

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

IDROVIA FERRARESE - 1° LOTTO 1° STRALCIO
DEMOLIZIONE E RICOSTRUZIONE BOTTE SIFONE DEL CANALE CITTADINO
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:

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I)
MC Engineering Srl 
Tel +39 051 4211945 - 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 3 1 6 R 7 0 1 0 E 1

Data	04/06/2018	Archivio	1316_R_7010_E_1.pdf	Scala	-
01	04/06/2018	Aggiornamento per passaggio competenza RER	MC	GF	MC
00	30/09/2016	Emissione	MC	GF	MC
Rev.	Data	Oggetto	Redatto	Controllato	Approvato

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisionali

INDICE

1.	INTRODUZIONE	2
1.1	SOVRACCARICHI E COMBINAZIONI DI CARICO	2
1.2	IL MODELLO DI CALCOLO	2
2.	NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	3
3.	MATERIALI	4
3.1	ACCIAIO PER CARPENTERIA	4
4.	PARAMETRI DEL TERRENO.....	5
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	15
7.1	DIAGRAMMI E VERIFICHE STRUTTURALI.....	15
7.2	VERIFICHE GEOTECNICHE.....	19
7.3	STABILITÀ IDRAULICA	20
	APPENDICE A: RESISTENZA ALL'INSTABILITA' DEI PUNTELLI	22

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisionali

1. INTRODUZIONE

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

Il palancolato viene eseguito con palancole AZ44, di lunghezza complessiva 20.0 m, con quota della testa a 6.00 m slm, con l'ausilio di un sistema di puntelli in testa a quota 6.00 m slm. Le palancole sono installate a distanza frontale di circa 10 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.

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisoria

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

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.

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: Palancole"
- UNI EN 12716: "Esecuzione di Lavori Geotecnici Speciali: Getti per Iniezione (Jet Grouting)"

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisionali

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: $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_{Mx}$

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisoria

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}	E _{UR} /E _s
	(m slm)	(kN/m ³)	(kPa)	(°)	(-)	(MPa)	(-)
Limi argillosi (clSi)	2.00	18	5	25	0.35	15	3
Sabbia MD (Sa)	-8.00	18	0	35	0.35	75	
Limi argillosi (clSi)	-11.50	18	5	25	0.35	15	
Sabbia MD (Sa)	-12.50	18	0	35	0.35	75	
Jet-Grouting	-4.65	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

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisionali

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.

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisoriali

5. SEZIONI DI CALCOLO

E' stata individuata la sezione tipologica di palancola combinata con tubi, compatibilmente con le ipotesi progettuali, per lunghezza complessiva di 20 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 -14.00 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 (classe 3). Il peso del tubo è maggiorato del 5% per tenere conto di giunti e tolleranze.

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.

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisionali

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 palanca si considerano i valori con modulo di Young unitario della sezione: EJ = 0.0011 kNm²/m, EA = 0.0273 kN/m, le sollecitazioni derivanti dovranno quindi essere moltiplicate per il valore E = 210 GPa.

5.2 Puntelli

In tabella 5.2 sono riportate le caratteristiche dei puntelli adottati nel calcolo. La rigidità 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 $L_n = 9.50$ 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.

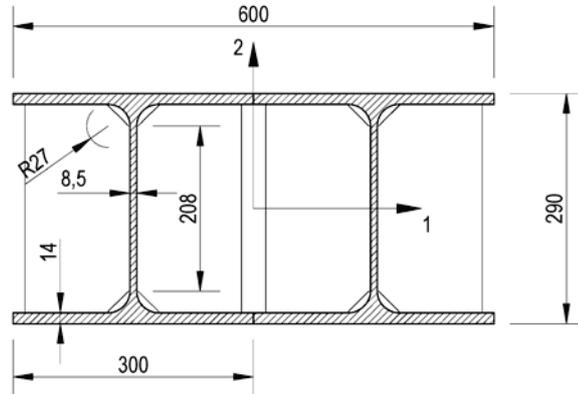


Fig. 5.2 – Sezione trave di coronamento

	A	As ₁	As ₂	J ₁₁	W ₁₁	W _{p11}	J ₂₂	W ₂₂	W _{p22}
Profilo	(cm ²)	(cm ²)	(cm ²)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm ³)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm ³)
2@HEA300	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 HEB340 = 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 flessa 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.

