

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

## 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

<b>MC Engineering Srl</b> Società di Ingegneria	 <b>ISO 9001</b> <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 Palancoato

## 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 Bianco e il Canale Boicelli.

Il palancoato viene eseguito con profili AZ44, di lunghezza complessiva 21.0 m, con quota della testa a 6.00 m slm, con l'ausilio di un sistema di puntelli in testa a quota 5.00 m slm. 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 ( $\gamma$ ,  $\phi'$ ,  $c'$ ,  $E_s$ ,  $E_{UR}$ ), 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](http://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).

<b>MC Engineering Srl</b> Società di Ingegneria	 <b>ISO 9001</b> <small>LL-C (Certification)</small> 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

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	 <b>ISO 9001</b> LL-C (Certification)  392876	Cliente:	Codice:	1509-R-7010-E-1
		REGIONE EMILIA ROMAGNA	Data:	14/04/2017
		Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli	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	 <b>ISO 9001</b> LL-C (Certification)  392876	Cliente:	Codice:	1509-R-7010-E-1
		REGIONE EMILIA ROMAGNA	Data:	14/04/2017
		Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli		
		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	$\geq 355$	$\geq 510$	210	UNI EN 10219
Profilati a Z per palancole	S355 GP	$\geq 355$	$\geq 480$	210	UNI EN 10248
Profilati, piatti e tondi	S355 J0	$\geq 355$	$\geq 510$	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:  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_{Mx}$

<div>MC Engineering Srl</div> <div>Società di Ingegneria</div>	<div> <b>ISO 9001</b> LL-C (Certification)  392876</div>	Cliente:	Codice:	1509-R-7010-E-1
		REGIONE EMILIA ROMAGNA	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	$Z_{top}$	$\gamma_k$	$c'_k$	$\phi'_k$	$\nu$	$E_{50,ref}$	$E_{UR}/E_s$
	(m slm)	(kN/m <sup>3</sup> )	(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  $\varepsilon_1 - q$ ) 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 [ $K_0 = 1 - \sin(\phi'_k)$ ] per terreni NC, per terreni OC  $K_0 = (K_0)_{nc} OCR^{0.5}$ ]. Sono inoltre riportati per completezza i valori della trasmissività idraulica orizzontale e verticale (rispettivamente  $K_H$ ,  $K_V$ ).

Terreno	$\delta'_k / \phi'_k$	$K_0$	$K_H$	$K_V$
	(-)	(-)	(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:


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

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

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

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.

<b>MC Engineering Srl</b> Società di Ingegneria	 <b>ISO 9001</b> <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

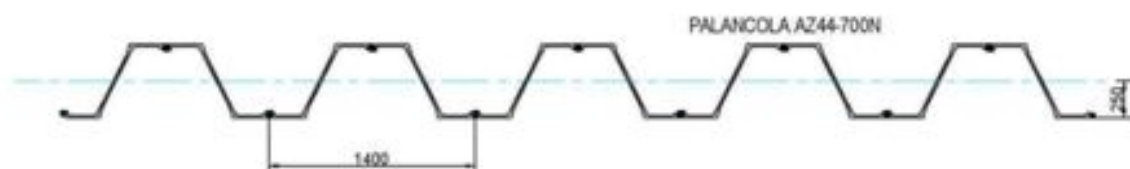
## 5. SEZIONI DI CALCOLO

La tipologica 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 <sub>max</sub> *	W <sub>min</sub> *	Peso	M <sub>yRd</sub>	V <sub>Rd</sub>
	(mm)	(cm <sup>2</sup> /m)	(cm <sup>4</sup> /m)	(cm <sup>3</sup> /m)	(cm <sup>3</sup> /m)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kNm/m)	(kN/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.



<b>MC Engineering Srl</b> Società di Ingegneria	 <b>ISO 9001</b> <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

EA (kN)	EJ (kNm <sup>2</sup> )	s <sub>eq</sub> (m)	E <sub>red</sub> (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  $6.00 \text{ m}$ .

PARATIA	D (mm)	t (mm)	classe	A (cm <sup>2</sup> )	Peso (kg/m)	i strut (m)	L <sub>n</sub> (m)	K strut (MNm/m)	N <sub>bd</sub> strut (kN)	N <sub>bd</sub> strut (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**

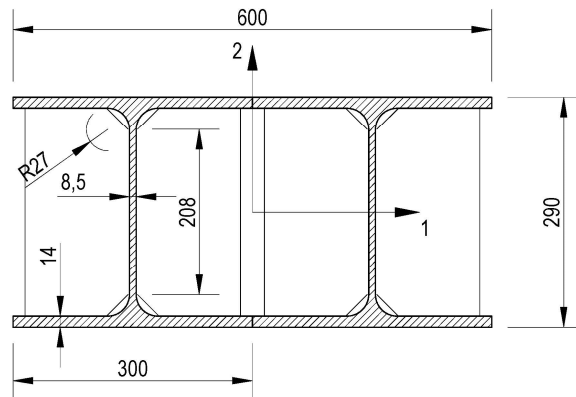
## 5.3 Travi di ripartizione

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



**Fig. 5.2 – Sezione trave di coronamento**

Profilo 2@HEA300  Peso 176.6 kg/ml	A	As <sub>1</sub>	As <sub>2</sub>	J <sub>11</sub>	W <sub>11</sub>	W <sub>p11</sub>	J <sub>22</sub>	W <sub>22</sub>	W <sub>p22</sub>
	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>4</sup> )	(cm <sup>3</sup> )	(cm <sup>3</sup> )	(cm <sup>4</sup> )	(cm <sup>3</sup> )	(cm <sup>3</sup> )
	225	140.1	52.8	36546	2520	2768	63286	2110	3378
	f <sub>yk</sub>	γ <sub>M</sub>	f <sub>yd</sub>	M <sub>Ry11</sub>	M <sub>Ry22</sub>	M <sub>Rp11</sub>	M <sub>Rp22</sub>	V <sub>Rd1</sub>	V <sub>Rd2</sub>
	(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**

