



Città Metropolitana di Bologna

Via Zamboni, 13 - 40126 Bologna (BO)

IL RUP:

P.I.E. Stefano Romagnoli

IL DIRETTORE DELL'ESECUZIONE DEL CONTRATTO:

Ing. Jonathan Manzi

INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA

(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA

OPERE D'ARTE MAGGIORI

Ponte sull'Idice

Relazione di calcolo spalle e fondazioni

PROGETTAZIONE:
Mandataria:

SYSTRA S.p.A.

Via della Stazione, 27 38123 Trento (TN), Italy - www.systra.com/italy

Mandanti:



SETECO Ingegneria S.r.l.



ITEC Engineering S.r.l.

SCALA: ---	IL PROGETTISTA:	IL RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:
FORMATO: A4	DATA: Mag 2026	Ing. Erica Calatizzo



REV	DESCRIZIONE	REDATTO	DATA	VERIFICATO	DATA	APPROVATO	DATA
r00	Emissione	M. Pavese/ G. Puglisi	Apr 2026	M. Palomba	Mag 2026	M. Ravelli	Mag 2026

CODICE PROGETTO	LIVELLO PROGETTAZIONE	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.
24V25	PF	R	ST	712	r00

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

INDICE

1.	PREMESSA	6
1.1	DESCRIZIONE DELL'OPERA	6
1.2	VITA NOMINALE E CLASSE D'USO	11
2.	NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	12
2.1	NORMATIVA	12
2.2	LETTERATURA TECNICA	13
2.3	ELABORATI DI RIFERIMENTO	14
2.4	SOFTWARE IMPIEGATI	15
3.	MATERIALI, UNITÀ DI MISURA E RESISTENZE DI PROGETTO	15
3.1	CALCESTRUZZO	15
3.1.1	CLASSE DI ESPOSIZIONE E COPRIFERRI	15
3.1.2	MAGRONE (C12/15)	18
3.1.3	CALCESTRUZZO PER PALI (C30/37)	19
3.1.4	CALCESTRUZZO PER PLATEE ED ELEVAZIONI SPALLE (C32/40)	20
3.2	ACCIAIO	21
3.2.1	ACCIAIO PER CEMENTO ARMATO (B450C)	21
3.3	ANCORAGGIO E SOVRAPPOSIZIONE DELL'ARMATURA LONGITUDINALE	21
4.	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E SISMICO	23
5.	ANALISI DEI CARICHI	24
5.1	SCARICHI AGLI APPOGGI	24
5.2	PESO PROPRIO STRUTTURALE	26
5.3	AZIONI VARIABILI DA TRAFFICO	26
5.4	SISMA	26
5.4.1	AZIONI INERZIALI SISMICHE	27
5.4.2	INCREMENTO DINAMICO SPINTA DEL TERRENO (WOOD)	27
5.5	SPINTA DEL TERRENO	28
6.	COMBINAZIONE DELLE AZIONI	28
6.1	COMBINAZIONI DI STATO LIMITE DI ESERCIZIO	28
6.2	COMBINAZIONI DI STATO LIMITE ULTIMO	29
7.	MODELLAZIONE STRUTTURALE	31
7.1	CODICI DI CALCOLO	31
7.1.1	PROGRAMMA DI CALCOLO	31
7.1.2	AFFIDABILITÀ DEL SOFTWARE	32

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

7.1.3	LICENZA D'USO DEL SOFTWARE	32
7.2	MODELLO DI CALCOLO DELLE SPALLE	33
8.	CRITERI DI VERIFICA DELLE SEZIONI IN CEMENTO ARMATO	39
8.1.1	VERIFICHE DI STATO LIMITE ULTIMO	39
8.1.2	VERIFICHE DI STATO LIMITE DI ESERCIZIO	40
8.1.3	CALCOLO DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE	41
8.1.4	LIMITAZIONE DELLE TENSIONI	42
9.	CRITERI DI DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DI SICUREZZA DELLE FONDAZIONI PROFONDE – PALI DI FONDAZIONE	43
9.1	RIPARTIZIONE DELLE SOLLECITAZIONI IN FONDAZIONE	44
9.2	ANALISI AGLI STATI LIMITE NEI CONFRONTI DEI CARICHI ASSIALI	45
9.2.1	METODOLOGIA DI VERIFICA	47
9.2.2	CAPACITÀ PORTANTE A CARICO VERTICALE (COMPRESSIONE)	47
9.2.2.1	Portata laterale	47
9.2.2.2	Portata di base	49
9.2.3	CAPACITÀ PORTANTE A CARICO VERTICALE (TRAZIONE)	51
9.3	CAPACITÀ PORTANTE DEL GRUPPO DI PALI PER CARICO VERTICALE ECCENTRICO	52
9.3.1	DOMINIO DI RESISTENZA DELLA PALIFICATA	52
9.4	ANALISI AGLI STATI LIMITE NEI CONFRONTI DEI CARICHI TRASVERSALI	56
9.4.1	CAPACITÀ PORTANTE A CARICO ORIZZONTALE DEI PALI DI FONDAZIONE	56
9.4.1.1	Capacità portante a carico orizzontale dei pali di fondazione	57
9.4.1.2	Verifica a carico limite orizzontale - Estensione della Teoria di Broms	59
9.5	ANALISI AGLI STATI LIMITE NEI CONFRONTI DEI CARICHI TRASVERSALI	61
9.5.1	MODULO DI REAZIONE ORIZZONTALE	61
9.5.2	VALUTAZIONE DEL MOMENTO ADIMENSIONALE LUNGO IL FUSTO DEL PALO	63
9.6	CEDIMENTO DEL PALO SINGOLO E DELLA PALIFICATA E CEDIMENTI DIFFERENZIALI TRA LE PILE	63
9.6.1	CEDIMENTO DEL PALO SINGOLO	63
9.6.2	CEDIMENTO DELLA PALIFICATA	64
9.6.3	CEDIMENTI DIFFERENZIALI TRA LE PILE	65
9.7	DIMENSIONAMENTO STRUTTURALE DEL SINGOLO PALO	65
9.8	VALUTAZIONE DEI PARAMETRI DI RESISTENZA DEI TERRENI IN CONDIZIONI DI LIQUEFAZIONE	66
9.8.1	RESISTENZA RESIDUA DEI TERRENI LIQUEFATTI	66
9.8.2	DEFINIZIONE DEI PARAMETRI NEI TERRENI NON LIQUEFATTI	66
9.8.3	APPLICAZIONE AI MODELLI DI INTERAZIONE TERRENO-PALO	67
9.8.4	SINTESI DEI PARAMETRI RESIDUI CARATTERISTICI	67
10.	VERIFICA DELLE SPALLE DEL PONTE	68
10.1	PLATEA	70
10.1.1	SOLLECITAZIONI DI CALCOLO IN COMBINAZIONE SISMICA (SLV)	71
10.1.2	SOLLECITAZIONI DI CALCOLO ULTIME IN COMBINAZIONE STATICA (SLU)	74
10.1.3	SOLLECITAZIONI IN COMBINAZIONE CARATTERISTICA (SLE)	77
10.1.4	SOLLECITAZIONI IN COMBINAZIONE FREQUENTE (SLE)	80
10.1.5	SOLLECITAZIONI IN COMBINAZIONE QUASI PERMANENTE (SLE)	83

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

10.1.6	RISULTATI VERIFICHE SLU E SLE	87
10.2	MURO FRONTALE	89
10.2.1	SOLLECITAZIONI DI CALCOLO IN COMBINAZIONE SISMICA (SLV)	89
10.2.2	SOLLECITAZIONI DI CALCOLO ULTIME IN COMBINAZIONE STATICA (SLU)	91
10.2.3	SOLLECITAZIONI IN COMBINAZIONE CARATTERISTICA (SLE)	94
10.2.4	SOLLECITAZIONI IN COMBINAZIONE FREQUENTE (SLE)	97
10.2.5	SOLLECITAZIONI IN COMBINAZIONE QUASI PERMANENTE (SLE)	99
10.2.6	RISULTATI VERIFICHE SLU E SLE	102
10.3	MURO PARAGHIAIA	104
10.3.1	SOLLECITAZIONI DI CALCOLO IN COMBINAZIONE SISMICA (SLV)	104
10.3.2	SOLLECITAZIONI DI CALCOLO ULTIME IN COMBINAZIONE STATICA (SLU)	106
10.3.3	SOLLECITAZIONI IN COMBINAZIONE CARATTERISTICA (SLE)	109
10.3.4	SOLLECITAZIONI IN COMBINAZIONE FREQUENTE (SLE)	112
10.3.5	SOLLECITAZIONI IN COMBINAZIONE QUASI PERMANENTE (SLE)	114
10.3.6	RISULTATI VERIFICHE SLU E SLE	117
10.4	MURO ANDATORE	120
10.4.1	SOLLECITAZIONI DI CALCOLO IN COMBINAZIONE SISMICA (SLV)	120
10.4.2	SOLLECITAZIONI DI CALCOLO ULTIME IN COMBINAZIONE STATICA (SLU)	122
10.4.3	SOLLECITAZIONI IN COMBINAZIONE CARATTERISTICA (SLE)	125
10.4.4	SOLLECITAZIONI IN COMBINAZIONE FREQUENTE (SLE)	128
10.4.5	SOLLECITAZIONI IN COMBINAZIONE QUASI PERMANENTE (SLE)	131
10.4.6	RISULTATI VERIFICHE SLU E SLE	134
11.	SOLLECITAZIONI IN INTRADOSSO FONDAZIONE	137
12.	DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DELLE OPERE DI FONDAZIONE	139
12.1	SPALLA A (LATO DX)	139
12.1.1	SOLLECITAZIONI PROVENIENTI DALLA SOVRASTRUTTURA	139
12.1.2	RIPARTIZIONE DELLE SOLLECITAZIONI SUI PALI	140
12.1.3	EFFETTO GRUPPO	144
12.1.4	VERIFICA A CAPACITÀ PORTANTE	144
12.1.4.1	Verifica a capacità portante del singolo palo	145
12.1.4.2	Calcolo dei domini di interazione della palificata	148
12.1.5	VERIFICHE A CARICO LIMITE ORIZZONTALE DEI PALI	151
12.1.6	VERIFICHE STRUTTURALI DEI PALI	153
12.1.7	VERIFICA DEI CEDIMENTI	159
12.1.8	VERIFICHE IN CONDIZIONI DI LIQUEFAZIONE	160
12.1.8.1	Calcolo momento adimensionale	160
12.1.8.2	Ripartizione delle sollecitazioni sui pali	162
12.1.8.3	Calcolo della portanza trasversale del singolo palo	163
12.1.8.4	Calcolo dei domini di interazione	165
12.1.8.5	Verifiche strutturali	166
12.2	SPALLA B (LATO SX)	169
12.2.1	SOLLECITAZIONI PROVENIENTI DALLA SOVRASTRUTTURA	169
12.2.2	RIPARTIZIONE DELLE SOLLECITAZIONI SUI PALI	169
12.2.3	EFFETTO GRUPPO	173
12.2.4	VERIFICA A CAPACITÀ PORTANTE	173

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

12.2.4.1	Verifica a capacità portante del singolo palo	174
12.2.4.2	Calcolo dei domini di interazione della palificata	177
12.2.5	VERIFICHE A CARICO LIMITE ORIZZONTALE DEI PALI	180
12.2.6	VERIFICHE STRUTTURALI DEI PALI	182
12.2.7	VERIFICA DEI CEDIMENTI	185
12.2.8	VERIFICHE IN CONDIZIONI DI LIQUEFAZIONE	186
12.2.8.1	Calcolo momento adimensionale	186
12.2.8.2	Ripartizione delle sollecitazioni sui pali	188
12.2.8.3	Calcolo della portanza trasversale del singolo palo	189
12.2.8.4	Calcolo dei domini di interazione	191
12.2.8.5	Verifiche strutturali	191
13.	FONDAZIONI TORRINI PROVVISORI	192
13.1	CRITERI DI DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DI SICUREZZA DELLE FONDAZIONI SUPERFICIALI	192
13.1.1	VERIFICHE PER CARICO LIMITE DELLA FONDAZIONE	193
13.1.2	ANALISI DEI CEDIMENTI	195
13.1.2.1	Determinazione della zona compressibile Hc	195
13.1.2.2	Descrizione dei fenomeni	195
13.1.2.2.1	Valutazione teorica dei vari tipi di cedimento	197
13.1.2.3	Procedura di calcolo	198
13.1.2.4	Scelta dei parametri di calcolo	198
13.2	VERIFICHE STRUTTURALI DELLA PLATEA DI FONDAZIONE	200
13.2.1	MODELLO DI CALCOLO E SOLLECITAZIONI DI PROGETTO	200
13.2.2	VERIFICHE STRUTTURALI	203
13.3	VERIFICHE GEOTECNICHE DELLA PLATEA DI FONDAZIONE	206
13.3.1	CARICO LIMITE	206
13.3.2	CEDIMENTI	208
13.3.2.1	Sezione P2	210
13.3.2.2	Sezione P2 - JG	211

ALLEGATI:

Allegato 1 – “Input table modello di calcolo spalle”

Allegato 2 – “Sollecitazioni elementari negli elementi del modello delle spalle”

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

1. PREMESSA

Il presente documento si inserisce nell'ambito della redazione degli elaborati tecnici del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica (PFTE) dei servizi di supporto alla progettazione e all'esecuzione dei lavori relativo all'intervento di "RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SULLA S.P. 6 AL KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA" - CUP C51B23000440001 (ALLUVIONE MAGGIO 2023 - 2024VIMASNC25).

In particolare, nell'attuale fase progettuale sono stati approfonditi i seguenti aspetti:

- condizioni geotecniche;
- verifica capacità portante ai carichi verticali del singolo palo;
- verifica a carico limite orizzontale del palo singolo;
- valutazione del momento adimensionale lungo il palo e del parametro alfa (rapporto momento taglio in testa palo nell'ipotesi di rotazione impedita);
- dominio di resistenza della palificata;
- calcolo dei cedimenti di fondazione (fondazione profonda e superficiale);
- verifiche per carico limite dell'insieme fondazione-terreno (fondazione superficiale);
- verifiche per scorrimento sul piano di posa (fondazione superficiale);
- verifiche degli elementi strutturali delle spalle (verifiche SLE e SLU).

Tutte le analisi svolte nel seguito sono eseguite in conformità alla normativa italiana vigente sulle opere civili (DM 17/01/2018) e secondo i criteri di calcolo descritti nei capitoli seguenti.

1.1 Descrizione dell'opera

Nella presente relazione si illustrano le soluzioni progettuali relative alle spalle e alle opere di fondazioni profonde del Ponte Motta-Budrio.

Il viadotto si estende dal km 0+314,12 al km 0+522,11, per uno sviluppo complessivo di 208m. L'impalcato è realizzato da un arco in carpenteria metallica e da una soletta in calcestruzzo gettata in opera. Per tutti gli approfondimenti del caso riguardanti le sovrastrutture si rimanda alla specifica relazione di calcolo, mentre qui di seguito si focalizzerà l'attenzione sulle sottostrutture.

Le spalle del ponte sono in calcestruzzo gettato in opera e possiedono entrambe analoga geometria. Il sistema di vincolo dell'impalcato, che prevede l'impiego di 2+2 isolatori a pendolo scorrevole, è infatti tale da ripartire in modo equo sulle due spalle le sollecitazioni derivanti dall'impalcato (con specifico riferimento alle azioni orizzontali statiche e sismiche).

Ciascuna spalla è realizzata da una platea di fondazione spessa 2.5 m con pianta rettangolare di dimensioni 13.80x24.70 m, rispettivamente nelle direzioni longitudinale e trasversale rispetto all'asse dell'impalcato. Dalla zattera spiccano un muro frontale spesso 2.5 m (nella sezione di base) e due muri di risvolto spessi 1.2 m e alti 9.15 m. Nella parte sommitale, lo spessore dei muri di risvolto si riduce a 0.6 m. Lo spessore del muro frontale è costante per i primi 2.9 m dallo spicco della fondazione e poi aumenta fino ad un massimo di 4.35 m in corrispondenza del piano appoggi. Qui, lato impalcato, è presente un aggetto longitudinale lungo 0.55 m realizzato allo scopo di consentire l'alloggiamento dei martinetti di sollevamento del ponte.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Infine, al di sopra del muro frontale è presente un muro paraghiaia spesso 0.6 m e alto 2.65 m.

Le fondazioni delle spalle sono previste su pali in c.a. di grande diametro pari a 1.20m, di lunghezza pari a 54m per Spalla A – Sud (Lato DX) e 46m per Spalla B – Nord (Lato SX).

Di seguito si riportano alcune immagini raffiguranti le viste in pianta e le sezioni longitudinali delle opere appena descritte.

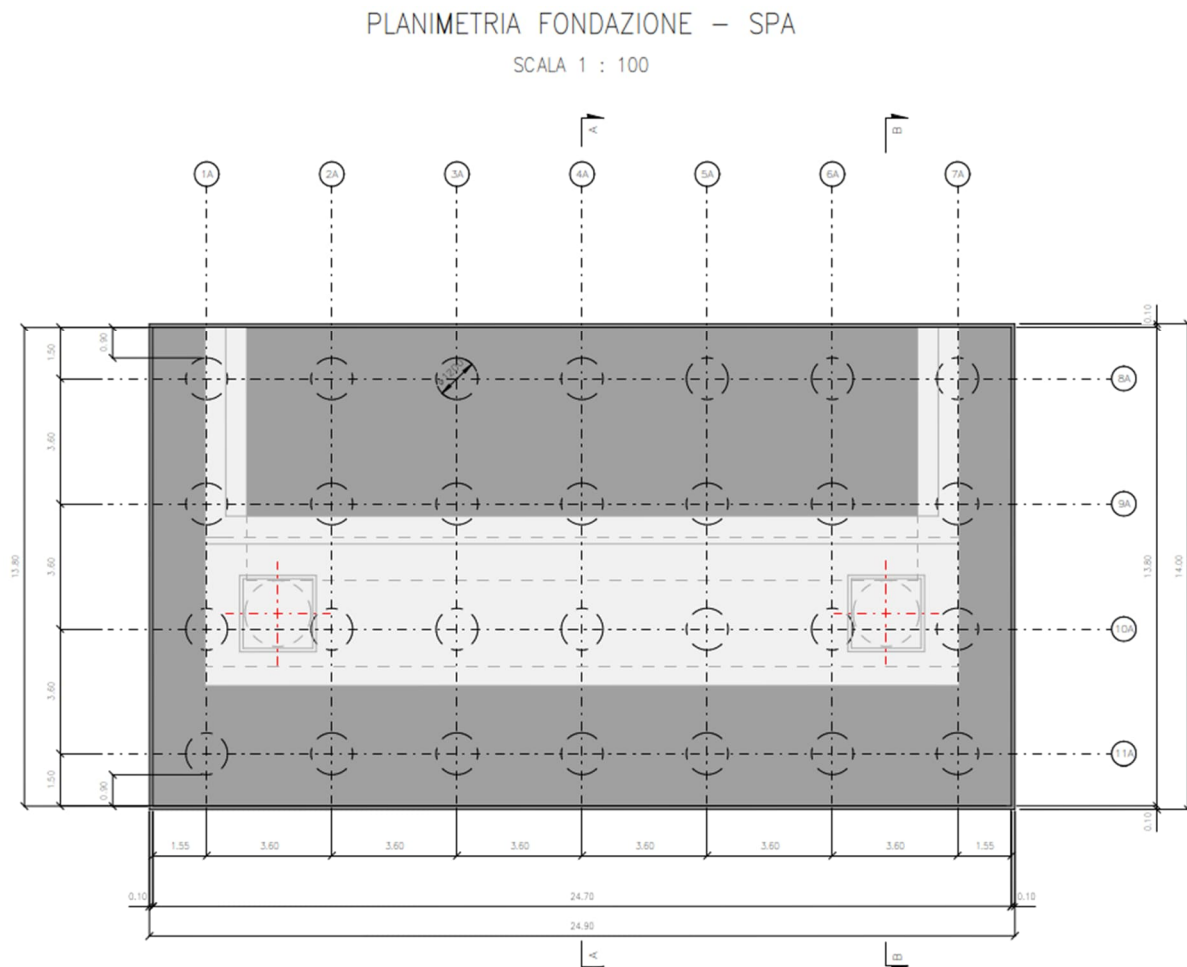


Figura 1: Vista in pianta SPA

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

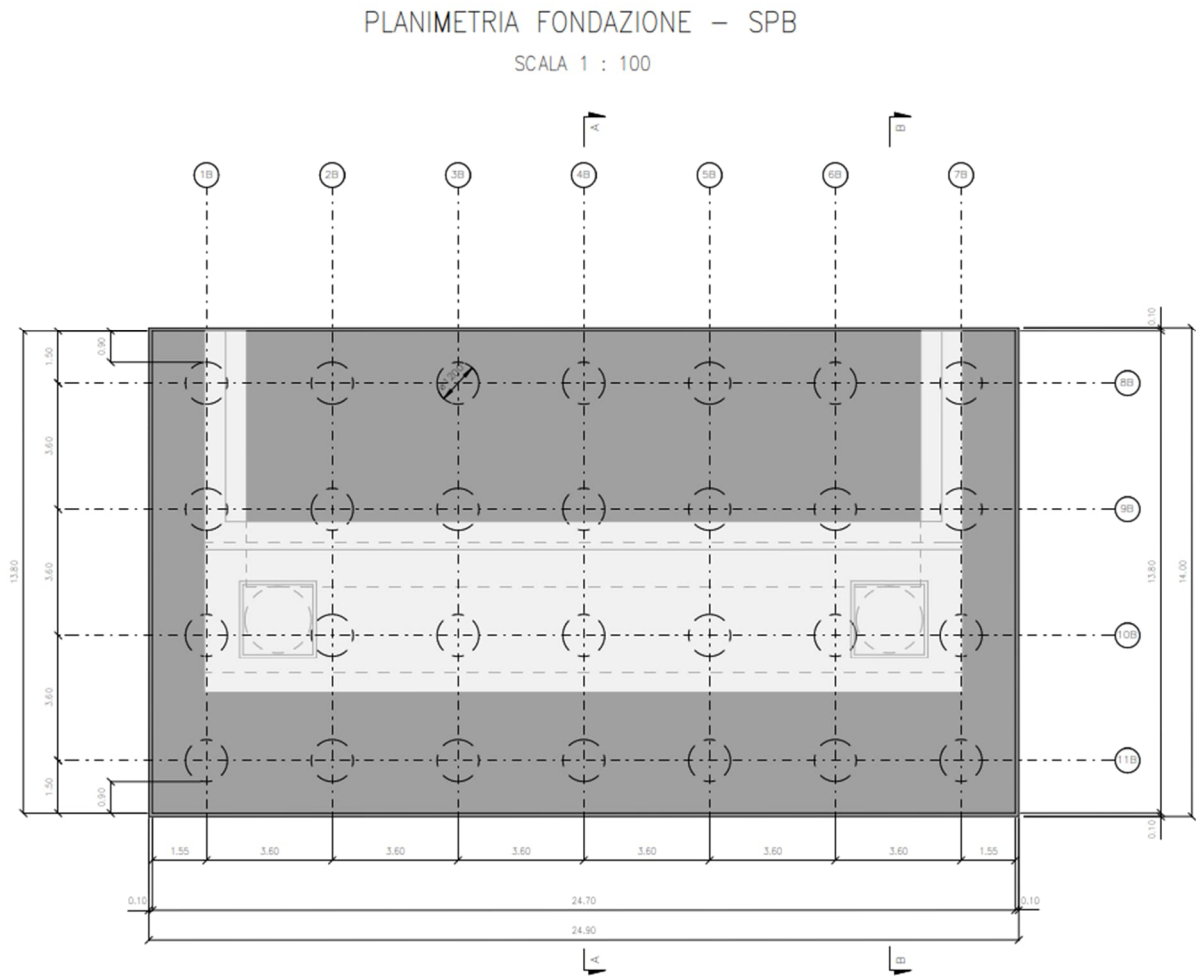


Figura 2: Vista in pianta SPB

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

SEZIONE A – SPALLA SPA

SCALA 1 : 100

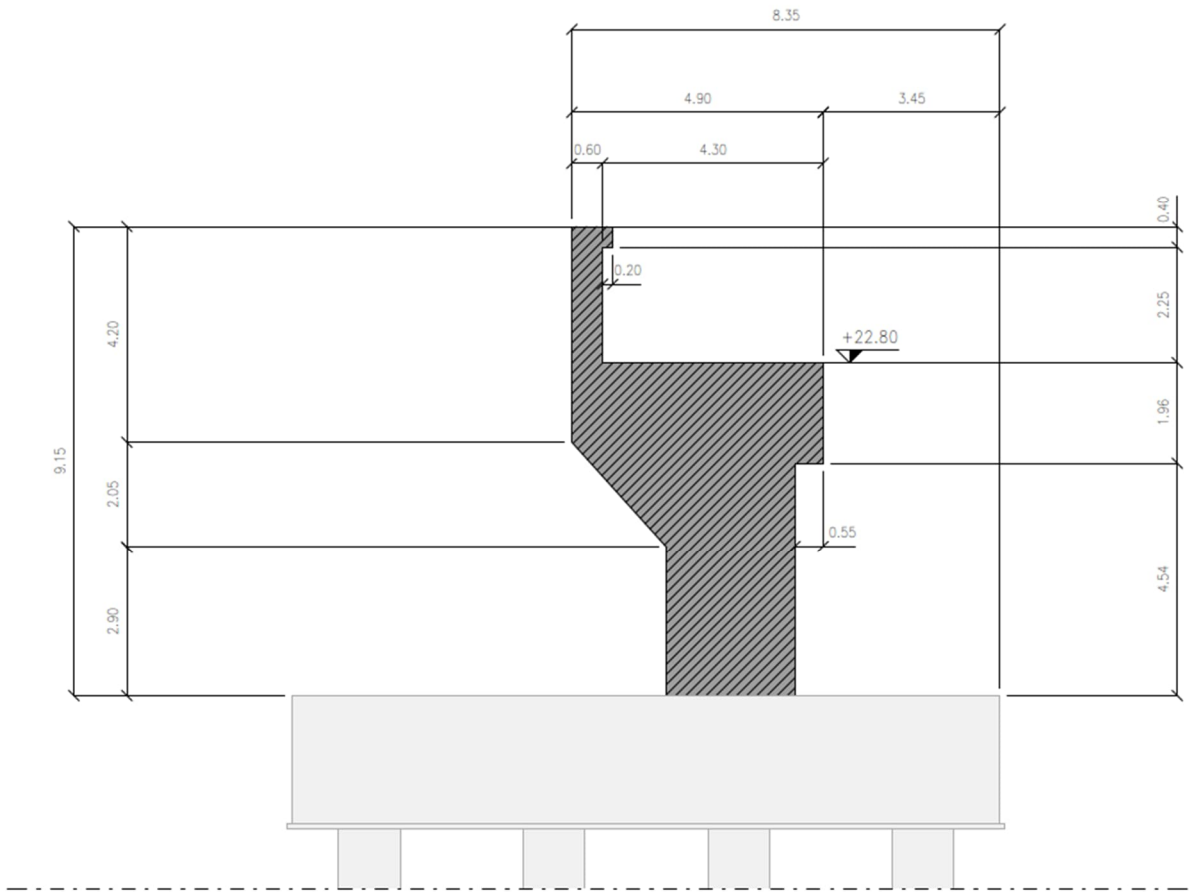


Figura 3: Profilo longitudinale SPA

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

SEZIONE A – SPALLA SPB

SCALA 1 : 100

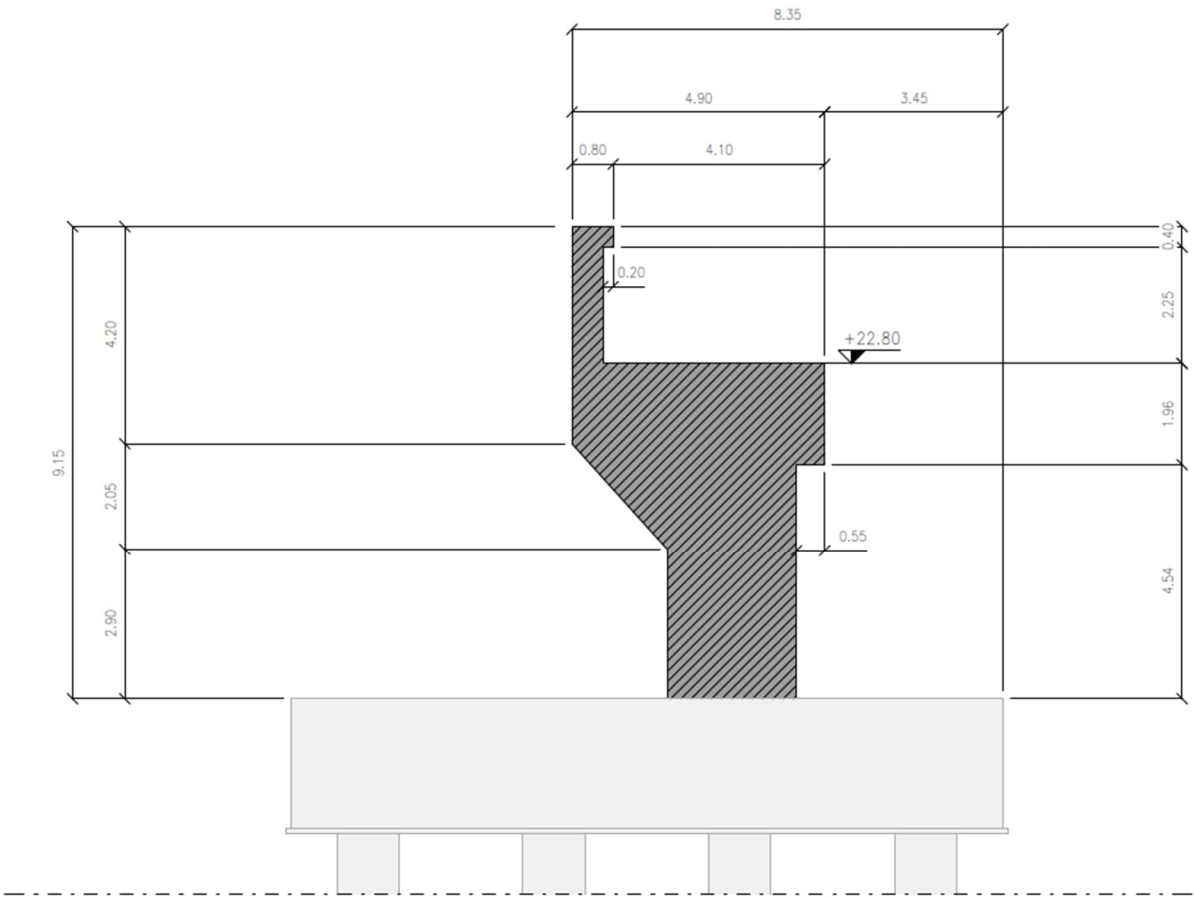


Figura 4: Profilo longitudinale SPB

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

1.2 Vita nominale e classe d'uso

La vita nominale di una struttura VN è definita nel punto 2.4.1 del D.M. di gennaio 2018 come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata.

La vita nominale dei diversi tipi di opere è riportata nella tabella 2.4.I del D.M. 17 gennaio 2018. Nel caso in esame, la costruzione è di tipo 3 ed è caratterizzata quindi dalla vita nominale VN = 100 anni.