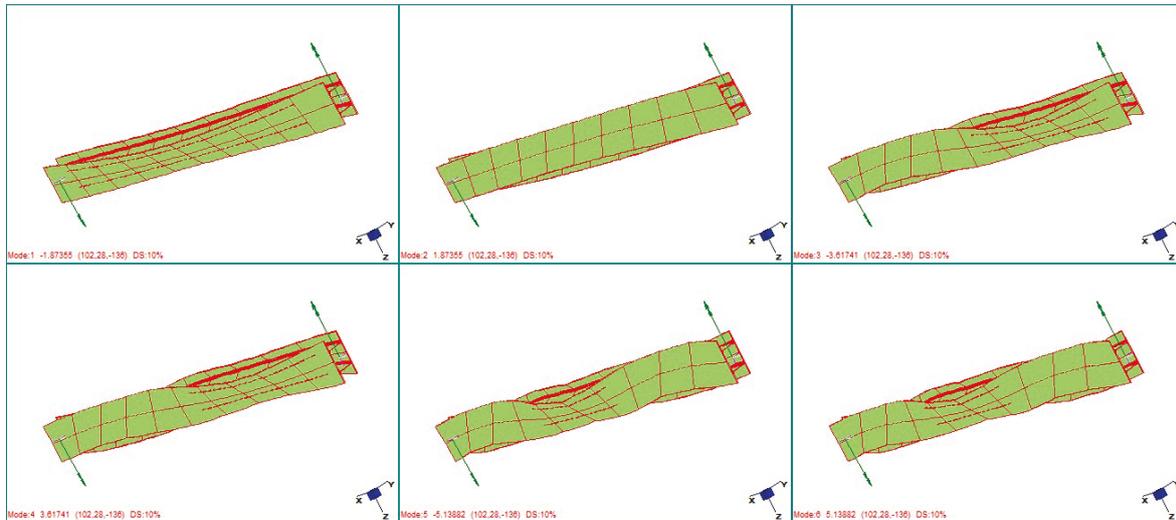


Fig. 5.3 – Verifica di “Buckling” (2@HEA300)

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 flessio torsionale

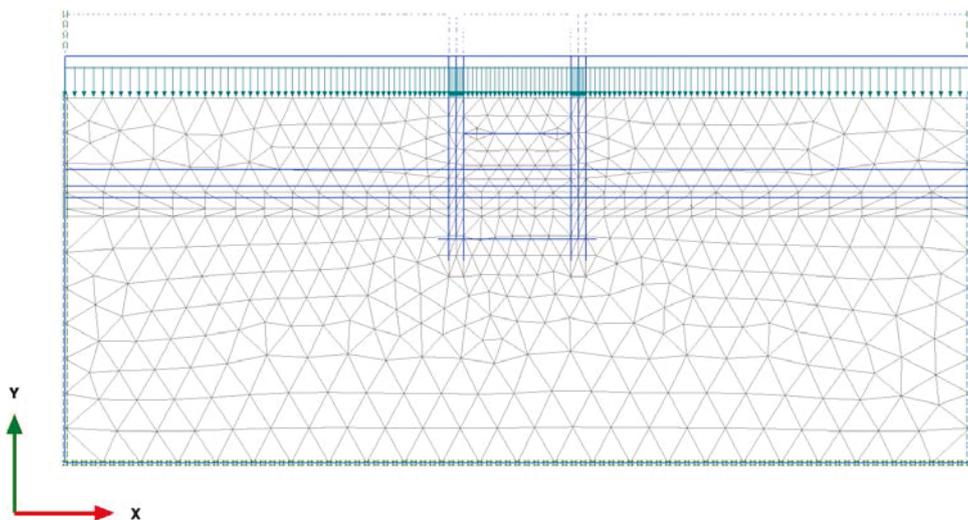
 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisorie

6. FASI ESECUTIVE

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

- 0) Geostatica
- 1) Installazione delle palancole combinate (AZ44-700 – S355) con testa fissata a quota 6.00 m slm;
- 2) Aggottamento della falda a quota 1.80 m slm;
- 3) Esecuzione delle colonne di consolidamento (jet-grouting) da quota -4.65 m slm a quota -14 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 -14.00 m slm;
- 6) Scavo a quota -4.65 m slm per l'esecuzione della botte sifone

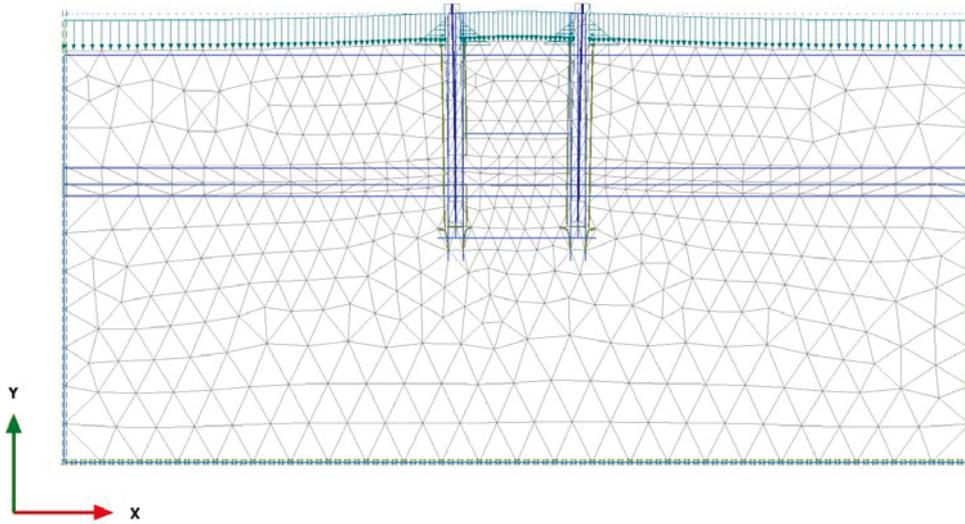
Nelle immagini seguenti vengono visualizzate le fasi; l'inserimento di due strati di sabbia ha lo scopo, sotto l'aspetto computazionale, di variare le caratteristiche di terreno tra le palancole per la simulazione del consolidamento in jet grouting e lo spessore di tale strato comprende la testa dello strato di sabbia e il limite inferiore corrisponde alla base delle palancole.