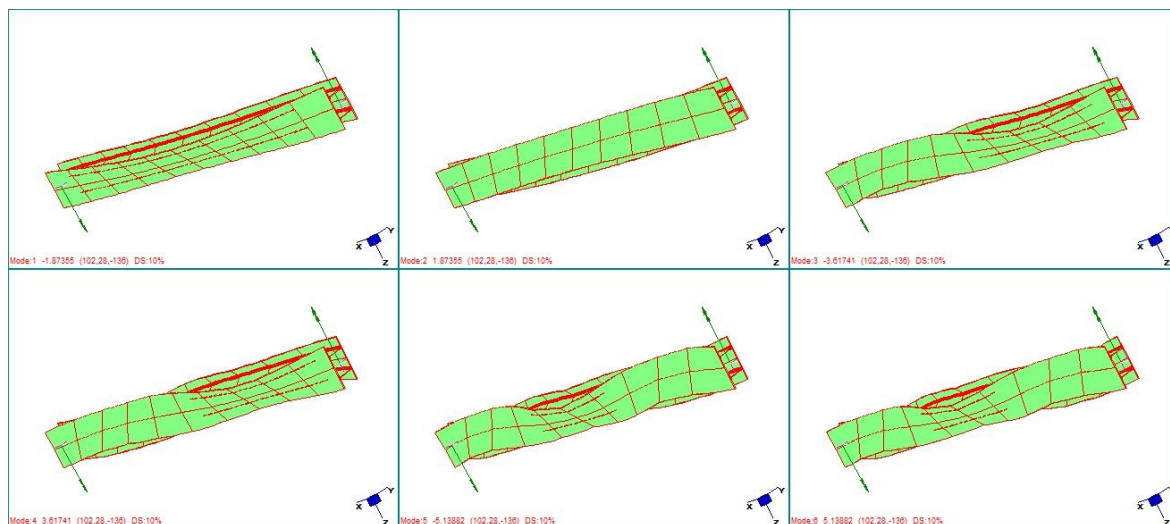
Essendo il taglio di progetto superiore al 50% del taglio resistente, si procede alla verifica combinata taglio-flessione, considerando (spessore dell'anima  $t_w$  per HEA300 = 2 x 8.5 mm = 17 mm):

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

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

La verifica all'instabilità flesso torsionale è stata eseguita con l'ausilio del codice ad elementi finiti Straus7 ([www.strand7.com](http://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	 <b>ISO 9001</b> LL-C (Certification)  392876	Cliente:	Codice:	1509-R-7010-E-1
		REGIONE EMILIA ROMAGNA	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		$\pm 1.87354849E+00$
3, 4		$\pm 3.61741335E+00$
5, 6		$\pm 5.13881842E+00$

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:

$M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$  essendo  $M_{b,Rd}$  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	$\alpha_{LT}$	$\beta$	$M_{cr}$	$f_{yk}$	$W_{py}$	$\lambda_{LT}$
	Tab 4.2.VII	(-)	(kNm)	(MPa)	(cm <sup>3</sup> )	(-)
	0.340	0.800	1873.5	355.00	2768.13	0.724
	$\lambda_{LT,0}$	$k_c$	$f$	$\Phi_{LT}$	$\chi_{LT}$	$M_{b,Rd}$
	(-)	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**

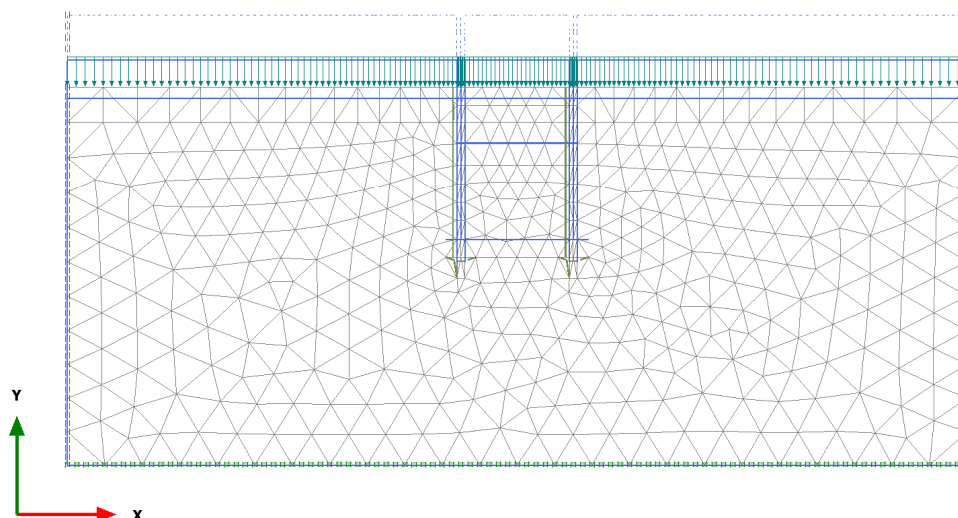
<b>MC Engineering Srl</b> Società di Ingegneria	 392876	Cliente: REGIONE EMILIA ROMAGNA	Codice: 1509-R-7010-E-1 Data: 14/04/2017
		Demolizione e ricostruzione della botte sifone del canale Bianco all'attraversamento del canale Boicelli	Relazione di calcolo Palancolato