Tipi di Costruzione		VN [anni]
1	Opere provvisorie - Opere Provvisionali - Strutture in fase costruttiva.	≤ 10
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale.	≥ 50
3	Grandi opere, ponti, infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica.	≥ 100

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, il punto 2.4.2 del D.M. 17 gennaio 2018 prevede che le costruzioni siano suddivise tra 4 classi d'uso, definite nella seguente tabella.

Classe d'uso	
Classe I	Costruzioni con la presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli
Classe II	Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.
Classe III	Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.
Classe IV	Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

La struttura in esame rientra nella Classe III, alla quale corrisponde coefficiente d'uso C_u pari a 1.5. Il periodo di riferimento V_R risulta pertanto pari a:

$$V_R = 150 \text{ anni}$$

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Normativa

Di seguito si riporta l'elenco generale delle Normative Nazionali ed internazionali vigenti alla data di redazione del presente documento, quale riferimento per la redazione degli elaborati tecnici e/o di calcolo dell'intero progetto nell'ambito della quale si inserisce l'opera oggetto della presente relazione:

- [1] D.M. 17 gennaio 2018 Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”;
- [2] Circolare 21 gennaio 2019 Istruzione per l'applicazione dell'aggiornamento delle “Norma tecniche per le costruzioni”;
- [3] Legge 05/11/1971, n.1086 Norma per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio, normale e precompresso ed a struttura metallica” e relative istruzioni (Circ. LL.PP. 14/02/1974, n. 11951);

Nei casi in cui le enunciate normative italiane si presentino carenti di informazioni in relazione a particolari studi specifici, si fa riferimento a normative europee e al sistema degli eurocodici, in particolare:

- [4] UNI EN 1990:2006: Eurocodice 0 – Criteri generali di progettazione strutturale;
- [5] UNI EN 1991-1-1:2004 Parte 1-1: Eurocodice 1 – Azioni in generale – Pesì per unità di volume, pesi proprio e sovraccarichi per gli edifici;
- [6] UNI EN 1991-1-1:2004 Parte 1-2: Eurocodice 1 – Azioni in generale - Azioni sulle strutture esposte al fuoco;
- [7] UNI EN 1991-1-1:2004 Parte 1-5: Eurocodice 1 – Azioni in generale - Azioni termiche;
- [8] UNI EN 1991-2:2005 Parte 2: Eurocodice 1 – Carichi da traffico sui ponti;
- [9] UNI EN 1992-1-1:2015 Parte 1-1: Eurocodice 2 – Regole generali e regole per gli edifici;
- [10] UNI EN 1992-1-2:2019 Parte 1-2: Eurocodice 2 – Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio;
- [11] UNI-EN-1997-1:2005 Parte 1: Eurocodice 7 – Regole generali – Progettazione geotecnica;
- [12] UNI EN 1993-5: 2007 Parte 5: Eurocodice 3 – Pali e Palancole – Progettazione delle strutture di acciaio.

Per quanto concerne le caratteristiche del materiale calcestruzzo armato, si considerano:

- [13] UNI EN 206:2016 - "Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità”;
- [14] UNI 11104:2004 - “Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206”;

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

[15] UNI EN 10080:2005 - "Acciaio saldabile per cemento armato - Generalità".

Per l'esecuzione delle strutture, si considerano le regole contenute nei seguenti documenti:

[16] UNI EN 13670 - "Esecuzione di strutture di calcestruzzo";

2.2 Letteratura tecnica

[17] AGI, Raccomandazioni sui pali di fondazione, Quaderni dell'Associazione Geotecnica Italiana, 1984.

[18] C. Viggiani, A. Mandolini e G. Russo, Piles and pile foundations, CRC Press, 2014.

[19] R. Di Laora, L. de Sanctis e S. Aversa, «Bearing capacity of pile groups under vertical eccentric load,» Acta Geotechnica, vol. 14, n. 1, 2019;

[20] P. De Simone, «Head embedment in Broms pile lateral capacity theory for cohesionless soils» Computers and Geotechnics, vol. 43, 2012.

[21] B. B. Broms, «Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils» Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, vol. 90, n. 2, 1964.

[22] B. B. Broms, «Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils» Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, vol. 90, n. 3, 1964.

[23] M. Bustamante, B. Doix (1985). Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés. Bull. Liaison Lab. Ponts et Chaussées, Paris, n. 140, nov-déc 1985 – Ref. 3047, 75-92;

[24] C. Viggiani (1999). Fondazioni, Hevelius Edizioni;

[25] Elson W.K., «Design of laterally-loaded piles» CIRIA Report 103 (1984)

[26] AGI – Jet grouting – Raccomandazioni;

[27] J. Bowles, Foundation analysis and design, Fifth Edition, The McGraw-Hill Companies, Inc.;

[28] 46, 811 pp. N.R. Morgenstern & V.E. Price (1965). The analysis of the stability of generalised slip surfaces. Geotechnique, 15, 79-93.

[29] AICAP – Ancoraggi nei terreni e nelle rocce, maggio 1993;

[30] Kramer, S.L. & Wang, Z. (2015). Empirical correlations for residual shear strength of liquefied soils.

[31] Robertson, P.K. (2010). Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test.

[32] Matlock, H.G. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay.

[33] California Department of Transportation (2012). Geotechnical Manual – Liquefaction Module.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>ST</td><td>712</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	ST	712	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	ST	712	r00								

[34] PARATIE PLUS 2023 (versione 25.0.0) – Manuale d'uso.

2.3 Elaborati di riferimento

[35] 24V25_PF_R_GE_102: "Relazione geotecnica di caratterizzazione"

[36] 24V25_PF_R_GE_101: "Relazione geologica"

[37] 24V25_PF_R_GT_101: "Relazione sismica"

[38] 24V25_PF_T_GE_400: "Planimetria ubicazione indagini e profilo geologico"

[39] 24V25_PF_T_PS_301: "Planimetria di progetto"

[40] 24V25_PF_T_ST_714: "Carpenteria spalla SX"

[41] 24V25_PF_T_ST_715: "Carpenteria spalla DX"

[42] 24V25_PF_T_ST_716: "Carpenteria fondazioni spalla SX"

[43] 24V25_PF_T_ST_717: "Carpenteria fondazioni spalla DX"

[44] 24V25_PF_R_GT_720: "Relazione geotecnica dei rilevati"

[45] 24V25_PF_T_GT_721: "Planimetria e sezioni interventi di consolidamento dei rilevati"

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

2.4 Software impiegati

I software utilizzati per la progettazione delle spalle e delle loro fondazioni sono i seguenti:

- Midas Civil 2024
- Paratie Plus 2025 versione 25.1.3 HarpaCeAS
- Fogli di calcolo sviluppati internamente

3. MATERIALI, UNITÀ DI MISURA E RESISTENZE DI PROGETTO

Si riportano di seguito le principali caratteristiche dei diversi materiali impiegati nelle opere in progetto, con l'indicazione dei valori di resistenza e deformabilità adottati nelle verifiche, nel rispetto delle indicazioni del DM 17/01/2018.

Nella tabella che segue si riportano in sintesi le classi dei materiali impiegati per l'analisi strutturale:

Tabella 1: Classi di resistenza dei materiali impiegati per l'analisi strutturale

ELEMENTI	CALCESTRUZZO
Magrone	C12/15
Platee ed elevazioni spalle	C32/40
Pali	C30/37
ELEMENTI	ACCIAIO PER C.A.
Tutti	B450C

3.1 Calcestruzzo

3.1.1 Classe di esposizione e copriferri

Con riferimento alle specifiche di cui alla norma UNI 11104, si definiscono di seguito la classe di esposizione del calcestruzzo delle diverse parti della struttura oggetto dei dimensionamenti di cui al presente documento:

Tabella 2: Classi di esposizione secondo UNI-EN 206-2006

Elemento	Classe cls	Classe esposizione	Ambiente	Diametro massimo aggregati	Max a/c	Min cemento
[-]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[kg/mc]
Pali	C30/37	XC2	Ordinario	25	0.60	300
Platee spalle	C32/40	XC2	Ordinario	32	0.5	340
Elevazioni spalle	C32/40	XC4	Aggressive	32	0.50	340

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Classe esposizione norma UNI 9558	Classe esposizione norma UNI 11104 UNI EN 206-1	Descrizione dell'ambiente	Esempio	Massimo rapporto a/c	Minima Classe di resistenza	Contenuto minimo in aria (%)	Classe esposizione norma UNI 9558	Classe esposizione norma UNI 11104 UNI EN 206-1	Descrizione dell'ambiente	Esempio	Massimo rapporto a/c	Minima Classe di resistenza	Contenuto minimo in aria (%)
1 Assenza di rischio di corrosione o attacco							4 Corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare						
1	X0	Per calcestruzzo privo di armatura o inseriti metallici tutte le esposizioni eccetto dove c'è gelo/disgelo, o attacco chimico. Calcestruzzi con armatura o inseriti metallici in ambiente molto asciutto.	Interno di edifici con umidità relativa molto bassa. Calcestruzzo non armato all'interno di edifici. Calcestruzzo non armato immerso in suolo non aggressivo o in acqua non aggressiva. Calcestruzzo non armato soggetto a cicli di bagnato asciutto ma non soggetto ad abrasione, gelo o attacco chimico.	-	C 12/15		4 a 5 b	XS1	Esposto alla salssedine marina ma non direttamente in contatto con l'acqua di mare.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso con elementi strutturali sulle coste o in prossimità.	0,50	C 32/40	
								XS2	Permanentemente sommerso.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso di strutture marine completamente immerse in acqua.	0,45	C 35/45	
								XS3	Zone esposte agli spruzzi o alle maree.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso con elementi strutturali esposti alla battaglia o alle zone soggette agli spruzzi ed onde del mare.	0,45	C 35/45	
2 Corrosione indotta da carbonatazione							5 Attacco dei cicli di gelo/disgelo con o senza disgelanti *						
Nota: Le condizioni di umidità si riferiscono a quelle presenti nel coperto o nel ricoprimento di inserti metallici, ma in molti casi si può considerare che tali condizioni riflettano quelle dell'ambiente circostante. In questi casi la classificazione dell'ambiente circostante può essere adeguata. Questo può non essere il caso se c'è una barriera tra il calcestruzzo e il suo ambiente.													
2 a	XC1	Asciutto o permanentemente bagnato.	Interno di edifici con umidità relativa bassa. Calcestruzzo armato ordinario o precompresso con le superfici all'interno di strutture con eccezione delle parti esposte a condensa, o immerse in acqua. Parti di strutture di contenimento: liquidi, fondazioni.	0,60	C 25/30		2 b	XF1	Moderata saturazione d'acqua in assenza di agente disgelante.	Superfici verticali di calcestruzzo come facciate e colonne esposte alla pioggia ed al gelo. Superfici non verticali e non soggette alla completa saturazione ma esposte al gelo, alla pioggia o all'acqua.	0,50	C 32/40	
2 a	XC2	Bagnato, raramente asciutto.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso prevalentemente immerso in acqua o terreno non aggressivo.	0,60	C 25/30		3	XF2	Moderata saturazione d'acqua, in presenza di agente disgelante.	Elementi come parti di ponti che in altro modo sarebbero classificati come XF1 ma che sono esposti direttamente o indirettamente agli agenti disgelanti.	0,50	C 25/30	3,0
5 a	XC3	Umidità moderata.	Calcestruzzo in esterni con superfici esterne riparate dalla pioggia, o in interni con umidità da moderata ad alta.	0,55	C 28/35		2 b	XF3	Elevata saturazione d'acqua, in assenza di agente disgelante.	Superfici orizzontali in edifici dove l'acqua può accumularsi e che possono essere soggetti ai fenomeni di gelo, elementi soggetti a frequenti bagnature ed esposti al gelo.	0,50	C 25/30	3,0
4 a 5 b	XC4	Ciclicamente asciutto e bagnato.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in esterni con superfici soggette a alternanze di asciutto ed umido. Calcestruzzi a vista in ambienti urbani. Superfici a contatto con l'acqua non compresi nella classe XC2.	0,50	C 32/40		3	XF4	Elevata saturazione d'acqua, con presenza di agente antigelo oppure acqua di mare.	Superfici orizzontali quali strade o pavimentazioni esposte al gelo, ed ai sali disgelanti, in modo diretto o indiretto, elementi esposti al gelo e soggetti a frequenti bagnature in presenza di agenti disgelanti o di acqua di mare.	0,45	C 28/35	3,0
3 Corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare							6 Attacco chimico**						
5 a	XD1	Umidità moderata.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in superfici o parti di ponti e viadotti esposti a spruzzi d'acqua contenenti cloruri.	0,55	C 28/35		5 a	XA1	Ambiente chimicamente debolmente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1	Contenitori di fanghi e vasche di decantazione. Contenitori e vasche per acque reflue.	0,55	C 28/35	
4 a 5 b	XD2	Bagnato, raramente asciutto.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in elementi strutturali totalmente immersi in acqua anche industriale contenente cloruri (Piscine).	0,50	C 32/40		4 a 5 b	XA2	Ambiente chimicamente moderatamente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1	Elementi strutturali o pareti a contatto di terreni aggressivi.	0,50	C 32/40	
5 c	XD3	Ciclicamente bagnato e asciutto.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso, di elementi strutturali direttamente soggetti agli agenti disgelanti o agli spruzzi contenenti agenti disgelanti. Calcestruzzo armato ordinario o precompresso, elementi con una superficie immersa in acqua contenente cloruri e l'altra esposta all'aria. Parti di ponti, pavimentazioni e parcheggi per auto.	0,45	C 35/45		5 c	XA3	Ambiente chimicamente fortemente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1	Elementi strutturali o pareti a contatto di acque industriali fortemente aggressive. Contenitori di foraggi, mangimi e liquame provenienti dall'allevamento animale. Tori di raffreddamento di fumi di gas di scarico industriali.	0,45	C 35/45	
							*) Il grado di saturazione della seconda colonna riflette la relativa frequenza con cui si verifica il gelo in condizioni di saturazione: - moderato: occasionalmente gelato in condizione di saturazione; - elevato: alta frequenza di gelo in condizioni di saturazione. **) Da parte di acque del terreno e acque fluenti.						

Figura 5: Classi di esposizione secondo UNI-EN 206-2016

La scelta delle classi di resistenza dei conglomerati riportate in precedenza viene di seguito verificata impiegando il Prospetto 4 della UNI-EN 11104 il quale prescrive, in funzione delle Classi di Esposizione, la resistenza minima delle miscele da adottare:

UNI 11104:2004

prospetto 4 Valori limiti per la composizione e le proprietà del calcestruzzo

	Classi di esposizione																	
	Nessun rischio di corrosione dell'armatura	Corrosione delle armature indotta dalla carbonatazione				Corrosione delle armature indotta da cloruri						Attacco da cicli di gelo/disgelo				Ambiente aggressivo per attacco chimico		
						Acqua di mare			Cloruri provenienti da altre fonti									
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	
Massimo rapporto <i>a/c</i>	-	0,60	0,55	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45		
Minima classe di resistenza ¹⁾	C12/15	C25/30	C28/35	C32/40	C32/40	C35/45	C28/35	C32/40	C35/45	32/40	25/30	28/35	28,35	32/40	35/45			
Minimo contenuto in cemento (kg/m ³)	-	300	320	340	340	360	320	340	360	320	340	360	320	340	360			
Contenuto minimo in aria (%)													3,0 ¹⁾					
Altri requisiti												Aggregati conformi alla UNI EN 12620 di adeguata resistenza al gelo/disgelo				È richiesto l'impiego di cementi resistenti ai solfati ²⁾		

*) Nel prospetto 7 della UNI EN 206-1 viene riportata la classe C8/10 che corrisponde a specifici calcestruzzi destinati a sottofondazioni e ricoprimenti. Per tale classe dovrebbero essere definite le prescrizioni di durabilità nei riguardi di acque o terreni aggressivi.

a) Quando il calcestruzzo non contiene aria aggiunta, le sue prestazioni devono essere verificate rispetto ad un calcestruzzo aerato per il quale è provata la resistenza al gelo/disgelo, da determinarsi secondo UNI 7087, per la relativa classe di esposizione.

b) Qualora la presenza di solfati comporti le classi di esposizione XA2 e XA3 è essenziale utilizzare un cemento resistente ai solfati secondo UNI 9156.

Figura 6: Classi di resistenza minima del calcestruzzo secondo UNI – 11104

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

ANALISI DI DURABILITA' E CALCOLO DEL COPRIFERRO

Normativa adottata: NTC18 § 4.1.6.1.3. e § C4.1.6.1.3

Requisiti di durabilità:

Vita utile di progetto:	≥ 100 anni
Classe di resistenza del calcestruzzo:	C30/37
Elemento simile ad una soletta:	NO
Controllo di qualità della produzione del cls:	NO
Controllo delle tolleranze di posa in cantiere:	NO
Tipologia di acciaio:	ORDINARIO
Diametro max della barra da carpenteria: [mm]	32
Disposizione delle barre	1
Classe di esposizione	XC2

XC2: Corrosione indotta da carbonatazione

Massimo rapporto acqua/cemento (UNI EN 206)	0.6	[-]
Classe di calcestruzzo minima: (UNI EN 206)	C25/30	
Minimo contenuto in cemento (UNI EN 206)	300	[kg/m ³]

Calcolo del copriferro minimo:

Copriferro minimo Tabella (C 4.1.IV)	c_{min}	25	[mm]
Incremento dovuto alla vita nominale (>100 anni):	$\Delta c_{vita\ nominale}$	10	[mm]
Incremento dovuto alla classe del cls ($C < C_{min}$):	Δc_{classe}	0	[mm]
Incremento dovuto al controllo di qualità:	$\Delta c_{controllo}$	0	[mm]
Copriferro minimo (Σ)	c_{min}	35	[mm]

Calcolo del copriferro nominale:

Copriferro minimo	c_{min}	35	[mm]
Tolleranza di posa:	Δc_{dev}	10	[mm]
Copriferro nominale § 4.4.1.1:	c_{nom}	45	[mm]

Tabella riepilogativa:

Classe di esposizione:	XC2
Condizioni ambientali (Tab.4.1 III NTC 18):	Ordinarie
Classe strutturale:	S6
Copriferro nominale § 4.4.1.1:	c_{nom} 45 [mm]

Figura 7: Copriferro nominale – Pali

Il copriferro netto utilizzato per i pali, a favore di sicurezza, è pari a 60 mm.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

ANALISI DI DURABILITA' E CALCOLO DEL COPRIFERRO

Normativa adottata: NTC18 § 4.1.6.1.3. e § C4.1.6.1.3

Requisiti di durabilità:

Vita utile di progetto:	≥ 100 anni
Classe di resistenza del calcestruzzo:	C32/40
Elemento simile ad una soletta:	NO
Controllo di qualità della produzione del cls:	NO
Controllo delle tolleranze di posa in cantiere:	NO
Tipologia di acciaio:	ORDINARIO
Diametro max della barra da carpenteria: [mm]	32
Disposizione delle barre	1
Classe di esposizione	XC4
XC4: Corrosione indotta da carbonatazione	
Massimo rapporto acqua/cemento (UNI EN 206)	0.5 [-]
Classe di calcestruzzo minima: (UNI EN 206)	C32/40
Minimo contenuto in cemento (UNI EN 206)	340 [kg/m ³]

Calcolo del copriferro minimo:

Copriferro minimo Tabella (C 4.1.IV)	c_{min}	35 [mm]
Incremento dovuto alla vita nominale (>100 anni):	$\Delta c_{vita\ nominale}$	10 [mm]
Incremento dovuto alla classe del cls ($C < C_{min}$):	Δc_{classe}	0 [mm]
Incremento dovuto al controllo di qualità:	$\Delta c_{controllo}$	0 [mm]
Copriferro minimo (Σ)	c_{min}	45 [mm]

Calcolo del copriferro nominale:

Copriferro minimo	c_{min}	45 [mm]
Tolleranza di posa:	Δc_{dev}	10 [mm]
Copriferro nominale § 4.4.1.1:	c_{nom}	55 [mm]

Tabella riepilogativa:

Classe di esposizione:	XC4
Condizioni ambientali (Tab.4.1 III NTC 18):	Aggressive
Classe strutturale:	S6
Copriferro nominale § 4.4.1.1:	c_{nom} 55 [mm]

Figura 8: Copriferro nominale – Platee ed elevazioni spalle

Tabella 3: Copriferri adottati nel calcolo

ELEMENTO	Copriferro
	[mm]
Pali	60
Platee ed elevazioni spalle	55

3.1.2 Magrone (C12/15)

Tabella 4: Specifiche tecniche materiali - Magrone

Magrone	
Classe di resistenza	C12/15
Valore caratteristico resistenza cubica a 28 giorni	$R_{ck} = 15$ MPa
Valore caratteristico resistenza cilindrica a 28 giorni	$f_{ck} = 12$ MPa
Resistenza a compressione cilindrica media	$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 20$ MPa

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

3.1.3 Calcestruzzo per Pali (C30/37)

Tabella 5: Specifiche tecniche materiali - Pali

CALCESTRUZZO (C30/37)			
Normativa adottata:		<u>NTC18</u>	<u>[-]</u>
Classe del calcestruzzo:		<u>C30/37</u>	<u>[-]</u>
Coeff. riduttivo per le resistenze di lunga durata:	α_{cc}	<u>0.85</u>	<u>[-]</u>
Coefficiente di sicurezza del materiale:	γ_c	<u>1.5</u>	<u>[-]</u>
Resistenze:			
Resistenza cubica caratteristica:	R_{ck}	37.0	[MPa]
Resistenza cilindrica caratteristica:	f_{ck}	30.7	[MPa]
Resistenza cilindrica media a compressione:	f_{cm}	38.7	[MPa]
Resistenza a compressione di progetto:	f_{cd}	17.40	[MPa]
Resistenza media a trazione semplice:	f_{ctm}	2.94	[MPa]
Resistenza caratteristica a trazione semplice:	$f_{ctk,0.05}$	2.06	[MPa]
Resistenza caratteristica a trazione semplice:	$f_{ctk,0.95}$	3.82	[MPa]
Resistenza media a trazione per flessione:	f_{ctm}	3.53	[MPa]
Deformazioni:			
Deformazione a limite elastico - Modello (a):	ε_{c2}	0.200%	<u>[-]</u>
Deformazione a limite elastico - Modello (b):	ε_{c3}	0.175%	<u>[-]</u>
Deformazione a limite elastico - Modello (c):	ε_{c4}	0.070%	<u>[-]</u>
Deformazione ultima:	ε_{cu}	0.350%	<u>[-]</u>
Parametri elastici:			
Modulo elastico:	E_{cm}	33019	[MPa]
Modulo di Poisson	ν	<u>0.2</u>	<u>[-]</u>
Tensioni limite:			
<u>NTC18</u>			
Combinazione quasi permanente: (0,45 fck)	$\sigma_{c,q.p.}$	13.82	[MPa]
Combinazione caratteristica rara: (0,6 fck)	$\sigma_{c,carat}$	18.43	[MPa]
Verifica fessurazione:			
Stato limite di formazione delle fessure ($f_{ctm}/1.2$)	σ_t	2.45	[MPa]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

3.1.4 Calcestruzzo per Platee ed Elevazioni Spalle (C32/40)

Tabella 6: Specifiche tecniche materiali – Platee ed elevazioni Spalle

CALCESTRUZZO (C32/40)			
Normativa adottata:		<u>NTC18</u>	<u>[-]</u>
Classe del calcestruzzo:		<u>C32/40</u>	<u>[-]</u>
Coeff. riduttivo per le resistenze di lunga durata:	α_{cc}	<u>0.85</u>	<u>[-]</u>
Coefficiente di sicurezza del materiale:	γ_c	<u>1.5</u>	<u>[-]</u>
Resistenze:			
Resistenza cubica caratteristica:	R_{ck}	40.0	[MPa]
Resistenza cilindrica caratteristica:	f_{ck}	33.2	[MPa]
Resistenza cilindrica media a compressione:	f_{cm}	41.2	[MPa]
Resistenza a compressione di progetto:	f_{cd}	18.81	[MPa]
Resistenza media a trazione semplice:	f_{ctm}	3.10	[MPa]
Resistenza caratteristica a trazione semplice:	$f_{ctk,0.05}$	2.17	[MPa]
Resistenza caratteristica a trazione semplice:	$f_{ctk,0.95}$	4.03	[MPa]
Resistenza media a trazione per flessione:	f_{ctm}	3.72	[MPa]
Deformazioni:			
Deformazione a limite elastico - Modello (a):	ε_{c2}	0.200%	<u>[-]</u>
Deformazione a limite elastico - Modello (b):	ε_{c3}	0.175%	<u>[-]</u>
Deformazione a limite elastico - Modello (c):	ε_{c4}	0.070%	<u>[-]</u>
Deformazione ultima:	ε_{cu}	0.350%	<u>[-]</u>
Parametri elastici:			
Modulo elastico:	E_{cm}	33643	[MPa]
Modulo di Poisson	ν	<u>0.2</u>	<u>[-]</u>
Tensioni limite:			
		<u>NTC18</u>	
Combinazione quasi permanente:	(0,45 fck)	$\sigma_{c,q.p.}$	14.94 [MPa]
Combinazione caratteristica rara:	(0,6 fck)	$\sigma_{c,carat}$	19.92 [MPa]
Verifica fessurazione:			
Stato limite di formazione delle fessure ($f_{ctm}/1.2$)	σ_t	2.58	[MPa]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

3.2 Acciaio

3.2.1 Acciaio per cemento armato (B450C)

Tabella 7: Specifiche tecniche materiali – Acciaio per c.a.

ACCIAIO PER ARMATURE (B450C)			
Normativa adottata:		<u>NTC18</u>	[-]
Acciaio d'armatura		<u>B450C</u>	[-]
Coefficiente di sicurezza del materiale - SLU:	$\gamma_{s,SLU}$	<u>1.15</u>	[-]
Coefficiente di sicurezza del materiale - SLE:	$\gamma_{s,SLE}$	<u>1.25</u>	[-]
Resistenze:			
Tensione caratteristica di snervamento:	f_{yk}	450.0	[MPa]
Tensione caratteristica di rottura:	f_{tk}	540.0	[MPa]
Fattore di sovraresistenza	k	1.2	[-]
Resistenza di progetto a trazione dell'acciaio:	f_{yd}	391.3	[MPa]
Deformazioni:			
Allungamento a rottura caratteristico:	$(A_{gt})_k$	<u>7.5</u>	[%]
Deformazione a limite elastico:	ϵ_{yd}	0.0019	[-]
Deformazione ultima di progetto:	ϵ_{ud}	<u>0.01</u>	[-]
Parametri elastici:			
Modulo elastico:	E_s	210000	[MPa]
Modulo di Poisson	ν	0.2	[-]
Tensione limite:		<u>NTC18</u>	
Combinazione caratteristica rara: (0.8 f_{yk})	σ_s	360.0	[MPa]

3.3 Ancoraggio e sovrapposizione dell'armatura longitudinale

La lunghezza di ancoraggio delle armature è definita secondo le prescrizioni riportate al paragrafo 8.4 della norma UNI EN 1992-1-1:2005. La lunghezza di ancoraggio di progetto l_{bd} risulta:

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{b,min}$$

essendo α_1 , α_2 , α_3 , α_4 e α_5 i coefficienti dati nel prospetto 8.2 del paragrafo 8.4.4.

α_1 tiene conto dell'effetto della forma delle barre posto che il copriferro sia adeguato;

α_2 tiene conto dell'effetto del ricoprimento minimo di calcestruzzo;

α_3 tiene conto dell'effetto del confinamento dovuto ad armatura trasversale;

α_4 tiene conto di una o più barre trasversali saldate ($\phi_t > 0,6f$) lungo la lunghezza di ancoraggio di progetto l_{bd} ;

α_5 tiene conto dell'effetto della pressione trasversale al piano di spacco lungo la lunghezza di ancoraggio di progetto.

Il prodotto ($\alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5$) $> 0,7$

$l_{b,rqd}$ la lunghezza di ancoraggio necessaria di base è ottenuta con l'espressione:

$$l_{b,rqd} = (\phi / 4) \cdot (\sigma_{sd} / f_{bd})$$

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

essendo:

σ_{sd} la tensione di progetto in corrispondenza del punto da cui si misura l'ancoraggio;

f_{bd} il valore di progetto della tensione di aderenza ultima pari a

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}$$

avendo indicato con:

f_{ctd} il valore di progetto della resistenza a trazione del calcestruzzo secondo il punto 3.1.6 (2)

η_1 coefficiente legato alla qualità della condizione di aderenza e alla posizione della barra durante il getto:

$\eta_1 = 1,0$ in condizione di "buona" aderenza;

$\eta_2 = 0,7$ in tutti gli altri casi e per barre in elementi strutturali con casseforme scorrevoli, a meno che non si possa dimostrare che esistano "buone" condizioni di aderenza;

η_2 è riferito al diametro della barra:

$\eta_2 = 1,0$ per $\phi \leq 32\text{mm}$;

$\eta_2 = (132 - \phi) / 100$ per $\phi > 32\text{mm}$.

$l_{b,min}$ è la lunghezza di ancoraggio minima se non sussistono altre limitazioni:

per ancoraggi in trazione: $l_{b,min} > \max(0,3 l_{b,rqd}; 10\phi; 100\text{mm})$;

per ancoraggi in compressione $l_{b,min} > \max(0,6 l_{b,rqd}; 10\phi; 100\text{mm})$.

La lunghezza di sovrapposizione delle armature è definita secondo le prescrizioni riportate al paragrafo 8.7.3 della norma UNI EN 1992-1-1:2005. La lunghezza di sovrapposizione è pari a:

$$l_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{b,min}$$

dove:

$l_{b,rqd}$ è calcolato con l'espressione precedente;

$l_{0,min} > \max(0,3 \cdot \alpha_3 \cdot l_{b,rqd}; 15\phi; 200\text{mm})$.

I valori di α_1 , α_2 , α_3 , α_4 e α_5 possono essere ricavati dal prospetto 8.2 del paragrafo 8.4.4; tuttavia, per il calcolo di a_3 , si raccomanda che $\Sigma A_{st,min}$ sia assunta pari a $1,0 A_s (\sigma_{sd} / f_{yd})$, con:

A_s = area della singola barra sovrapposta;

$\alpha_6 = (\rho_1 / 25)^{0,5}$ ma non maggiore di 1,5, né minore di 1,0, essendo ρ_1 la percentuale di armatura sovrapposta entro la lunghezza $0,65 l_0$ valutata a partire dal centro della lunghezza di sovrapposizione considerata. I valori di α_6 sono dati nel prospetto 8.3 del paragrafo 8.7.3.

A favore di sicurezza e coerentemente a quanto indicato in §4.1.2.3.10 e §4.1.6.1.4, si assume una lunghezza di ancoraggio e di sovrapposizione pari almeno a 50 diametri.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E SISMICO

Per l'inquadramento geologico e sismico di dettaglio si rimanda alla relazione geologica [36], la relazione geotecnica di caratterizzazione [35] e la relazione sismica [37].

Di seguito si riporta una sintesi della stratigrafia e dei parametri geotecnici adottati nel dimensionamento delle opere oggetto di questa relazione.

Le unità geotecniche individuate sono le seguenti:

- Unità rilevato esistente, costituita dal materiale utilizzato per la costruzione del rilevato relativo al vecchio ponte;
- Unità incoerenti: sabbia limosa (SL) e sabbia e ghiaia (SG);
- Unità coesive: limo sabbioso (L) e argilla limosa/limo argilloso (AL)

La stratigrafia è presentata nell'elaborato "Planimetria ubicazione indagini e profilo geologico e geotecnico" [38].