Deformed mesh |u| (scaled up 20.0 times)

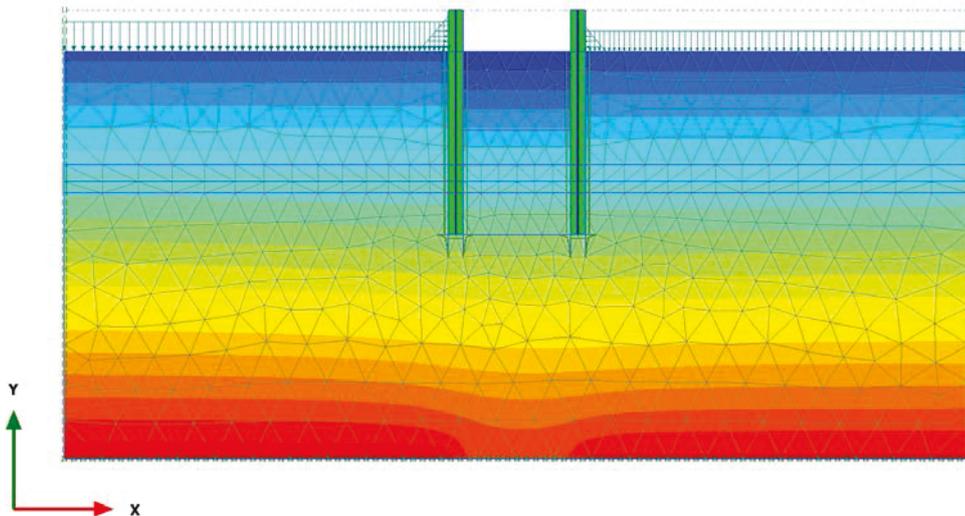
Maximum value = 0.1868 m (Element 774 at Node 4068)

Fase 0 – geostatica



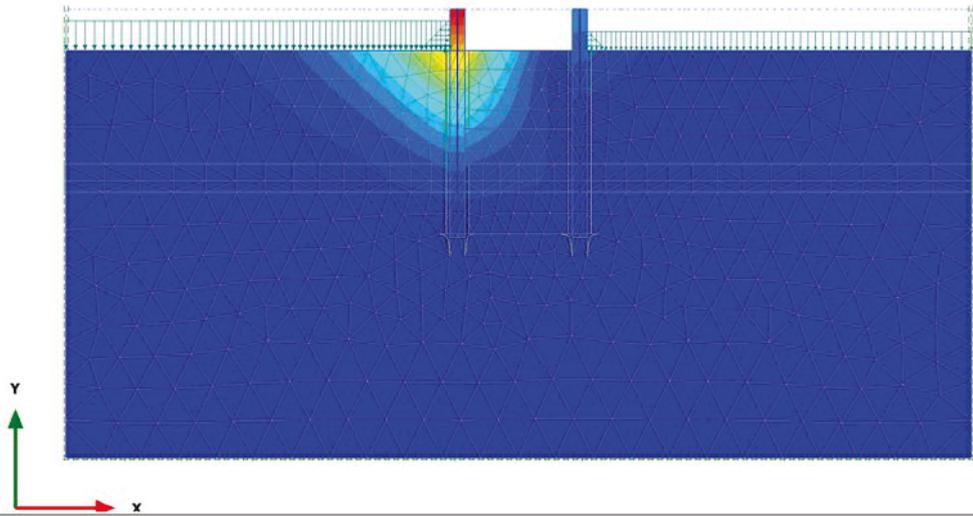
Deformed mesh $|u|$ (scaled up $5.00 \cdot 10^3$ times)
 Maximum value = $0.3083 \cdot 10^{-3}$ m (Element 813 at Node 5392)

Fase 0 – installazione palancole (AZ44-700)