## 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 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.

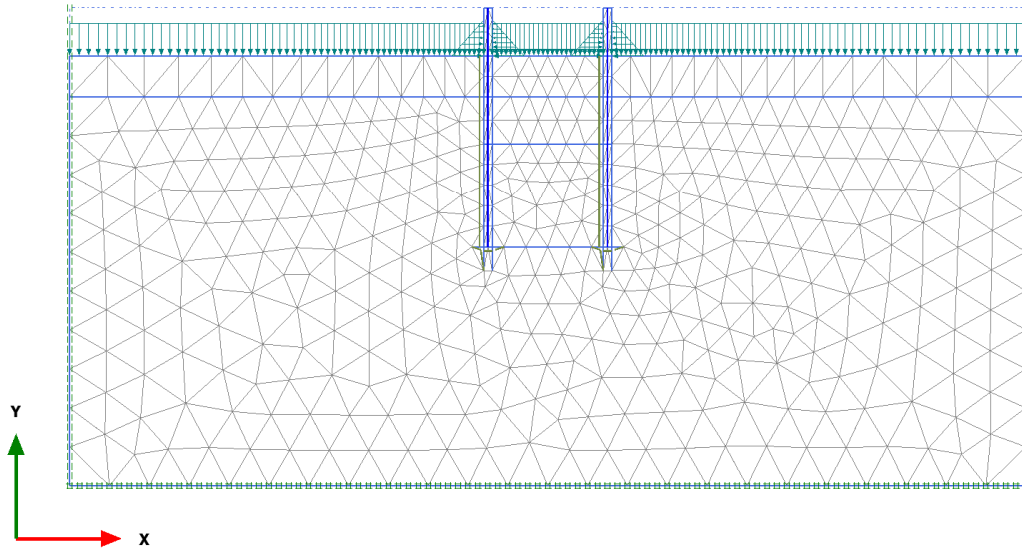


**Deformed mesh |u| (scaled up 20.0 times)**

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

Fase 0 – Geostatica


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

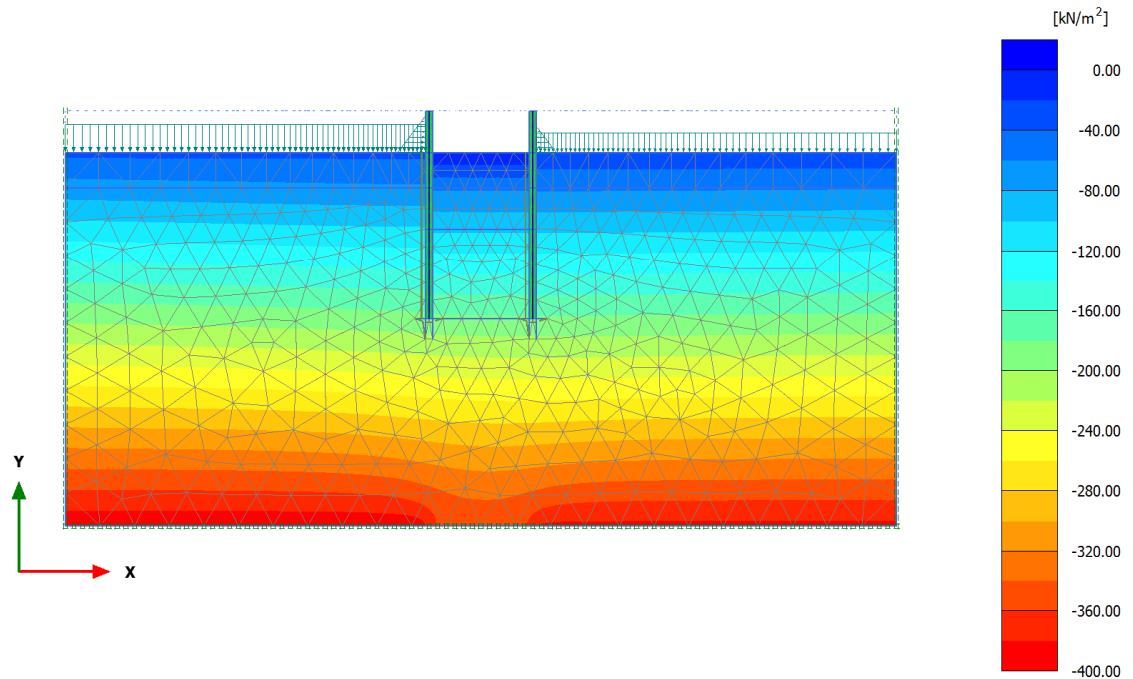


**Deformed mesh |u| (scaled up 0.00 times)**

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




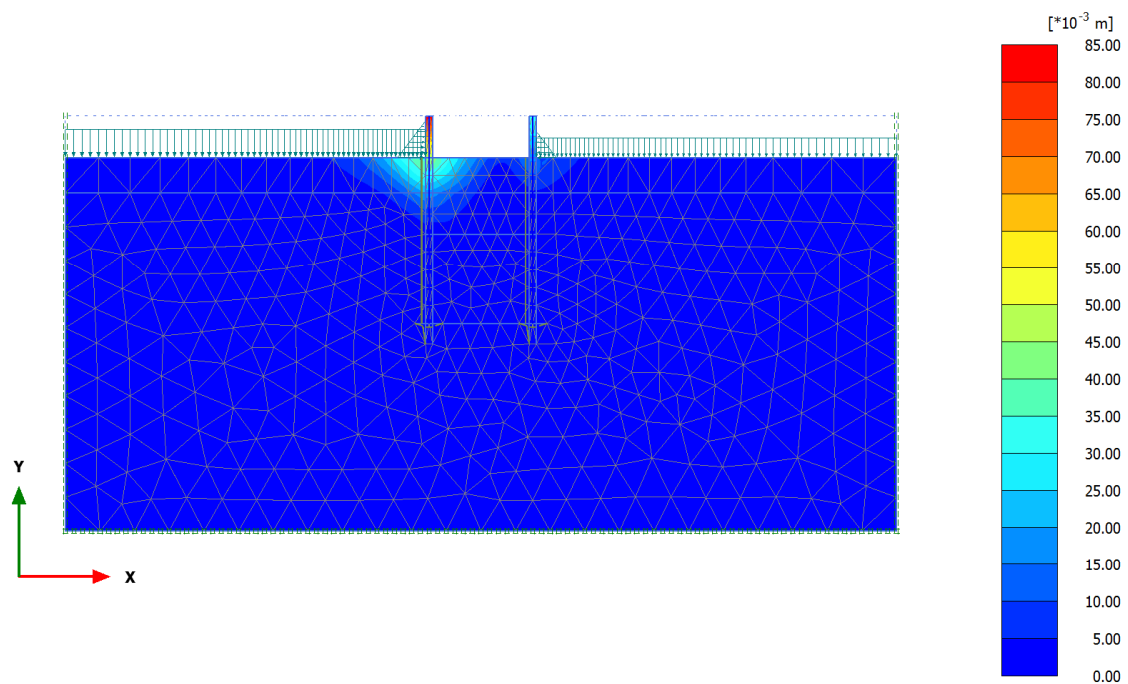
**Active pore pressures  $p_{active}$  (Pressure = negative)**

Maximum value = 0.000 kN/m<sup>2</sup> (Element 887 at Node 4818)

Minimum value = -396.4 kN/m<sup>2</sup> (Element 77 at Node 4280)

Fase 1 – Aggottamento falda a quota +1.50 m slm


<b>MC Engineering Srl</b> Società di Ingegneria	 <b>ISO 9001</b> <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

