



**CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA**  
AREA SERVIZI TERRITORIALI METROPOLITANI  
Servizio Progettazione Costruzioni e Manutenzione Strade

**S.P. n° 65 "DELLA FUTA"**  
**PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65**  
**ALL'ABITATO DI RASTIGNANO:**  
**II Stralcio da Ponte delle Oche a Rotatoria Rastignano**

**Arcate di Mitigazione Ambientale**  
**Relazione di Calcolo**

*Giuseppe Fusco*  


Codice	ADD0104
--------	---------

Rev.	Data	Redatto	Controllato
0	Settembre 2018	Samantha Cancellieri	Daniele Mingozzi
1			
2			


Approvato
Giancarlo Guadagnini




Sede Principale:  
Viale Baccarini, 29  
48018 FAENZA (RA)  
Tel. 0546 663423  
Fax 0546 663428

Sede di Bologna:  
Via Zacconi, 16  
40127 BOLOGNA (BO)  
Tel. 051 245663  
Fax 0546 663428

Sede di Santarcangelo:  
Via Andrea Costa, 115  
47822 SANTARCANGELO DI  
ROMAGNA (RN)  
Tel. 0546 663423  
Fax 0546 663428

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice:   ADD0104 Data:       Settembre 2018

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

## INDICE

<b>1.</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>NORMATIVA TECNICA DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>8</b>
<b>3.</b>	<b>PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI .....</b>	<b>9</b>
<b>4.</b>	<b>CARATTERISTICHE DEI MATERIALI.....</b>	<b>10</b>
<b>5.</b>	<b>STRATIGRAFIA DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>12</b>
<b>6.</b>	<b>ANALISI DELLE ARCADE .....</b>	<b>13</b>
6.1	GEOMETRIA DELLA STRUTTURA .....	13
6.2	MODELLAZIONE ADOTTATA.....	13
6.3	ANALISI DEI CARICHI NELLA FASE DI ESERCIZIO .....	16
6.3.1	<i>Peso proprio e carichi permanenti portati (<math>G_{k1}+G_{k2}+G_{k3}</math>).....</i>	16
6.3.2	<i>Azione della neve (<math>Q_{k1}</math>).....</i>	16
6.3.3	<i>Azione del vento (<math>Q_{k2}</math>).....</i>	17
6.3.4	<i>Azioni sismiche (<math>S_k</math>) .....</i>	18
6.3.4.1	<i>Azioni orizzontali e verticali.....</i>	18
6.4	CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI .....	19
6.4.1	<i>Combinazioni di carico.....</i>	19
6.4.1.1	<i>Combinazioni di carico per SLU e SLE.....</i>	19
6.4.1.2	<i>Riassunto delle combinazioni di carico per SLU .....</i>	21
6.4.1.3	<i>Riassunto delle combinazioni di carico per SLE .....</i>	21
6.4.2	<i>Sollecitazioni.....</i>	22
6.5	VERIFICHE DI RESISTENZA ED A FESSURAZIONE .....	26
6.5.1	<i>Verifiche SLU .....</i>	26
6.5.1.1	<i>Verifica a presso/tenso-flessione .....</i>	26
6.5.1.2	<i>Verifica a taglio .....</i>	26
6.5.1.3	<i>Verifica a torsione.....</i>	27
6.5.2	<i>Verifiche SLE.....</i>	27
6.5.2.1	<i>Verifica delle tensioni di esercizio .....</i>	28
6.5.2.2	<i>Verifica a fessurazione .....</i>	29
6.5.2.3	<i>Spostamenti massimi.....</i>	29
<b>7.</b>	<b>ANALISI DELLE FONDAZIONI SU MICROPALI.....</b>	<b>30</b>
7.1	GEOMETRIA DELLA STRUTTURA .....	30
7.2	AZIONI SOLLECITANTI .....	33
7.3	RISULTATI DI CALCOLO .....	38
7.4	VERIFICA DELLA CAPACITÀ PORTANTE DEI MICROPALI .....	41
7.5	VERIFICA DEI PLINTI DI FONDAZIONE .....	43

## TABELLE

TABELLA 5-1	STRATIGRAFIA DI RIFERIMENTO.....	12
TABELLA 6-1	COEFFICIENTI PARZIALI PER LE AZIONI AGLI STATI LIMITE ULTIMI. ....	20
TABELLA 6-2	COEFFICIENTI DI COMBINAZIONE DELLE AZIONI VARIABILI. ....	20
TABELLA 6-3	SOLLECITAZIONI PER LE VERIFICHE AGLI SLU. ....	22


	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

TABELLA 6-4 SOLLECITAZIONI PER LE VERIFICHE AGLI SLE. ....	24
TABELLA 6-5 VERIFICA A PRESSO/TENSO-FLESSIONE (SLU).....	26
TABELLA 6-6 VERIFICA A TAGLIO (SLU). ....	26
TABELLA 6-7 VERIFICA A TORSIONE (SLU).....	27
TABELLA 6-8 VERIFICA DELLE TENSIONI DI ESERCIZIO (SLE). ....	28
TABELLA 6-9 VERIFICA A FESSURAZIONE (SLE). ....	29
TABELLA 7-1 GEOMETRIA DEI MICROPALI. ....	30
TABELLA 7-2 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO PILA 1. ....	32
TABELLA 7-3 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO PILA 2. ....	32
TABELLA 7-4 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO PILA 3. ....	32
TABELLA 7-5 COEFFICIENTI PARZIALI PER LE AZIONI. ....	33
TABELLA 7-6 COEFFICIENTI PARZIALI PER I PARAMETRI GEOTECNICI. ....	33
TABELLA 7-7 COEFFICIENTI PARZIALI $\gamma_R$ PER LA VERIFICA AGLI STATI LIMITE ULTIMI DI PALI....	33
TABELLA 7-8 FATTORI DI CORRELAZIONE $\xi$ . ....	34
TABELLA 7-9 AZIONI ALL'INCASTRO DELLE PILE. ....	35
TABELLA 7-10 AZIONI PER ANALISI GROUP ALLA BASE DEI PLINTI. ....	37
TABELLA 7-11 PLINTO PILA 1 – MASSIME SOLLECITAZIONI IN TESTA AI MICROPALI.....	38
TABELLA 7-12 PLINTO PILA 2 – MASSIME SOLLECITAZIONI IN TESTA AI MICROPALI.....	38
TABELLA 7-13 PLINTO PILA 3 – MASSIME SOLLECITAZIONI IN TESTA AI MICROPALI.....	38
TABELLA 7-14 PLINTO PILA 1 –VERIFICA DELLE TENSIONI NEL TUBO DI ARMATURA. ....	39
TABELLA 7-15 PLINTO PILA 2 – VERIFICA DELLE TENSIONI NEL TUBO DI ARMATURA. ....	39
TABELLA 7-16 PLINTO PILA 3 – VERIFICA DELLE TENSIONI NEL TUBO DI ARMATURA. ....	39
TABELLA 7-17 AZIONI ASSIALI DI COMPRESSIONE E TRAZIONE MASSIME NEI MICROPALI. ....	40
TABELLA 7-18 RIEPILOGO VERIFICHE CAPACITÀ PORTANTE DEI MICROPALI IN COMPRESSIONE. ....	42
TABELLA 7-19 RIEPILOGO VERIFICHE CAPACITÀ PORTANTE DEI MICROPALI IN TRAZIONE.....	42
TABELLA 7-20 RIEPILOGO SOLLECITAZIONI FLESSIONALI NEL PLINTO DI FONDAZIONE DELLA PILA 1. ....	45
TABELLA 7-21 RIEPILOGO SOLLECITAZIONI FLESSIONALI NEL PLINTO DI FONDAZIONE DELLA PILA 2. ....	46
TABELLA 7-22 RIEPILOGO SOLLECITAZIONI FLESSIONALI NEL PLINTO DI FONDAZIONE DELLA PILA 3. ....	46

## FIGURE

FIGURA 1.1: ANDAMENTO PLANIMETRICO DEL TRACCIATO E UBICAZIONE DELL'OPERA.....	7
FIGURA 6-1 GEOMETRIA DELL'ARCATA LATO PIANORO. ....	13
FIGURA 6-2 SEZIONI TIPO. ....	14
FIGURA 6-3 NUMERAZIONE NODI. ....	14
FIGURA 6-4 NUMERAZIONE ASTE.....	15
FIGURA 7-1 SISTEMA DI RIFERIMENTO DEI MODELLI DI CALCOLO. ....	30
FIGURA 7-2 PLANIMETRIA DEI MODELLI DI CALCOLO.....	31



	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

FIGURA 7-3	VISTA FRONTALE DEI MODELLI DI CALCOLO.....	31
FIGURA 7-4	SISTEMA DI RIFERIMENTO DELLE AZIONI DEL PROGRAMMA DI CALCOLO GROUP....	36
FIGURA 7-5	SISTEMA DI RIFERIMENTO DELLE AZIONI DEL PROGRAMMA DI CALCOLO GROUP....	43
FIGURA 7-6	SCHEMA PLANIMETRICO PLINTO PILA 1.....	44
FIGURA 7-7	SCHEMA PLANIMETRICO PLINTO PILA 2.....	44
FIGURA 7-8	SCHEMA PLANIMETRICO PLINTO PILA 3.....	45

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

## 1. PREMESSA

La presente relazione di calcolo è stata redatta a corredo del Progetto Definitivo per la realizzazione del tratto stradale "Variante di Rastignano della SP 65 della Futa" che collega la fondovalle del torrente Savena con la strada 870.

La presente relazione riguarda i calcoli strutturali delle due Arcate di Mitigazione Ambientale (Lato Bologna e Lato Pianoro) secondo i criteri e le azioni previste dalle "Norme tecniche per le Costruzioni" del 17 gennaio 2018.

Entrambe le Arcate sono costituite da due campate realizzate mediante una sezione scatolare di larghezza pari a 1.5m, altezza variabile da 1.8 m a 3.9 m e spessore pari a 0.3 m in appoggio su tre pile a sezione scatolare quadrata di lato esterno pari a 1.9 m e spessore pari a 0.3 m. Le campate dell'arcata lato Pianoro hanno luce rispettivamente pari a 22 m e 16 m, mentre le campate dell'arcata lato Bologna hanno luce rispettivamente pari a 22 m e 14.6 m.


All'estradosso delle travi di campata le pareti verticali della sezione scatolare si estendono verso l'alto per un'altezza pari a 0.8 m al fine di consentire un adeguato riempimento in terra per l'inserimento di decorazioni floreali.

Le fondazioni delle pile verranno realizzate mediante plinti su micropali al fine di soddisfare la verifica di capacità portante dell'opera.

La struttura sarà realizzata in c.a. gettato in opera.

Le azioni considerate nel calcolo sono quelle relative ai pesi propri della struttura, ai carichi permanenti non strutturali e ai carichi variabili dati dall'azione della neve e del vento.

L'azione sismica viene valutata a partire dal valore di accelerazione massima al suolo per il sito considerato  $a_g$  ottenuta per una vita nominale dell'opera pari a 100 anni e una classe d'uso III.