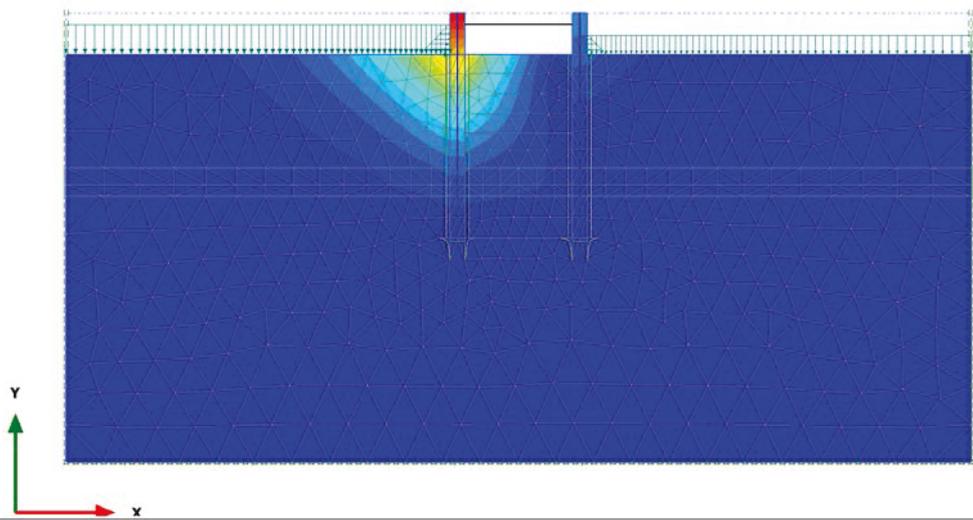
Active pore pressures p_{active} (Pressure = negative)
 Maximum value = 0.000 kN/m^2 (Element 771 at Node 5296)
 Minimum value = -396.7 kN/m^2 (Element 53 at Node 4022)

Fase 1 – Aggottamento falda a quota 1.5 m slm



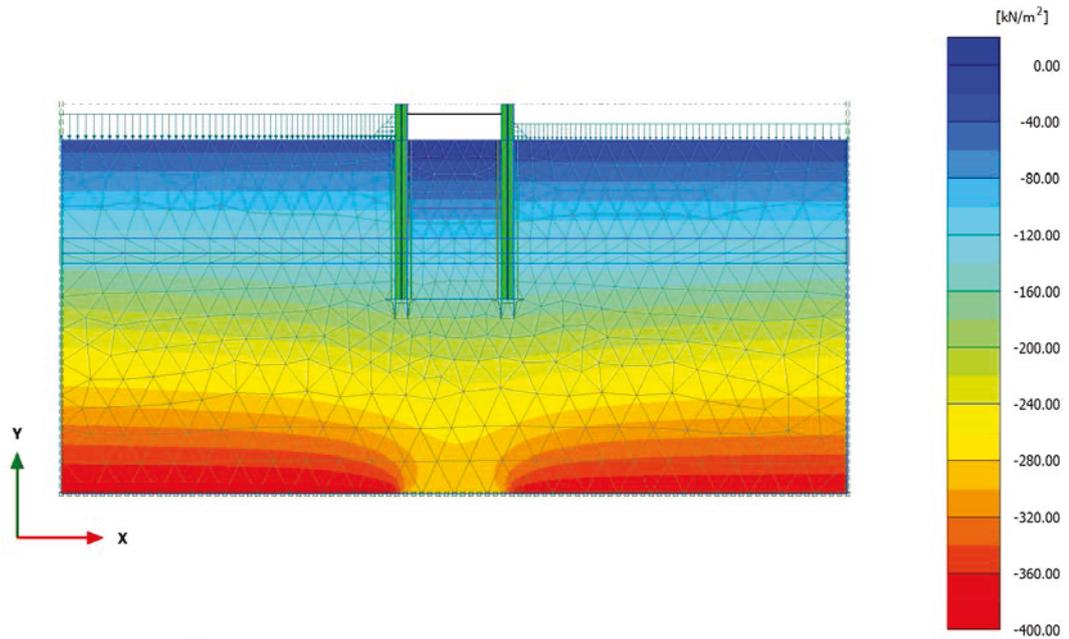
Total displacements |u|
 Maximum value = 0.04211 m (Element 890 at Node 2647)