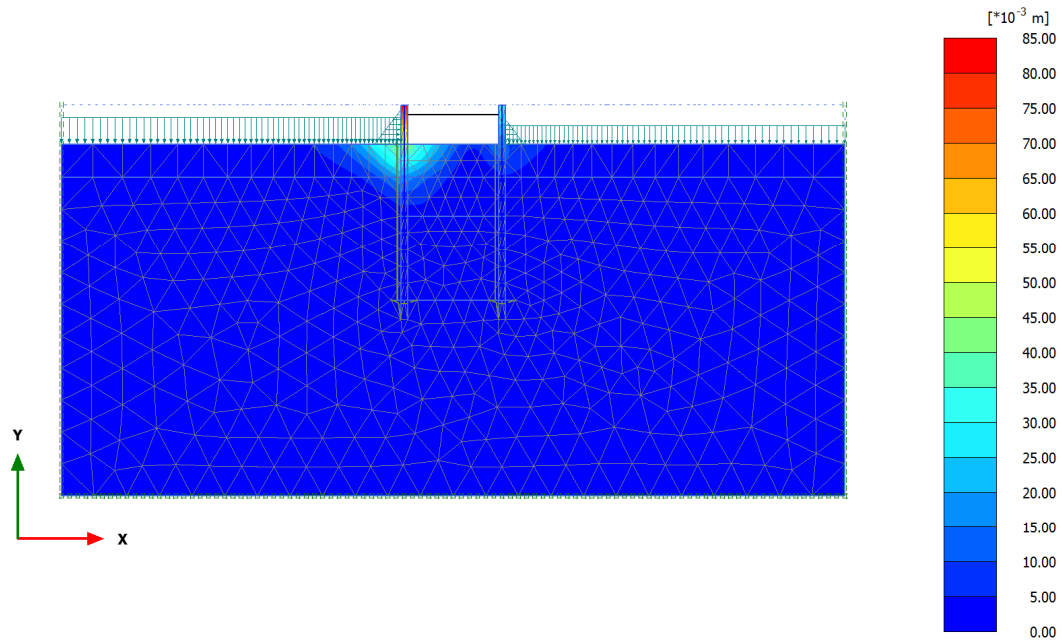


#### Total displacements |u|

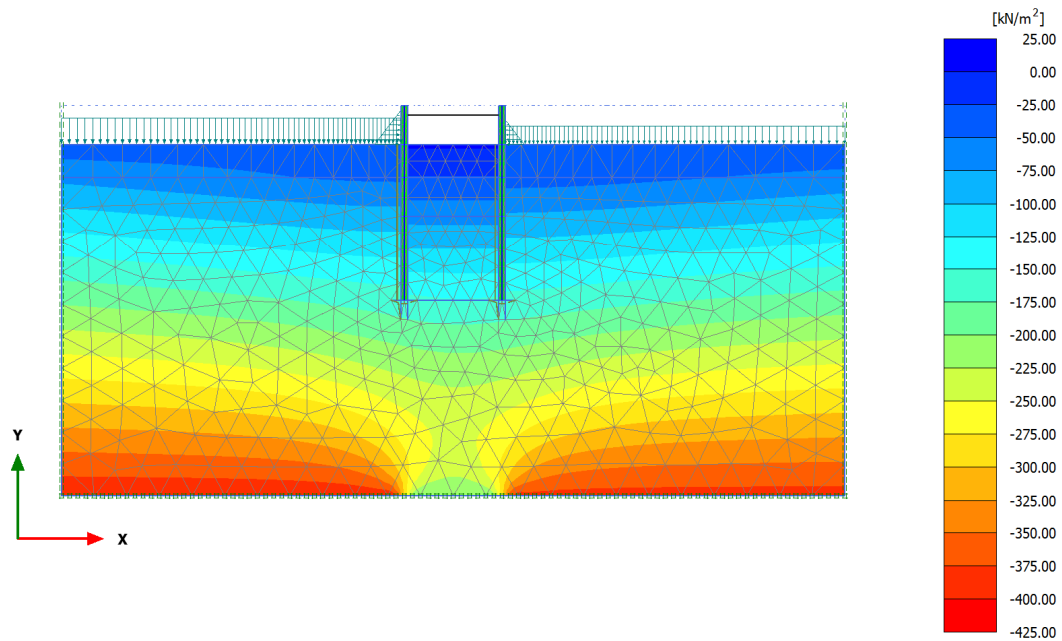
Maximum value = 0.08397 m (Element 904 at Node 1994)

### Fase 2 – Consolidamento in Jet Grouting

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



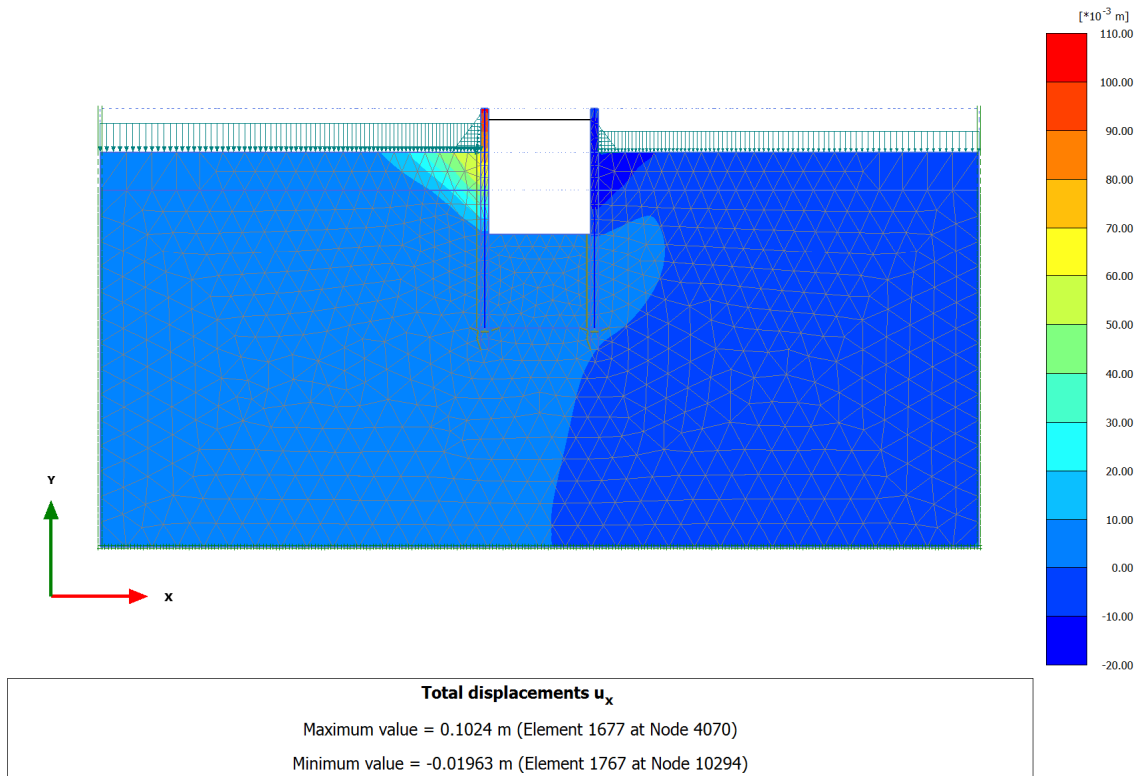