 <b>ENSER</b>	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

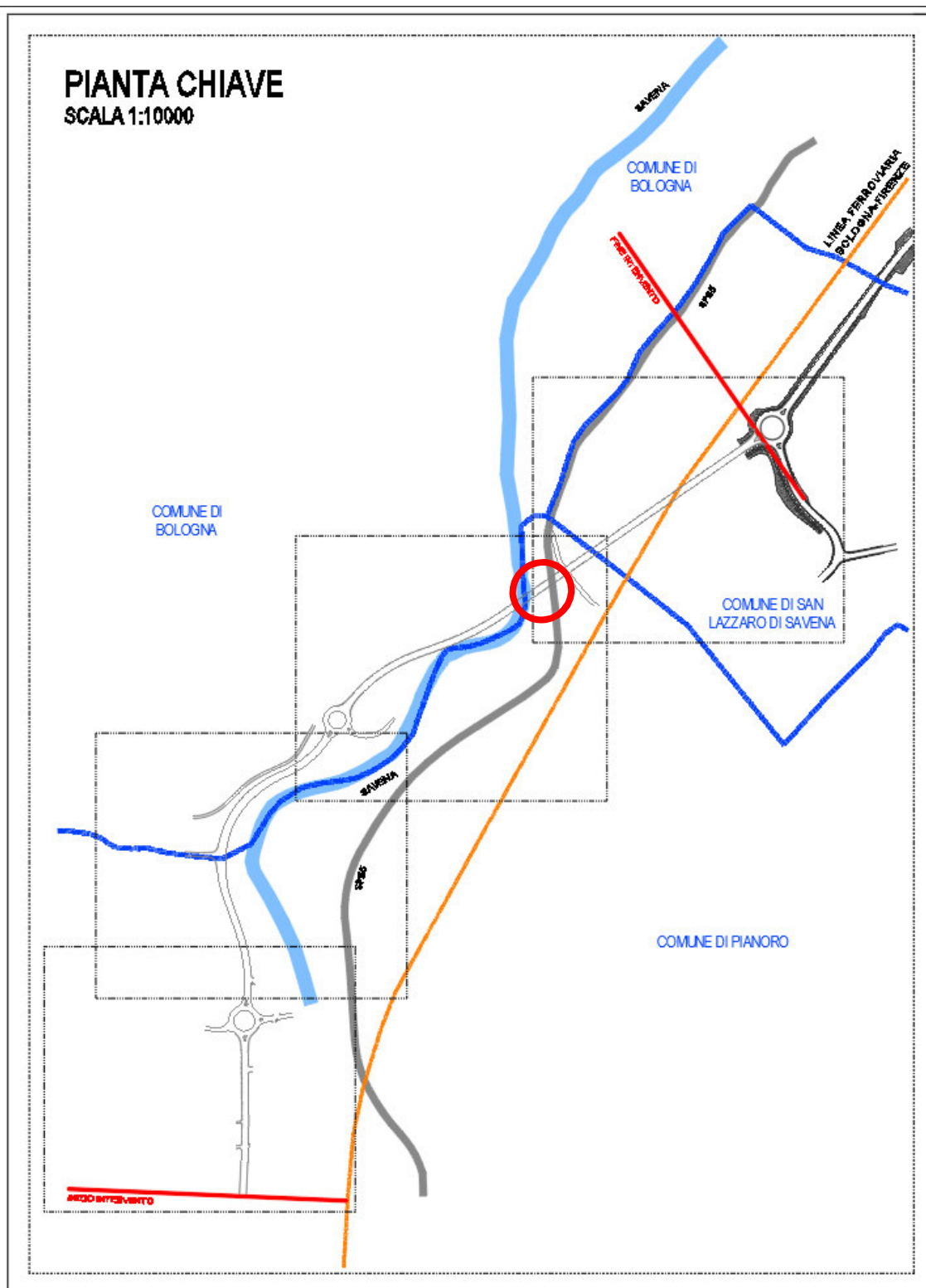




Figura 1.1: Andamento planimetrico del tracciato e ubicazione dell'opera.

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

## 2. NORMATIVA TECNICA DI RIFERIMENTO

- **Legge 5 Novembre 1971, n. 1086** "Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica";
- **Legge 2 Febbraio 1974, n. 64** "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche";
- **D.M. 17/01/2018** "Nuove norme tecniche per le costruzioni";
- **Circolare n. 617 del 02/02/2009** "Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008";
- **UNI EN 1992-1-1:2005** "Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici";
- **UNI EN 1997-1:2005** "Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 1: Regole generali";
- **UNI EN 1998-1:2005** "Eurocodice 8 - Parte 1: Progettazione delle strutture per la resistenza sismica: regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici";
- **UNI EN 1998-2:2005** "Eurocodice 8 - Parte 2: Progettazione delle strutture per la resistenza sismica: Ponti";
- **UNI EN 1998-5:2005** "Eurocodice 8 - Parte 5: Progettazione delle strutture per la resistenza sismica: fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici";
- **UNI EN 206:2014** "Calcestruzzo, Parte1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità".
- **UNI 11104:2004** "Calcestruzzo, Specificazione, prestazione, produzione e conformità – Istruzioni complementari per l'applicazione della EN206";
- **O.P.C.M. n. 3274 del 20.03.2003 e s.m.i.**, "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" e successive modifiche ed integrazioni.




	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

### 3. PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

Il calcolo delle strutture dell'arcata di mitigazione ambientale è stato eseguito con il programma di calcolo ad elementi finiti "SAP2000" versione 12.0, attraverso il quale è stato eseguito un modello di calcolo piano schematizzando le pile e le travate con elementi di tipo "beam". Il codice consente di determinare l'involuppo delle sollecitazioni dovute a diverse condizioni di carico visualizzando, asta per asta, l'andamento massimo e minimo del momento, del taglio, dello sforzo normale.

Le verifiche delle sezioni in cemento armato sono state eseguite con il programma IngegneriaSoft versione 5.2.0 con il metodo degli Stati Limite secondo quanto prescritto dalle norme tecniche del 17 gennaio 2018.


Il calcolo delle strutture di fondazione è stato eseguito con il programma di calcolo GROUP v. 7.0.17 con il quale è stata eseguita un'analisi di interazione terreno-struttura con le sollecitazioni ottenute dall'analisi della struttura in elevazione.

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018


## 4. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Per la realizzazione delle opere si adotteranno materiali uniformi a quanto prescritto dal CSA ed ai paragrafi 11.2 e 11.3 delle "Norme tecniche per le costruzioni". In particolare per le opere in oggetto si prevedono i conglomerati cementizi e l'acciaio le cui caratteristiche sono descritte nella tabella a seguire.

CALCESTRUZZO	
Impiego	<b><u>Elevazioni</u></b>
Classe di resistenza	C30/37
Resistenza caratteristica cubica a compressione $R_{ck}$	37 MPa
Resistenza caratteristica cilindrica a compressione $f_{ck} = 0.83 \cdot R_{ck}$	30.7 MPa
Valor medio della resistenza a trazione semplice $f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{ck}^{2/3}$	2.94 MPa
Valor medio della resistenza cilindrica $f_{cm} = f_{ck} + 8$	38.7 MPa
Valor medio della resistenza a trazione per flessione $f_{ctm} = 1.2 \cdot f_{ctm}$	3.53 MPa
Modulo elastico $E_{cm}$	33017 MPa
Copriferro netto	50 mm
Sovrapposizione barre	Min 50 $\phi$
Diametro max aggregati	32 mm
Classe di esposizione	XF2
Classe di consistenza	S4
Impiego	<b><u>Fondazioni</u></b>
Classe di resistenza	C25/30
Resistenza caratteristica cubica a compressione $R_{ck}$	30 MPa
Resistenza caratteristica cilindrica a compressione	25 MPa

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

<b><math>f_{ck} = 0.83 \cdot R_{ck}</math></b>	
Valor medio della resistenza a trazione semplice <b><math>f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{ck}^{2/3}</math></b>	2.56 MPa
Valor medio della resistenza cilindrica <b><math>f_{cm} = f_{ck} + 8</math></b>	33 MPa
Valor medio della resistenza a trazione per flessione <b><math>f_{ctm} = 1.2 \cdot f_{ctm}</math></b>	3.08 MPa
Modulo elastico <b><math>E_{cm}</math></b>	31476 MPa
Copriferro netto	50 mm
Sovrapposizione barre	Min 50 $\phi$
Diametro max aggregati	32 mm
Classe di esposizione	XC2
Classe di consistenza	S4
<b>ACCIAIO PER CEMENTO ARMATO</b>	
Tipo	B450C
Tensione caratteristica di snervamento <b><math>f_{y \text{ nom}}</math></b>	450 N/mm <sup>2</sup>
Tensione caratteristica di rottura <b><math>f_{t \text{ nom}}</math></b>	540 N/mm <sup>2</sup>
<b>ACCIAIO PER MICROPALI</b>	
Tipo	S355H
Tensione caratteristica di snervamento <b><math>f_{yk}</math></b>	275 N/mm <sup>2</sup>
Tensione caratteristica di rottura <b><math>f_{tk}</math></b>	430 N/mm <sup>2</sup>

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

## 5. STRATIGRAFIA DI RIFERIMENTO

Nella si riporta la stratigrafia di riferimento adottata per il calcolo delle fondazioni delle pile che saranno realizzate mediante plinti su micropali.


Tabella 5-1 Stratigrafia di riferimento.

Quote assolute		Unità
Da [m slm]	A [m slm]	
Piano campagna	94.2÷99.7	<i>RIP</i> : riporto
94.2÷99.7	90.6÷90.7	<i>DAG</i> : depositi alluvionali prevalentemente incoerenti
90.6÷99.7	89.6÷95.7	<i>PAT alt</i> : porzione alterata ed allentata dell'unità <i>PAT</i>
89.6÷95.7	-	<i>PAT</i> : Arenite marnosa e marne argillose

Di seguito si riporta una tabella riepilogativa con i parametri geotecnici adottati nei calcoli di interazione terreno-struttura (analisi con programma di calcolo GROUP 7.0) e di capacità portante dei micropali.

Unità	$\gamma$ [kN/mc]	$c'$ [kPa]	$\phi$ [°]	$E'$ [MPa]
RIP	19.0	0	28÷32	10÷20
DAG	20.0	0	35÷37	25÷35
PAT alt	21.3	50÷60	31÷33	110÷150
PAT	21.3	75÷90	38÷36	205÷285

La falda è stata assunta a quota +91.00m s.l.m..

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

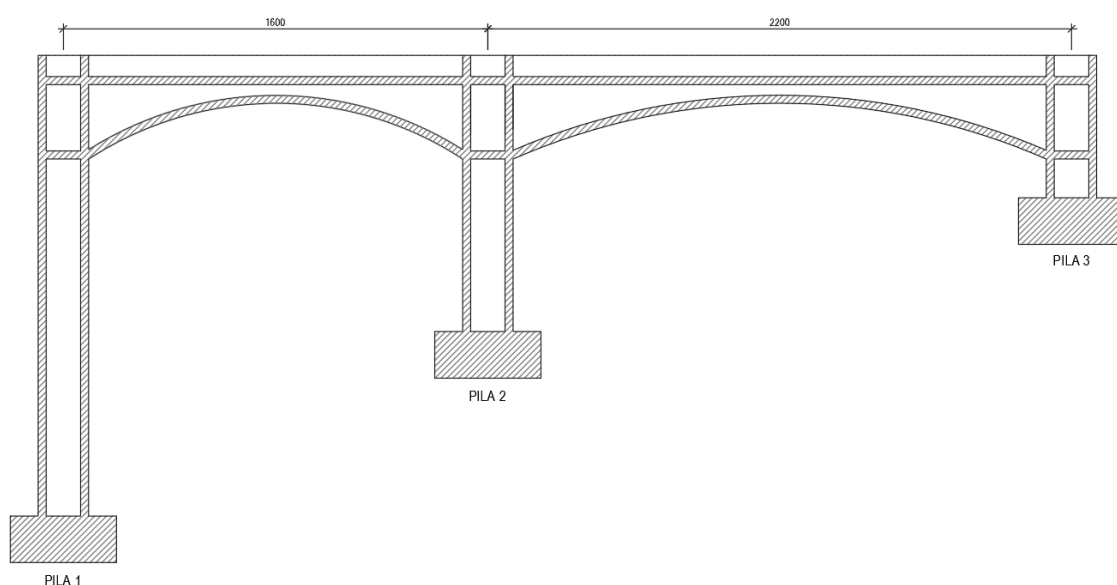
## 6. ANALISI DELLE ARCATE

### 6.1 Geometria della struttura

È stata analizzata la geometria dell'arcata lato Pianoro in quanto per quella lato Bologna la campata più corta presenta una luce della inferiore a quella lato Pianoro e pertanto le sollecitazioni finali risulterebbero inferiori a quelle del calcolo di seguito riportato.

