

COMMITTENTE:



ALTA SORVEGLIANZA:



GENERAL CONTRACTOR:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE  
OBIETTIVO N. 443/01**

**LINEA AV/AC TORINO – VENEZIA      Tratta VERONA – PADOVA**

**Lotto funzionale Verona – Bivio Vicenza**

**PROGETTO ESECUTIVO**

**TR-TRINCEE**

**TR00 - TRINCEE DI APPROCCIO ALLA GALLERIA ARTIFICIALE S. MARTINO**

**TR03 dal km 4+530.53 al km 4+942.53**

**Fabbricato FA03 – Relazione di calcolo pali di fondazione**

|   |  |                  |      |            |
|---|--|------------------|------|------------|
| GENERAL CONTRACTOR  |  | DIRETTORE LAVORI |      | SCALA<br>- |
| IL PROGETTISTA INTEGRATORE  | Conorzio   |                  | Data |            |
|  Ing. Paolo MALAVENDA<br>iscritto all'ordine degli<br>ingegneri di Venezia n. 4289<br>Data: Ottobre 2022 | Iricav Due<br>ing. Paolo Carmona<br>Data: Ottobre 2022 |                  |      |            |

COMMESSA    LOTTO    FASE    ENTE    TIPO DOC.    OPERA/DISCIPLINA    Progr.    REV.    FOGLIO

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | N | 1 | 7 | 1 | 2 | E | 1 | 2 | CL | T | R | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | B | - | - | - | P | - | - | - |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

|   |                                |                      |
|---|--------------------------------|----------------------|
|  | VISTO CONSORZIO IRICAV DUE     |                      |
|   | Firma<br>Ing. Alberto LEVORATO | Data<br>Ottobre 2022 |

Progettazione:

| Rev. | Descrizione                              | Redatto                           | Data     | Verificato              | Data     | Approvato                | Data     | IL PROGETTISTA   |
|------|--|-----------------------------------|----------|-------------------------|----------|--------------------------|----------|--|
| A    | EMISSIONE                                | R. CONFORTI<br><i>R. Conforti</i> | 29/04/22 | L. ALFIERI<br><i>LQ</i> | 29/04/22 | P. GALVANIN<br><i>PG</i> | 29/04/22 |  Data: 25/10/22 |
| B    | REVISIONE A SEGUITO ISTRUTTORIA ITALFERR | R. CONFORTI<br><i>R. Conforti</i> | 25/10/22 | L. ALFIERI<br><i>LQ</i> | 25/10/22 | P. GALVANIN<br><i>PG</i> | 25/10/22 |  |

|                 |                     |                                     |
|-----------------|---------------------|-------------------------------------|
| CIG. 8377957CD1 | CUP: J41E9100000009 | File: IN1712EI2CLTR0300001B_00.DOCX |
|                 |                     | Cod. origine:                       |



Progetto cofinanziato  
dalla Unione Europea

|  |  |  |             |  |           |                   |
|--|--|--|-------------|--|-----------|-------------------|
| GENERAL CONTRACTOR<br><br>IRICAV2 |  | ALTA SORVEGLIANZA<br><br>ITALFERR<br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |             |  |           |                   |
| FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE  |  | Progetto<br>IN17   | Lotto<br>12 | Codifica Documento<br>EI2 CL TR 03 0 0 001 | Rev.<br>B | Foglio<br>2 di 51 |

## INDICE

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1       | INTRODUZIONE .....   | 4  |
| 2       | DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....  | 5  |
| 2.1     | Riferimenti Normativi .....  | 5  |
| 2.2     | Progetto esecutivo.....  | 5  |
| 2.2.1   | Elaborati progettuali.....   | 5  |
| 3       | FABBRICATO FA03: DESCRIZIONE DELLE OPERE.....                                    | 6  |
| 3.1     | Aspetti generali.....  | 6  |
| 4       | CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA E SISMICA.....                                      | 10 |
| 4.1     | Falda di progetto .....  | 10 |
| 4.2     | Inquadramento sismico.....   | 10 |
| 5       | CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICA .....  | 11 |
| 6       | CARATTERISTICHE DEI MATERIALI .....  | 12 |
| 6.1     | Calcestruzzo pali di fondazione .....  | 12 |
| 6.2     | Acciaio in barre.....  | 12 |
| 7       | ANALISI DELLA PALIFICATA E DETERMINAZIONE CARICHI APPLICATI .....                | 14 |
| 7.1     | Riferimenti normativi e specifiche di progetto .....                             | 14 |
| 7.2     | Modellazione strutturale.....  | 14 |
| 7.2.1   | Determinazione sollecitazioni assiali testa pali .....                           | 14 |
| 7.2.2   | Determinazione sollecitazioni taglianti testa pali .....                         | 22 |
| 7.2.2.1 | Calcolo azioni da ritiro sulla platea .....                                      | 22 |
| 7.2.2.2 | Azioni termiche sulla platea.....  | 22 |
| 7.2.3   | Determinazione sollecitazioni taglianti e flettenti sui pali di fondazione ..... | 24 |
| 8       | VERIFICHE DEI PALI DI FONDAZIONE .....   | 29 |
| 8.1     | Riepilogo sollecitazioni di verifica.....  | 29 |
| 8.2     | Verifiche geotecniche dei pali di fondazione.....                                | 30 |
| 8.2.1   | Verifica dei pali nei confronti dei carichi verticali.....                       | 30 |
| 8.2.1.1 | Resistenza pali singoli soggetti a carichi assiali di compressione.....          | 31 |
| 8.2.1.2 | Resistenza pali singoli soggetti a carichi assiali di trazione .....             | 31 |
| 8.2.1.3 | Portata laterale .....   | 32 |
| 8.2.1.4 | Portata di base.....   | 33 |
| 8.2.1.5 | Determinazione della resistenza di progetto a trazione .....                     | 33 |
| 8.2.1.6 | Determinazione capacità portante .....   | 33 |
| 8.2.1.7 | Determinazione rigidezza assiale dei pali .....                                  | 36 |
| 8.2.2   | Verifica dei pali nei confronti dei carichi orizzontali .....                    | 37 |
| 8.2.2.1 | Caso generale – Teoria di Broms .....  | 38 |
| 8.2.2.2 | Determinazione del carico limite orizzontale .....                               | 39 |
| 8.3     | Verifiche strutturali dei pali.....  | 40 |

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE

Progetto  
IN17

Lotto  
12

Codifica Documento  
EI2 CL TR 03 0 0 001

Rev.  
B

Foglio  
3 di 51

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 8.3.1 | Sezione di testa palo .....                               | 42 |
| 8.3.2 | Sezione armatura corrente.....                            | 45 |
| 8.3.3 | Verifica ancoraggio barre nella platea di fondazione..... | 48 |
| 9     | VERIFICHE AL GALLEGGIAMENTO DELLA RAMPA DI ACCESSO .....  | 50 |
| 10    | VERIFICHE A GALLEGGIAMENTO VASCA ANTINCENDIO .....        | 51 |

|  |  |             |  |           |                   |
|--|--|-------------|--|-----------|-------------------|
| GENERAL CONTRACTOR<br><br>IRICAV2 | ALTA SORVEGLIANZA<br><br>ITALFERR<br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |             |  |           |                   |
| FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE  | Progetto<br>IN17   | Lotto<br>12 | Codifica Documento<br>EI2 CL TR 03 0 0 001 | Rev.<br>B | Foglio<br>4 di 51 |

## 1 INTRODUZIONE

La presente relazione riporta le verifiche delle opere di fondazione profonde del piazzale del fabbricato FA03 al km 4+880 da realizzare nella tratta Verona - Padova, sublotto Verona - Montebello Vicentino, nell'ambito della progettazione definitiva della linea AV/AC Torino - Venezia.

Per la descrizione e verifiche strutturali delle opere in elevazione del fabbricato e della platea di fondazione in c.a. si rimanda alla relazione di calcolo IN1712EI2CLFA0300001 ed elaborati progettuali ad essa riferite.

Si specifica che oggetto della presente relazione sono le verifiche geotecniche e strutturali dei pali di fondazione, le cui azioni sollecitanti sono state desunte dalla relazione di calcolo del fabbricato tecnologico FA03.

Nel seguito, dopo una breve descrizione delle condizioni geologiche e idrogeologiche dei terreni interessati dalle opere in oggetto, sono ricapitolati i criteri di calcolo adottati per le verifiche delle opere e quindi riportati gli esiti dei dimensionamenti e delle verifiche effettuate al fine di verificare le soluzioni proposte.

Per la descrizione e verifiche di progetto delle opere di sostegno degli scavi previsti per il fabbricato, si rimanda alla relazione 'IN1712EI2CLTR0000003A' (Opere sostegno degli scavi e tampone di fondo - Relazione di calcolo) ed elaborati di progetto ad essa riferiti.

Per quanto riguarda le fasi esecutive di realizzazione delle opere si rimanda all'elaborato IN1712EI2WATR0300001; per le verifiche dei diaframmi e del tampone di fondo in jet grouting, necessari per sostenere le pareti di scavo e impermeabilizzare lo stesso durante la fase costruzione, si rimanda alla relazione di calcolo IN1711EI2CLTR0000003.

|  |  |  |             |  |           |                   |
|--|--|--|-------------|--|-----------|-------------------|
| GENERAL CONTRACTOR<br><br>IRICAV2 |  | ALTA SORVEGLIANZA<br><br>ITALFERR<br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |             |  |           |                   |
| FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE  |  | Progetto<br>IN17   | Lotto<br>12 | Codifica Documento<br>EI2 CL TR 03 0 0 001 | Rev.<br>B | Foglio<br>5 di 51 |

## 2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Riferimenti Normativi

- [1] Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008 – “Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, G.U. n.29 del 04.2.2008, Supplemento Ordinario n.30.
- [2] Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 – “Istruzioni per l’applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008.
- [3] Manuale di Progettazione delle opere civili RFI Parte II - Sezione 3, RFI DTC SI CS MA IFS 001 B
- [4] Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili RFI, RFI DTC SI SP IFS 001 B

### 2.2 Progetto esecutivo

#### 2.2.1 Elaborati progettuali

|                      |   |
|----------------------|---|
| IN1712EI2PATR0300007 | Diaframmi e tampone di fondo - Planimetria di tracciamento e profili longitudinali Tav. 7   |
| IN1712EI2PATR0300008 | Opere di sostegno e tampone di fondo FA03 - Profilo longitudinale                           |
| IN1712EI2PATR0300009 | Fabbricato FA03 – Pali di fondazione – Planimetria di tracciamento                          |
| IN1712EI2WATR0303001 | Fabbricato FA03 – Pali di fondazione – Sezioni trasversali                                  |
| IN1712EI2BZTR0303001 | Fabbricato FA03 – Pali di fondazione – Armatura   |
| IN1712EI2WATR0300001 | Fabbricato FA03 – Opere di sostegno, pali di fondazione e tampone di fondo – Fasi esecutive |
| IN1712EI2BATR0301010 | Fabbricato FA03 - Tampone di fondo campo 1 - Vasca di raccolta acque: Planimetria e sezioni |
| IN1712EI2BATR0301011 | Fabbricato FA03 - Tampone di fondo campo 2 - Piazzale: Planimetria e sezioni                |
| IN1712EI2BATR0301012 | Fabbricato FA03 - Tampone di fondo campo 3 - Rampa di accesso: Planimetria e sezioni        |
| IN1712EI2CLFA0300001 | Relazione di calcolo strutturale  |
| IN1712EI2EEFA0300001 | Elenco elaborati  |
| IN1712EI2CLTR0000003 | Opere sostegno degli scavi e tampone di fondo - Relazione di calcolo                        |
| IN1712EI2RBTR0000001 | Relazione geotecnica  |
| IN1712EI2L6TR0000001 | Planimetria di ubicazione delle indagini geognostiche e profilo geotecnico                  |
| IN1711EI2RBGA0100001 | Relazione geotecnica  |
| IN1711EI2SPGA0102001 | Specifiche tecniche campo prova jet grouting  |
| IN1711EI2L6GA0100001 | Planimetria di ubicazione delle indagini geognostiche e profilo geotecnico                  |
| IN1711EI2RHGA0102001 | Relazione finale campo prova jet grouting   |

### 3 FABBRICATO FA03: DESCRIZIONE DELLE OPERE

#### 3.1 Aspetti generali

Come riportato nella relazione di calcolo strutturale 'IN1712E12CLFA0300001', il piazzale del fabbricato è di forma rettangolare, posto in parte alla quota del piano ferro e parte a piano campagna. Le due diverse quote sono collegate da una rampa carrabile. Sul piazzale a quota piano ferro sono previsti locali tecnologici, vasca di pompaggio/antincendio ed un'area di sicurezza per punto antincendio. La parte di piazzale a piano ferro è a quota 40.40 m circa e presenta scavi di profondità compresa tra i 5.80m e 6.50m. L'area della vasca di pompaggio/antincendio è posta circa 4m al di sotto del piano ferro e presenta un'altezza di scavo di 10m dal piano di lavoro di realizzazione delle opere di sostegno pari a 45.50m.

Il sistema di opere di sostegno necessarie all'esecuzione degli scavi del fabbricato è costituito da diaframmi in c.a di spessore 1.0m. Lo scavo tra diaframmi è realizzato in presenza di fango stabilizzante con benna mordente e con una sequenza primari/accostati/secondari tale da minimizzare il numero dei giunti, così come rappresentato negli elaborati grafici di progetto. Considerato il battente della falda, per tutti i giunti dei diaframmi è previsto l'impiego di palancole di spalla tra un pannello e l'altro.

Si riporta, di seguito, la planimetria generale del piazzale (Figura 1) e delle opere di sostegno necessarie all'esecuzione degli scavi (Figura 2).

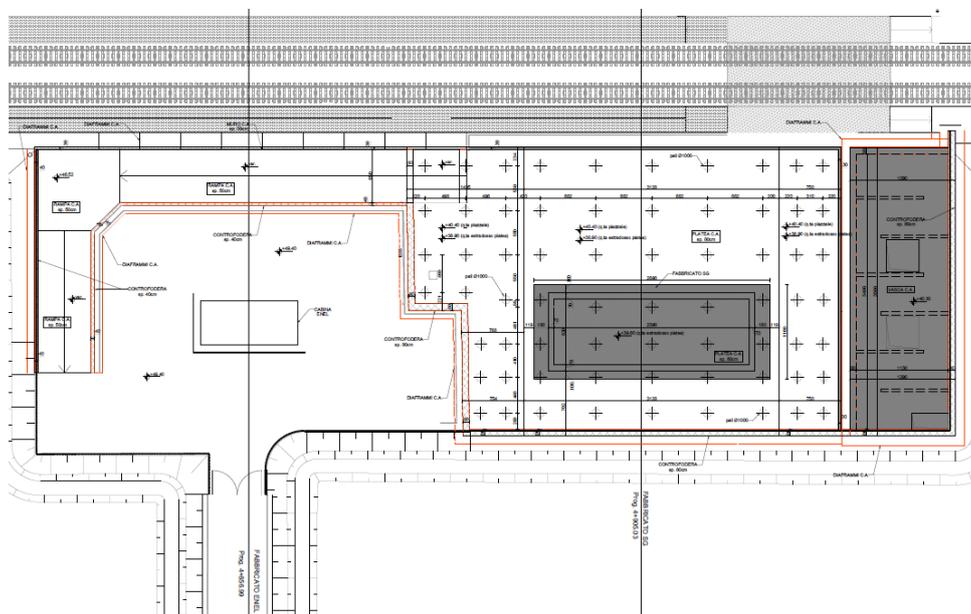


Figura 1 Planimetria generale

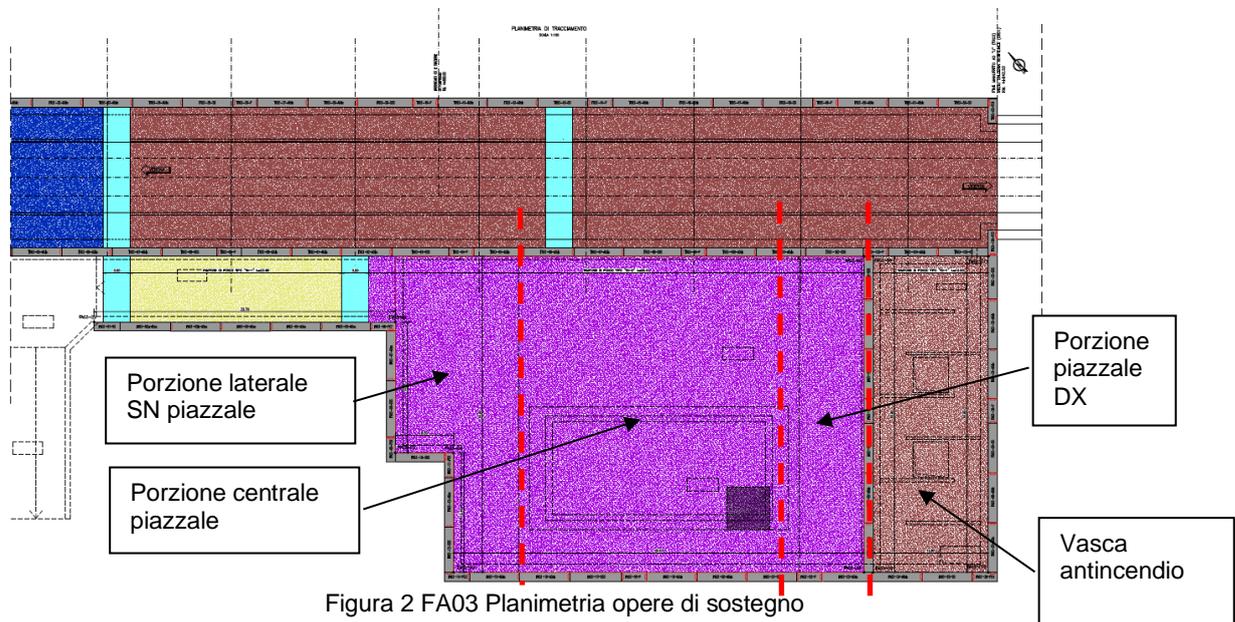


Figura 2 FA03 Planimetria opere di sostegno

Le strutture di fondazione ed elevazione del piazzale a quota piano ferro sono costituite da platea di fondazione di spessore pari a 80cm e contropareti in c.a. gettato in opera, di spessore nominale pari a 90cm. La platea è suddivisa in 3 parti da giunti a contatto: vasca antincendio area del fabbricato e piazzale esterno laterale. (Figura 2). Esse sono separate tra loro per mezzo di giunti a contatto. Per il piazzale a quota piano ferro è stata inserita una maglia di pali  $\varnothing 1000$  trivellati di lunghezza  $L=28m$  necessaria a contrastare la sottospinta idraulica (Figura 3).

I pali di fondazione della platea sono utilizzati per contrastare la sottospinta generata dal battente di falda a lungo termine e garantire l'equilibrio del manufatto al galleggiamento. Essi sono quindi prevalentemente sottoposti ad azioni di trazione/compressione in funzione dei livelli di falda assunti. Come anticipato nell'introduzione, i valori delle azioni verticali agenti sui pali di fondazione sono state ricavate combinando le reazioni caratteristiche estratte dal modello di calcolo del piazzale a quota P.F., di cui alla relazione IN1712EI2CLFA0300001.

La platea di fondazione funge anche da elemento di contrasto a lungo termine delle azioni di spinta del terreno e della falda agenti sui diaframmi disposti lungo il perimetro della fondazione. La continuità della platea e la presenza dei diaframmi lungo tutto il perimetro fanno sì che i pali non risultino direttamente sollecitati a taglio dalle spinte che si esercitano sui diaframmi in condizioni statiche e sismiche, in quanto autoequilibrate. In altre parole, si assume che l'effetto di taglio alla base dell'edificio sia trasmesso direttamente ai diaframmi perimetrali attraverso la rigidità assiale della platea, che è infinitamente più elevata di quella flessionale dei pali sottostanti.

Ai fini del dimensionamento si è previsto che i pali siano caricati in testa da una coazione dovuta al ritiro della platea e delle azioni termiche. Per il calcolo delle azioni di taglio si rimanda ai paragrafi successivi.

La vasca antincendio è fondata su una platea di fondazione diretta di spessore pari a 80cm. Per tale opera non sono previsti pali perché le azioni derivanti dalla sottospinta idraulica sono equilibrate dai diaframmi perimetrali a sostegno dello scavo connesse strutturalmente alle contropareti. Per le verifiche dei diaframmi perimetrali della vasca si rimanda alla apposita relazione di calcolo della trincea TR03.

