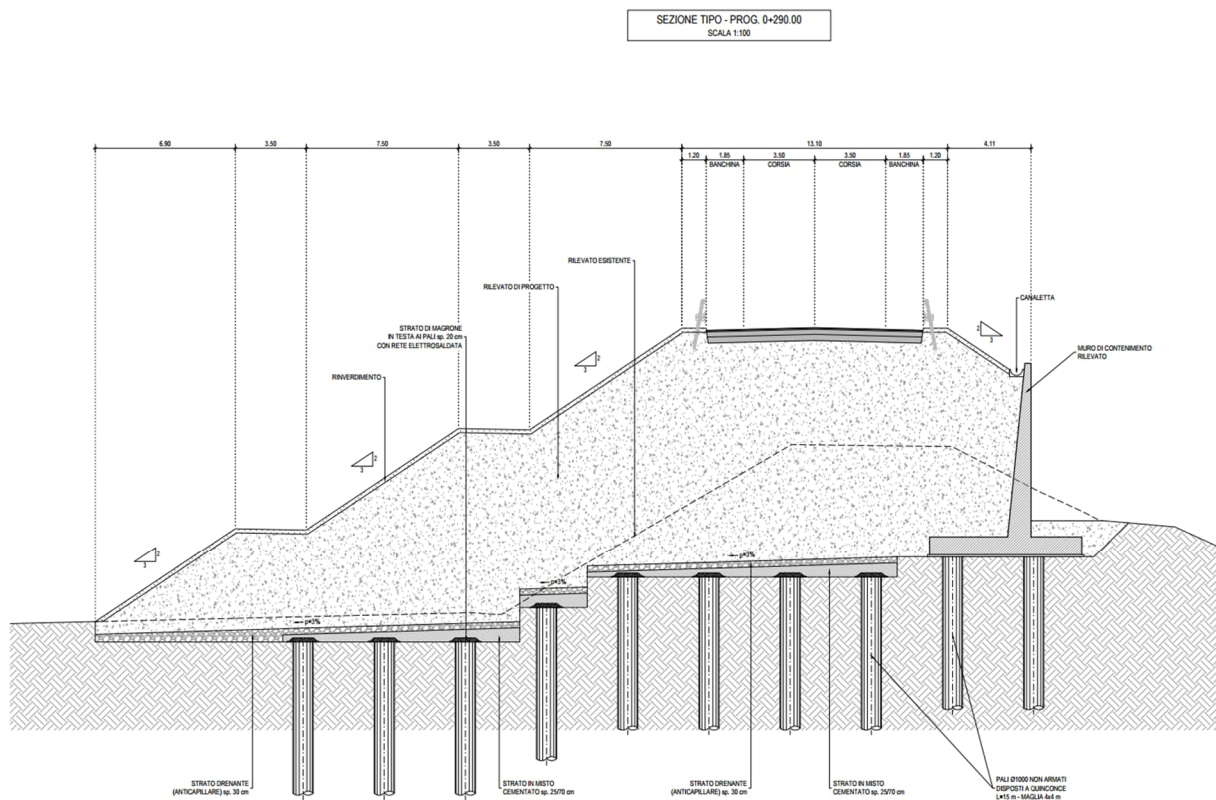


Figura 6: Sezione tipo approccio nord ala pk 0+290

In questo documento verranno analizzate le due sezioni tipo relative all'approccio Sud:

- Sez. 29a: Nuovo rilevato definitivo
- Sez. 29b: Rilevato provvisorio di varo

La sezione tipo relativa all'approccio Nord risulta paragonabile, per geometrie e per terreni indagati, alla Sez.29a e la verifica dei cedimenti del muro è stata presentata nel documento di riferimento [16], a cui si rimanda per ogni ulteriore dettaglio.

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                  |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div> |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <div>CODICE PROGETTO</div> <div>24V25</div>                                                                                                                                                                      | <div>LIVELLO PROG.</div> <div>PF</div> | <div>TIPO DOC.</div> <div>R</div> | <div>AMBITO</div> <div>GT</div> | <div>PROGRESSIVO</div> <div>720</div> | <div>REV.</div> <div>r00</div> |

## 6.2 Risultati verifica sez. 29a Sponda Destra – approccio Sud

Per la sponda destra l'analisi di stabilità è stata condotta cautelativamente per la sezione con altezza maggiore:

**Sez. 29a –  $H = 13,0m$**

La figura seguente mostra la sezione di calcolo modellata:

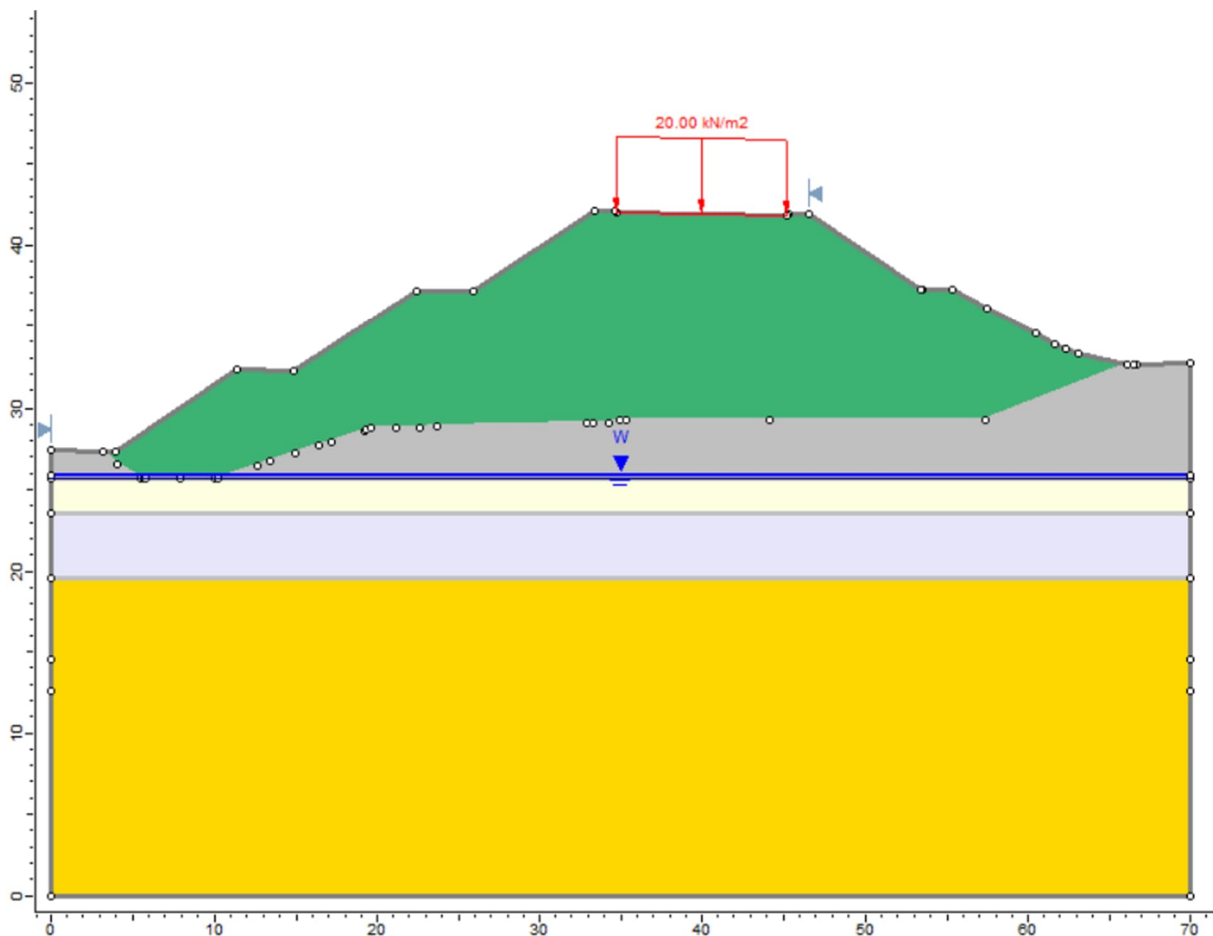


Figura 7: Sezione 29 modellata

I parametri geotecnici adottati sono riportati nella seguente tabella:

Tabella 7: Parametri geotecnici stabilità globale

| PARAMETRI TERRENI           |                               | R  | SL | SG | LSA | R stab. a calce |
|-----------------------------|-------------------------------|----|----|----|-----|-----------------|
| Proprietà fisico-meccaniche | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 18 | 19 | 19 | 19  | 19              |
| Resistenza<br>(Criterio MC) | $c'$ (kPa)                    | 3  | 3  | 0  | 15  | 20              |
|                             | $\phi'$ (°)                   | 30 | 32 | 34 | 24  | 30              |

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                  |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div> |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <div>CODICE PROGETTO</div> <div>24V25</div>                                                                                                                                                                      | <div>LIVELLO PROG.</div> <div>PF</div> | <div>TIPO DOC.</div> <div>R</div> | <div>AMBITO</div> <div>GT</div> | <div>PROGRESSIVO</div> <div>720</div> | <div>REV.</div> <div>r00</div> |

Nelle seguenti figure sono mostrati i risultati delle verifiche di stabilità del rilevato con altezza maggiore, sia in condizioni statiche che in condizioni sismiche.

I fattori di sicurezza minimi ottenuti dalle verifiche sono sempre maggiori di quanto previsto da normativa ( $FS_{SLU} > 1,2$  e  $FS_{SLV} > 1,1$ ); di conseguenza le verifiche di stabilità sono sempre soddisfatte.