La geometria della struttura dell'arcata analizzata è riportata nella Figura 6-1.

Figura 6-1 Geometria dell'arcata lato Pianoro.



### 6.2 Modellazione adottata

La struttura è stata schematizzata con un modello di calcolo piano ad elementi finiti tipo "beam" passanti per il baricentro delle travate e delle pile.

La mesh del calcolo (si vedano le figure seguenti) è composta da 71 beam elements e da 72 nodi.

I plinti di fondazione su micropali sono schematizzati mediante incastro al fine di massimizzare le azioni sulla struttura e sulle opere di fondazione.

Le aste 1÷44 rappresentano le arcate tra le pile, mentre le aste 45÷47, 48÷62, 63÷71 rappresentano rispettivamente le pile 3, 1 e 2 con riferimento alla Figura 6-1.

Le sezioni delle pile e delle arcate hanno le dimensioni riportate in Figura 6-2.


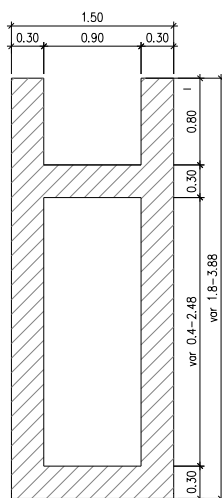
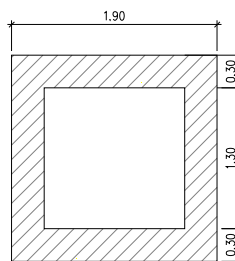
 <b>ENSER</b>	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

Figura 6-2 Sezioni tipo.

SEZIONE TRAVATA



SEZIONE PILA 1-3

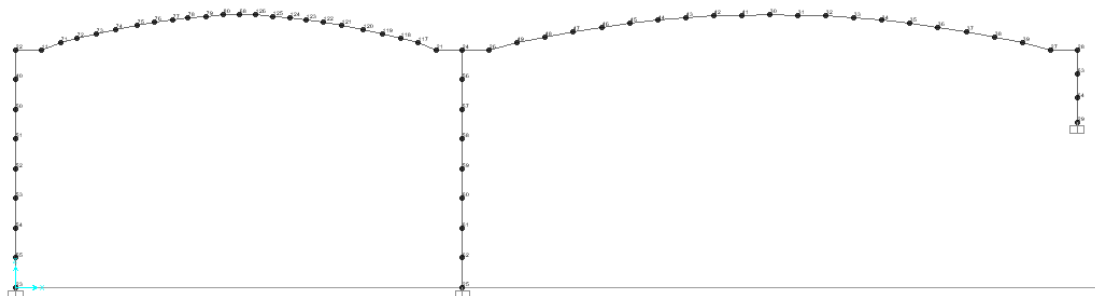


Per tutte le aste del reticolo si è assunto:

$E_c = 33017 \text{ N/mm}^2$ ; modulo elastico del calcestruzzo ( $R_{ck} = 37 \text{ N/mm}^2$ )

Lo schema statico della struttura e la relativa numerazione dei nodi e delle aste sono riportati in Figura 6-3 e Figura 6-4.

Figura 6-3 Numerazione nodi.




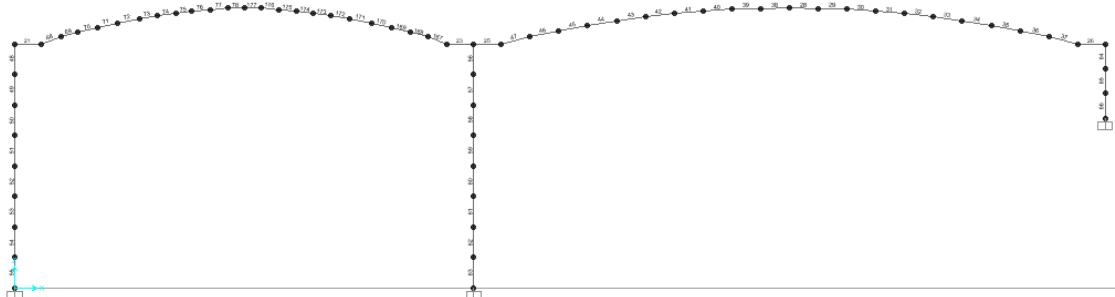
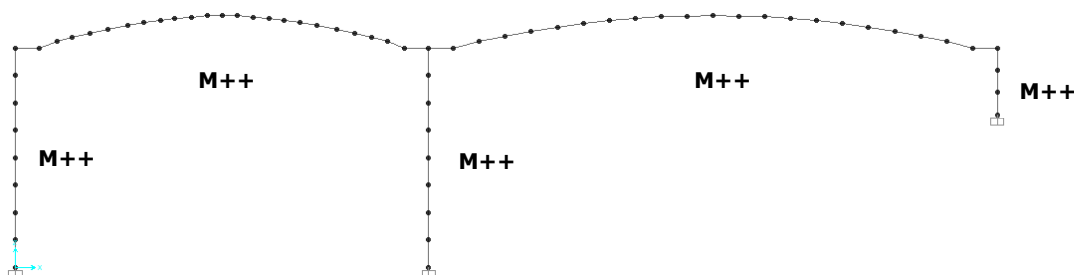
 <b>ENSER</b>	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018


Figura 6-4 Numerazione aste.



Al fine di garantire la leggibilità dei risultati si fa notare quanto segue:

1. Le unità di misura utilizzate in SAP sono il kN ed il m.
2. Il sistema di riferimento globale assunto per le strutture ha asse Z verticale e l'asse X orizzontale. L'incastro della pila 1 è a quota  $Z=0$ .
3. Ogni elemento finito ha un suo sistema di riferimento locale rispetto al quale sono definite le tensioni e le caratteristiche della sollecitazione riportate nelle uscite del programma di calcolo e nelle successive verifiche eseguite nella presente relazione. L'asse 1 locale degli elementi è assunto sempre coassiale all'elemento con origine sul nodo iniziale, mentre l'asse 2 locale è ortogonale all'asse 1 locale e giacente nel piano del modello di calcolo.
4. Le tensioni normali sono positive se di trazione.
5. I momenti flettenti sono positivi per convenzione quando tendono le fibre dal lato negativo dell'asse 2 locale. *Nel modello in esame l'asse 2 locale è diretto per tutti gli elementi dell'arcata verso l'alto (estradosso arcata) e per tutte le pile secondo la direzione positiva dell'asse globale X.*



	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

## 6.3 Analisi dei carichi nella fase di esercizio

Nel presente paragrafo si descrivono i carichi assunti per le verifiche di resistenza della struttura.

### 6.3.1 Peso proprio e carichi permanenti portati ( $G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}$ )

#### Arcata

I carichi permanenti considerati sono i seguenti:

- *peso proprio* ( $\gamma_{cls}=25\text{kN/m}^3$ )  
 $G_{k1} = 40.5 \div 71.7 \text{ kN/m}$
- *peso terreno vegetale riempimento* ( $\gamma_{terreno}=19\text{kN/m}^3$ )  
 $G_{k2} = b \cdot h \cdot \gamma_{terreno} = 0.9 \cdot 0.8 \cdot 19 = 13.68 \text{ kN/m}$
- *peso muratura faccia a vista* ( $\gamma_{muratura}=17\text{kN/m}^3$ )  
 $G_{k3} = 5.6 \div 9.2 \text{ kN/m}$

#### Pile

I carichi permanenti considerati sono i seguenti:

- *peso proprio* ( $\gamma_{cls}=25\text{kN/m}^3$ )  
 $G_{k1} = 48.0 \text{ kN/m}$
- *peso muratura faccia a vista* ( $\gamma_{muratura}=17\text{kN/m}^3$ )  
 $G_{k3} = 13.6 \text{ kN/m}$

### 6.3.2 Azione della neve ( $Q_{k1}$ )

L'azione della neve è stata calcolata tenendo conto che l'opera sorge in zona I - Mediterranea secondo la seguente formulazione:

$$q_s = \mu_i = q_{sk}(T_R) \cdot C_E \cdot C_T = 1.25 \text{ kN/m}^2$$

Con:


$$\mu_i = 0.8$$

coefficiente di forma

$$q_{sk}(T_R) = a_R \cdot q_{sk} = 1.04 \cdot 1.5 = 1.56 \text{ kN/m}^2$$

valore caratteristico della neve al suolo per un periodo di ritorno  $T_R = 100$  anni



	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

$C_E=1$  coefficiente di esposizione

$C_T=1$  coefficiente termico

Il carico totale da neve sull'intera larghezza dell'arcata è pari a:

$$Q_{1k} = q_s \cdot B = 1.2 \cdot 1.7 = 2.12 \text{ kN/m}$$

### 6.3.3 Azione del vento ( $Q_{k2}$ )

L'azione del vento è stata ricavata per un sito ricadente in Zona 2, classe di rugosità B, categoria di esposizione IV.

La pressione del vento è stata calcolata come segue:

$$Q_{k2} = q_b \cdot C_e \cdot C_p \cdot C_d = 893.71 \text{ kN/m}^2$$

con:

$$q_b = 421.88 \text{ kN/m}^2 \text{ pressione cinetica di riferimento}$$

$$C_e = 1.63 \text{ coefficiente di esposizione}$$

$$C_p = 1.4 \text{ coefficiente di forma}$$

$$C_d = 1.0 \text{ coefficiente dinamico}$$

La pressione cinetica di riferimento è data dall'espressione:

$$q_b = 0.5 \cdot \rho \cdot v_b(T_R)^2 = 421.88 \text{ kN/m}^2$$

con:

$v_b(T_R) = a_R \cdot v_b = 1.04 \cdot 25.00 \text{ m/s} = 25.98 \text{ m/s}$  velocità di riferimento del vento per la zona 2 (Emilia Romagna) per un periodo di ritorno di 100 anni.

$$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3 \text{ densità dell'aria}$$

Il coefficiente di esposizione dipende dall'altezza del punto considerato ed è calcolato per un sito con categoria di esposizione IV (classe di rugosità B, distanza dal mare superiore a 30m) con la seguente espressione:

$$C_e(z) = C_e(z_{min}) = k_r^2 \cdot C_t \cdot \ln(z_{min}/z_0) \cdot [7 + C_t \cdot \ln(z_{min}/z_0)] = 1.63$$


con:

$$k_r = 0.22 \text{ (vedi Tabella 3.3.II, NTC del 17/01/18)}$$

$$z_0 = 0.3 \text{ m (vedi Tabella 3.3.II, NTC del 17/01/18)}$$

$$z_{min} = 8.0 \text{ m (vedi Tabella 3.3.II, NTC del 17/01/18)}$$

$$C_t = 1.0 \text{ coefficiente di topografia}$$

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

## 6.3.4 Azioni sismiche ( $S_k$ )

### 6.3.4.1 Azioni orizzontali e verticali

Gli effetti dell'azione sismica sono valutati mediante un'analisi lineare dinamica che segue i criteri riportati al par. 7.3.3.1 del D.M. 17/01/2018. Tale analisi consiste nel determinare i modi di vibrare della costruzione mediante un'analisi modale, nell'applicare lo spettro di risposta di progetto per ciascuno dei modi di vibrare individuati e nel combinare opportunamente gli effetti dei singoli modi.