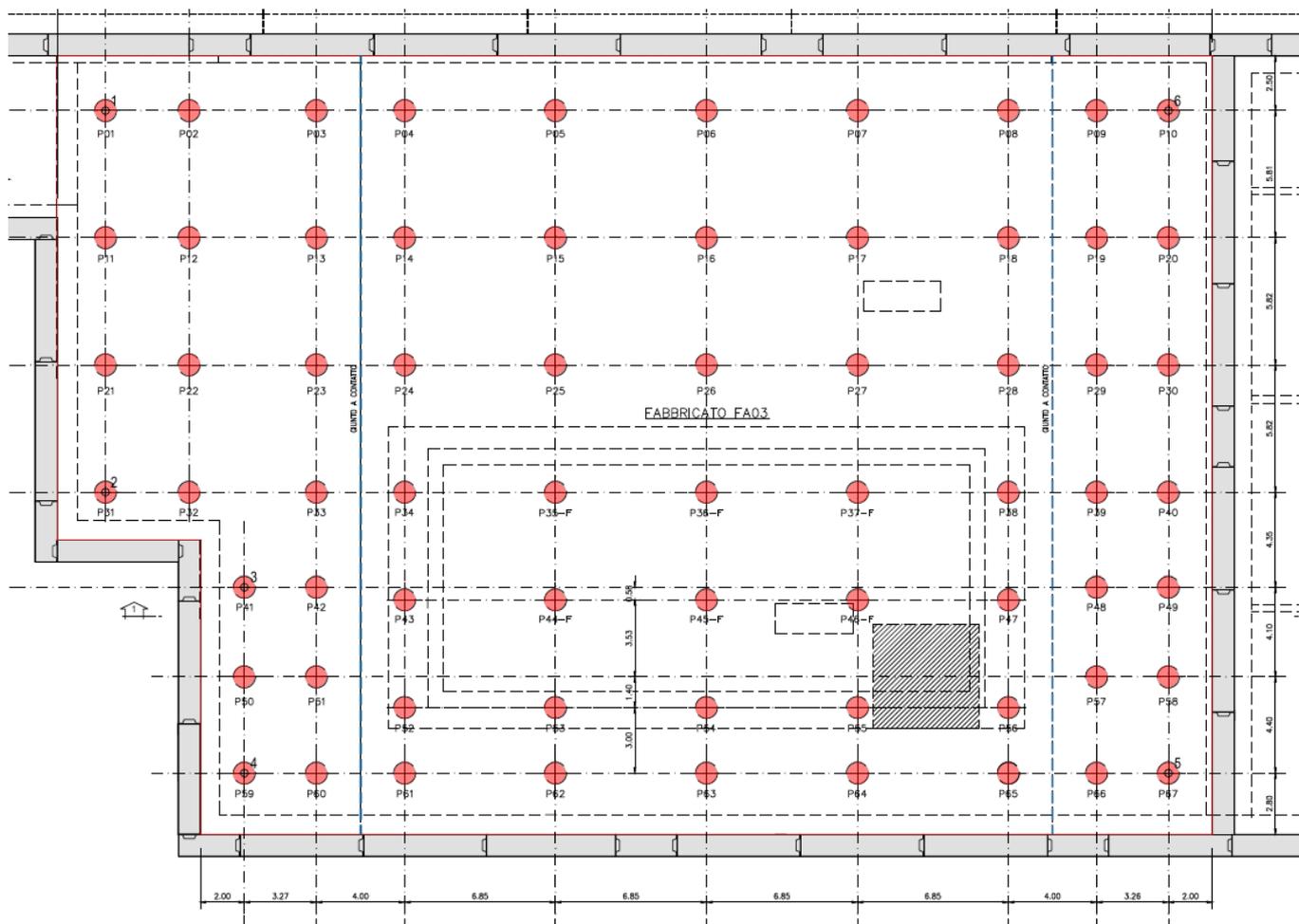


Figura 3 Planimetria pali di fondazione piazzale quota piano ferro

| PALI IN C.A.          |        |   |  |                                    |                                   |
|-----------------------|--------|---|--|------------------------------------|-----------------------------------|
| NUMERO IDENTIFICATIVO | Ø (mm) | Lunghezza palo da intradosso fondazione (m) | Quota testa palo scapitozzato (m s.l.m.) | Lunghezza perforazione a vuoto (m) | Lunghezza perforazione totale (m) |
| P01 ÷ P34             | 1000   | 28,00                                       | 38,10                                    | 7,40                               | 35,40                             |
| P35-F ÷ P37-F         | 1000   | 28,00                                       | 38,72                                    | 6,78                               | 34,78                             |
| P38 ÷ P43             | 1000   | 28,00                                       | 38,10                                    | 7,40                               | 35,40                             |
| P44-F ÷ P46-F         | 1000   | 28,00                                       | 38,72                                    | 6,78                               | 34,78                             |
| P47 ÷ P67             | 1000   | 28,00                                       | 38,10                                    | 7,40                               | 35,40                             |

|   |   |                     |  |                   |                           |
|---|---|---------------------|--|-------------------|---------------------------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  <p><b>IRICAV2</b></p> | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  <p><b>ITALFERR</b><br/>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> |                     |  |                   |                           |
| <p>FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE</p>  | <p>Progetto<br/>IN17</p>  | <p>Lotto<br/>12</p> | <p>Codifica Documento<br/>EI2 CL TR 03 0 0 001</p> | <p>Rev.<br/>B</p> | <p>Foglio<br/>9 di 51</p> |

Tabella 1: Tabella riepilogativa altezza pali

|  |  |             |  |           |                    |
|--|--|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR<br><br>IRICAV2 | ALTA SORVEGLIANZA<br><br>ITALFERR<br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |             |  |           |                    |
| FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE  | Progetto<br>IN17   | Lotto<br>12 | Codifica Documento<br>EI2 CL TR 03 0 0 001 | Rev.<br>B | Foglio<br>10 di 51 |

## 4 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA E SISMICA

La struttura idrogeologica del settore interessato dalla galleria artificiale e dalle trincee di approccio è caratterizzata dalla presenza dei depositi alluvionali della conoide del Fiume Adige al suo sbocco nella pianura padana, attribuita alle facies fluviali e fluvioglaciali del Pleistocene Superiore. Trattasi di una unità ghiaioso-sabbiosa, potente oltre 200 m, intervallata da lenti argillose di modesto spessore, variabile tra 3 e 9 m, e di estensione areale alquanto limitata, collocate a profondità comprese tra 20 e 30 m circa dal piano campagna, che vanno a separare una prima falda libera da una seconda semi-confinata. La prima falda libera presenta una soggiacenza del livello freatico di circa 6-9 m da p.c. attuale.

Nell'area dell'opera oggetto della presente relazione si osserva una estesa copertura di unità ghiaioso-sabbiosa con spessori variabili tra 5 e 10m che poggia su strati di sabbie limose con spessori da 10 a 15 m e strati di limi argillosi compatti sovraconsolidati con spessori variabili da 5 a 10 m.

### 4.1 Falda di progetto

I valori di soggiacenza misurati nei piezometri lungo la tratta in esame indicano una sostanziale stabilità nelle escursioni stagionali. La differenza di quota massima e minima misurata risulta essere inferiore a 3 m.

Ai fini progettuali, prendendo a riferimento i livelli di falda definiti nella Relazione Idrogeologica di tratta (Doc. rif. IN1711EI2RHGE0000003), si assumeranno:

1. quota della falda di riferimento in fase di costruzione: pari alla falda media "misurata" incrementata di 0.5 m;
2. quota della falda a breve termine: pari alla falda media "misurata" incrementata di 3.0 m;
3. quota di falda a lungo termine: pari alla falda media "misurata" incrementata di 4.5 m;

In corrispondenza del fabbricato FA03 la quota di falda a lungo termine è variabile tra 45.75m e 45.40m, con quota decrescente avvicinandosi alla GA01.

Ai fini del dimensionamento dei pali di fondazione del piazzale a quota ferro del fabbricato, la quota di progetto della falda è stata assunta coincidente a quota testa pali della platea di fondazione del piazzale.

### 4.2 Inquadramento sismico

Per la caratterizzazione sismica dell'opera in esame si rimanda al documento 'Relazione di calcolo strutturale', paragrafo §9, doc. No. IN1712EI2CLFA0300001.



## 5 CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICA

Sulla base di quanto riportato al paragrafo §4 e in maniera più dettagliata nelle relazioni geotecniche delle trincee IN1712EI2RBTR0000001 e della GA01 IN1711EI2RBGA0100001 e nei rispettivi profili geotecnici IN1712EI2L6TR0000001 e IN1711EI2L6GA0100001, la stratigrafia di progetto utilizzata per l'opera di fondazione in esame è composta dalle seguenti unità stratigrafiche:

- ALL\_6: ghiaia e ghiaia sabbiosa limosa;
- ALL\_2: limi argillosi;
- ALL\_4: sabbie limose.

| Parametri                     | ALL_2 | ALL_4 | ALL6  |
|-------------------------------|-------|-------|-------|
| $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | 20    | 20    | 20    |
| $\varphi'$ [°]                | 28    | 38    | 38÷40 |
| $c'$ [kPa]                    | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| NSPT [-]                      | 10÷20 | 30    | 40    |

| Unità | Spessore [m] |
|-------|--------------|
| ALL_2 | 0.0÷3.0      |
| ALL_4 | 3.0÷21.5     |
| ALL_2 | 21.5÷26.5    |
| ALL_6 | 26.5÷35      |



## 6 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

### 6.1 Calcestruzzo pali di fondazione

- Classe di resistenza minima  $C(f_{ck}/R_{ck})_{min}$ : C25/30 MPa
- Classe di esposizione XC2
- Classe di consistenza S4
- Tipo di cemento UN EN197-1:2006 CEM III-IV

#### Copriferro minimo

- ricoprimento minimo per i pali di fondazione:  $c_{min} = 60\text{mm}$

### 6.2 Acciaio in barre

Si prevede l'impiego di acciaio tipo B450C avente le seguenti caratteristiche meccaniche:

Tensione di Rottura  $f_{tk} = 540 \text{ N/mm}^2$

Tensione di Snervamento  $f_{yk} = 450 \text{ N/mm}^2$

#### Resistenze di progetto allo SLU

$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 391.3 \text{ N/mm}^2$

$\gamma_s = 1.15$  coefficiente di sicurezza

$\epsilon_{cuk} = 75\%$  allungamento caratteristico a rottura

$\epsilon_{cuk} = 67.5\%$  allungamento a rottura di calcolo

Si assume a rottura un diagramma tensione-deformazione bilineare finito con incrudimento ovvero il diagramma tipo (a) di cui al par. 4.1.2.1.2.3 del Testo Unico.

#### Tensione di lavoro limite agli SLE

Trazione massima in esercizio per Combinazione Caratteristica Rara =  $337.5 \text{ N/mm}^2$  ( $0.75 f_{yk}$ )

Il massimo interasse delle barre ad aderenza migliorata è indicato nella tabella sottostante:

$\gamma_s = 1.15$  coefficiente di sicurezza

$\epsilon_{cuk} = 75\%$  allungamento caratteristico a rottura

#### Verifiche di resistenza e fessurazione

Le verifiche a fessurazione sono state condotte considerando la Combinazione Caratteristica Rara

a) Verifica di formazione delle fessure: in sezione interamente reagente e per le sollecitazioni di esercizio si determina la massima trazione nel calcestruzzo  $\sigma_{ct}$  confrontandola con la resistenza

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE

Progetto  
IN17

Lotto  
12

Codifica Documento  
EI2 CL TR 03 0 0 001

Rev.  
B

Foglio  
13 di 51

caratteristica a trazione per flessione  $f_{ctk}$ : se risulta  $\sigma_{ct} < f_{ctk}$  la verifica è soddisfatta, altrimenti si procede alla verifica di apertura delle fessure.

b) Verifica di apertura delle fessure: l'apertura convenzionale delle fessure viene calcolata con le modalità indicate nel D.M. LL.PP. relativo alle “Norme Tecniche per le costruzioni” (D.M. 14.01.2008), cui fa riferimento il “Manuale di progettazione delle opere civili” di RFI.

La massima apertura ammissibile risulta (assumendo una classe di esposizione XC2 strutture poste a permanente contatto con il terreno):

$$w_{amm} = w_1 = 0.20\text{mm}$$

|  |  |             |  |           |                    |
|--|--|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR<br><br>IRICAV2 | ALTA SORVEGLIANZA<br><br>ITALFERR<br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |             |  |           |                    |
| FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE  | Progetto<br>IN17   | Lotto<br>12 | Codifica Documento<br>EI2 CL TR 03 0 0 001 | Rev.<br>B | Foglio<br>14 di 51 |

## 7 ANALISI DELLA PALIFICATA E DETERMINAZIONE CARICHI APPLICATI

### 7.1 Riferimenti normativi e specifiche di progetto

Le verifiche sono condotte, in osservanza al D.M. del 14.01.2008 “Norme tecniche per le costruzioni”, attraverso il metodo semiprobabilistico agli Stati Limite. Le combinazioni di carico agli stati limite considerate ai fini delle verifiche sono stabilite in modo da garantire la sicurezza in conformità a quanto prescritto nel Cap. 2 delle NTC 2008 e del MdP sopra richiamato.

### 7.2 Modellazione strutturale

Per dettagli sulla metodologia seguita per la modellazione strutturale dell’opera in esame, si rimanda al documento ‘Relazione di calcolo strutturale’, paragrafo §11, doc. No. IN1712EI2CLFA0300001.

#### 7.2.1 Determinazione sollecitazioni assiali testa pali

Come riportato nella ‘Relazione di calcolo strutturale’ (doc.No.IN1712EI2CLFA0300001) paragrafo §11.4.1, la platea di fondazione è stata modellata con una piastra bidimensionale vincolata in direzione verticale con vincoli elastici di rigidezza pari a 600000 kN/m che simulano la palificata. Il valore di rigidezza dei pali di fondazione è stato determinato attraverso l’elaborazione della curva carico-cedimento dei pali come riportato al successivo §.8.2.1.7. La citata relazione di calcolo strutturale del fabbricato riporta le reazioni vincolari caratteristiche dei pali di fondazione, che sono state combinate secondo le modalità descritte in seguito, in modo da ottenere gli involuipi massimi e minimi, sintetizzate nelle Tabella 7, Tabella 8, Tabella 9 e Tabella 10.

Per ogni palo le reazioni vincolari caratteristiche esplicitate in Tabella 2 sono state combinate secondo i 6+6 gruppi di coefficienti parziali. In tali gruppi di combinazioni si definiscono “favorevoli” le condizioni di carico che incrementano l’azione di compressione sul palo e “sfavorevoli” le condizioni che incrementano l’azione di trazione sul palo.

Per ogni palo e per ogni gruppo di coefficienti parziali si calcolano le risultanti massime di compressione amplificando, secondo i coefficienti riportati nelle Tabella 3-Tabella 4-Tabella 5-Tabella 6, i valori favorevoli e assumendo nulli quelli sfavorevoli.

Analogamente si calcolano le risultanti massime di trazione amplificando, secondo i coefficienti riportati nelle medesime tabelle, i valori sfavorevoli e moltiplicando per 1 i valori favorevoli di carattere permanente e per 0 quelli favorevoli di carattere accidentale. Si specifica che nel SET-1 di coefficienti parziali si considerano come favorevoli i soli pesi propri strutturali, mentre nel SET-2 si considerano come favorevoli anche i carichi permanenti non strutturali.

Si rimanda alla ‘Relazione di calcolo strutturale’ doc.No. IN1712EI2CLFA0300001 per maggiori dettagli sulla determinazione delle singole combinazioni di calcolo considerate.

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE

Progetto  
IN17Lotto  
12Codifica Documento  
EI2 CL TR 03 0 0 001Rev.  
BFoglio  
15 di 51

| No | Name             | Type                  | Description                           |
|----|------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| 1  | G1-1             | Dead Load (D)         | pp modellato                          |
| 2  | G1-2             | Dead Load (D)         | Dead Edificio                         |
| 3  | G2-1             | Dead Load (D)         | perm. Edificio (impianti+finitura+mur |
| 4  | G2-2             | Dead Load (D)         | perm. verticali da magrone piazzale   |
| 5  | G3-2             | Dead Load (D)         | Sottospinta idraulica di 39KN/mq      |
| 6  | Q                | Live Load (L)         | acc. da traffico pari a 20KN/mq       |
| 7  | Q Ed             | Live Load (L)         | Variabile Edificio                    |
| 8  | T+               | Temperature (T)       | acc. termica +15 ac. +10 ca           |
| 9  | T-               | Temperature (T)       | acc. termica -15 ac. -10 ca           |
| 10 | Spinta_terra     | User Defined Load (U) | Spinta terra controfodera             |
| 11 | Spinta_idra      | User Defined Load (U) | Spinta idraulica controfodera         |
| 12 | Spinta_sisma     | User Defined Load (U) | Spinta sismica controfodera           |
| 13 | Sovraspinta_idra | User Defined Load (U) | SovraSpinta idra controfodera         |
| 14 | RSP_X_EDIFICIO   | User Defined Load (U) | SISMA X DA EDIFICIO                   |
| 15 | RSP_Y_EDIFICIO   | User Defined Load (U) | SISMA Y DA EDIFICIO                   |

Tabella 2 Condizioni di carico considerate nell'analisi strutturale della platea di fondazione

|  |  |
|--|--|
| <b>GENERAL CONTRACTOR</b><br><br> | <b>ALTA SORVEGLIANZA</b><br><br> |
| <b>FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE</b>   | Progetto IN17      Lotto 11      Codifica Documento E12 CL TR 03 0 0 001      Rev. A      Foglio 16 di 51          |

- 'SET-1': massima sottospinta idraulica in assenza di carichi permanenti portati stabilizzanti agenti sull'edificio o sul piazzale

|                   |               | G1-1 |      | G2-2 |      | G3-2 | Q    |      | Spinta_terra | Spinta_idra | Spinta_sisma | Sovraspinta_idra |                |                |
|-------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|-------------|--------------|------------------|----------------|----------------|
|                   |               | G1-1 | G1-2 | G2-1 | G2-2 | G3-2 | Q    | Q Ed | Spinta_terra | Spinta_idra | Spinta_sisma | Sovraspinta_idra | RSP_X_EDIFICIO | RSP_Y_EDIFICIO |
| STATICA MAX FALDA | γ favorevole  | 1    | 1    |      |      |      |      |      |              |             |              |                  |                |                |
| STATICA MAX FALDA | γ sfavorevole | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,35 | 1,5  | 1,3          | 1,3         |              |                  |                |                |
| STATICA MAX PESO  | γ favorevole  | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,35 | 1,5  | 1,3          | 1,3         |              |                  |                |                |
| STATICA MAX PESO  | γ sfavorevole | 1    | 1    | 1    |      |      |      |      | 1            |             |              |                  |                |                |
| SISMICA MAX FALDA | γ favorevole  | 1    | 1    | 1    |      |      |      |      |              |             | 1            |                  | 1              | 1              |
| SISMICA MAX FALDA | γ sfavorevole | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1            | 1           | 1            | 1                | 1              | 1              |
| SISMICA MAX PESO  | γ favorevole  | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1            | 1           | 1            | 1                | 1              | 1              |
| SISMICA MAX PESO  | γ sfavorevole | 1    | 1    | 1    |      |      |      |      |              |             | 1            |                  | 1              | 1              |

Tabella 3 Coefficienti parziali condizioni di carico 'SET-1' – SLU-SLV

|                   |               | G1-1 |      | G2-2 |      | G3-2 | Q |      | Spinta_terra | Spinta_idra | Spinta_sisma | Sovraspinta_idra |                |                |
|-------------------|---------------|------|------|------|------|------|---|------|--------------|-------------|--------------|------------------|----------------|----------------|
|                   |               | G1-1 | G1-2 | G2-1 | G2-2 | G3-2 | Q | Q Ed | Spinta_terra | Spinta_idra | Spinta_sisma | Sovraspinta_idra | RSP_X_EDIFICIO | RSP_Y_EDIFICIO |
| STATICA MAX FALDA | γ favorevole  | 1    | 1    |      |      |      |   |      |              |             |              |                  |                |                |
| STATICA MAX FALDA | γ sfavorevole | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1 | 1    | 1            | 1           |              |                  |                |                |
| STATICA MAX PESO  | γ favorevole  | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1 | 1    | 1            | 1           |              |                  |                |                |
| STATICA MAX PESO  | γ sfavorevole | 1    | 1    | 1    |      |      |   |      | 1            |             |              |                  |                |                |

Tabella 4 Coefficienti parziali condizioni di carico 'SET-1' – SLE

|   |  |   |             |  |           |                    |
|---|--|---|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  |  | ALTA SORVEGLIANZA   |             |  |           |                    |
|  |  |  |             |  |           |                    |
| FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE                         |  | Progetto<br>IN17  | Lotto<br>12 | Codifica Documento<br>E12 CL TR 03 0 0 001 | Rev.<br>B | Foglio<br>17 di 51 |

- 'SET-2': massima sottospinta idraulica in presenza di carichi permanenti portati stabilizzanti agenti sull'edificio o sul piazzale

|                   |               | G1-1 |      |      | G2-2 | G3-2 | Q    |      | Spinta_terra | Spinta_idra | Spinta_sisma | Sovraspinta_idra |                |                |
|-------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|-------------|--------------|------------------|----------------|----------------|
|                   |               | G1-1 | G1-2 | G2-1 | G2-2 | G3-2 | Q    | Q Ed | Spinta_terra | Spinta_idra | Spinta_sisma | Sovraspinta_idra | RSP_X_EDIFICIO | RSP_Y_EDIFICIO |
| STATICA MAX FALDA | γ favorevole  | 1    | 1    | 1    | 1    |      |      |      |              |             |              |                  |                |                |
| STATICA MAX FALDA | γ sfavorevole | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,35 | 1,5  | 1,3          | 1,3         |              |                  |                |                |
| STATICA MAX PESO  | γ favorevole  | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,3  | 1,35 | 1,5  | 1,3          | 1,3         |              |                  |                |                |
| STATICA MAX PESO  | γ sfavorevole | 1    | 1    | 1    |      |      |      |      | 1            |             |              |                  |                |                |
| SISMICA MAX FALDA | γ favorevole  | 1    | 1    | 1    |      |      |      |      |              |             | 1            |                  | 1              | 1              |
| SISMICA MAX FALDA | γ sfavorevole | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1            | 1           | 1            | 1                | 1              | 1              |
| SISMICA MAX PESO  | γ favorevole  | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1            | 1           | 1            | 1                | 1              | 1              |
| SISMICA MAX PESO  | γ sfavorevole | 1    | 1    | 1    |      |      |      |      |              |             | 1            |                  | 1              | 1              |

Tabella 5 Coefficienti parziali condizioni di carico 'SET-2' – SLU-SLV

|                   |               | G1-1 |      |      | G2-2 | G3-2 | Q |      | Spinta_terra | Spinta_idra | Spinta_sisma | Sovraspinta_idra |                |                |
|-------------------|---------------|------|------|------|------|------|---|------|--------------|-------------|--------------|------------------|----------------|----------------|
|                   |               | G1-1 | G1-2 | G2-1 | G2-2 | G3-2 | Q | Q Ed | Spinta_terra | Spinta_idra | Spinta_sisma | Sovraspinta_idra | RSP_X_EDIFICIO | RSP_Y_EDIFICIO |
| STATICA MAX FALDA | γ favorevole  | 1    | 1    | 1    | 1    |      |   |      |              |             |              |                  |                |                |
| STATICA MAX FALDA | γ sfavorevole | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1 | 1    | 1            | 1           |              |                  |                |                |
| STATICA MAX PESO  | γ favorevole  | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1 | 1    | 1            | 1           |              |                  |                |                |
| STATICA MAX PESO  | γ sfavorevole | 1    | 1    | 1    |      |      |   |      | 1            |             |              |                  |                |                |

Tabella 6 Coefficienti parziali condizioni di carico 'SET-2' – SLE





Le reazioni vincolari delle combinazioni di carico di progetto ottenute per i set di combinazioni definiti in precedenza sono riportate in Tabella 7 (valori positivi dell'azione assiale indicano compressione). Tali valori sono stati utilizzati per la verifica dei pali per carichi verticali e determinare le lunghezze dei pali (si veda §8.2.1 della presente relazione di calcolo) e per le verifiche strutturali riportate al §8.3.