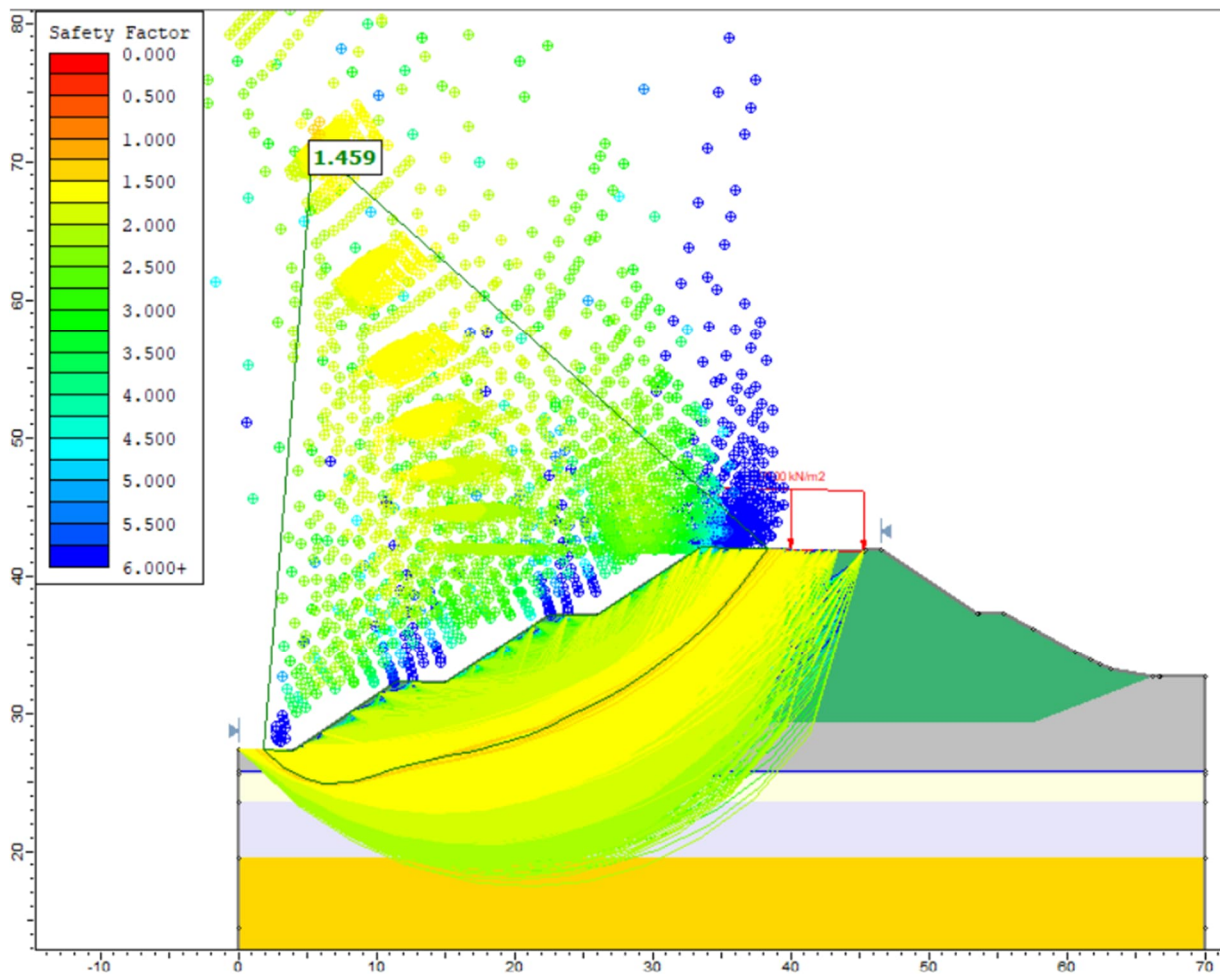


Figura 8: Analisi statica – Sponda DX – Lato monte -  $FS=1,459$

|                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                 |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna<br><br>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)<br><br>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                                                                                     | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                                                                        | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

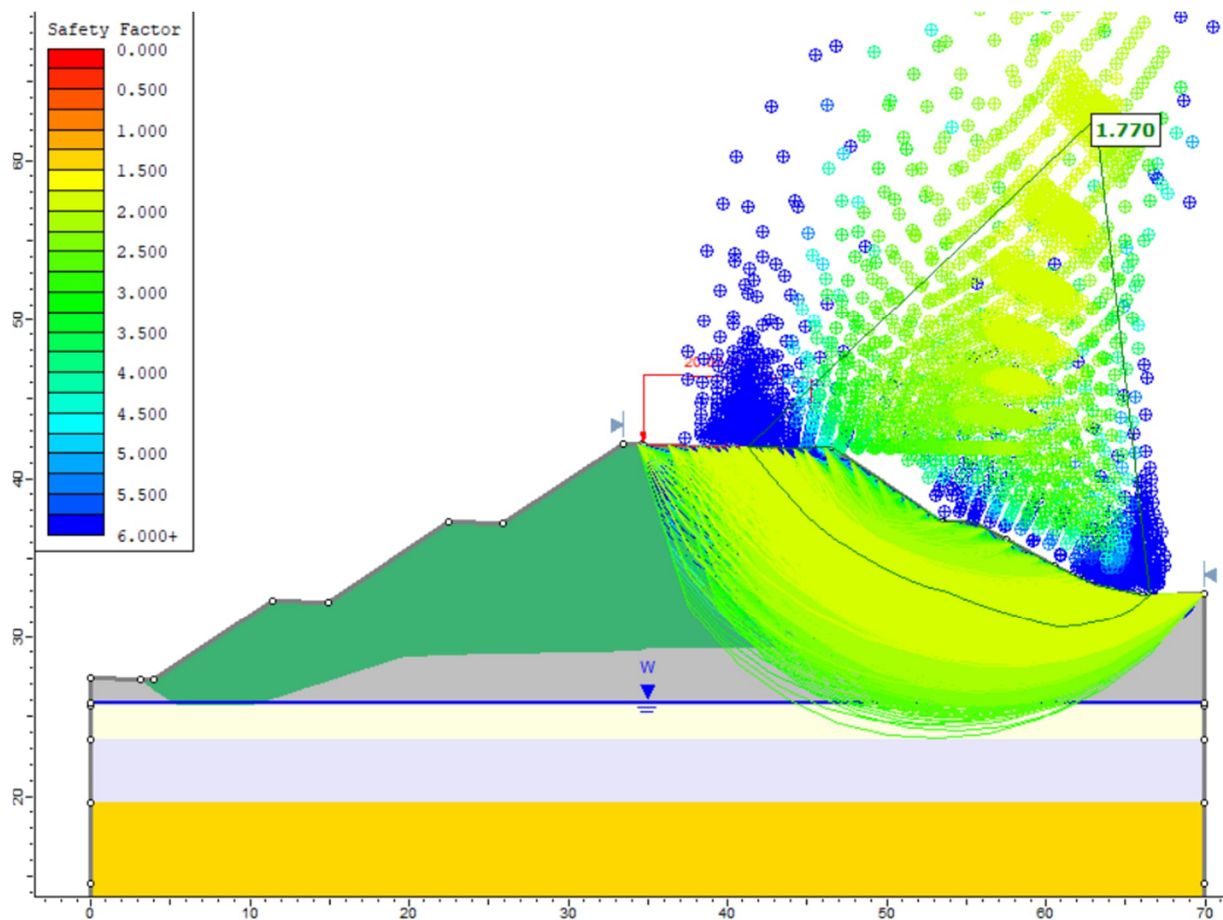


Figura 9: Analisi statica – Sponda DX – Lato valle - FS=1,770

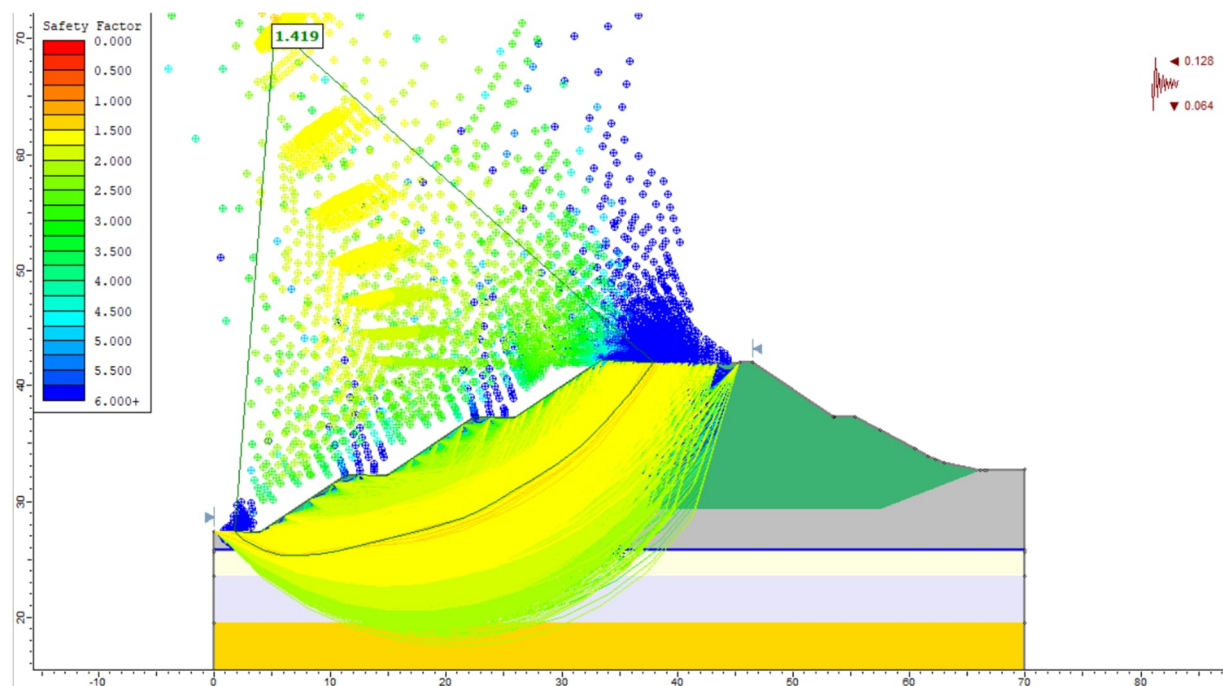


Figura 10: Analisi sismica (+kv) – Sponda DX – Lato monte - FS=1,419

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                  |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div> |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <div>CODICE PROGETTO</div> <div>24V25</div>                                                                                                                                                                      | <div>LIVELLO PROG.</div> <div>PF</div> | <div>TIPO DOC.</div> <div>R</div> | <div>AMBITO</div> <div>GT</div> | <div>PROGRESSIVO</div> <div>720</div> | <div>REV.</div> <div>r00</div> |

