

Regione Emilia-Romagna
Direzione Generale Cura del Territorio e dell'Ambiente

IDROVIA FERRARESE - 1° LOTTO 1° STRALCIO / PARTE
DEMOLIZIONE E RICOSTRUZIONE BOTTE SIFONE DEL CANALE BIANCO
ALL'ATTRAVERSAMENTO DEL CANALE BOICELLI

PROGETTO ESECUTIVO

RUP:

Dott. Claudio Miccoli
REGIONE EMILIA-ROMAGNA
AGENZIA REGIONALE PER LA SICUREZZA TERRITORIALE E LA PROTEZIONE CIVILE
SERVIZIO AREA RENO PO DI VOLANO - SEDE DI FERRARA

PROGETTAZIONE:

MC Engineering Srl



SOCIETA' DI INGEGNERIA
Via Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (BO)
Tel. +39 051 4211945 Fax +39 051 4213490
E-mail info@studio-chinni.it

Direttore tecnico:
Ing. Mario Chinni
(Albo Ingegneri Bologna nr. 4776/A)

Gruppo di lavoro:
Ing. Giorgio Fantini
Ing. Cristina Osti
Geom. Dario Calvanese

Titolo:

RELAZIONE DI CALCOLO OPERE PROVVISORIALI

Codice elaborato

1 5 0 9 R 7 0 1 0 E 1

| Data | 14/04/2017 | Archivio | 1509_R_7010_E_1.pdf | Scala | | |
|------|------------|--|---------------------|---------|-------------|-----------|
| 01 | 14/04/2017 | Aggiornamento a seguito istruttoria tecnica del 05/04/2017 | | MC | GF | MC |
| 00 | 30/09/2016 | Emissione | | MC | GF | MC |
| Rev. | Data | Oggetto | | Redatto | Controllato | Approvato |

| | | | |
|--|---|--|-------------------------|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Data: 14/04/2017 |
| | | Relazione di calcolo Palancoiato | |

INDICE

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | INTRODUZIONE | 2 |
| 1.1 | SOVRACCARICHI E COMBINAZIONI DI CARICO | 2 |
| 1.2 | IL MODELLO DI CALCOLO..... | 2 |
| 2. | NORMATIVA DI RIFERIMENTO | 4 |
| 3. | MATERIALI | 5 |
| 3.1 | ACCIAIO PER CARPENTERIA..... | 5 |
| 4. | PARAMETRI DEL TERRENO | 6 |
| 5. | SEZIONI DI CALCOLO | 7 |
| 5.1 | PALANCOLE | 7 |
| 5.2 | PUNTELLI..... | 8 |
| 5.3 | TRAVI DI RIPARTIZIONE | 8 |
| 6. | FASI ESECUTIVE | 11 |
| 7. | RISULTATI DELL'ANALISI E VERIFICHE | 16 |
| 7.1 | DIAGRAMMI E VERIFICHE STRUTTURALI | 16 |
| 7.2 | VERIFICHE GEOTECNICHE..... | 20 |
| 7.3 | STABILITÀ IDRAULICA..... | 21 |
| | APPENDICE A: RESISTENZA ALL'INSTABILITÀ DEI PUNTELLI | 23 |

| | | | |
|--|---|--|---|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 Data: 14/04/2017 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Relazione di calcolo Palancole |

1. INTRODUZIONE

Il presente rapporto tratta del calcolo delle palancole provvisorie a sostegno degli scavi per la costruzione della nuova botte a sifone all'interferenza tra il canale Bianco e il Canale Boicelli.

Il palancole viene eseguito con profili AZ44, di lunghezza complessiva 21.0 m, con quota della testa a 6.00 m s.l.m., con l'ausilio di un sistema di puntelli in testa a quota 5.00 m s.l.m. Le palancole sono installate a distanza frontale di circa 12.5 m le une dalle altre, a chiusura del perimetro sui lati esterni. Prima dell'approfondimento dello scavo, si prevede il tamponamento del fondo mediante iniezioni ad alta pressione (jet grouting monofluido) al fine di contenere i fenomeni di sifonamento.

1.1 Sovraccarichi e Combinazioni di carico

La spinta delle terre è determinata dai parametri geotecnici (γ , ϕ' , c' , E_s , E_{UR}), la spinta idraulica si assume agente dal pelo libero del canale Boicelli. La caratteristica di provvisorietà dell'intervento di scavo (inferiore a 2 anni), non prevede l'azione sismica. Le combinazioni di carico analizzate sono le seguenti.

- SLE RARA ($E_d = G_k + Q_k$) Coefficienti parziali terreno M1 (tab. 6.2.II NTC08)
- SLU STR ($E_d = 1.3 G_k + 1.5 Q_k$) Coefficienti parziali terreno M1 (tab. 6.2.II NTC08)
- SLU GEO ($E_d = G_k + 1.3 Q_k$) Coefficienti parziali terreno M2 (tab. 6.2.II NTC08)
- SLU UPL ($E_d = 0.9 G_{k,stab} + 1.1 G_{k,dst}$) Coefficienti parziali terreno M2 (tab. 6.2.II NTC08)

Essendo E_d l'azione di progetto, G_k e Q_k rispettivamente i carichi permanenti e variabili caratteristici (intendendo quali permanenti quelli derivanti dalla spinta delle terre e dell'acqua).

1.2 Il modello di calcolo

Il calcolo viene affrontato mediante la tecnica gli elementi finiti in regime di deformazione piana e con modelli non lineari del terreno implementata nel codice Plaxis (www.plaxis.nl), al sito della quale si rimanda per gli elementi di validazione del codice.

Le palancole sono simulate mediante elementi piani con modulo e spessore tali da determinare le medesime caratteristiche di deformabilità flessionale (EJ) e assiale (EA) delle palancole unitamente ad un elemento (beam) in asse con modulo piccolissimo (onion skin) che, deformandosi con gli elementi piani simulanti le palancole, permetta di ricostruire i diagrammi di sollecitazione delle palancole.

I puntelli vengono simulati attraverso elementi molla con rigidezza distribuita per metro di sviluppo essendo il calcolo eseguito in termini di deformazione piana ($K = (EA / L) / i$ essendo i l'interasse dei puntelli).

| | | | |
|--|---|--|-------------------------|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Data: 14/04/2017 |
| | | Relazione di calcolo Palancolato | |

La modellazione non lineare viene eseguita considerando i processi di nascita e morte degli elementi di terreno al fine di simulare le fasi di scavo e la loro incidenza sulle sollecitazioni degli elementi strutturali.

| | | | |
|--|---|--|-------------------------|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Data: 14/04/2017 |
| | | Relazione di calcolo Palancolato | |

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Norme Nazionali

- DM 14 gennaio 2008: Norme Tecniche per le costruzioni
- Circolare 2 febbraio 2009 n.ro 617: Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove Norme Tecniche per le costruzioni" di cui al DM 14/01/2008

Eurocodici

- UNI EN 1993-1-6: Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture di acciaio. Parte 1-6: Resistenza e stabilità delle strutture a guscio.
- UNI EN 1993-5: Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 5: Pali e palancole
- UNI EN 1997-1: Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica. Parte 1: Regole generali.
- UNI EN 1998-5: Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

Norme di esecuzione

- UNI EN 12063: "Esecuzione di Lavori geotecnici speciali: Palancolate"
- UNI EN 12716: "Esecuzione di Lavori Geotecnici Speciali: Getti per Iniezione (Jet Grouting)"

| | | | |
|--|---|--|-------------------------|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Data: 14/04/2017 |
| | | Relazione di calcolo Palancolato | |

3. MATERIALI

3.1 Acciaio per carpenteria

In tabella 3.2 sono riportati i valori di resistenza caratteristici e deformabilità dell'acciaio per ogni elemento strutturale (per spessori $t \leq 40$ mm).

| Elemento | Tipo acciaio | f_{yk} (MPa) | f_{tk} (MPa) | E (GPa) | Norma |
|-----------------------------|--------------|----------------|----------------|---------|--------------|
| Profili tubolari | S355 J0 H | ≥ 355 | ≥ 510 | 210 | UNI EN 10219 |
| Profilati a Z per palancole | S355 GP | ≥ 355 | ≥ 480 | 210 | UNI EN 10248 |
| Profilati, piatti e tondi | S355 J0 | ≥ 355 | ≥ 510 | 210 | UNI EN 10025 |