Sono stati considerati i seguenti Stati Limite

- ✓ *Stato limite ultimo: Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV)*
- ✓ *Stato limite di esercizio: Stato Limite di Danno (SLD)*

Il valore accelerazione massima al suolo per il sito considerato  $a_g$  è stato ottenuto assumendo una vita nominale dell'opera pari a 100 anni e una classe d'uso III e considerando che le arcate insistono su suolo di Categoria "A" con coefficiente di struttura  $q$  pari ad "1":


- *Stato limite ultimo:*  $a_g=0.237\text{ g}$
- *Stato limite esercizio:*  $a_g=0.110\text{ g}$

con:

$a_g$  accelerazione di progetto del terreno su suolo di tipo A

Lo spettro di risposta di progetto è stato calcolato come riportato al par. 3.2.3.2.1 delle NTC assumendo i seguenti parametri:

- $S=S_T \cdot S_S$  coefficiente relativo al terreno
- $S_T=1$  coefficiente di amplificazione topografica
- $S_S=1$  coefficiente di amplificazione stratigrafica
- $F_0$  fattore che quantifica l'amplificazione massima spettrale
  - Stato limite ultimo  $F_0=2.458$
  - Stato limite esercizio  $F_0=2.461$
- $T_C^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro di risposta
  - Stato limite ultimo  $T_C^*=0.286$
  - Stato limite esercizio  $T_C^*=0.319$

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

L'effetto dell'azione sismica si applica sulle seguenti masse:

- pesi propri;
- sovraccarichi permanenti.

## 6.4 Calcolo delle sollecitazioni

### 6.4.1 Combinazioni di carico

#### 6.4.1.1 Combinazioni di carico per SLU e SLE

Le azioni caratteristiche vengono combinate tra di loro al fine di ottenere le sollecitazioni di progetto, per effettuare le successive verifiche di resistenza e a fessurazione.

#### ✓ Combinazioni di carico per SLU

Ai fini del calcolo e della verifica degli elementi strutturali per gli stati limite ultimi si considerano le seguenti combinazioni di carico:

$$F_d = \gamma_G G_k + \gamma_P P_k + \gamma_Q \cdot \left( Q_{k1} + \sum_{i=2}^n \psi_{0i} Q_{ki} \right) \quad \text{in cond. statiche}$$

$$F_{ds} = G_k + P_k + E_k + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj} \quad \text{in cond. sismiche}$$

essendo:

- $G_k$  = il valore caratteristico delle azioni permanenti, ivi comprese le azioni indirette che danno effetti di tipo permanente;
- $Q_{k1}$  = il valore caratteristico dell'azione di base di ogni combinazione;
- $Q_{ki}$  = il valore caratteristico delle azioni variabili tra loro indipendenti;
- $E_k$  = il valore caratteristico delle azioni in fase sismica;
- $Q_{kj}$  = il valore caratteristico delle azioni variabili in fase sismica;
- $\gamma$  = coefficienti parziali delle azioni di tipo "A1" come indicati in Tabella 6-1 relativamente allo stato limite di resistenza della struttura (STR) con riferimento all'Approccio di calcolo 2 previsto dalle norme tecniche del 2018.
- $\psi_{0i}$  = coefficienti di combinazione allo stato limite ultimo sulla base di considerazioni statistiche (Tabella 6-2).


 <b>ENSER</b>	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

Tabella 6-1 Coefficienti parziali per le azioni agli stati limite ultimi.

		Coefficiente	EQU	A1	A2
		$\gamma_F$			
Carichi permanenti $G_i$	Favorevoli	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali $G_2^{(1)}$	Favorevoli	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili $Q$	Favorevoli	$\gamma_{Q1}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

<sup>(1)</sup> Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. carichi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.

Tabella 6-2 Coefficienti di combinazione delle azioni variabili.

Categoria/Azione variabile	$\psi_{0j}$	$\psi_{1j}$	$\psi_{2j}$
Categoria A - Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B - Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C - Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D - Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E - Aree per immagazzinamento, uso commerciale e uso industriale Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F - Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso $\leq 30$ kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G - Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso $> 30$ kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H - Coperture accessibili per sola manutenzione	0,0	0,0	0,0
Categoria I - Coperture praticabili	da valutarsi caso per caso		
Categoria K - Coperture per usi speciali (impianti, eliporti, ...)			
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota $\leq 1000$ m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota $> 1000$ m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0


### ✓ Combinazioni di carico per SLE

Per gli stati limite di servizio devono essere prese in esame le combinazioni rare, frequenti e quasi permanenti con i coefficienti parziali  $\gamma$  tutti uguali ad 1.0, applicando ai valori caratteristici delle azioni variabili i coefficienti di combinazione  $\psi_0$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  definiti nella Tabella 6-2. In forma convenzionale, le combinazioni richiamate possono essere espresse nel modo seguente:

a) combinazione rare: 
$$F_d = \sum_j G_{kj} + P_k + Q_{k1} + \sum_{i=2}^n \psi_{0i} Q_{ki}$$

b) combinazione frequenti: 
$$F_d = \sum_j G_{kj} + P_k + \psi_{11} Q_{k1} + \sum_{i=2}^n \psi_{2i} Q_{ki}$$

c) combinazione quasi permanenti: 
$$F_d = \sum_j G_{kj} + P_k + \sum_{i=2}^n \psi_{2i} Q_{ki}$$

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

Gli stati limite di servizio da verificare riguardano i seguenti aspetti:

- ✓ stato tensionale;
- ✓ deformazioni;
- ✓ fessurazione.

#### 6.4.1.2 Riassunto delle combinazioni di carico per SLU

Le combinazioni di carico analizzate per la verifica allo Stato limite Ultimo sono le seguenti:

$$\textbf{COMB 1} \quad F_d = \gamma_{G1} G_{k1} + \gamma_{G2} (G_{k2} + G_{k3}) + \gamma_Q \cdot (Q_{k1} + \psi_{02} Q_{k2})$$

con  $\psi_{02}=0.6$

$$\textbf{COMB 2} \quad F_d = \gamma_{G1} G_{k1} + \gamma_{G2} (G_{k2} + G_{k3}) + \gamma_Q \cdot (Q_{k2} + \psi_{02} Q_{k1})$$

con  $\psi_{02}=0.5$

$$\textbf{COMB 3 (SISMICA)} \quad F_d = G_{k1} + G_{k2} + G_{k3} + E_{k1}$$

Con:  $E_{k1} = E_x + 0.3 \cdot E_y$

$E_x$  sisma in direzione x (parallela alla direzione dell'arcata)

$E_y$  sisma in direzione y (perpendicolare alla direzione dell'arcata)

$$\textbf{COMB 4 (SISMICA)} \quad F_d = G_{k1} + G_{k2} + G_{k3} + E_{k2}$$

Con:  $E_{k2} = E_y + 0.3 \cdot E_x$

$E_x$  sisma in direzione x (parallela alla direzione dell'arcata)

$E_y$  sisma in direzione y (perpendicolare alla direzione dell'arcata)


Nelle combinazioni 3 e 4 l'azione sismica viene applicata in entrambi i versi degli assi x e y e pertanto nell'output di calcolo vengono evidenziati con "Max" e "Min" l'involuppo massimo e minimo dei risultati ottenuti.

#### 6.4.1.3 Riassunto delle combinazioni di carico per SLE

$$\textbf{COMB 5 ( RARA)} \quad F_d = G_{k1} + G_{k2} + G_{k3} + Q_{k1} + \psi_{02} Q_{k2}$$

con  $\psi_{02}=0.6$

$$\textbf{COMB 6 ( RARA)} \quad F_d = G_{k1} + G_{k2} + G_{k3} + Q_{k2} + \psi_{02} Q_{k1}$$

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

con  $\psi_{02}=0.5$

**COMB7 ( FREQUENTE)**

$$F_d = G_{k1} + G_{k2} + G_{k3} + \psi_{11} Q_{k1} + \psi_{22} Q_{k2}$$

con  $\psi_{11}=0.2$  e  $\psi_{22}=0.0$

**COMB8 ( FREQUENTE)**

$$F_d = G_{k1} + G_{k2} + G_{k3} + \psi_{11} Q_{k2} + \psi_{22} Q_{k1}$$

con  $\psi_{11}=0.2$  e  $\psi_{22}=0.0$

**COMB 9 (QUASI PERMANENTE)**

$$F_d = G_{k1} + G_{k2} + G_{k3}$$

## 6.4.2 Sollecitazioni


Il calcolo delle sollecitazioni indotte dalle Combinazioni di carico è stato condotto con l'ausilio del programma di calcolo strutturale SAP2000, prodotto dalla Computers and Structures, Inc.

Di seguito sono riportate la Tabella 6-3 e la Tabella 6-4 con le sollecitazioni delle sezioni più significative e per le Combinazioni di carico risultate più critiche, sia con riferimento alle verifiche agli SLU che con riferimento alle verifiche agli SLE.


Le sezioni considerate nelle verifiche sono:

- Arco - sezione di mezzeria;
- Arco - sezione di imposta;
- Pila 1, 2, e 3 – sezione di estremità superiore;
- Pila 1, 2, e 3 – sezione di base.

Tabella 6-3 Sollecitazioni per le verifiche agli SLU.

 <b>ENSER</b>	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

Sezione di verifica	Sforzo assiale P [kN]	Azione di taglio V2 [kN]	Azione di taglio V3 [kN]	Momento torcente T [kNm]	Momento flettente M2 [kNm]	Momento flettente M3 [kNm]	Combinazione
<i>Arco: sezione mezzeria (nodo 12)</i>	-270.4	66.6	4.7	5.1	56.3	1344.2	Comb1
	-71.3	60.0	154.2	308.7	1170.6	1069.0	Comb4
	210.7	88.4	46.3	92.6	351.2	1339.6	Comb3
	-594.9	7.4	-46.3	-92.6	-351.2	566.5	Comb3
<i>Arco: sezione imposta (nodo 72)</i>	-360.9	1289.6	-23.3	12.3	78.7	-6076.4	Comb1
	-111.9	1009.5	247.4	214.8	1142.0	-3592.8	Comb4
	-737.7	623.6	-74.2	-64.5	-342.6	-6738.2	Comb3
	225.1	1217.3	74.2	64.5	342.6	-1899.2	Comb3
<i>Pila 1: sezione estremità sup (nodo 1)</i>	-980.1	-271.6	18.5	-4.1	0.4	2536.4	Comb1
	-652.8	-175.3	371.2	395.5	277.1	2007.5	Comb4
	-541.7	-134.2	111.4	118.6	83.1	2487.1	Comb3
<i>Pila 1: sezione estremità inf (nodo 48)</i>	-1783.8	-389.0	-176.4	-118.6	-2269.2	-2169.3	Comb3
	-1565.0	-134.2	588.1	395.5	7564.0	-733.2	Comb4
	-2210.0	-271.6	45.7	-4.1	477.5	-1498.6	Comb1
	-1447.1	3.0	176.4	118.6	2269.2	40.1	Comb3
<i>Pila 2: sezione estremità sup (nodo 72)</i>	-1450.2	271.2	198.0	388.9	129.3	1924.2	Comb3
	-1719.4	37.1	659.9	1296.2	431.0	692.9	Comb4
	-2219.3	-397.8	-198.0	-388.9	-129.3	-1593.8	Comb3
	-2570.3	-89.3	54.5	-56.8	12.6	233.9	Comb1
<i>Pila 2: sezione estremità inf (nodo 63)</i>	-2772.8	-488.3	-215.2	-388.9	-1926.5	-2141.1	Comb3
	-2262.4	64.2	717.5	1296.2	6421.7	128.5	Comb4
	-3303.4	-89.3	70.7	-56.8	567.1	-556.8	Comb1
	-1987.6	361.7	215.2	388.9	1926.5	1350.6	Comb3
<i>Pila 3: sezione estremità sup (nodo 44)</i>	-880.5	-688.2	-71.9	-377.7	-119.0	-2583.2	Comb3
	-638.4	539.6	239.5	1258.9	396.8	-1605.5	Comb4
	-971.3	360.9	26.5	-113.7	37.7	-2575.6	Comb1
	-508.1	1200.8	71.9	377.7	119.0	-1079.0	Comb3
	-1062.8	-698.0	-72.2	-377.7	-308.6	-4063.6	Comb3
	-820.3	542.6	240.8	1258.9	1028.5	-177.1	Comb4