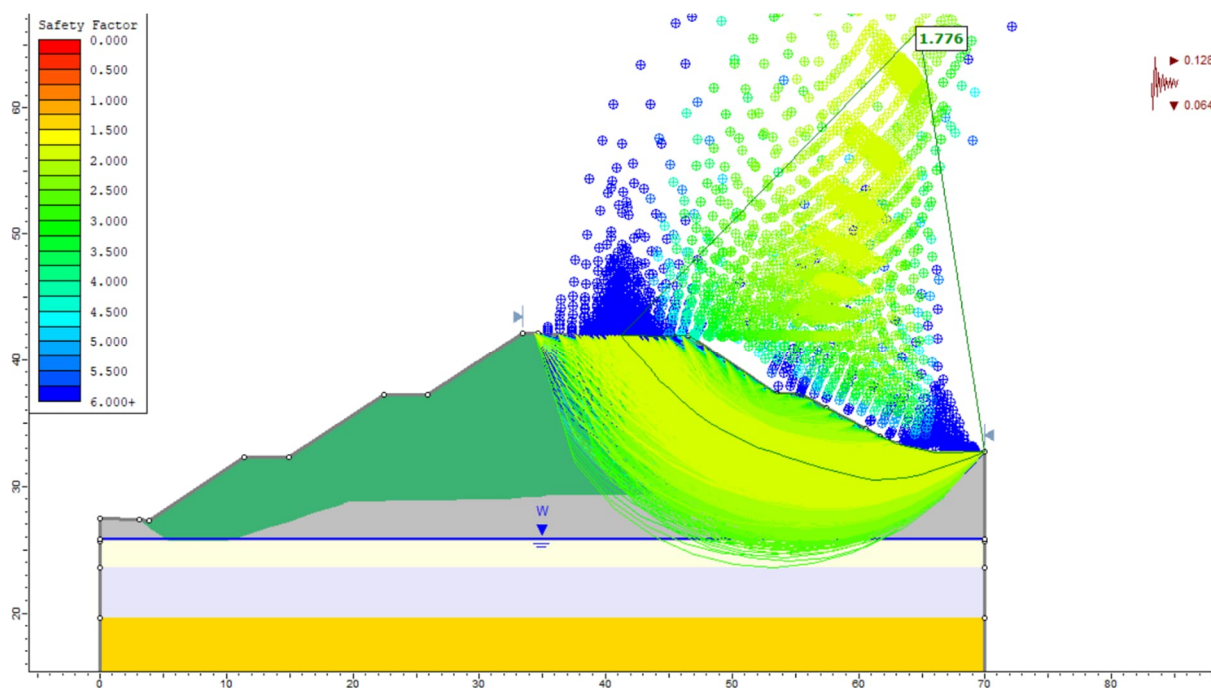


Figura 11: Analisi sismica (+kv) – Sponda DX – Lato valle - FS=1,776

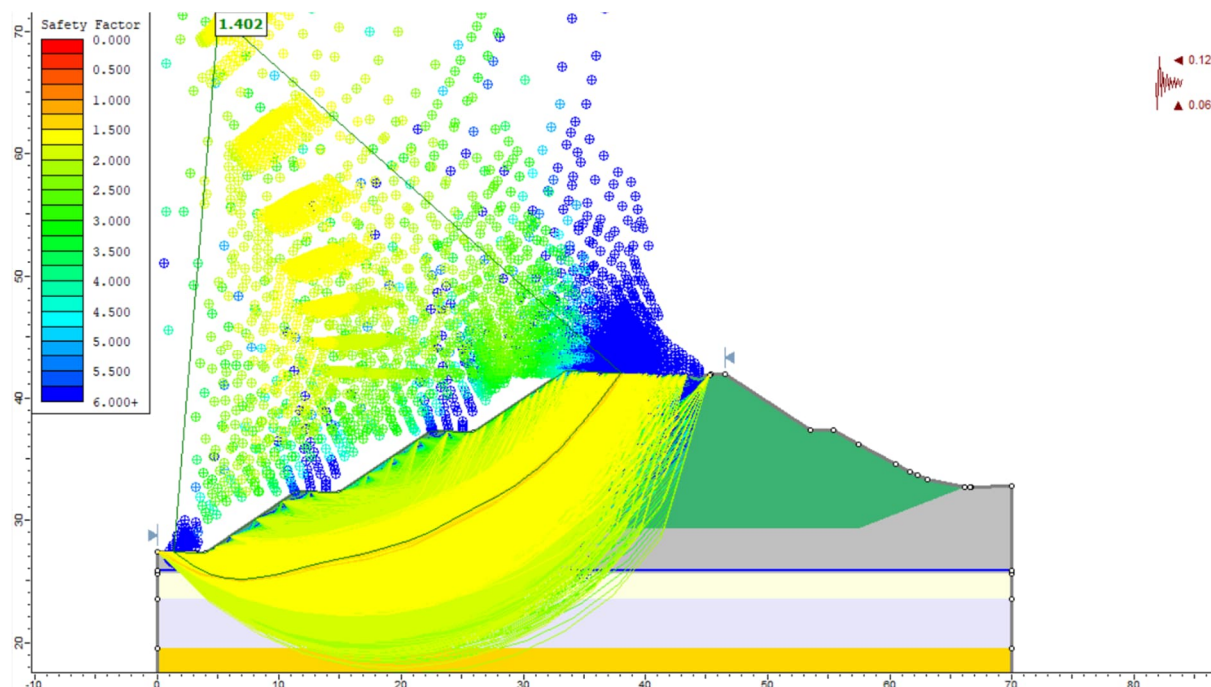


Figura 12: Analisi sismica (-kv) – Sponda DX – Lato monte - FS=1,402

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                  |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div> |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <div>CODICE PROGETTO</div> <div>24V25</div>                                                                                                                                                                      | <div>LIVELLO PROG.</div> <div>PF</div> | <div>TIPO DOC.</div> <div>R</div> | <div>AMBITO</div> <div>GT</div> | <div>PROGRESSIVO</div> <div>720</div> | <div>REV.</div> <div>r00</div> |

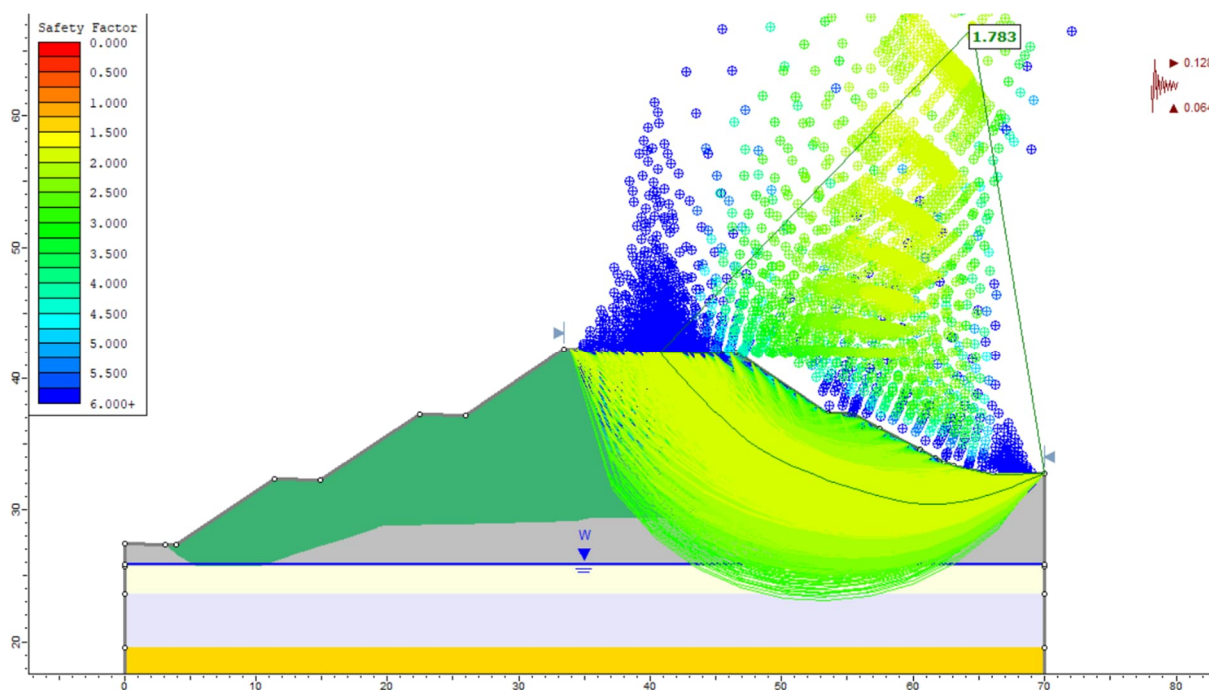


Figura 13: Analisi sismica (-kv) – Sponda DX – Lato valle - FS=1,783

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                  |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div> |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <div>CODICE PROGETTO</div> <div>24V25</div>                                                                                                                                                                      | <div>LIVELLO PROG.</div> <div>PF</div> | <div>TIPO DOC.</div> <div>R</div> | <div>AMBITO</div> <div>GT</div> | <div>PROGRESSIVO</div> <div>720</div> | <div>REV.</div> <div>r00</div> |