Fase 2 – Consolidamento in Jet Grouting



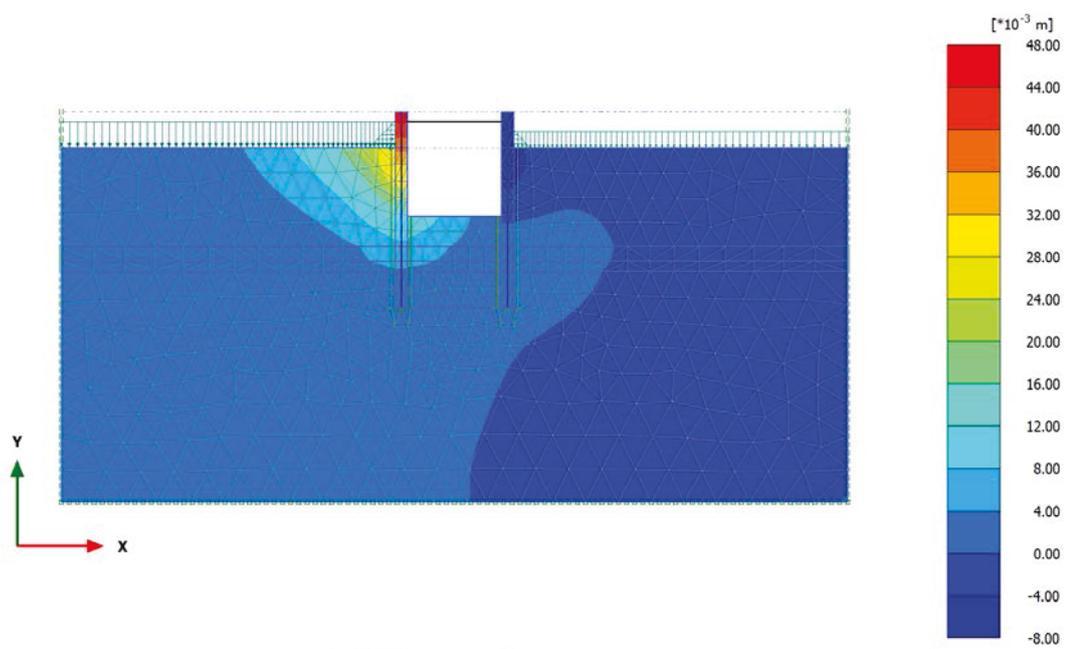
Total displacements |u|
 Maximum value = 0.04211 m (Element 890 at Node 2647)

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



Active pore pressures p_{active} (Pressure = negative)
 Maximum value = 0.000 kN/m² (Element 771 at Node 5296)
 Minimum value = -395.7 kN/m² (Element 53 at Node 4022)

Fase 3 - Abbattimento falda interna a -14 m slm



Total displacements u_x
 Maximum value = 0.04700 m (Element 890 at Node 2641)
 Minimum value = -6.356*10⁻³ m (Element 1052 at Node 5941)

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisionali

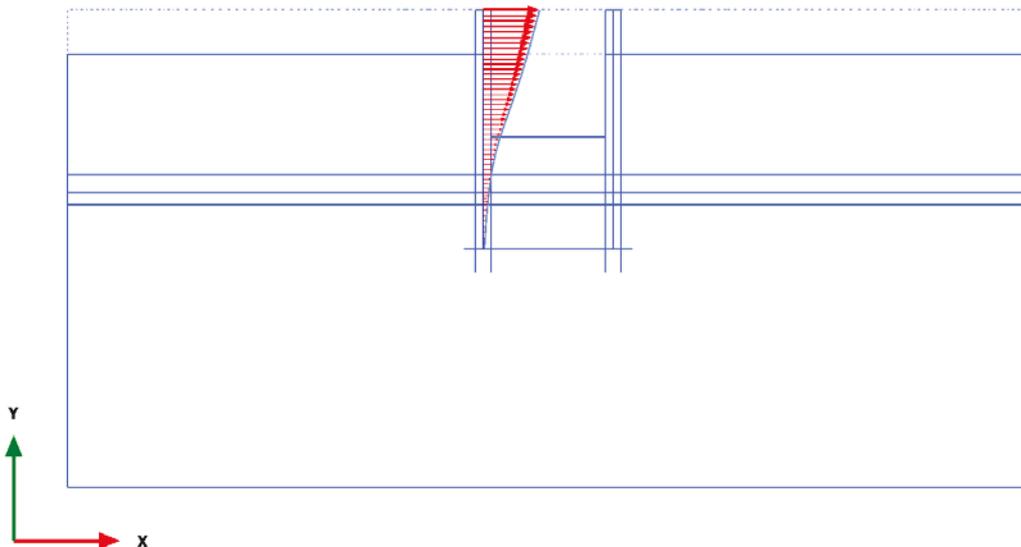
Fase 4 - Scavo a -4.65 m slm

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 involucro di momento flettente e taglio.