	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

Sezione di verifica	Sforzo assiale P [kN]	Azione di taglio V2 [kN]	Azione di taglio V3 [kN]	Momento torcente T [kNm]	Momento flettente M2 [kNm]	Momento flettente M3 [kNm]	Combinazione
<i>Pila 3: sezione estremità inf (nodo 45)</i>	-1215.9	360.9	31.9	-113.7	124.0	-1509.2	Comb1
	-689.7	1210.6	72.2	377.7	308.6	1915.7	Comb3


Tabella 6-4 Sollecitazioni per le verifiche agli SLE.

Sezione di verifica	Tipo di combinazione	Sforzo assiale P [kN]	Momento flettente M2 [kNm]	Momento flettente M3 [kNm]	Combinazione
<i>Arco: sezione mezzera (nodo 12)</i>	rara	-198.2	37.5	984.3	Comb5
	rara	-195.2	62.6	968.7	Comb6
	frequente	-193.3	0.0	959.3	Comb7
	frequente	-192.1	12.5	953.0	Comb8
	quasi-perm	-192.1	0.0	953.0	Comb9
<i>Arco: sezione imposta (nodo 72)</i>	rara	-264.5	52.5	-4455.0	Comb5
	rara	-260.4	87.4	-4386.8	Comb6
	frequente	-257.9	0.0	-4346.0	Comb7
	frequente	-256.3	17.5	-4318.7	Comb8
	quasi-perm	-256.3	0.0	-4318.7	Comb9
<i>Pila 1: sezione estremità sup (nodo 1)</i>	rara	-720.6	0.3	1859.3	Comb5
	rara	-710.5	0.5	1830.6	Comb6
	frequente	-704.5	0.0	1813.4	Comb7
	frequente	-700.5	0.1	1801.9	Comb8
	quasi-perm	-700.5	0.0	1801.9	Comb9
<i>Pila 1: sezione estremità inf (nodo 48)</i>	rara	-1635.6	318.3	-1098.5	Comb5
	rara	-1625.6	530.6	-1081.5	Comb6
	frequente	-1619.5	0.0	-1071.4	Comb7
	frequente	-1615.5	106.1	-1064.6	Comb8
	quasi-perm	-1615.5	0.0	-1064.6	Comb9
	rara	-1888.6	8.4	171.1	Comb5
	rara	-1861.7	14.0	168.1	Comb6



	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

Sezione di verifica	Tipo di combinazione	Sforzo assiale P [kN]	Momento flettente M2 [kNm]	Momento flettente M3 [kNm]	Combinazione
<i>Pila 2: sezione estremità sup (nodo 72)</i>	frequente	-1845.5	0.0	166.4	Comb7
	frequente	-1834.8	2.8	165.2	Comb8
	quasi-perm	-1834.8	0.0	165.2	Comb9
<i>Pila 2: sezione estremità inf (nodo 63)</i>	rara	-2434.0	378.0	-408.0	Comb5
	rara	-2407.1	630.1	-401.6	Comb6
	frequente	-2390.9	0.0	-397.8	Comb7
	frequente	-2380.2	126.0	-395.3	Comb8
	quasi-perm	-2380.2	0.0	-395.3	Comb9
<i>Pila 3: sezione estremità sup (nodo 44)</i>	rara	-714.1	25.2	-1888.6	Comb5
	rara	-704.2	41.9	-1859.9	Comb6
	frequente	-698.3	0.0	-1842.6	Comb7
	frequente	-694.3	8.4	-1831.1	Comb8
	quasi-perm	-694.3	0.0	-1831.1	Comb9
<i>Pila 3: sezione estremità inf (nodo 45)</i>	rara	-896.2	82.6	-1107.0	Comb5
	rara	-886.2	137.7	-1090.5	Comb6
	frequente	-880.3	0.0	-1080.6	Comb7
	frequente	-876.3	27.5	-1074.0	Comb8
	quasi-perm	-876.3	0.0	-1074.0	Comb9

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

## 6.5 Verifiche di resistenza ed a fessurazione

### 6.5.1 Verifiche SLU

Di seguito si riportano le tabelle riepilogative per le verifiche agli Stati Limite Ultimi a flessione e a taglio delle sezioni più significative.

#### 6.5.1.1 Verifica a presso/tenso-flessione

Tabella 6-5 Verifica a presso/tenso-flessione (SLU).

Sezione di verifica	Combinazione	$P_{Rd}$ [kN]	$M_{2,Rd}$ [kNm]	$M_{3,Rd}$ [kNm]	FS
Arco: mezzeria	Comb 3	-569.7	924.9	3628.3	2.70
Arco: imposta	Comb 3	1182.8	538.7	-1080.4	1.60
Pila 1	Comb 3	1612.4	7799.6	687.4	1.03
Pila 2	Comb 4	2616.1	7425.4	160.4	1.15
Pila 3	Comb 3	2139.0	681.4	8173.7	2.01


Dove  $P_{Rd}$ ,  $M_{2,Rd}$ ,  $M_{3,Rd}$ , sono rispettivamente sforzo assiale resistente e momenti flettenti resistenti rispetto agli assi locali 2 e 3, ed FS è il fattore di sicurezza nella verifica ad M/N costante.

#### 6.5.1.2 Verifica a taglio

Tabella 6-6 Verifica a taglio (SLU).

Sezione di verifica	Combinazione	$V_{Ed}$ [kN]	$A_{sw}/s$ [cmq/m]
Arco: mezzeria	Comb 4	161.5	0.85
Arco: imposta	Comb 3	1143.3	4.00
Pila 1	Comb 4	596.4	3.52
Pila 2	Comb 4	718.2	4.40
Pila 3	Comb 3	1202.9	7.06

Dove  $V_{Ed}$  è l'azione di taglio di progetto e  $A_{sw}/s$  è la quantità minima di staffe a metro lineare necessaria per il soddisfacimento della verifica a taglio.

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

### 6.5.1.3 Verifica a torsione

Tabella 6-7 Verifica a torsione (SLU).

Sezione di verifica	Combinazione	$T_{Ed}$ [kNm]	$A_{sL}$ [cmq]	$t$ [cm]	$A_s/s$ [cmq/m]
Arco: mezzeria	Comb 4	308.7	41.22	15.0	0.86
Arco: imposta	Comb 3	64.5	18.24	15.0	0.25
Pila 1	Comb 4	395.5	27.71	15.0	0.61
Pila 2	Comb 4	1296.2	90.8	15.0	1.99
Pila 3	Comb 4	1258.9	88.19	15.0	1.94

Dove  $T_{Ed}$  è l'azione torcente di progetto,  $A_L$  è l'armatura longitudinale aggiuntiva a quella necessaria per il soddisfacimento della verifica a flessione distribuita nella zona tesa della fascia perimetrale di spessore  $t$  della sezione cava e  $A_s/s$  è la quantità minima di staffe a metro lineare necessaria per il soddisfacimento della verifica a torsione.


### 6.5.2 Verifiche SLE

Le verifiche allo Stato limite di Esercizio sono state effettuate nei confronti delle tensioni di esercizio e della fessurazione. In particolare per le tensioni di esercizio è stato verificato che:

- Combinazioni rare (COMB 5 e 6):  $\sigma_c < 0.6 f_{ck}$
- Combinazioni quasi-permanenti (COMB 9):  $\sigma_c < 0.45 f_{ck}$

Le verifiche a fessurazione sono state condotte considerando:

- Stato limite di formazione delle fessure: in sezione interamente reagente e per le sollecitazioni di esercizio è stato verificato che la massima trazione nel calcestruzzo  $\sigma_{ct}$  sia inferiore alla resistenza caratteristica a trazione per flessione  $f_{ctk}$ : se risulta  $\sigma_{ct} > f_{ctk}$  si procede alla verifica di apertura delle fessure.
- Stato limite di apertura delle fessure: è stato verificato che l'apertura convenzionale delle fessure valutata con le sollecitazioni relative alle combinazioni frequenti e quasi-permanenti, sia inferiore alla massima apertura ammissibile  $w_k$ :
  - Combinazioni frequenti (COMB 7 e 8)  $w_k = w_3 = 0.40\text{mm}$
  - Combinazioni quasi-permanenti (COMB 9)  $w_k = w_2 = 0.30\text{mm}$

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018


Sono stati inoltre controllati gli spostamenti massimi dell'arcata in direzione ortogonale al suo sviluppo al fine di garantire che non si manifesti alcun contatto con il viadotto adiacente.

### 6.5.2.1 Verifica delle tensioni di esercizio

Tabella 6-8 Verifica delle tensioni di esercizio (SLE).

Sezione di verifica	Combinazione	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_s$ [MPa]
<i>Arco: mezzeria</i>	Rara: comb 6	2.14	-17.8
	Quasi-perm: comb 9	2.02	
<i>Arco: imposta</i>	Rara: comb 5-6	1.74	-17.65
	Quasi-perm: comb 9	1.66	
<i>Pila 1</i>	Rara: comb 6	2.26	-10.26
	Quasi-perm: comb 9	1.78	
<i>Pila 2</i>	Rara: comb 6	1.98	3.25
	Quasi-perm: comb 9	1.56	
<i>Pila 3</i>	Rara: comb 5	2.17	-21.26
	Quasi-perm: comb 9	2.08	

Dove  $\sigma_c$  è la tensione di compressione nel calcestruzzo e  $\sigma_s$  è la tensione massima nell'acciaio.

 <b>ENSER</b>	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

### 6.5.2.2 Verifica a fessurazione


Tabella 6-9 Verifica a fessurazione (SLE).

Sezione di verifica	Combinazione	$\sigma_{ct}$ [MPa]	w [mm]
Arco: mezzeria	Frequente: comb 8	-1.23	-
	Quasi-perm: comb 9	-1.21	-
Arco: imposta	Frequente: comb 8	-1.18	-
	Quasi-perm: comb 9	-1.17	-
Pila 1	Frequente: comb 8	-0.40	-
	Quasi-perm: comb 9	-0.32	-
Pila 2	Frequente: comb 8	0.61	-
	Quasi-perm: comb 9	0.60	-
Pila 3	Frequente: comb 7	-1.52	-
	Quasi-perm: comb 9	-1.51	-

Dove  $\sigma_{ct}$  è la tensione di trazione nel calcestruzzo e w è l'apertura massima delle fessure. Nelle verifiche sopra riportate l'apertura delle fessure non viene calcolata in quanto la tensione di trazione nel calcestruzzo non supera mai la resistenza caratteristica a trazione per flessione  $f_{ctk}=2.21\text{MPa}$ .