|                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | 3683  | 684   | 109   | 117   | 115   | 113   | 111   | 109   | 687   | 109   |
| STATICA MAX FALDA | -1370 | -2028 | -2087 | -2268 | -2927 | -3014 | -2926 | -2260 | -1585 | -1585 |
| STATICA MAX PESO  | 2707  | 3156  | 2792  | 2801  | 3622  | 3731  | 3625  | 2804  | 1821  | 2001  |
| SISMICA MAX FALDA | -864  | -915  | -1324 | -1583 | -2046 | -2107 | -2047 | -1579 | -1127 | -1127 |
| SISMICA MAX PESO  | 1107  | 1087  | 730   | 2128  | 2753  | 2835  | 2754  | 2131  | 1387  | 1525  |
|                   | 3811  | 837   | 107   | 99    | 101   | 103   | 105   | 107   | 840   | 107   |
| STATICA MAX FALDA | -1565 | -2164 | -2591 | -2467 | -3205 | -3257 | -3211 | -2457 | -1678 | -1678 |
| STATICA MAX PESO  | 2881  | 3349  | 2859  | 2753  | 3638  | 3681  | 3633  | 2754  | 1841  | 2025  |
| SISMICA MAX FALDA | -1544 | -620  | -1373 | -1766 | -2293 | -2337 | -2303 | -1754 | -1193 | -1193 |
| SISMICA MAX PESO  | 1089  | 1441  | 761   | 2090  | 2760  | 2786  | 2750  | 2097  | 1401  | 1542  |
|                   | 3943  | 1516  | 89    | 97    | 95    | 93    | 91    | 89    | 1519  | 89    |
| STATICA MAX FALDA | -1624 | -1610 | -2570 | -2314 | -3023 | -3080 | -3052 | -2302 | -1729 | -1729 |
| STATICA MAX PESO  | 3424  | 3803  | 3143  | 2972  | 3689  | 3616  | 3592  | 2904  | 1896  | 2075  |
| SISMICA MAX FALDA | -2290 | -72   | -1124 | -1501 | -1976 | -2079 | -2067 | -1499 | -1256 | -1256 |
| SISMICA MAX PESO  | 1058  | 1871  | 981   | 2277  | 2802  | 2732  | 2715  | 2273  | 1423  | 1561  |
|                   | 4221  | 3609  | 87    | 79    | 81    | 83    | 85    | 87    | 3595  | 87    |
| STATICA MAX FALDA | -1788 | -653  | -2084 | -1826 | -2490 | -2564 | -2546 | -1819 | -1509 | -1509 |
| STATICA MAX PESO  | 3759  | 3531  | 2663  | 2673  | 2924  | 2672  | 2727  | 2477  | 1598  | 1762  |
| SISMICA MAX FALDA | -3363 | -191  | -910  | -845  | -1146 | -1285 | -1345 | -926  | -1108 | -1108 |
| SISMICA MAX PESO  | 754   | 1689  | 836   | 2101  | 2384  | 2191  | 2223  | 2044  | 1195  | 1321  |
|                   |       | 3408  | 69    | 77    | 75    | 73    | 71    | 69    | 3408  | 69    |
| STATICA MAX FALDA |       | -637  | -1691 | -1823 | -2293 | -2354 | -2362 | -1840 | -1344 | -1344 |
| STATICA MAX PESO  |       | 2903  | 1929  | 2613  | 3108  | 2884  | 3010  | 2492  | 1439  | 1589  |
| SISMICA MAX FALDA |       | -235  | -768  | -552  | -408  | -449  | -620  | -609  | -740  | -740  |
| SISMICA MAX PESO  |       | 1271  | 542   | 2524  | 3114  | 2968  | 3055  | 2535  | 1374  | 1490  |
|                   |       | 3272  | 3279  | 5154  | 4285  | 4270  | 4894  | 5311  | 3011  | 67    |
| STATICA MAX FALDA |       | -738  | -1557 | -1589 | -1788 | -1797 | -1828 | -1606 | -1380 | -1380 |
| STATICA MAX PESO  |       | 3016  | 2110  | 2927  | 3720  | 3698  | 3634  | 2862  | 1986  | 2134  |
| SISMICA MAX FALDA |       | -918  | -467  | -266  | -130  | -48   | -226  | -270  | -235  | -235  |
| SISMICA MAX PESO  |       | 1055  | 734   | 3069  | 3684  | 3723  | 3644  | 3070  | 2385  | 2499  |
|                   |       | 3094  | 3101  | 2585  | 2599  | 2769  | 2935  | 3101  | 3094  | 3101  |
| STATICA MAX FALDA |       | -682  | -930  | -2124 | -2234 | -2222 | -2246 | -2117 | -1527 | -1527 |
| STATICA MAX PESO  |       | 3778  | 3918  | 4131  | 4640  | 4649  | 4586  | 4074  | 2822  | 2979  |
| SISMICA MAX FALDA |       | -1392 | 799   | -2722 | -2792 | -2741 | -2811 | -2706 | -1900 | -1900 |
| SISMICA MAX PESO  |       | 1254  | 2112  | 1998  | 2359  | 2383  | 2325  | 1967  | 1396  | 1516  |

Tabella 7 Reazioni assiali pali di fondazione – 'SET-1' – SLU-SLV



|                   |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | 3683 | 684   | 109   | 117   | 115   | 113   | 111   | 109   | 687   | 109   |
| STATICA MAX FALDA | -780 | -1427 | -1471 | -1585 | -2047 | -2108 | -2046 | -1580 | -1128 | -1128 |
| STATICA MAX PESO  | 2060 | 2406  | 2126  | 2126  | 2752  | 2834  | 2755  | 2130  | 1386  | 1524  |
|                   | 3811 | 837   | 107   | 99    | 101   | 103   | 105   | 107   | 840   | 107   |
| STATICA MAX FALDA | -790 | -1546 | -1939 | -1763 | -2280 | -2319 | -2285 | -1755 | -1194 | -1194 |
| STATICA MAX PESO  | 2149 | 2554  | 2166  | 2088  | 2766  | 2798  | 2762  | 2091  | 1400  | 1541  |
|                   | 3943 | 1516  | 89    | 97    | 95    | 93    | 91    | 89    | 1519  | 89    |
| STATICA MAX FALDA | -650 | -1027 | -1934 | -1591 | -2075 | -2123 | -2104 | -1580 | -1229 | -1229 |
| STATICA MAX PESO  | 2505 | 2899  | 2388  | 2261  | 2809  | 2753  | 2735  | 2209  | 1440  | 1578  |
|                   | 4221 | 3609  | 87    | 79    | 81    | 83    | 85    | 87    | 3595  | 87    |
| STATICA MAX FALDA | -602 | -91   | -1560 | -1193 | -1649 | -1717 | -1705 | -1187 | -1078 | -1078 |
| STATICA MAX PESO  | 2685 | 2685  | 2026  | 2045  | 2239  | 2047  | 2087  | 1893  | 1213  | 1339  |
|                   |      | 3408  | 69    | 77    | 75    | 73    | 71    | 69    | 3408  | 69    |
| STATICA MAX FALDA |      | -184  | -1298 | -1279 | -1552 | -1611 | -1621 | -1296 | -1002 | -1002 |
| STATICA MAX PESO  |      | 2210  | 1468  | 1996  | 2381  | 2211  | 2302  | 1901  | 1094  | 1210  |
|                   |      | 3272  | 3279  | 5154  | 4285  | 4270  | 4894  | 5311  | 3011  | 67    |
| STATICA MAX FALDA |      | -156  | -1197 | -1107 | -1148 | -1155 | -1190 | -1123 | -1052 | -1052 |
| STATICA MAX PESO  |      | 2251  | 1608  | 2233  | 2843  | 2828  | 2776  | 2183  | 1513  | 1627  |
|                   |      | 3094  | 3101  | 2585  | 2599  | 2769  | 2935  | 3101  | 3094  | 3101  |
| STATICA MAX FALDA |      | 89    | -536  | -1103 | -1123 | -1111 | -1135 | -1096 | -803  | -803  |
| STATICA MAX PESO  |      | 2787  | 2994  | 3035  | 3434  | 3442  | 3393  | 2994  | 2082  | 2202  |

Tabella 8 Reazioni assiali pali di fondazione – ‘SET-1’ – SLE

|                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | 3683  | 684   | 109   | 117   | 115   | 113   | 111   | 109   | 687   | 109   |
| STATICA MAX FALDA | -892  | -1284 | -1254 | -1407 | -1814 | -1865 | -1812 | -1399 | -991  | -852  |
| STATICA MAX PESO  | 2707  | 3156  | 2792  | 2801  | 3622  | 3731  | 3625  | 2804  | 1821  | 2001  |
| SISMICA MAX FALDA | -864  | -915  | -1324 | -1583 | -2046 | -2107 | -2047 | -1579 | -1127 | -1127 |
| SISMICA MAX PESO  | 1585  | 1831  | 1563  | 2128  | 2753  | 2835  | 2754  | 2131  | 1387  | 1525  |
|                   | 3811  | 837   | 107   | 99    | 101   | 103   | 105   | 107   | 840   | 107   |
| STATICA MAX FALDA | -1269 | -1552 | -1755 | -1561 | -2034 | -2066 | -2040 | -1551 | -1118 | -977  |
| STATICA MAX PESO  | 2881  | 3349  | 2859  | 2753  | 3638  | 3681  | 3633  | 2754  | 1841  | 2025  |
| SISMICA MAX FALDA | -1544 | -620  | -1373 | -1766 | -2293 | -2337 | -2303 | -1754 | -1193 | -1193 |
| SISMICA MAX PESO  | 1385  | 2053  | 1596  | 2090  | 2760  | 2786  | 2750  | 2097  | 1401  | 1542  |
|                   | 3943  | 1516  | 89    | 97    | 95    | 93    | 91    | 89    | 1519  | 89    |
| STATICA MAX FALDA | -1442 | -1120 | -1749 | -1380 | -1910 | -2007 | -1990 | -1427 | -1145 | -1007 |
| STATICA MAX PESO  | 3424  | 3803  | 3143  | 2972  | 3689  | 3616  | 3592  | 2904  | 1896  | 2075  |
| SISMICA MAX FALDA | -2290 | -72   | -1124 | -1501 | -1976 | -2079 | -2067 | -1499 | -1256 | -1256 |
| SISMICA MAX PESO  | 1240  | 2362  | 1802  | 2277  | 2802  | 2732  | 2715  | 2273  | 1423  | 1561  |
|                   | 4221  | 3609  | 87    | 79    | 81    | 83    | 85    | 87    | 3595  | 87    |
| STATICA MAX FALDA | -1721 | -276  | -1395 | -1031 | -1721 | -1917 | -1909 | -1200 | -1009 | -883  |
| STATICA MAX PESO  | 3759  | 3531  | 2663  | 2673  | 2924  | 2672  | 2727  | 2477  | 1598  | 1762  |
| SISMICA MAX FALDA | -3363 | -191  | -910  | -845  | -1146 | -1285 | -1345 | -926  | -1108 | -1108 |
| SISMICA MAX PESO  | 754   | 2067  | 1525  | 2101  | 2384  | 2191  | 2223  | 2044  | 1195  | 1321  |
|                   |       | 3408  | 69    | 77    | 75    | 73    | 71    | 69    | 3408  | 69    |
| STATICA MAX FALDA |       | -197  | -1158 | -1204 | -1607 | -1753 | -1796 | -1358 | -947  | -831  |
| STATICA MAX PESO  |       | 2903  | 1929  | 2613  | 3108  | 2884  | 3010  | 2492  | 1439  | 1589  |
| SISMICA MAX FALDA |       | -235  | -768  | -552  | -408  | -449  | -620  | -609  | -740  | -740  |
| SISMICA MAX PESO  |       | 1711  | 1074  | 2524  | 3114  | 2968  | 3055  | 2535  | 1374  | 1490  |
|                   |       | 3272  | 3279  | 5154  | 4285  | 4270  | 4894  | 5311  | 3011  | 67    |
| STATICA MAX FALDA |       | -350  | -1059 | -1048 | -1063 | -1072 | -1159 | -1099 | -1001 | -887  |
| STATICA MAX PESO  |       | 3016  | 2110  | 2927  | 3720  | 3698  | 3634  | 2862  | 1986  | 2134  |
| SISMICA MAX FALDA |       | -918  | -467  | -266  | -130  | -48   | -226  | -270  | -235  | -235  |
| SISMICA MAX PESO  |       | 1443  | 1232  | 3069  | 3684  | 3723  | 3644  | 3070  | 2385  | 2499  |
|                   |       | 3094  | 3101  | 2585  | 2599  | 2769  | 2935  | 3101  | 3094  | 3101  |
| STATICA MAX FALDA |       | -306  | -382  | -1277 | -1316 | -1292 | -1337 | -1272 | -986  | -866  |
| STATICA MAX PESO  |       | 3778  | 3918  | 4131  | 4640  | 4649  | 4586  | 4074  | 2822  | 2979  |
| SISMICA MAX FALDA |       | -1392 | 799   | -2722 | -2792 | -2741 | -2811 | -2706 | -1900 | -1900 |
| SISMICA MAX PESO  |       | 1631  | 2659  | 1998  | 2359  | 2383  | 2325  | 1967  | 1396  | 1516  |

Tabella 9 Reazioni assiali pali di fondazione – ‘SET-2’ – SLU-SLV



|                   |      |      |       |      |       |       |       |      |      |      |
|-------------------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|
|                   | 3683 | 684  | 109   | 117  | 115   | 113   | 111   | 109  | 687  | 109  |
| STATICA MAX FALDA | -302 | -683 | -638  | -724 | -933  | -958  | -932  | -719 | -534 | -395 |
| STATICA MAX PESO  | 2060 | 2406 | 2126  | 2126 | 2752  | 2834  | 2755  | 2130 | 1386 | 1524 |
|                   | 3811 | 837  | 107   | 99   | 101   | 103   | 105   | 107  | 840  | 107  |
| STATICA MAX FALDA | -494 | -934 | -1104 | -856 | -1109 | -1127 | -1114 | -849 | -634 | -493 |
| STATICA MAX PESO  | 2149 | 2554 | 2166  | 2088 | 2766  | 2798  | 2762  | 2091 | 1400 | 1541 |
|                   | 3943 | 1516 | 89    | 97   | 95    | 93    | 91    | 89   | 1519 | 89   |
| STATICA MAX FALDA | -468 | -537 | -1113 | -658 | -962  | -1050 | -1041 | -705 | -645 | -506 |
| STATICA MAX PESO  | 2505 | 2899 | 2388  | 2261 | 2809  | 2753  | 2735  | 2209 | 1440 | 1578 |
|                   | 4221 | 3609 | 87    | 79   | 81    | 83    | 85    | 87   | 3595 | 87   |
| STATICA MAX FALDA | -535 | 287  | -871  | -398 | -880  | -1070 | -1068 | -567 | -578 | -452 |
| STATICA MAX PESO  | 2685 | 2685 | 2026  | 2045 | 2239  | 2047  | 2087  | 1893 | 1213 | 1339 |
|                   |      | 3408 | 69    | 77   | 75    | 73    | 71    | 69   | 3408 | 69   |
| STATICA MAX FALDA |      | 256  | -765  | -659 | -866  | -1009 | -1055 | -814 | -604 | -488 |
| STATICA MAX PESO  |      | 2210 | 1468  | 1996 | 2381  | 2211  | 2302  | 1901 | 1094 | 1210 |
|                   |      | 3272 | 3279  | 5154 | 4285  | 4270  | 4894  | 5311 | 3011 | 67   |
| STATICA MAX FALDA |      | 232  | -699  | -565 | -424  | -430  | -521  | -617 | -673 | -559 |
| STATICA MAX PESO  |      | 2251 | 1608  | 2233 | 2843  | 2828  | 2776  | 2183 | 1513 | 1627 |
|                   |      | 3094 | 3101  | 2585 | 2599  | 2769  | 2935  | 3101 | 3094 | 3101 |
| STATICA MAX FALDA |      | 466  | 12    | -256 | -205  | -181  | -225  | -251 | -263 | -143 |
| STATICA MAX PESO  |      | 2787 | 2994  | 3035 | 3434  | 3442  | 3393  | 2994 | 2082 | 2202 |

Tabella 10 Reazioni assiali pali di fondazione – ‘SET-2’ – SLE

Per i set di combinazione ‘SET-1’ e ‘SET-2’ sopra definiti, le massime e minime azioni assiali risultano essere le seguenti (Tabella 11), valori positivi indicano azioni di compressione. Con tali azioni sono state eseguite le verifiche geotecniche e strutturali riportate dei pali riportate nei paragrafi 8.2 e 0.

| Combinazione                            | AZIONI ASSIALI PALI           |                               |
|---|-------------------------------|-------------------------------|
|   | N <sub>max</sub><br>(kN/palo) | N <sub>min</sub><br>(kN/palo) |
| STATICA MAX FALDA (SLU1) – SET 1        | -637                          | <b>-3257</b>                  |
| STATICA MAX PESO (SLU2) – SET 1         | <b>4649</b>                   | 1439                          |
| SISMICA MAX FALDA (SLV SISMA 1) – SET 1 | 799                           | <b>-3363</b>                  |
| SISMICA MAX PESO (SLV SISMA 2) – SET 1  | 3114                          | 542                           |

Tabella 11 Azioni assiali pali di fondazione massime e minime – SLU-SLV

| Combinazione                          | AZIONI ASSIALI PALI           |                               |
|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                                       | N <sub>max</sub><br>(kN/palo) | N <sub>min</sub><br>(kN/palo) |
| STATICA MAX FALDA (SLE RARA1) – SET 1 | 89                            | <b>-2319</b>                  |
| STATICA MAX PESO (SLE RARA2) – SET 1  | <b>3442</b>                   | 1094                          |
| STATICA MAX FALDA (SLE RARA1) – SET 2 | 466                           | <b>-1127</b>                  |

Tabella 12 Azioni assiali pali di fondazione massime e minime – SLE

Le combinazioni di carico SET 2 sono state utilizzate esclusivamente per le verifiche a fessurazione dei pali in quanto le combinazioni di SET 1 corrispondono ad uno scenario eccezionale di carico in cui è presente la massima sottospinta idraulica in assenza dei carichi permanenti dell’edificio e della platea.



## 7.2.2 Determinazione sollecitazioni taglianti testa pali

Come indicato in precedenza, i pali sono sollecitati a taglio dalle coazioni che si generano in testa agli stessi per effetto delle azioni termiche e di ritiro agenti sulla platea di fondazione.

Per stimare i valori di queste azioni di taglio si calcola il valore di spostamento massimo della platea per effetto di azioni termiche e ritiro, ipotizzando una libera deformazione della stessa.

### 7.2.2.1 Calcolo azioni da ritiro sulla platea

Gli effetti del ritiro vanno valutati a “lungo termine” attraverso il calcolo dei coefficienti di ritiro finale  $\epsilon_{cs}(t, t_0)$  e di viscosità  $\phi(t, t_0)$ , come definiti nell'EC 2- UNI EN 1992-1-1 Novembre 2005 e D. M.14-01-2008.

L'analisi viene svolta per una striscia di larghezza unitaria della sola fondazione, assumendo la dimensione convenzionale  $h_0$  pari a  $2 \times A/u = 2 \times H$ , ed un calcestruzzo C30/37 classe N.

|   |   |      |               |   |                      |                      |          |
|---|---|------|---------------|---|----------------------|----------------------|----------|
| Concrete class                              | f <sub>ck</sub> (Mpa)                     | 30,7 | N             | concrete class  | $\alpha_{ds1}$       | $\alpha_{ds2}$       | $\alpha$ |
| Concrete elastic modulus                    | E <sub>cm</sub> (Gpa)                     | =    | 33,019        | S   | 3                    | 0,13                 | -1       |
| linear coefficient of thermal expansion     | $\alpha_{thermal}$                        | =    | 1,00E-05      | N   | 4                    | 0,12                 | 0        |
| element thickness                           | s (mm)                                    | =    | 800           | R   | 6                    | 0,11                 | 1        |
| exposed surfaces                            | n°  | =    | 1             | <b>K<sub>h</sub> value</b>                              | <b>h<sub>0</sub></b> | <b>k<sub>h</sub></b> |          |
| member's notional size $\alpha=2Ac/u h_0$   | $\alpha$ (mm)                             | =    | 1600          |   | 100                  | 1                    |          |
| relative humidity                           | UR%                                       | =    | 75            |   | 200                  | 0,85                 |          |
| age of concrete in days                     | t (gg)                                    | =    | 54750         |   | 300                  | 0,75                 |          |
| age at the beginning of drying shrinkage    | t <sub>s</sub> (gg)                       | =    | 2             |   | >500                 | 0,7                  |          |
| age of concrete at loading in days          | t <sub>0</sub> (gg)                       | =    | 2             | <b>parameters for E<sub>long term</sub> calculation</b> |                      |                      |          |
| coefficient which depends on the type of ce | $\alpha_{ds1}$                            | =    | 4             | $\alpha_1$  | 0,932                |                      |          |
| coefficient which depends on the type of ce | $\alpha_{ds2}$                            | =    | 0,12          | $\alpha_2$  | 0,980                |                      |          |
| reference mean compressive strength         | f <sub>cm0</sub> (Mpa)                    | =    | 10            | $\alpha_3$  | 0,951                |                      |          |
| characteristic compressive strength         | f <sub>ck</sub> (Mpa)                     | =    | 30,71         | $\alpha$  | 0,000                |                      |          |
| mean compressive strength                   | f <sub>cm</sub> (Mpa)                     | =    | 38,71         | t <sub>0</sub> (modified)                               | 2,000                |                      |          |
| coefficient for UR%                         | $\beta_{RH}$                              | =    | 0,896         | $\phi_{RH}$   | 1,195                |                      |          |
| basic drying shrinkage strain               | $\epsilon_{cd0}$                          | =    | 3,16E-04      | $\beta(t_0)$  | 0,801                |                      |          |
| drying shrinkage strain - time effect       | $\beta_{ds}(t, t_s)$                      | =    | 0,955         | $\beta(f_{cm})$   | 2,700                |                      |          |
| coefficient depending on the notional size  | k <sub>h</sub>                            | =    | 0,7           |   | 1500                 |                      |          |
| drying shrinkage strain x1000               | $\epsilon_{cd}(t)$                        | =    | 0,2113        |   | 1426                 |                      |          |
| autogenous shrinkage strain-time effect     | $\beta_{as}(t)$                           | =    | 1,0000        | $\beta_H$   | 1426                 |                      |          |
| autogenous shrinkage strain - infinity      | $\epsilon_{ca}(\infty)$                   | =    | 5,18E-05      | $\phi_0$  | 2,585                |                      |          |
| autogenous shrinkage strain x1000           | $\epsilon_{ca}(t)$                        | =    | 0,0518        | $\beta_c(t, t_0)$                                       | 0,992                |                      |          |
| <b>total shrinkage strain x1000</b>         | <b><math>\epsilon_{cs}(t, t_s)</math></b> | =    | <b>0,2630</b> | $\phi(t, t_0)$  | 2,565                |                      |          |
| <b>Equivalent thermal effect</b>            | <b><math>\Delta T</math> °C</b>           | =    | <b>7,38</b>   | <b>E<sub>cm</sub>(t, t<sub>0</sub>)</b>                 | 9,263                |                      |          |

Tabella 13 Determinazione azioni da ritiro sui pali FA03

Si ottiene un valore di azione termica equivalente pari a 7.38°C.