Tab. 3.2 – Parametri di resistenza acciaio

Il coefficiente di sicurezza per le verifiche di resistenza SLU risulta: $\gamma_{M0} = 1.05$, $\gamma_{M1} = 1.05$ (per sezioni di classe 1,2,3). Nel caso di sezioni di classe 4 si utilizza $\gamma_{M1} = 1.10$ (UNI EN 1993-6-1). La resistenza di progetto SLU risulta quindi data dall'espressione: $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_{Mx}$

| | | | |
|--|---|--|---|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 Data: 14/04/2017 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Relazione di calcolo Palancolato |

4. PARAMETRI DEL TERRENO

I parametri caratteristici del terreno e la stratigrafia di progetto risultano dai dati di tabella 4.1 rimandando alla relazione geotecnica per dettagli ulteriori.

| Terreno | Z _{top} | γ _k | c' _k | φ' _k | v | E _{50,ref} | EUR/E _s |
|-----------------------|------------------|----------------------|-----------------|-----------------|------|-----------------------|--------------------|
| | (m slm) | (kN/m ³) | (kPa) | (°) | (-) | (MPa) | (-) |
| Limi argillosi (clSi) | 2.00 | 18 | 5 | 25 | 0.35 | 15 | 3 |
| Sabbia MD (Sa) | -1.00 | 18 | 0 | 35 | 0.35 | 75 | |
| Jet-Grouting | -5.35 | 20 | 80 | 45 | 0.20 | E _s = 1000 | |

Tab. 4.1 – Parametri caratteristici del terreno e del terreno consolidato

I parametri di deformabilità sono quelli del modello Hardening Softening contenuto in Plaxis (E_{50,ref} è il modulo secante al 50% della tensione deviatorica limite sul piano ε₁ - q) che risultano compatibili con le stratigrafie e ragionevolmente conservativi.

In tabella 4.2 sono riportati i coefficienti di spinta a riposo valutati mediante l'espressione di Yaki [K₀ = 1-sin(φ'_k)] per terreni NC, per terreni OC K₀ = (K₀)_{nc}OCR^{0.5}]. Sono inoltre riportati per completezza i valori della trasmissività idraulica orizzontale e verticale (rispettivamente K_H, K_V).

| Terreno | δ' _k / φ' _k | K ₀ | K _H | K _V |
|-----------------------|-----------------------------------|----------------|------------------|------------------|
| | (-) | (-) | (m/s) | (m/s) |
| Limi argillosi (clSi) | 2/3 | 0.707 | 10 ⁻⁸ | 10 ⁻⁸ |
| Sabbia (Sa) | 2/3 | 0.426 | 10 ⁻³ | 10 ⁻³ |
| Jet-Grouting | 2/3 | 1.000 | 10 ⁻⁹ | 10 ⁻⁹ |

Tab. 4.2 – Coefficienti di spinta e permeabilità

I livelli idraulici del canale Boicelli, fissati a 4.60 m slm, si considerando posti a 5.5 m slm e 4.5 m slm per tenere conto di eventuali effetti parete allo scorrimento delle acque.

I valori del terreno consolidato, interno allo scavo, sono da ritenersi soddisfatti qualora, su campioni indisturbati estratti mediante carotaggio continuo eseguito sul terreno miscelato a 14 gg di maturazione, la resistenza a compressione non confinata risulti:

$$|q_c| \geq 2 c' \cos(\varphi') / [1 - \sin(\varphi')] \approx 400 \text{ kPa}$$

e contestualmente la prova di trazione indiretta (brasiliiana) confermi un risultato non inferiore a:

$$|q_t| \geq 2 c' \cos(\varphi') / [3 - \sin(\varphi')] \approx 50 \text{ kPa}$$

La permeabilità in direzione verticale del terreno consolidato deve essere non superiore a K_V = 10⁻⁹ m/s

Il modulo di taglio a piccolissime deformazioni (G_{max}) deve risultare non inferiore a 3 volte il modulo di taglio del terreno interessato dalle iniezioni non ancora trattato.

| | | | |
|--|---|--|---|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 Data: 14/04/2017 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Relazione di calcolo Palancolato |

5. SEZIONI DI CALCOLO

La tipologia di palancola utilizzata è la AZ44-700, di lunghezza complessiva uguale a 21 m, supportata da puntelli formati da tubo in acciaio posti a quota 5 m slm.

La palancola si prevede posta a quota di testa 6.0 m slm e base a quota -15.00 m slm.

5.1 Palancole

In figura 5.1 è riportato lo schema della palancola adottata:

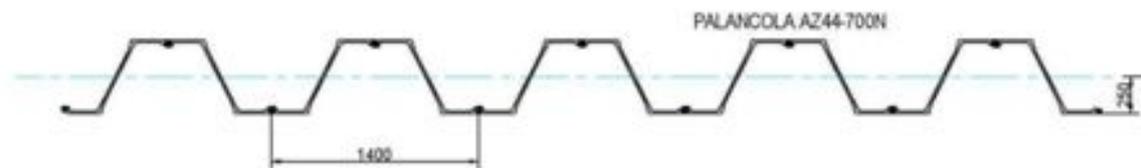


Fig. 5.1 – Sezioni tipiche palancole (con individuazione dell'asse baricentrico)

In tabella 5.1 sono riportate le caratteristiche geometriche e di massa delle tipologie adottate unitamente al momento di snervamento delle palancole ed al taglio limite.

| PALANCOLA | B | A* | J* | W _{max} * | W _{min} * | Peso | M _{yRd} | V _{Rd} |
|-----------|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------|------------------|-----------------|
| | (mm) | (cm ² /m) | (cm ⁴ /m) | (cm ³ /m) | (cm ³ /m) | | | |
| AZ44 | 1400 | 273 | 110150 | 4406 | 4406 | 214.14 | 1489.6 | 2091.4 |

Tab. 5.1 – Parametri di massa e resistenza delle paratie

I dati riportati in tabella si riferiscono alle verifiche di resistenza. Si rimanda agli approfondimenti in appendice B per l'instabilità della struttura a guscio.

La definizione dello spessore equivalente e del modulo equivalente di calcolo viene determinato ponendo l'eguaglianza (per metro di larghezza):

$$EA (s^2 / 12) = EJ \Rightarrow s_{eq} = (12 EJ / EA)^{0.5}$$

E determinando il modulo equivalente da una delle espressioni (per metro di larghezza):

$$E_{eq} = EA / s_{eq} = 12 EJ / s_{eq}^3$$

Le caratteristiche di deformabilità della palancola combinata, espresse in elemento di spessore costante equivalente, risultano in tabella 5.2.

| | | | |
|--|---|--|---|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 Data: 14/04/2017 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Relazione di calcolo Palancolato |

| | | | |
|------------|------------------------|---------------------|------------------------|
| EA (kN) | EJ (kNm ²) | s _{eq} (m) | E _{red} (MPa) |
| 5730000.00 | 231315.00 | 0.696 | 8232.65 |

Tab. 5.2 – Spessore e modulo equivalente

Per la modellazione della pelle di cipolla interna agli elementi palancola si considerano i valori con modulo di Young unitario della sezione: $EJ = 0.0011 \text{ kNm}^2/\text{m}$, $EA = 0.0273 \text{ kN/m}$, le sollecitazioni derivanti dovranno quindi essere moltiplicate per il valore $E = 210 \text{ GPa}$.