### 6.5.2.3 Spostamenti massimi

Lo spostamento massimo che può subire la struttura in direzione ortogonale al suo sviluppo è pari a 1.9 cm e si ottiene per la combinazione di calcolo 4. Tale valore è compatibile con la distanza tenuta con il viadotto adiacente e non crea problemi di interazione tra le strutture.

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

## 7. ANALISI DELLE FONDAZIONI SU MICRO-PALI

### 7.1 Geometria della struttura

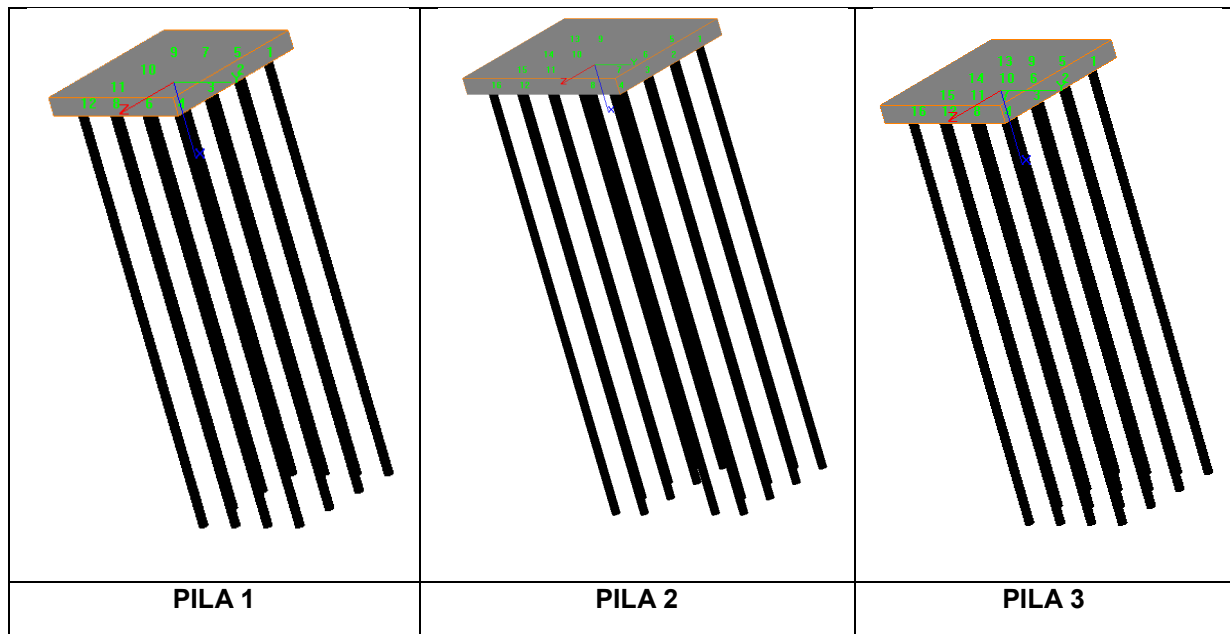
Le fondazioni delle pile sono costituite da plinti su micropali. Per ogni tipologia di pila è stata eseguita un'analisi con il programma di calcolo GROUP che ha permesso di modellare il plinto come elemento rigido su 12/16 micropali.

Tabella 7-1 Geometria dei micropali.

Pila	Diametro perforazione [mm]	Tubo di armatura [m]	Lunghezza [m]	Numero micropali	Quota sommità palo [m]
Pila 1	220	Ø168.3 sp 10	10	12	89.2
Pila 2	220	Ø168.3 sp 10	12	16	96.1
Pila 3	220	Ø168.3 sp 10	11	16	101.1

Nella Figura 7-1 sono rappresentati i tre modelli di calcolo analizzati per ciascuna delle tre pile e il sistema di riferimento convenzionale.

Figura 7-1 Sistema di riferimento dei modelli di calcolo.



Una vista planimetrica e frontale dei tre modelli di calcolo è illustrata in Figura 7-2 e Figura 7-3.


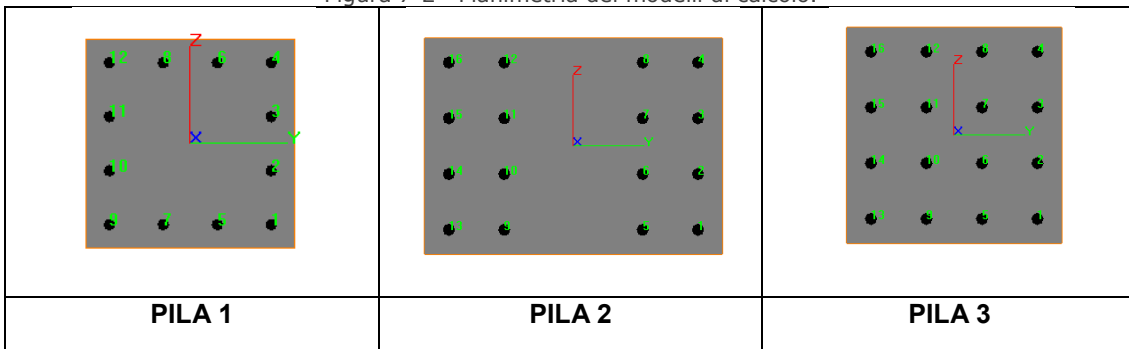
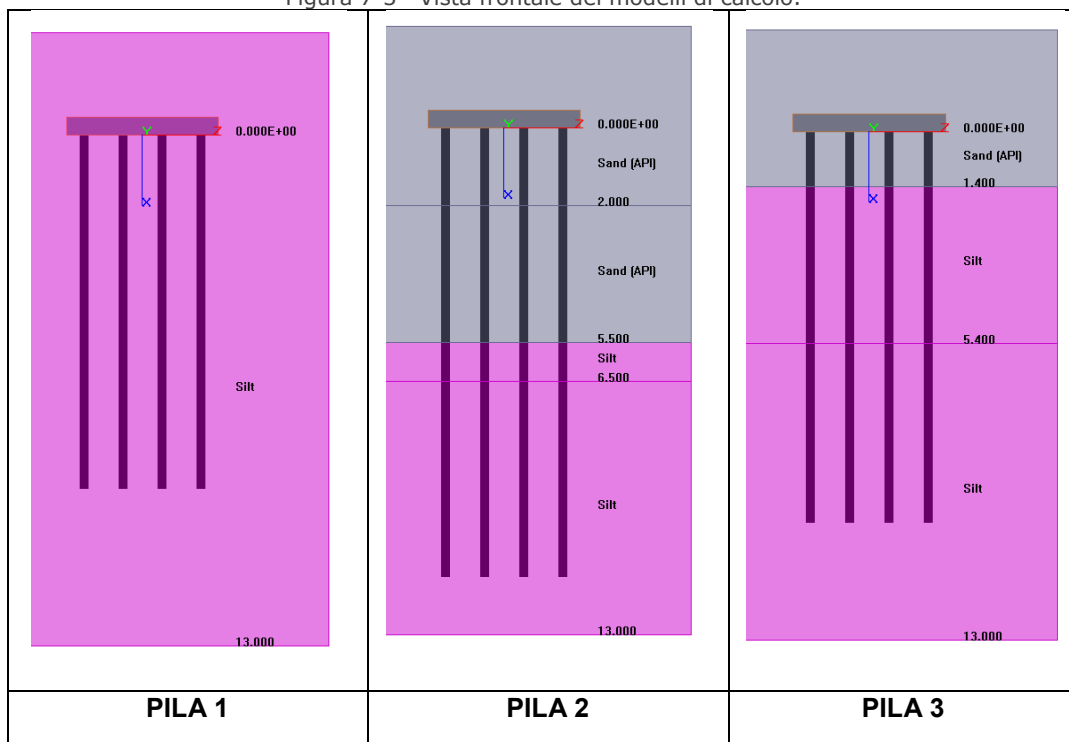
	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

Figura 7-2 Planimetria dei modelli di calcolo.



I micropali nei modelli delle pile 1 e 3 sono posizionati ad un interasse pari a 1m in entrambe le direzioni, mentre i micropali della pila 2 sono distribuiti in quattro file lungo l'asse z, distanti rispettivamente 1m, 2.5m e 1m.

Figura 7-3 Vista frontale dei modelli di calcolo.



Nelle tabelle seguenti vengono riportate le stratigrafie di riferimento per ciascun calcolo eseguito e i parametri adottati.


	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

Tabella 7-2 Stratigrafia e parametri geotecnici di calcolo pila 1.

Unità stratigrafica	Quota sommità strato [m]	Peso di volume [kN/m³]	angolo di attrito [°]	coesione [kPa]	Modulo di reazione del terreno [kN/m³]
PAT	89.2	21.3	37	82.5	84000

Tabella 7-3 Stratigrafia e parametri geotecnici di calcolo pila 2.

Unità stratigrafica	Quota sommità strato [m]	Peso di volume [kN/m³]	angolo di attrito [°]	coesione [kPa]	Modulo di reazione del terreno [kN/m³]
RIP	96.10	19.0	30	0	12000
DAG	94.10	20.0	36	0	42800
PAT alt	90.60	21.3	32	55	63000
PAT	89.60	21.3	37	82.5	84000


Tabella 7-4 Stratigrafia e parametri geotecnici di calcolo pila 3.

Unità stratigrafica	Quota sommità strato [m]	Peso di volume [kN/m³]	angolo di attrito [°]	coesione [kPa]	Modulo di reazione del terreno [kN/m³]
RIP	101.1	19.0	30	0	12000
PAT alt	99.7	21.3	32	55	63000
PAT	95.7	21.3	37	82.5	84000

I micropali sono stati modellati come pali battuti aventi le seguenti caratteristiche:

- rigidezza flessionale:  $EJ = 7130 \text{ kNm}^2$
- rigidezza torsionale:  $GJ_t = 5367 \text{ kNm}^2$



	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

## 7.2 Azioni sollecitanti

Con riferimento alle NTC del 2018 il calcolo dei micropali viene eseguito seguendo l'approccio 2, fattorizzando quindi azioni, parametri geotecnici di progetto, resistenze secondo i coefficienti A1+M1+R3 di seguito riportati:

Tabella 7-5 Coefficienti parziali per le azioni.

	Effetto	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti $G_1$	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	$\gamma_Q$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

<sup>(1)</sup> Per i carichi permanenti  $G_2$  si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti  $\gamma_{G1}$

Tabella 7-6 Coefficienti parziali per i parametri geotecnici.

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale $\gamma_M$	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_\gamma$	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0

Tabella 7-7 Coefficienti parziali  $\gamma_R$  per la verifica agli Stati Limite Ultimi di pali.

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

<sup>(1)</sup> da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

I valori dei coefficienti  $\gamma_R$  sono da applicare alle resistenze caratteristiche dei pali. Queste ultime verranno calcolate sulla base di procedimenti analitici e dovranno pertanto essere fattorizzate per un fattore di correlazione  $\xi$  che è funzione del numero di verticali indagate come suggerito dalle NTC del 2018.


 <b>ENSER</b>	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

Tabella 7-8 Fattori di correlazione  $\xi$ .