### 7.2.2.2 Azioni termiche sulla platea

In accordo al §3.5.5 delle NTC2008, nel caso in cui la temperatura non costituisca azione fondamentale per la sicurezza, come nel caso in esame, è possibile considerare un valore di  $\Delta T_u$  per strutture protette pari a  $\pm 10$  °C. L'assunzione risulta giustificata dal fatto che al di sopra del solettone sono presenti circa 80 cm di finitura.



In accordo, inoltre, con il §4.1.1.1 delle NTC2008, per la determinazione degli effetti delle azioni termiche e del ritiro le analisi saranno effettuate assumendo:

- per gli stati limite ultimi, rigidzze ridotte valutate ipotizzando che le sezioni siano fessurate (in assenza di valutazioni più precise la rigidzza delle sezioni fessurate potrà essere assunta pari alla metà della rigidzza delle sezioni interamente reagenti);
- per gli stati limite di esercizio, rigidzze intermedie tra quelle delle sezioni interamente reagenti e quelle delle sezioni fessurate.

Nei calcoli a seguire si ridurranno quindi gli effetti delle azioni termiche e del ritiro, ipotizzando una riduzione del 50% allo stato limite ultimo e del 75% allo stato limite di esercizio.

$$\Delta T_{\text{ridotto}}(\text{SLE}) = \pm 10^{\circ}\text{C} \cdot 0.75 = 7.5^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{ridotto}}(\text{SLU}) = \pm 10^{\circ}\text{C} \cdot 1.5 \cdot 0.5 = 7.5^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{ritiro}}_{\text{ridotto}}(\text{SLE}) = \pm 7.4^{\circ}\text{C} \cdot 0.75 = 5.55^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{ritiro}}_{\text{ridotto}}(\text{SLU}) = \pm 7.4^{\circ}\text{C} \cdot 1.2 \cdot 0.5 = 4.5^{\circ}\text{C}$$

Gli effetti della termica e del ritiro sono quindi equivalenti in esercizio e allo stato limite ultimo.

Considerando la presenza di giunti di contrazione in direzione longitudinale, le massime distanze tra i pali, nelle due direzioni sono:

$$L_L = 27.40\text{m}$$

$$L_T = 30.30\text{m}$$

Si calcolano a seguire i massimi spostamenti dovuti all'azione termica ed al ritiro ad una distanza pari a  $L_L/2$  e  $L_T/2$  dagli assi di mezzzeria del concio di platea.

$$\Delta s_L = \alpha \frac{\Delta L_L}{2} (\Delta T_{\text{ridotto}} + \Delta T_{\text{ritiro}}_{\text{ridotto}}) = 1.78\text{mm}$$

$$\Delta s_T = \alpha \frac{\Delta L_T}{2} (\Delta T_{\text{ridotto}} + \Delta T_{\text{ritiro}}_{\text{ridotto}}) = 1.98\text{mm}$$

$$\Delta s = \sqrt{\Delta s_T^2 + \Delta s_L^2} = 2.66\text{mm}$$

Il calcolo dei valori di spostamento si ritiene cautelativo in quanto vengono completamente trascurati gli effetti dell'attrito tra platea e terreno e il contributo di rigidzza dei pali.

|  |  |             |  |           |                    |
|--|--|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR<br><br>IRICAV2 | ALTA SORVEGLIANZA<br><br>ITALFERR<br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |             |  |           |                    |
| FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE  | Progetto<br>IN17   | Lotto<br>12 | Codifica Documento<br>EI2 CL TR 03 0 0 001 | Rev.<br>B | Foglio<br>24 di 51 |

### 7.2.3 Determinazione sollecitazioni taglianti e flettenti sui pali di fondazione

Noti i valori di spostamento in testa ai pali, per effetto delle azioni termiche e di ritiro, lo studio del comportamento del singolo palo, soggetto ad uno spostamento imposto alla testa impedita di ruotare, permette di determinare le sollecitazioni flettenti e taglianti lungo il fusto del palo.

Tale studio è effettuato utilizzando le note correlazioni proposte da Matlock & Reese, che si ritengono applicabili, considerati i valori di spostamento calcolati che sono inferiori a 1 cm e, quindi, tali da mantenere la risposta palo terreno in campo sostanzialmente elastico.

La deformata elastica del palo immerso nel terreno è dato dalla seguente espressione:

$$EJ \frac{d^4 Y}{dx^4} + E_s Y = 0$$

dove:

EJ = rigidezza flessionale del palo

Y = spostamento del palo alla profondità z da p.c.

E<sub>s</sub> = k<sub>h</sub> z = modulo di reazione orizzontale del terreno

k<sub>h</sub> = gradiente del modulo orizzontale con la profondità

L'equazione differenziale può essere risolta con il metodo delle differenze finite, calcolando i parametri adimensionali che sono riportati per diverse leggi di variazione di E<sub>s</sub> con la profondità z. I valori delle grandezze adimensionali sono funzione della legge di variazione del modulo di reazione orizzontale del terreno con la profondità e della flessibilità del palo.

Mediante le relazioni sopra riportate, imposti i valori di spostamento in testa palo determinati al precedente §7.2.2.2, si è provveduto a calcolare il momento flettente e il taglio a quota testa pali e lungo il fusto.

La tabella dei coefficienti adimensionali nel caso di modulo E<sub>s</sub> costante con la profondità è di seguito riportata



| Ay     | As     | Am     | Av     | By     | Bs     | Bm     | Bv     |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,412  | -0,998 | 0,000  | 1,000  | 0,998  | -1,412 | 1,000  | 0,000  |
| 1,313  | -0,993 | 0,093  | 0,864  | 0,861  | -1,313 | 0,995  | -0,093 |
| 1,214  | -0,980 | 0,173  | 0,738  | 0,735  | -1,214 | 0,981  | -0,173 |
| 1,117  | -0,959 | 0,240  | 0,621  | 0,618  | -1,117 | 0,960  | -0,240 |
| 1,022  | -0,932 | 0,297  | 0,514  | 0,512  | -1,022 | 0,933  | -0,297 |
| 0,930  | -0,900 | 0,343  | 0,416  | 0,414  | -0,930 | 0,901  | -0,343 |
| 0,842  | -0,864 | 0,380  | 0,328  | 0,326  | -0,842 | 0,865  | -0,380 |
| 0,758  | -0,824 | 0,409  | 0,248  | 0,246  | -0,758 | 0,825  | -0,409 |
| 0,677  | -0,783 | 0,430  | 0,176  | 0,174  | -0,677 | 0,783  | -0,430 |
| 0,601  | -0,739 | 0,444  | 0,112  | 0,110  | -0,601 | 0,739  | -0,444 |
| 0,529  | -0,694 | 0,452  | 0,056  | 0,054  | -0,529 | 0,694  | -0,452 |
| 0,400  | -0,603 | 0,453  | -0,037 | -0,039 | -0,400 | 0,603  | -0,453 |
| 0,288  | -0,514 | 0,438  | -0,106 | -0,107 | -0,288 | 0,514  | -0,438 |
| 0,194  | -0,429 | 0,412  | -0,154 | -0,155 | -0,194 | 0,428  | -0,412 |
| 0,116  | -0,350 | 0,378  | -0,185 | -0,185 | -0,116 | 0,349  | -0,378 |
| 0,054  | -0,278 | 0,339  | -0,201 | -0,202 | -0,054 | 0,277  | -0,339 |
| -0,047 | -0,134 | 0,236  | -0,200 | -0,201 | 0,047  | 0,134  | -0,236 |
| -0,088 | -0,040 | 0,144  | -0,164 | -0,165 | 0,088  | 0,039  | -0,144 |
| -0,093 | 0,014  | 0,074  | -0,118 | -0,118 | 0,093  | -0,014 | -0,074 |
| -0,079 | 0,038  | 0,026  | -0,074 | -0,074 | 0,079  | -0,030 | -0,026 |
| -0,059 | 0,043  | -0,002 | -0,040 | -0,040 | 0,059  | -0,043 | 0,002  |
| -0,038 | 0,038  | -0,016 | -0,016 | -0,016 | 0,038  | -0,038 | 0,016  |
| 0,000  | -0,002 | 0,000  | 0,000  | -0,002 | -0,003 | 0,000  | 0,000  |

Tabella 14 Coefficienti adimensionali Matlock &amp; Reese

Nel caso di modulo  $E_s$  variabile con la profondità, come nella situazione in esame, l'analisi viene effettuata facendo riferimento ad un modulo medio calcolato tra la profondità della testa del palo  $z_t$  e  $z_t + 3 \div 4$  volte il diametro del palo. Le profondità suddette sono riferite al p.c. originario.

A partire dalle massime sollecitazioni taglianti riportate in Tabella 16 si è proceduto al calcolo delle sollecitazioni flettenti quota testa e lungo il fusto del palo. I risultati di tali calcoli sono mostrati di seguito.



## Dati pali

| D (m) | Ep (KPa)    | Lpalo (m) | Ip (m <sup>4</sup> ) | Ap (m <sup>2</sup> ) |
|-------|-------------|-----------|----------------------|----------------------|
| 1     | 31475806,21 | 28        | 0,0491               | 0,79                 |

| Z <sub>T D.A.P.C.</sub> (m) | Z <sub>T+4D</sub> | Z <sub>medio</sub> | K <sub>ai</sub> (kNm <sup>3</sup> ) | Es (kPa) | L <sub>fuori-terra</sub> (m) |
|-----------------------------|-------------------|--------------------|-------------------------------------|----------|------------------------------|
| 5                           | 9                 | 7                  | 12000                               | 84000    | 0                            |

| T    | Z     | L <sub>fuori terra</sub> /T |
|------|-------|-----------------------------|
| 2,07 | 13,52 | 0,000                       |

## Massime azioni in testa al palo

| H     | M      | Unità    |
|-------|--------|----------|
| 328,0 | -480,0 | kN / kNm |

## Azioni nella sezione a quota z= 4,5 dalla testa del palo

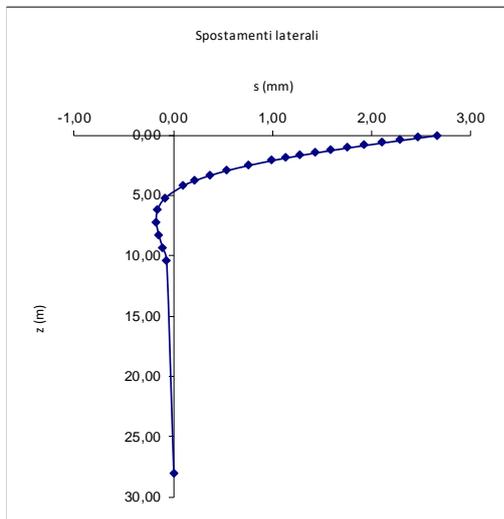
| H    | M    | Unità    |
|------|------|----------|
| 12,5 | 97,0 | kN / kNm |

| Z    | z (m) | Ay     | As     | Am     | Av     | By     | Bs     | Bm     | Bv     | s (mm) | θ (rad) | Mi (kNm) | Hi (kN) |
|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|----------|---------|
| 0,0  | 0,00  | 1,412  | -0,998 | 0,000  | 1,000  | 0,998  | -1,412 | 1,000  | 0,000  | 2,66   | 0,0000  | -480,0   | 328,0   |
| 0,1  | 0,21  | 1,313  | -0,993 | 0,093  | 0,864  | 0,861  | -1,313 | 0,995  | -0,093 | 2,47   | -0,0001 | -414,5   | 305,0   |
| 0,2  | 0,41  | 1,214  | -0,980 | 0,173  | 0,738  | 0,735  | -1,214 | 0,981  | -0,173 | 2,29   | -0,0002 | -353,4   | 282,2   |
| 0,3  | 0,62  | 1,117  | -0,959 | 0,240  | 0,621  | 0,618  | -1,117 | 0,960  | -0,240 | 2,11   | -0,0003 | -297,8   | 259,3   |
| 0,4  | 0,83  | 1,022  | -0,932 | 0,297  | 0,514  | 0,512  | -1,022 | 0,933  | -0,297 | 1,93   | -0,0004 | -246,2   | 237,4   |
| 0,5  | 1,04  | 0,930  | -0,900 | 0,343  | 0,416  | 0,414  | -0,930 | 0,901  | -0,343 | 1,75   | -0,0005 | -199,6   | 216,0   |
| 0,6  | 1,24  | 0,842  | -0,864 | 0,380  | 0,328  | 0,326  | -0,842 | 0,865  | -0,380 | 1,59   | -0,0005 | -157,1   | 195,7   |
| 0,7  | 1,45  | 0,758  | -0,824 | 0,409  | 0,248  | 0,246  | -0,758 | 0,825  | -0,409 | 1,43   | -0,0005 | -118,3   | 176,2   |
| 0,8  | 1,66  | 0,677  | -0,783 | 0,430  | 0,176  | 0,174  | -0,677 | 0,783  | -0,430 | 1,28   | -0,0006 | -83,8    | 157,4   |
| 0,9  | 1,86  | 0,601  | -0,739 | 0,444  | 0,112  | 0,110  | -0,601 | 0,739  | -0,444 | 1,13   | -0,0006 | -53,2    | 139,7   |
| 1,0  | 2,07  | 0,529  | -0,694 | 0,452  | 0,056  | 0,054  | -0,529 | 0,694  | -0,452 | 1,00   | -0,0006 | -26,2    | 123,2   |
| 1,2  | 2,48  | 0,400  | -0,603 | 0,453  | -0,037 | -0,039 | -0,400 | 0,603  | -0,453 | 0,75   | -0,0006 | 18,2     | 92,9    |
| 1,4  | 2,90  | 0,288  | -0,514 | 0,438  | -0,106 | -0,107 | -0,288 | 0,514  | -0,438 | 0,54   | -0,0006 | 50,7     | 66,8    |
| 1,6  | 3,31  | 0,194  | -0,429 | 0,412  | -0,154 | -0,155 | -0,194 | 0,428  | -0,412 | 0,37   | -0,0006 | 74,4     | 45,0    |
| 1,8  | 3,73  | 0,116  | -0,350 | 0,378  | -0,185 | -0,185 | -0,116 | 0,349  | -0,378 | 0,22   | -0,0005 | 89,2     | 27,0    |
| 2,0  | 4,14  | 0,054  | -0,278 | 0,339  | -0,201 | -0,202 | -0,054 | 0,277  | -0,339 | 0,10   | -0,0005 | 97,3     | 12,7    |
| 2,5  | 5,18  | -0,047 | -0,134 | 0,236  | -0,200 | -0,201 | 0,047  | 0,134  | -0,236 | -0,09  | -0,0003 | 96,0     | -10,9   |
| 3,0  | 6,21  | -0,088 | -0,040 | 0,144  | -0,164 | -0,165 | 0,088  | 0,039  | -0,144 | -0,17  | -0,0002 | 79,1     | -20,4   |
| 3,5  | 7,25  | -0,093 | 0,014  | 0,074  | -0,118 | -0,118 | 0,093  | -0,014 | -0,074 | -0,18  | -0,0001 | 57,0     | -21,5   |
| 4,0  | 8,28  | -0,079 | 0,038  | 0,026  | -0,074 | -0,074 | 0,079  | -0,030 | -0,026 | -0,15  | 0,0000  | 32,1     | -18,2   |
| 4,5  | 9,32  | -0,059 | 0,043  | -0,002 | -0,040 | -0,040 | 0,059  | -0,043 | 0,002  | -0,11  | 0,0000  | 19,3     | -13,6   |
| 5,0  | 10,35 | -0,038 | 0,038  | -0,016 | -0,016 | -0,016 | 0,038  | -0,038 | 0,016  | -0,07  | 0,0000  | 7,4      | -9,0    |
| 13,5 | 28,00 | 0,000  | -0,002 | 0,000  | 0,000  | -0,002 | -0,003 | 0,000  | 0,000  | 0,00   | 0,0000  | 0,0      | 0,0     |

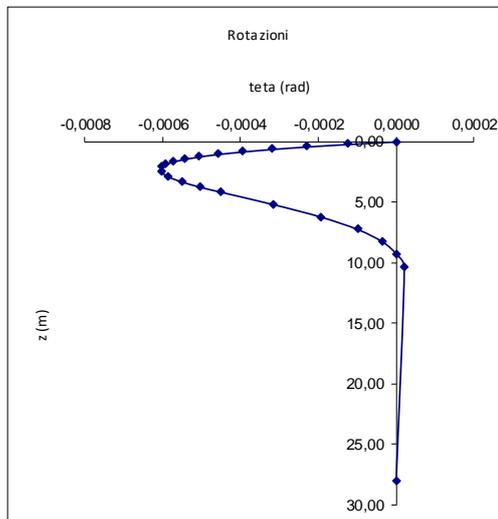
Tabella 15 Determinazioni azioni flettenti quota testa e lungo fusto palo



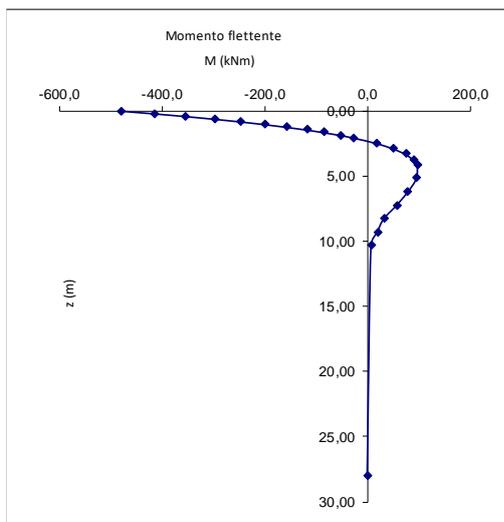
**Spostamento laterale lungo l'asse del palo**



**Rotazione lungo l'asse del palo**



**Andamento del momento flettente**



**Andamento del taglio**

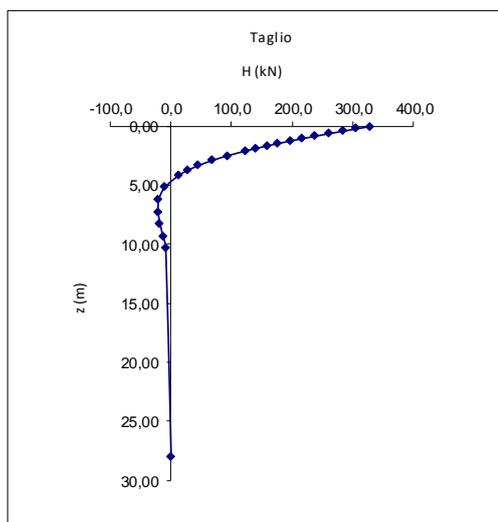


Figura 6 Distribuzione spostamenti ed azioni flettenti e taglianti lungo il fusto dei pali

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE

Progetto  
IN17Lotto  
12Codifica Documento  
EI2 CL TR 03 0 0 001Rev.  
BFoglio  
28 di 51

| Coefficienti parziali | $V_{Ed}$ (kN) | $M_{Ed}$ (kNm) |
|-----------------------|---------------|----------------|
| SLE - rara            | 328           | -480           |
| SLU                   | 328           | -480           |

Tabella 16 Massime sollecitazioni - sezione di testa palo

| Coefficienti parziali | $V_{Ed}$ (kN) | $M_{Ed}$ (kNm) |
|-----------------------|---------------|----------------|
| SLE - rara            | 16            | 26             |
| SLU                   | 16            | 26             |

Tabella 17 Massime sollecitazioni – fusto palo

|   |   |  |             |  |           |                    |
|---|---|--|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR<br><br><b>IRICAV2</b> | ALTA SORVEGLIANZA<br><br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE   |  |             |  |           |                    |
| FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE   | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">Progetto<br/>IN17</td> <td style="width: 15%;">Lotto<br/>12</td> <td style="width: 35%;">Codifica Documento<br/>EI2 CL TR 03 0 0 001</td> <td style="width: 10%;">Rev.<br/>B</td> <td style="width: 25%;">Foglio<br/>29 di 51</td> </tr> </table> | Progetto<br>IN17                           | Lotto<br>12 | Codifica Documento<br>EI2 CL TR 03 0 0 001 | Rev.<br>B | Foglio<br>29 di 51 |
| Progetto<br>IN17  | Lotto<br>12   | Codifica Documento<br>EI2 CL TR 03 0 0 001 | Rev.<br>B   | Foglio<br>29 di 51                         |           |                    |

## 8 VERIFICHE DEI PALI DI FONDAZIONE

### 8.1 Riepilogo sollecitazioni di verifica

Le sollecitazioni di verifica per tipologia di palo desunte dalle analisi condotte al § 7 sono riassunte nelle tabelle seguenti, valori positivi dell'azione assiale indica compressione. Esse si riferiscono alla quota di testa palo dove si prevede il quantitativo maggiore di armatura.

| Comb.                 | Nmax<br>(kN/palo) | Nmin<br>(kN/palo) | Vmax<br>(kN/palo) | Mmax<br>(kNm/palo) |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| SLE RARA1 – 'SET-1'   | 89                | -2319             | 328               | 480                |
| SLE RARA2 – 'SET-1'   | <b>3442</b>       | 1094              |                   |                    |
| SLE RARA1 – 'SET-2'   | 466               | <b>-1127</b>      |                   |                    |
| SLU1 – 'SET-1'        | -637              | -3257             | 328               | 480                |
| SLU2 – 'SET-1'        | <b>4649</b>       | 1439              |                   |                    |
| SLV SISMA 1 – 'SET-1' | 799               | <b>-3363</b>      | 328               | 480                |
| SLV SISMA 2 – 'SET-1' | <b>3114</b>       | 542               |                   |                    |

Tabella 18 - Sollecitazioni di progetto a quota testa pali

Per le porzioni di palo dove si prevede l'utilizzo della sola armatura corrente, le sollecitazioni di progetto sono riassunte nella seguente tabella. Si rimanda alla sezione §8.3 per maggiori dettagli sulle verifiche strutturali.

| Comb.                 | Nmax<br>(kN/palo) | Nmin<br>(kN/palo) | Vmax<br>(kN/palo) | Mmax<br>(kNm/palo) |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| SLE RARA1 – 'SET-1'   | 89                | -2319             | 16                | 26                 |
| SLE RARA2 – 'SET-1'   | <b>3442</b>       | 1094              |                   |                    |
| SLE RARA1 – 'SET-2'   | 466               | <b>-1127</b>      |                   |                    |
| SLU1 – 'SET-1'        | -637              | -3257             | 16                | 26                 |
| SLU2 – 'SET-1'        | <b>4649</b>       | 1439              |                   |                    |
| SLV SISMA 1 – 'SET-1' | 799               | <b>-3363</b>      | 16                | 26                 |
| SLV SISMA 2 – 'SET-1' | <b>3114</b>       | 542               |                   |                    |

Tabella 19 - Sollecitazioni di progetto armatura corrente

|   |   |             |  |           |                    |
|---|---|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR<br><br><b>IRICAV2</b> | ALTA SORVEGLIANZA<br><br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |             |  |           |                    |
| FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE   | Progetto<br>IN17  | Lotto<br>12 | Codifica Documento<br>EI2 CL TR 03 0 0 001 | Rev.<br>B | Foglio<br>30 di 51 |

## 8.2 Verifiche geotecniche dei pali di fondazione

Ai fini del progetto delle fondazioni, sono stati considerati sia gli stati limite di esercizio (SLE) sia gli stati limite ultimi (SLU). In generale, le analisi degli stati limite di esercizio (SLE) sono utilizzate per ottenere informazioni circa gli spostamenti attesi sotto i carichi di esercizio e per verificarne l'ammissibilità nei confronti della funzionalità dell'opera. Le analisi agli stati limite ultimi (SLU) sono impiegate per le verifiche di resistenza degli elementi strutturali e per le verifiche geotecniche.