I parametri geotecnici riferiti alla sponda destra sono riassunti nella Tabella 8.

Tabella 8: Parametri geotecnici sponda destra

Sponda destra								
Unità	z (m)	γ (kN/m ³)	c_u (kPa)	c' (kPa)	ϕ (°)	E_0 (MPa)	E' (MPa)	k (m/s)
R	-	17 – 19	-	0 – 5	28 – 32	80 – 200	8 – 20	$10^{-7} - 10^{-5}$
SL	<20	18 – 20	-	0 – 5	30 – 34	200 – 300	20 – 30	$10^{-7} - 10^{-5}$
SG	-			0	32 – 36			
LSA	<20	18 – 20	70 – 170	10 – 20	22 – 26	200 – 300	20 – 30	$10^{-9} - 10^{-7}$
	z > 20					300 – 400	30 – 40	

La quota della falda risulta essere pari a +8,6 m s.l.m.

I parametri geotecnici riferiti alla sponda sinistra sono riassunti nella Tabella 9.

Tabella 9: Parametri geotecnici sponda sinistra

Sponda sinistra								
Unità	z (m)	γ (kN/m ³)	c_u (kPa)	c' (kPa)	ϕ (°)	E_0 (MPa)	E' (MPa)	k (m/s)
R	-	17 – 19	-	0 – 5	28 – 32	180 – 300	18 – 30	$10^{-7} - 10^{-5}$
SL	z < 20	18 – 20	-	0 – 5	30 – 34	200 – 400	20 – 40	$10^{-7} - 10^{-5}$
	z > 28					350 – 600	35 – 60	
LSA	z < 20	18 – 20	50 – 130	10 – 20	22 – 26	200 – 300	20 – 30	$10^{-9} - 10^{-7}$
	z > 20					300 – 400	30 – 40	

La quota della falda risulta essere pari a +8,2 m s.l.m.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

5. ANALISI DEI CARICHI

Le analisi strutturali sono state eseguite considerando le seguenti condizioni di carico elementari:

- Peso proprio strutturale;
- Carichi permanenti non strutturali;
- Azioni variabili da traffico;
- Frenatura/accelerazione;
- Azione variabile del vento;
- Azione variabile della temperatura;
- Attriti vincolari;
- Ritiro e viscosità del calcestruzzo;
- Azione sismica;
- Spinte delle terre (statica e sismica).

Per la descrizione dettagliata delle azioni trasmesse dall'impalcato si rimanda alla relazione di calcolo delle sovrastrutture, mentre qui di seguito si procederà alla descrizione dei carichi gravanti sulle elevazioni delle spalle quali le spinte del terreno (statiche e sismiche) e le inerzie strutturali (sismiche).

5.1 Scarichi agli appoggi

Il modello di calcolo delle spalle è stato caricato con le azioni trasmesse dall'impalcato a livello degli appoggi. Tali azioni, definite con il modello con cui è stato analizzato l'impalcato, sono riassunte nei seguenti prospetti.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Tabella 10: Carichi trasmessi dall'impalcato (1/2)

Spalla A	Trave 1			Trave 2		
	Appoggio Friction Pendulum			Appoggio Friction pendulum		
	Vert. [kN]	Trasv. [kN]	Long. [kN]	Vert. [kN]	Trasv. [kN]	Long. [kN]
Carichi permanenti						
Fase 1 - Carichi permanenti strutturali	15830	-20	270	15830	20	270
Fase 2 - Carichi permanenti portati	5110	-10	190	5110	10	190
Ritiro	0	0	-90	0	0	-90
Massimi carichi permanenti	20940	-20	450	20940	20	450
Minimi carichi permanenti	20940	-20	360	20940	20	360
Cedimenti vincolari (+/-)	0	0	0	0	0	0
Effetti ambientali						
Vert. [kN]	Trasv. [kN]	Long. [kN]	Vert. [kN]	Trasv. [kN]	Long. [kN]	
Variazione termica lineare						
Termica lineare (cond. 1)	0	10	0	0	20	0
Termica lineare (cond. 2)	0	-20	0	0	-10	0
Variazione termica uniforme						
Termica uniforme (cond. 1)	0	60	1230	0	70	1230
Termica uniforme (cond. 2)	0	-70	-1080	0	-60	-1080
Vento verticale (*)						
Massimo carico verticale trave 1	2870	0	0	440	0	0
Minimo carico verticale trave 1	-2870	0	0	-440	0	0
Massimo carico verticale trave 2	440	0	0	2870	0	0
Minimo carico verticale trave 2	-440	0	0	-2870	0	0
Vento Orizzontale (*) (**) 						
Vento +	-	140	10	-	140	10
Vento -	-	-140	-10	-	-140	-10
Fase 3 - Sovraccarichi accidentali da traffico	Vert. [kN]	Trasv. [kN]	Long. [kN]	Vert. [kN]	Trasv. [kN]	Long. [kN]
Sc. carico 1 (*) (***) - Max carico trave - Tandem						
Massimo carico verticale trave 1	760	10	20	510	10	20
Minimo carico verticale trave 1	-10	-10	0	10	-10	0
Massimo carico verticale trave 2	510	10	20	760	10	20
Minimo carico verticale trave 2	10	-10	0	-10	-10	0
Sc. carico 1 (*) (***) - Max carico trave - Distribuiti						
Massimo carico verticale trave 1	3540	10	120	2620	10	110
Minimo carico verticale trave 1	-10	-10	0	10	-10	0
Massimo carico verticale trave 2	2620	10	110	3540	10	120
Minimo carico verticale trave 2	10	-10	0	-10	-10	0
Sc. carico 1 (*) (***) - Max carico centrato - Tandem						
Massimo carico verticale trave 1	720	10	20	540	10	20
Minimo carico verticale trave 1	-10	-10	0	-10	-10	0
Massimo carico verticale trave 2	670	10	20	600	10	20
Minimo carico verticale trave 2	-10	-10	0	-10	-10	0
Sc. carico 1 (*) (***) - Max carico centrato - Distribuiti						
Massimo carico verticale trave 1	3260	10	120	2890	10	120
Minimo carico verticale trave 1	-10	-10	0	-10	-10	0
Massimo carico verticale trave 2	3080	10	120	3080	10	120
Minimo carico verticale trave 2	-10	-10	0	-10	-10	0
Sc. carico 1 (*) (***) - Max squilibrio di carico - Tandem						
Massimo carico verticale trave 1	680	10	20	370	10	20
Minimo carico verticale trave 1	-10	-10	0	10	-10	0
Massimo carico verticale trave 2	370	10	20	680	10	20
Minimo carico verticale trave 2	10	-10	0	-10	-10	0
Sc. carico 1 (*) (***) - Max squilibrio di carico - Distribuiti						
Massimo carico verticale trave 1	3070	10	100	1300	10	70
Minimo carico verticale trave 1	-10	-10	0	10	-10	0
Massimo carico verticale trave 2	1300	10	70	3070	10	100
Minimo carico verticale trave 2	10	-10	0	-10	-10	0
Sc. carico 5 (*) (***) - Folla compatta						
Massimo carico verticale trave 1	4000	10	150	4000	10	150
Minimo carico verticale trave 1	990	-10	60	990	-10	60
Massimo carico verticale trave 2	4000	10	150	4000	10	150
Minimo carico verticale trave 2	990	-10	60	990	-10	60

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Tabella 11: Carichi trasmessi dall'impalcato (2/2)

Spalla A	Trave 1			Trave 2		
	Appoggio Friction Pendulum			Appoggio Friction pendulum		
Frenatura						
Frenatura (+/-)	10	0	240	10	0	240
Forza centrifuga						
Forza centrifuga (+/-)	0	0	0	0	0	0
Forze di attrito (***) (***)	Vert. [kN]	Trasv. [kN]	Long. [kN]	Vert. [kN]	Trasv. [kN]	Long. [kN]
SLU (+/-)	0	1982	1982	0	1982	1982
SLE rara (+/-)	0	1428	1428	0	1428	1428
SLE quasi permanente (+/-)	0	1096	1096	0	1096	1096
Sisma SLV	Vert. [kN]	Trasv. [kN]	Long. [kN]	Vert. [kN]	Trasv. [kN]	Long. [kN]
Sisma - Componente elementare direzione X (+/-)	200	0	3900	200	0	3900
Sisma - Componente elementare direzione Y (+/-)	2100	3180	300	-2100	3180	300
Sisma - Componente elementare direzione Z (+/-)	1310	0	70	1310	0	70
Sisma - Involuppo delle componenti (+/-)	2540	3180	4010	2540	3180	4010
Sisma SLC	Vert. [kN]	Trasv. [kN]	Long. [kN]	Vert. [kN]	Trasv. [kN]	Long. [kN]
Sisma - Componente elementare direzione X (+/-)	210	0	4170	210	0	4170
Sisma - Componente elementare direzione Y (+/-)	2250	3410	330	2250	3410	330
Sisma - Componente elementare direzione Z (+/-)	1500	0	80	1500	0	80
Sisma - Involuppo delle componenti (+/-)	2760	3410	4290	2760	3410	4290
(*) Le condizioni sono tra loro mutuamente esclusive. (**) Le condizioni di vento orizzontale possono essere concomitanti con ciascuna cond. di vento verticale. (***) Carichi trasversali di segno opposto sul singolo allineamento. (****) Forze di attrito inclusi nelle combinazioni di carico come carichi per <i>Variazione termica uniforme</i> .						

Unitamente alle sollecitazioni riassunte nelle precedenti tabelle, la spalla è stata analizzata considerando i carichi sotto descritti.

5.2 Peso proprio strutturale

Il peso proprio degli elementi che compongono la spalla è stato calcolato autonomamente dal software di modellazione e di analisi in funzione delle geometrie strutturali, considerando un peso specifico del conglomerato cementizio pari a 25 kN/m³.

5.3 Azioni variabili da traffico

In aggiunta alle azioni variabili trasmesse dall'impalcato, la spalla è stata verificata considerando un carico di 20 kPa distribuito sul terrapieno retrostante il muro frontale. Gli effetti prodotti da tale carico sono un'azione verticale sulla platea di fondazione ed una spinta orizzontale sui muri di contenimento del terrapieno. Tale azione orizzontale è pari al prodotto fra il carico verticale ed il coefficiente di spinta a riposo $k_0 = 0.426$ ($\varphi = 35^\circ$) ed è pertanto uguale a $p = 8.53$ kPa.

5.4 Sisma

Gli incrementi di spinta dinamici del terreno e le azioni inerziali dovute alla massa delle spalle sono stati calcolati in funzione della massima accelerazione al suolo. Quest'ultima è stata calcolata considerando i seguenti parametri:

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- Latitudine: 44.57814
- Longitudine: 11.59546
- Vita nominale: 100 anni
- Categoria opera: III
- Classe uso: 1.5
- Vita di riferimento: 150 anni
- Categoria suolo: C
- Categoria topografica: T1

In funzione dei quali risulta:

- TR (SLV) = 1424
- S = 1.324
- a_g/g = 0.257 (accelerazione di picco su roccia)
- F_0 = 2.442
- T_c^* = 0.296 [s]

Le massime accelerazioni orizzontali e verticali al suolo sono pertanto pari a:

- $a_{h,max}/g = 0.340$ (massima accelerazione orizzontale suolo)
- $a_{v,max}/g = 0.176$ (massima accelerazione verticale suolo)

5.4.1 Azioni inerziali sismiche

Con riferimento al §7.9.5.4.2 delle NTC18, nel caso in cui il sistema costituito dalla spalla e dal terreno presente sulla sua fondazione sia considerabile come infinitamente rigido (periodo proprio inferiore a 0,05s) le forze d'inerzia direttamente applicate ad esso possono essere assunte pari al prodotto delle masse per l'accelerazione del terreno $a_g \cdot S$.

Nel caso specifico $a_g \cdot S = 0.257 \text{ g} \cdot 1.324 = 0.340 \text{ g}$.

5.4.2 Incremento dinamico spinta del terreno (Wood)

L'incremento dinamico di spinta del terreno è stato calcolato attraverso la nota formulazione di Wood (1973) come:

$$\Delta P_{\text{sis}} = \gamma k_h H$$

Con $k_h = \beta a_g S/g = 1 \cdot 0.257 \cdot 1.324 = 0.340 \text{ g}$

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Tale azione, al pari della spinta statica del terreno, è stato tenuto in conto nel dimensionamento delle spalle del ponte.

5.5 Spinta del terreno

La spinta del terreno è stata considerata per il dimensionamento delle spalle del ponte, sui muri verticali delle quali è stata applicata una pressione orizzontale triangolare (crescente con la profondità), calcolata nel modo seguente:

$$S_T = \gamma \cdot z \cdot k_0$$

con

- $\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$ (peso specifico terreno);
- z = profondità rispetto al piano campagna;
- $K_0 = 0.426$ (calcolato con $\phi = 35^\circ$)

6. COMBINAZIONE DELLE AZIONI

Nel presente capitolo sono descritte le regole di combinazione delle azioni adottate per definire le sollecitazioni di progetto utilizzate nelle verifiche dei diversi componenti dell'opera.

6.1 Combinazioni di stato limite di esercizio

Le verifiche agli stati limite di esercizio sono state effettuate in riferimento alle seguenti combinazioni:

- Combinazione caratteristica

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k_1} + \psi_{02} \cdot Q_{k_2} + \psi_{03} \cdot Q_{k_3} + \dots$$

- Combinazione frequente:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k_1} + \psi_{22} \cdot Q_{k_2} + \psi_{23} \cdot Q_{k_3} + \dots$$

- Combinazione quasi permanente:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k_1} + \psi_{22} \cdot Q_{k_2} + \psi_{23} \cdot Q_{k_3} + \dots$$

dove:

G_1 = peso proprio delle strutture

G_2 = altri carichi permanenti portati

P = valore caratteristico della precompressione

Q_{1k} = valore caratteristico del carico variabile principale

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Q_{ik} = valore caratteristico delle altre azioni variabili secondarie

I coefficienti di combinazione sono quelli previsti al punto 5.1.3.14 del D.M. 2018.

Table 1. Tabella 12 – Coefficienti di combinazione delle azioni

Tab. 5.1.VI - Coefficienti ψ per le azioni variabili per ponti stradali e pedonali

Azioni	Gruppo di azioni (Tab. 5.1.IV)	Coefficiente ψ_0 di combi- nazione	Coefficiente ψ_1 (valori frequent)	Coefficiente ψ_2 (valori quasi permanent)
Azioni da traffico (Tab. 5.1.IV)	Schema 1 (carichi tandem)	0,75	0,75	0,0
	Schemi 1, 5 e 6 (carichi distribuiti)	0,40	0,40	0,0
	Schemi 3 e 4 (carichi concentrati)	0,40	0,40	0,0
	Schema 2	0,0	0,75	0,0
	2	0,0	0,0	0,0
	3	0,0	0,0	0,0
	4 (folla)	--	0,75	0,0
	5	0,0	0,0	0,0
Vento	a ponte scarico SLU e SLE	0,6	0,2	0,0
	in esecuzione	0,8	0,0	0,0
	a ponte carico SLU e SLE	0,6	0,0	0,0
Neve	SLU e SLE	0,0	0,0	0,0
	in esecuzione	0,8	0,6	0,5
Temperatura	SLU e SLE	0,6	0,6	0,5

6.2 Combinazioni di stato limite ultimo

Le verifiche a stato limite ultimo sono state eseguite in accordo al punto 2.5.3 del D.M. 2018, combinando le singole azioni come di seguito riportato:

- Combinazione fondamentale:

$$\gamma_{g1} G_1 + \gamma_{g2} G_2 + \gamma_p P + \gamma_{q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

- Combinazione sismica:

$$G_1 + G_2 + P + E + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Per quanto riguarda i coefficienti di sicurezza si è fatto riferimento, oltre a quanto già riportato al punto precedente, alla tabella 5.1.V del D.M. 2018.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Table 2. Tabella 13 – Coefficienti parziali di sicurezza delle azioni

Tab. 5.1.V – Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU

		Coefficiente	EQU ⁽¹⁾	A1	A2
Azioni permanenti g_1 e g_3	favorevoli	γ_{G1} e γ_{G3}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,10	1,35	1,00
Azioni permanenti non strutturali ⁽²⁾ g_2	favorevoli	γ_{G2}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Azioni variabili da traffico	favorevoli	γ_Q	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,35	1,35	1,15
Azioni variabili	favorevoli	γ_{Qs}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Distorsioni e presollecitazioni di progetto	favorevoli	γ_{s1}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,00 ⁽³⁾	1,00 ⁽⁴⁾	1,00
Ritiro e viscosità, Cedimenti vincolari	favorevoli	$\gamma_{s2}, \gamma_{s3}, \gamma_{s4}$	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,20	1,20	1,00

Le combinazioni di calcolo considerate ai fini delle verifiche dei diversi elementi strutturali sono riportate nei relativi capitoli.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

7. MODELLAZIONE STRUTTURALE

Nel presente capitolo, successivamente alla descrizione del codice di calcolo utilizzato nelle analisi, verrà descritto il modello analitico utilizzato per la verifica degli elementi strutturali che compongono l'impalcato in calcestruzzo.

7.1 Codici di calcolo

Per i calcoli e la modellazione di cui alla presente relazione sono stati impiegati i codici di calcolo descritti di seguito. Tutti i codici di calcolo automatico utilizzati per l'analisi e la verifica delle strutture sono di sicura ed accertata validità e sono impiegati conformemente alle loro caratteristiche.

7.1.1 Programma di calcolo

Per la modellazione strutturale e il calcolo delle sollecitazioni si è fatto ricorso all'ausilio di un elaboratore elettronico utilizzando il programma di calcolo MIDAS Civil 2024.

MIDAS permette l'analisi elastica lineare e non lineare di strutture tridimensionali con nodi a sei gradi di libertà utilizzando un solutore ad elementi finiti. Il software è caratterizzato da una potente interfaccia grafica di grande facilità d'uso e produttività, tramite la quale è possibile gestire la creazione del modello, l'esecuzione delle analisi, l'ottimizzazione del progetto e la produzione degli output.

Il software è anche dotato di potenti strumenti integrati di progetto/verifica per acciaio e calcestruzzo. Questi strumenti sono disponibili all'interno della medesima interfaccia grafica già utilizzata per creare e analizzare il modello. Il progetto degli elementi frame in c.a. include il calcolo della quantità di armatura necessaria. Gli elementi possono essere raggruppati tra loro per necessità di progetto. Per ciascun elemento è possibile visualizzare i dettagli del calcolo di verifica. All'interno del software è implementata una gran varietà di normative internazionali tra le quali:

- UNI EN 1992 – Eurocodice 2;
- UNI EN 1993 – Eurocodice 3;
- UNI EN 1998 – Eurocodice 8.

E' possibile avere accesso a tutti i dati di MIDAS, incluse le informazioni sul modello, i risultati dell'analisi e i risultati delle verifiche, attraverso un archivio a struttura tabulare. I dati tabulari possono essere rappresentati e editati direttamente per mezzo dell'interfaccia grafica, oppure esportati in un foglio di lavoro Microsoft Excel o anche ad un semplice file di testo. E' possibile utilizzare i dati così esportati per creare relazioni o per eseguire calcoli autonomi. Esiste inoltre la possibilità di scambiare dati con svariati altri programmi molto diffusi per il disegno e per il calcolo.

Il metodo degli elementi finiti può essere considerato una estensione al campo dei corpi elastici continui del metodo degli spostamenti, dove si realizza una approssimazione fisica della struttura mediante elementi (travi, aste ecc.), per i quali si possono definire in forma esatta le relazioni forze-spostamenti ai nodi. Per analogia, si sostituisce al corpo elastico continuo il modello ad elementi finiti e si riducono ai nodi le infinite connessioni presenti. L'elemento atto a riprodurre il comportamento fisico di una parte molto piccola del modello viene visualizzato come una sottoregione in cui definire a

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

priori, in modo possibilmente semplice, l'andamento delle funzioni incognite rappresentate dalle componenti dello spostamento.

Le relazioni analitiche fra caratteristiche di deformazione, spostamenti, sollecitazioni e tensioni nei materiali sono regolate dalla teoria classica della Scienza delle Costruzioni.

Una volta acquisiti i dati, il software effettua una serie di controlli formali sulla correttezza dell'input (controllo di eventuali labilità del modello), calcola le rigidzze dei singoli elementi, assembla la matrice di rigidzza globale della struttura, costruisce il vettore dei carichi, risolve il sistema di equazioni lineari rappresentativo del problema e calcola le sollecitazioni negli elementi strutturali. I carichi vengono applicati alla struttura mediante una serie di condizioni elementari che poi l'utente può combinare a piacere in quelli che vengono chiamati Load Case, che il software utilizza nell'analisi della struttura. Le sollecitazioni utilizzate dal programma nella verifica/progetto delle sezioni (Load Combination) sono a loro volta delle combinazioni lineari dei Load Case. Tali combinazioni possono essere definite dall'utente, ovvero in modo automatico dal software in funzione della normativa selezionata.

7.1.2 Affidabilità del software

L'affidabilità del codice di calcolo è garantita dall'esistenza di un'ampia documentazione di supporto. Il prodotto è conforme a quanto richiesto dalle nuove normative italiane, presentando un adeguato numero di Benchmark che controllano l'accuratezza delle soluzioni numeriche confrontandole con soluzioni teoriche e con analisi eseguite con altri software.

7.1.3 Licenza d'uso del software

Si riportano qui di seguito gli estremi della licenza d'uso del software impiegato.



Numero licenza: CFENCIV0000703

Scadenza: 31/05/2027

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

7.2 Modello di calcolo delle spalle

Le spalle del viadotto sono state dimensionate con appositi modelli tridimensionali riproducenti la reale geometria dei manufatti con elementi bidimensionali di tipo "shell", a quali sono stati assegnati gli spessori effettivi delle porzioni d'opera modellate:

- Spessore platea di fondazione = 2.5 m;
- Spessore muro frontale = 2.5 m;
- Spessore paraghiaia = 0.60 m;
- Spessore porzione inferiore muro di risvolto = 1.2 m;
- Spessore porzione superiore muro di risvolto = 0.6 m.

Nelle figure seguenti si riportano alcune viste dei modelli di calcolo delle due spalle.

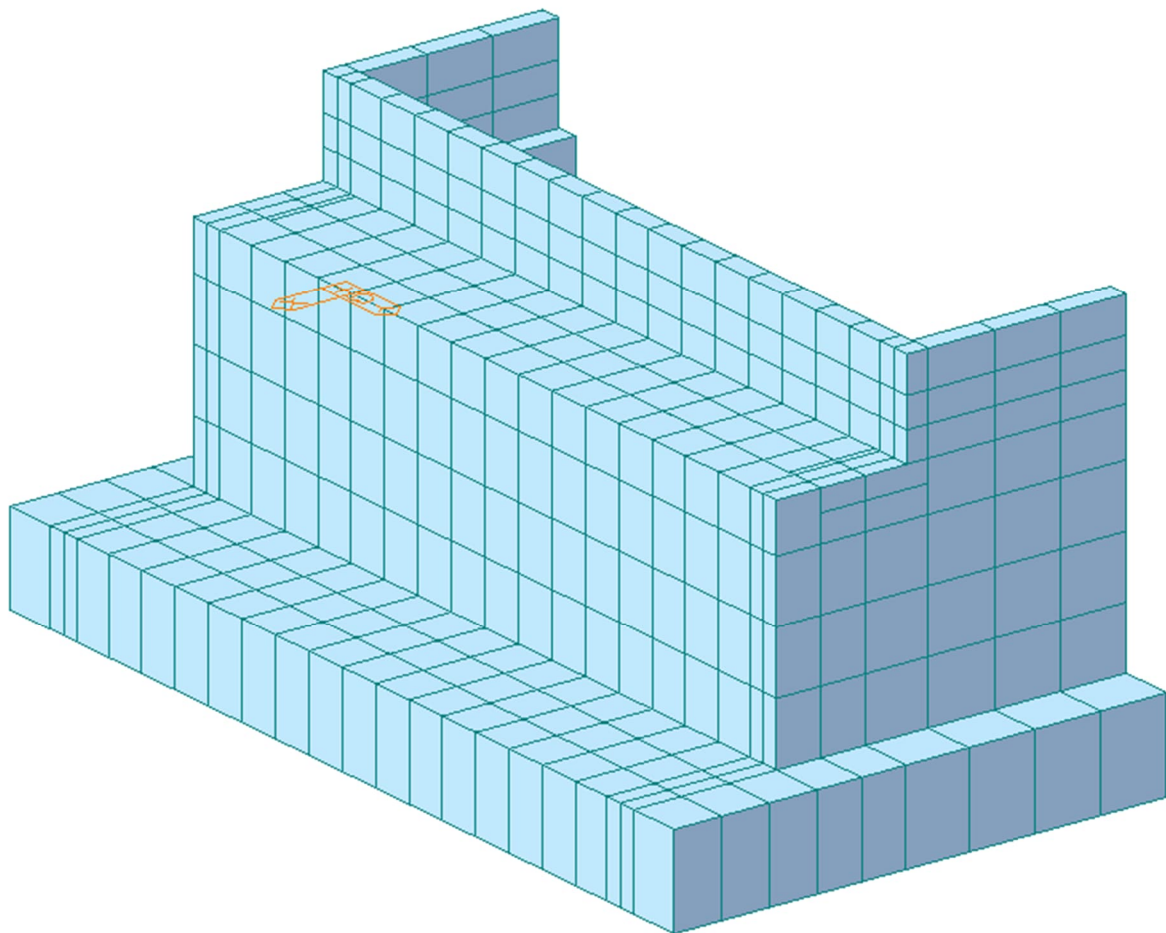


Table 3. Figura 9 – Modello di calcolo spalla

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Il modello di calcolo è stato caricato con le azioni derivanti dall'impalcato e con le spinte statiche e sismiche del terreno di riempimento. A tal proposito, si riportano qui di seguito alcune immagini relative all'applicazione delle azioni ai modelli di calcolo:

- Peso del rinterro

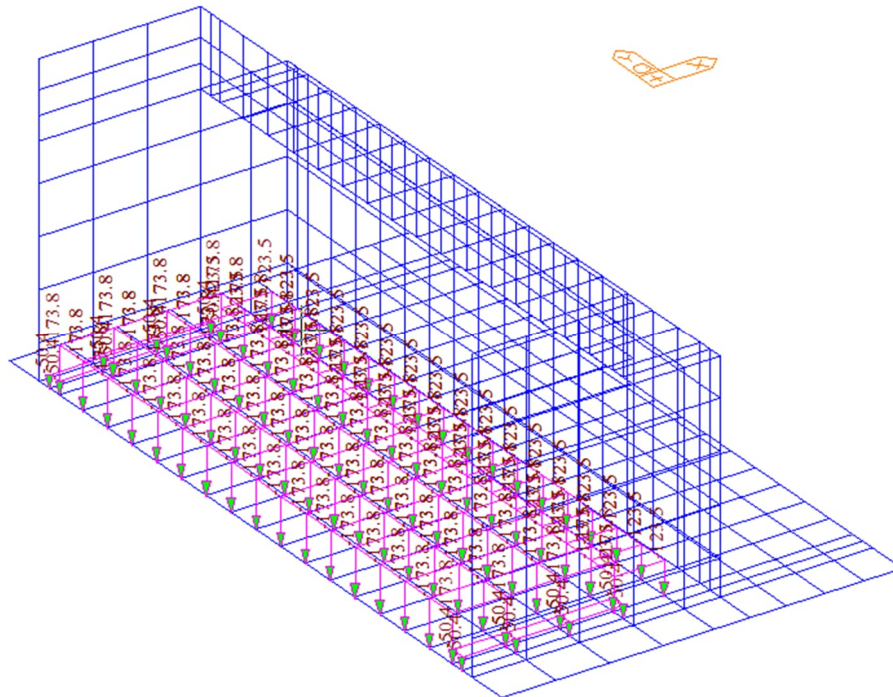


Table 4. Figura 10 – Applicazione dei carichi sugli elementi della spalla: peso del rinterro

- Spinta statica orizzontale del rinterro: per maggiore chiarezza si riportano i soli elementi dei muri di rivolto (l'azione è stata applicata a tutti gli elementi del modello). Come si vede, l'azione cresce in modo triangolare con l'approfondimento dal piano di progetto.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

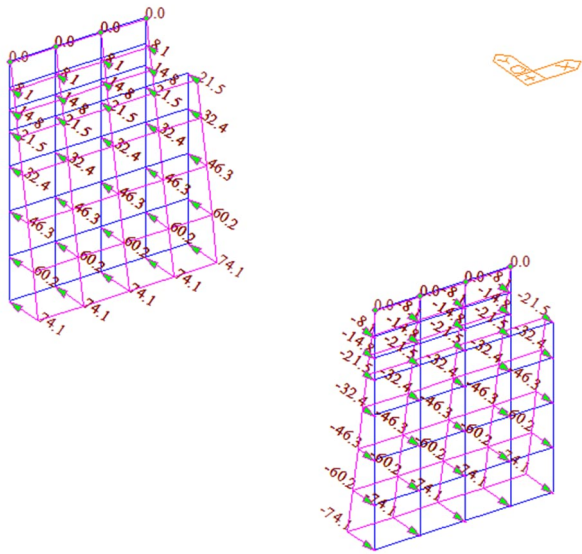


Table 5. Figura 11 – Applicazione dei carichi sugli elementi della spalla: spinta statica orizzontale del rinterro

- Spinta statica orizzontale dei carichi variabili presenti sul rilevato: per maggiore chiarezza, si riportano anche in questo caso le sole spinte sui muri di risvolto.

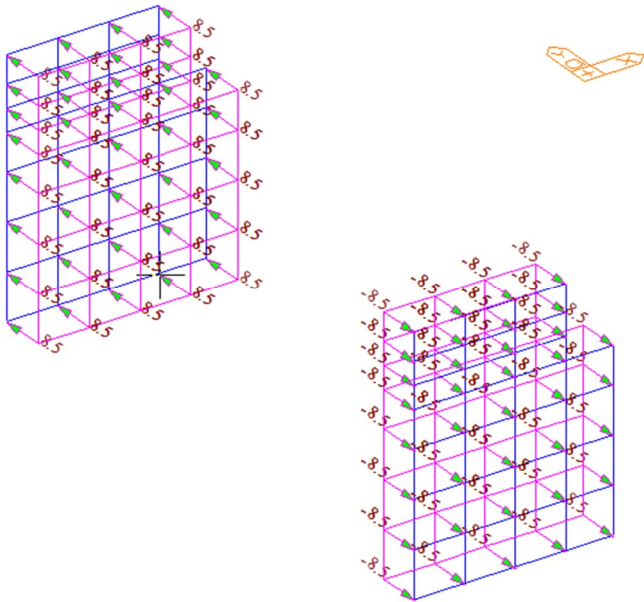


Table 6. Figura 12 – Applicazione dei carichi sugli elementi della spalla: spinta orizzontale dovuta ai sovraccarichi variabili

- Sovrappinta sismica sul muro frontale e sul muro paraghiaia.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>ST</td><td>712</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	ST	712	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	ST	712	r00								

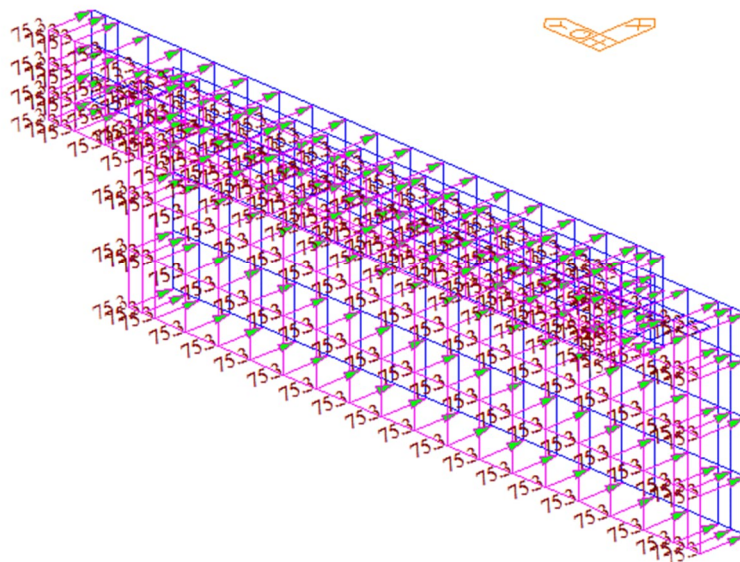


Table 7. Figura 13 – Applicazione dei carichi sugli elementi della spalla: sovraspinta sismica

- Peso carichi permanenti strutturali dell'impalcato.