## 6.1 Risultati verifica sez. 29b Sponda Destra – approccio Sud

L'analisi di stabilità è stata condotta cautelativamente per la sezione con altezza maggiore:

**Sez. 29b –  $H = 13,0m$**

La figura seguente mostra la sezione di calcolo modellata:

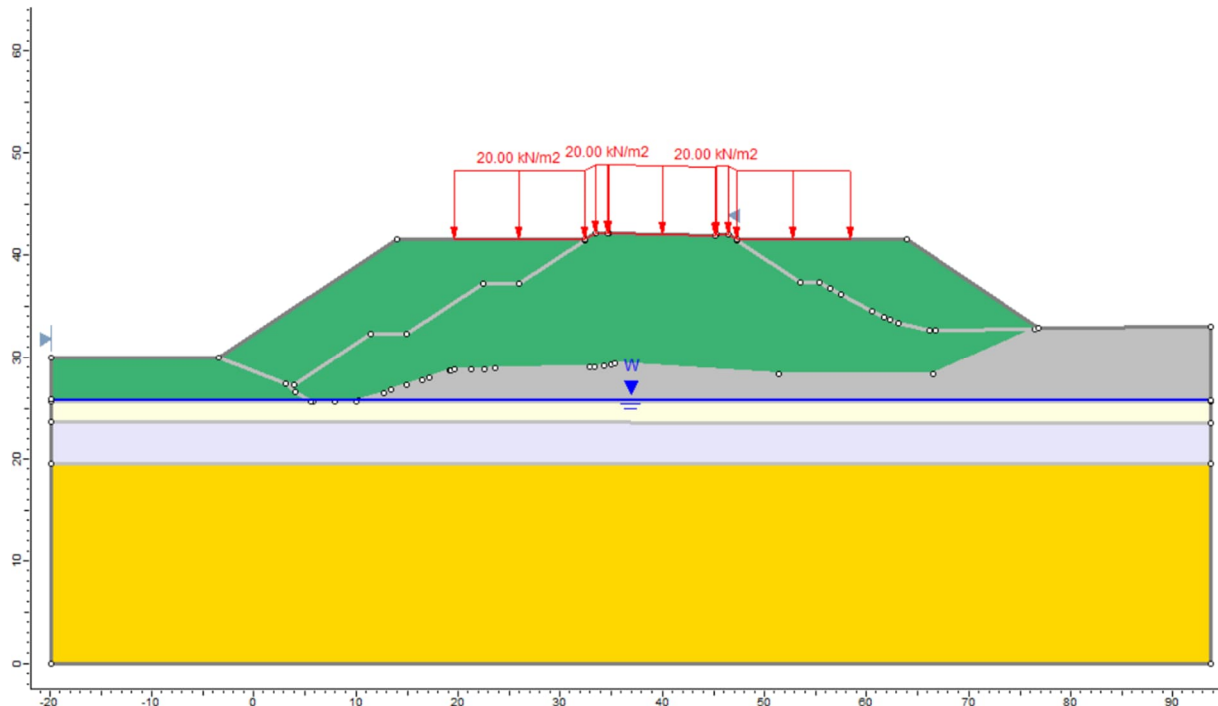


Figura 14: Sezione di varo modellata

I parametri geotecnici adottati sono riportati nella seguente tabella:

Tabella 8: Parametri geotecnici stabilità globale

| PARAMETRI TERRENI           |                  | R  | SL | SG | LSA | R stab. a calce |
|-----------------------------|------------------|----|----|----|-----|-----------------|
| Proprietà fisico-meccaniche | $\gamma$ (kN/m³) | 18 | 19 | 19 | 19  | 19              |
| Resistenza<br>(Criterio MC) | $c'$ (kPa)       | 3  | 3  | 0  | 15  | 20              |
|                             | $\phi'$ (°)      | 30 | 32 | 34 | 24  | 30              |

Nelle seguenti figure sono mostrati i risultati delle verifiche di stabilità del rilevato con altezza maggiore in condizioni statiche. Essendo un rilevato provvisorio è possibile escludere le analisi allo SLV.

I fattori di sicurezza minimi ottenuti dalle verifiche sono sempre maggiori di quanto previsto da normativa ( $FS_{SLU} > 1,2$ ); di conseguenza le verifiche di stabilità sono sempre soddisfatte.

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                  |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div> |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <div>CODICE PROGETTO</div> <div>24V25</div>                                                                                                                                                                      | <div>LIVELLO PROG.</div> <div>PF</div> | <div>TIPO DOC.</div> <div>R</div> | <div>AMBITO</div> <div>GT</div> | <div>PROGRESSIVO</div> <div>720</div> | <div>REV.</div> <div>r00</div> |

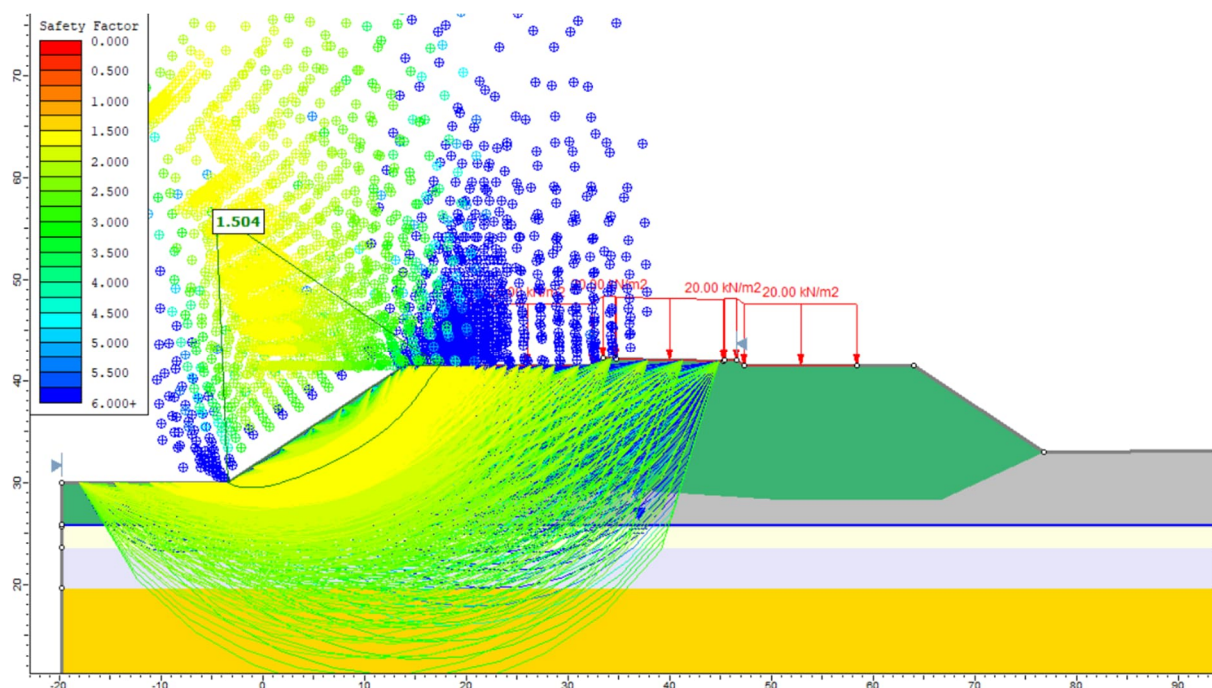


Figura 15: Analisi statica – Sponda DX – Rilevato di varo – Lato monte - FS=1,504

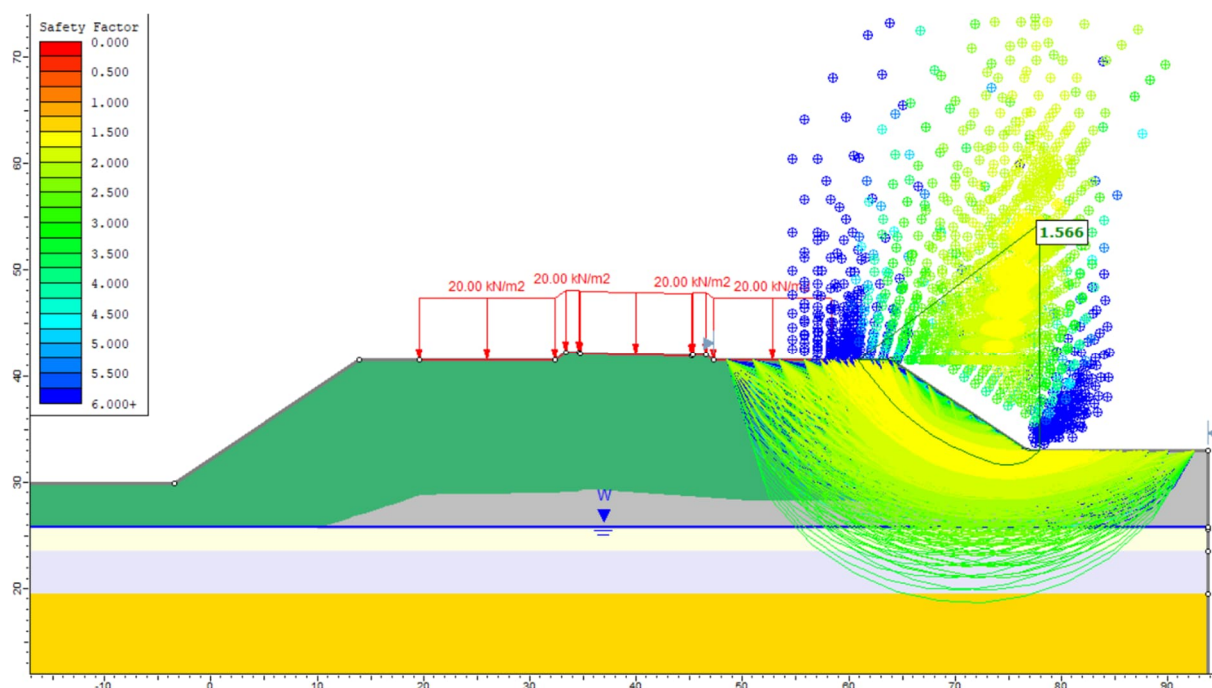


Figura 16: Analisi statica – Sponda DX – Rilevato di varo – Lato valle - FS=1,566

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                  |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div> |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <div>CODICE PROGETTO</div> <div>24V25</div>                                                                                                                                                                      | <div>LIVELLO PROG.</div> <div>PF</div> | <div>TIPO DOC.</div> <div>R</div> | <div>AMBITO</div> <div>GT</div> | <div>PROGRESSIVO</div> <div>720</div> | <div>REV.</div> <div>r00</div> |

## 7. VERIFICA DEI CEDIMENTI

L'analisi dei cedimenti è stata svolta per le sezioni ritenute più gravose in termini di sviluppo dei cedimenti, in relazione ad altezza massima del rilevato ed alle caratteristiche del terreno riportate in Tabella 4.