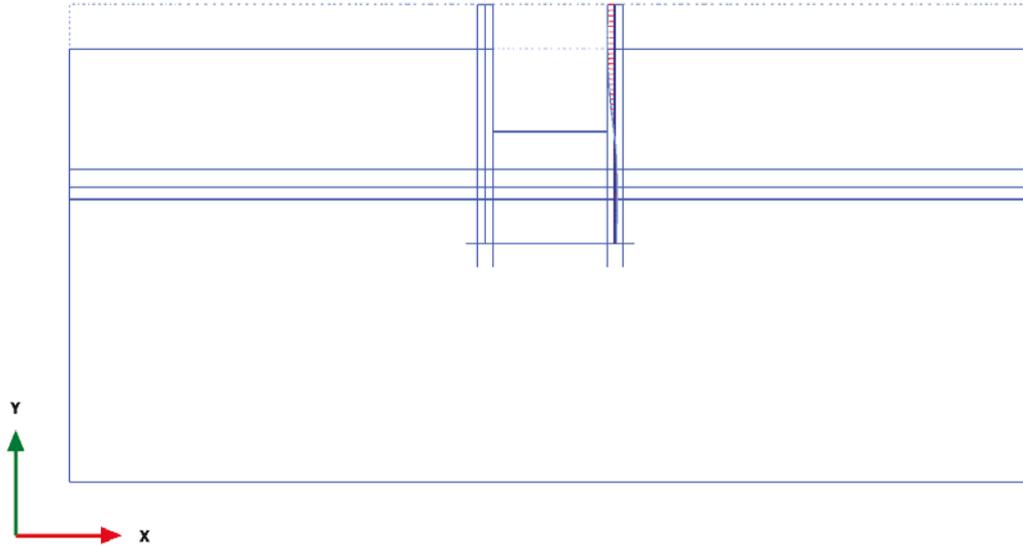
Total displacements u_x (scaled up 100 times)

Maximum value = 0.04700 m (Element 12 at Node 2637)

Minimum value = $1.061 \cdot 10^{-3}$ m (Element 1 at Node 3231)

Spostamenti orizzontali (SLE RARA): $u_{\max} = 47.0$ mm

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisionali

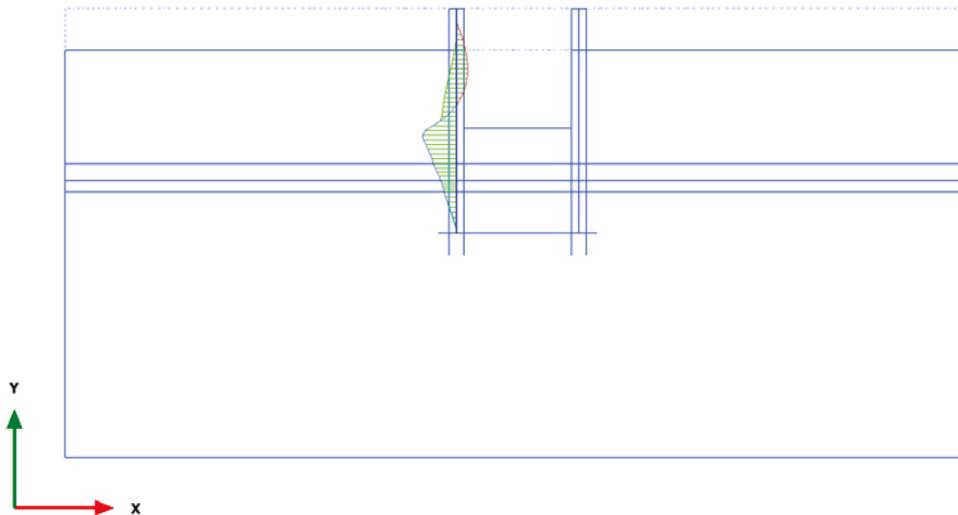


Total displacements u_x (scaled up 100 times)

Maximum value = $1.628 \cdot 10^{-3}$ m (Element 22 at Node 5552)

Minimum value = $-6.356 \cdot 10^{-3}$ m (Element 14 at Node 5941)

Spostamenti orizzontali (SLE RARA): $u_{max} = -6.4$ mm

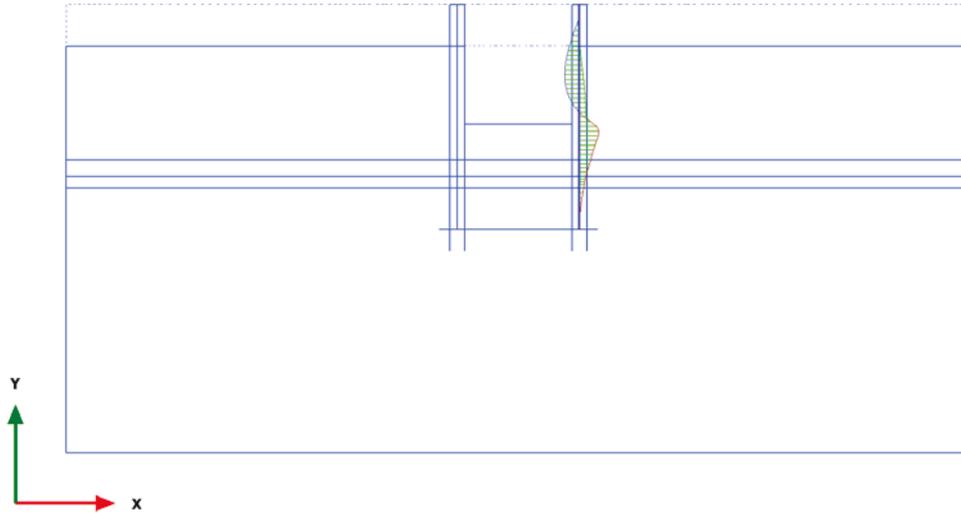


Bending moments M (scaled up $5.00 \cdot 10^6$ times)