5.2 Puntelli

In tabella 5.2 sono riportate le caratteristiche dei puntelli adottati nel calcolo. La rigidezza dei puntelli ($K = EA/L$) viene calcolata sulla metà dello sviluppo della luce netta del puntello (L_n). La resistenza di calcolo (N_{Ed} : vedi sviluppi in Appendice A) tiene conto dell'instabilità per azioni combinate di compressione e flessione considerando il momento derivante dal peso proprio del puntello maggiorato del 10% per tenere conto del peso di flange e collegamenti (fattorizzato per $\gamma_G = 1.3$). La luce libera di inflessione viene calcolata sulla base dello schema di trave semplicemente appoggiata ($L_0 = L_n$ essendo $L_n = 9.50 \text{ m}$ la luce di campata). L'interasse dei puntelli è 6.00 m .

| PARATIA | D | t | classe | A | Peso | i strut | L _n | K strut | N _{bd} strut | N _{bd} strut |
|---------|-------|------|--------|--------------------|--------|---------|----------------|---------|-----------------------|-----------------------|
| | (mm) | (mm) | | (cm ²) | (kg/m) | (m) | (m) | (MNm/m) | (kN) | (kN/m) |
| AZ44 | 323.9 | 8 | 2 | 79.39 | 68.6 | 6.00 | 9.50 | 58.50 | 1343 | 224 |

Tab. 5.2 – Rigidezza e Resistenza del puntello

5.3 Travi di ripartizione

Le travi di ripartizione sono formate da due profili HEA300 accoppiati e saldati in acciaio di grado S355. Il calcolo viene eseguito cautelativamente considerando il carico limite uniformemente ripartito e una condizione di semiincastro su trave continua con campate pari all'interasse:

$$(M_{Ed} \approx qL^2/12 = 224 \text{ kN/m} \times 36 \text{ m}^2 / 12 = 672 \text{ kNm}, V_{Ed} \approx qL/2 = 224 \text{ kN/m} \times 6 \text{ m} / 2 = 672 \text{ kN}).$$

Le caratteristiche delle travi sono riportate in tabella 5.3 con riferimento alla figura 5.2 per gli assi.

| | | | |
|--|---|--|----------------------------------|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Data: 14/04/2017 |
| | | | Relazione di calcolo Palancolato |

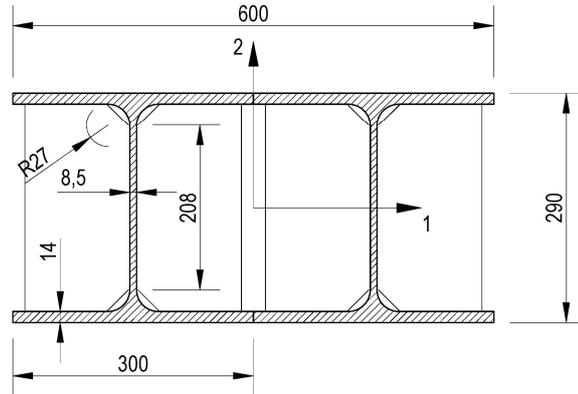


Fig. 5.2 – Sezione trave di coronamento

| Profilo | A | As ₁ | As ₂ | J ₁₁ | W ₁₁ | W _{p11} | J ₂₂ | W ₂₂ | W _{p22} |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 2@HEA300 | (cm ²) | (cm ²) | (cm ²) | (cm ⁴) | (cm ³) | (cm ³) | (cm ⁴) | (cm ³) | (cm ³) |
| | 225 | 140.1 | 52.8 | 36546 | 2520 | 2768 | 63286 | 2110 | 3378 |
| Peso | f _{yk} | γ _M | f _{yd} | M _{Ry11} | M _{Ry22} | M _{Rp11} | M _{Rp22} | V _{Rd1} | V _{Rd2} |
| 176.6 kg/ml | (MPa) | (-) | (MPa) | (kNm) | (kNm) | (kNm) | (kNm) | (kN) | (kN) |
| | 335 | 1.05 | 319 | 804.14 | 673.05 | 883.16 | 1077.68 | 2580.75 | 972.04 |

Tab. 5.3 – Caratteristiche delle travi di ripartizione

Essendo il taglio di progetto superiore al 50% del taglio resistente, si procede alla verifica combinata taglio-flessione, considerando (spessore dell'anima t_w per HEA300 = 2 x 8.5 mm = 17 mm):

$$\rho = (2V_{Ed} / V_{Rd} - 1)^2 = 0.1464$$

$$M_{y,VRd} = f_{yd} [W_{pmax} - \rho A_s^2 / (4 t_w)] = 824.26 \text{ kNm} \quad (M_{Ed} = 672 \text{ kNm} < M_{y,VRd})$$

La verifica all'instabilità flesso torsionale è stata eseguita con l'ausilio del codice ad elementi finiti Straus7 (www.strand7.com) al sito del quale si rimanda per gli elementi di validazione, per la ricerca del momento critico eseguito considerando una trave di campata 6 m caricata con due momenti all'estremità uguali di valore 1000 kNm al fine di determinare un diagramma del momento flettente uniforme. La campata è stata vincolata torsionalmente alle estremità. In figura 5.3 sono riportati i risultanti dell'analisi di "buckling" relativi ai primi 6 modi di instabilità.

| | | | |
|--|---|--|---|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 Data: 14/04/2017 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Relazione di calcolo Palancolato |

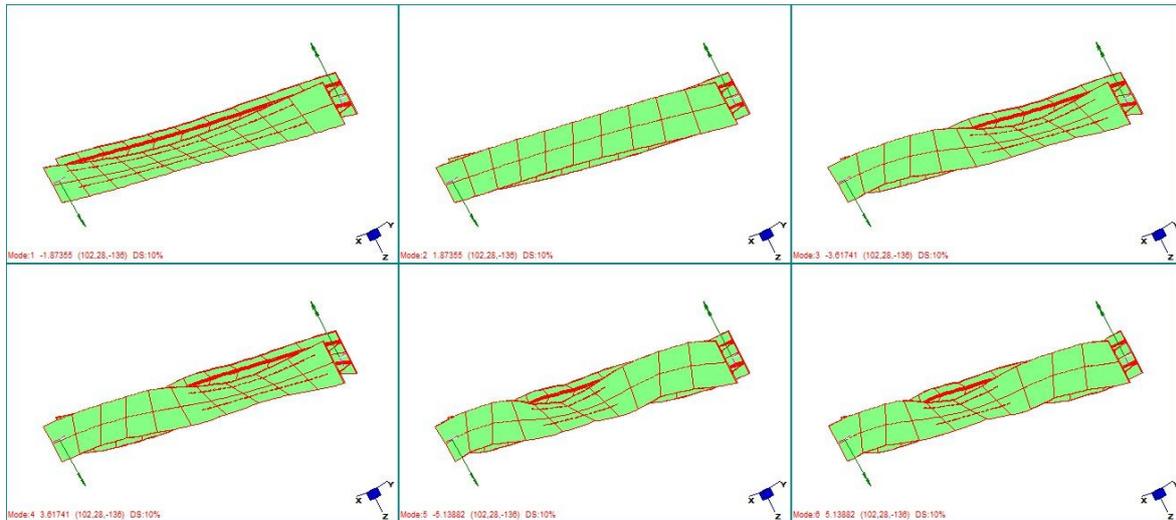


Fig. 5.3 – Verifica di “Buckling” (2@HEA300)

I primi 6 modi di instabilità presentano i seguenti moltiplicatori critici del carico:

| FINAL BUCKLING RESULTS | |
|----------------------------------|-----------------|
| CALCULATED BUCKLING LOAD FACTORS | |
| 1, 2 | ±1.87354849E+00 |
| 3, 4 | ±3.61741335E+00 |
| 5, 6 | ±5.13881842E+00 |

Il momento critico risulta pertanto determinato dal minimo moltiplicatore critico 1.8735 ed è quindi uguale al valore 1873.5 kN.m. La verifica di instabilità flessotorsionale della trave di collegamento risulta dalla disequaglianza:

$$M_{Ed} \leq M_{b,Rd} \text{ essendo } M_{b,Rd} \text{ data dall'espressione: } M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} f_{yd}$$

In tabella 5.4 viene esplicitata la verifica ai sensi del § 4.2.4.1.3.2 delle NTC approvate con DM 14/01/2008. La verifica risulta soddisfatta ($M_{Ed} = 672 \text{ kNm} < M_{b,Rd}$).

| VERIFICA A INSTABILITA' FLESSO TORSIONALE (DM 14/01/2008) | | | | | | |
|---|------------------|--------------|----------|-------------|--------------------|----------------|
| profilo 2@HEA300 | α_{LT} | β | M_{cr} | f_{yk} | W_{py} | λ_{LT} |
| | Tab 4.2.VII | (-) | (kNm) | (MPa) | (cm ³) | (-) |
| | 0.340 | 0.800 | 1873.5 | 355.00 | 2768.13 | 0.724 |
| | $\lambda_{LT,0}$ | k_c | f | Φ_{LT} | χ_{LT} | $M_{b,Rd}$ |
| | (-) | Tab 4.2.VIII | (-) | (-) | (-) | (kNm) |
| 0.200 | 0.900 | 0.951 | 0.799 | 0.831 | 733.56 | |