In Figura 17 sono illustrati i parametri inseriti nel modello di calcolo per quanto riguarda le unità geotecniche coesive e il corpo del rilevato.

### Limo argilloso e argilla limosa\_1

Name:  Color:  Hatch:

Unit Weight (kN/m3):  Sat. Unit Wt. (kN/m3)

Poisson Ratio:  K0:

Immediate Settlement **Primary Consolidation** Secondary Consolidation Datum Dependency Stage Factors

☒ Primary Consolidation

Material Type:

mv (m2/kN):  mvur (m2/kN):

Time-dependent Consolidation Analysis:

☐ Cv (cm2/s):

☒ K (cm/s):

B-bar:

### Limo argilloso e argilla limosa\_2

Name:  Color:  Hatch:

Unit Weight (kN/m3):  Sat. Unit Wt. (kN/m3)

Poisson Ratio:  K0:

Immediate Settlement **Primary Consolidation** Secondary Consolidation Datum Dependency Stage Factors

☒ Primary Consolidation

Material Type:

mv (m2/kN):  mvur (m2/kN):

Time-dependent Consolidation Analysis:

☐ Cv (cm2/s):

☒ K (cm/s):

B-bar:

|                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna<br><br>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)<br><br>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                                                                                     | CODICE PROGETTO<br>24V25<br><br>LIVELLO PROG.<br>PF<br><br>TIPO DOC.<br>R<br><br>AMBITO<br>GT<br><br>PROGRESSIVO<br>720<br><br>REV.<br>r00                                                      |

**Limo sabbioso**

Name:  Color:  Hatch:

Unit Weight (kN/m<sup>3</sup>):  Sat. Unit Wt. (kN/m<sup>3</sup>):

Poisson Ratio:  K0:

Immediate Settlement: **Primary Consolidation** Secondary Consolidation Datum Dependency Stage Factors

☒ Primary Consolidation

Material Type:

mv (m<sup>2</sup>/kN):  mvur (m<sup>2</sup>/kN):

Time-dependent Consolidation Analysis:

☐ Cv (cm<sup>2</sup>/s):

☒ K (cm/s):

B-bar:

---

Name:  [Display Properties](#)

Number of Layers:  Near End Angle (deg):  Far End Angle (deg):  Bottom Elevation (m):

 Base Width (m):  ☐ Remove Entire Embankment in Stage Stage 5 = 8.09 m ☐ Define angles by ratio

| Layer | Stage           | Left Bench Width (m) | Left Angle (deg) | Height (m) | Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> ) | Right Angle (deg) | Right Bench Width (m) |
|-------|-----------------|----------------------|------------------|------------|----------------------------------|-------------------|-----------------------|
| 1     | Stage 2 = 0 mon | 0                    | 34               | 5          | 20                               | 90                | 0                     |
| 2     | Stage 3 = 3 mon | 3.5                  | 34               | 5          | 20                               | 90                | 0                     |
| 3     | Stage 4 = 6 mon | 3.5                  | 34               | 5          | 20                               | 90                | 0                     |

Figura 17: Input parametri geotecnici delle unità e del corpo del Rilevato inseriti nel software di calcolo

|                                                                                                   |                                                                                                                                               |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna                                              | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) |                     |                |              |                    |             |
| PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA                                                                                                    |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                         | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                      | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

## 7.1 Sezioni di calcolo

Per le sezioni di calcolo si rimanda al §6.1.

## 7.2 Risultati verifica 29a Sponda Destra – approccio Sud

Nella seguente figura sono rappresentati il modello di calcolo per la sezione analizzata e le sue caratteristiche:

| Sez.29a               |    |
|-----------------------|----|
| Altezza rilevato (m)  | 13 |
| Larghezza base (m)    | 65 |
| Estensione tratto (m) | 20 |
| Hc (m)                | 48 |

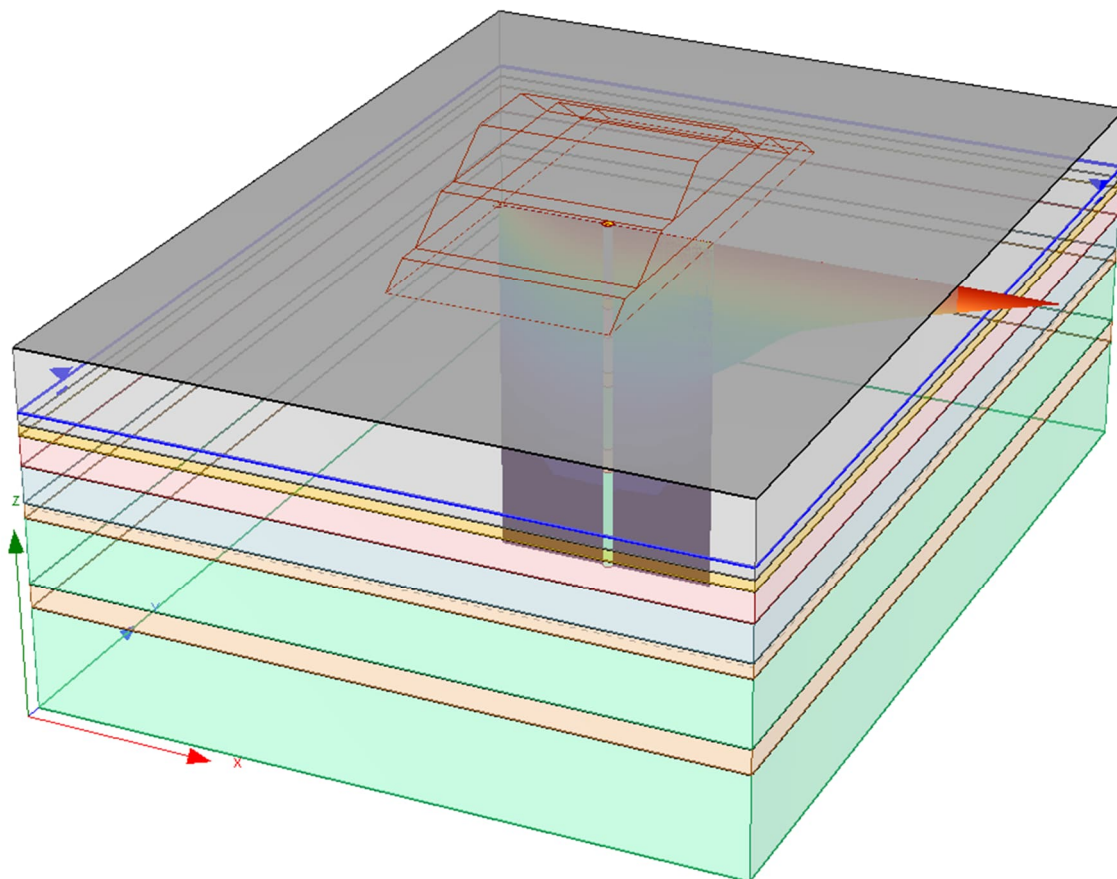


Figura 18: Modello di calcolo – Sezione 29a

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                  |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div> |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <div>CODICE PROGETTO</div> <div>24V25</div>                                                                                                                                                                      | <div>LIVELLO PROG.</div> <div>PF</div> | <div>TIPO DOC.</div> <div>R</div> | <div>AMBITO</div> <div>GT</div> | <div>PROGRESSIVO</div> <div>720</div> | <div>REV.</div> <div>r00</div> |

Nel grafico successivo sono illustrati i risultati dell'analisi sotto forma di cedimenti totali nel tempo, mentre, per chiarezza espositiva, si riportano gli stessi in formato tabellare:

Tabella 9: Risultati analisi cedimenti – Sezione 29a

|                                                | Sez.29a |
|------------------------------------------------|---------|
| Cedimento elastico (t=0) in asse (cm)          | 5,9     |
| Cedimento elastico (t=3mesi) in asse (cm)      | 15,6    |
| Cedimento elastico (t=6mesi) in asse (cm)      | 21,8    |
| Cedimento consolidazione in asse t=8 mesi (cm) | 4,7     |
| Cedimento totale in asse (cm)                  | 26,6    |