Uniform value of $0.5987 \cdot 10^{-6}$ kNm/m

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisionali

Momento flettente fase di fondo scavo (SLU STR): $M_{max} = 163 \text{ kNm/m} < M_{yRd} = 1490 \text{ kNm/m}$

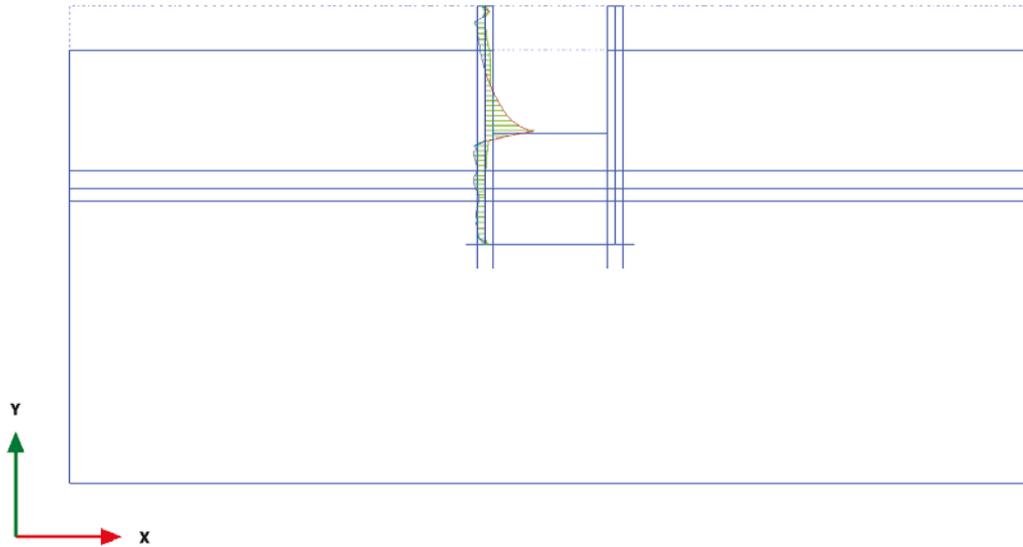


Bending moments M (scaled up $5.00 \cdot 10^6$ times)

Uniform value of $0.2603 \cdot 10^{-6} \text{ kNm/m}$

Momento flettente fase fondo scavo (SLU STR): $M_{max} = 55 \text{ kNm/m} < M_{yRd} = 1490 \text{ kNm/m}$

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisionali

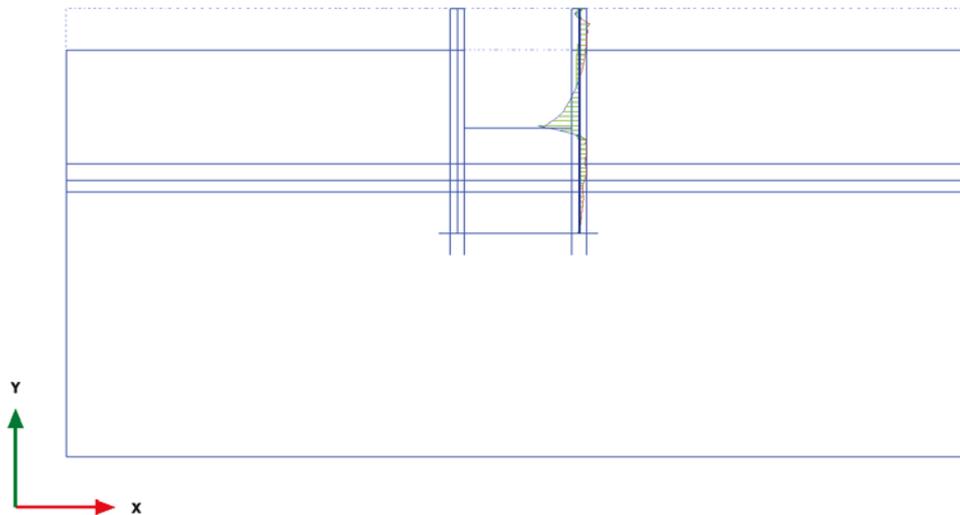


Shear forces Q (scaled up $10.0 \cdot 10^6$ times)

Uniform value of $0.09563 \cdot 10^{-6}$ kN/m

Taglio fase fondo scavo (SLU STR/GEO): $V_{\max} = 26 \text{ kN/m} < V_{Rd} = 2091 \text{ kN/m}$: $V_{\max} / V_{Rd} < 0.5$

+



Shear forces Q (scaled up $10.0 \cdot 10^6$ times)

Uniform value of $0.3713 \cdot 10^{-6}$ kN/m

Taglio fase fondo scavo (SLU STR/GEO): $V_{max} = 101 \text{ kN/m} < V_{Rd} = 2091 \text{ kN/m}$; $V_{max} / V_{Rd} < 0.5$