### 8.2.1 Verifica dei pali nei confronti dei carichi verticali

Le verifiche di capacità portante dei pali vengono svolte secondo la metodologia degli stati limite ultimi, in accordo alla normativa vigente. La verifica della capacità portante dei pali è soddisfatta se:

$$F_{cd} < R_{cd}$$

essendo  $R_{cd} = R_k / \gamma_R$

dove:

$F_{cd}$  = carico assiale di compressione di progetto

$R_{cd}$  = capacità portante di progetto nei confronti dei carichi assiali

$R_k$  = valore caratteristico della capacità portante limite del palo

In particolare le verifiche di capacità portante dei pali agli stati limite ultimi (SLU) vengono condotte secondo la combinazione (A1+M1+R3) tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali delle tabelle di normativa 6.2.I, 6.2.II e 6.4.VI. La resistenza di progetto a compressione  $R_{c,d}$  è calcolata applicando al valore caratteristico della resistenza  $R_{c,k}$  i coefficienti parziali  $\gamma_R$  riportati in Tabella 20 (tabella di normativa 6.4.II), relativi alla condizione di pali trivellati.

Il valore caratteristico della resistenza  $R_{c,k}$  a compressione del palo (o a trazione  $R_{tk}$ ) è ottenuto applicando i fattori di correlazione  $\xi_3$  e  $\xi_4$  (vedasi tabella seguente) alle resistenze di calcolo  $R_{c,cal}$  (o  $R_{t,cal}$ ); tali fattori di correlazione sono funzione del numero di verticali d'indagine rappresentative (tabella di normativa 6.4.IV).

In condizioni sismiche le verifiche di capacità portante dei pali agli stati limite ultimi vanno condotte con riferimento allo stesso approccio utilizzato per le condizioni statiche (A1+M1+R3), tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nella successiva tabella e ponendo i coefficienti parziali sulle azioni tutti pari all'unità.

| Resistenza               | Simbolo       | Pali infissi | Pali trivellati | Pali ad elica continua |
|--------------------------|---------------|--------------|-----------------|------------------------|
|                          | $\gamma_R$    | (R3)         | (R3)            | (R3)                   |
| Base                     | $\gamma_b$    | 1,15         | 1,35            | 1,3                    |
| Laterale in compressione | $\gamma_s$    | 1,15         | 1,15            | 1,15                   |
| Totale (*)               | $\gamma$      | 1,15         | 1,30            | 1,25                   |
| Laterale in trazione     | $\gamma_{st}$ | 1,25         | 1,25            | 1,25                   |

(\*) da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

Tabella 20 Coefficienti parziali  $\gamma_R$  da applicare alle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali



$$R_{c,k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c,cal})_{media}}{\xi_3}; \frac{(R_{c,cal})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

$$R_{t,k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{t,cal})_{media}}{\xi_3}; \frac{(R_{t,cal})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

| Numero di verticali indagate | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 7    | ≥ 10 |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\xi_3$                      | 1,70 | 1,65 | 1,60 | 1,55 | 1,50 | 1,45 | 1,40 |
| $\xi_4$                      | 1,70 | 1,55 | 1,48 | 1,42 | 1,34 | 1,28 | 1,21 |

Tabella 21 Fattori di correlazione  $\xi$  per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali d'indagine

Per il calcolo della palificata in esame sono state considerate No. 4 verticali di indagine condotte nelle immediate vicinanze dell'opera e considerato il valore  $\xi_4 = 1.42$ . Tale scelta si considera a favore di sicurezza in quanto nella definizione della stratigrafia di progetto non si è tenuto conto dell'intervento di consolidamento del terreno di fondazione con colonne di jet-grouting.

### 8.2.1.1 Resistenza pali singoli soggetti a carichi assiali di compressione

Nel caso di pali soggetti ad azioni di compressione risulta:

$$R_{c,d} = R_{s,d} + R_{b,d} - W'_d = \frac{R_{s,k}}{\gamma_s} + \frac{R_{b,k}}{\gamma_b} - W'_d,$$

Dove:

$$R_{s,k} = \frac{\sum_{j=1}^n A_{s,j} \cdot q_{s,j}}{\xi_3} : \quad \text{valore caratteristico della resistenza laterale;}$$

$$R_{b,k} = \frac{A_b \cdot q_b}{\xi_3} : \quad \text{valore caratteristico della resistenza di base;}$$

$$W'_d = \gamma_F \cdot W_k : \quad \text{valore di progetto del peso efficace del palo.}$$

In aggiunta alle verifiche previste dalle NTC 2008 verrà controllato (vedasi: Manuale di progettazione delle opere civili RFI - Parte II - Sez.2 - Ponti e strutture – par. 2.5.1.9.3) di avere in esercizio un adeguato margine di sicurezza rispetto alla portanza laterale ovvero:

$$R_{c,cal,LAT} / 1.25 > N_{ag}$$

dove  $R_{c,cal,LAT}$  è la resistenza laterale di calcolo.

### 8.2.1.2 Resistenza pali singoli soggetti a carichi assiali di trazione

Nel caso di pali soggetti ad azioni di trazione risulta:



$$R_{t,d} = R_{s,d} + W'_d = \frac{R_{s,k}}{\gamma_s} + W'_d,$$

Dove:

$$R_{s,k} = \frac{\sum_{j=1}^n A_{s,j} \cdot q_{s,j}}{\xi_3} : \quad \text{valore caratteristico della resistenza laterale;}$$

$$W'_d = \gamma_F \cdot W_k : \quad \text{valore di progetto del peso efficace del palo.}$$

### 8.2.1.3 Portata laterale

La portata laterale limite viene valutata con la seguente relazione:

$$Ql = \pi \cdot D \cdot \sum_i (\tau_i \cdot h_i)$$

dove:

D = diametro palo,

$\tau_i$  = tensione di adesione laterale limite nello strato i-esimo,

$h_i$  = altezza dello strato i-esimo.

#### Depositi incoerenti

Con riferimento alle raccomandazioni AGI '84, per i depositi incoerenti, la capacità portante laterale dei pali in questo caso viene valutata con la seguente relazione:

$$\tau_{us} = q_a + \mu \cdot k \cdot \sigma'_v$$

$\sigma'_v$  = tensione verticale efficace litostatica,

dove  $\mu$  è pari alla tangente dell'angolo di attrito,  $q_a$  è nulla in terreni non coesivi e  $k$  è pari a 0.6 per pali trivellati.

#### Depositi coesivi

Per i terreni coesivi superficiali (alluvionali) la tensione tangenziale è stata valutata con la seguente espressione:

$$\tau_i = \alpha \cdot c_u \leq \tau_{\lambda, \max}$$

Dove:

$c_u$  = resistenza al taglio in condizioni non drenate

$\alpha$  = parametro empirico assunto come da Indicazione AGI:

$\alpha = 0.90$  per  $c_u \leq 25 \text{ kPa}$ ;

$\alpha = 0.80$  per  $25 \leq c_u \leq 50 \text{ kPa}$ ;

$\alpha = 0.60$  per  $50 \leq c_u \leq 75 \text{ kPa}$ ;

$\alpha = 0.40$  per  $c_u \geq 75 \text{ kPa}$ .

|   |  |             |  |           |                    |
|---|--|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR<br> | ALTA SORVEGLIANZA<br> |             |  |           |                    |
| FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE   | Progetto<br>IN17   | Lotto<br>12 | Codifica Documento<br>EI2 CL TR 03 0 0 001 | Rev.<br>B | Foglio<br>33 di 51 |

#### 8.2.1.4 Portata di base

Per la valutazione della portata di base limite sono state utilizzate le seguenti relazioni:

$$Q_{bl} = A_p \cdot q_{bl}$$

dove:

$A_p$  = area della base del palo,

$q_{bl}$  = portata limite specifica di base.

##### Depositi incoerenti

Nei terreni incoerenti, la pressione di base del palo associabile a cedimenti pari al 10% del diametro del palo viene valutata con la relazione di Berezantzev (1965) indicata nelle Raccomandazioni AGI:

$$q_b = N_q^* \cdot \sigma^{\prime v} \leq q_{b,lim}$$

essendo:

$N_q^*$  = coefficiente in funzione dell'angolo di resistenza al taglio del terreno (Raccomandazioni AGI);

$\sigma^{\prime v}$  = tensione verticale efficace

##### Depositi coesivi

La portata di base limite nei terreni coesivi viene valutata con la seguente relazione:

$$q_b = 9 \cdot c_u + \sigma_v \leq q_{b,lim}$$

dove:

$c_u$  = resistenza al taglio non drenata [kPa];

$\sigma_v$  = tensione totale verticale;

#### 8.2.1.5 Determinazione della resistenza di progetto a trazione

La portata a trazione di progetto di un palo trivellato (eseguito con completa asportazione del terreno) "Q<sub>d</sub>" può essere espressa dalla seguente relazione:

$$Q_d = Q_{LL} / F_{SL} + W'_P$$

dove:

$Q_{LL}$  = portata laterale limite (da determinarsi in conformità a quanto già descritto nel precedente paragrafo),

$W'_P$  = peso efficace del palo (alleggerito se sotto falda),

$F_{SL}$  = fattore di sicurezza per la portata laterale a trazione ( $= \gamma_{st} \cdot \xi_3$ ).

#### 8.2.1.6 Determinazione capacità portante

Le curve di capacità portante dei pali trivellati sono definite a partire dalla stratigrafia seguente in funzione dello spessore di ricoprimento degli strati superficiali.



## GALLERIA ARTIFICIALE GA01

FABBRICATO FA03- VERIFICA PALI TRIVELLATI 1000 mm L=28 m

Inserisci stratigrafia

## Stratigrafia e parametri geotecnici

| Dati di imput                      |      |                   |
|------------------------------------|------|-------------------|
| Diametro palo                      | 1    | m                 |
| Sovraccarico efficace              | 25   | kPa               |
| HW da testa palo                   | 0    | m                 |
| $\gamma$ acqua                     | 9,81 | kN/m <sup>3</sup> |
| $\Delta z$ palo da p.c. originario | 6    | m                 |
| N° diametri per qb                 | 4    | (-)               |
| L palo fuori terra                 | 0    | (m)               |
| Peso calcestruzzo                  | 25   | kN/m <sup>3</sup> |
| Pressione max sul cls.             | 10   | MPa               |

| Legenda tipo di terreno: |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| SL                       | Sabbia limosa            |
| S                        | Sabbia                   |
| G                        | Ghiaia o sabbie ghiaiose |
| A                        | Materiali coesivi        |

| Verticali di indagine | $\xi_3$ | $\xi_4$ |
|-----------------------|---------|---------|
| 4                     | 1,55    | 1,42    |

| Scelta di $\xi$ | $\xi$ |
|-----------------|-------|
| 4               | 1,42  |

| Caratteristiche del terreno |        |         |                |      |   |             |   |            |              |    | Calcola Nq |    |
|-----------------------------|--------|---------|----------------|------|---|-------------|---|------------|--------------|----|------------|----|
| (massimo 10 strati)         |        |         |                |      |   |             |   |            |              |    |            |    |
| Profondità (m)              | Strato | Terreno | $\gamma_{tot}$ | Nspt |   | $c_u$ (kPa) |   | $\Delta z$ | $\phi^\circ$ |    | Nq         |    |
| da                          | a      | No.     | (S,SL,G,A)     | da   | a | da          | a | (m)        | da           | a  | da         | a  |
| 0,0                         | 3,0    | 1       | SL             | 20,0 |   |             |   | 0,50       | 28           | 28 | 7          | 7  |
| 3,0                         | 21,5   | 2       | S              | 20,0 |   |             |   | 0,50       | 38           | 38 | 23         | 23 |
| 21,5                        | 26,5   | 3       | SL             | 20,0 |   |             |   | 0,50       | 28           | 28 | 7          | 7  |
| 26,5                        | 35,0   | 4       | S              | 20,0 |   |             |   | 0,50       | 38           | 40 | 26         | 26 |
| 35,0                        |        |         |                |      |   |             |   |            |              |    |            |    |
| 0,0                         |        |         |                |      |   |             |   |            |              |    |            |    |
| 0,0                         |        |         |                |      |   |             |   |            |              |    |            |    |
| 0,0                         |        |         |                |      |   |             |   |            |              |    |            |    |
| 0,0                         |        |         |                |      |   |             |   |            |              |    |            |    |
| 0,0                         |        |         |                |      |   |             |   |            |              |    |            |    |
| Numero di strati =          | 4,0    |         |                |      |   |             |   |            |              |    |            |    |

N.B. La quota zero di riferimento è la testa del palo: le profondità degli strati vanno riferite alla testa del palo

Tabella 22 Stratigrafia di progetto per calcolo capacità portante a carichi verticali

Le curve di capacità portante sono riportate nel seguente grafico, per pali di diametro 1000 mm, per la stratigrafia sopra definita (Tabella 22).

Le verifiche nei confronti delle azioni di compressione e di trazione risultano soddisfatte prevedendo una lunghezza dei pali pari a 28m (Figura 7).



**FABBRIACTO FA03**  
**Capacità portante pali trivellati - Diametro 1000 mm**  
**(Metodo AGI)**

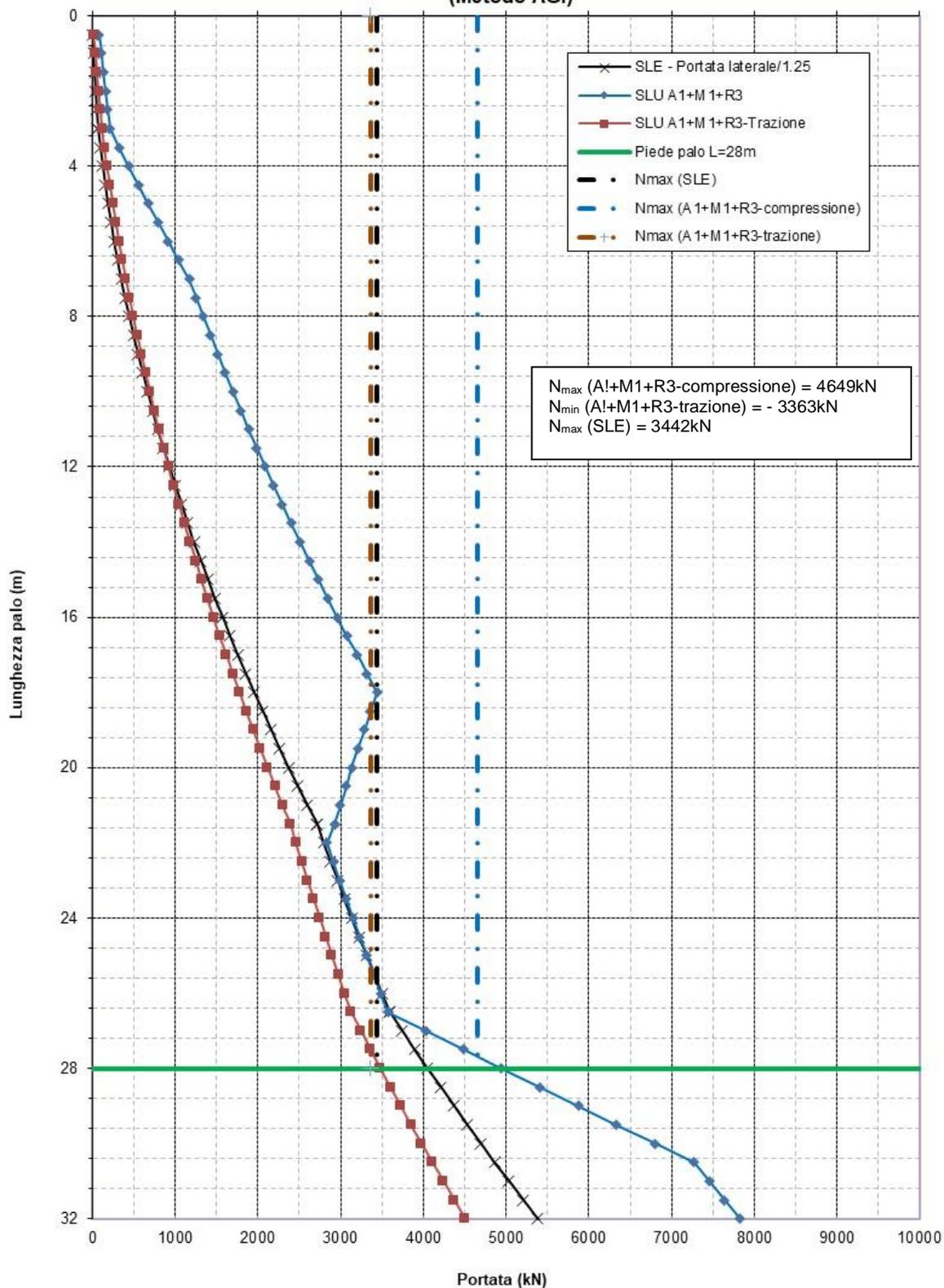


Figura 7 Capacità portante Pali 28m D=1.0m



### 8.2.1.7 Determinazione rigidità assiale dei pali

Il cedimento del singolo palo sotto carico è stimato facendo riferimento alle curve carico-cedimento: per esprimere la curva di trasferimento della portata di base in funzione del rapporto  $\Delta H_{\text{punta}}/D$ , dove  $\Delta H_{\text{punta}}$  è il cedimento della punta del palo e  $D$  è il diametro, si sono interpolati i valori sperimentali riportati nelle seguenti tabelle e validi per sabbie e ghiaie e per argille.

$$\frac{\tau}{\tau_{us}} = 379.5 \cdot \left(\frac{s_v}{D}\right) - 67867 \cdot \left(\frac{s_v}{D}\right)^2 + 6 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{s_v}{D}\right)^3 - 2 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{s_v}{D}\right)^4$$

#### Curve di trasferimento $\tau$ - $s_v$ per sabbie e ghiaie

| sv/D (%) | sv/D  | $\tau/\tau_{us}$ |
|----------|-------|------------------|
| 0        | 0     | 0                |
| 0.2      | 0.002 | 0.55             |
| 0.3      | 0.003 | 0.65             |
| 0.4      | 0.004 | 0.8              |
| 0.6      | 0.006 | 0.9              |
| 1        | 0.01  | 1                |

#### Curve di trasferimento q- $s_v$ per sabbie e ghiaie

| sv/D (%) | sv/D  | q/q <sub>us</sub> |
|----------|-------|-------------------|
| 0        | 0     | 0                 |
| 1.5      | 0.015 | 0.3               |
| 3        | 0.03  | 0.5               |
| 5        | 0.05  | 0.7               |
| 10       | 0.1   | 1                 |

#### Curve di trasferimento $\tau$ - $s_v$ per argille e limi

| sv/D (%) | sv/D  | $\tau/\tau_{us}$ |
|----------|-------|------------------|
| 0        | 0     | 0                |
| 0.2      | 0.002 | 0.75             |
| 0.3      | 0.003 | 0.85             |
| 0.4      | 0.004 | 0.9              |
| 0.6      | 0.006 | 0.95             |
| 1        | 0.01  | 1                |

#### Curve di trasferimento q- $s_v$ per argille e limi

| sv/D (%) | sv/D  | q/q <sub>us</sub> |
|----------|-------|-------------------|
| 0        | 0     | 0                 |
| 1.5      | 0.015 | 0.7               |
| 3        | 0.03  | 0.9               |
| 5        | 0.05  | 0.95              |
| 10       | 0.1   | 1                 |

Si procede, quindi, al calcolo del carico agente in sommità del palo per effetto di uno spostamento assunto alla base; il palo è schematizzato mediante un numero congruo di conci; si calcola l'equilibrio alla traslazione verticale di ciascun concio partendo dal concio di base.

La rigidità del palo è calcolata, a favore di sicurezza, considerando il rapporto tra il carico massimo applicato al palo ed il conseguente cedimento valutato mediante il metodo sopra descritto.