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

Nel caso in esame il numero di verticali indagate è 3 e si assume un valore  $\xi_3=1.6$ .

Le azioni di calcolo dei plinti saranno quelle desunte dalle combinazioni agli Stati Limite Ultimi del calcolo SAP (carichi fattorizzati secondo i coefficienti di tipo A1).

La tabella seguente riassume le reazioni ottenute alla base delle pile per ciascuna combinazione di carico ULS analizzata (vedi analisi della struttura cap.6).


	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

Tabella 7-9 Azioni all'incastro delle pile.

Pila	Comb	$F_{x,SAP}$	$F_{y,SAP}$	$F_{z,SAP}$	$M_{x,SAP}$	$M_{y,SAP}$	$M_{z,SAP}$
		kN	kN	kN	kNm	kNm	kNm
1	1	271.6	-45.7	2210.0	477.5	1498.6	4.1
	2	267.0	-76.1	2194.9	795.8	1473.2	6.8
	3Max	390.6	174.0	1785.2	2237.0	2178.5	118.3
	3Min	-4.7	-174.0	1445.8	-2237.0	-49.4	-118.3
	4Max	252.3	580.1	1666.4	7456.6	1398.8	394.4
	4Min	133.7	-580.1	1564.6	-7456.6	730.4	-394.4
2	1	89.3	-70.7	3303.4	567.1	556.8	56.8
	2	87.7	-117.8	3263.1	945.1	547.3	94.6
	3Max	491.9	213.1	2775.9	1905.2	2156.1	383.5
	3Min	-365.3	-213.1	1984.5	-1905.2	-1365.6	-383.5
	4Max	191.9	710.2	2498.9	6350.7	923.5	1278.5
	4Min	-65.3	-710.2	2261.5	-6350.7	-133.0	-1278.5
3	1	-360.9	-31.9	1215.9	124.0	1509.2	113.7
	2	-354.8	-53.1	1201.0	206.6	1484.4	189.5
	3Max	705.9	72.2	1064.3	308.4	4089.1	377.4
	3Min	-1218.5	-72.2	688.3	-308.4	-1941.2	-377.4
	4Max	32.4	240.8	932.7	1027.9	1978.5	1257.9
	4Min	-544.9	-240.8	819.9	-1027.9	169.4	-1257.9

Si considerano le seguenti coincidenze degli assi tra il modello di calcolo strutturale (SAP) e il modello di interazione terreno-struttura delle fondazioni (GROUP):

- asse x modello SAP = asse z modello GROUP;
- asse y modello SAP = asse y modello GROUP;
- asse z modello SAP = asse -x modello GROUP.


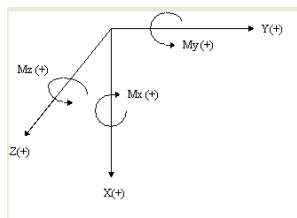
	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

Figura 7-4 Sistema di riferimento delle azioni del programma di calcolo GROUP.



Ipotizzando che le reazioni fornite dall'incastro del modello SAP si esplicino nel baricentro del plinto e considerando che la reazione verticale non tiene conto del peso del plinto, con riferimento alle convenzioni adottate per le azioni di calcolo dal programma GROUP (vedi Figura 7-4), le sollecitazioni di progetto del plinto su micropali sono state determinate come segue:

$$F_{x,Group} = F_{z,SAP} + \gamma_G \cdot P_{plinto}$$

$$F_{y,Group} = F_{y,SAP}$$

$$F_{z,Group} = F_{x,SAP}$$

$$M_{x,Group} = M_{z,SAP}$$

$$M_{y,Group} = M_{y,SAP} + F_{z,Group} \cdot e$$

$$M_{z,Group} = M_{x,SAP} - F_{y,Group} \cdot e$$

essendo:

$P_{plinto}$  il peso del plinto per ciascuna tipologia di fondazione:

Pila 1 e 3  $P_{plinto} = 700 \text{ kN}$

Pila 2  $P_{plinto} = 962.5 \text{ kN}$

$\gamma_G$  coefficiente di amplificazione dei carichi permanenti:

Comb 1 e 2  $\gamma_G = 1.3$

Comb 3 e 4  $\gamma_G = 1.0$

$e = 0.9 \text{ m}$  la distanza tra il baricentro del plinto e la quota di sommità dei pali.

Le azioni sollecitanti dell'analisi GROUP sono quelle riportate nella tabella seguente:



	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

Tabella 7-10 Azioni per analisi GROUP alla base dei plinti.

Pila	Comb	$F_{x, \text{GROUP}}$	$F_{y, \text{GROUP}}$	$F_{z, \text{GROUP}}$	$M_{x, \text{GROUP}}$	$M_{y, \text{GROUP}}$	$M_{z, \text{GROUP}}$
		kN	kN	kN	kNm	kNm	kNm
1	1	3120.0	-45.7	271.6	4.1	1743.1	518.6
	2	3104.9	-76.1	267.0	6.8	1713.5	864.4
	3Max	2485.2	174.0	390.6	118.3	2530.1	2080.4
	3Min	2145.8	-174.0	-4.7	-118.3	-53.6	-2080.4
	4Max	2366.4	580.1	252.3	394.4	1625.8	6934.6
	4Min	2264.6	-580.1	133.7	-394.4	850.7	-6934.6
2	1	4554.7	-70.7	89.3	56.8	637.2	630.7
	2	4514.3	-117.8	87.7	94.6	626.2	1051.2
	3Max	3738.4	213.1	491.9	383.5	2598.8	1713.5
	3Min	2947.0	-213.1	-365.3	-383.5	-1694.4	-1713.5
	4Max	3461.4	710.2	191.9	1278.5	1096.2	5711.6
	4Min	3224.0	-710.2	-65.3	-1278.5	-191.7	-5711.6
3	1	2125.9	-31.9	-360.9	113.7	1184.4	152.7
	2	2111.0	-53.1	-354.8	189.5	1165.1	254.4
	3Max	1764.3	72.2	705.9	377.4	4724.4	243.3
	3Min	1388.3	-72.2	-1218.5	-377.4	-3037.8	-243.3
	4Max	1632.7	240.8	32.4	1257.9	2007.7	811.1
	4Min	1519.9	-240.8	-544.9	-1257.9	-321.0	-811.1

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

## 7.3 Risultati di calcolo

Le seguenti tabelle riassumono, per ciascun plinto analizzato, i risultati in termini di sollecitazioni interne che massimizzano i valori delle tensioni nei micropali.

Tabella 7-11 Plinto pila 1 – massime sollecitazioni in testa ai micropali.

Combinazione	Micropalo	N	Mz	My	Ty	Tz
		[kN]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]
1	12	437	0.768	5.52	-3.78	21.9
2	12	455	1.28	5.38	-6.3	21.4
3Max	12	536	-4.96	6.34	9.99	26.8
4Max	10	671	-23.0	-0.19	51.4	4.37

Tabella 7-12 Plinto pila 2 – massime sollecitazioni in testa ai micropali.

Combinazione	Micropalo	N	Mz	My	Ty	Tz
		[kN]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]
1	16	363	2.59	1.19	-5.67	3.97
2	16	378	4.3	0.529	-9.41	2.64
3Max	4	377	-3.58	19.9	5.88	43.9
4Max	13	359	-36.3	-14.6	63.4	-24.8

Tabella 7-13 Plinto pila 3 – massime sollecitazioni in testa ai micropali.


Combinazione	Micropalo	N	Mz	My	Ty	Tz
		[kN]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]
1	16	217	3.04	-14.6	-5.87	-25.1
2	16	224	3.08	-11.1	-9.58	-27
3Min	1	364	10	-45.6	-18.6	-93.2
4Min	1	189	32.8	-42.6	-60.8	-81.7

La verifica di resistenza dei micropali è stata eseguita con riferimento al solo tubo di armatura. È stato verificato che la tensione totale in campo elastico sia inferiore al valore della tensione di snervamento di progetto:

$$\sigma_{Ed,tot}^2 = \sigma_{Ed}^2 + 3\tau_{Ed}^2 \leq (f_{yk}/\gamma_{M0})^2$$

$$\text{con: } \sigma_{Ed} = \sigma_{Ed,N} + \sigma_{Ed,M} = N/A + M/W_{el}$$

N=azione assiale

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

$M$ =momento flettente risultante,

$A=49.7 \text{ cm}^2$  area della sezione del profilato tubolare,

$W_{el}=186\text{cm}^3$  modulo di resistenza elastico del profilato tubolare,

$\tau_{Ed} = T/A_v$

$T$ =azione di taglio risultante

$A_v=2A/\pi$  area resistente a taglio del profilato tubolare

$f_{yk}/\gamma_{M0}=355/1.05=338\text{MPa}$

Di seguito si riportano le verifiche dei micropali più sollecitati per le varie combinazioni di carico:

Tabella 7-14 Plinto pila 1 –verifica delle tensioni nel tubo di armatura.


Combinazione	Micropalo	$\sigma_{Ed,N}$	$\sigma_{Ed,M}$	$\tau_{Ed}$	$\sigma_{Ed,tot}$
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	12	87.93	29.96	7.02	118.52
2	12	91.55	29.73	7.05	121.89
3Max	12	107.85	43.28	9.04	151.93
4Max	10	135.01	123.66	16.30	260.21

Tabella 7-15 Plinto pila 2 – verifica delle tensioni nel tubo di armatura.

Combinazione	Micropalo	$\sigma_{Ed,N}$	$\sigma_{Ed,M}$	$\tau_{Ed}$	$\sigma_{Ed,tot}$
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	16	73.04	15.32	2.19	88.44
2	16	76.06	23.29	3.09	99.49
3Max	4	75.86	108.71	14.00	186.15
4Max	13	72.23	210.36	21.52	285.04

Tabella 7-16 Plinto pila 3 – verifica delle tensioni nel tubo di armatura.

Combinazione	Micropalo	$\sigma_{Ed,N}$	$\sigma_{Ed,M}$	$\tau_{Ed}$	$\sigma_{Ed,tot}$
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	16	43.66	80.18	8.15	124.64
2	16	45.07	61.93	9.05	108.15
3Min	1	73.24	250.99	30.04	328.37
4Min	1	38.03	289.06	32.19	331.80

 <b>ENSER</b>	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018


Le verifiche risultano soddisfatte in quanto  $\sigma_{Ed,tot} < f_{yk}/\gamma_{M0} = 338 \text{ MPa}$ .

Di seguito si riporta una tabella riepilogativa con le massime azioni di compressione e di trazione nei micropali. La verifica di capacità portante è riportata al paragrafo seguente.

Tabella 7-17 Azioni assiali di compressione e trazione massime nei micropali.

Plinto	Combinazione	Micropalo	Azione assiale [kN]
Pila 1	4Max	12	814
	4Max	1	-474
Pila 2	4Max	16	518
	4Max	1	-109
Pila 3	3Max	16	490
	3Max	1	-285



	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

## 7.4 Verifica della capacità portante dei micropali

Le verifiche di capacità portante dei micropali di fondazione vengono svolte considerando l'Approccio 2 suggerito dalle norme tecniche del 17/01/2018 con riferimento alle massime sollecitazioni ottenute dall'analisi GROUP riportate in Tabella 7-18 (azioni già fattorizzate per i coefficienti A1).

Il calcolo della capacità portante dei micropali di supporto dei plinti di fondazione è stato condotto come segue:

$$Q_u = \pi \cdot \varnothing_p \cdot L \cdot \tau_s$$

Dove:

$Q_u$  = capacità portante ultima del micropalo;

$\varnothing$  = diametro di perforazione del micropalo;

$L$  = lunghezza del palo nel terreno;

$\tau_s$  = tensione tangenziale laterale tra palo e terreno.