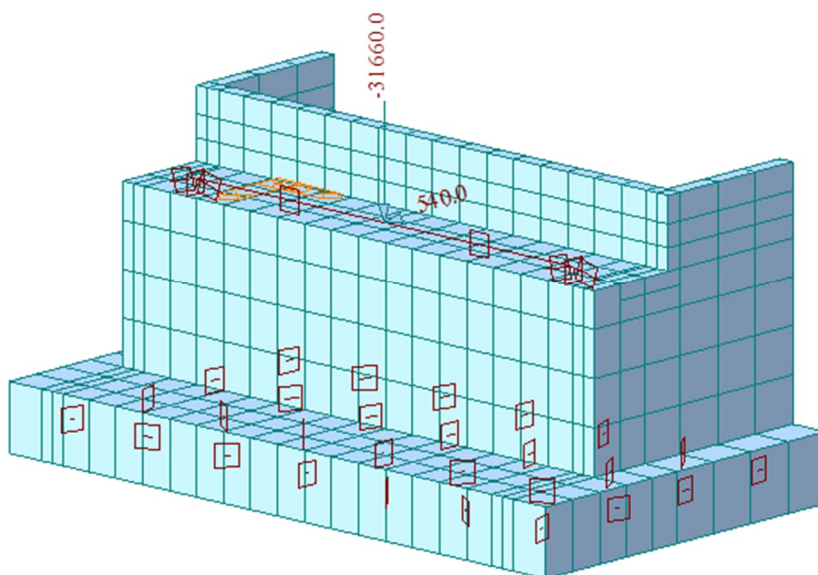


Table 8. Figura 14 – Applicazione dei carichi sugli elementi della spalla: peso carpenteria metallica impalcato

- Azioni variabili da traffico trasmesse dall'impalcato.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

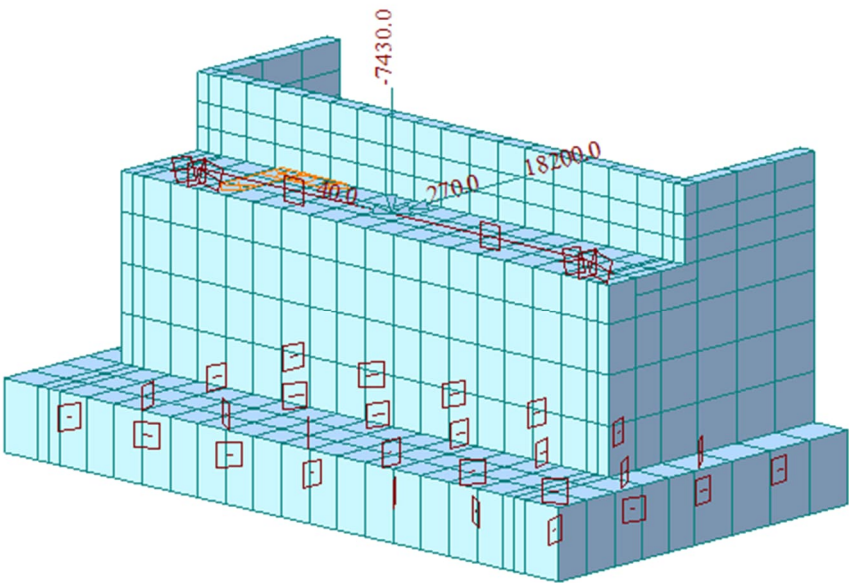


Table 9. Figura 15 – Applicazione dei carichi sugli elementi della spalla: azioni variabili da traffico

- Azione sismica longitudinale dell'impalcato.

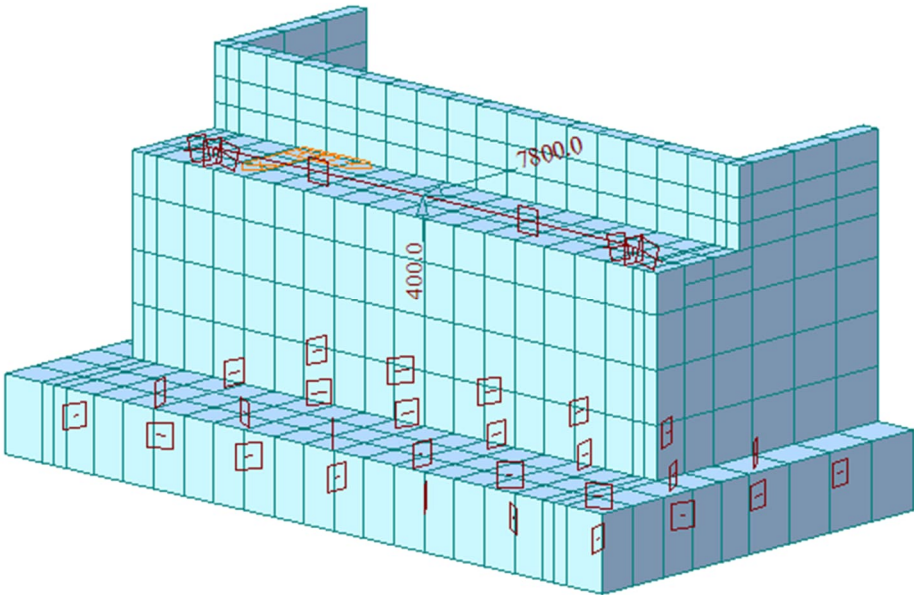


Table 10. Figura 16 – Applicazione dei carichi sugli elementi della spalla: sisma longitudinale impalcato

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- Azione sismica trasversale dell'impalcato.

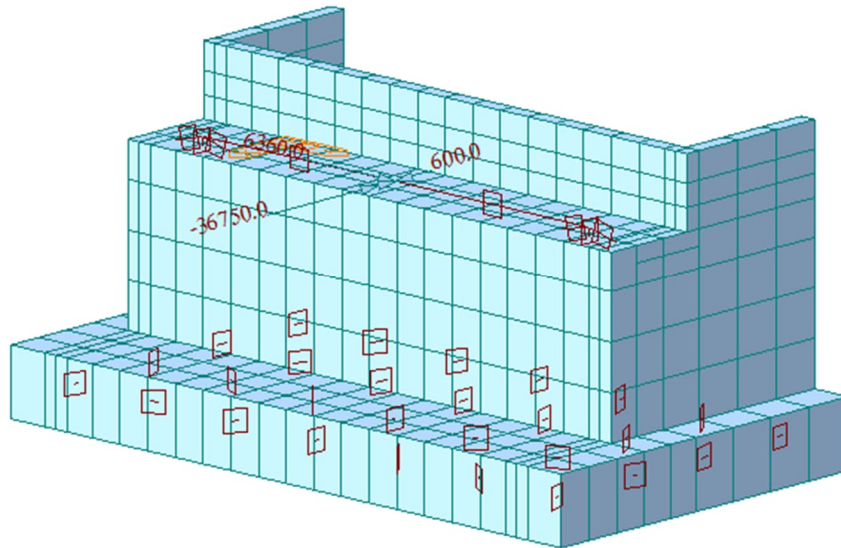


Table 11. Figura 17 – Applicazione dei carichi sugli elementi della spalla: sisma longitudinale impalcato

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

8. CRITERI DI VERIFICA DELLE SEZIONI IN CEMENTO ARMATO

In questo capitolo sono riportati i criteri adottati per le verifiche delle sezioni in calcestruzzo armato, sia agli stati limite ultimi (SLU) che agli stati limite di esercizio (SLE).

8.1.1 Verifiche di stato limite ultimo

Le verifiche a pressoflessione sono condotte confrontando le resistenze ultime e le sollecitazioni massime agenti, valutando il corrispondente fattore di sicurezza (FS) come rapporto tra la sollecitazione resistente e quella agente.

Le verifiche flessionali allo SLU della soletta in cemento armato sono state eseguite adottando le seguenti ipotesi:

- Conservazione delle sezioni piane;
- Perfetta aderenza tra acciaio e calcestruzzo;
- Resistenza a trazione del calcestruzzo nulla;
- Rottura del calcestruzzo determinata dal raggiungimento della sua capacità di deformazione ultima a compressione;
- Rottura dell'armatura tesa determinata dal raggiungimento della sua capacità di deformazione ultima;

Le tensioni nel calcestruzzo e nell'armatura sono state dedotte a partire dalle relative deformazioni utilizzando i rispettivi diagrammi tensione-deformazione.

Per quanto attiene la legge σ - ϵ del calcestruzzo si è utilizzata una curva parabola-rettangolo, considerando solo la porzione compressa con $\epsilon_{c2} = 0.2\%$ ed $\epsilon_{cu} = 0.35\%$.

La verifica allo stato limite ultimo per azioni di taglio è condotta secondo quanto prescritto in UNI EN 1992-1-1 facendo riferimento ai seguenti valori della resistenza di calcolo:

- Resistenza di calcolo dell'elemento privo di armatura a taglio

$$V_{Rd,c} = \max \left\{ \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d; (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \right\}$$

- Valore di progetto dello sforzo di taglio che può essere sopportato dall'armatura a taglio alla tensione di snervamento

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta$$

- Valore di progetto del massimo sforzo di taglio che può essere sopportato dall'elemento resistente, limitato dalla rottura delle bielle compresse.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta}$$

Nelle espressioni precedenti, i simboli hanno i seguenti significati:

- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0$ con d in mm;
- $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0.02$;
- A_{sl} è l'area dell'armatura tesa;
- b_w è la larghezza minima della sezione in zona tesa;
- $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0.2 \cdot f_{cd}$;
- N_{Ed} è la forza assiale nella sezione dovuta ai carichi agenti;
- A_c è l'area della sezione di calcestruzzo;
- $C_{Rd,c} = \frac{0.18}{\gamma_c}$;
- $k_1 = 0.15$;
- $v_{min} = 0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$;
- $v = 0.5$ per calcestruzzi fino a C70/85;
- $1 \leq \cot\theta \leq 2.5$;
- A_{sw} è l'area della sezione trasversale dell'armatura a taglio;
- s è il passo delle staffe;
- f_{ywd} è la tensione di snervamento di progetto dell'armatura a taglio;
- $v_1 = v$ è il coefficiente di riduzione della resistenza del calcestruzzo fessurato per taglio;
- α_{cw} è un coefficiente che tiene conto dell'interazione tra la tensione nel corrente compresso e qualsiasi tensione di compressione assiale.

8.1.2 Verifiche di stato limite di esercizio

Le verifiche allo stato limite di esercizio riguardano:

- Controllo delle tensioni nei materiali;
- Limitazione dell'ampiezza delle fessure nel calcestruzzo.

In entrambi i casi, il calcolo delle tensioni nella sezione resistente avviene ipotizzando una legge costitutiva tensioni-deformazioni di tipo lineare. Nel primo caso, noti i valori delle tensioni nell'acciaio

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

e nel calcestruzzo, si valuta il rispetto dei limiti tensionali previsti nella norma; nel secondo caso si esegue il calcolo dell'ampiezza delle fessure in accordo con le indicazioni fornite al punto 7.3.4 di UNI EN 1992-1-1.

8.1.3 Calcolo dell'ampiezza delle fessure

Al punto 7.3.4 di UNI EN 1992-1-1 si fornisce l'equazione per il calcolo dell'ampiezza delle fessure:

$$w_k = s(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})_{r,max}$$

dove:

- $s_{r,max}$ è la distanza massima tra le fessure;
- ϵ_{sm} è la deformazione media nell'armatura sotto la combinazione di carico pertinente;
- ϵ_{cm} è la deformazione media del calcestruzzo tra le fessure.

Il termine tra parentesi può essere ottenuto come:

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$$

dove:

- σ_s è la tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata;
- α_e equivale al rapporto E_s/E_{cm} ;
- $f_{ct,eff}$ è il valore medio della resistenza a trazione efficace del calcestruzzo;
- $\rho_{p,eff} = (A_s + \xi_1^2 \cdot A'_p) / A_{c,eff}$;
- $A_{c,eff}$ è l'area efficace di calcestruzzo teso attorno all'armatura ordinaria o a quella di precompressione. Per il calcolo di tale area, l'altezza efficace $h_{c,eff}$ è stata valutata secondo quanto riportato al punto 7.3.2 (3) di UNI EN 1992-1-1;
- A'_p è l'area delle armature di precompressione pre- o post-tese all'interno di $A_{c,eff}$;
- ξ_1 è il rapporto modificato della resistenza per aderenza che tiene conto dei diversi diametri dell'acciaio da precompressione e di quello ordinario;
- k_t è un fattore dipendente dalla durata dei carichi, pari a 0.4 per carichi di lunga durata.

La distanza massima finale tra le fessure può essere invece ricavata tramite la seguente espressione:

$$s_{r,max} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \sigma / \rho_{p,eff,r,max}$$

dove:

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- $\emptyset$ è il diametro delle barre. Se in una sezione sono impiegate barre di diametro diverso si raccomanda di adottare un diametro equivalente, $\emptyset_{eq}$. Per una sezione con n_1 barre di diametro $\emptyset_1$ e n_2 barre di diametro $\emptyset_2$, si raccomanda di adottare l'espressione seguente

$$\emptyset_{eq} = \frac{n_1 \cdot \emptyset_1^2 + n_2 \cdot \emptyset_2^2}{n_1 \cdot \emptyset_1 + n_2 \cdot \emptyset_2}$$

- c è il ricoprimento dell'armatura;
- k_1 è un coefficiente che tiene conto delle proprietà di aderenza dell'armatura aderente, pari a 0.8 per barre ad aderenza migliorata;
- k_2 è un coefficiente che tiene conto della distribuzione delle deformazioni, vale 1.0 per trazione pura e 0.5 per flessione;
- k_3 è un coefficiente per il quale si raccomanda di utilizzare il valore di 3.4;
- k_4 è un coefficiente per il quale si raccomanda di utilizzare il valore di 0.425.

8.1.4 Limitazione delle tensioni

La verifica riguardante il controllo degli stati tensionali è soddisfatta se risultano rispettati i seguenti limiti:

- $\sigma_c \leq 0.45 f_{ck}$ (Combinazione Quasi Permanente)
- $\sigma_s \leq 0.8 f_{yk}$ (Combinazione Quasi Permanente)
- $\sigma_c \leq 0.6 f_{ck}$ (Combinazione Caratteristica)
- $\sigma_s \leq 0.8 f_{yk}$ (Combinazione Caratteristica)

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

9. CRITERI DI DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DI SICUREZZA DELLE FONDAZIONI PROFONDE – PALI DI FONDAZIONE

Nel presente capitolo si riportano i criteri di dimensionamento e verifica delle fondazioni su pali delle opere d'arte previste.

Come riportato al §6.4.3.1 della normativa di riferimento (Doc. Rif.[1]), per le fondazioni su pali, devono essere prese in considerazione almeno le seguenti verifiche agli stati limite ultimi, quando pertinenti:

- SLU di tipo geotecnico (GEO), relative a condizioni di:
 - collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi assiali;
 - collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi trasversali;
 - collasso per carico limite di sfilamento nei riguardi dei carichi assiali di trazione;
 - stabilità globale.
- SLU di tipo strutturale (STR), relative a condizioni di:
 - raggiungimento della resistenza dei pali;
 - raggiungimento della resistenza della struttura di collegamento dei pali;
 - spostamenti o rotazioni eccessive che possano indurre il raggiungimento di uno stato limite ultimo nella struttura in elevazione.
- SLE in termini di:
 - eccessivi cedimenti o sollevamenti;
 - eccessivi spostamenti trasversali.

Tutte le verifiche (GEO/STRU) di cui sopra, ad eccezione della verifica di stabilità globale dell'insieme opera-terreno, devono essere svolte considerando l'Approccio 2 con la combinazione A1+M1+R3 (STR e GEO) tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle tabelle di normativa.

Nel presente progetto le verifiche allo stato limite ultimo verranno condotte con riferimento all'Approccio 2: (A1+M1+R3).

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

9.1 Ripartizione delle sollecitazioni in fondazione

Il calcolo delle sollecitazioni agenti in testa ai pali è stato effettuato nell'ipotesi di ripartizione rigida delle stesse secondo le seguenti espressioni:

$$N_{Ed,i} = \frac{N_z}{n} + \frac{M_x}{\sum_{i=1}^n d_{y,i}^2} \cdot d_{y,i} + \frac{M_y}{\sum_{i=1}^n d_{x,i}^2} \cdot d_{x,i}$$

$$V_{Ed,x,i} = \frac{V_x}{n} + \frac{M_z}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \cdot d_i \cdot \cos(\alpha_i)$$

$$V_{Ed,y,i} = \frac{V_y}{n} + \frac{M_z}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \cdot d_i \cdot \sin(\alpha_i)$$

$$V_{Ed,i} = \sqrt{V_{Ed,x,i}^2 + V_{Ed,y,i}^2}$$

Dove:

- N_z = forza verticale esterna
- M_x = momento esterno attorno all'asse x;
- M_y = momento esterno attorno all'asse y;
- V_x = forza orizzontale esterna nella direzione x;
- V_y = forza orizzontale esterna nella direzione y;
- $N_{Ed,i}$ = forza verticale agente sulla testa dell'i-esimo palo;
- $V_{Ed,x,i}$ = forza orizzontale in direzione x agente sulla testa dell'i-esimo palo;
- $V_{Ed,y,i}$ = forza orizzontale in direzione y agente sulla testa dell'i-esimo palo;
- V_{Ed} = forza orizzontale risultante agente sulla testa dell'i-esimo palo;
- M_z = coppia torcente;
- y_i = distanza del palo i-esimo dall'asse baricentrico della palificata nella direzione y;
- x_i = distanza del palo i-esimo dall'asse baricentrico della palificata nella direzione x;
- d_i è la distanza del palo dall'origine degli assi;
- α_i è l'angolo del vettore forza che deriva dall'applicazione della coppia torcente M_z .

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

A partire dai risultati della ripartizione rigida, si adottano i seguenti criteri:

- Verifiche SLU GEO:
 - Per la verifica a capacità portante verticale (compressione/trazione) si utilizza il valore massimo di $N_{Ed,i}$;
 - Per la verifica a capacità portante orizzontale (Broms) si utilizza il valore massimo di $V_{Ed,i}$;
- Verifiche SLU STR:
 - Per la verifica strutturale si utilizzano i valori massimi di $N_{Ed,i}$ e $V_{Ed,i}$. Per il calcolo del momento agente si fa riferimento al metodo di Matlock & Reese partendo sempre dal valore di $V_{Ed,i}$;
- Verifiche SLE:
 - Per le verifiche SLE (cedimenti e rotazione della palificata, verifiche tensionali e fessurazione delle sezioni strutturali) si adotta lo stesso valore del punto precedente.

9.2 Analisi agli stati limite nei confronti dei carichi assiali

Le verifiche di capacità portante dei pali vengono svolte secondo la metodologia degli stati limite ultimi, in accordo alla normativa vigente [1]. La verifica della capacità portante dei pali è soddisfatta se:

$$E_d < R_d$$

essendo:

$$R_d = R_k / \gamma_R$$

dove:

- E_d = carico assiale di compressione di progetto;
- R_d = capacità portante di progetto nei confronti dei carichi assiali;
- R_k = valore caratteristico della capacità portante limite del palo.

In particolare, le verifiche di capacità portante dei pali agli stati limite ultimi (SLU) vengono condotte secondo l'Approccio 2 con la combinazione (A1+M1+R3) tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali delle tabelle di normativa 6.2.I, 6.2.II e 6.4.VI.

La resistenza di progetto a compressione $R_{c,d}$ è calcolata applicando al valore caratteristico della resistenza $R_{c,k}$ i coefficienti parziali γ_R riportati in Tabella 14, relativi alla condizione di pali trivellati.

Il valore caratteristico della resistenza $R_{c,k}$ a compressione del palo (o a trazione $R_{t,k}$) è ottenuto applicando i fattori di correlazione ξ_3 e ξ_4 (Tabella 15) alle resistenze di calcolo $R_{c,cal}$ (o $R_{t,cal}$); tali fattori di correlazione sono funzione del numero di verticali d'indagine rappresentative.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Per ogni opera verrà assunto un coefficiente ξ_3 in funzione delle verticali di indagine eseguite, sufficientemente rappresentative per la caratterizzazione geotecnica, secondo quanto indicato da normativa.

In condizioni sismiche le verifiche di capacità portante dei pali agli stati limite ultimi vanno condotte con riferimento allo stesso approccio utilizzato per le condizioni statiche (A1+M1+R3), tenendo conto dei coefficienti parziali riportati in Tabella 14 e ponendo i coefficienti parziali sulle azioni tutti pari all'unità.

Tabella 14: Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali (Tab. 6.4.II di [1])

Resistenza	Simbolo	Pali infissi	Pali trivellati	Pali ad elica continua
	γ_R	(R3)	(R3)	(R3)
Base	γ_b	1,15	1,35	1,3
Laterale in compressione	γ_s	1,15	1,15	1,15
Totale (*)	γ	1,15	1,30	1,25
Laterale in trazione	γ_{st}	1,25	1,25	1,25

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

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

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

Tabella 15: Fattori di correlazione ξ per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali d'indagine (Tab. 6.4.IV di [1])

Numero di verticali indagate	1	2	3	4	5	7	≥ 10
ξ_3	1,70	1,65	1,60	1,55	1,50	1,45	1,40
ξ_4	1,70	1,55	1,48	1,42	1,34	1,28	1,21

Si verificherà inoltre che la risposta del palo in esercizio sia di tipo "elastico", verificando un adeguato coefficiente di sicurezza sulla portata ultima per attrito laterale:

$$N_{\max, SLE} < Q_{II} / 1,25$$

la massima sollecitazione assiale allo SLE RARA dovrà essere inferiore alla portata laterale limite del palo (Q_{II} , riportata nelle seguenti tabelle) con un fattore di sicurezza di 1,25.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

9.2.1 Metodologia di verifica

Le verifiche di portanza dei pali di fondazione dei viadotti sono condotte in termini di tensioni totali, mediante le formulazioni riportate nei precedenti paragrafi in funzione della resistenza non drenata dei terreni. Infatti, come riportato sul libro di testo "Piles and Pile Foundations" (C. Viggiani, A. Mandolini, G. Russo, 2011, [18]) *"la capacità portante a lungo termine, drenata, di un palo in argilla sarà notevolmente maggiore della capacità non drenata. Tuttavia, i cedimenti necessari per mobilitare la capacità drenata sarebbero troppo grandi per essere tollerati dalla maggior parte delle strutture. Inoltre, il palo deve avere una capacità portante immediata sufficiente per evitare un collasso a breve termine. Per questi motivi, è consuetudine calcolare la capacità di base dei pali in argilla in termini di resistenza al taglio non drenata dell'argilla"*.

Inoltre, le combinazioni di carico dimensionanti per le fondazioni dei viadotti, in particolare quelli ferroviari, comprendono sempre azioni di breve durata (sisma, traffico ferroviario, vento) che inducono delle sovrappressioni interstiziali localizzate nell'intorno del palo, sollecitando il terreno in condizioni non drenate sia alla punta che lungo il fusto.

La verifica nelle condizioni di "lungo termine" in tensioni efficaci assumerebbe rilevanza per le combinazioni di carico che comprendono solo azioni permanenti (i.e. pesi propri e permanenti portati per i carichi verticali, spinta del terreno su spalle e muri per i carichi orizzontali). Tali combinazioni risultano evidentemente sempre meno gravose di quelle contenenti anche le azioni variabili di breve durata; per esse le NTC non richiederebbero a rigore una verifica allo SLU, quanto piuttosto solo verifiche SLE (cfr. combinazione di carico SLE-Quasi Permanente).

9.2.2 Capacità portante a carico verticale (compressione)

La portata di progetto a compressione di un palo trivellato (eseguito con completa asportazione del terreno) Q_d può essere espressa dalla seguente relazione:

$$Q_{d, compr} = Q_{ll} / F_{SL} + Q_{bl} / F_{SB} - W'_p$$

dove:

- Q_{ll} = portata laterale limite;
- Q_{bl} = portata di base limite;
- W'_p = peso efficace del palo o del setto (al netto del peso del terreno asportato: peso calcestruzzo-peso terreno);
- F_{SL} = fattore di sicurezza per la portata laterale a compressione ($=\xi_3 \cdot \gamma_s$);
- F_{SB} = fattore di sicurezza per la portata di base ($=\xi_3 \cdot \gamma_b$).

9.2.2.1 Portata laterale

La portata laterale limite viene valutata con la seguente relazione:

$$Q_{ll} = \pi \cdot D \cdot \sum_i (\tau_i \cdot h_i)$$

dove:

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- D = diametro palo;
- τ_i = tensione di adesione laterale limite nello strato i-esimo;
- h_i = altezza dello strato i-esimo.

Depositi incoerenti

La tensione tangenziale ultima lungo il fusto del palo, in accordo a Burland [1973], può essere valutata in termini di tensioni efficaci, Reese & O'Neill [1988], Chen & Kulhawy [1994], O'Neill & Hassan [1994], con riferimento alla seguente espressione:

$$\tau_i = \beta \cdot \sigma'_v \leq \tau_{i,max}$$

dove:

- σ'_v = tensione verticale efficace litostatica;
- β = coefficiente empirico valutato come $\beta = k \cdot \tan \phi'$;
- k = coefficiente di pressione laterale = 0,6 (compressione); $k = 0,5$ (trazione);
- ϕ' = angolo di resistenza al taglio;
- $\tau_{i,max}$ = valore massimo dell'adesione laterale limite palo-terreno (pari a 150 kPa per terreni incoerenti).

Depositi coesivi

La tensione tangenziale per i terreni coesivi viene valutata con la seguente espressione:

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

dove:

- c_u = resistenza al taglio in condizioni non drenate;
- α = coefficiente empirico valutato da [17]:

$$c_u \leq 25 \text{ kPa} \quad \alpha = 0,90$$

$$25 < c_u < 50 \quad \alpha = 0,80$$

$$50 < c_u < 75 \quad \alpha = 0,60$$

$$c_u \geq 75 \quad \alpha = 0,40$$

- $\tau_{i,max} = 100 \text{ kPa}$ per i depositi coesivi alluvionali.

Inoltre, per i depositi coesivi si considera:

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

$$\tau_i > 0,25 \cdot \sigma'_v$$

$$\tau_i < 0,55 \cdot \sigma'_v$$

dove σ'_v = tensione verticale efficace litostatica.

Per i depositi coesivi del substrato la tensione tangenziale può essere valutata con la correlazione di Burland (1993):

$$\tau_i = \beta \cdot \sigma'_v \leq \tau_{i,max}$$

Dove

- $\beta = 0,1 + 0,4 \cdot c_u / \sigma'_v$ (con $\beta > 0,23$, AGI dicembre 1984);
- c_u = resistenza al taglio in condizioni non drenate;
- σ'_v = tensioni verticali efficaci;
- $\tau_{i,max}$ = valore massimo dell'adesione laterale limite palo-terreno (pari a 120 kPa per terreni coesivi del substrato).

9.2.2.2 Portata di base

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

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

dove:

- A_p = area della base del palo,
- q_{bl} = portata limite specifica di base.

Depositi incoerenti

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

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

essendo:

- N_q^* = coefficiente in funzione dell'angolo di resistenza al taglio del terreno [17];
- σ'_v = tensione verticale efficace;
- $q_{b,lim}$ = pressione ultima di base massima consigliabile. Nel caso in esame si è fatto riferimento a quanto indicato da Gwidzala (1984), vedasi seguente tabella.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Tabella 16: Valori di $q_{b,lim}$ secondo Gwidzala (1984)

	$q_{b,lim}$ [kPa]
GHIAIE	7500
SABBIE	5800
SABBIE LIMOSE	4300

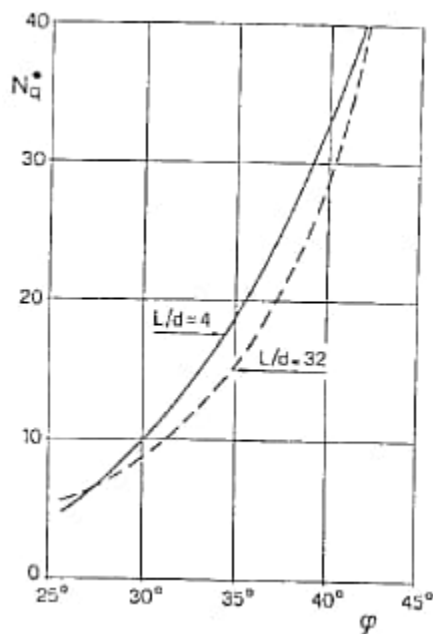


Figura 18: Coefficiente N_q^* corrispondente all'insorgere delle deformazioni plastiche alla base del palo

Cautelativamente per le unità in esame si assume:

- terreni sabbiosi con angolo di resistenza al taglio $\phi' = 31 \div 32^\circ$: $N_q^* = 10$; $q_b \leq 4300$ kPa
- terreni sabbiosi con angolo di resistenza al taglio $\phi' = 34^\circ$: $N_q^* = 14$; $q_b \leq 4300$ kPa
- terreni ghiaioso sabbiosi con angolo di resistenza al taglio $\phi' = 38^\circ$: $N_q^* = 23$; $q_b \leq 5800$ kPa

Depositi coesivi

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

$$q_{bl} = 9 \cdot c_u + \sigma_v$$

dove:

- c_u = resistenza al taglio non drenata;

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- σ_v = tensione totale;
- $q_{b,lim}$ = pressione ultima di base massima consigliabile (3800 kN in accordo a Engling e Reese, 1974).

Nel caso di terreni stratificati, la mobilitazione dell'intera resistenza di base disponibile è subordinata alla condizione che il palo penetri nello strato portante per almeno 3 diametri.

9.2.3 Capacità portante a carico verticale (trazione)

La portata di progetto a trazione di un palo trivellato (eseguito con completa asportazione del terreno) Q_d può essere espressa dalla seguente relazione:

$$Q_{d_traz} = Q_{II} / F_{SL} + W'_{p_eff}$$

dove:

- Q_{II} = portata laterale limite (da determinarsi secondo quanto già descritto in precedenza);
- W'_{p_eff} = peso efficace del palo (alleggerito della sotto spinta idraulica se sottofalda);
- F_{SL} = fattore di sicurezza per la portata laterale ($=\xi_3 \cdot \gamma_s$).