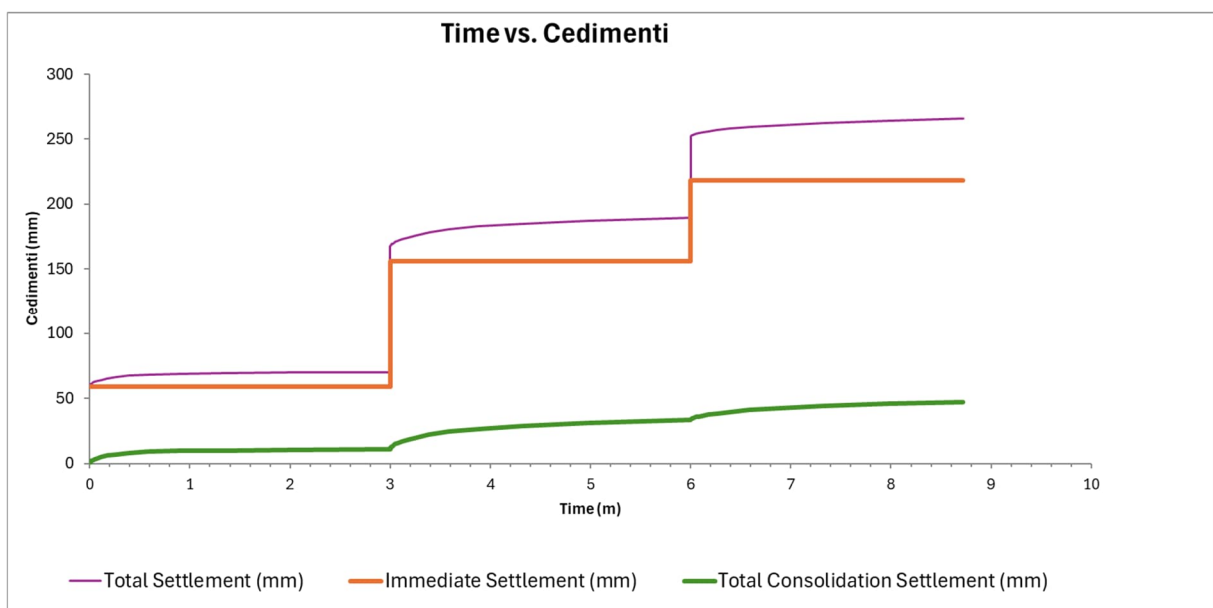


Figura 19: Cedimenti nel tempo – Sezione 29a

|                                                                                                   |                                                                                                                                               |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna                                              | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) |                     |                |              |                    |             |
| PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA                                                                                                    |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                         | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                      | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

### 7.3 Risultati verifica 29b Sponda Destra – approccio Sud

Nella seguente figura sono rappresentati il modello di calcolo per la sezione analizzata e le sue caratteristiche:

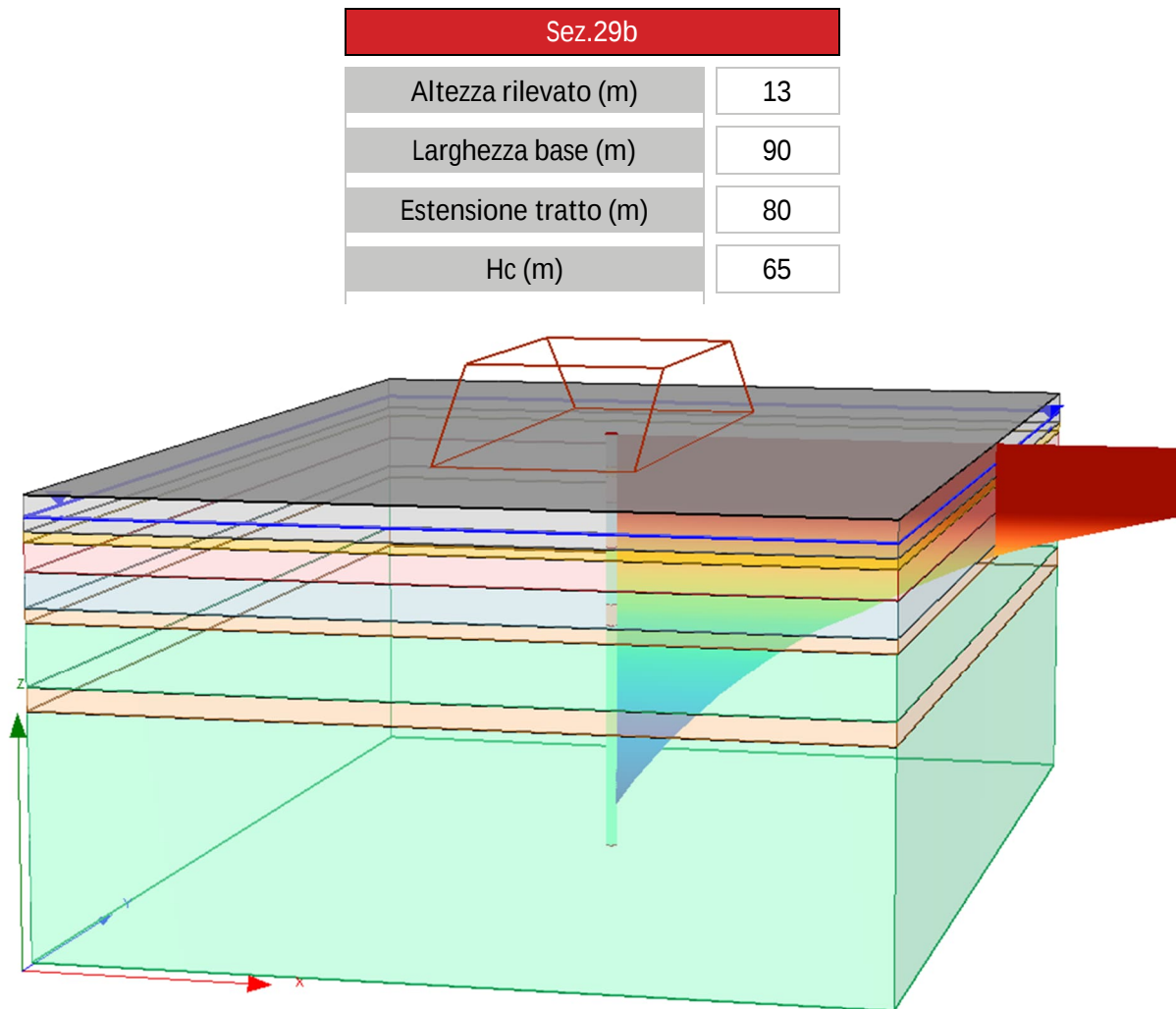


Figura 20: Modello di calcolo – Sezione 29b

Nel grafico successivo sono illustrati i risultati dell'analisi sotto forma di cedimenti totali nel tempo, mentre, per chiarezza espositiva, si riportano gli stessi in formato tabellare:

|                                                                                                   |                                                                                                                                               |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna                                              | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) |                     |                |              |                    |             |
| PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA                                                                                                    |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                         | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                      | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

Tabella 10: Risultati analisi cedimenti – Sezione 29b

|                                                | Sez.29b |
|------------------------------------------------|---------|
| Cedimento elastico (t=0) in asse (cm)          | 26,9    |
| Cedimento consolidazione in asse t=3 mesi (cm) | 8,3     |
| Cedimento consolidazione in asse t=6 mesi (cm) | 10,5    |
| Cedimento totale in asse (cm)                  | 37,4    |

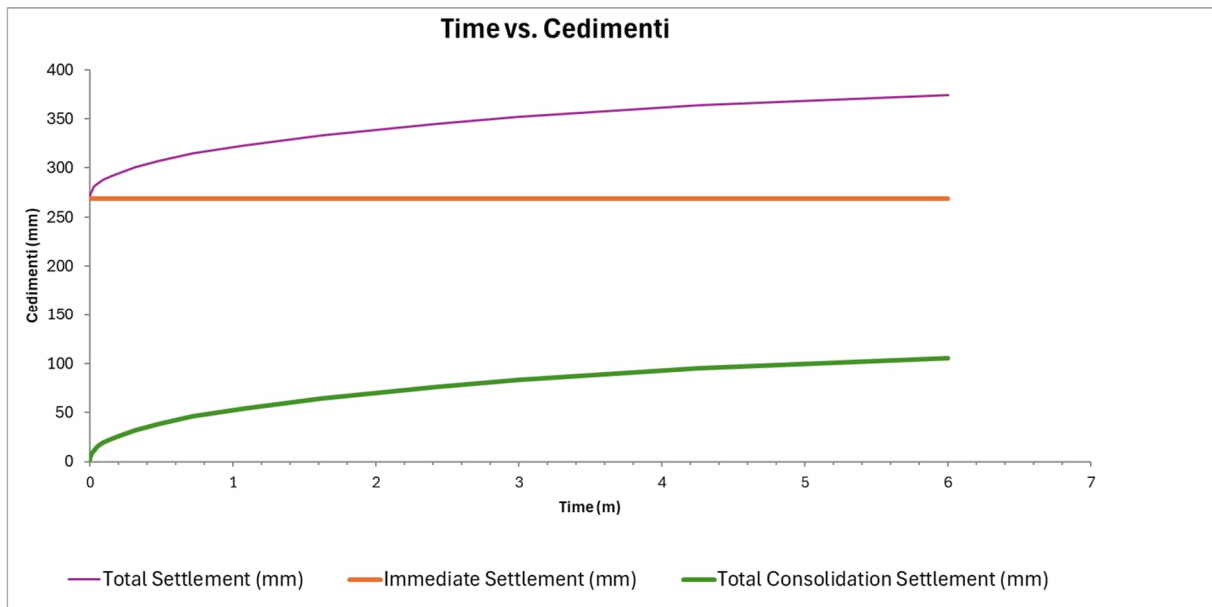


Figura 21: Cedimenti nel tempo – Sezione 29b

|                                                                                                   |                                                                                                                                               |                     |                |              |                    |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna                                              | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) |                     |                |              |                    |             |
| PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA                                                                                                    |                     |                |              |                    |             |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                         | CODICE PROGETTO<br>24V25                                                                                                                      | LIVELLO PROG.<br>PF | TIPO DOC.<br>R | AMBITO<br>GT | PROGRESSIVO<br>720 | REV.<br>r00 |