Tab. 5.4 – Verifica per instabilità flesso torsionale

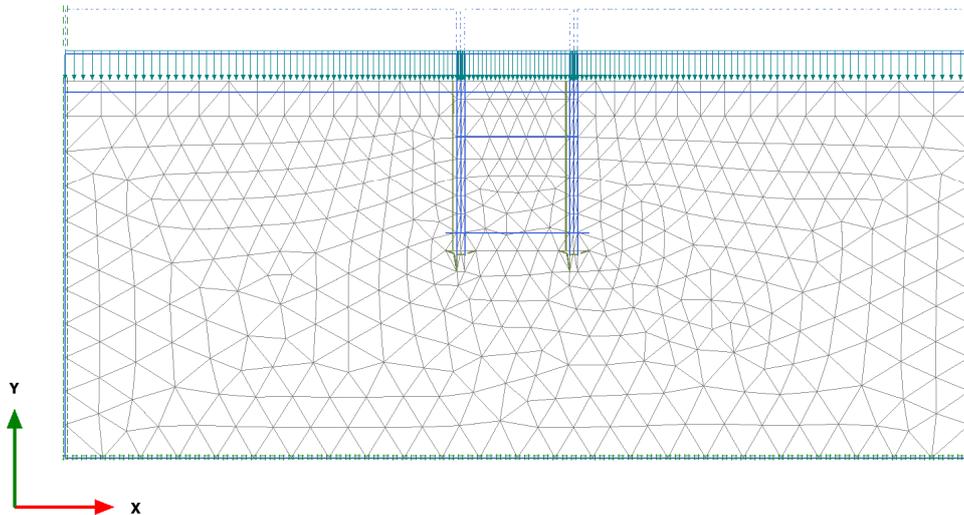
| | | | |
|--|---|--|---|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 Data: 14/04/2017 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Relazione di calcolo Palancolato |

6. FASI ESECUTIVE

Le fasi esecutive di scavo utilizzate nella redazione dei calcoli sono le seguenti:

- 0) Geostatica
- 1) Installazione delle palancole (AZ44-700 – S355) con testa fissata a quota 6.00 m slm;
- 2) Aggottamento della falda a quota 1.50 m slm;
- 3) Esecuzione delle colonne di consolidamento (jet-grouting) da quota -14 m slm a quota -5.40 m slm;
- 4) Installazione delle travi di coronamento (2@HEA300 – S355) e dei i puntelli ($\varnothing 323.9/8$ – S355, interasse 6.00 m) posti a quota 5.00 m slm
- 5) Aggottamento della falda a quota -15.00 m slm;
- 6) Scavo a quota -5.40 m slm per l'esecuzione della botte sifone

Nelle immagini seguenti vengono visualizzate le fasi.

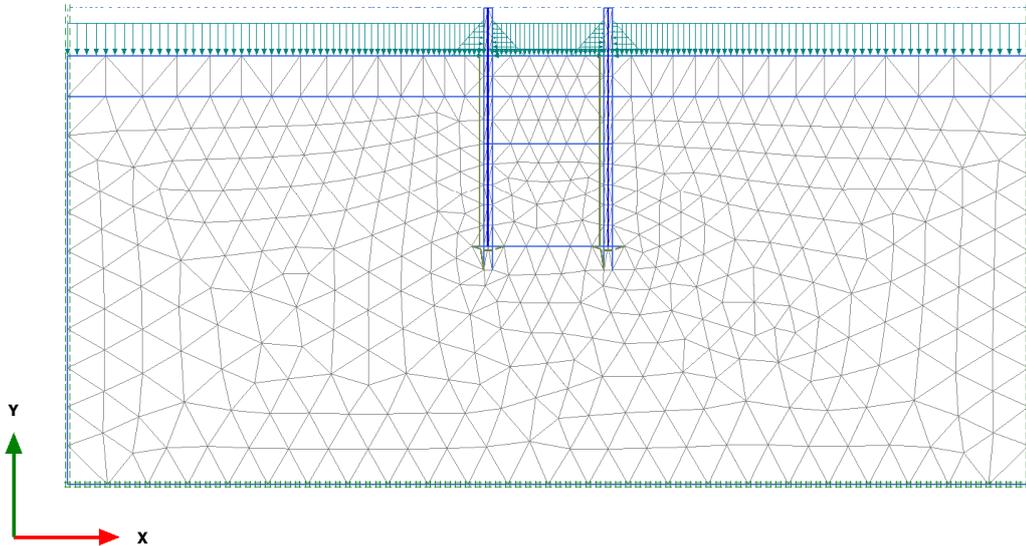


Deformed mesh |u| (scaled up 20.0 times)

Maximum value = 0.1198 m (Element 892 at Node 2871)

Fase 0 – Geostatica

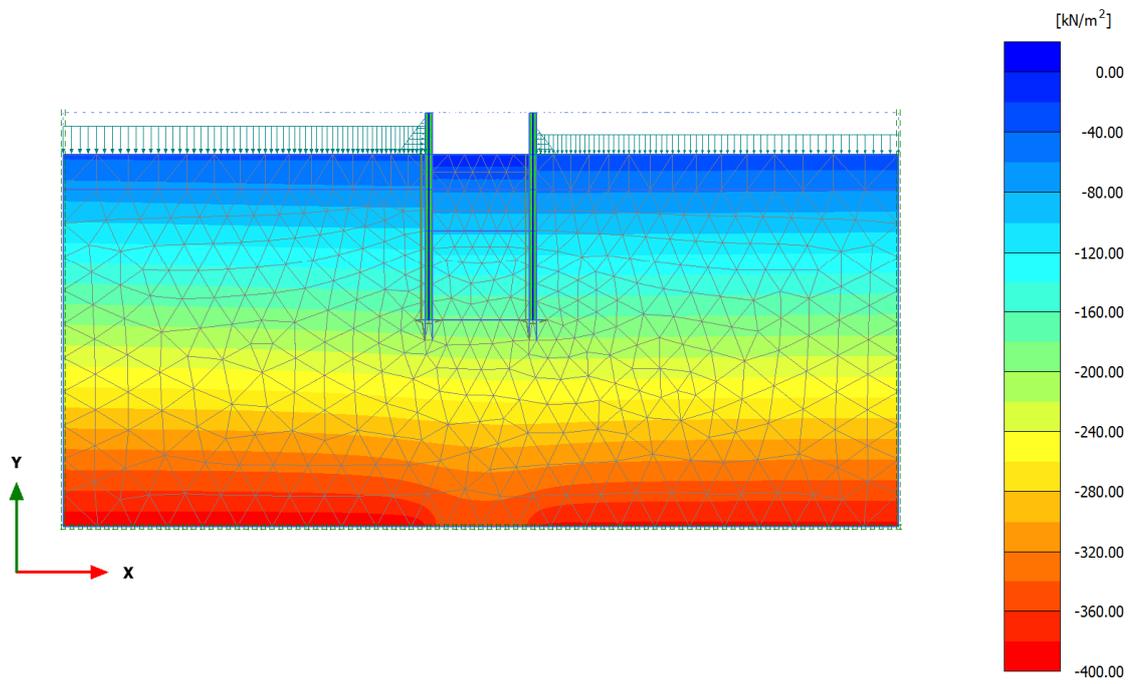
| | | | |
|--|---|--|-------------------------|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Data: 14/04/2017 |
| | | Relazione di calcolo Palancolato | |



Deformed mesh |u| (scaled up 0.00 times)
 Maximum value = $0.2094 \cdot 10^{-3}$ m (Element 908 at Node 2143)

Fase 0 – Installazione palancole (AZ44-700)