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

9.3 Capacità portante del gruppo di pali per carico verticale eccentrico

Ai sensi delle NTC2018 la verifica per stati limite ultimi di tipo GEO della fondazione mista può essere svolta “*limitatamente alle azioni verticali*” (par. 6.4.3.3); tale indicazione si deve interpretare nel senso di escludere il caso di combinazioni di azioni verticali e coppie in fondazione, cioè di azioni verticali eccentriche. In quest'ultimo caso, si deve far riferimento al solo contributo dei pali, che può essere valutato applicando metodologie di calcolo in grado di rappresentare lo stato limite ultimo di collasso della palificata nel suo complesso, in virtù del raggiungimento del carico limite di tutti i pali. Nel seguito si fa riferimento al *Metodo dei Domini di Interazione M-N* o *Metodo dei Domini di Resistenza* della palificata [19].

9.3.1 Dominio di resistenza della palificata

Il *dominio di resistenza* $\mathcal{D}$ delle fondazioni su pali è costruito come il luogo dei punti rappresentativi del collasso dell'intera palificata. Il dominio di resistenza, se costruito con riferimento ai valori delle resistenze di progetto del palo singolo (in compressione, $R_{c,d}$, e in trazione, $R_{t,d}$), assume il significato di *dominio delle resistenze di progetto* $\mathcal{D}_d$.

Le verifiche SLU-GEO delle fondazioni su pali sono soddisfatte se i punti rappresentativi delle azioni di progetto (N_{Ed} , M_{Ed}) risultano interni al dominio di resistenza di progetto $\mathcal{D}_d$. La verifica è dunque formalmente soddisfatta se risulta verificata la seguente condizione:

$$(N_{Ed}, M_{Ed}) \in \mathcal{D}_d$$

I punti della frontiera del dominio rappresentano le coppie di valori “ N_u , M_u ” (resistenza a compressione/trazione e momento resistente del gruppo di pali, rispettivamente) per i quali tutte le riserve di resistenza della palificata risultano esaurite.

Il dominio è costruito secondo le seguenti ipotesi di calcolo:

1. I pali sono modellati sia a trazione sia in compressione come elementi monodimensionali rigido-perfettamente plastici, indipendenti fra loro, caratterizzati dai due carichi limite (di “snervamento”) in compressione “ N_u ” ($=R_{c,d}$) ed in trazione “ $-S_u$ ” ($=R_{t,d}$);
2. I pali sono connessi con un/una plinto/platea infinitamente rigido/a;
3. La testa dei pali può essere considerata sia incastrata al/alla plinto/platea (vincolo in grado di esprimere un momento flettente) sia incernierata alla al/alla plinto/platea.

In estrema sintesi, a titolo esemplificativo, considerando una generica riga di n pali, identici e equidistanti fra loro, su cui agiscono un carico verticale centrato $Q_{u,i}$ e un momento flettente $M_{u,i}$, il sistema può subire una rotazione intorno ad un punto posto tra due pali adiacenti (o eventualmente posto anche esternamente ai pali d'estremità) o intorno alla testa di un palo (rispettivamente caso (a) e caso (b) della Figura 19).

Essendo tutti i pali a comportamento rigido-perfettamente plastico, in testa al singolo palo agirà un carico assiale paria a N_u o $-S_u$: nel caso (a) tutti i pali saranno soggetti al loro carico limite, mentre nel caso (b) ciò sarà vero per tutti i pali, eccetto quello intorno al quale avviene la rotazione.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

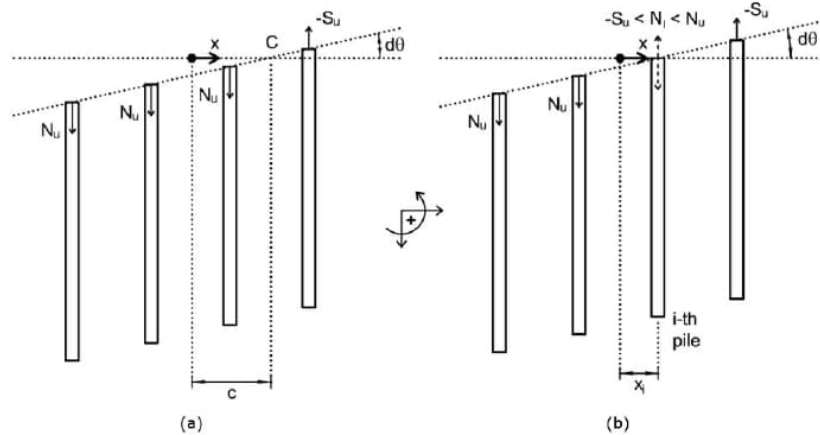


Figura 19: Meccanismo di collasso per una riga di pali identici ed equidistanti: (a) rotazione intorno ad un punto tra due pali adiacenti; (b) rotazione intorno alla testa di un palo (Di Laora et al, 2019 [19])

Applicando i teoremi dell'analisi limite è possibile ricavare le seguenti equazioni:

$$\begin{cases} Q_{u,i} = N_u \cdot (i - 1) - S_u \cdot (n - i + 1) \\ M_{u,i} = \frac{s}{2} \cdot (N_u + S_u) \cdot (i - 1) \cdot (n - i + 1) \end{cases} \quad \text{con } i = 1, \dots, n.$$

$$\begin{cases} Q_{u,(k+n)} = -(k - 1) \cdot S_u + (n - k + 1) \cdot N_u \\ M_{u,(k+n)} = -\frac{s}{2} \cdot (N_u + S_u) \cdot (k - 1) \cdot (n - k + 1) \end{cases} \quad \text{con } k = 1, \dots, n.$$

Le coppie di valori $(Q_{u,i}, M_{u,i})$ o $(Q_{u,(k+n)}, M_{u,(k+n)})$ definiscono un poligono nel piano (V_u, M_u) , ottenuto tracciando le congiungenti tra due punti consecutivi. Le rette così determinate costituiscono, a loro volta, soluzioni del teorema e rappresentano la condizione in cui la rotazione avviene proprio in corrispondenza della testa di un palo.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

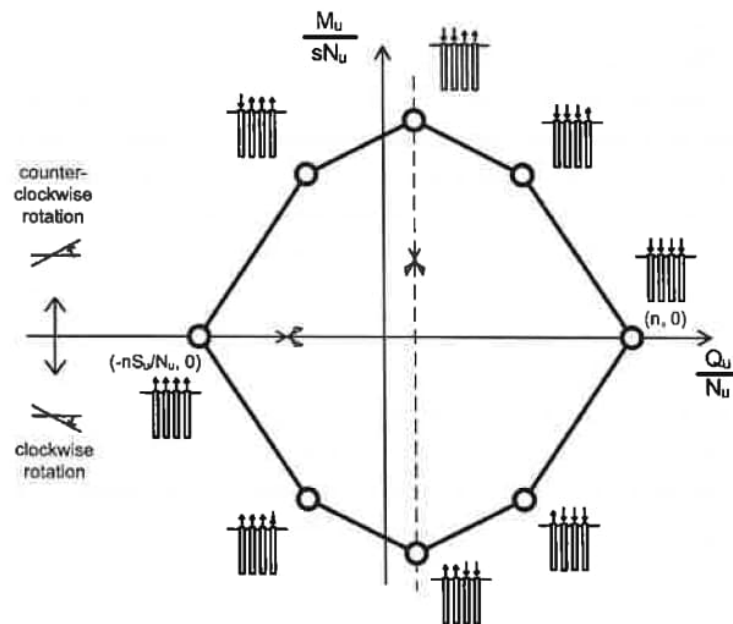


Figura 20: Diagramma di interazione relativo ad una generica riga di 4 pali identici, equidistanti fra loro

Quanto esposto fino ad ora può essere esteso ad un gruppo di pali, caratterizzato da: a) un generico numero di elementi; b) differenti valori di carico assiale limite a compressione e trazione per ciascun palo e c) valori non nulli del momento di plasticizzazione dei singoli pali nella loro sezione di testa. Nella generica condizione sopra descritta le coordinate dei vertici del dominio possono essere determinate attraverso le seguenti espressioni:

$$\begin{cases} Q_{u,i} = \sum_{j=1}^{i-1} N_{uj} - \sum_{j=i}^p S_{uj} \\ M_{u,i} = \sum_{j=1}^{i-1} (M_{ycj} - N_{uj} \xi_j) + \sum_{j=i}^p (M_{ytj} + S_{uj} \xi_j) \end{cases} \quad \text{con } i = 1, \dots, p+1$$

$$\begin{cases} Q_{u(k+p+1)} = -\sum_{j=1}^{k-1} S_{uj} + \sum_{j=k}^p N_{uj} \\ M_{u(k+p+1)} = \sum_{j=1}^{k-1} (S_{uj} \xi_j - M_{ytj}) - \sum_{j=k}^p (M_{ycj} + N_{uj} \xi_j) \end{cases} \quad \text{con } k = 1, \dots, p+1$$

Dove:

- M_{ycj} , M_{ytj} : momenti di plasticizzazione della sezione in corrispondenza della testa del palo di fondazione valutati, rispettivamente, con i valori di sforzo assiale pari a N_{uj} e S_{uj} ;
- ξ_j : distanza lungo l'asse ξ del j -esimo palo nel sistema di riferimento $(\xi; \eta)$
- p : numero di pali che compongono la palificata.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

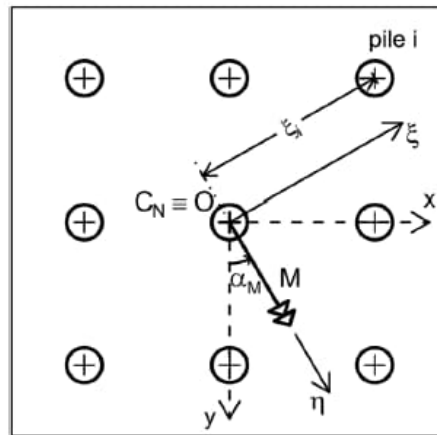


Figura 21: Definizione del sistema di riferimento (ξ ; η)

In figura si riporta, a titolo di esempio, il dominio di resistenza di una palificata costituita da una generica riga di 4 pali identici e equidistanti fra loro, in cui si evidenzia l'effetto della variazione del momento di plasticizzazione sul dominio stesso. Si precisa che nella figura seguente $m_{yt} = M_{yt} / (sN_u)$ e $m_{yc} = M_{yc} / (sN_u)$ rappresentano i momenti di plasticizzazione adimensionali della sezione in corrispondenza della testa del palo di fondazione, valutati, rispettivamente, con i valori di sforzo assiale pari a S_{uj} e N_{uj} e s rappresenta l'interasse dei pali.

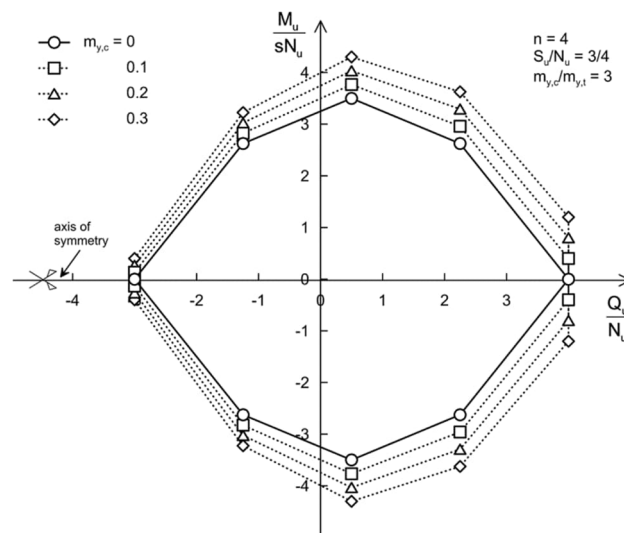


Figura 22: Esempio di Dominio di Resistenza di una palificata 4x4

Per ulteriori approfondimenti circa il calcolo dei domini di resistenza si rimanda a Di Laora et al. [19].

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

9.4 Analisi agli stati limite nei confronti dei carichi trasversali

In linea generale, per la verifica del carico limite orizzontale si fa riferimento alla teoria di Broms per il caso di pali con rotazione in testa impedita.

Per la determinazione del valore di progetto della resistenza dei pali soggetti a carichi trasversali valgono le indicazioni di normativa [1] al paragrafo 6.4.3.1.1, applicando il coefficiente parziale (γ_T) della Tabella 17 ed i coefficienti ξ_3 e ξ_4 , fattori di correlazione in funzione del numero di verticali d'indagine rappresentative, per i quali si rimanda alla relazione geotecnica di caratterizzazione [35].

Tabella 17: Coefficiente parziale γ_T per le verifiche agli stati limite ultimi di pali soggetti a carichi trasversali (Tab. 6.4.VI di [1])

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

Il valore determinato con la teoria di Broms dovrà essere ridotto secondo quanto prevede la normativa vigente.

$$H_{lim} = H / (\xi \cdot \gamma_T) > V_{pd}$$

dove:

- H = valore limite in funzione del meccanismo attivato;
- ξ = fattore di correlazione in funzione delle verticali indagate;
- γ_T = fattore parziale per pali soggetti a carichi orizzontali.

9.4.1 Capacità portante a carico orizzontale dei pali di fondazione

Il carico limite di un palo verticale sotto l'azione di una forza orizzontale applicata alla testa del palo viene calcolato secondo la teoria sviluppata da Broms per terreni coesivi ed incoerenti.

Verranno comunque considerate le implementazioni di De Simone, per tenere in conto dell'approfondimento della testa del palo rispetto al piano di campagna.

Secondo il metodo proposto da Broms, la capacità portante orizzontale viene determinata con le seguenti ipotesi:

- Terreno modellato come mezzo rigido-perfettamente plastico;
- Pressione di interazione palo-terreno dipendente solo dal tipo di terreno (attritivo o coesivo) e dal diametro del palo;
- Comportamento flessionale del palo come rigido-perfettamente plastico dopo il raggiungimento del momento di plasticizzazione.

Per la determinazione del carico limite verrà inoltre considerato il vincolo di incastro perfetto tra testa del palo e plinto di fondazione.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

A valle delle ipotesi appena descritte, i possibili meccanismi di rottura del sistema palo-terreno possono essere indicati come rottura a palo "corto", "intermedio" e "lungo" (si veda Figura 23).

La resistenza trasversale di calcolo del palo singolo $R_{tr,cal}$ viene pertanto calcolata come valore minimo corrispondente ai possibili meccanismi di rottura.

Per la valutazione dell'effetto dell'efficienza del gruppo di pali, al fine di tenere conto dell'interazione reciproca dei pali soggetti a carichi trasversali (effetto gruppo), operativamente si introduce un parametro di efficienza della palificata nella verifica SLU GEO pari a 0,80 che corrisponde a un coefficiente amplificativo del taglio sul singolo palo pari a 1,25.

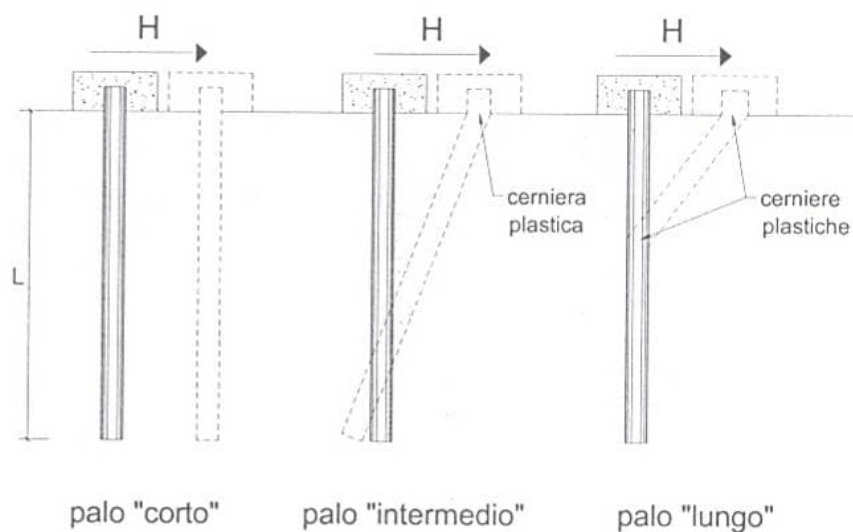


Figura 23: Meccanismi di collasso del sistema palo-terreno per pali impediti di ruotare in testa

Le equazioni con cui si determina il carico limite a forze orizzontali dei pali sono definite di seguito al variare del tipo di meccanismo considerato.

9.4.1.1 Capacità portante a carico orizzontale dei pali di fondazione

La resistenza trasversale di calcolo del palo singolo $R_{tr,cal,P}$ (Broms) nella condizione di palo con rotazione in testa impedita, si determina mediante le equazioni riportate di seguito in funzione del meccanismo di collasso considerato e delle caratteristiche geotecniche del deposito.

Depositi coesivi

La distribuzione della resistenza p offerta dal terreno lungo il fusto del palo soggetto a carichi trasversali, ottenuto su basi teoriche e sperimentali ([21]), è quella riportata nella figura seguente.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

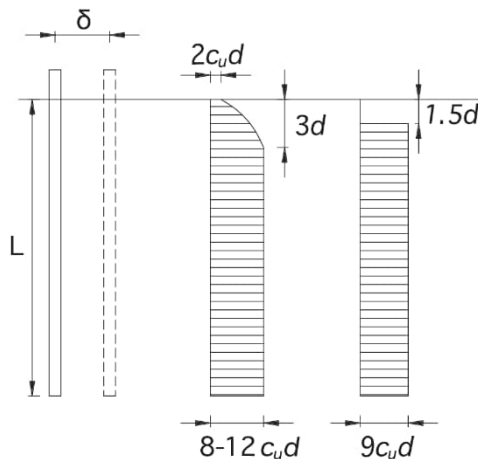


Figura 24: Distribuzione della resistenza limite lungo il fusto del palo soggetto a forze orizzontali in condizioni non drenate (Broms)

Al fine di determinare la resistenza trasversale di calcolo del palo, nella teoria di Broms si adotta un diagramma semplificato con reazione nulla fino a $(1,5 \cdot d)$ e quindi costante con la profondità con valore $(9 \cdot c_u \cdot d)$. Le espressioni analitiche relative ai possibili meccanismi di collasso del sistema palo-terreno sono di seguito riportate:

palo corto $H = 9 c_u d^2 \left(\frac{L}{d} - 1,5 \right)$

palo intermedio $H = -9 c_u d^2 \left(\frac{L}{d} + 1,5 \right) + 9 c_u d^2 \sqrt{2 \left(\frac{L}{d} \right)^2 + \frac{4}{9} \frac{M_y}{c_u d^3} + 4,5}$

palo lungo $H = -13,5 c_u d^2 + c_u d^2 \sqrt{182,25 + 36 \frac{M_y}{c_u d^3}}$

dove:

- H = carico limite orizzontale del palo;
- c_u = resistenza non drenata del terreno;
- M_y = momento di plasticizzazione del palo;
- L = lunghezza del palo;
- d = diametro del palo.

Depositi incoerenti

Per un terreno incoerente si assume che la resistenza opposta dal terreno alla traslazione del palo vari linearmente con la profondità con legge ([22]):

$$p = 3 \cdot k_p \cdot \gamma \cdot z \cdot d$$

in cui:

- k_p = coefficiente di spinta passiva;

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- z = profondità dal piano campagna;
- γ = è il peso dell'unità di volume del terreno (se sottofalda γ').

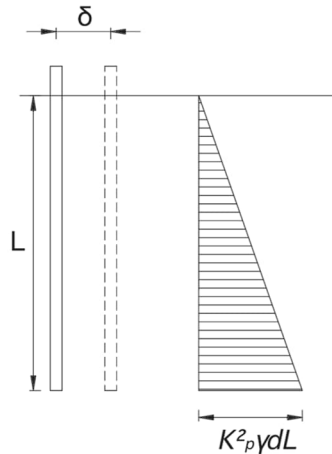


Figura 25: Distribuzione della resistenza limite lungo il fusto del palo soggetto a forze orizzontali in condizioni drenate (Broms)

Le espressioni analitiche relative ai possibili meccanismi di collasso del sistema palo-terreno sono di seguito riportate:

palo corto
$$H = 1,5 k_p \gamma d^3 \left(\frac{L}{d} \right)^2$$

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

palo lungo
$$H = k_p \gamma d^3 \sqrt{\left(3,676 \frac{M_y}{k_p \gamma d^4} \right)^2}$$

9.4.1.2 Verifica a carico limite orizzontale - Estensione della Teoria di Broms

Nel presente paragrafo si riporta la metodologia proposta da De Simone [20] che, partendo dalle soluzioni formulate da Broms, estende tale metodologia a pali la cui testa è posta ad una generica profondità dal piano campagna.

Tale metodologia, partendo da quella proposta da Broms, permette di tener in conto dei seguenti aspetti al fine di determinare la resistenza trasversale di calcolo del singolo palo:

- posizione della testa del palo rispetto al piano campagna;
- legge di variazione della stessa resistenza ultima in funzione della profondità.

La testa del palo può assumere qualsiasi posizione rispetto al piano campagna, sia nel caso di palo libero di ruotare in testa sia nel caso di palo impedito di ruotare.

Si definisce come eccentricità $e = (L - D)$, la differenza tra la lunghezza del palo (L) e la profondità della base del palo rispetto al piano campagna (D). Tale differenza può assumere valore negativo o positivo a seconda se la testa del palo è posta al di sopra o al di sotto del piano campagna.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Nel caso di eccentricità negativa, l'effetto dell'approfondimento della testa del palo si trasforma in un contributo aggiuntivo di resistenza, funzione dell'approfondimento stesso.

Considerando i tre meccanismi di collasso del sistema palo-terreno (palo corto, palo intermedio e palo lungo) previsti dalla teoria di Broms, è possibile determinare, attraverso l'equilibrio delle forze, il valore della resistenza limite in funzione del valore dell'eccentricità e .

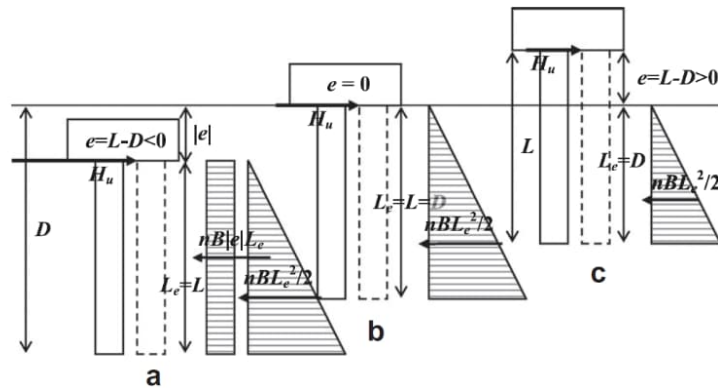


Figura 26: Meccanismi di collasso a palo corto del sistema palo-terreno

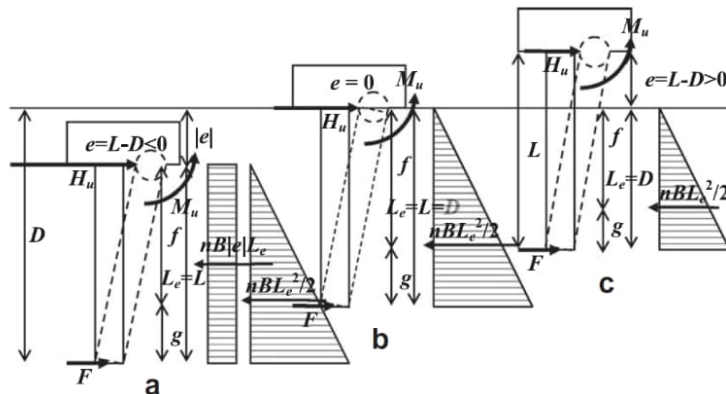


Figura 27: Meccanismi di collasso a palo intermedio del sistema palo-terreno

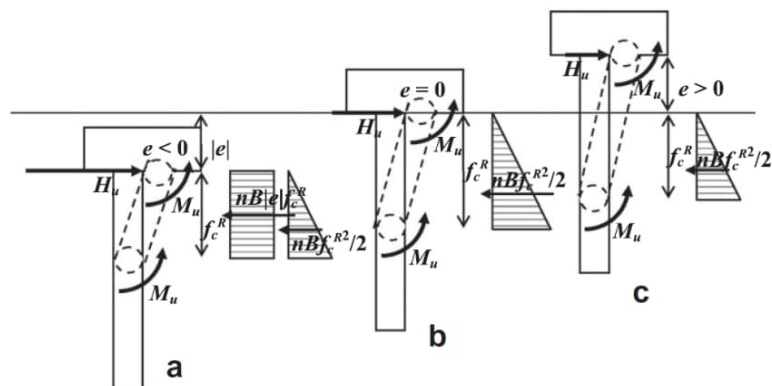


Figura 28: Meccanismi di collasso a palo lungo del sistema palo-terreno

Per le formulazioni di dettaglio si rimanda alla pubblicazione in questione [20].

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

9.5 Analisi agli stati limite nei confronti dei carichi trasversali

Lo studio dell'interazione palo-terreno per un palo soggetto ad un'azione di carico orizzontale viene effettuato attraverso un modello basato sulla schematizzazione del terreno come un mezzo alla Winkler, ovvero mediante molle indipendenti fra di loro e linearmente elastiche.

Nel seguito si fa riferimento alla teoria di Matlock e Reese che si basa sul modello di suolo alla Winkler, caratterizzato da un modulo di reazione orizzontale del terreno (E_{MR}) definito come il rapporto fra la reazione del terreno per unità di lunghezza del palo (p) ed il corrispondente spostamento orizzontale (y):

$$E_{MR} = p / y \quad [FL^{-2}]$$

Si osservi che, definito K_h [FL^{-3}] il coefficiente di reazione orizzontale, per un palo di diametro D si ha:

$$E_{MR} = K_h \cdot D$$

L'andamento del modulo di reazione orizzontale con la profondità è funzione principalmente del tipo di terreno.

9.5.1 Modulo di reazione orizzontale

La determinazione del coefficiente di reazione orizzontale si effettua secondo quanto di seguito specificato distinguendone il calcolo nella condizione di depositi incoerenti ed in quella di depositi coesivi.

Depositati coesivi

Si assume un valore costante del coefficiente di reazione orizzontale. Per la sua valutazione, si fa riferimento alla relazione seguente (Elson, [25]):

$$K_h = 200 \div 400 \cdot c_u / D \quad [FL^{-3}]$$

Nella valutazione del coefficiente di reazione si farà riferimento allo specifico valore della coesione non drenata ricavato.

Depositati incoerenti

Si assume, in genere, una legge di variazione lineare con la profondità caratterizzata dai seguenti parametri:

$$K_h = n_h \frac{z}{D} \quad [FL^{-3}]$$

$$E_{MR} = E_{MR,0} + n_h z \quad [FL^{-2}]$$

dove:

K_h = coefficiente di reazione orizzontale del terreno;

$E_{MR,0}$ = valore del modulo di reazione a testa palo;

n_h = gradiente del coefficiente di reazione orizzontale del terreno;

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

z = profondità a partire dalla sommità del palo;

D = diametro del palo.

La determinazione del gradiente del modulo reazione del terreno può essere effettuata, in funzione dello stato di addensamento e dalla presenza o meno della falda, secondo l'espressione seguente (Viggiani, [24]):

$$n_h = \frac{A \cdot \gamma}{1,35}$$

Nella relazione sopra riportata deve essere considerato il valore del peso di volume immerso γ' se sottofalda.

Tabella 18: Campo di variabilità del gradiente n_h e del parametro A in funzione dello stato di addensamento per terreni incoerenti [24]

Stato di addensamento	Sciolto	Medio	Denso
Campo dei valori di A	100÷300	300÷1000	1000÷3000
Valore consigliato di A	200	600	1500
n_h (N/cm ³), sabbie non immerse	2,5	7,5	20
n_h (N/cm ³), sabbie immerse	1,5	5	12

Per un utilizzo della precedente tabella coerente con i dati di indagine si è fatto riferimento ai valori di N_{SPT} ottenuti in un ambito di profondità compresa tra il p.c. e una profondità pari a 10 volte il diametro del palo (assumendo il valore medio di questo ambito di profondità).

Per le prove SPT a rifiuto si assume un valore convenzionale $N_{SPT} = 50$.

Facendo riferimento alle relazioni di Kulhawy e Mayne (1990) si può fare riferimento a terreni “sciolti” per valori di $N_{SPT} < 10$, a terreni di “medio” addensamento per valori di N_{SPT} tra 10 e 30 a terreni densi o molto densi per valori di $N_{SPT} > 30$.

I terreni vengono considerati “immersi” quando la profondità della falda misurata nei piezometri è posta a profondità rispetto alla testa del palo inferiore a 2-3 volte il diametro del palo.

Nel caso di terreni incoerenti, K_h può essere assunto variabile linearmente con la profondità e si assume l'espressione (Matlock e Reese, 1956) con i valori di n_h assunti come:

- Rilevato esistente = 4000 kN/m³;
- Sabbia limosa = 4000 kN/m³;
- Sabbia e ghiaia = 10000 kN/m³.

Per terreni coesivi si adotta la relazione con la coesione non drenata prima descritta, adottando un coefficiente di 400 per la stima del K_h a partire dal valore di coesione non drenata.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

9.5.2 Valutazione del momento adimensionale lungo il fusto del palo

Per ricavare il momento adimensionalizzato lungo il fusto del palo si ricorre al metodo di Matlock e Reese (1956), i quali utilizzando il metodo delle differenze finite, hanno risolto il problema del palo soggetto ad un carico orizzontale, mediante l'impiego di parametri adimensionali, ottenuti esprimendo l'equazione della linea elastica attraverso equazioni differenziali funzione del tipo di sollecitazione agente.

Nel caso in esame, considerando l'andamento del modulo di reazione orizzontale palo-terreno (E_{MR} , valutato in accordo al precedente paragrafo), si ricorre al metodo degli elementi finiti, adimensionalizzando la soluzione come segue:

$$M_0 = \alpha_m \cdot H_0$$

$$M(z) = M_0 \cdot M_{ad}(z)$$

essendo:

- H_0 = azione tagliante in testa palo [F];
- M_0 = azione flettente, conseguente ad H_0 , in testa al palo;
- α_m = rapporto momento-taglio in testa palo nell'ipotesi di rotazione impedita [L];
- M_{ad} = momento flettente adimensionale lungo il fusto del palo.

I valori del coefficiente α da utilizzare per le palificate di fondazione sono riportati nel capitolo relativo.

9.6 Cedimento del palo singolo e della palificata e cedimenti differenziali tra le pile

9.6.1 Cedimento del palo singolo

La valutazione del cedimento del palo singolo viene condotta attraverso lo schema di suolo elastico indefinito (Poulos & Davis, 1968) che porta alla soluzione in forma chiusa derivata dalla teoria dell'elasticità e mette in relazione il cedimento del palo singolo (δ) con la lunghezza del palo (L), il carico verticale agente alla testa del palo (N) e con il modulo di deformazione medio (E) del semispazio indefinito:

$$\delta = \frac{\beta \cdot N}{E \cdot L}$$

Il coefficiente di influenza adimensionale β risulta funzione del rapporto L/D e può essere valutato come segue:

$$\beta = 0,5 + \log\left(\frac{L}{D}\right) \quad [\text{Poulos \& Davis, 1981}]$$

Il modulo elastico E è quello dello strato di terreno in cui è immorsato il palo, o nel caso in cui siano presenti più strati, quello di un unico strato omogeneizzato (tale valore sarà stimato in base alla media pesata dei moduli elastici dei vari strati di terreno che interessano lo sviluppo del palo). Dunque, ove il modulo del terreno subisca variazione con la lunghezza del palo, il modulo medio del terreno può essere valutato come segue:

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

$$E_m = \left(\frac{1}{L}\right) \sum_{i=1}^n E_i \cdot h_i$$

in cui E_i e h_i sono rispettivamente il modulo e lo spessore dello strato i -esimo.