La tensione tangenziale laterale tra palo in compressione e terreno è stata assunta come segue:

Unità RIP:  $\tau_{s1,c} = 10\text{kPa}$

Unità DAG:  $\tau_{s1,c} = 50\text{kPa}$

Unità API alterata:  $\tau_{s1,c} = 70\text{kPa}$

Unità API:  $\tau_{s2,c} = 250\text{kPa}$

Per i pali in trazione si assume un valore pari a  $\tau_{s,t} = 2/3 \cdot \tau_{s,c}$ :

Unità RIP:  $\tau_{s1,c} = 6.6\text{kPa}$

Unità DAG:  $\tau_{s1,c} = 33.3\text{kPa}$

Unità API alterata:  $\tau_{s1,t} = 46.6\text{kPa}$

Unità API:  $\tau_{s2,c} = 166.6\text{kPa}$


La capacità portante di progetto del micropalo in compressione è stata calcolata come segue:

$$Q_{c,d} = Q_{c,u} / (\gamma_R \cdot \xi_3)$$

con:

$\gamma_R = 1.15$  coefficiente parziale della resistenza laterale dei pali in compressione;

$\xi_3 = 1.6$  fattore di correlazione per numero 3 di verticali indagate.

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

La capacità portante di progetto del micropalo in trazione è stata calcolata come segue:

$$Q_{t,d} = Q_{t,u} / (\gamma_R \cdot \xi_3)$$

con:

$\gamma_R = 1.25$  coefficiente parziale della resistenza laterale dei pali in trazione;

$\xi_3 = 1.6$  fattore di correlazione per numero 3 di verticali indagate.


La verifica di capacità portante risulta soddisfatta sia per i micropali in trazione che in compressione essendo il carico massimo sul palo ( $Q_{\max}$ ) inferiore al valore della capacità di progetto per il micropalo stesso ( $Q_d$ ). Di seguito è riportata una sintesi dei risultati ottenuti:

Tabella 7-18 Riepilogo verifiche capacità portante dei micropali in compressione.

Pila	L palo [m]	L ANCORAGGIO [m]	L <sub>1</sub> (RIP) [m]	L <sub>2</sub> (DAG) [m]	L <sub>3</sub> (PAT alt) [m]	L <sub>4</sub> (PAT) [m]	Q <sub>c,d</sub> [kN]	Q <sub>c,max</sub> [kN]
Pila 1	10	1.0	-	-	-	9	845	814
Pila 2	12	1.0	2.0	3.5	1.0	4.5	522	518
Pila 3	11	1.0	1.4	-	4.0	4.6	542	490

Tabella 7-19 Riepilogo verifiche capacità portante dei micropali in trazione.

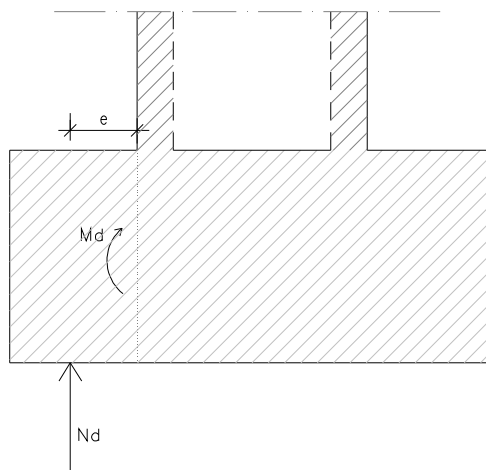
Pila	L palo [m]	L ANCORAGGIO [m]	L <sub>1</sub> (RIP) [m]	L <sub>2</sub> (DAG) [m]	L <sub>3</sub> (PAT alt) [m]	L <sub>4</sub> (PAT) [m]	Q <sub>t,d</sub> [kN]	Q <sub>t,max</sub> [kN]
Pila 1	10	1.0	-	-	-	9	-518	-474
Pila 2	12	1.0	2.0	3.5	1.0	4.5	-320	-109
Pila 3	12	1.0	1.4	-	4.0	4.6	-333	-285

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

## 7.5 Verifica dei plinti di fondazione

Le verifiche di resistenza dei plinti di fondazione sono state eseguite adottando lo schema statico riportato in Figura 7-5:

Figura 7-5 Sistema di riferimento delle azioni del programma di calcolo GROUP.



Le sollecitazioni flessionali massime nel plinto sono state calcolate con la seguente espressione:

$$M_{d,x} = \sum N_{d, \text{micropali}} \cdot e_y$$

$$M_{d,y} = \sum N_{d, \text{micropali}} \cdot e_x$$

Dove  $e_x$ ,  $e_y$  sono rispettivamente le distanze dall'asse del micropalo al bordo esterno della pila, e  $\sum N_{d, \text{micropali}}$  è la sommatoria delle reazioni dei micropali posti a distanza  $e_x$ ,  $e_y$  dal bordo esterno della pila.

Nelle figure seguenti sono riportate le piante delle due tipologie di plinto considerate, la prima di dimensioni 4m x 4m x 1.75m per le pile 1 e 3, la seconda di dimensioni 4m x 5.5m x 1.75m per la pila 2.


 <b>ENSER</b>	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

Figura 7-6 Schema planimetrico plinto pila 1.

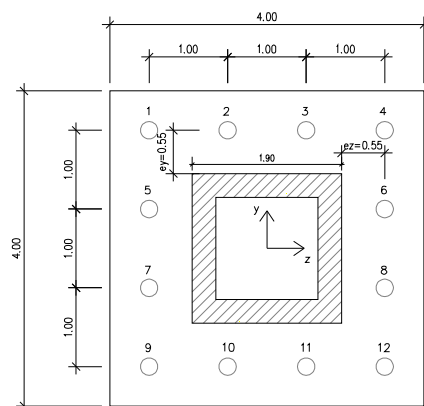
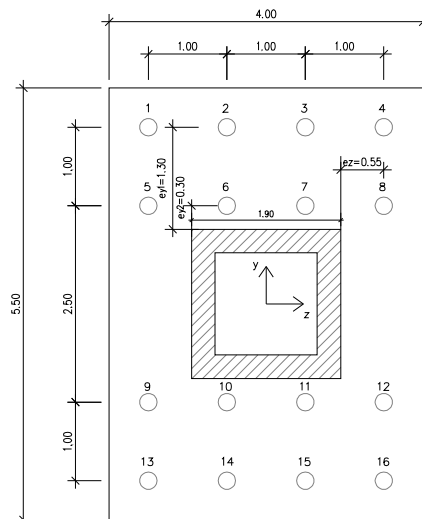


Figura 7-7 Schema planimetrico plinto pila 2.




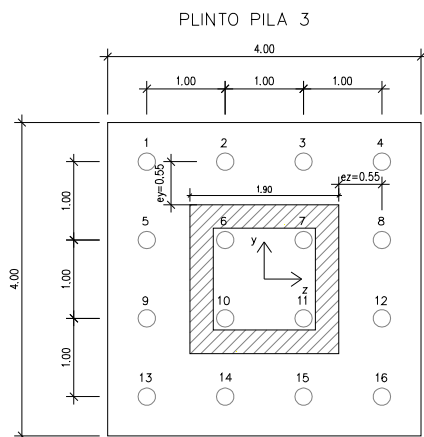
	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

Figura 7-8 Schema planimetrico plinto pila 3.



Di seguito si riportano le massime sollecitazioni flettenti ottenute per i plinti delle tre pile della struttura e la combinazione di riferimento.

Tabella 7-20 Riepilogo sollecitazioni flessionali nel plinto di fondazione della Pila 1.

Combinazione	$N_{1+2+3+4}$ $N_{9+10+11+12}$ [kN]	$N_{1+5+7+9}$ $N_{4+6+8+12}$ [kN]	$e_y$ [m]	$e_z$ [m]	$M_{dz}$ [kNm]	$M_{dy}$ [kNm]
1	875	464	0.55	0.55	481	255
	1208	1604	0.55	0.55	664	882
2	759	469	0.55	0.55	417	258
	1311	1589	0.55	0.55	721	874
3Max	192	-11	0.55	0.55	105	-6
	1461	1643	0.55	0.55	804	904
4Max	-1374	285	0.55	0.55	-756	157
	2827	1353	0.55	0.55	1555	744


	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	Codice: ADD0104 Data: Settembre 2018

Tabella 7-21 Riepilogo sollecitazioni flessionali nel plinto di fondazione della Pila 2.

Combinazione	$N_{1+2+3+4}$ $N_{13+14+15+16}$ [kN]	$N_{5+6+7+8}$ $N_{9+10+11+12}$ [kN]	$N_{1+5+7+9}$ $N_{4+6+8+12}$ [kN]	$e_{y1}$ [m]	$e_{y2}$ [m]	$e_z$ [m]	$M_{dz}$ [kNm]	$M_{dy}$ [kNm]
1	1027	1076	939	1.3	0.3	0.55	1658	516
	1251	1201	1339	1.3	0.3	0.55	1987	736
2	942	1025	932	1.3	0.3	0.55	1532	513
	1315	1233	1325	1.3	0.3	0.55	2079	729
3Max	659	788	52	1.3	0.3	0.55	1093	29
	1204	1086	1732	1.3	0.3	0.55	1891	953
4Max	-59	387	516	1.3	0.3	0.55	40	284
	1754	1379	1216	1.3	0.3	0.55	2694	669


Tabella 7-22 Riepilogo sollecitazioni flessionali nel plinto di fondazione della Pila 3.

Combinazione	$N_{1+2+3+4}$ $N_{13+14+15+16}$ [kN]	$N_{1+5+9+13}$ $N_{4+8+12+16}$ [kN]	$e_y$ [m]	$e_z$ [m]	$M_{dz}$ [kNm]	$M_{dy}$ [kNm]
1	481	235	0.55	0.55	264	129
	582	823	0.55	0.55	320	453
2	447	209	0.55	0.55	246	115
	608	824	0.55	0.55	334	453
3Min	408	1202	0.55	0.55	225	661
	287	-749	0.55	0.55	158	-412
3Max	381	-1080	0.55	0.55	209	-594
	501	1904	0.55	0.55	276	1047
4Min	582	558	0.55	0.55	320	307
	175	201	0.55	0.55	96	110
4Max	178	-188	0.55	0.55	98	-104
	659	1003	0.55	0.55	363	552

I plinti vengono armati con barre  $\varnothing 20/20$  sia inferiormente che superiormente con copriferro netto alla barra più esterna di 5cm.

Il momento resistente della sezione dei plinti delle pile 1 e 3 è pari a:

$$M_{R,dz} = M_{R,dy} = 4610 \text{ kNm}$$

	<b>Committente:</b> Città Metropolitana di Bologna	<b>Documento:</b> Arcate di Mitigazione Ambientale Relazione di Calcolo
	<b>Lavoro:</b> PROGETTO DEFINITIVO DELLA VARIANTE SP65 ALL'ABITATO DI RASTIGNANO	<b>Codice:</b> ADD0104 <b>Data:</b> Settembre 2018

I momenti resistenti delle sezioni del plinto della pila 2 nelle due direzioni sono pari a:

$$M_{R,dz} = 6220 \text{ kNm}$$

$$M_{R,dy} = 4610 \text{ kNm}$$

Dato che il momento sollecitante  $M_d$  è sempre inferiore al momento resistente  $M_{R,d}$  le verifiche risultano soddisfatte.