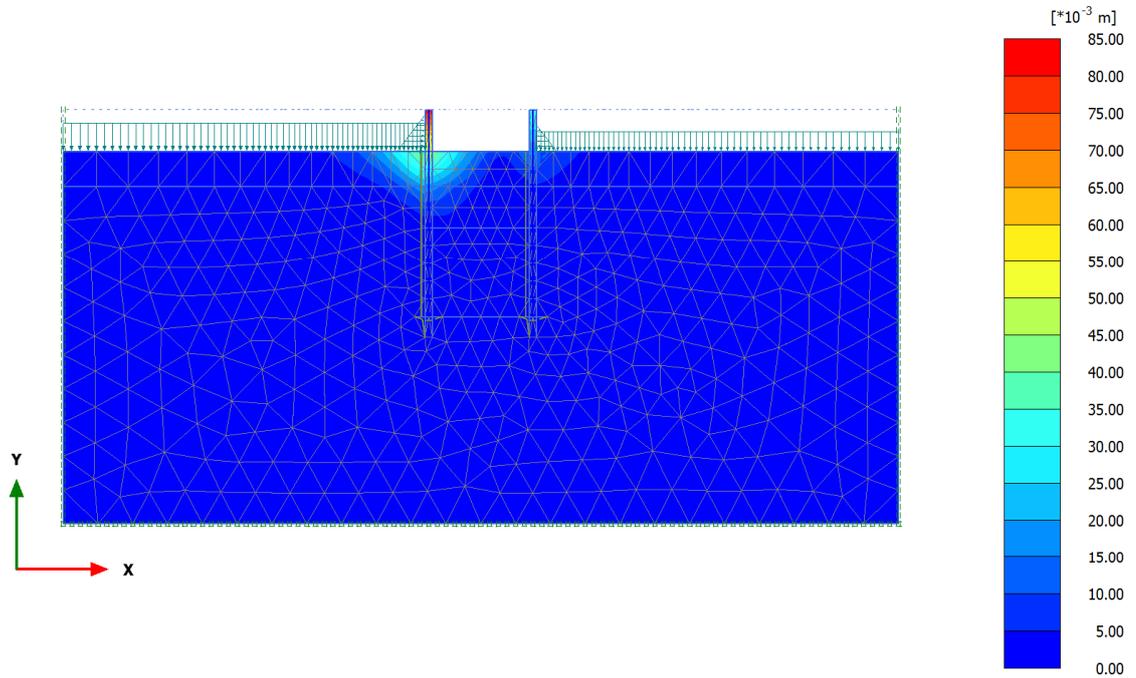
| | | | |
|--|---|--|---|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 Data: 14/04/2017 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Relazione di calcolo Palancolato |



Active pore pressures p_{active} (Pressure = negative)
 Maximum value = 0.000 kN/m² (Element 887 at Node 4818)
 Minimum value = -396.4 kN/m² (Element 77 at Node 4280)

Fase 1 – Aggotamento falda a quota +1.50 m slm

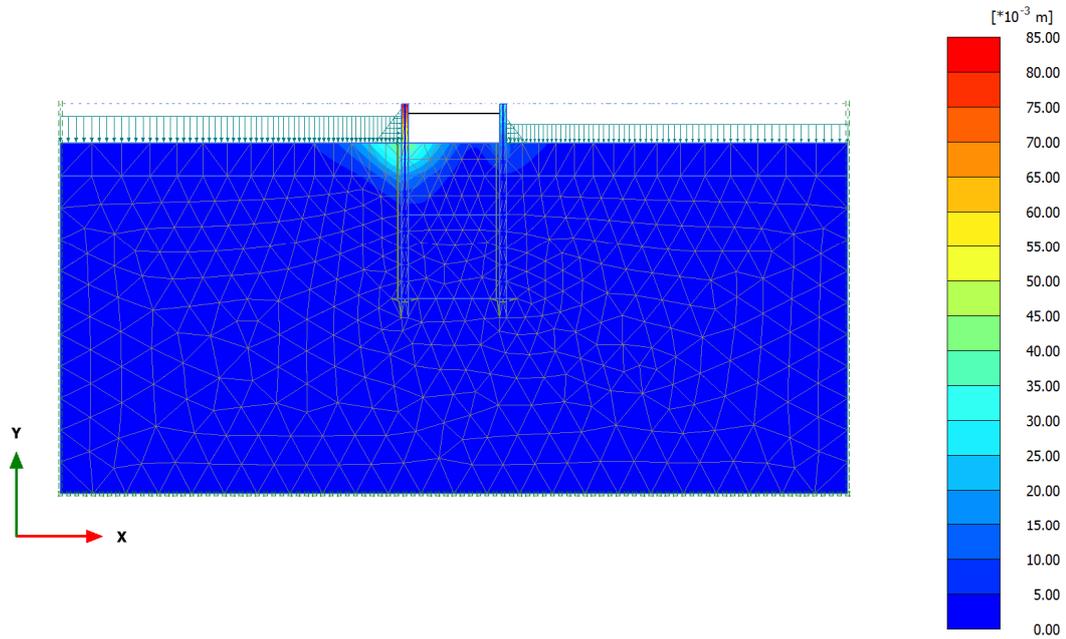
| | | | |
|--|---|--|-------------------------|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Data: 14/04/2017 |
| | | Relazione di calcolo Palancolato | |



Total displacements |u|
 Maximum value = 0.08397 m (Element 904 at Node 1994)

Fase 2 – Consolidamento in Jet Grouting

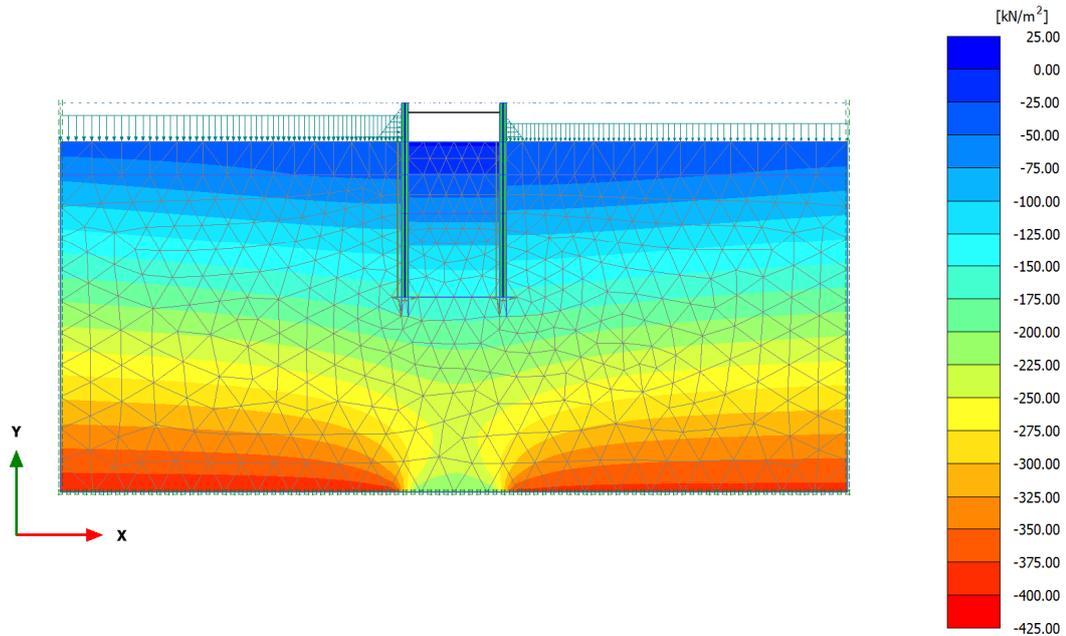
| | | | |
|--|---|--|----------------------------------|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Data: 14/04/2017 |
| | | | Relazione di calcolo Palancolato |



Total displacements |u|

Maximum value = 0.08384 m (Element 904 at Node 1994)

Fase 3 - Installazione puntelli (S355J0H Ø323.9/8)



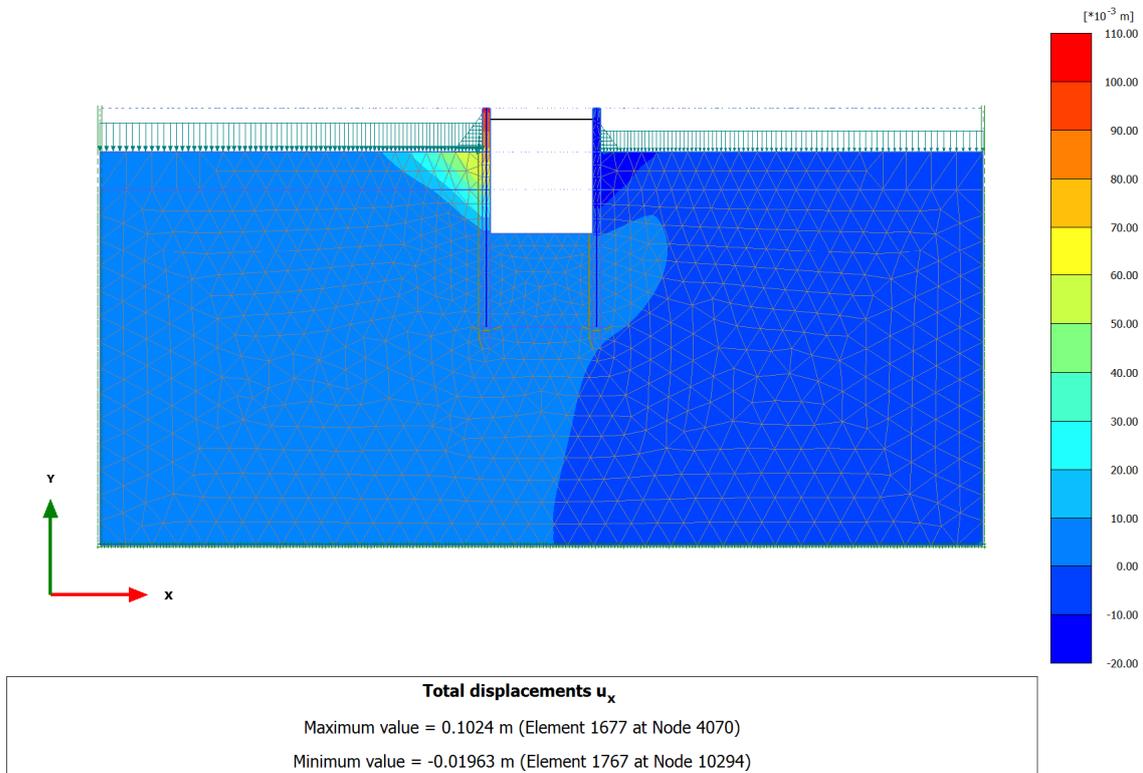
Active pore pressures p_{active} (Pressure = negative)