9.6.2 Cedimento della palificata

Il cedimento medio della palificata può essere espresso come il prodotto del cedimento del palo isolato, a parità di carico medio, per un coefficiente di amplificazione R_s legato alla geometria della fondazione. In modo equivalente si può fare riferimento al parametro $R_g = R_s/n$ (coefficiente di riduzione del gruppo) in cui n è il numero di elementi della palificata:

$$\delta_p = R_s \cdot \delta = n \cdot R_g \cdot \delta$$

Facendo riferimento a Randolph & Clancy (1993) e Mandolini (1994), si può individuare una correlazione tra R_g ed il parametro:

$$R = \sqrt{\frac{n \cdot i}{L}}$$

in cui con i è l'interasse dei pali.

L'evidenza sperimentale del comportamento di gruppi di pali in vera grandezza permette di stimare il parametro R_g attraverso la relazione seguente (Mandolini et al., 1997):

$$R_g = \frac{0,5}{R} + \frac{0,13}{R^2}$$

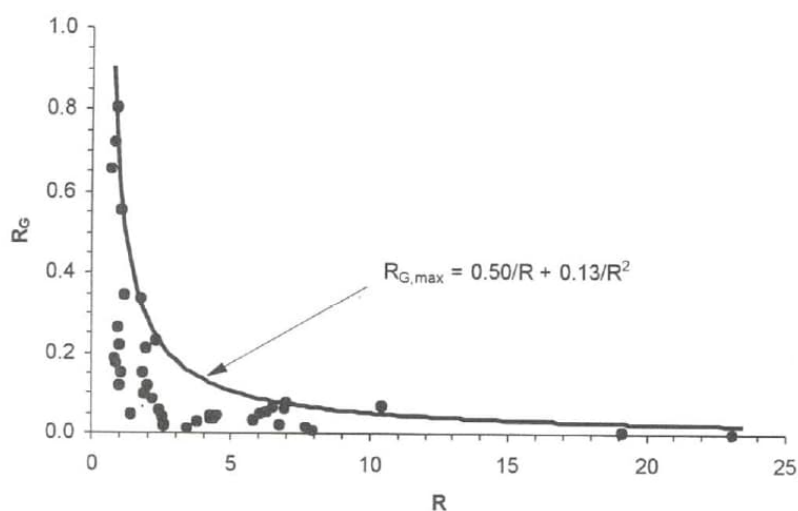


Figura 29: Dati empirici per il cedimento di fondazioni su pali

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

9.6.3 Cedimenti differenziali tra le pile

Come riportato al §6.4.3.2 di [1], deve essere verificato che la palificata, soggetta alle azioni caratteristiche, non subisca eccessivi cedimenti (o sollevamenti) ed eccessivi spostamenti trasversali, tali da risultare non compatibili con i requisiti prestazionali della stessa e della struttura in elevazione.

La geometria della fondazione (numero, lunghezza, diametro e interasse dei pali) deve essere stabilita nel rispetto dei requisiti prestazionali sopracitati, tenendo opportunamente conto degli effetti di interazione tra i pali e considerando i diversi meccanismi di mobilitazione della resistenza laterale rispetto alla resistenza alla base, soprattutto in presenza di pali di grande diametro.

9.7 Dimensionamento strutturale del singolo palo

Per quanto riguarda il dimensionamento strutturale del palo, si fa riferimento a quanto riportato al §7.2.5 di [1] di cui se ne riporta un estratto nella figura seguente:

FONDAZIONI SU PALI
I pali in calcestruzzo devono essere armati, per tutta la lunghezza, con una armatura longitudinale in percentuale non inferiore allo 0,3% dell'area della sezione trasversale del palo e un'armatura trasversale costituita da staffe o da spirali di diametro non inferiore a 8 mm, passo non superiore a 8 volte il diametro delle barre longitudinali.
Qualora non fosse possibile escludere il raggiungimento della capacità dei pali, devono essere soddisfatte le seguenti condizioni:
• se la capacità è raggiunta in prossimità della testa del palo, deve considerarsi una zona dissipativa estesa fino a una profondità pari ad almeno dieci volte il diametro del palo; se la capacità è raggiunta in profondità, per esempio in corrispondenza di contatti tra strati di terreno di rigidità molto diversa (§7.11.5.3.2), deve considerarsi una zona dissipativa a cavallo dei contatti avente estensione pari ad almeno cinque diametri; • nelle zone dissipative le sezioni devono essere progettate per esibire un comportamento duttile per effetto delle azioni di calcolo;
In tali zone dissipative l'armatura longitudinale deve avere area non inferiore all'1% dell'area della sezione trasversale del palo, mentre l'armatura trasversale deve essere costituita da staffe singole di passo non superiore a 6 volte il diametro delle barre longitudinali.

Figura 30: Disposizione e quantitativi minimi delle armature per pali di fondazione ([1])

I quantitativi minimi di armatura, al fine di soddisfare le NTC, sono i seguenti:

Tabella 19: Quantitativi minimi di armatura per pali di fondazione

Quota	Palo 1200	
	Armatura minima	% di armatura
Primi 10D da testa palo	26Φ24	1,04
Oltre i 10D da testa palo	18Φ16	0,32

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

9.8 Valutazione dei parametri di resistenza dei terreni in condizioni di liquefazione

Nel presente paragrafo si descrivono i criteri adottati per la valutazione dei parametri di resistenza dei terreni ai fini del dimensionamento dei pali di fondazione in condizioni sismiche, con particolare riferimento ai fenomeni di liquefazione.

La valutazione dei parametri geotecnici per il dimensionamento dei pali in condizioni sismiche è condotta in conformità alle NTC 2018 (§6.2.2 e §7.11), in cui si richiede la valutazione degli effetti della liquefazione e la conseguente riduzione dei parametri di resistenza.

9.8.1 Resistenza residua dei terreni liquefatti

In presenza di terreni suscettibili a liquefazione, la perdita di resistenza al taglio comporta una significativa riduzione della capacità portante laterale e assiale dei pali.

Pertanto, risulta necessario adottare parametri di resistenza residua non drenata rappresentativi dello stato post-liquefazione, secondo quanto proposto in letteratura tecnica, tra cui Kramer e Wang (2015) [30]:

$$S_r = 2116 \cdot \exp \left(-8.444 + 0.109(N_1)_{60} + 5.379 \left(\frac{\sigma'_v}{2116} \right)^{0.1} \right)$$

Figura 31: Formulazione di Kramer e Wang, 2015 per la stima della resistenza residua dei terreni liquefacibili [30]

In cui:

- $(N_1)_{60}$ = è il numero di colpi SPT corretto per energia e normalizzato rispetto alla tensione efficace verticale di riferimento;
- σ'_v = è la tensione verticale efficace in sito.

La formulazione sopra riportata:

- non richiede correzioni per contenuto fine;
- è coerente con l'approccio prestazionale richiesto dalle norme, che ammettono l'uso di correlazioni empiriche qualora adeguatamente validate.

9.8.2 Definizione dei parametri nei terreni non liquefatti

Per i terreni che non risultano suscettibili a liquefazione, i parametri di resistenza sono definiti secondo le condizioni di drenaggio e la natura del terreno:

- Terreni coesivi: analisi in condizioni non drenate con utilizzo della resistenza S_u (assumendo $\phi=0$);

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- Terreni granulari o a comportamento intermedio: utilizzo dei parametri efficaci c' e ϕ' .

9.8.3 Applicazione ai modelli di interazione terreno-palo

Nelle analisi di risposta sismica dei pali, i parametri definiti vengono implementati distinguendo chiaramente tra livelli liquefatti e non liquefatti:

- nei livelli liquefatti si utilizza la resistenza residua;
- nei livelli non liquefatti si mantengono i parametri geotecnici standard.

Per la modellazione dell'interazione laterale terreno-palo, si è fatto riferimento alla teoria di Matlock e Reese che si basa sul modello di suolo alla Winkler, sostituendo la resistenza non drenata con quella residua nei livelli liquefatti.

Tale procedura è coerente con le indicazioni di EN 1998-5, che richiede di considerare esplicitamente la degradazione delle proprietà meccaniche del terreno nelle verifiche sismiche.

9.8.4 Sintesi dei parametri residui caratteristici

I parametri residui adottati vengono riassunti per ciascun livello stratigrafico:

Tabella 20: Tabella riassuntiva parametri residui caratteristici

SP DX	Sr media	SP SX	Sr media
	[kPa]		[kPa]
Rilevato esistente	12	Rilevato esistente	15
Sabbia limosa	41	Sabbia limosa	21
Sabbia e ghiaia	48	Sabbia e ghiaia	84

Il potenziale di liquefazione è stato valutato esclusivamente per i terreni che presentano caratteristiche suscettibili al fenomeno, limitatamente agli strati ubicati entro i primi 20 m di profondità dal piano campagna.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

10. VERIFICA DELLE SPALLE DEL PONTE

In questo capitolo si riportano i risultati delle verifiche eseguite sulle spalle del ponte. Nello specifico, saranno riportati gli esiti delle calcolazioni inerenti alla sola spalla fissa che, nonostante più bassa, è quella soggetta a condizioni di carico più gravose. Si ricorda a tal proposito che la spalla in questione è quella su cui grava l'intero carico sismico longitudinale dall'impalcato.

La spalla fissa possiede un muro frontale spesso 2.10 m, alto 2.40 m e un muro paraghiaia alto circa 1.80 m e spesso 0.40 m. I muri di risvolto possiedono un'altezza variabile, uno spessore di 0.80 m da estradosso fondazione a quota piano appoggi e di 0.40 m dal piano appoggi alla sezione sommitale. La platea di fondazione ha dimensioni in pianta di 9.00×17.00 m ed è spessa 2.0 m. I pali sono su cui si fonda la platea sono in totale 15, hanno diametro di 1200 mm e lunghezza di 25 m.

All'interno del capitolo sono riportati i risultati delle calcolazioni svolte per ciascuno degli elementi strutturali costituenti la spalla:

- Platea;
- Muro frontale;
- Muro andatore;
- Muro paraghiaia.

Le verifiche sono state eseguite considerando le combinazioni statiche (SLE, SLU) riportate in tabella seguente.

I coefficienti di combinazione con segno negativo sono indicativi del fatto che l'azione a cui si riferiscono può agire sulla struttura nei due versi della stessa direzione: il vento può agire lungo Y e lungo -Y e la temperatura sia in allungamento che in accorciamento dell'impalcato (analoghe considerazioni possono essere fatte per la frenatura e gli attriti vincolari). In questo caso la combinazione delle sollecitazioni avviene considerando la configurazione peggiore far le due.

Table 12. Tabella 21 – Coefficienti di combinazione delle azioni (statica)

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Combinazione [-]	AZIONE				
	Peso proprio (Spalla/Impalcato)	Permanenti portati (Impalcato)	Peso rinterro (-)	Spinta statica terreno (-)	Traffico_caratteristico (Impalcato)
QP	1.0	1.0	1.0	1.0	0
FREQ	1.0	1.0	1	1.0	0.75
CARATT_0	1.0	1.0	1	1.0	1
CARATT_1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.75
CARATT_2	1.0	1.0	1.0	1.0	0.75
SLU_0	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
SLU_1	1.35	1.35	1.35	1.35	1.0125
SLU_2	1.35	1.35	1.35	1.35	1.0125
SLU_3	1.00	1.00	1.0	1.35	1.35
SLU_4	1.00	1.00	1.0	1.35	1.0125
SLU_5	1.00	1.00	1.0	1.35	1.0125

Combinazione [-]	AZIONE				
	Traffico su terrapieno (-)	Vento (Impalcato)	Temperatura (Impalcato)	Attrito (Impalcato)	Frenatura (su paraghiaia)
QP	0	0	0.5 (-0.5)	1.0 (-1.0)	0.0
FREQ	0.75	0	0.5 (-0.5)	1.0 (-1.0)	0.0
CARATT_0	1	0.6 (-0.6)	0.6 (-0.6)	1.0 (-1.0)	0.0
CARATT_1	0.75	1.0 (-1.0)	0.6 (-0.6)	1.0 (-1.0)	0.0
CARATT_2	0.75	0.6 (-0.6)	0.6 (-0.6)	1.0 (-1.0)	1.0 (-1.0)
SLU_0	1.35	0.9 (-0.9)	0.9 (-0.9)	1.5 (-1.5)	0
SLU_1	1.0125	1.5 (-1.5)	0.9 (-0.9)	1.5 (-1.5)	0
SLU_2	1.0125	0.9 (-0.9)	0.9 (-0.9)	1.5 (-1.5)	1.35 (-1.35)
SLU_3	1.35	0.9 (-0.9)	0.9 (-0.9)	1.5 (-1.5)	0
SLU_4	1.0125	1.5 (-1.5)	0.9 (-0.9)	1.5 (-1.5)	0.0
SLU_5	1.0125	0.9 (-0.9)	0.9 (-0.9)	1.5 (-1.5)	1.35 (-1.35)

Per quanto riguarda la combinazione delle azioni si fa presente quanto segue:

- Combinazione "QP" → Combinazione Quasi Permanente. Combinazione utilizzata per lo svolgimento delle verifiche di stato limite di esercizio riguardanti il controllo delle tensioni e la fessurazione;
- Combinazione "FREQ" → Combinazione Frequente con traffico veicolare quale azione variabile principale. Combinazione utilizzata per lo svolgimento delle verifiche di stato limite di esercizio riguardanti il controllo della fessurazione;
- Combinazione "CARATT_0" → Combinazione Caratteristica con traffico quale azione variabile principale. Combinazione utilizzata per lo svolgimento delle verifiche di stato limite di esercizio riguardanti il controllo delle tensioni;
- Combinazione "CARATT_1" → Combinazione Caratteristica con vento quale azione variabile principale;
- Combinazione "CARATT_2" → Combinazione Caratteristica con frenatura quale azione variabile principale;

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- Combinazione “SLU_0” → Combinazione Fondamentale con traffico quale azione variabile principale. Combinazione utilizzata per lo svolgimento delle verifiche di resistenza allo stato limite ultimo;
- Combinazione “SLU_1” → Combinazione Fondamentale con vento quale azione variabile principale;
- Combinazione “SLU_2” → Combinazione Fondamentale con frenatura quale azione variabile principale;
- Combinazione “SLU_3” → Come SLU_0, ma con coefficiente di combinazione unitario per le sollecitazioni dei carichi permanenti e di peso proprio;
- Combinazione “SLU_4” → Come SLU_1, ma con coefficiente di combinazione unitario per le sollecitazioni dei carichi permanenti e di peso proprio;
- Combinazione “SLU_5” → Come SLU_2, ma con coefficiente di combinazione unitario per le sollecitazioni dei carichi permanenti e di peso proprio.

In modo analogo a quanto fatto per le combinazioni statiche, in tabella seguente si riportano i coefficienti di combinazione impiegati per le combinazioni sismiche.

Table 13. Tabella 22 – Coefficienti di combinazione delle azioni (sismica)

Combinazione [-]	AZIONE				
	Peso proprio (Spalla/Impalcato)	Permanenti portati (Impalcato)	Peso rinterro (-)	Spinta statica terreno (-)	Sovrappinta sismica (terreno)
Sisma_100%X	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Sisma_100%Y	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Sisma_100%Z	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Combinazione [-]	AZIONE				
	Temperatura (Impalcato)	Attrito (Impalcato)	Sisma_X (Spalla/impalcato)	Sisma_Y (Spalla/impalcato)	Sisma_Z (Spalla/impalcato)
Sisma_100%X	0.5 (-0.5)	1.3 (-1.3)	1.0 (-1.0)	0.3 (-0.3)	0.3 (-0.3)
Sisma_100%Y	0.5 (-0.5)	1.3 (-1.3)	0.3 (-0.3)	1.0 (-1.0)	0.3 (-0.3)
Sisma_100%Z	0.5 (-0.5)	1.3 (-1.3)	0.3 (-0.3)	0.3 (-0.3)	1.0 (-1.0)

10.1 Platea

I risultati delle verifiche strutturali eseguite sulla platea di fondazione della spalla sono riportati nella parte conclusiva del paragrafo, mentre qui di seguito si riportano i grafici delle sollecitazioni su di essa gravanti.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

10.1.1 Sollecitazioni di calcolo in combinazione sismica (SLV)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni sismiche calcolate per la platea di fondazione della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale agente lungo l'asse trasversale dell'impalcato (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale agente lungo l'asse longitudinale dell'impalcato (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre della platea disposte trasversalmente all'asse dell'impalcato (se positivo tende le fibre inferiori, se negativo quelle superiori);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre della platea disposte longitudinalmente all'asse dell'impalcato (se positivo tende le fibre inferiori, se negativo quelle superiori);
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano della platea, agente nel piano locale YZ (positivo se rivolto nel verso positivo dell'asse z);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano della platea, agente nel piano locale XZ (positivo se rivolto nel verso positivo dell'asse z).

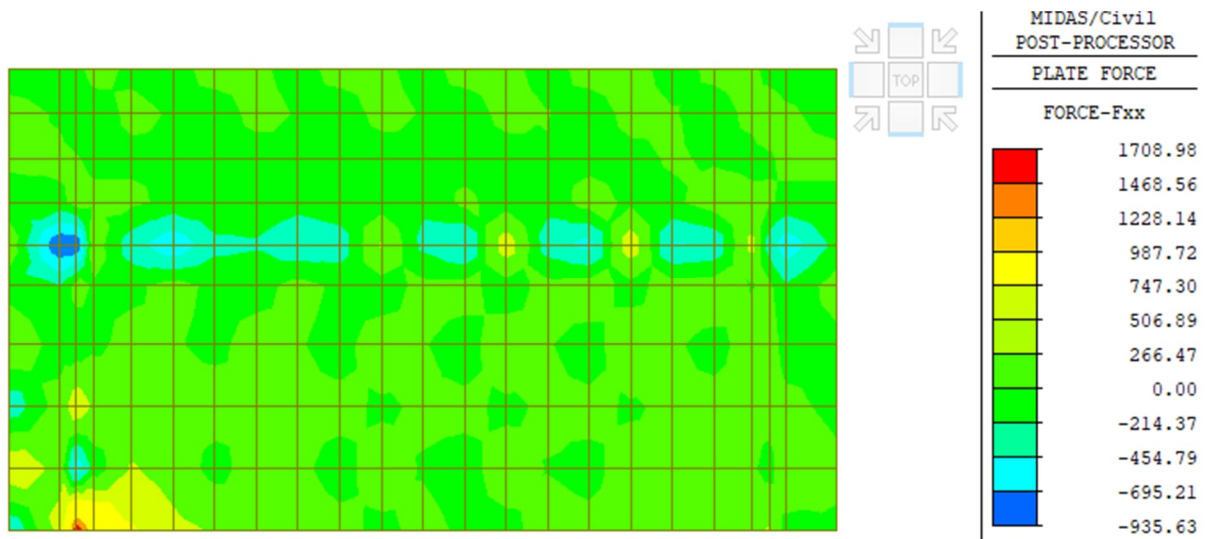


Figura 32 – Involuppo Sollecitazioni SLV platea: F_{xx} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

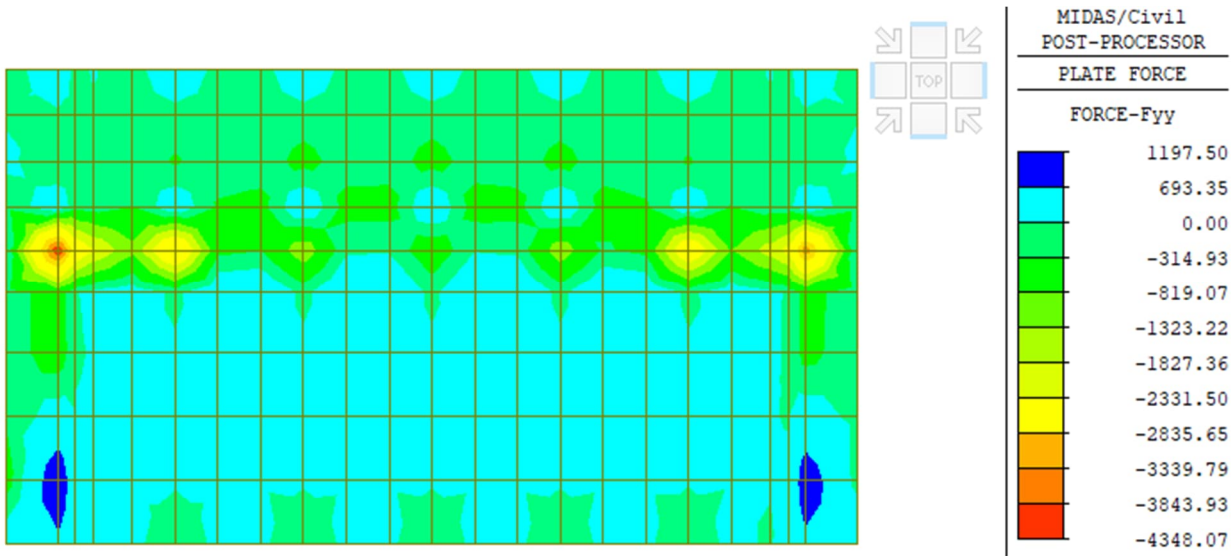


Figura 33 – Involuppo Sollecitazioni SLV platea: F_{yy} [kN/m]

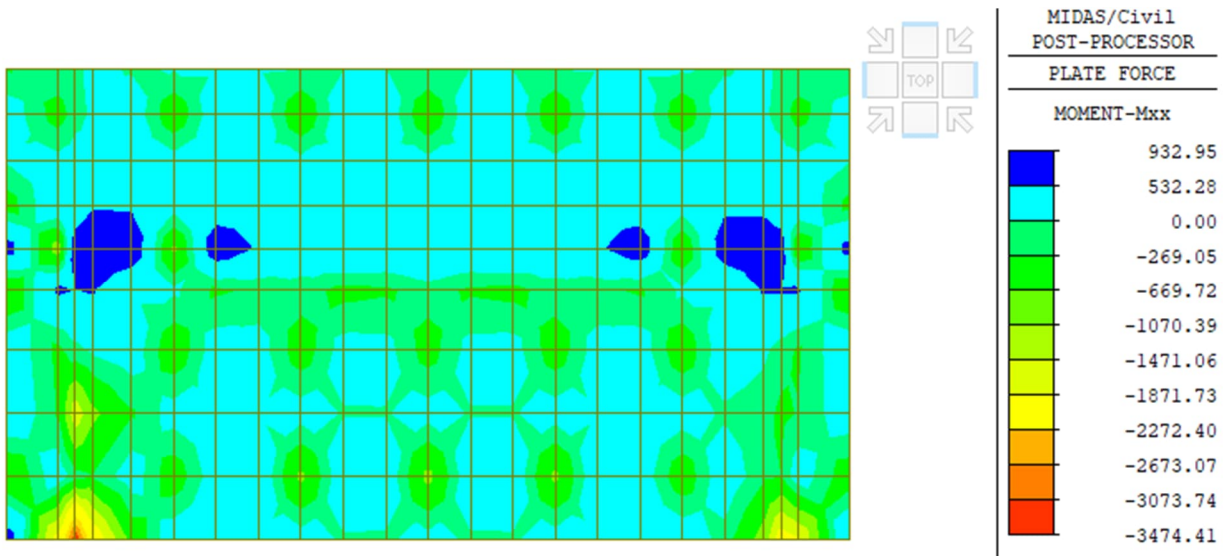


Figura 34 – Involuppo Sollecitazioni SLV platea: M_{xx} [kNm/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

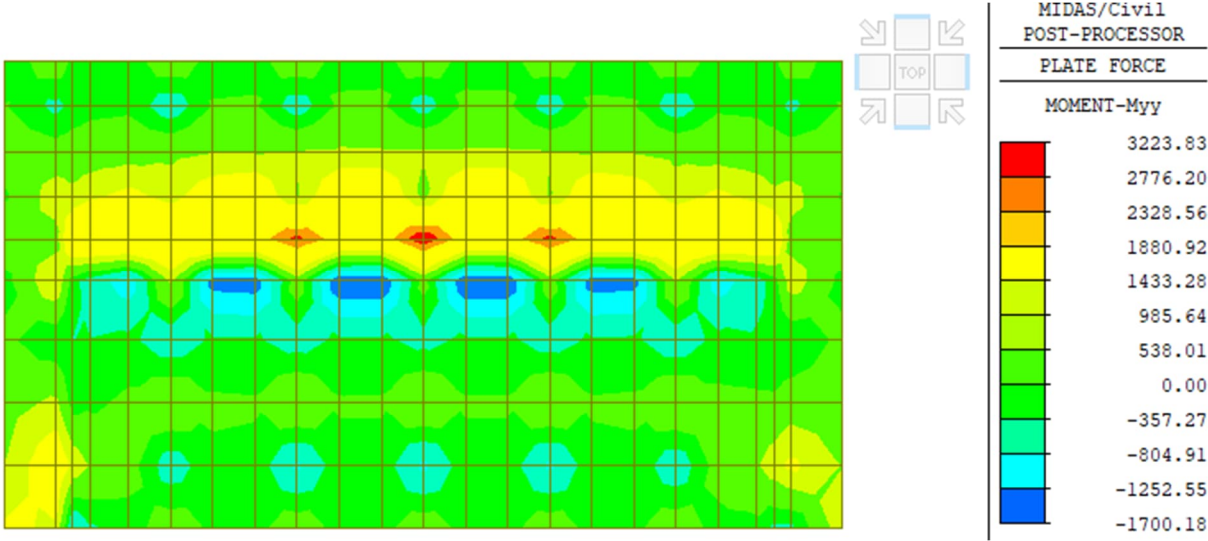


Figura 35 – Involuppo Sollecitazioni SLV platea: M_{yy} [kNm/m]

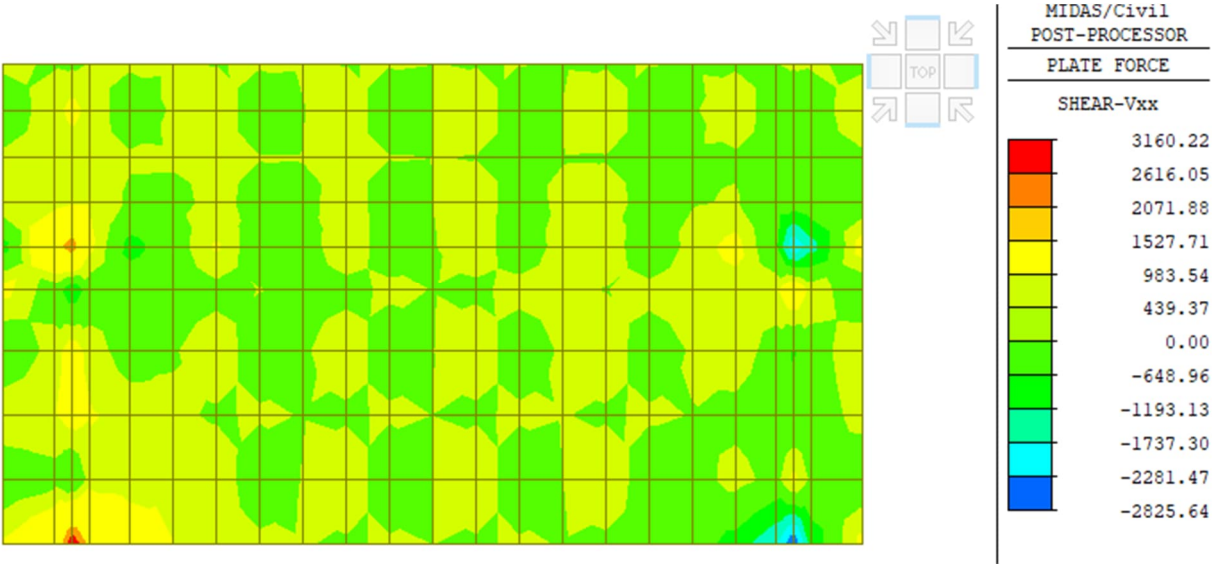


Figura 36 – Involuppo Sollecitazioni SLV platea: V_{xx} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

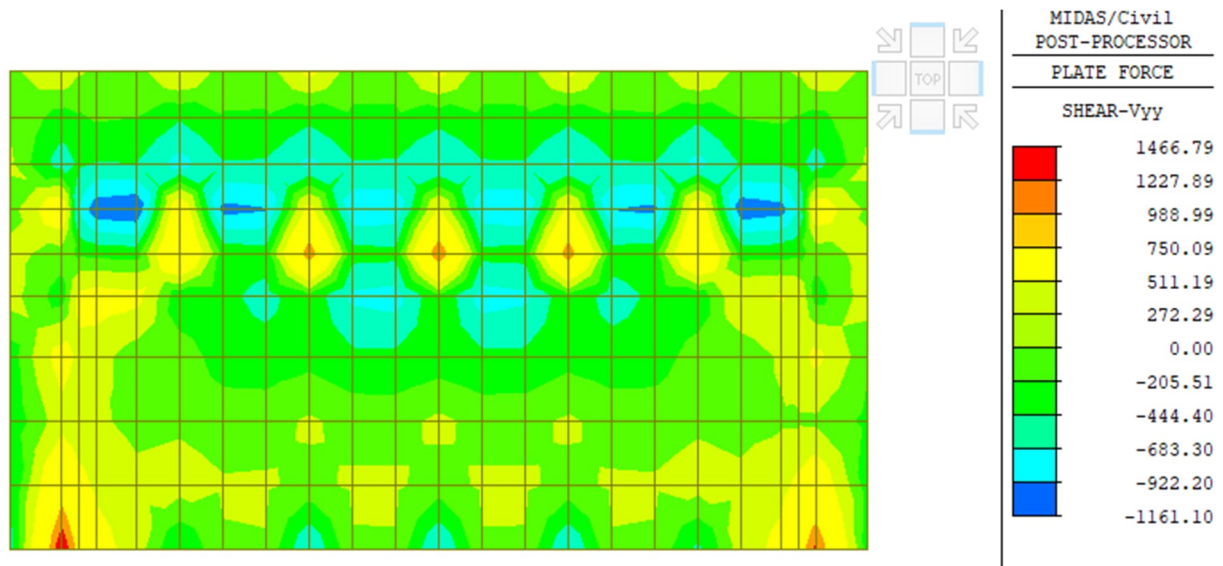


Figura 37 – Involuppo Sollecitazioni SLV platea: V_{yy} [kN/m]

10.1.2 Sollecitazioni di calcolo ultime in combinazione statica (SLU)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni di stato limite ultimo statiche (SLU) calcolate per la platea di fondazione della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale agente lungo l'asse trasversale dell'impalcato (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale agente lungo l'asse longitudinale dell'impalcato (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre della platea disposte trasversalmente all'asse dell'impalcato (se positivo tende le fibre inferiori, se negativo quelle superiori);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre della platea disposte longitudinalmente all'asse dell'impalcato (se positivo tende le fibre inferiori, se negativo quelle superiori);
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano della platea, agente nel piano locale YZ (positivo se rivolto nel verso positivo dell'asse z);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano della platea, agente nel piano locale XZ (positivo se rivolto nel verso positivo dell'asse z).