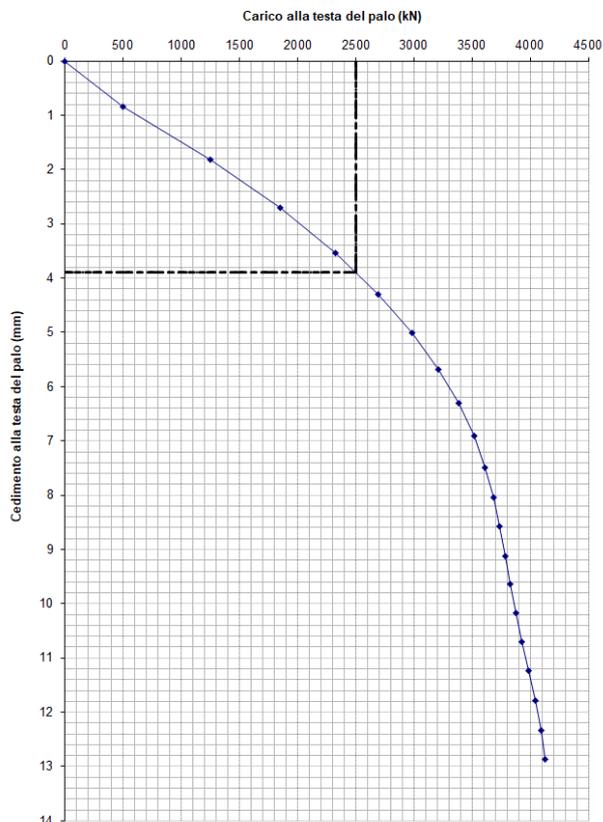
GALLERIA ARTIFICIALE GA01

FABBRICATO FA03 - PALI DIAMETRO 1000 mm - TRAZIONE

Curva carico-cedimento

| Dati di input       |        |                   |   |
|---------------------|--------|-------------------|---|
| D                   | 1      | m                 | Diametro del palo   |
| q efficace          | 25.0   | kPa               | Sovraccarico efficace valutato alla testa del palo          |
| H <sub>w</sub>      | 0.0    | m                 | Profondità della falda rispetto alla testa del palo         |
| γ <sub>v</sub>      | 10.00  | kN/m <sup>3</sup> | Peso specifico dell'acqua                                   |
| Δz palo             | 6.00   | m                 | Profondità della testa del palo rispetto al p.c. originario |
| L palo              | 28     | m                 | Lunghezza totale del palo                                   |
| L fuori terra       | 0.00   | m                 | Lunghezza del palo fuori terra                              |
| γ <sub>cls</sub>    | 25.00  | MPa               | Peso specifico del calcestruzzo                             |
| R <sub>ck cls</sub> | 25.00  | MPa               | Resistenza caratteristica del calcestruzzo                  |
| q <sub>bmax</sub>   | 1.00   | kPa               | Portata massima dello strato di base                        |
| N <sub>max</sub>    | 2500   | kN                | Azione assiale massima sul palo                             |
| N <sub>med</sub>    | 2500   | kN                | Azione assiale media sulla palificata                       |
| K <sub>vmax</sub>   | 642181 | kN/m              | Rigidezza assiale per il carico massimo del palo            |

Curva carico cedimento palo



| Punto della curva (-) | Cedimento alla base (mm) | Cedimento in testa (mm) | Carico alla base (kN) | Carico in testa (kN) | Portata laterale tot. (kN) | Peso palo (kN) | Equilibrio globale (-) | σ max in testa (MPa) |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|----------------|------------------------|----------------------|
| 1.00                  | 10.00                    | 12.87                   | 0.16                  | 4126.41              | 4456.12                    | 329.87         | 0.00                   | 5.26                 |
| 2.00                  | 9.50                     | 12.34                   | 0.15                  | 4093.75              | 4423.47                    | 329.87         | 0.00                   | 5.21                 |
| 3.00                  | 9.00                     | 11.79                   | 0.15                  | 4041.81              | 4371.53                    | 329.87         | 0.00                   | 5.15                 |
| 4.00                  | 8.50                     | 11.24                   | 0.14                  | 3985.08              | 4314.80                    | 329.87         | 0.00                   | 5.08                 |
| 5.00                  | 8.00                     | 10.70                   | 0.13                  | 3929.16              | 4258.90                    | 329.87         | 0.00                   | 5.01                 |
| 6.00                  | 7.50                     | 10.17                   | 0.12                  | 3876.54              | 4206.28                    | 329.87         | 0.00                   | 4.94                 |
| 7.00                  | 7.00                     | 9.64                    | 0.12                  | 3828.37              | 4158.12                    | 329.87         | 0.00                   | 4.88                 |
| 8.00                  | 6.50                     | 9.12                    | 0.11                  | 3784.50              | 4114.26                    | 329.87         | 0.00                   | 4.82                 |
| 9.00                  | 6.00                     | 8.58                    | 0.10                  | 3738.49              | 4068.25                    | 329.87         | 0.00                   | 4.76                 |
| 10.00                 | 5.50                     | 8.04                    | 0.09                  | 3683.25              | 4013.02                    | 329.87         | 0.00                   | 4.69                 |
| 11.00                 | 5.00                     | 7.48                    | 0.08                  | 3611.44              | 3941.22                    | 329.87         | 0.00                   | 4.60                 |
| 12.00                 | 4.50                     | 6.91                    | 0.08                  | 3515.21              | 3845.00                    | 329.87         | 0.00                   | 4.48                 |
| 13.00                 | 4.00                     | 6.31                    | 0.07                  | 3385.98              | 3715.78                    | 329.87         | 0.00                   | 4.31                 |
| 14.00                 | 3.50                     | 5.68                    | 0.06                  | 3214.13              | 3543.94                    | 329.87         | 0.00                   | 4.09                 |
| 15.00                 | 3.00                     | 5.01                    | 0.05                  | 2988.65              | 3318.47                    | 329.87         | 0.00                   | 3.81                 |
| 16.00                 | 2.50                     | 4.30                    | 0.04                  | 2696.69              | 3026.51                    | 329.87         | 0.00                   | 3.44                 |
| 17.00                 | 2.00                     | 3.53                    | 0.04                  | 2322.98              | 2652.82                    | 329.87         | 0.00                   | 2.96                 |
| 18.00                 | 1.50                     | 2.71                    | 0.03                  | 1849.09              | 2178.93                    | 329.87         | 0.00                   | 2.36                 |
| 19.00                 | 1.00                     | 1.81                    | 0.02                  | 1252.40              | 1582.25                    | 329.87         | 0.00                   | 1.60                 |
| 20.00                 | 0.50                     | 0.83                    | 0.01                  | 504.78               | 834.64                     | 329.87         | 0.00                   | 0.64                 |
| 21.00                 | 0.00                     | 0.00                    | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                       | 0.00           | 0.00                   | 0.00                 |

La tabella seguente riporta, i valori della rigidezza assiale dei pali assunti nel calcolo strutturale della platea di fondazione, indicati al precedente § 7.2.1

| L palo (m) | D (m) | k(kN/m)  |
|------------|-------|----------|
| 28         | 1.0   | ~600.000 |

8.2.2 Verifica dei pali nei confronti dei carichi orizzontali

Per la determinazione del valore di progetto della resistenza dei pali soggetti a carichi trasversali valgono le indicazioni di normativa al paragrafo 6.4.3.1.1, applicando il coefficiente parziale ( $\gamma_T$ ) della seguente tabella (vedasi tabella di normativa 6.4.VI) ed i coefficienti  $\xi_3$  e  $\xi_4$ , fattori di correlazione in funzione del numero di verticali d'indagine rappresentative (tabella di normativa 6.4.IV, pari a 1.42 nel caso in esame). Nel caso in esame si ha un coefficiente complessivo pari a  $1.42 \times 1.3 = 1.846$ .

**Coefficiente parziale (R3)**  
 $\gamma_T = 1,3$

Tabella 23 Coefficiente parziale  $\gamma_T$  per le verifiche agli stati limite ultimi di pali soggetti a carichi trasversali

### 8.2.2.1 Caso generale – Teoria di Broms

In linea generale, per la verifica del carico limite orizzontale si è fatto riferimento alla teoria di Broms per il caso di pali con rotazione in testa impedita. Le equazioni con cui si determina il carico limite a forze orizzontali dei pali sono definite di seguito al variare del tipo di meccanismo considerato.

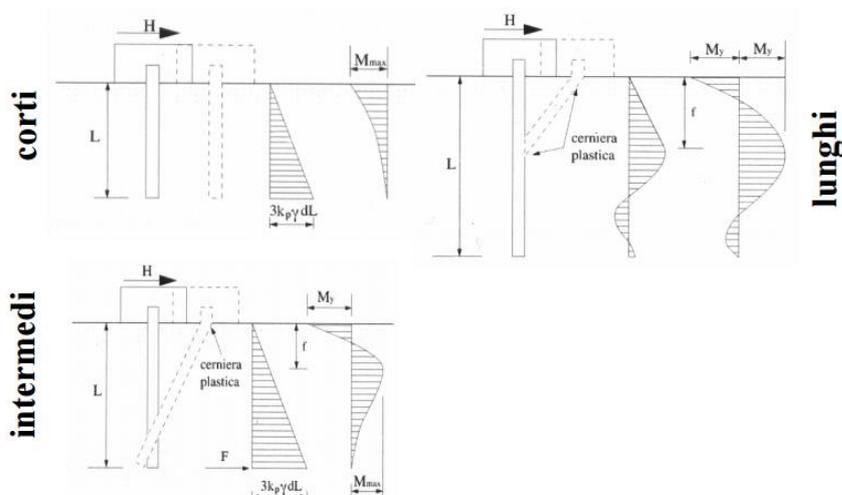
In terreni incoerenti si ha (vedasi figura seguente):

$$\text{Palo corto:} \quad H = 1.5k_p \gamma d^3 \left( \frac{L}{d} \right)^2$$

$$\text{Palo intermedio:} \quad H = \frac{1}{2} k_p \gamma d^3 \left( \frac{L}{d} \right)^2 + \frac{M_y}{L}$$

$$\text{Palo lungo:} \quad H = k_p \gamma d^3 \sqrt[3]{ \left( 3.676 \frac{M_y}{k_p \gamma d^4} \right)^2 }$$

Dove, oltre ai termini già definiti,  $k_p$  = coefficiente di spinta passiva.



Il valore di  $H$  dovrà essere confrontato con il massimo valore del taglio agente sul palo ( $H_{Ed}$ ). Il valore determinato con la teoria di Broms dovrà essere ridotto secondo quanto prevede la normativa vigente.

$$H_{lim} = H / (\xi \gamma_T) > H_{Ed}$$

dove:

$H_{lim}$  = valore limite in funzione del meccanismo attivato;

$\xi$  = fattore di correlazione in funzione delle verticali indagate

$\gamma_T$  = fattore parziale per pali soggetti a carichi orizzontali.

Nel caso in esame i pali analizzati sono classificabili come pali lunghi.



## 8.2.2.2 Determinazione del carico limite orizzontale

Nella tabella seguente è riportato il valore del carico limite determinato applicando i criteri illustrati nei paragrafi precedenti.

| <b>PALI <math>\Phi</math> 1000</b>  |                                    |
|---|------------------------------------|
| <u>Calcolo del carico trasversale limite</u>                                |                                    |
| <b>Terreni incoerenti (Broms 1964)</b>                                      |                                    |
| <b>DATI GEOMETRICI:</b>   |                                    |
| Lunghezza del palo  | L      28 [m]                      |
| Diametro del palo   | D <sub>palo</sub> 1 [m]            |
| Momento di plasticizzazione   | M <sub>y</sub> 1637,0 [kNm]        |
| <b>DATI GEOTECNICI:</b>   |                                    |
| Peso per unità di volume  | $\gamma$ 10,5 [kN/m <sup>3</sup> ] |
| Angolo attrito medio  | $\varphi_{\text{medio}}$ 38 [°]    |
| Coefficiente di spinta passiva medio  | k <sub>p,medio</sub> 4,20 [-]      |
| Angolo attrito minimo   | $\varphi_{\text{minimo}}$ 38 [°]   |
| Coefficiente di spinta passiva minimo                                       | k <sub>p,minimo</sub> 4,20 [-]     |
| <b>VERTICALI INDAGATE:</b>  |                                    |
| numero di verticali indagate  | n°      4                          |
| fattore di correlazione   | $\xi_3$ 1,55                       |
| fattore di correlazione   | $\xi_4$ 1,42                       |
| <b>CARICO TRASVERSALE PER PALO CORTO H<sub>1</sub>:</b> (13.44)             |                                    |
| H <sub>1,medio</sub>  | 51907,9 [kN]                       |
| H <sub>1,minimo</sub>   | 51907,9 [kN]                       |
| $H = 1.5 k_p \gamma d^3 \left(\frac{L}{d}\right)^2$                         |                                    |
| <b>CARICO TRASVERSALE PER PALO INTERMEDIO H<sub>2</sub>:</b> (13.46)        |                                    |
| H <sub>2,medio</sub>  | 17361,1 [kN]                       |
| H <sub>2,minimo</sub>   | 17361,1 [kN]                       |
| $H = \frac{1}{2} k_p \gamma d^3 \left(\frac{L}{d}\right)^2 + \frac{M_y}{L}$ |                                    |
| <b>CARICO TRASVERSALE PER PALO LUNGO H<sub>3</sub>:</b> (13.47)             |                                    |
| H <sub>3,medio</sub>  | 1169,2 [kN]                        |
| H <sub>3,minimo</sub>   | 1169,2 [kN]                        |
| $H = k_p \gamma d^3 \sqrt{\left(3.676 \frac{M_y}{k_p \gamma d^4}\right)^2}$ |                                    |
| <b>DEFINIZIONE DEL COMPORTAMENTO DEL PALO:</b>                              |                                    |
| F   | 4,2 [m]                            |
| H <sub>medio</sub>  | 1169,2 [kN] <b>PALO</b>            |
| H <sub>minimo</sub>   | 1169,2 [kN] <b>LUNGO</b>           |
| <b>CARICO TRASVERSALE ULTIMO:</b>   |                                    |
| $H_k = \text{Min}\{H_{\text{med}}/\xi_3, H_{\text{min}}/\xi_4\}$            |                                    |
| H <sub>k</sub>  | 754,3 [kN]                         |
| $H_d = H_k / \gamma_T$  |                                    |
| $\gamma_T$  | 1,3 [-]                            |
| H <sub>d</sub>  | 580,3 [kN]                         |
| H <sub>agente</sub>   | 328,0 [kN]                         |
| <b>VERIFICA:</b>  | <b>VERIFICATO</b>                  |
| <b>FS</b>   | 1,769                              |

Tabella 24 Determinazione carico limite orizzontale pali FA03

|   |   |             |  |           |                    |
|---|---|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR<br><br><b>IRICAV2</b> | ALTA SORVEGLIANZA<br><br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |             |  |           |                    |
| FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE   | Progetto<br>IN17  | Lotto<br>12 | Codifica Documento<br>EI2 CL TR 03 0 0 001 | Rev.<br>B | Foglio<br>40 di 51 |

### 8.3 Verifiche strutturali dei pali

Utilizzando i criteri esposti nei paragrafi precedenti, con le sollecitazioni di progetto riportate nelle precedenti tabelle sono state eseguite le verifiche SLU e SLE e calcolate le armature previste. I risultati delle verifiche sono riportati di seguito. L'armatura prevista è riassunta in Tabella 25.

| Armature pali                  |                      |
|--------------------------------|----------------------|
| Diametro palo                  | 1.0m                 |
| Copriferro                     | 6cm                  |
| Armatura corrente              | 20Ø26                |
| Armatura aggiuntiva testa palo | 20Ø20                |
| Armatura a taglio              | spirale<br>Ø12/10-20 |

Tabella 25 Armature pali di fondazione

Per quanto riguarda le verifiche a fessurazione con riferimento alla Tab. 4.1.III delle NTC08 in base alla classe di esposizione del calcestruzzo si qualifica la "Condizione ambientale".

| Condizioni ambientali | Classe di esposizione             |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Ordinarie             | X0, XC1, XC2, XC3, XF1            |
| Aggressive            | XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3 |
| Molto aggressive      | XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4      |

Tabella 26 Condizioni ambientali

| Gruppi di esigenze | Condizioni ambientali | Combinazione di azioni | Armatura           |                  |                |                  |
|--------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|------------------|----------------|------------------|
|                    |                       |                        | Sensibile          |                  | Poco sensibile |                  |
|                    |                       |                        | Stato limite       | w <sub>d</sub>   | Stato limite   | w <sub>d</sub>   |
| a                  | Ordinarie             | frequente              | ap. fessure        | ≤ w <sub>2</sub> | ap. fessure    | ≤ w <sub>3</sub> |
|                    |                       | quasi permanente       | ap. fessure        | ≤ w <sub>1</sub> | ap. fessure    | ≤ w <sub>2</sub> |
| b                  | Aggressive            | frequente              | ap. fessure        | ≤ w <sub>1</sub> | ap. fessure    | ≤ w <sub>2</sub> |
|                    |                       | quasi permanente       | decompressione     | -                | ap. fessure    | ≤ w <sub>1</sub> |
| c                  | Molto aggressive      | frequente              | formazione fessure | -                | ap. fessure    | ≤ w <sub>1</sub> |
|                    |                       | quasi permanente       | decompressione     | -                | ap. fessure    | ≤ w <sub>1</sub> |

Tabella 27 Condizioni ambientali e apertura delle fessure

Dove w<sub>1</sub> = 0.2 mm; w<sub>2</sub> = 0.3 mm; w<sub>3</sub> = 0.4 mm.

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE

Progetto  
IN17

Lotto  
12

Codifica Documento  
EI2 CL TR.03 0 0 001

Rev.  
B

Foglio  
41 di 51

Nell'ambito della verifica a fessurazione si controlla con metodo diretto che l'apertura delle fessure sia inferiore a quella limite prevista dalla norma per condizioni ambientali ordinarie corrispondenti alla classe di esposizione XC2 e armature poco sensibili. Con riferimento alle indicazioni del MdP RFI, per i pali si utilizza un limite di apertura delle fessure comunque non superiori a 0.2 mm.

## 8.3.1 Sezione di testa palo

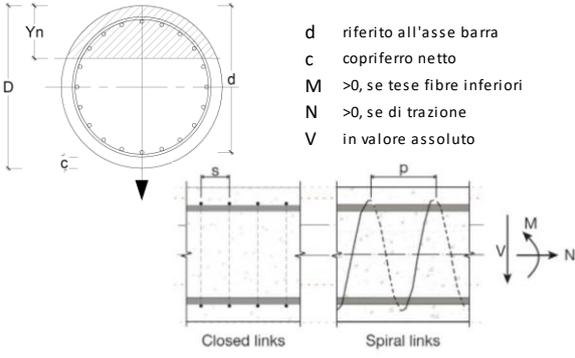
| geometria              |            |                    |                    |                | sollecitazioni e risultati  |             |                               |              |                            | verifica DM08        |        |   |                     |
|------------------------|------------|--------------------|--------------------|----------------|---|-------------|-------------------------------|--------------|----------------------------|----------------------|--------|---|---------------------|
| sezione trasversale    |            |                    |                    |                | SLE   |             | SLU                           |              |                            | Verifica a taglio    |        |   |                     |
| D                      | c          | d                  | passo              | interferro     | M <sub>Ek</sub>   | 480,0 [kNm] | M <sub>Ed</sub>               | 480,0 [kNm]  |                            |                      |        |   |                     |
| [cm]                   | [cm]       | [cm]               | [cm]               | [cm]           | N <sub>Ek</sub>   | 2319,0 [kN] | N <sub>Ed</sub>               | 3363,0 [kN]  |                            |                      |        |   |                     |
| 100                    | 6,0        | 91,5               | 13,0               | 10,4           | presso-flessione  |             | V <sub>Ed</sub>               | 328,0 [kN]   | contributo A <sub>sl</sub> |                      |        |   |                     |
| armatura longitudinale |            |                    |                    |                | M <sub>cr</sub>   | -14,3 [kNm] | presso-flessione              |              |                            | scelta <b>no</b>     |        |   |                     |
| n <sub>barre</sub>     | φ          | r <sub>i</sub>     | A <sub>sl</sub>    | c <sub>i</sub> | quota asse neutro   |             | M <sub>Rd</sub>               | 1255,1 [kNm] | angolo θ                   |                      |        |   |                     |
| [mm]                   | [mm]       | [cm]               | [cm <sup>2</sup> ] | [cm]           | γ <sub>n</sub>  | 7,21 [cm]   | FS                            | 2,61         | scelta <b>imposto</b>      |                      |        |   |                     |
| 20                     | 26         | 41,5               | 106,19             | 8,50           | tensioni e fessure  |             | taglio                        |              |                            | θ <sub>imposto</sub> | 30 [°] |   |                     |
| 20                     | 20         | 41,80              | 62,83              | 8,20           | σ <sub>c,min</sub>  | -1,6 [MPa]  | V <sub>Rdc</sub>              | -264,4 [kN]  | θ <sub>calcolato</sub>     |                      |        | 21,9 [°]  |                     |
| armatura a taglio      |            |                    |                    |                | σ <sub>s,min</sub>  | 3,2 [MPa]   | predisporre armatura a taglio |              |                            | θ <sub>inf</sub>     |        |   | 21,8 [°]            |
| Tipo                   | φ          | p                  | A <sub>sw</sub>    |                | σ <sub>s,max</sub>  | 273,1 [MPa] |                               |              |                            | θ <sub>sup</sub>     |        |   | 45 [°]              |
| [mm]                   | [mm]       | [cm]               | [cm <sup>2</sup> ] |                |   |             |                               |              |                            | Incidenza            |        |   |                     |
| spirale                | 12         | 10                 | 2,26               |                |   |             |                               |              |                            | Armatura min         |        |   | CD 'A'              |
| materiali              |            |                    |                    |                | legenda   |             |                               |              |                            |                      |        |   |                     |
| calcestruzzo           |            |                    | acciaio            |                |  |             |                               |              |                            |                      |        |   |                     |
| R <sub>ck</sub>        | 30 [MPa]   | f <sub>yk</sub>    | 450 [MPa]          | d              |   |             |                               |              | α <sub>cc</sub>            |                      |        | coeff. effetti a lungo termine                      |                     |
| f <sub>ck</sub>        | 24,9 [MPa] | γ <sub>s</sub>     | 1,15               | c              |   |             |                               |              | v                          |                      |        | coeff. riduzione resistenza bielle                  |                     |
| γ <sub>c</sub>         | 1,5        | f <sub>yd</sub>    | 391,3 [MPa]        | M              |   |             |                               |              | α <sub>es</sub>            |                      |        | =E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub>                     |                     |
| α <sub>cc</sub>        | 0,85       | E <sub>s</sub>     | 200000 [MPa]       | N              |   |             |                               |              | k <sub>t</sub>             |                      |        | 0,6 azioni di breve durata                          |                     |
| f <sub>cd</sub>        | 14,1 [MPa] | ε <sub>uk</sub>    | 75 [‰]             | V              |   |             |                               |              | k <sub>1</sub>             |                      |        | 0,4 azioni di lunga durata                          |                     |
| v                      | 0,5        |                    |                    |                |   |             |                               |              | k <sub>2</sub>             |                      |        | 0,8 barre aderenza migliorata                       |                     |
| ε <sub>c2</sub>        | 2,0 [‰]    |                    |                    |                |   |             |                               |              | k <sub>3</sub>             |                      |        | 1,6 barre lisce                                     |                     |
| ε <sub>cu2</sub>       | 3,5 [‰]    |                    |                    |                |   |             |                               |              | k <sub>4</sub>             |                      |        | 0,5 flessione                                       |                     |
| α <sub>e</sub>         | 15,0       |                    |                    |                |   |             |                               |              |                            |                      |        | (ε <sub>1</sub> +ε <sub>2</sub> )/2, ε <sub>1</sub> | trazione eccentrica |
| k <sub>t</sub>         | 0,6        |                    |                    |                |   |             |                               |              |                            |                      |        | 1   | trazione pura       |
| k <sub>1</sub>         | 0,8        | 0,55               | 13,7 [MPa]         |                |   |             |                               |              |                            |                      |        | k <sub>3</sub>                                      | 3,4                 |
| k <sub>3</sub>         | 3,4        | 0,75               | 337,5 [MPa]        |                |   |             |                               |              |                            |                      |        | k <sub>4</sub>                                      | 0,425               |
| k <sub>4</sub>         | 0,425      | w <sub>k,lim</sub> | 0,2 [mm]           |                |   |             |                               |              |                            |                      |        | σ   | >0 se di trazione   |