Maximum value = 0.000 kN/m² (Element 887 at Node 4818)

Minimum value = -401.6 kN/m² (Element 77 at Node 4280)

| | | | |
|--|---|--|---|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 Data: 14/04/2017 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Relazione di calcolo Palancolato |

Fase 3 - Abbattimento falda interna a -15.0 m slm



Fase 4 - Scavo a -5.40 m slm

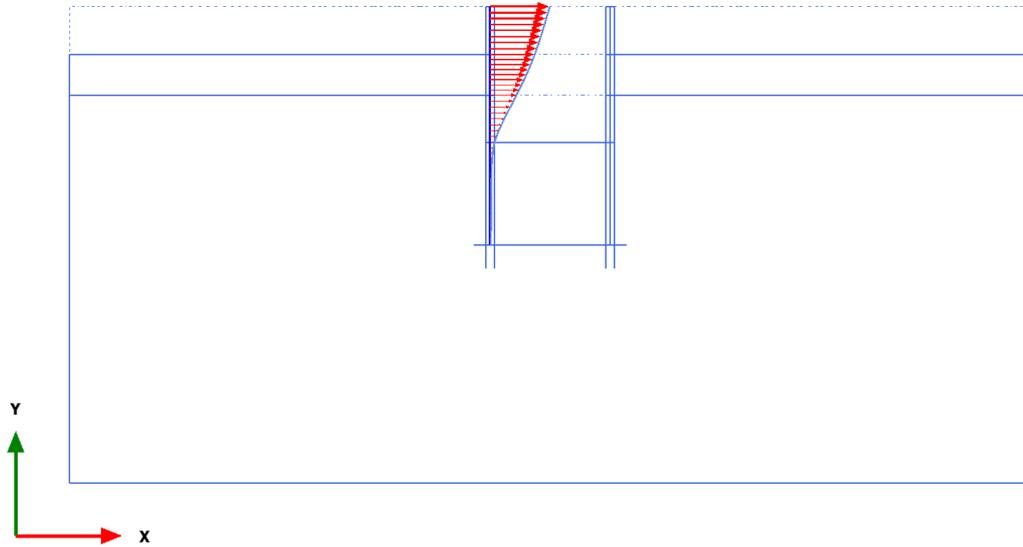
7. RISULTATI DELL'ANALISI E VERIFICHE

Si riportano in sintesi i risultati principali dell'analisi non lineare eseguita con particolare riferimento agli aspetti deformativi del sistema di interazione struttura/terreno. Per entrambi i palancolati opposti vengono riportati i diagrammi degli spostamenti orizzontali (SLE RARA) considerando che per gli SLU STR occorre considerare il fattore incrementale $\gamma_G = 1.3$.

7.1 Diagrammi e Verifiche strutturali

Vengono riportati gli spostamenti totali a fondo scavo del sistema di palancole ed i diagrammi di involuppo di momento flettente e taglio.

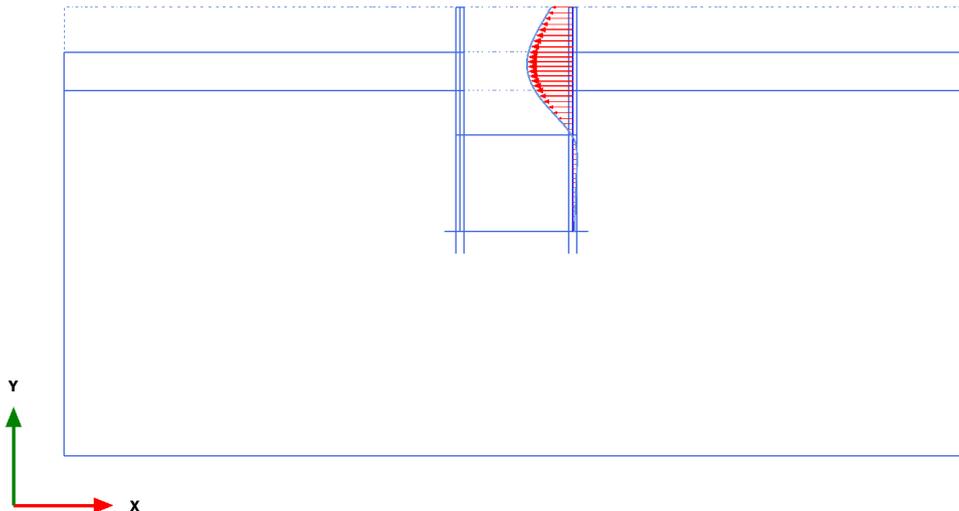
| | | | |
|--|---|--|---|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 Data: 14/04/2017 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | |



Total displacements u_x (scaled up 50.0 times)

Maximum value = 0.09966 m (Element 1 at Node 2133)
 Minimum value = $1.453 \cdot 10^{-3}$ m (Element 11 at Node 3129)

Spostamenti orizzontali (SLE RARA): $u_{max} = 100$ mm

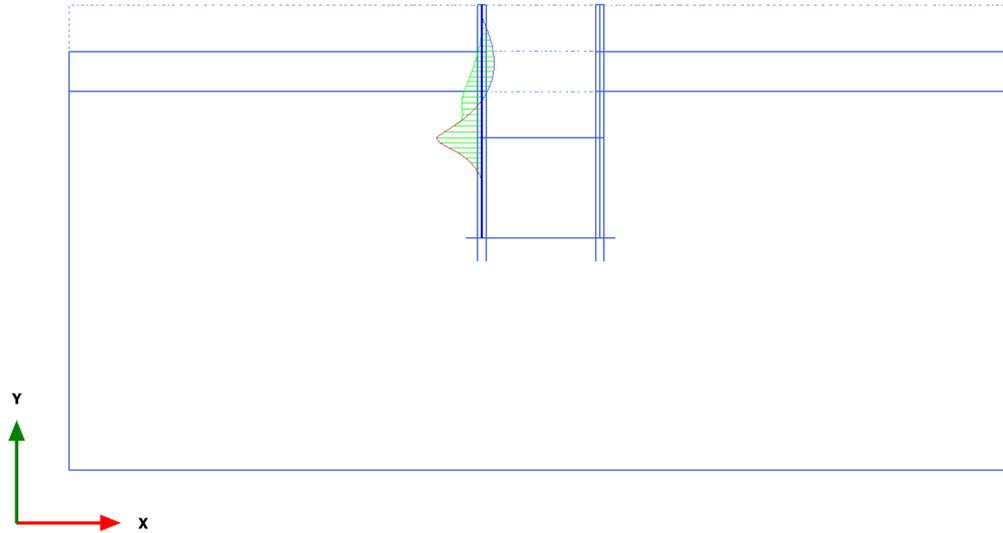


Total displacements u_x (scaled up 200 times)

Maximum value = $1.932 \cdot 10^{-3}$ m (Element 19 at Node 5144)
 Minimum value = -0.02026 m (Element 14 at Node 5560)

| | | | |
|--|---|--|----------------------------------|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Data: 14/04/2017 |
| | | | Relazione di calcolo Palancolato |