#### 7.4 Risultati verifica 29a Sponda Destra – approccio Sud - Consolidamento

Nella seguente figura sono rappresentati il modello di calcolo per la sezione analizzata e le sue caratteristiche:

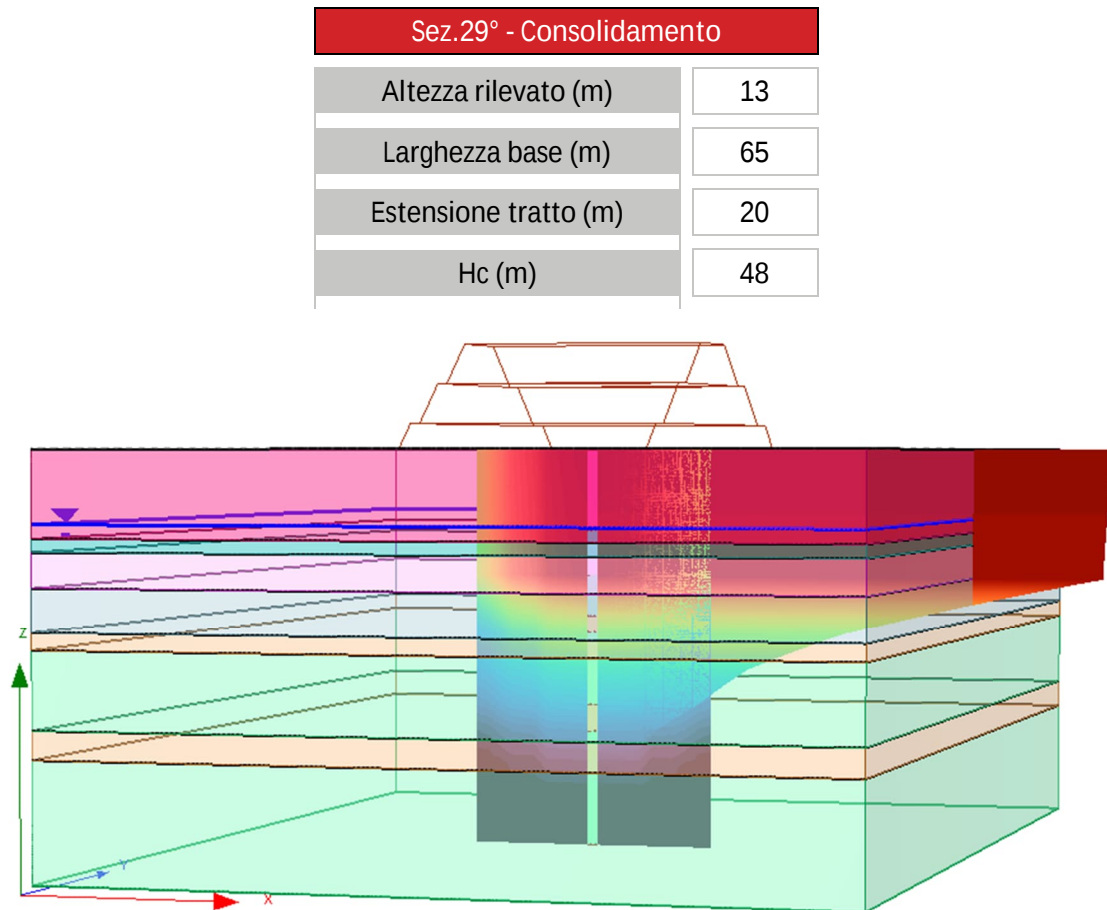


Figura 22: Modello di calcolo – Sezione 29a - Consolidamento

Nel grafico successivo sono illustrati i risultati dell'analisi sotto forma di cedimenti totali nel tempo:

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                  |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div> |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <div>CODICE PROGETTO</div> <div>24V25</div>                                                                                                                                                                      | <div>LIVELLO PROG.</div> <div>PF</div> | <div>TIPO DOC.</div> <div>R</div> | <div>AMBITO</div> <div>GT</div> | <div>PROGRESSIVO</div> <div>720</div> | <div>REV.</div> <div>r00</div> |

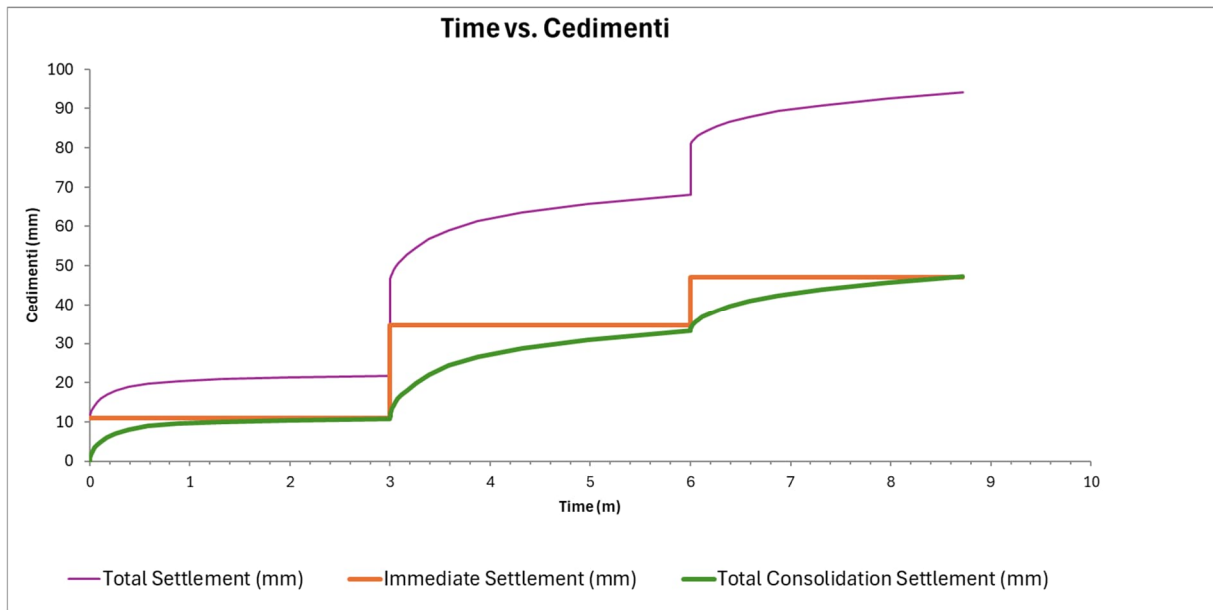


Figura 23: Cedimenti nel tempo – Sezione 29a - Consolidamento

Per chiarezza espositiva si riportano gli stessi in formato tabellare:

Tabella 11: Risultati analisi cedimenti – Sezione 29a - Consolidamento

|                                                | Sez.29b |
|------------------------------------------------|---------|
| Cedimento elastico (t=0) in asse (cm)          | 1,1     |
| Cedimento elastico (t=3mesi) in asse (cm)      | 3,5     |
| Cedimento elastico (t=6mesi) in asse (cm)      | 4,7     |
| Cedimento consolidazione in asse t=8 mesi (cm) | 4,7     |
| Cedimento totale in asse (cm)                  | 9,4     |

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                  |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div> |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <div>CODICE PROGETTO</div> <div>24V25</div>                                                                                                                                                                      | <div>LIVELLO PROG.</div> <div>PF</div> | <div>TIPO DOC.</div> <div>R</div> | <div>AMBITO</div> <div>GT</div> | <div>PROGRESSIVO</div> <div>720</div> | <div>REV.</div> <div>r00</div> |

## 7.5 Risultati verifica 29b Sponda Destra – approccio Sud - Consolidamento

Nella seguente figura sono rappresentati il modello di calcolo per la sezione analizzata e le sue caratteristiche:

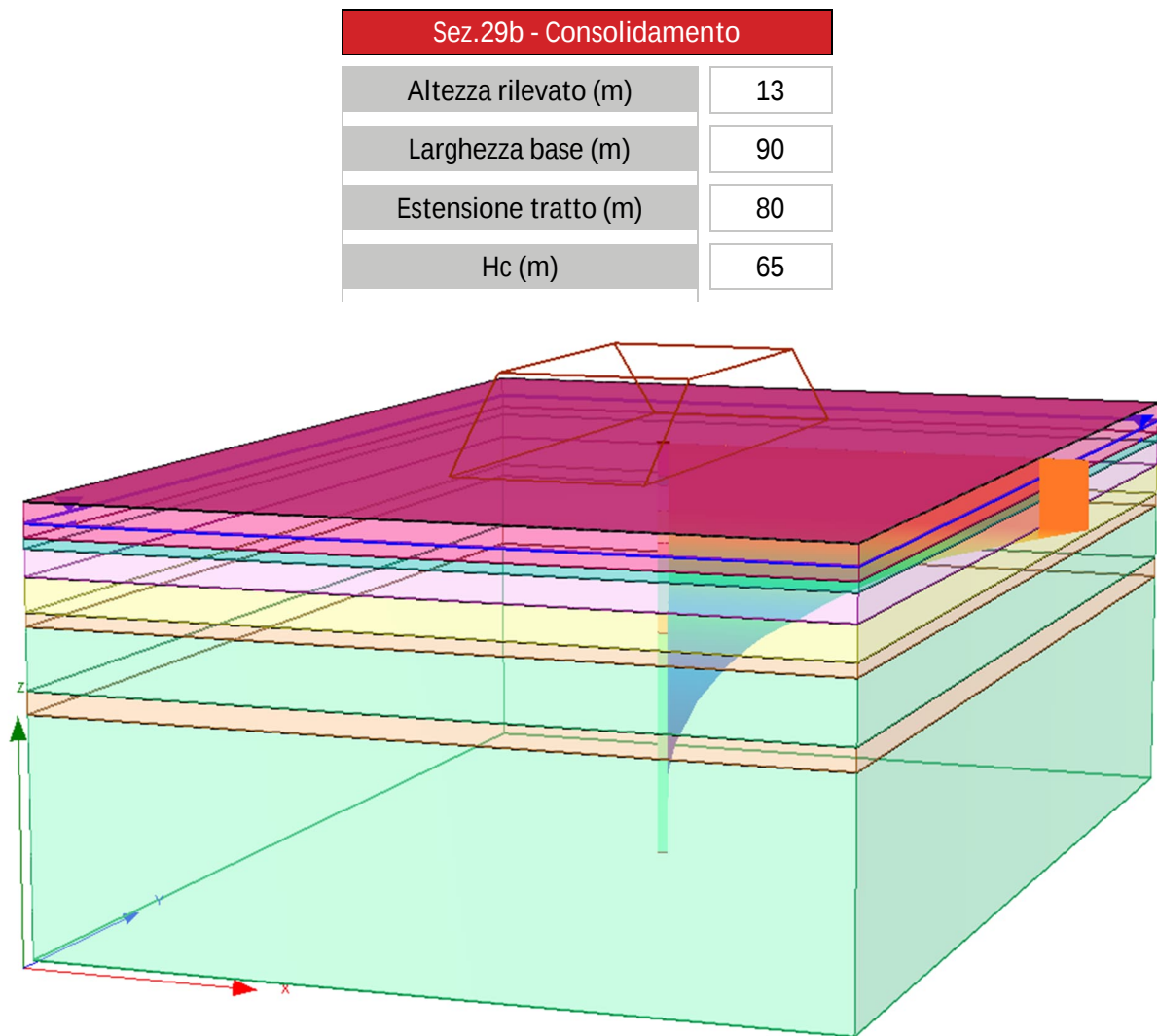


Figura 24: Modello di calcolo – Sezione 29b - Consolidamento

Nel grafico successivo sono illustrati i risultati dell'analisi sotto forma di cedimenti totali nel tempo, mentre, per chiarezza espositiva, si riportano gli stessi in formato tabellare:

|                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna<br><br>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br>ITEC ENGINEERING S.r.l. | INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)<br><br>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA |
| VIABILITA<br>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati                                                                                                     | CODICE PROGETTO<br>24V25 LIVELLO PROG.<br>PF TIPO DOC.<br>R AMBITO<br>GT PROGRESSIVO<br>720 REV.<br>r00                                                                                         |

Tabella 12: Risultati analisi cedimenti – Sezione 29b - Consolidamento

|                                                | Sez.29b |
|------------------------------------------------|---------|
| Cedimento elastico (t=0) in asse (cm)          | 10,9    |
| Cedimento consolidazione in asse t=3 mesi (cm) | 8,3     |
| Cedimento consolidazione in asse t=6 mesi (cm) | 10,5    |
| Cedimento totale in asse (cm)                  | 21,3    |

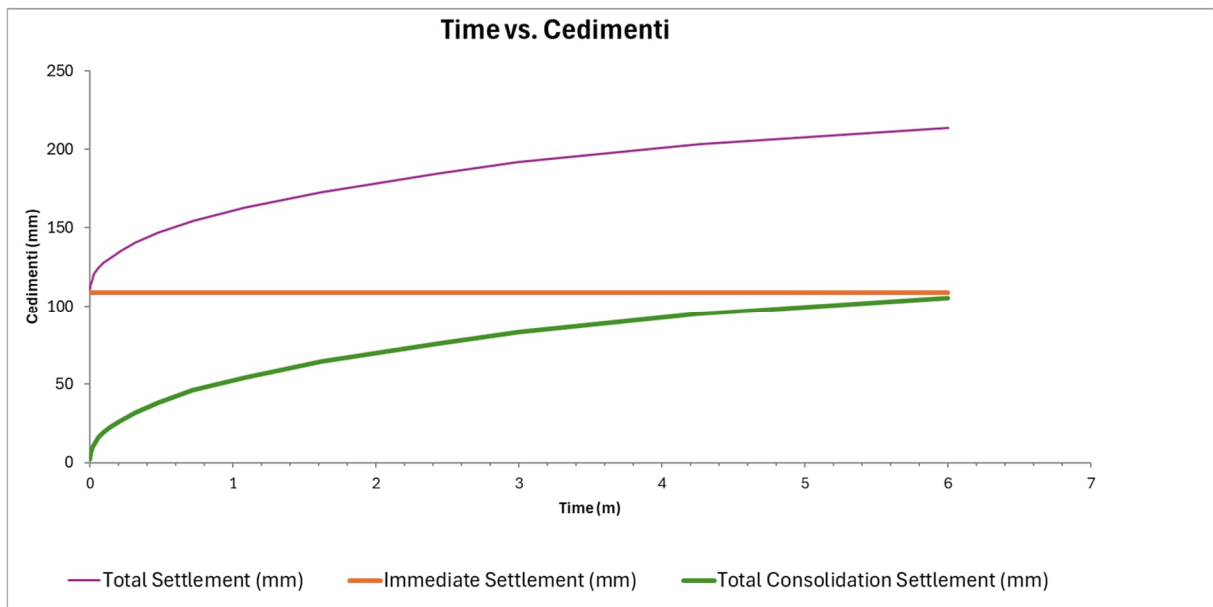


Figura 25: Cedimenti nel tempo – Sezione 29b - Consolidamento

|                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                  |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| <div>STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna</div> <div>PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria)<br/>SETECO INGEGNERIA S.r.l.<br/>ITEC ENGINEERING S.r.l.</div> | <div>INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13<br/>TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA<br/>(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)</div> <div>PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA</div> |                                        |                                   |                                 |                                       |                                |
| <div>VIABILITA</div> <div>Relazione geotecnica di calcolo dei rilevati</div>                                                                                                   | <div>CODICE PROGETTO</div> <div>24V25</div>                                                                                                                                                                      | <div>LIVELLO PROG.</div> <div>PF</div> | <div>TIPO DOC.</div> <div>R</div> | <div>AMBITO</div> <div>GT</div> | <div>PROGRESSIVO</div> <div>720</div> | <div>REV.</div> <div>r00</div> |

## 8. CONCLUSIONI

Nella presente relazione vengono descritte le soluzioni progettuali previste per i rilevati di approccio al Ponte Motta-Budrio, con specifico riferimento alle problematiche geotecniche connesse alla realizzazione delle opere in progetto e agli interventi di miglioramento e consolidamento del terreno di fondazione.

Il rilevato dell'approccio nord si sviluppa da inizio tracciato (km 0+000) fino alla spalla in km 0+314, per un'estensione complessiva di circa 314m. Nella tratta iniziale, caratterizzato da altezze di rilevato contenute, l'intervento previsto consiste sostanzialmente nell'allargamento e nel sopralzo del rilevato esistente. Nei tratti a maggiore rilevanza altimetrica, sul lato di via Zagno, è prevista la realizzazione di un muro di sostegno in c.a., da km 0+030 fino alla spalla in km 0+306 circa, per un'estensione complessiva di circa 276m. Il rilevato dell'approccio sud si sviluppa da km 0+825 circa con altezze molto contenute via via crescenti, fino alla spalla (km 0+522), per uno sviluppo complessivo di 300m circa.

Il rilevato di approccio sud è inoltre destinato a svolgere la funzione di area di varo dell'impalcato. A tal fine, in fase costruttiva, si rende necessaria la predisposizione di una piattaforma piana di dimensioni pari a circa 80m x 50m, con conseguente ampliamento del rilevato rispetto alla configurazione prevista in fase di esercizio, solo durante la fase di costruzione.

La modellazione geotecnica degli strati superficiali è stata eseguita, allo stato attuale delle indagini disponibili, considerando prevalentemente la risposta elastica dei terreni.

I primi 15 m di sottosuolo risultano costituiti da terreni a prevalente comportamento granulare, caratterizzati da una significativa suscettibilità a fenomeni di liquefazione. Tuttavia, le prove edometriche eseguite su campioni prelevati nei medesimi intervalli evidenziano la presenza di una frazione fine non trascurabile, tale da determinare anche componenti di deformazione differita riconducibili a fenomeni di consolidazione.

Le analisi effettuate evidenziano valori di cedimento immediato rilevanti per i rilevati in approccio. In via cautelativa, e in attesa dei risultati delle indagini geotecniche integrative già programmate, si ritiene che una quota parte dei cedimenti possa evolvere nel tempo, con conseguente incremento del rischio di cedimenti differenziali tra rilevato e opere d'arte.

In tale contesto, è stata prevista l'adozione di pali in calcestruzzo non armato con funzione di miglioramento del terreno e trasferimento dei carichi agli strati più profondi, costituiti da terreni a comportamento coesivo, caratterizzati da maggiore rigidità e minore comprimibilità.

La soluzione adottata consente di:

- ridurre i cedimenti totali e differenziali del rilevato in prossimità della spalla del ponte;
- limitare gli effetti di attrito negativo sui pali di fondazione delle spalle, potenzialmente indotti dai cedimenti differiti degli strati superficiali;
- mitigare gli effetti della suscettibilità a liquefazione dei terreni granulari superficiali, garantendo un trasferimento dei carichi a profondità non interessate dal fenomeno.

La scelta progettuale adottata nel presente livello di progettazione (PFTE) è pertanto di tipo cautelativo e finalizzata a garantire adeguati livelli prestazionali dell'opera in termini di deformabilità e sicurezza. Essa sarà oggetto di rivalutazione e possibile ottimizzazione nella successiva fase progettuale, sulla base dei risultati delle indagini integrative.