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

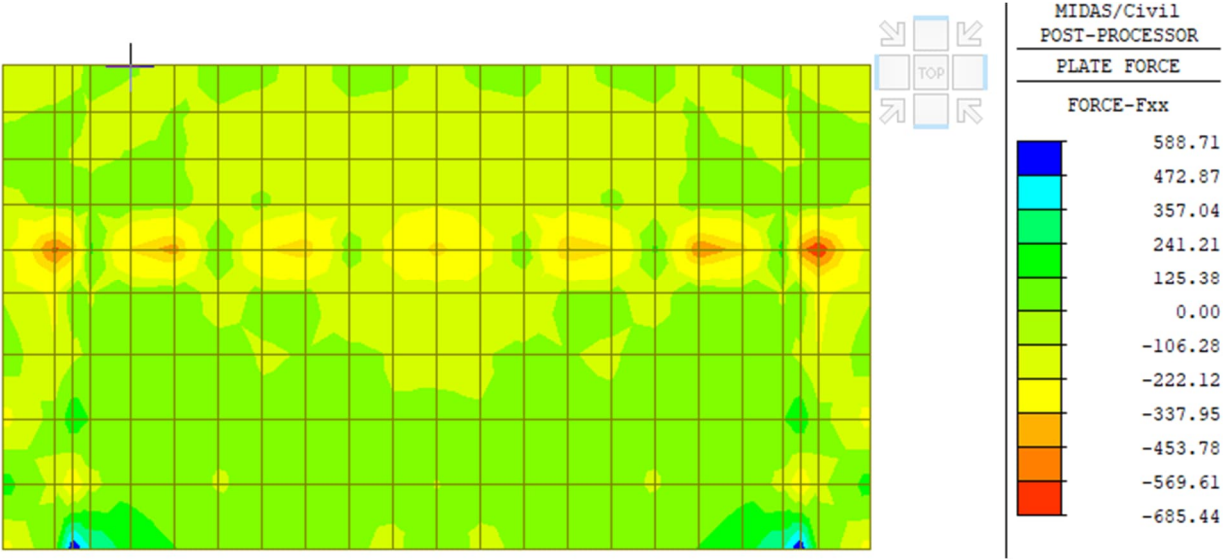


Figura 38 – Involuppo Sollecitazioni SLU platea: F_{xx} [kN/m]

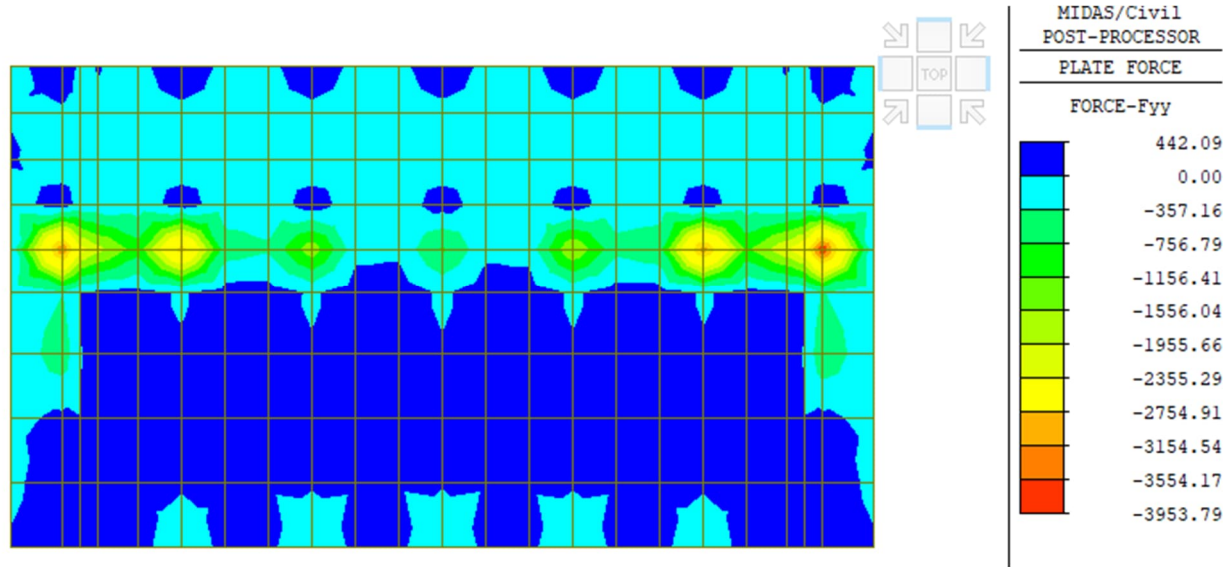


Figura 39 – Involuppo Sollecitazioni SLU platea: F_{yy} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

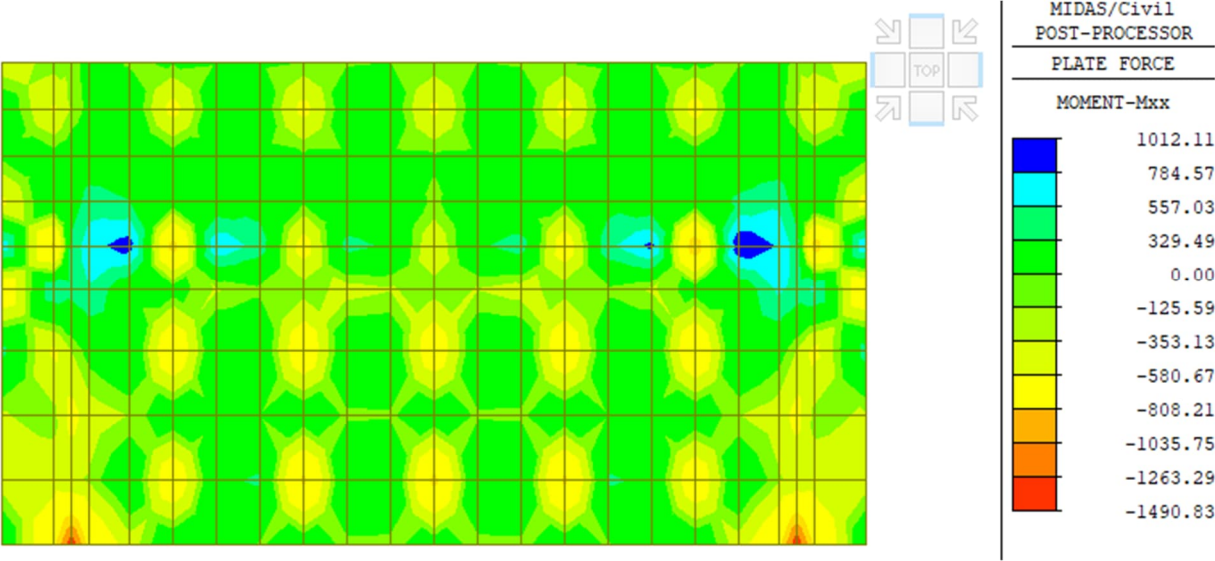


Figura 40 – Inviluppo Sollecitazioni SLU platea: M_{xx} [kNm/m]

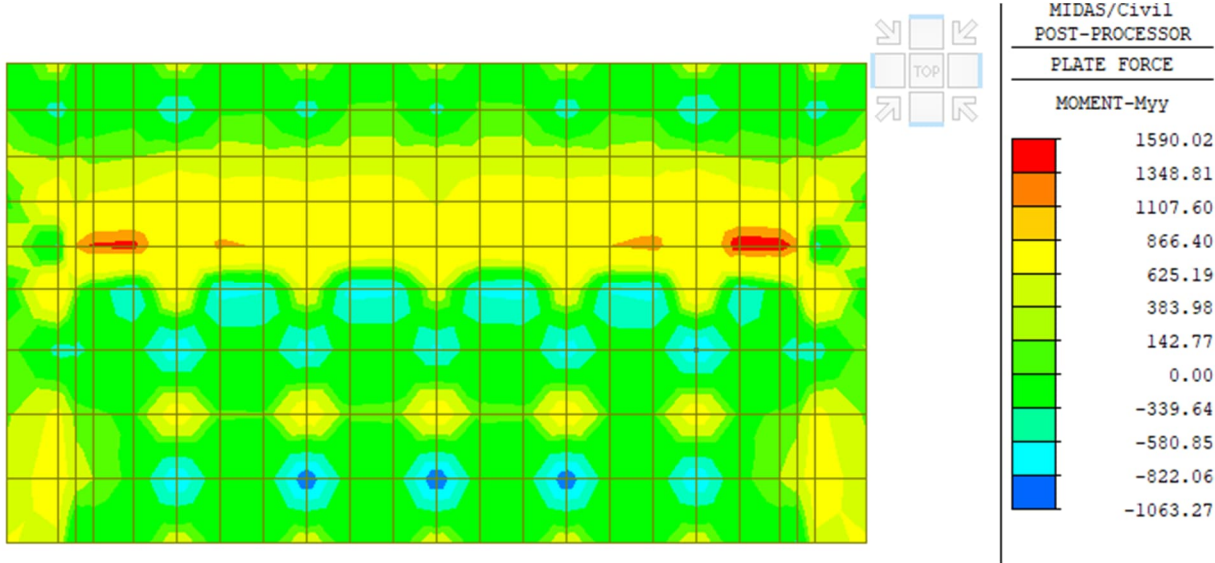


Figura 41 – Inviluppo Sollecitazioni SLU platea: M_{yy} [kNm/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

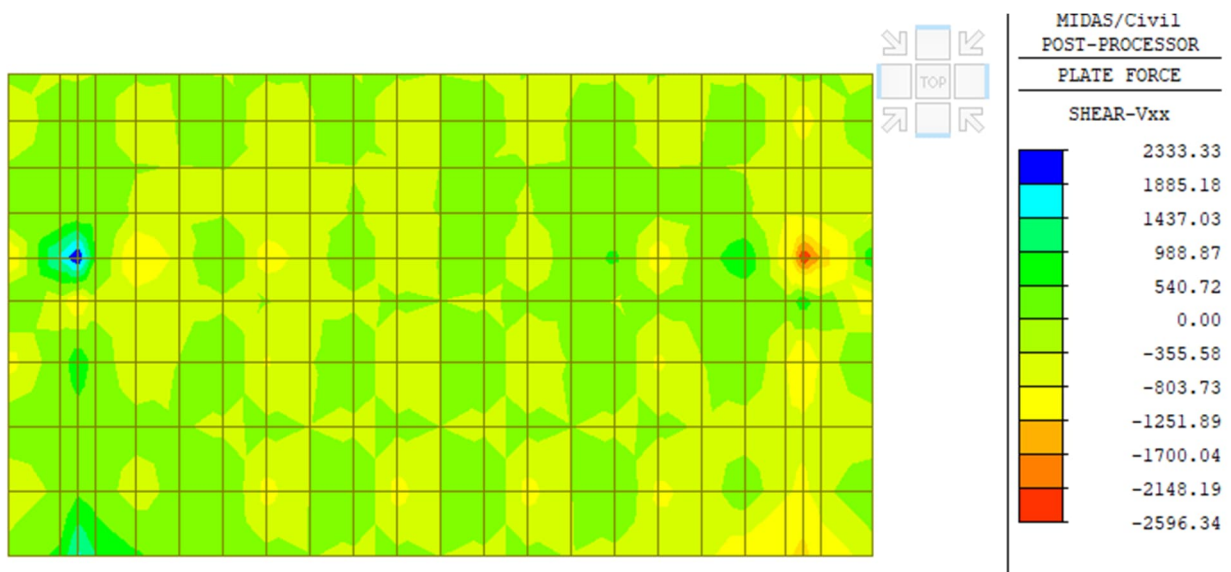


Figura 42 – Involuppo Sollecitazioni SLU platea: V_{xx} [kN/m]

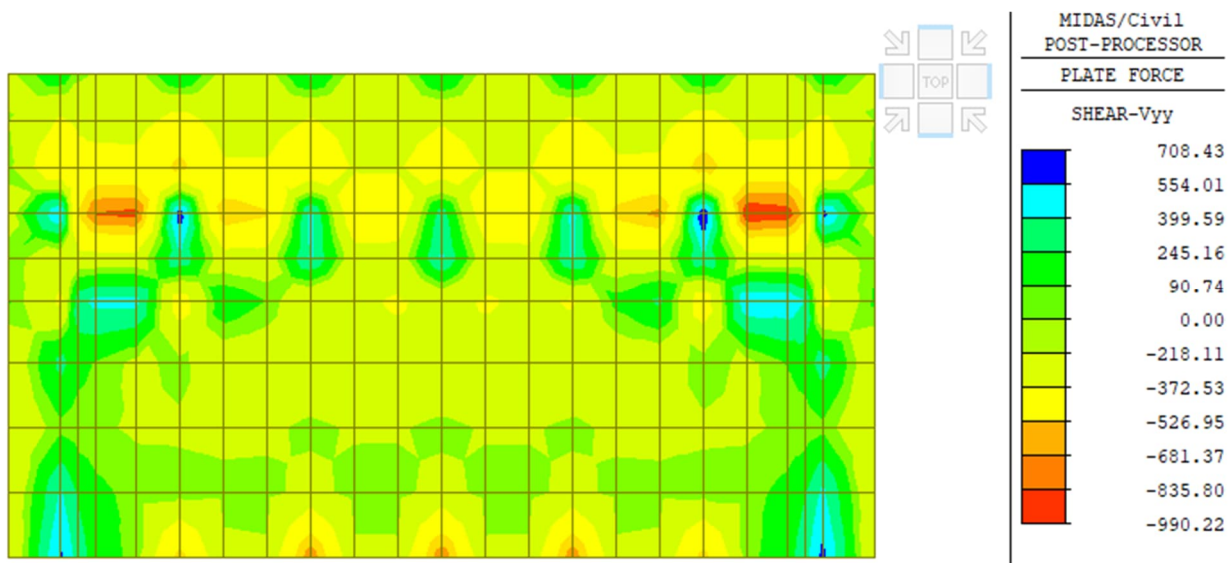


Figura 43 – Involuppo Sollecitazioni SLU platea: V_{yy} [kN/m]

10.1.3 Sollecitazioni in combinazione caratteristica (SLE)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni in combinazione caratteristica (SLE) calcolate per la platea di fondazione della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale agente lungo l'asse trasversale dell'impalcato (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale agente lungo l'asse longitudinale dell'impalcato (se positivo di trazione, se negativo di compressione);

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre della platea disposte trasversalmente all'asse dell'impalcato (se positivo tende le fibre inferiori, se negativo quelle superiori);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre della platea disposte longitudinalmente all'asse dell'impalcato (se positivo tende le fibre inferiori, se negativo quelle superiori)
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano della platea, agente nel piano locale YZ (positivo se rivolto nel verso positivo dell'asse z);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano della platea, agente nel piano locale XZ (positivo se rivolto nel verso positivo dell'asse z).

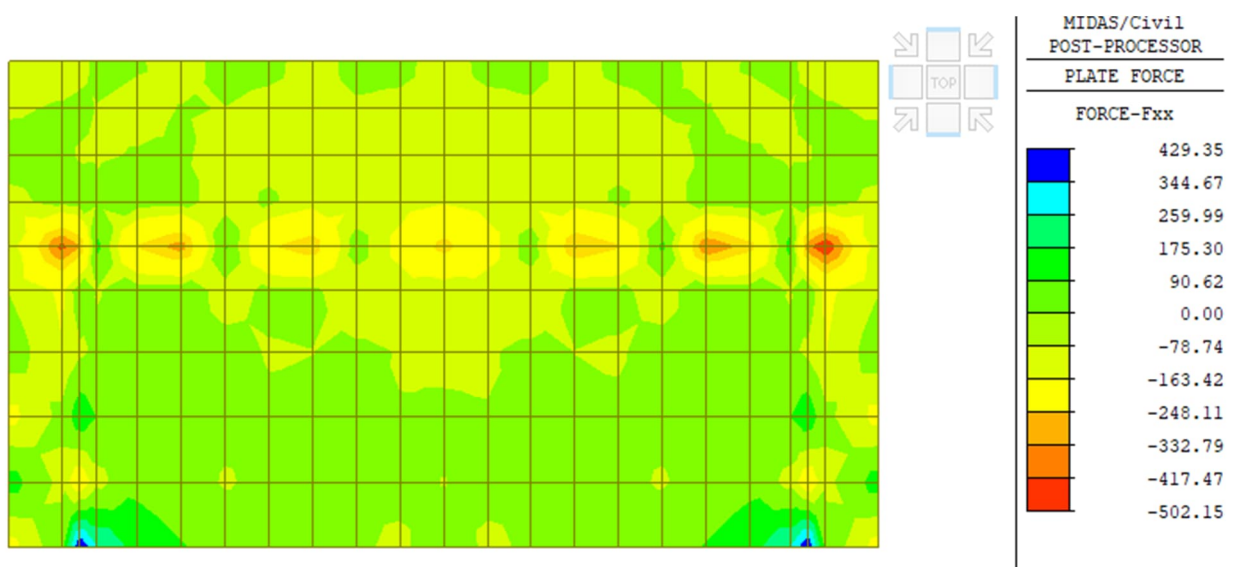


Figura 44 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) platea: F_{xx} [kN/m]

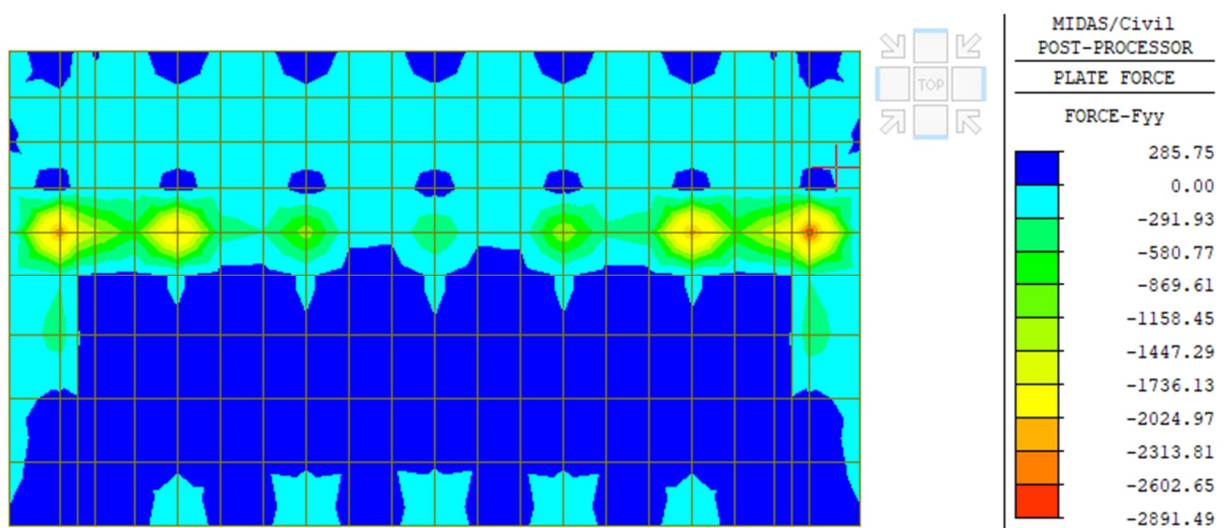


Figura 45 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) platea: F_{yy} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

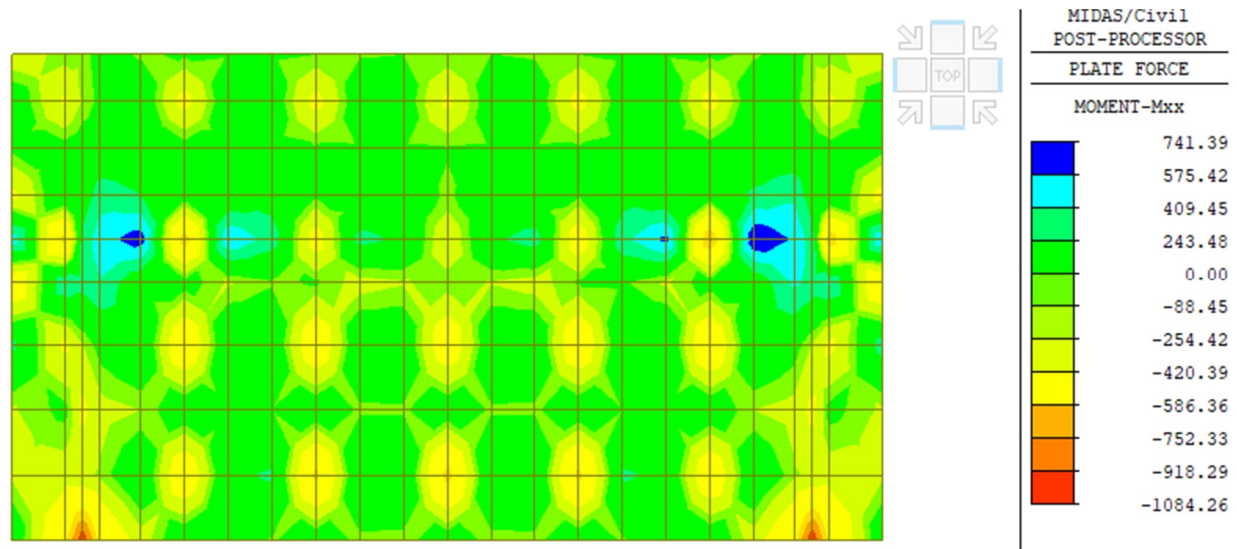


Figura 46 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) platea: M_{xx} [kNm/m]

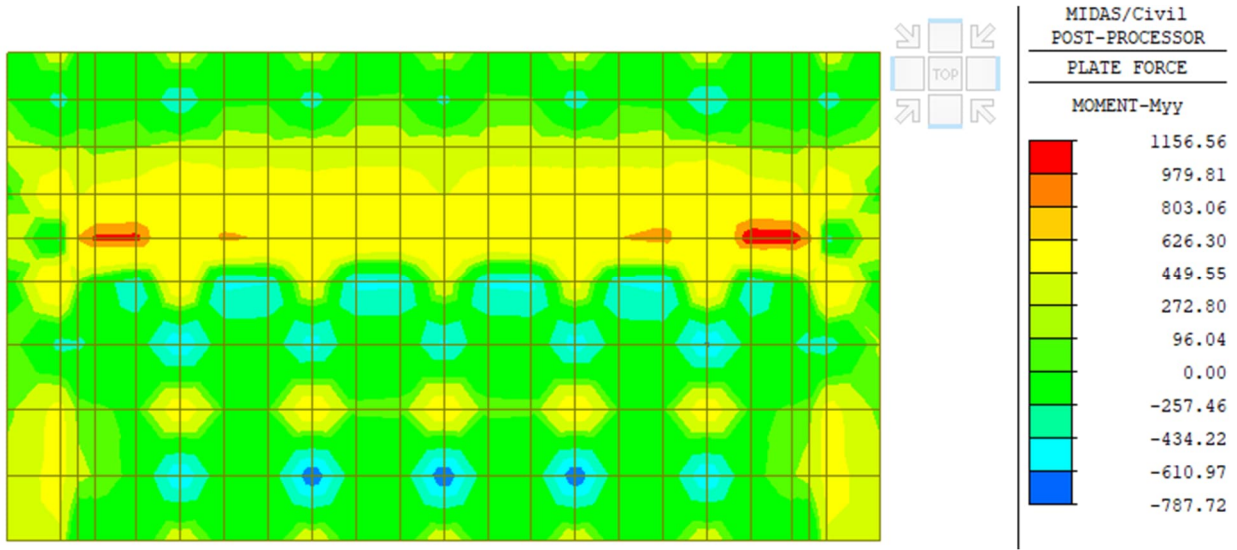


Figura 47 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) platea: M_{yy} [kNm/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

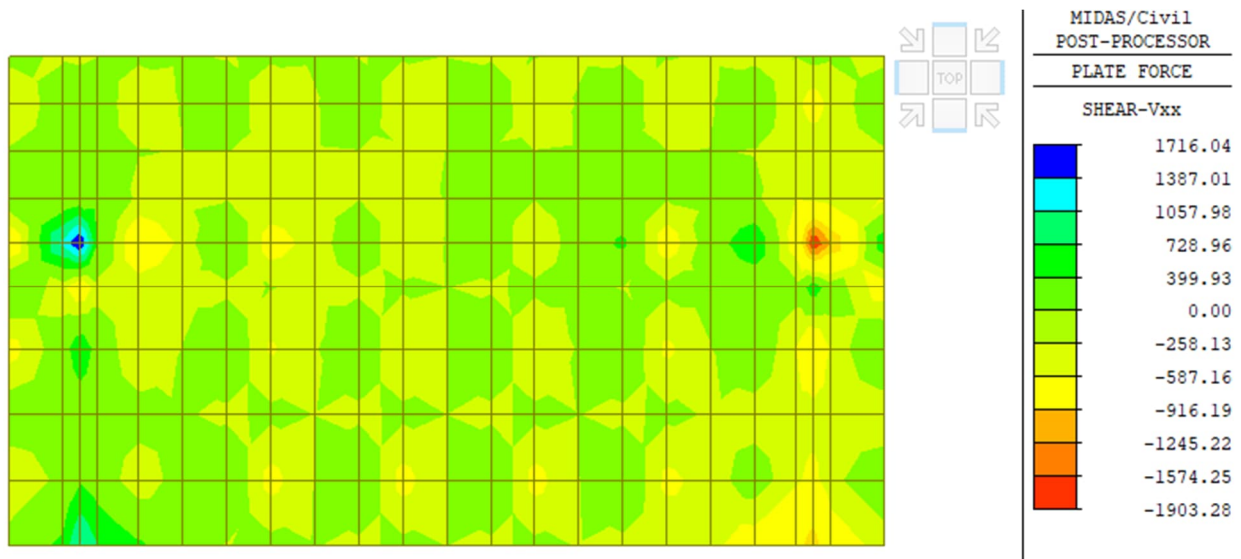


Figura 48 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) platea: V_{xx} [kN/m]

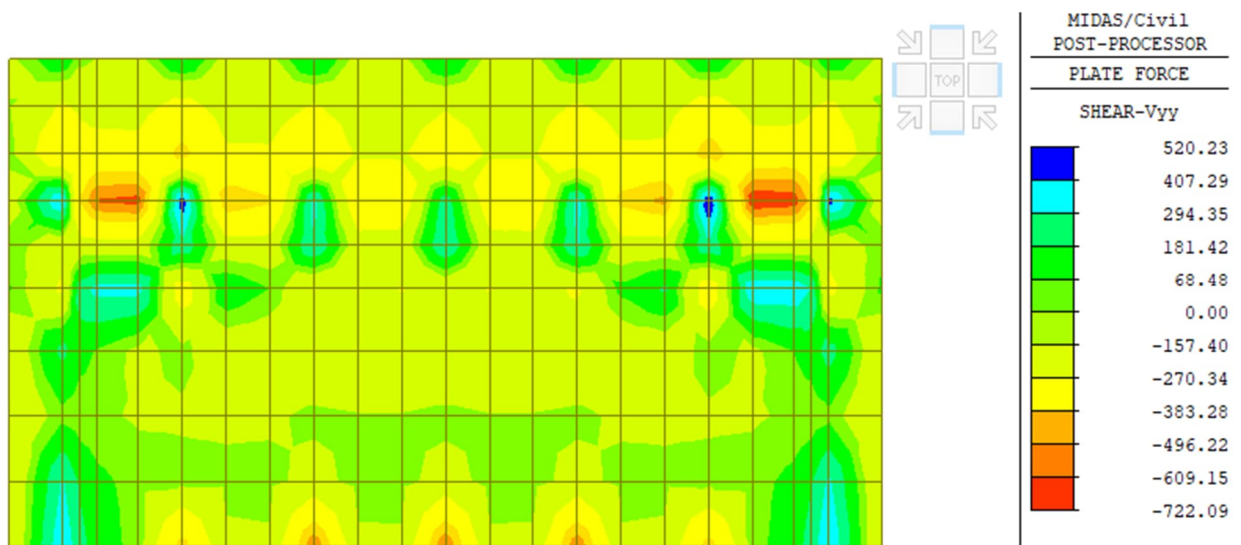


Figura 49 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) platea: V_{yy} [kN/m]

10.1.4 Sollecitazioni in combinazione frequente (SLE)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni in combinazione frequente (SLE) calcolate per la platea di fondazione della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale agente lungo l'asse trasversale dell'impalcato (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale agente lungo l'asse longitudinale dell'impalcato (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre della platea disposte trasversalmente all'asse dell'impalcato (se positivo tende le fibre inferiori, se negativo quelle superiori);

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre della platea disposte longitudinalmente all'asse dell'impalcato (se positivo tende le fibre inferiori, se negativo quelle superiori)
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano della platea, agente nel piano locale YZ (positivo se rivolto nel verso positivo dell'asse z);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano della platea, agente nel piano locale XZ (positivo se rivolto nel verso positivo dell'asse z).