### Fase 3 - Installazione puntelli (S355J0H Ø323.9/8)





<b>MC Engineering Srl</b> Società di Ingegneria	 <b>ISO 9001</b> LL-C (Certification) 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

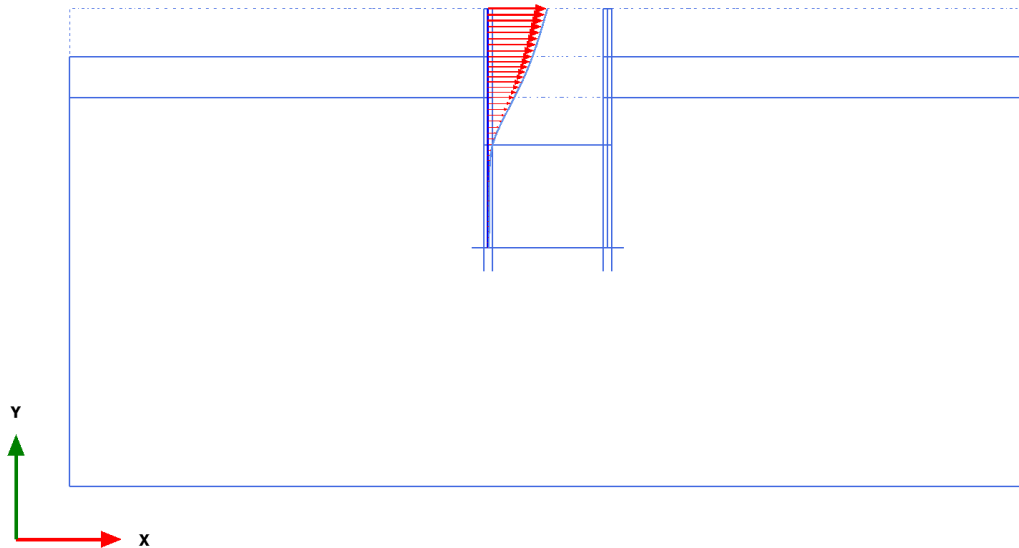
## 7. RISULTATI DELL'ANALISI E VERIFICHE