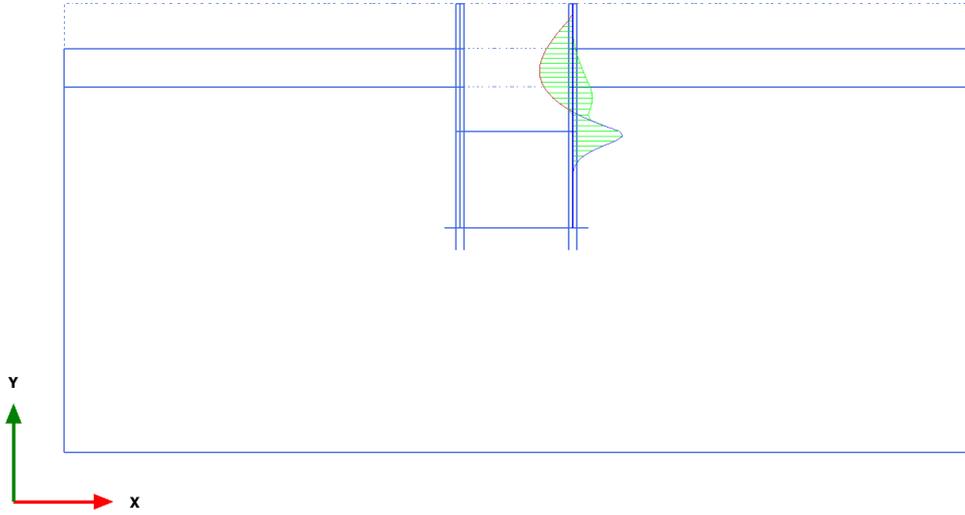
Spostamenti orizzontali (SLE RARA): $u_{max} = -20$ mm



| |
|--|
| <p align="center">Bending moments M (scaled up $1.00 \cdot 10^6$ times)</p> <p align="center">Maximum value = $1.042 \cdot 10^{-6}$ kNm/m (Element 3 at Node 2406)</p> <p align="center">Minimum value = $-3.874 \cdot 10^{-6}$ kNm/m (Element 7 at Node 2529)</p> |
|--|

Momento flettente fase fondo scavo (SLU STR): $M_{max} = 1058$ kNm/m $<$ $M_{yRd} = 1490$ kNm/m)

| | | | |
|--|--|--|---|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  ISO 9001 <small>LL-C (Certification)</small> 392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 Data: 14/04/2017 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Relazione di calcolo Palancolato |

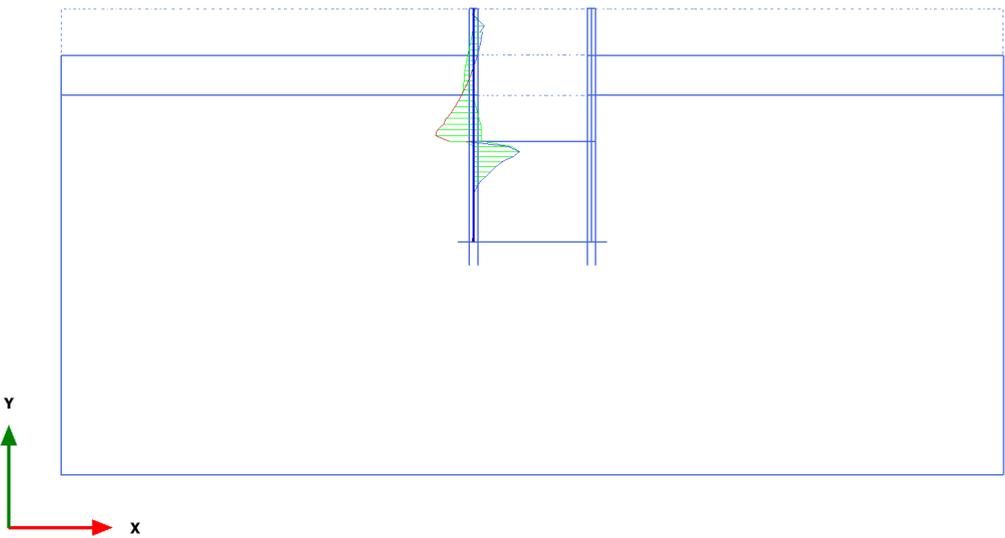


Bending moments M (scaled up 2.00*10⁶ times)

Maximum value = 2.220*10⁻⁶ kNm/m (Element 18 at Node 5150)

Minimum value = -1.466*10⁻⁶ kNm/m (Element 15 at Node 5387)

Momento flettente fase fondo scavo (SLU STR): $M_{max} = 606 \text{ kNm/m} < M_{yRd} = 1490 \text{ kNm/m}$



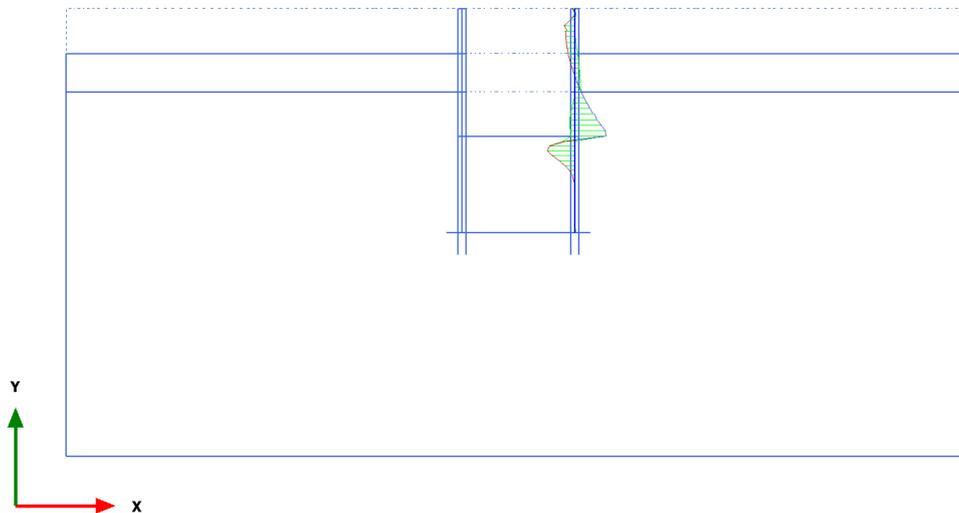
Shear forces Q (scaled up 2.00*10⁶ times)

Maximum value = 1.958*10⁻⁶ kN/m (Element 7 at Node 2524)

Minimum value = -1.607*10⁻⁶ kN/m (Element 6 at Node 2465)

Taglio nella fase di fondo scavo (SLU STR/GEO): $V_{max} = 534 \text{ kN/m} < V_{Rd} = 2091 \text{ kN/m}$: $V_{max} / V_{Rd} < 0.5$

| | | | |
|--|---|--|---|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 Data: 14/04/2017 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Relazione di calcolo Palancolato |



Shear forces Q (scaled up 2.00*10⁶ times)

Maximum value = 1.391*10⁻⁶ kN/m (Element 17 at Node 5173)

Minimum value = -1.211*10⁻⁶ kN/m (Element 18 at Node 5148)

Taglio nella fase di fondo scavo (SLU STR/GEO): $V_{max} = 380 \text{ kN/m} < V_{Rd} = 2091 \text{ kN/m}$; $V_{max} / V_{Rd} < 0.5$

| Structural element ▲ | Node ▲ | Local number ▲ | X ▲ [m] | Y ▲ [m] | N ▲ [kN/m] | N _{min} ▲ [kN/m] | N _{max} ▲ [kN/m] |
|---------------------------------------|--------|----------------|------------|------------|---------------|------------------------------|------------------------------|
| Node-to-node anchor 1-1 (Puntello) | 2298 | 1 | 35.348 | 39.000 | -97.402 | -97.402 | 0.000 |
| | 5343 | 2 | 44.652 | 39.000 | -97.402 | -97.402 | 0.000 |

Azione assiale sul puntello: $N_{max} = 97.4 \text{ kN/m} < N_{bd} = 224 \text{ kN/m}$