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)	2670	1	35.248	39.000	-97.225	-97.225	0.000
	5724	2	44.752	39.000	-97.225	-97.225	0.000

Azione assiale sul puntello: $N_{max} = 97 \text{ kN/m} < N_{bd} = 224 \text{ kN/m}$

7.2 Verifiche geotecniche

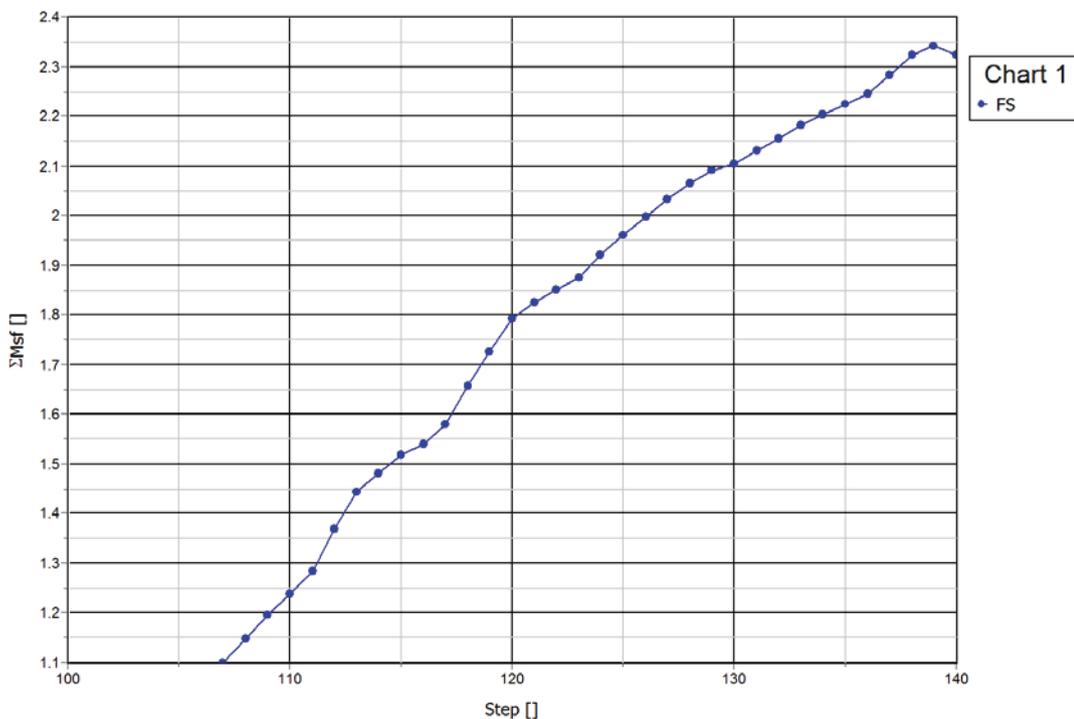
La verifica viene eseguita attraverso la riduzione progressiva dei parametri di resistenza del terreno (φ' e c') considerando la riduzione $[c' + \sigma'_v \tan(\varphi')]/SF$. Tutti gli elementi strutturali sono non lineari.

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:

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

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisoriali

Il coefficiente di sicurezza risulta superiore a 2.30 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.



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 -4.65 m e i -14.00 m s.l.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 ($B = 9.00$ m): $V_{inst,d} = \gamma_G \Delta U_k B = 1.10 [9.806 \text{ kN/m}^3 (5 + 14) \text{ m}] \times 9 \text{ m} = 1844.5 \text{ kN/m}$

L'azione stabilizzante è data dal peso del terreno consolidato, pensato immerso fino alla quota di aggotamento 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 ($H = 9.35 \text{ m}$, $\varphi'_d = \arctan[\tan(45^\circ)/1.25] = 38.7^\circ$):

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisionali

$$T_{Rd} = \frac{1}{2} K_0 \gamma_n H^2 [0.50 \tan(\varphi'_d)] = 350.2 \text{ kN/m}$$

L'azione stabilizzante risulta:

$$V_{st,d} = \gamma_G (\gamma H B + 2T_{Rd}) = 0.90 (20 \text{ kN/m}^3 \times 9.35 \text{ m} \times 9.00 \text{ m} + 2 \times 350.2 \text{ kN/m}) = 2145.0 \text{ kN/m} > V_{inst,d}$$

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisionali

APPENDICE A: RESISTENZA ALL'INSTABILITA' DEI PUNTELLI

 Via Francesco Zanardi 157/6 - 40131 Bologna (I) MC Engineering Srl Tel +39 051 4211945 - info@studio-chinni.it <small>ISO 9001 392876</small>	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1316-R-7010-E-1 Data: 04/06/2018
	Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Cittadino all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo opere provvisionali

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;

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

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

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}

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