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 involucro di momento flettente e taglio.

<b>MC Engineering Srl</b> Società di Ingegneria	 <b>ISO 9001</b> <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

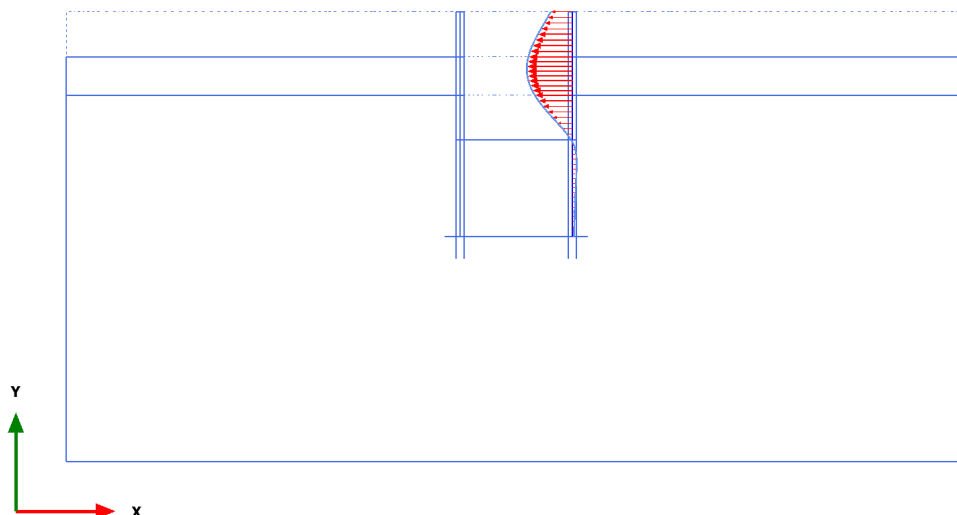


**Total displacements  $u_x$  (scaled up 50.0 times)**

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



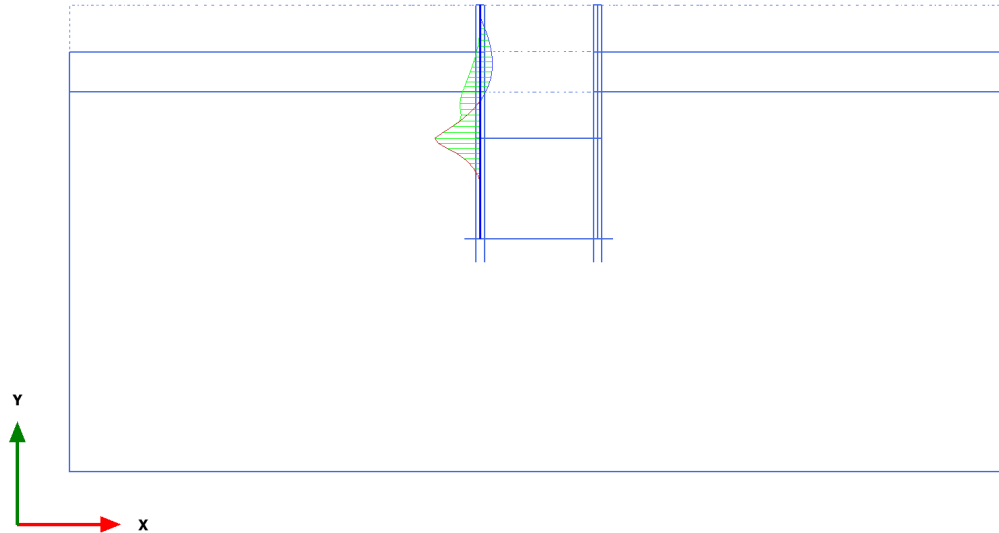
**Total displacements  $u_x$  (scaled up 200 times)**

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

Minimum value = -0.02026 m (Element 14 at Node 5560)

<b>MC Engineering Srl</b> Società di Ingegneria	 <b>ISO 9001</b> LL-C (Certification) 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