Tabella 28 'SET-1' Massima trazione – Verifica a pressoflessione SLE, SLU, SLV



| geometria              |        |        |                    |            |
|------------------------|--------|--------|--------------------|------------|
| sezione trasversale    |        |        |                    |            |
| D                      | c      | d      | passo              | interferro |
| [cm]                   | [cm]   | [cm]   | [cm]               | [cm]       |
| 100                    | 6,0    | 91,5   | 13,0               | 10,4       |
| armatura longitudinale |        |        |                    |            |
| nbarre                 | $\phi$ | $r_i$  | $A_{sl}$           | $c_i$      |
|                        | [mm]   | [cm]   | [cm <sup>2</sup> ] | [cm]       |
| 20                     | 26     | 41,5   | 106,19             | 8,50       |
| 20                     | 20     | 41,80  | 62,83              | 8,20       |
| armatura a taglio      |        |        |                    |            |
| Tipo                   | $\phi$ | $\rho$ | $A_{sw}$           |            |
|                        | [mm]   | [cm]   | [cm <sup>2</sup> ] |            |
| spirale                | 12     | 10     | 2,26               |            |

| sollecitazioni e risultati          |                             |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| SLE                                 | SLU                         |
| $M_{Ek}$ 480,0 [kNm]                | $M_{Ed}$ 480,0 [kNm]        |
| $N_{Ek}$ -3442,0 [kN]               | $N_{Ed}$ -4649,0 [kN]       |
| presso-flessione                    | presso-flessione            |
| $M_{cr}$ 773,7 [kNm]                | $M_{Rd}$ 2730,8 [kNm]       |
| quota asse neutro                   | FS                          |
| $y_n$ 99,04 [cm]                    | 5,69                        |
| tensioni e fessure                  | taglio                      |
| $\sigma_{c,min}$ -6,7 [MPa]         | $V_{Rdc}$ 443,3 [kN]        |
| $\sigma_{s,min}$ -92,1 [MPa]        | non serve armatura a taglio |
| $\sigma_{s,max}$ -7,3 [MPa]         | $V_{Rds}$ 917,5 [kN]        |
| $k_2$ 0,5                           | $V_{Rdmax}$ 1937,1 [kN]     |
| $\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$ - [%] | $\theta$ 30,0 [°]           |
| $S_{r,max}$ - [cm]                  | sezione duttile             |
| $w_k$ - [mm]                        | $a_l$ 64,6 [cm]             |

| verifica DM08        |          |
|----------------------|----------|
| Verifica a taglio    |          |
| contributo $A_{sl}$  |          |
| scelta               | no       |
| angolo $\theta$      |          |
| scelta               | imposto  |
| $\theta_{imposto}$   | 30 [°]   |
| $\theta_{calcolato}$ | 21,9 [°] |
| $\theta_{inf}$       | 21,8 [°] |
| $\theta_{sup}$       | 45 [°]   |
| Incidenza            |          |
| Armatura min         | CD 'A'   |

| materiali        |             |                 |              |
|------------------|-------------|-----------------|--------------|
| calcestruzzo     |             | acciaio         |              |
| $R_{ck}$         | 30 [MPa]    | $f_{yk}$        | 450 [MPa]    |
| $f_{ck}$         | 24,9 [MPa]  | $\gamma_s$      | 1,15         |
| $\gamma_c$       | 1,5         | $f_{yd}$        | 391,3 [MPa]  |
| $\alpha_{cc}$    | 0,85        | $E_s$           | 200000 [MPa] |
| $f_{cd}$         | 14,1 [MPa]  | $\epsilon_{uk}$ | 75 [%]       |
| $\nu$            | 0,5         |                 |              |
| $\epsilon_{c2}$  | 2,0 [%]     |                 |              |
| $\epsilon_{cu2}$ | 3,5 [%]     |                 |              |
| $\alpha_e$       | 15,0        |                 |              |
| $k_t$            | 0,6         |                 |              |
| $k_1$            | 0,8         |                 |              |
| $k_3$            | 3,4         |                 |              |
| $k_4$            | 0,425       |                 |              |
| valori limite    |             |                 |              |
|                  | 0,55        |                 | 13,7 [MPa]   |
|                  | 0,75        |                 | 337,5 [MPa]  |
|                  | $w_{k,lim}$ |                 | 0,2 [mm]     |

| legenda |  |
|---------|--|
|         |  |
| $d$     | riferito all'asse barra                                      |
| $c$     | copriferro netto   |
| $M$     | >0, se tese fibre inferiori                                  |
| $N$     | >0, se di trazione   |
| $V$     | in valore assoluto   |
|         |  |
|         | $\alpha_{cc}$ coeff. effetti a lungo termine                 |
|         | $\nu$ coeff. riduzione resistenza bielle                     |
|         | $\alpha_e = E_s/E_c$   |
|         | $k_t$ 0,6 azioni di breve durata                             |
|         | 0,4 azioni di lunga durata                                   |
|         | $k_1$ 0,8 barre aderenza migliorata                          |
|         | 1,6 barre lisce  |
|         | $k_2$ 0,5 flessione  |
|         | $(\epsilon_1 + \epsilon_2)/2 \epsilon_1$ trazione eccentrica |
|         | 1 trazione pura  |
|         | $k_3$ 3,4  |
|         | $k_4$ 0,425  |
|         | $\sigma$ >0 se di trazione                                   |

Tabella 29 'SET-1' Massima compressione – Verifica a pressoflessione SLE, SLU, SLV



| geometria              |      |                |                    |                |
|------------------------|------|----------------|--------------------|----------------|
| sezione trasversale    |      |                |                    |                |
| D                      | c    | d              | passo              | interferro     |
| [cm]                   | [cm] | [cm]           | [cm]               | [cm]           |
| 100                    | 6,0  | 91,5           | 13,0               | 10,4           |
| armatura longitudinale |      |                |                    |                |
| nbarre                 | φ    | r <sub>i</sub> | A <sub>sl</sub>    | c <sub>i</sub> |
|                        | [mm] | [cm]           | [cm <sup>2</sup> ] | [cm]           |
| 20                     | 26   | 41,5           | 106,19             | 8,50           |
| 20                     | 20   | 41,80          | 62,83              | 8,20           |
| armatura a taglio      |      |                |                    |                |
| Tipo                   | φ    | ρ              | A <sub>sw</sub>    |                |
|                        | [mm] | [cm]           | [cm <sup>2</sup> ] |                |
| spirale                | 12   | 10             | 2,26               |                |

| sollecitazioni e risultati              |                                |
|---|--------------------------------|
| SLE                                     | SLU                            |
| M <sub>EK</sub> 480,0 [kNm]             | M <sub>Ed</sub> 480,0 [kNm]    |
| N <sub>EK</sub> 1127,0 [kN]             | N <sub>Ed</sub> 3363,0 [kN]    |
| presso-flessione                        | presso-flessione               |
| M <sub>cr</sub> 148,8 [kNm]             | M <sub>Rd</sub> 1255,1 [kNm]   |
| quota asse neutro                       | FS                             |
| γ <sub>n</sub> 21,37 [cm]               | FS 2,61                        |
| tensioni e fessure                      | taglio                         |
| σ <sub>c,min</sub> -3,9 [MPa]           | V <sub>Rdc</sub> -264,4 [kN]   |
| σ <sub>s,min</sub> -36,0 [MPa]          | predisporre armatura a taglio  |
| σ <sub>s,max</sub> 192,4 [MPa]          | V <sub>Rds</sub> 917,5 [kN]    |
|   | V <sub>Rdmax</sub> 1937,1 [kN] |
|   | θ 30,0 [°]                     |
| k <sub>2</sub> 0,5                      | sezione duttile                |
| ε <sub>sm-ε<sub>cm</sub></sub> 0,54 [%] | ai 59,0 [cm]                   |
| S <sub>r,max</sub> 36,0 [cm]            |                                |
| w <sub>k</sub> 0,19 [mm]                |                                |

| verifica DM08              |          |
|----------------------------|----------|
| Verifica a taglio          |          |
| contributo A <sub>sl</sub> |          |
| scelta                     | no       |
| angolo θ                   |          |
| scelta                     | imposto  |
| θ <sub>imposto</sub>       | 30 [°]   |
| θ <sub>calcolato</sub>     | 21,9 [°] |
| θ <sub>inf</sub>           | 21,8 [°] |
| θ <sub>sup</sub>           | 45 [°]   |
| Incidenza                  |          |
| Armatura min               | CD 'A'   |

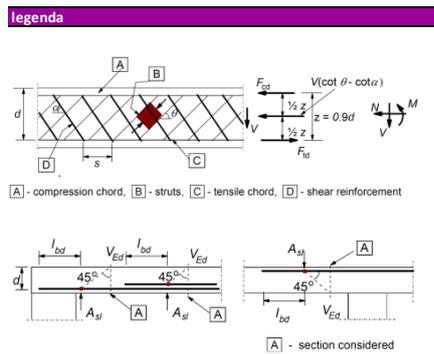
| materiali                  |                             |
|----------------------------|-----------------------------|
| calcestruzzo               | acciaio                     |
| R <sub>ck</sub> 30 [MPa]   | f <sub>yk</sub> 450 [MPa]   |
| f <sub>ck</sub> 24,9 [MPa] | γ <sub>s</sub> 1,15         |
| γ <sub>c</sub> 1,5         | f <sub>yd</sub> 391,3 [MPa] |
| α <sub>cc</sub> 0,85       | E <sub>s</sub> 210000 [MPa] |
| f <sub>cd</sub> 14,1 [MPa] | ε <sub>uk</sub> 75 [%]      |
| v 0,5                      |                             |
| ε <sub>c2</sub> 2,0 [%]    |                             |
| ε <sub>cu2</sub> 3,5 [%]   |                             |
| α <sub>e</sub> 15,0        |                             |
| kt 0,6                     |                             |
| k <sub>1</sub> 0,8         |                             |
| k <sub>3</sub> 3,4         |                             |
| k <sub>4</sub> 0,425       |                             |
|                            | valori limite               |
|                            | 0,55   13,7 [MPa]           |
|                            | 0,75   337,5 [MPa]          |
|                            | w <sub>k,lim</sub> 0,2 [mm] |

| legenda |   |
|---------|---|
|         | d riferito all'asse barra   |
|         | c copriferro netto  |
|         | M >0, se tese fibre inferiori   |
|         | N >0, se di trazione  |
|         | V in valore assoluto  |
|         |   |
|         | α <sub>cc</sub> coeff. effetti a lungo termine                        |
|         | v coeff. riduzione resistenza bielle                                  |
|         | α <sub>e</sub> = E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub>                       |
|         | kt 0,6 azioni di breve durata   |
|         | 0,4 azioni di lunga durata  |
|         | k <sub>1</sub> 0,8 barre aderenza migliorata                          |
|         | 1,6 barre lisce   |
|         | k <sub>2</sub> 0,5 flessione  |
|         | (ε <sub>1</sub> +ε <sub>2</sub> )/2ε <sub>1</sub> trazione eccentrica |
|         | 1 trazione pura   |
|         | k <sub>3</sub> 3,4  |
|         | k <sub>4</sub> 0,425  |
|         | σ >0 se di trazione   |

Tabella 30 'SET-2' – Verifica a fessurazione SLE

Verifica a taglio di una sezione circolare secondo EN 1992-1-1:2004/E / Bollettino CEB n. 137 All. 5

| geometria                                    |   |
|--|---|
| sezione trasversale - rettangolo equivalente |   |
| base   | b <sub>e</sub> = 90 cm                    |
| altezza                                      | h <sub>e</sub> = 70,6 cm                  |
| copriferro (asse armatura long.)             | c = 6 cm                                  |
| altezza utile                                | d = 64,6 cm                               |
| braccio coppia interna                       | z = 70,5 cm                               |
| armatura a taglio                            |   |
| tipo di armatura                             | -> spirale                                |
| diametro                                     | φ = 12 mm                                 |
| coefficiente correttivo                      | λ <sub>1</sub> = 0,85                     |
| area   | A <sub>sw</sub> = 226,2 mm <sup>2</sup>   |
| area massima - 6.12 - EC2                    | A <sub>sw,m</sub> = 811,3 mm <sup>2</sup> |
| distanza tra due creste                      | ρ = 10 cm                                 |
| coefficiente correttivo                      | λ <sub>2</sub> = 1,00                     |
|  | r <sub>sw</sub> = 43,4 cm                 |
| armatura longitudinale tesa                  |   |
| area totale                                  | A <sub>sl,e</sub> = 84,5 cm <sup>2</sup>  |
| materiali                                    |   |
| calcestruzzo                                 |   |
| resistenza caratt. cilindrica a 28 gg.       | f <sub>ck</sub> = 24,9 MPa                |
| coeff. parziale di sicurezza                 | γ <sub>c</sub> = 1,5                      |
| coeff. effetti a lungo termine               | α <sub>cc</sub> = 0,85                    |
| tensione di calcolo                          | f <sub>cd</sub> = 14,1 MPa                |
| coeff. riduzione resistenza bielle           | v = 0,5                                   |
| tensione di calcolo - trazione               | f <sub>ctd</sub> = 1,2 MPa                |
| acciaio                                      |   |
| tensione caratt. di snervamento              | f <sub>yk</sub> = 450,0 MPa               |
| coeff. parziale di sicurezza                 | γ <sub>s</sub> = 1,15                     |
| tensione di snervamento di calcolo           | f <sub>yd</sub> = 391,3 MPa               |



| sollecitazioni e verifiche   |                           |
|--|---------------------------|
| taglio   | V <sub>Ed</sub> = 328 kN  |
| azione assiale   | N <sub>Ed</sub> = 3363 kN |
| azione assiale di precompressione  | N <sub>ed,cp</sub> = 0 kN |
| resistenza elemento non armato   |                           |
| V <sub>Rdc</sub>   | -264,4 kN                 |
| resistenza armatura a taglio   |                           |
| V <sub>Rds</sub>   | 917,5 kN                  |
| V <sub>Rdmax</sub>   | 1937,1 kN                 |
| inclinazione bielle calcestruzzo   |                           |
| θ  | 30,0 °                    |
| 2 A <sub>sw,max</sub> f <sub>ywd</sub> sen(a) / b <sub>w</sub> s α <sub>fa,cw</sub> ρ <sub>1</sub> f <sub>cd</sub> | 0,28                      |
| sezione duttile  |                           |
| traslazione armatura long.   | ai = 58,986586 cm         |

| servizio               |             |
|------------------------|-------------|
| α                      | = 1,513 rad |
| θ                      | = 0,524 rad |
| C <sub>Rdc</sub>       | = 0,12      |
| k                      | = 1,56      |
| ρ <sub>1</sub>         | = 0,00      |
| k <sub>1</sub>         | = 0,15      |
| V <sub>min</sub>       | = 0,339 MPa |
| σ <sub>cp</sub>        | = -5,29 MPa |
| V <sub>Rdc</sub>       | = -461,6 kN |
| V <sub>Rdcm</sub>      | = -264,4 kN |
| α <sub>cw</sub>        | = 1,0       |
| V <sub>Rd,c</sub>      | = 703,2 kN  |
| V <sub>Rd,c</sub>      | = 703,2 kN  |
| angolo θ               |             |
| scelta                 | imposto     |
| θ <sub>imposto</sub>   | = 30 °      |
| θ <sub>calcolato</sub> | = 21,9 °    |
| θ <sub>inf</sub>       | = 21,8 °    |
| θ <sub>sup</sub>       | = 45 °      |

Tabella 31 - Verifica a sollecitazioni taglianti SLU



### 8.3.2 Sezione armatura corrente

| geometria              |        |        |                    |            |
|------------------------|--------|--------|--------------------|------------|
| sezione trasversale    |        |        |                    |            |
| D                      | c      | d      | passo              | interferro |
| [cm]                   | [cm]   | [cm]   | [cm]               | [cm]       |
| 100                    | 6,0    | 91,5   | 13,0               | 10,4       |
| armatura longitudinale |        |        |                    |            |
| nbarre                 | $\phi$ | $r_i$  | $A_{sl}$           | $c_i$      |
|                        | [mm]   | [cm]   | [cm <sup>2</sup> ] | [cm]       |
| 20                     | 26     | 41,5   | 106,19             | 8,50       |
| armatura a taglio      |        |        |                    |            |
| Tipo                   | $\phi$ | $\rho$ | $A_{sw}$           |            |
|                        | [mm]   | [cm]   | [cm <sup>2</sup> ] |            |
| spirale                | 12     | 20     | 2,26               |            |

| sollecitazioni e risultati   |                               |
|------------------------------|-------------------------------|
| SLE                          | SLU                           |
| $M_{Ek}$ 26,0 [kNm]          | $M_{Ed}$ 26,0 [kNm]           |
| $N_{Ek}$ 2319,0 [kN]         | $N_{Ed}$ 3363,0 [kN]          |
| <b>presso-flessione</b>      | <b>presso-flessione</b>       |
| $M_{cr}$ -40,6 [kNm]         | $M_{Rd}$ 333,8 [kNm]          |
| <b>quota asse neutro</b>     | FS 12,84                      |
| $y_n$ - [cm]                 | <b>taglio</b>                 |
| <b>tensioni e fessure</b>    | $V_{Rdc}$ -264,4 [kN]         |
| $\sigma_{c,min}$ 0,0 [MPa]   | predisporre armatura a taglio |
| $\sigma_{s,min}$ 206,6 [MPa] |                               |
| $\sigma_{s,max}$ 230,2 [MPa] |                               |
|                              | $V_{Rds}$ 457,8 [kN]          |
|                              | $V_{Rdmax}$ 1937,1 [kN]       |
|                              | $\theta$ 30,0 [°]             |
|                              | sezione duttile               |
|                              | $a_l$ 57,0 [cm]               |

| verifica DM08        |          |
|----------------------|----------|
| Verifica a taglio    |          |
| contributo $A_{sl}$  |          |
| scelta               | no       |
| angolo $\theta$      |          |
| scelta               | imposto  |
| $\theta_{imposto}$   | 30 [°]   |
| $\theta_{calcolato}$ | 15,3 [°] |
| $\theta_{inf}$       | 21,8 [°] |
| $\theta_{sup}$       | 45 [°]   |
| Incidenza            |          |
| Armatura min         | CD 'A'   |

| materiali                |                        |
|--------------------------|------------------------|
| calcestruzzo             | acciaio                |
| $R_{ck}$ 30 [MPa]        | $f_{yk}$ 450 [MPa]     |
| $f_{ck}$ 24,9 [MPa]      | $\gamma_s$ 1,15        |
| $\gamma_c$ 1,5           | $f_{yd}$ 391,3 [MPa]   |
| $\alpha_{cc}$ 0,85       | $E_s$ 200000 [MPa]     |
| $f_{cd}$ 14,1 [MPa]      | $\epsilon_{uk}$ 75 [‰] |
| $v$ 0,5                  |                        |
| $\epsilon_{c2}$ 2,0 [‰]  |                        |
| $\epsilon_{cu2}$ 3,5 [‰] |                        |
| $\alpha_e$ 15,0          |                        |
| $k_t$ 0,6                |                        |
| $k_1$ 0,8                |                        |
| $k_3$ 3,4                |                        |
| $k_4$ 0,425              |                        |
|                          | <b>valori limite</b>   |
|                          | 0,55   13,7 [MPa]      |
|                          | 0,75   337,5 [MPa]     |
|                          | $w_{k,lim}$ 0,2 [mm]   |

| legenda              |   |
|----------------------|---|
| $\alpha_{cc}$        | coeff. effetti a lungo termine                                |
| $v$                  | coeff. riduzione resistenza bielle                            |
| $\alpha_e = E_s/E_c$ |   |
| $k_t$                | 0,6 azioni di breve durata                                    |
|                      | 0,4 azioni di lunga durata                                    |
| $k_1$                | 0,8 barre aderenza migliorata                                 |
|                      | 1,6 barre lisce   |
| $k_2$                | 0,5 flessione   |
|                      | $(\epsilon_1 + \epsilon_2)/2, \epsilon_1$ trazione eccentrica |
|                      | 1 trazione pura   |
| $k_3$                | 3,4   |
| $k_4$                | 0,425   |
| $\sigma$             | >0 se di trazione   |