7.2 Verifiche geotecniche

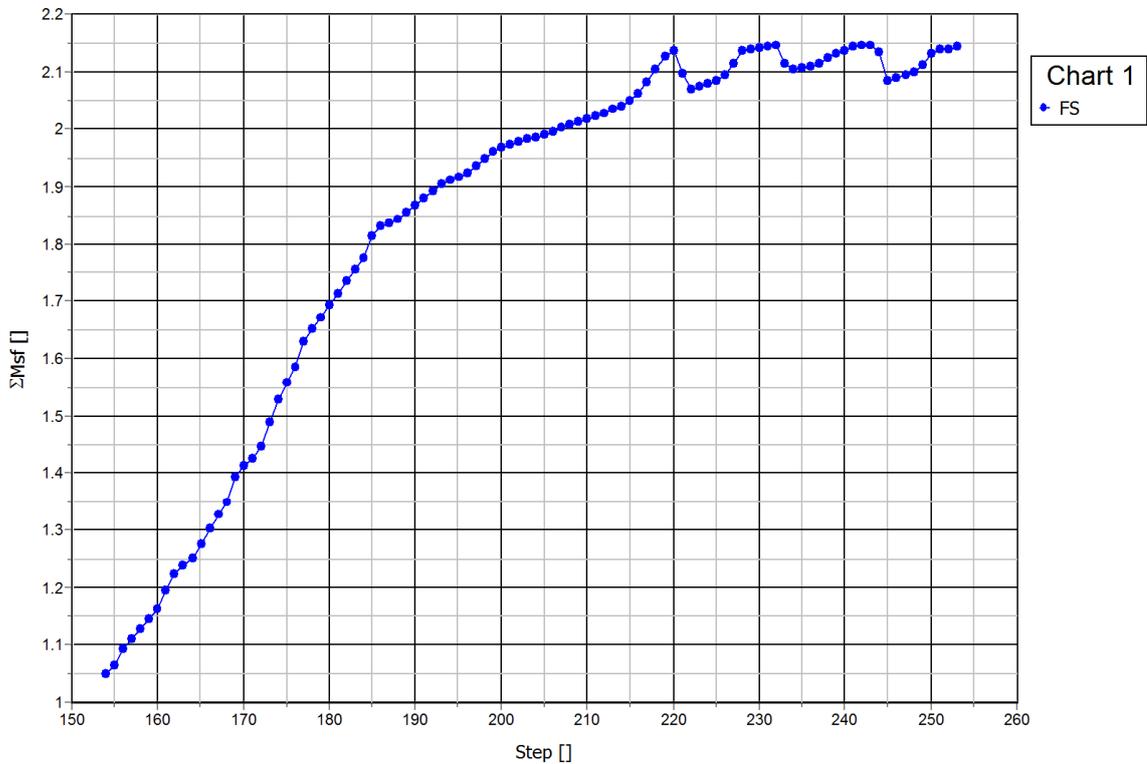
La verifica viene eseguita attraverso la riduzione progressiva dei parametri di resistenza del terreno (φ' e c') considerando la riduzione $[c' + \sigma'_v \tan(\varphi')]/SF$. Tutti gli elementi strutturali sono non lineari.

Nel set M2 (EC7, NTC08) il coefficiente indicato per i parametri di resistenza in termini di tensioni efficaci è $\gamma_M = 1.25$ mentre il coefficiente di sicurezza per l'instabilità richiesto dalle NTC risulta $\gamma_R = 1.1$ pertanto SF deve risultare:

$$SF \geq 1.1 \times 1.25 = 1.375.$$

Il coefficiente di sicurezza risulta superiore a 2.00 come evidenziato dal grafico seguente in cui si riporta il valore FS alla progressione delle iterazioni di calcolo che si interrompono quando non sussiste l'equilibrio per rottura del terreno o strutturale. La verifica è soddisfatta.

| | | | |
|--|---|--|---|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 Data: 14/04/2017 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Relazione di calcolo Palancolato |



Andamento del coefficiente di sicurezza al procedere delle iterazioni di calcolo

7.3 Stabilità idraulica

Assumendo che il consolidamento in jet grouting a profondità compresa tra i -5.35 m e i -15.00 m, formi un tappo impermeabile, si verifica il sollevamento del tampone di iniezione a causa del gradiente idraulico tra interno ed esterno dello scavo (UPL). Il gradiente idraulico è determinato dalla variazione del livello piezometrico tra l'esterno (5 m) e la base dello strato consolidato (-14 m).

L'azione destabilizzante è determinata dalla pressione idraulica in corrispondenza della base dello strato consolidato e risulta ($B = 10.00$ m): $V_{inst,d} = \gamma_G \Delta U_k B = 1.10 [9.806 \text{ kN/m}^3 (5 \text{ m} + 15 \text{ m})] \times 10 \text{ m} = 2157 \text{ kN/m}$

L'azione stabilizzante è data dal peso del terreno consolidato, pensato immerso fino alla quota di aggettamento della falda internamente allo scavo. Si considera il peso di volume del terreno consolidato $\gamma_n = 20 \text{ kN/m}^3$. Inoltre si considera l'adesione laterale dello strato consolidato valutata in ragione della spinta sulle pareti della palancolata determinata per coefficiente di spinta cautelativamente valutato, essendo conseguente all'iniezione: $K_0 = 1$.

Il valore di adesione sulla parete risulta ($H = 9.65$ m, $\varphi'_d = \arctan[\tan(45^\circ)/1.25] = 38.7^\circ$):

$$T_{Rd} = \frac{1}{2} K_0 \gamma_n H^2 [0.50 \tan(\varphi'_d)] = 373 \text{ kN/m}$$

L'azione stabilizzante risulta:

| | | | |
|--|---|--|-------------------------|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Data: 14/04/2017 |
| | | Relazione di calcolo Palancolato | |

$$V_{st,d} = \gamma_G (\gamma H B + 2T_{Rd}) = 0.90 (20 \text{ kN/m}^3 \times 9.65 \text{ m} \times 10.00 \text{ m} + 2 \times 373 \text{ kN/m}) = 2228 \text{ kN/m} > V_{inst,d}$$

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

| | | | |
|--|---|--|-------------------------|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Data: 14/04/2017 |
| | | Relazione di calcolo Palancolato | |

APPENDICE A: RESISTENZA ALL'INSTABILITA' DEI PUNTELLI

| | | | |
|--|---|--|-------------------------|
| MC Engineering Srl Società di Ingegneria |  392876 | Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA | Codice: 1509-R-7010-E-1 |
| | | Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli | Data: 14/04/2017 |
| Relazione di calcolo Palancolato | | | |

| VERIFICA DI STABILITA' DEI PUNTELLI (NTC08 DM14/01/2008) | | | | | | | | | | |
|---|----------|-------|--------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-----------------|
| Diametro | Spessore | D/t | classe | A | g | J | W | L ₀ | γ _{M1} | f _{yk} |
| (mm) | (mm) | (-) | (-) | (cm ²) | (kN/m) | (cm ⁴) | (cm ³) | (m) | (-) | (MPa) |
| 323.9 | 8 | 40.49 | 2 | 79.4 | 0.686 | 9910 | 611.9 | 9.5 | 1.10 | 355 |
| N _{cr} | λ | α | φ | χ | N _{b,Rd} | N _{bd} | M _{Ed} | M _{m,Ed} | M _{eq,Ed} | verifica |
| (kN) | (-) | (-) | (-) | (-) | (kN) | (kN) | (kNm) | (kNm) | (kNm) | C4.2.32 |
| 2275.9 | 1.113 | 0.210 | 1.215 | 0.587 | 1504.7 | 1343.0 | 10.05 | 6.71 | 8.72 | 1.000 |

LEGENDA

D/t = rapporto diametro spessore,

A = area

g = peso per unità di lunghezza

J = modulo di inerzia

W = modulo di resistenza

L₀ = lunghezza libera di inflessione;

γ_{M1} = coefficiente di sicurezza del materiale;

f_{yk} = resistenza a snervamento;

$$N_{cr} = \pi^2 E J / L_0^2$$

$$\lambda = (A f_{yk} / N_{cr})^{0.5}$$

α = coeff da tab. 4.2.VI NTC (curva a)

$$\phi = 0.5 [1 + \alpha(\lambda - 0.2) + \lambda^2]$$

$$\chi = 1 / [\phi + (\phi^2 - \lambda^2)^{0.5}]$$

$$N_{b,Rd} = \chi A f_{yk} / \gamma_{M1}$$

$$N_{bd} = N_{Ed}$$

M_{Ed} = momento di progetto fattorizzato dovuto al peso proprio

M_{m,Ed} = valore medio del momento flettente: $0.75 M_{max,Ed} \leq M_{eq,Ed} \leq M_{max,Ed}$

$$M_{eq,Ed} = 1.3 M_{m,Ed}$$

$$\text{Verifica} = N_{Ed} / N_{b,Rd} + M_{Ed} \gamma_{M1} / [f_{yk} W (1 - N_{Ed} / N_{cr})] = 1$$