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




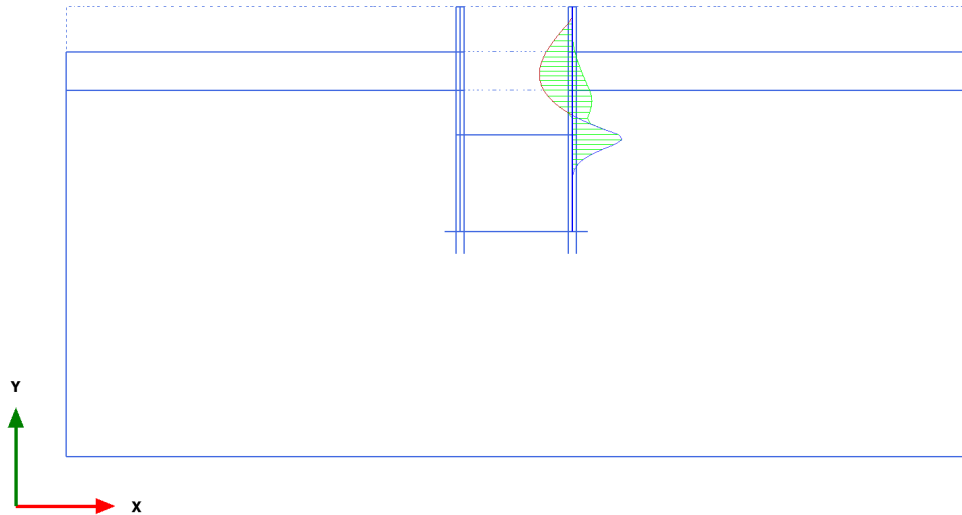
**Bending moments M (scaled up  $1.00 \cdot 10^6$  times)**

Maximum value =  $1.042 \cdot 10^{-6} \text{ kNm/m}$  (Element 3 at Node 2406)

Minimum value =  $-3.874 \cdot 10^{-6} \text{ kNm/m}$  (Element 7 at Node 2529)

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

<b>MC Engineering Srl</b> Società di Ingegneria	 <b>ISO 9001</b> <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

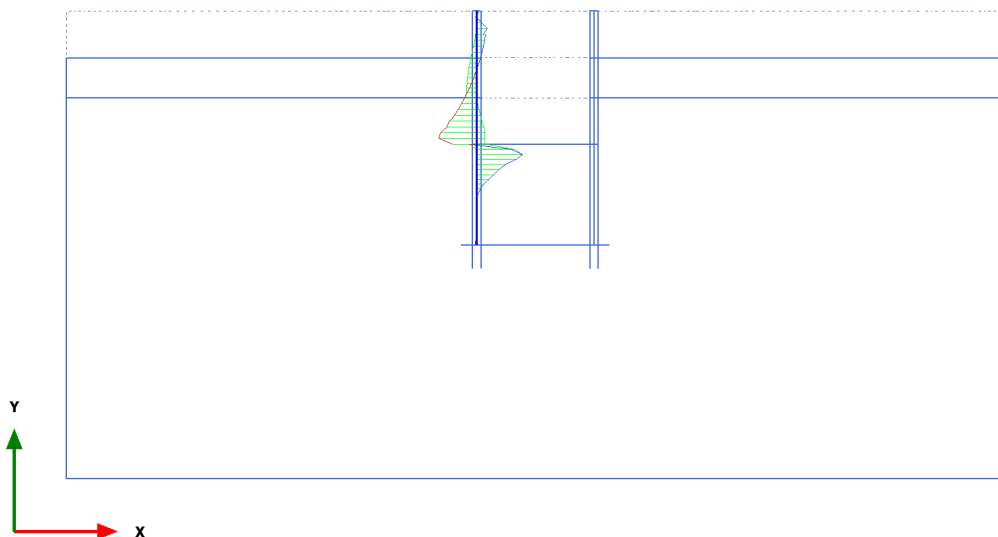


**Bending moments M (scaled up  $2.00 \cdot 10^6$  times)**

Maximum value =  $2.220 \cdot 10^{-6}$  kNm/m (Element 18 at Node 5150)

Minimum value =  $-1.466 \cdot 10^{-6}$  kNm/m (Element 15 at Node 5387)

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



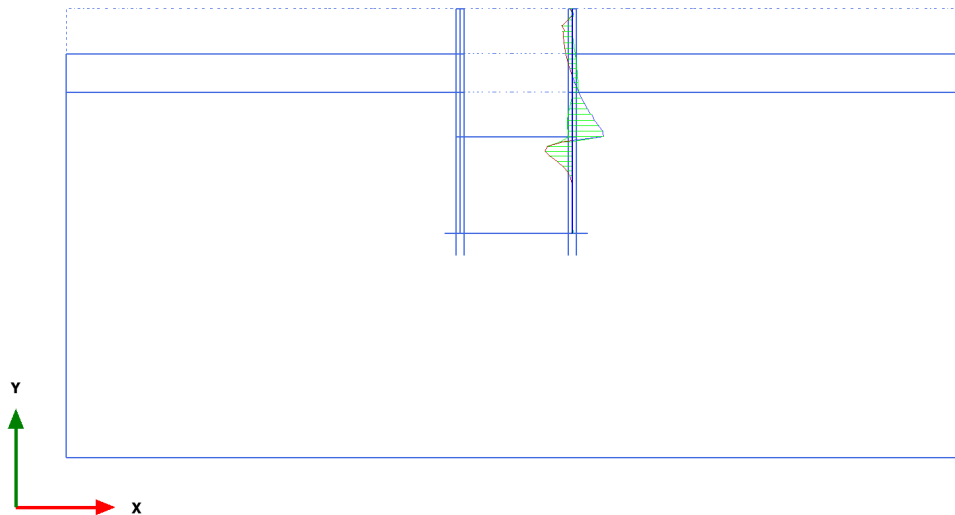
**Shear forces Q (scaled up  $2.00 \cdot 10^6$  times)**

Maximum value =  $1.958 \cdot 10^{-6}$  kN/m (Element 7 at Node 2524)

Minimum value =  $-1.607 \cdot 10^{-6}$  kN/m (Element 6 at Node 2465)

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

<b>MC Engineering Srl</b> Società di Ingegneria	 <b>ISO 9001</b> <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