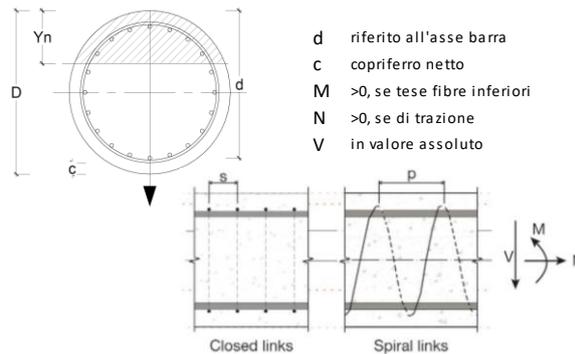


Tabella 32 'SET-1' Massima trazione - Verifica a pressoflessione SLE, SLU, SLV



| geometria              |        |        |                    |            |
|------------------------|--------|--------|--------------------|------------|
| sezione trasversale    |        |        |                    |            |
| D                      | c      | d      | passo              | interferro |
| [cm]                   | [cm]   | [cm]   | [cm]               | [cm]       |
| 100                    | 6,0    | 91,5   | 13,0               | 10,4       |
| armatura longitudinale |        |        |                    |            |
| nbarre                 | $\phi$ | $r_i$  | $A_{sl}$           | $c_i$      |
|                        | [mm]   | [cm]   | [cm <sup>2</sup> ] | [cm]       |
| 20                     | 26     | 41,5   | 106,19             | 8,50       |
| armatura a taglio      |        |        |                    |            |
| Tipo                   | $\phi$ | $\rho$ | $A_{sw}$           |            |
|                        | [mm]   | [cm]   | [cm <sup>2</sup> ] |            |
| spirale                | 12     | 20     | 2,26               |            |

| sollecitazioni e risultati          |                             |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| SLE                                 | SLU                         |
| $M_{Ek}$ 26,0 [kNm]                 | $M_{Ed}$ 26,0 [kNm]         |
| $N_{Ek}$ -3442,0 [kN]               | $N_{Ed}$ -4649,0 [kN]       |
| presso-flessione                    | presso-flessione            |
| $M_{cr}$ 725,5 [kNm]                | $M_{Rd}$ 2135,8 [kNm]       |
| quota asse neutro                   | FS                          |
| $y_n$ - [cm]                        | 82,14                       |
| tensioni e fessure                  | taglio                      |
| $\sigma_{c,min}$ -3,9 [MPa]         | $V_{Rdc}$ 443,3 [kN]        |
| $\sigma_{s,min}$ -57,2 [MPa]        | non serve armatura a taglio |
| $\sigma_{s,max}$ -52,1 [MPa]        |                             |
|                                     | $V_{Rds}$ 457,8 [kN]        |
| $k_2$ 0,5                           | $V_{Rdmax}$ 1937,1 [kN]     |
| $\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$ - [%] | $\theta$ 30,0 [°]           |
| $S_{r,max}$ - [cm]                  | sezione duttile             |
| $w_k$ - [mm]                        | $a_l$ 64,6 [cm]             |

| verifica DM08        |          |
|----------------------|----------|
| Verifica a taglio    |          |
| contributo $A_{sl}$  |          |
| scelta               | no       |
| angolo $\theta$      |          |
| scelta               | imposto  |
| $\theta_{imposto}$   | 30 [°]   |
| $\theta_{calcolato}$ | 15,3 [°] |
| $\theta_{inf}$       | 21,8 [°] |
| $\theta_{sup}$       | 45 [°]   |
| Incidenza            |          |
| Armatura min         | CD 'A'   |

| materiali        |            |                 |              |
|------------------|------------|-----------------|--------------|
| calcestruzzo     |            | acciaio         |              |
| $R_{ck}$         | 30 [MPa]   | $f_{yk}$        | 450 [MPa]    |
| $f_{ck}$         | 24,9 [MPa] | $\gamma_s$      | 1,15         |
| $\gamma_c$       | 1,5        | $f_{yd}$        | 391,3 [MPa]  |
| $\alpha_{cc}$    | 0,85       | $E_s$           | 200000 [MPa] |
| $f_{cd}$         | 14,1 [MPa] | $\epsilon_{uk}$ | 75 [%]       |
| $\nu$            | 0,5        |                 |              |
| $\epsilon_{c2}$  | 2,0 [%]    |                 |              |
| $\epsilon_{cu2}$ | 3,5 [%]    |                 |              |
| $\alpha_e$       | 15,0       |                 |              |
| $k_t$            | 0,6        |                 |              |
| valori limite    |            |                 |              |
| $k_1$            | 0,8        | 0,55            | 13,7 [MPa]   |
| $k_3$            | 3,4        | 0,75            | 337,5 [MPa]  |
| $k_4$            | 0,425      | $w_{k,lim}$     | 0,2 [mm]     |

| legenda |  |
|---------|--|
|         | <p><math>d</math> riferito all'asse barra</p> <p><math>c</math> copriferro netto</p> <p><math>M</math> &gt;0, se tese fibre inferiori</p> <p><math>N</math> &gt;0, se di trazione</p> <p><math>V</math> in valore assoluto</p>   |
|         | <p><math>\alpha_{cc}</math> coeff. effetti a lungo termine</p> <p><math>\nu</math> coeff. riduzione resistenza bielle</p> <p><math>\alpha_e = E_s/E_c</math></p> <p><math>k_t</math> 0,6 azioni di breve durata</p> <p>0,4 azioni di lunga durata</p> <p><math>k_1</math> 0,8 barre aderenza migliorata</p> <p>1,6 barre lisce</p> <p><math>k_2</math> 0,5 flessione</p> <p><math>(\epsilon_1 + \epsilon_2)/2 \epsilon_1</math> trazione eccentrica</p> <p>1 trazione pura</p> <p><math>k_3</math> 3,4</p> <p><math>k_4</math> 0,425</p> <p><math>\sigma</math> &gt;0 se di trazione</p> |

Tabella 33 Massima compressione - Verifica a pressoflessione SLE, SLU, SLV



| geometria              |        |        |                    |            |
|------------------------|--------|--------|--------------------|------------|
| sezione trasversale    |        |        |                    |            |
| D                      | c      | d      | passo              | interferro |
| [cm]                   | [cm]   | [cm]   | [cm]               | [cm]       |
| 100                    | 6,0    | 91,5   | 13,0               | 10,4       |
| armatura longitudinale |        |        |                    |            |
| nbarre                 | $\phi$ | $r_i$  | $A_{sl}$           | $c_i$      |
|                        | [mm]   | [cm]   | [cm <sup>2</sup> ] | [cm]       |
| 20                     | 26     | 41,5   | 106,19             | 8,50       |
| armatura a taglio      |        |        |                    |            |
| Tipo                   | $\phi$ | $\rho$ | $A_{sw}$           |            |
|                        | [mm]   | [cm]   | [cm <sup>2</sup> ] |            |
| spirale                | 12     | 20     | 2,26               |            |

| sollecitazioni e risultati             |                               |
|--|-------------------------------|
| SLE                                    | SLU                           |
| $M_{Ek}$ 26,0 [kNm]                    | $M_{Ed}$ 26,0 [kNm]           |
| $N_{Ek}$ 1127,0 [kN]                   | $N_{Ed}$ 3363,0 [kN]          |
| $V_{Ed}$ 16,0 [kN]                     | $V_{Ed}$ 16,0 [kN]            |
| presso-flessione                       |                               |
| $M_{cr}$ 117,9 [kNm]                   | $M_{Rd}$ 333,8 [kNm]          |
| quota asse neutro                      |                               |
| $y_n$ - [cm]                           | FS 12,84                      |
| tensioni e fessure                     |                               |
| $\sigma_{c,min}$ 0,0 [MPa]             | $V_{Rdc}$ -264,4 [kN]         |
| $\sigma_{s,min}$ 94,3 [MPa]            | predisporre armatura a taglio |
| $\sigma_{s,max}$ 117,9 [MPa]           | $V_{Rds}$ 457,8 [kN]          |
| $k_2$ 1,0                              | $V_{Rdmax}$ 1937,1 [kN]       |
| $\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$ 0,30 [‰] | $\theta$ 30,0 [°]             |
| $S_{r,max}$ 57,2 [cm]                  | sezione duttile               |
| $w_k$ 0,17 [mm]                        | $a_l$ 57,0 [cm]               |

| verifica DM08        |          |
|----------------------|----------|
| Verifica a taglio    |          |
| contributo $A_{sl}$  |          |
| scelta               | no       |
| angolo $\theta$      |          |
| scelta               | imposto  |
| $\theta_{imposto}$   | 30 [°]   |
| $\theta_{calcolato}$ | 15,3 [°] |
| $\theta_{inf}$       | 21,8 [°] |
| $\theta_{sup}$       | 45 [°]   |
| Incidenza            |          |
| Armatura min         | CD 'A'   |

| materiali                |                        |
|--------------------------|------------------------|
| calcestruzzo             | acciaio                |
| $R_{ck}$ 30 [MPa]        | $f_{yk}$ 450 [MPa]     |
| $f_{ck}$ 24,9 [MPa]      | $\gamma_s$ 1,15        |
| $\gamma_c$ 1,5           | $f_{yd}$ 391,3 [MPa]   |
| $\alpha_{cc}$ 0,85       | $E_s$ 210000 [MPa]     |
| $f_{cd}$ 14,1 [MPa]      | $\epsilon_{uk}$ 75 [‰] |
| $v$ 0,5                  |                        |
| $\epsilon_{c2}$ 2,0 [‰]  |                        |
| $\epsilon_{cu2}$ 3,5 [‰] |                        |
| $\alpha_e$ 15,0          |                        |
| $k_t$ 0,6                |                        |
| valori limite            |                        |
| $k_1$ 0,8                | 0,55   13,7 [MPa]      |
| $k_3$ 3,4                | 0,75   337,5 [MPa]     |
| $k_4$ 0,425              | $w_{k,lim}$ 0,2 [mm]   |

| legenda |                             |
|---------|-----------------------------|
| $d$     | riferito all'asse barra     |
| $c$     | copriferro netto            |
| $M$     | >0, se tese fibre inferiori |
| $N$     | >0, se di trazione          |
| $V$     | in valore assoluto          |

|               |   |
|---------------|---|
| $\alpha_{cc}$ | coeff. effetti a lungo termine                              |
| $v$           | coeff. riduzione resistenza bielle                          |
| $\alpha_e$    | $=E_s/E_c$  |
| $k_t$         | 0,6 azioni di breve durata                                  |
|               | 0,4 azioni di lunga durata                                  |
| $k_1$         | 0,8 barre aderenza migliorata                               |
|               | 1,6 barre lisce   |
| $k_2$         | 0,5 flessione   |
|               | $(\epsilon_1 + \epsilon_2)/2\epsilon_1$ trazione eccentrica |
|               | 1 trazione pura   |
| $k_3$         | 3,4   |
| $k_4$         | 0,425   |
| $\sigma$      | >0 se di trazione   |

Tabella 34 'SET-2' – Verifica a fessurazione SLE



**Verifica a taglio di una sezione circolare**

secondo EN 1992-1-1:2004/E / Bollettino CEB n. 137 All. 5

**geometria**

**sezione trasversale - rettangolo equivalente**

|                                  |       |   |      |    |
|----------------------------------|-------|---|------|----|
| base                             | $b_e$ | = | 90   | cm |
| altezza                          | $h_e$ | = | 70,6 | cm |
| copriferro (asse armatura long.) | $c$   | = | 6    | cm |
| altezza utile                    | $d$   | = | 64,6 | cm |
| braccio coppia interna           | $z$   | = | 70,5 | cm |

**armatura a taglio**

|                           |             |   |        |                 |
|---------------------------|-------------|---|--------|-----------------|
| tipo di armatura          | -> spirale  |   |        |                 |
| diametro                  | $\phi$      | = | 12     | mm              |
| coefficiente correttivo   | $\lambda_1$ | = | 0,85   |                 |
| area                      | $A_{sw}$    | = | 226,2  | mm <sup>2</sup> |
| area massima - 6.12 - EC2 | $A_{sw,m}$  | = | 1622,7 | mm <sup>2</sup> |
| distanza tra due creste   | $\rho$      | = | 20     | cm              |
| coefficiente correttivo   | $\lambda_2$ | = | 1,00   |                 |
|                           | $r_{sw}$    | = | 43,4   | cm              |

**armatura longitudinale tesa**

|             |            |   |      |                 |
|-------------|------------|---|------|-----------------|
| area totale | $A_{sl,e}$ | = | 53,1 | cm <sup>2</sup> |
|-------------|------------|---|------|-----------------|

**materiali**

**calcestruzzo**

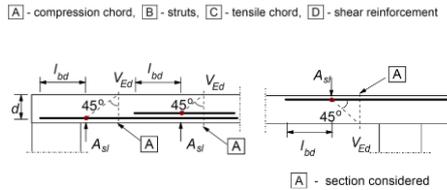
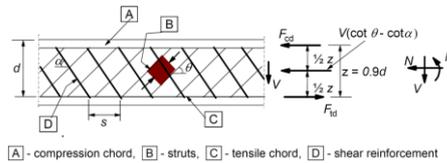
|  |               |   |      |     |
|--|---------------|---|------|-----|
| resistenza caratt. cilindrica a 28 gg. | $f_{ck}$      | = | 24,9 | MPa |
| coeff. parziale di sicurezza           | $\gamma_c$    | = | 1,5  |     |
| coeff. effetti a lungo termine         | $\alpha_{cc}$ | = | 0,85 |     |
| tensione di calcolo                    | $f_{cd}$      | = | 14,1 | MPa |
| coeff. riduzione resistenza bielle     | $v$           | = | 0,5  |     |
| tensione di calcolo - trazione         | $f_{ctd}$     | = | 1,2  | MPa |

**acciaio**

|                                    |            |   |       |     |
|------------------------------------|------------|---|-------|-----|
| tensione caratt. di snervamento    | $f_{yk}$   | = | 450,0 | MPa |
| coeff. parziale di sicurezza       | $\gamma_s$ | = | 1,15  |     |
| tensione di snervamento di calcolo | $f_{yd}$   | = | 391,3 | MPa |

Tabella 35 Verifica a taglio

**legenda**



**sollecitazioni e verifiche**

|                                   |             |   |       |    |
|-----------------------------------|-------------|---|-------|----|
| taglio                            | $V_{Ed}$    | = | 16    | kN |
| azione assiale                    | $N_{Ed}$    | = | -4649 | kN |
| azione assiale di precompressione | $N_{Ed,cp}$ | = | 0     | kN |

|                                |           |   |       |    |
|--------------------------------|-----------|---|-------|----|
| resistenza elemento non armato | $V_{Rdc}$ | = | 443,3 | kN |
|--------------------------------|-----------|---|-------|----|

|   |             |   |        |    |
|---|-------------|---|--------|----|
| resistenza armatura a taglio  | $V_{Rds}$   | = | 457,8  | kN |
| resistenza bielle calcestruzzo                                      | $V_{Rdmax}$ | = | 1937,1 | kN |
| inclinazione bielle calcestruzzo                                    | $\theta$    | = | 30,0   | °  |
| $2 A_{sw,max} f_{ywd} \text{sen}(a) / b_w s \alpha_{cw} n_1 f_{cd}$ |             | = | 0,14   |    |

|                            |         |   |      |    |
|----------------------------|---------|---|------|----|
| sezione                    | duttile |   |      |    |
| traslazione armatura long. | $a_l$   | = | 64,6 | cm |

**servizio**

|               |   |       |     |
|---------------|---|-------|-----|
| $\alpha$      | = | 1,456 | rad |
| $\theta$      | = | 0,524 | rad |
| $C_{Rdc}$     | = | 0,12  |     |
| $k$           | = | 1,56  |     |
| $\rho_1$      | = | 0,00  |     |
| $k_1$         | = | 0,15  |     |
| $v_{min}$     | = | 0,339 | MPa |
| $\sigma_{cp}$ | = | 2,82  | MPa |
| $V_{Rdc}$     | = | 246,1 | kN  |
| $V_{Rdcmin}$  | = | 443,3 | kN  |
| $\alpha_{cw}$ | = | 1,0   |     |

|            |   |        |    |
|------------|---|--------|----|
| $V_{Rd,c}$ | = | 1716,5 | kN |
|------------|---|--------|----|

|            |   |       |    |
|------------|---|-------|----|
| $V_{Rd,c}$ | = | 703,2 | kN |
|------------|---|-------|----|

**angolo  $\theta$**

|                      |         |        |
|----------------------|---------|--------|
| scelta               | imposto |        |
| $\theta_{imposto}$   | =       | 30 °   |
| $\theta_{calcolato}$ | =       | 15,3 ° |
| $\theta_{inf}$       | =       | 21,8 ° |
| $\theta_{sup}$       | =       | 45 °   |

**8.3.3 Verifica ancoraggio barre nella platea di fondazione**

I pali di fondazione sono ancorati alla platea attraverso i ferri di attesa della gabbia superiore di armatura dei pali stessi. Al fine di garantire una adeguata lunghezza di ancoraggio, i ferri di armatura sono stati risvoltati a U, la lunghezza complessiva dell'ancoraggio è pari 144 cm, 19cm superiore a quella minima di necessaria, calcolata in accordo al §8.4 di EC2 per barre dritte, come riportato nella seguente tabella.

Nel calcolo dell'ancoraggio, è stato tenuto considerato un diametro di 33 mm, equivalente all'area delle barre longitudinali accoppiate  $\Phi 26$  e 20.



| <b>Armatura</b>            | <b>[-]</b>           | <b>Longitudinale</b>   |
|----------------------------|----------------------|--|
| <b>Barra</b>               | <b>[-]</b>           | <b>Dritta</b>  |
| <b>Sollecitazione</b>      | <b>[-]</b>           | <b>Trazione</b>  |
| $\phi$                     | [mm]                 | <b>33</b> Diametro dell'armatura   |
| $\gamma_c$                 | [-]                  | <b>1,50</b> Coefficiente parziale per il calcestruzzo                          |
| $R_{ck}$                   | [N/mm <sup>2</sup> ] | <b>37</b> Resistenza caratteristica cubica CLS                                 |
| $f_{ck}$                   | [N/mm <sup>2</sup> ] | <b>30,7</b> Resistenza caratteristica cilindrica CLS                           |
| $f_{ctk,0.05}$             | [N/mm <sup>2</sup> ] | <b>2,06</b> Resistenza caratteristica cubica CLS                               |
| $\alpha_{ct}$              | [-]                  | <b>1,00</b> Coeff. effetti a lungo termine                                     |
| $\eta_1$                   | [-]                  | <b>0,70</b> Coeff. condizioni di aderenza (1.0 buona aderenza; 0.7 altri casi) |
| $\eta_2$                   | [-]                  | <b>0,99</b> Coeff. riferito al diametro dell'armatura                          |
| $f_{bd}$                   | [N/mm <sup>2</sup> ] | <b>2,14</b> Tensione di aderenza ultima acciaio-clc                            |
| $\sigma_{sd}$              | [N/mm <sup>2</sup> ] | <b>335</b> Tensione di progetto  |
| $l_{b,rqd}$                | [mm]                 | <b>1291</b> Lunghezza di ancoraggio di base                                    |
| $c$                        | [mm]                 | <b>72</b> Copriferro netto   |
| $a$                        | [mm]                 | <b>80</b> Interasse netto armature   |
| $c_1$                      | [mm]                 | <b>72</b> Copriferro laterale  |
| $c_d$                      | [mm]                 | <b>40</b> Copriferro netto   |
| $\alpha_1$                 | [-]                  | <b>1,00</b> Coeff. vedi prospetto 8.2 EC2                                      |
| $\alpha_2$                 | [-]                  | <b>0,97</b> Coeff. vedi prospetto 8.2 EC2                                      |
| $\alpha_3$                 | [-]                  | <b>1,00</b> Coeff. vedi prospetto 8.2 EC2                                      |
| $\alpha_4$                 | [-]                  | <b>1,00</b> Coeff. vedi prospetto 8.2 EC2                                      |
| $\alpha_5$                 | [-]                  | <b>1,00</b> Coeff. vedi prospetto 8.2 EC2                                      |
| $l_{b,min}$                | [mm]                 | <b>387</b> Lunghezza di ancoraggio minima                                      |
| <b><math>l_{bd}</math></b> | <b>[mm]</b>          | <b>1250</b> Lunghezza di ancoraggio di progetto                                |

|   |   |             |  |           |                    |
|---|---|-------------|--|-----------|--------------------|
| GENERAL CONTRACTOR<br><br><b>IRICAV2</b> | ALTA SORVEGLIANZA<br><br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |             |  |           |                    |
| FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE   | Progetto<br>IN17  | Lotto<br>12 | Codifica Documento<br>EI2 CL TR 03 0 0 001 | Rev.<br>B | Foglio<br>50 di 51 |

## 9 VERIFICHE AL GALLEGGIAMENTO DELLA RAMPA DI ACCESSO

Il piazzale del fabbricato FA03 è raggiunto da una rampa di accesso con platea in calcestruzzo e muri laterali, separata dal piazzale su pali attraverso un giunto. La rampa è soggetta alla sottospinta idraulica, analogamente alla platea, e si è verificato che il peso proprio complessivo della stessa sia tale da autoequilibrare la spinta applicata. Nelle tabelle seguenti sono riportati i parametri geometrici fondamentali e le verifiche al galleggiamento.

### DATI GEOMETRICI PRINCIPALI

|  |        |
|--|--------|
| <b>Altezza media di falda</b>                            | 4.7 m  |
| <b>Lunghezza rampa</b>                                   |        |
| <b>Lunghezza rampa parallela binari</b>                  | 43.5 m |
| <b>Lunghezza rampa ortogonali binari</b>                 | 23 m   |
| <b>Altezza media muro Hvar - tratto parallelo binari</b> | 4.5 m  |
| <b>Altezza media muro H var - tratto ortogonale</b>      | 2.3 m  |
| <b>Altezza muro H cost - tratto parallelo binari</b>     | 3 m    |
| <b>Larghezza rampa</b>                                   | 7.4 m  |
| <b>Tratto rampa immerso</b>                              | 33.5 m |
| <b>Spessore fondazione</b>                               | 0.6 m  |
| <b>Spessore muro lato diaframmi</b>                      | 0.6 m  |
| <b>Spessore muro lato trincea</b>                        | 0.3 m  |

Tabella 36 Dati geometrici principali rampa di accesso piazzale FA03

| VERIFICHE AL GALLEGGIAMENTO RAMPA DI ACCESSO          |                                |                         |                                 |
|---|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
|   | Equilibrio<br>alla traslazione | Braccio<br>di<br>coppia | Equilibrio<br>alla<br>rotazione |
| <b>Carichi instabilizzanti (coefficiente 1.1)</b>     |                                |                         |                                 |
|   | <b>(kN)</b>                    | <b>(m)</b>              | <b>(kNm)</b>                    |
| <i>Spinta falda</i>                                   | 6408.2                         | 32.3                    | 207199.0                        |
| <b>Carichi stabilizzanti (coefficiente 0.9)</b>       |                                |                         |                                 |
|   | <b>(kN)</b>                    | <b>(m)</b>              | <b>(kNm)</b>                    |
| <i>Fondazione</i>                                     | 4345.7                         | 21.8                    | 94517.9                         |
| <i>Parete contro terra - tratto parallelo - H var</i> | 3057.8                         | 28.7                    | 87757.4                         |
| <i>Parete lato trincea - tratto parallelo - Hvar</i>  | 681.8                          | 21.8                    | 14828.1                         |
| <i>Parete lato trincea - tratto parallelo - Hcost</i> | 2303.4                         | 3.8                     | 8637.9                          |
| <i>Parete lato piazzale - tratto ortogonale</i>       | 560.3                          | 7.0                     | 3921.8                          |
| <b>Totale stabilizzante</b>                           | 10388.6                        |                         | 209663.0                        |
| <b>Rapporto Stabilizzante/Instabilizzante</b>         | <b>1.62</b>                    |                         | <b>1.01</b>                     |

Tabella 37 Verifica al galleggiamento rampa di accesso piazzale FA03

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



FABBRICATO FA03 – RELAZIONE DI CALCOLO PALI DI FONDAZIONE

Progetto  
IN17

Lotto  
12

Codifica Documento  
EI2 CL TR 03 0 0 001

Rev.  
B

Foglio  
51 di 51

## 10 VERIFICHE A GALLEGGIAMENTO VASCA ANTINCENDIO

La vasca antincendio è ancorata ai diaframmi perimetrali che circondano la vasca stessa, pertanto, non sono previsti pali a trazione al di sotto della vasca; per la determinazione delle azioni di sollevamento e la verifica dei diaframmi perimetrali si rimanda alla relazione IN1711EI2CLTR0000003.