#### Shear forces Q (scaled up $2.00 \cdot 10^6$ times)

Maximum value =  $1.391 \cdot 10^{-6}$  kN/m (Element 17 at Node 5173)

Minimum value =  $-1.211 \cdot 10^{-6}$  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 <sub>min</sub> ▲ [kN/m]	N <sub>max</sub> ▲ [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

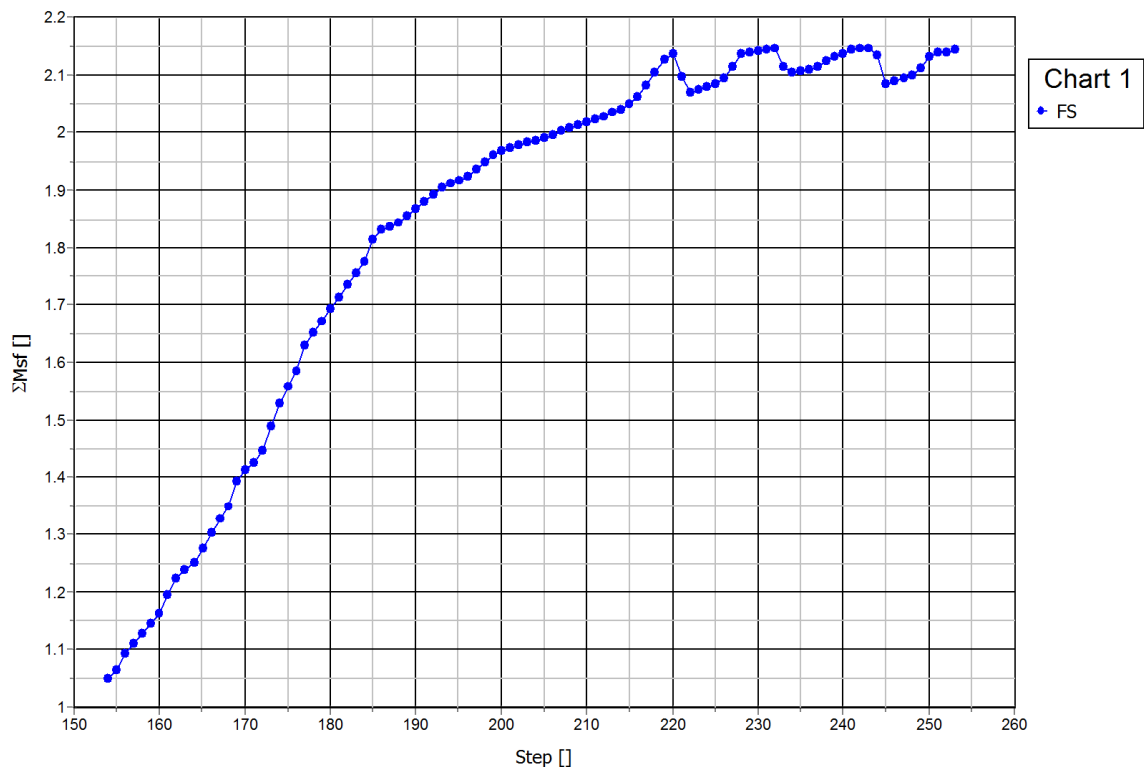
La verifica viene eseguita attraverso la riduzione progressiva dei parametri di resistenza del terreno ( $\varphi'$  e  $c'$ ) considerando la riduzione  $[c' + \sigma'_v \tan(\varphi')]/SF$ . Tutti gli elementi strutturali sono non lineari.

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.

<div>MC Engineering Srl</div> <div>Società di Ingegneria</div>	<div> <b>ISO 9001</b> LL-C (Certification)</div> <div>392876</div>	Cliente:	Codice:	1509-R-7010-E-1
		REGIONE EMILIA ROMAGNA	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:

<b>MC Engineering Srl</b> Società di Ingegneria	 <b>ISO 9001</b> <small>LL-C (Certification)</small> 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

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

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

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

## APPENDICE A: RESISTENZA ALL'INSTABILITA' DEI PUNTELLI



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

<b>VERIFICA DI STABILITA' DEI PUNTELLI (NTC08 DM14/01/2008)</b>										
Diametro	Spessore	D/t	classe	A	g	J	W	L <sub>0</sub>	γ <sub>M1</sub>	f <sub>yk</sub>
(mm)	(mm)	(-)	(-)	(cm <sup>2</sup> )	(kN/m)	(cm <sup>4</sup> )	(cm <sup>3</sup> )	(m)	(-)	(MPa)
323.9	8	40.49	2	79.4	0.686	9910	611.9	9.5	1.10	355
N <sub>cr</sub>	λ	α	φ	χ	N <sub>b,Rd</sub>	N <sub>bd</sub>	M <sub>Ed</sub>	M <sub>m,Ed</sub>	M <sub>eq,Ed</sub>	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	<b>1.000</b>

## LEGENDA

D/t = rapporto diametro spessore,

A = area

g = peso per unità di lunghezza

J = modulo di inerzia

W = modulo di resistenza

L<sub>0</sub> = lunghezza libera di inflessione;

γ<sub>M1</sub> = coefficiente di sicurezza del materiale;

f<sub>yk</sub> = 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<sub>Ed</sub> = momento di progetto fattorizzato dovuto al peso proprio

M<sub>m,Ed</sub> = valore medio del momento flettente:  $0.75M_{max,Ed} \leq M_{eq,Ed} \leq M_{max,Ed}$

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

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