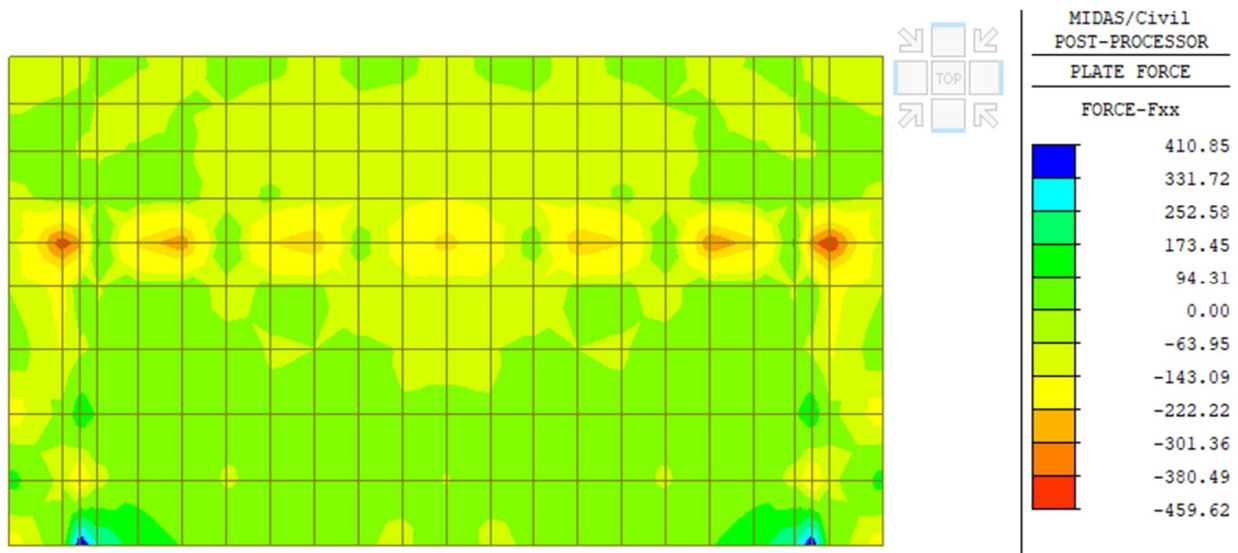


Figura 50 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) platea: F_{xx} [kN/m]

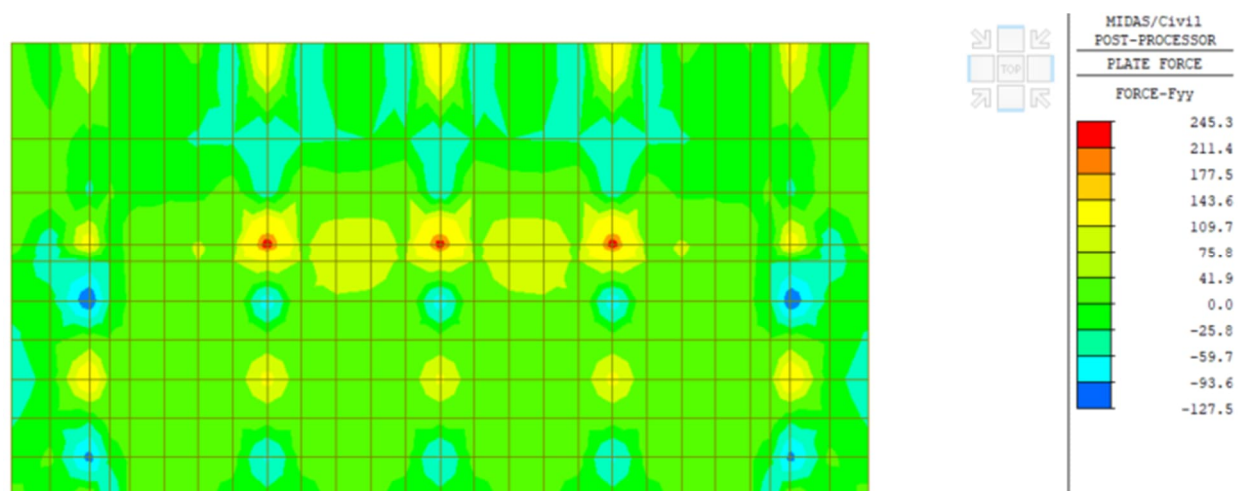


Figura 51 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) platea: F_{yy} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

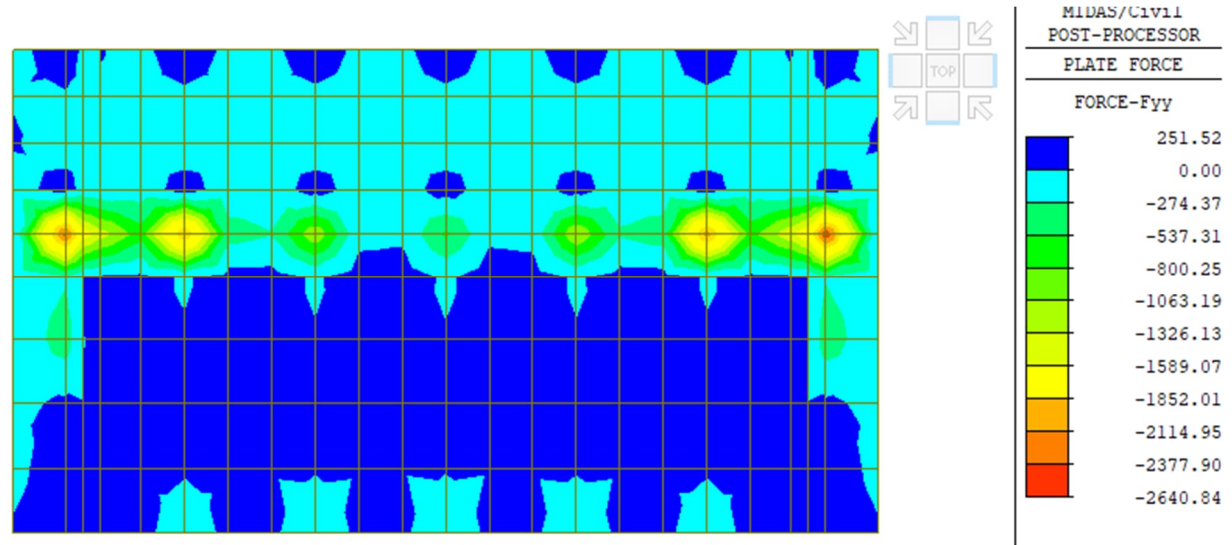


Figura 52 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) platea: M_{xx} [kNm/m]

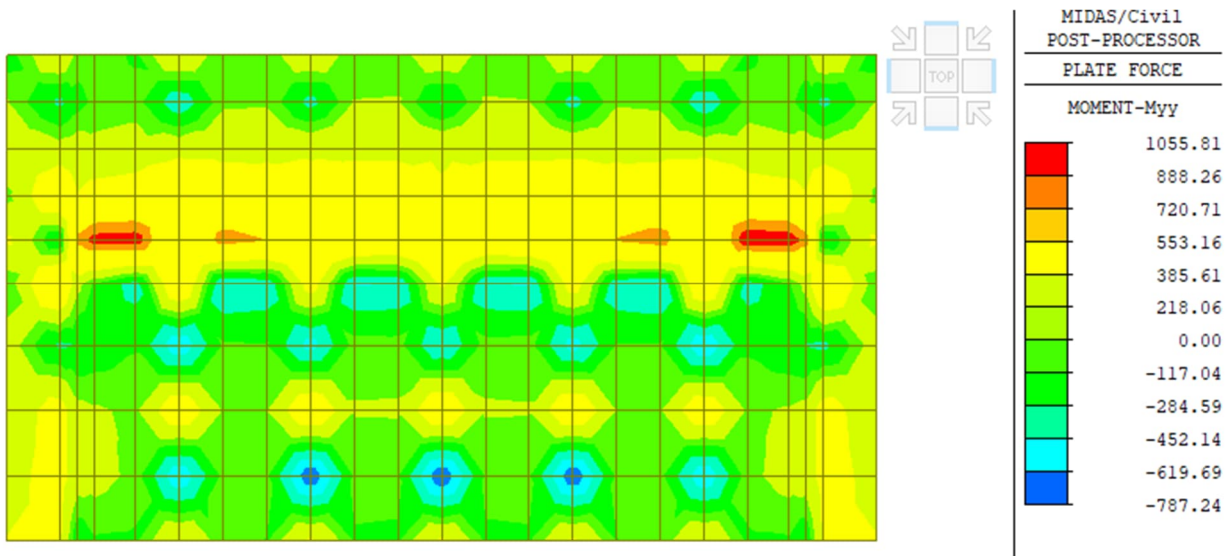


Figura 53 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) platea: M_{yy} [kNm/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

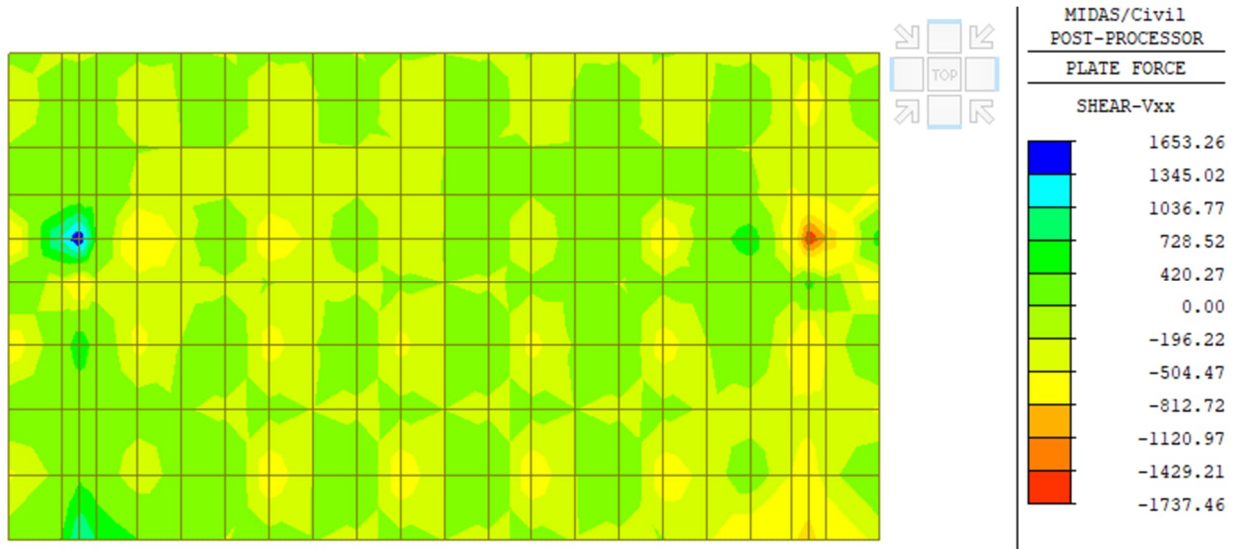


Figura 54 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) platea: V_{xx} [kN/m]

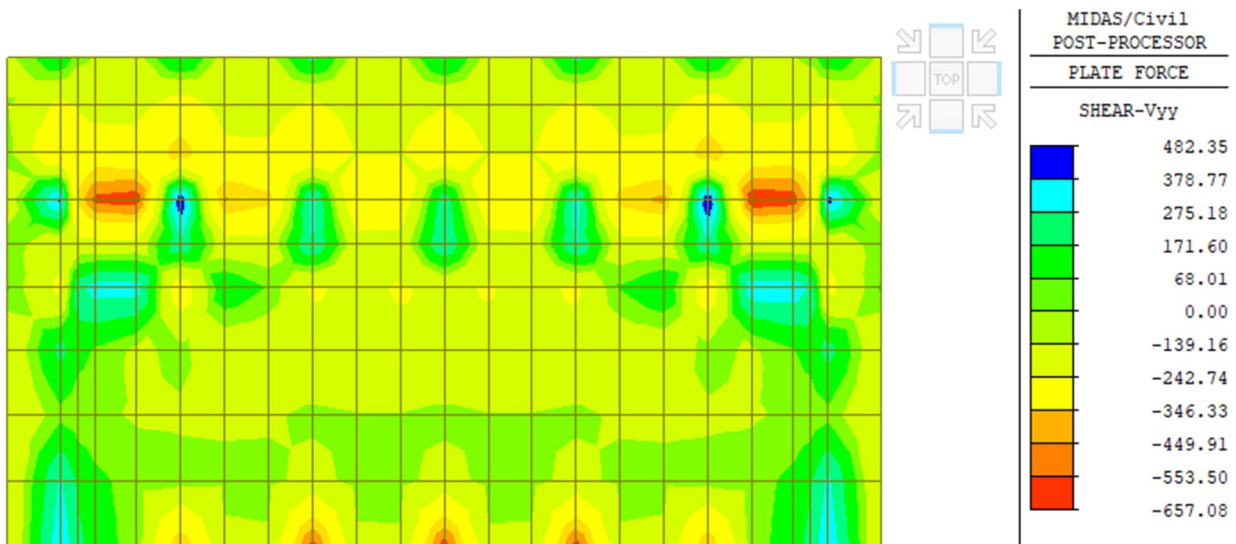


Figura 55 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) platea: V_{yy} [kN/m]

10.1.5 Sollecitazioni in combinazione quasi permanente (SLE)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni in combinazione quasi permanente (SLE) calcolate per la platea di fondazione della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale agente lungo l'asse trasversale dell'impalcato (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale agente lungo l'asse longitudinale dell'impalcato (se positivo di trazione, se negativo di compressione);

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre della platea disposte trasversalmente all'asse dell'impalcato (se positivo tende le fibre inferiori, se negativo quelle superiori);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre della platea disposte longitudinalmente all'asse dell'impalcato (se positivo tende le fibre inferiori, se negativo quelle superiori)
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano della platea, agente nel piano locale YZ (positivo se rivolto nel verso positivo dell'asse z);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano della platea, agente nel piano locale XZ (positivo se rivolto nel verso positivo dell'asse z).

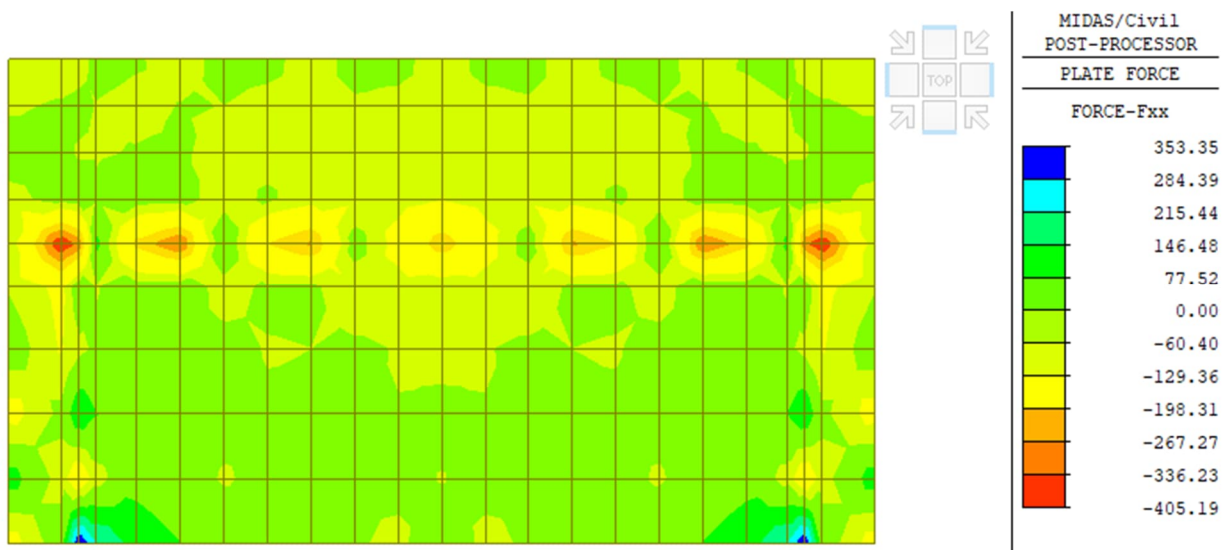


Figura 56 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) platea: F_{xx} [kN/m]

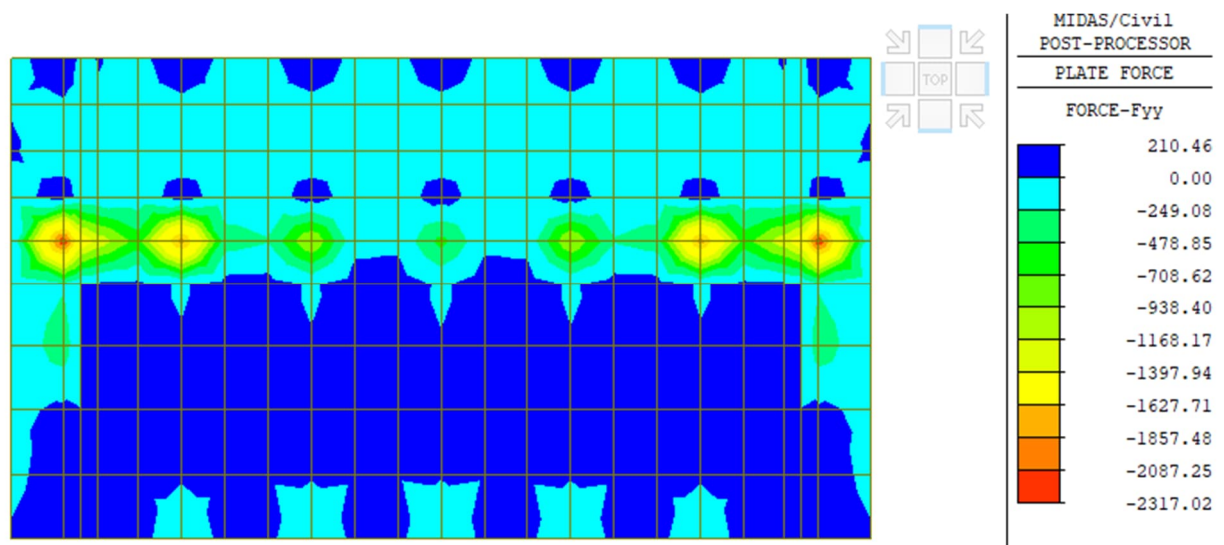


Figura 57 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) platea: F_{yy} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

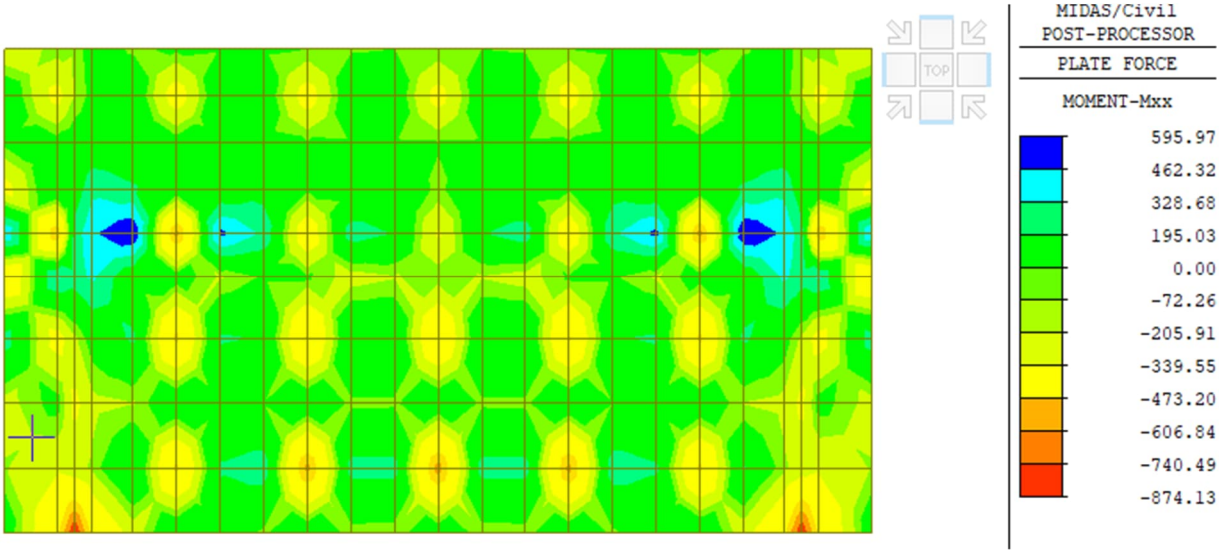


Figura 58 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) platea: M_{xx} [kNm/m]

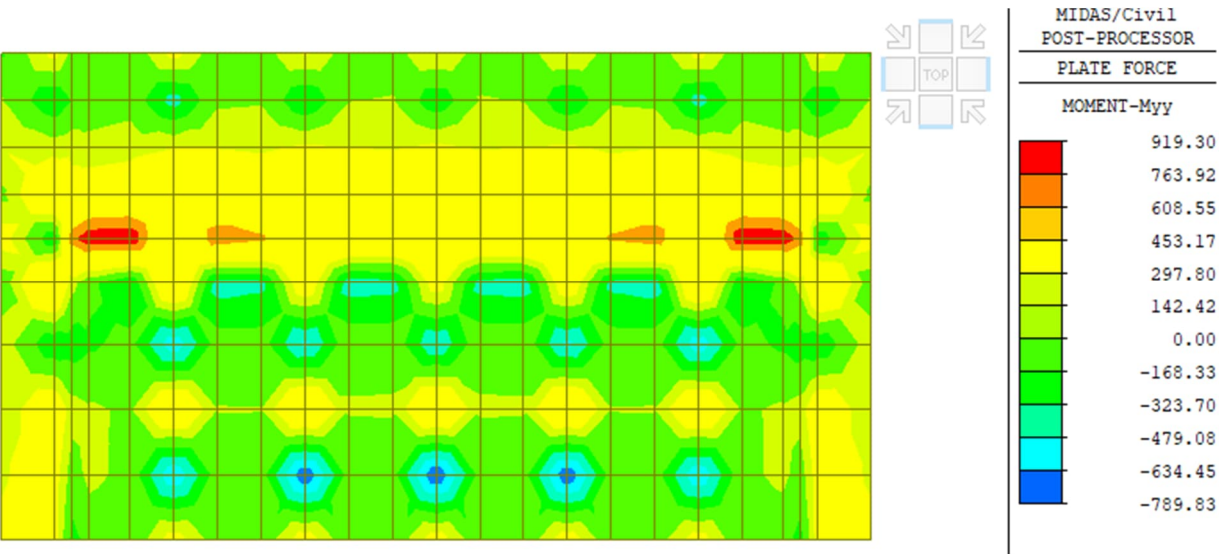


Figura 59 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) platea: M_{yy} [kNm/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

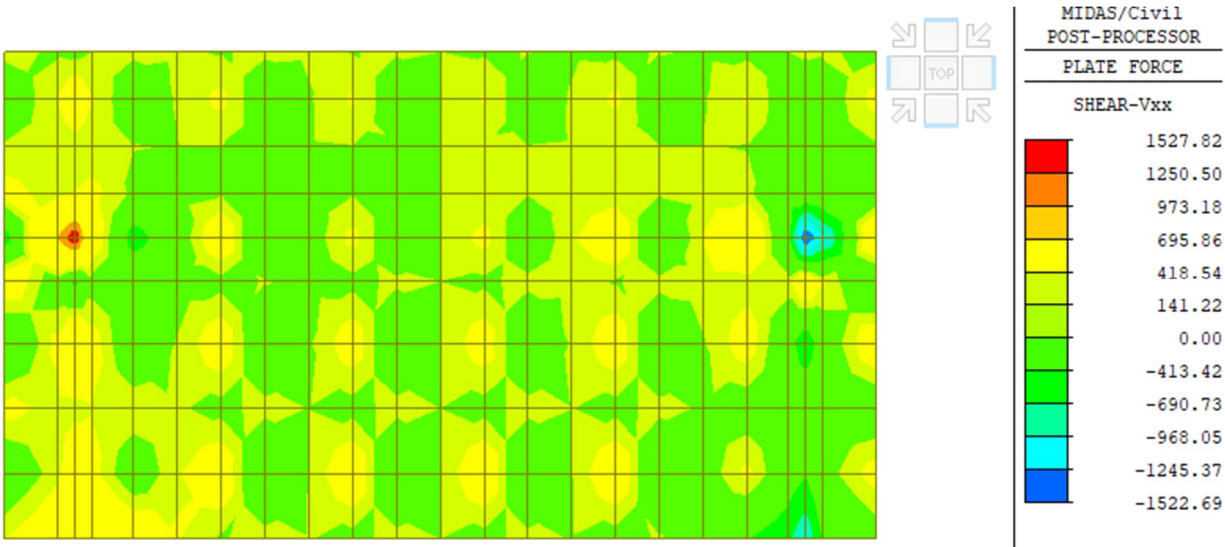


Figura 60 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) platea: V_{xx} [kN/m]

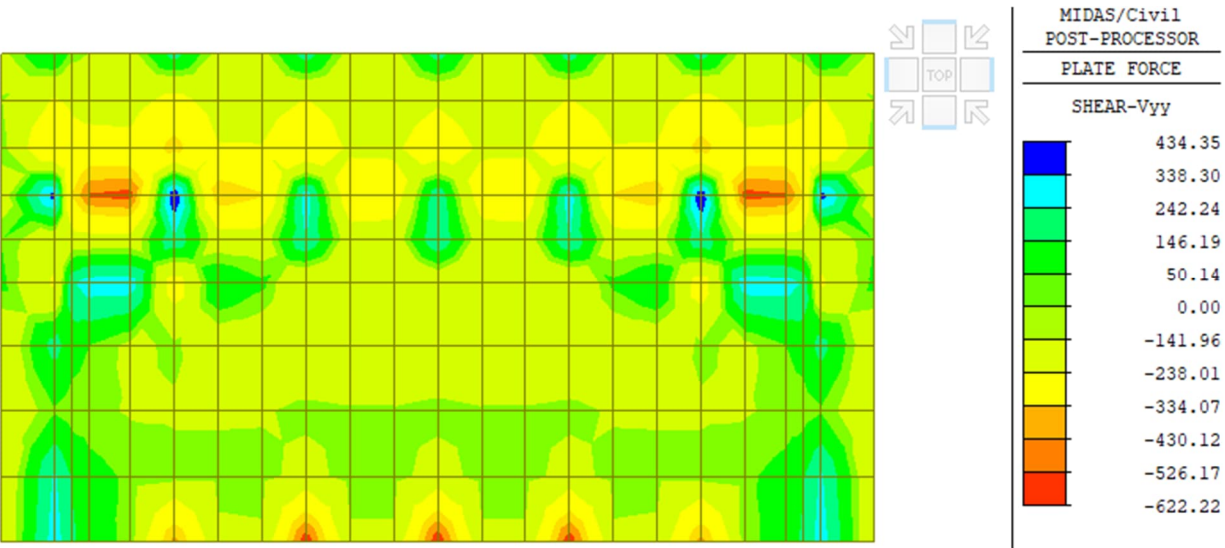


Figura 61 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) platea: V_{yy} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

10.1.6 Risultati verifiche SLU e SLE

In questo paragrafo si riportano i risultati delle verifiche di stato limite ultimo e di stato limite di esercizio eseguite sulla platea di fondazione della spalla. Nelle calcolazioni si è considerata una sezione resistente di forma rettangolare larga 1.0m, alta 2.5 m, rinforzata nel modo seguente:

- Doppio strato di Ø30/20: Armatura corrente in intradosso;
- Doppio strato di Ø30/20: Armatura corrente in intradosso;
- Spilli Ø20/40x40: Armatura a taglio.

Le sollecitazioni di calcolo adottate nelle verifiche sono quelle riportate nelle rappresentazioni grafiche precedenti, riassunte in tabella seguente. La sollecitazione di taglio è stata calcolata mettendo in quadratura i massimi tagli V_{xx} e V_{yy} .

Tabella 23 –Sollecitazioni di calcolo platea di fondazione

Combinazione [-]	N_{sd} [kN/m]	M_{sd} [kNm/m]	V_{sd} [kN/m]
Quasi permanente	210.46	919.3	1644.91
Frequente	251.52	1055.8	1857.55
Caratteristica	285.75	1156.5	2035.65
Fondamentale (SLU)	442.1	1590.0	2778.76
Sismica (SLV)	693.35	3223.8	1521.67

I risultati delle verifiche strutturali di stato limite ultimo statiche e sismiche e quelli delle verifiche di stato limite di esercizio sono riportati nel seguente prospetto. Come si vede, tutte le verifiche sono soddisfatte.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

FOGLIO VERSIONE R21

INPUT				OUTPUT				
SOLLECITAZIONI DI VERIFICA				VERIFICHE IN ESERCIZIO				
Combinazione	N _{sd} [kN]	M _{sd} [kNm]	V _{sd} [kN]					
SLE Quasi Permanente	210	919	1644.914					
SLE Frequente	252	1056	1857.558					
SLE Rara	286	1157	2035.654					
SLU	442	1590	2779					
SLV	693	3224	1522					
CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE IN C.A.								
Geometria della sezione								
Base (ortogonale al Taglio)	B [cm]	100						
Altezza (parallela al Taglio)	H [cm]	250						
Altezza utile della sezione	d [cm]	238.00						
Area di calcestruzzo	A _c [cm ²]	25000						
Armatura longitudinale tesa								
	1° STRATO	2° STRATO	3° STRATO					
Numero Barre	n	5.00	5.00	0.00				
Diametro	φ [mm]	30	30	0				
Posizione dal lembo esterno	c [mm]	90	150	50				
Area strato	A _s [cm ²]	35.34	35.34	0.00				
Percentuale di armatura	ρ [%]	0.297%						
Armatura longitudinale compressa								
	1° STRATO	2° STRATO	3° STRATO					
Numero Barre	n	5.00	5.00	0.00				
Diametro	φ [mm]	30	30	0				
Posizione dal lembo esterno	c' [mm]	90	150	50				
Area strato	A _s ' [cm ²]	35.34	35.34	0.00				
Percentuale di armatura	ρ [%]	0.297%						
Armatura trasversale								
	1° TIPO	2° TIPO	3° TIPO					
Diametro	φ [mm]	20	0	0				
Numero bracci	n _{bi}	2.5	0	0				
Passo	s _w [mm]	400	0	0				
Inclinazione	α [deg]	90	90	90				
Area di armatura a metro	A _{sw} /s _w [cm ² /m]	19.63	0.00	0.00				
CARATTERISTICHE REOLOGICHE DEI MATERIALI								
Calcestruzzo								
Resistenza cubica a compressione	RCK	40						
Resistenza cilindrica caratteristica a compressione	f _{ck} [MPa]	33.20						
Resistenza cilindrica media a compressione	f _{cm} [MPa]	41.20						
Resistenza media a trazione	f _{ctm} [MPa]	3.10						
Resistenza caratteristica a trazione	f _{ctk} [MPa]	2.17						
Resistenza di progetto a compressione	f _{cd} [MPa]	18.81						
Resistenza di progetto delle bielle compresse	f _{cd} [MPa]	9.79						
Acciaio								
Resistenza caratteristica a snervamento	f _{yk} [MPa]	450						
Resistenza di progetto a snervamento	f _{yd} [MPa]	391						
Verifica Tensionale								
Calcestruzzo SLE Quasi Permanente	σ _c [Mpa]	1.05	< 14.94					
Calcestruzzo SLE Rara	σ _c [Mpa]	1.31	< 19.92					
Acciaio SLE Rara	σ _s [Mpa]	94.34	< 360.00					
Verifica di fessurazione								
	Quasi-perm	Frequent						
Altezza efficace	h _{ceff} [cm]	30.00	30.00					
Area efficace	A _{ceff} [cm ²]	3000	3000					
Percentuale di armatura all'interno dell' area efficace	ρ _{p,eff} [%]	2.3562%	2.3562%					
Coefficiente dipendente dalla durata del carico	k ₁	0.4	0.6					
Coefficiente dipendente dall'aderenza delle armature	k ₂	0.8	0.8					
Coefficiente dipendente dalla distribuzione deformazioni	k ₃	0.5	0.5					
Coefficiente dipendente dal copriferro	k ₃	3.4	3.4					
Tensione di trazione nella barra di acciaio	σ _s [MPa]	73.9	85.5					
Spaziatura massima delle fessure	s _{r,max} [mm]	471	471					
Differenza di deformazione media acciaio-calcestruzzo	(ε _{sm} - ε _{cm})	0.0211%	0.0244%					
Apertura delle fessure di calcolo	w _d [mm]	0.099	0.115					
Valore limite di apertura delle fessure	w _{lim} [mm]	0.200	0.300					
VERIFICA DI RESISTENZA A TAGLIO								
Sollecitazioni di progetto								
Taglio sollecitante = max Taglio(SLU,SLV)	V _{Ed} [kN]	2778.8						
Sforzo Normale concomitante al massimo taglio	N _{Ed} [kN]	0.0						
Verifica di resistenza in assenza di armatura specifica								
Resistenza di progetto senza armatura specifica	V _{Rd1} [kN]	789.96						
Coefficiente di sicurezza	V _{Rd1} / V _{Ed}	0.28						
Verifica di resistenza dell'armatura specifica								
CoTan(θ) di progetto	cotan(θ)	2.5						
Resistenza a taglio delle bielle compresse in cls	V _{Rd2} [kN]	7230						
Resistenza a taglio dell'armatura	V _{Rd3} [kN]	4114						
Resistenza a taglio di progetto	V _{Rd} [kN]	4114						
Coefficiente di sicurezza	V _{Rd} / V _{Ed}	1.48						
VERIFICA DI RESISTENZA A PRESSO-FLESSIONE								
Sollecitazioni di progetto								
Momento sollecitante	M _{Ed} [kNm]	1590.0	3223.8					
Sforzo Normale concomitante	N _{Ed} [kN]	442.1	693.4					
Verifica di resistenza in termini di momento								
Momento resistente	M _{Rd} [kNm]	5468.8	5209.6					
Coefficiente di sicurezza	M _{Rd} / M _{Ed}	3.44	1.62					
Verifica di resistenza in termini di sforzo normale								
Sforzo normale resistente	N _{Rd} [kN]	4084.7	2440.5					
Coefficiente di sicurezza	N _{Rd} / N _{Ed}	9.24	3.52					
Coefficiente di sicurezza minimo								
		3.44	1.62					

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

10.2 Muro frontale

I risultati delle verifiche strutturali eseguite sul muro frontale della spalla sono riportati nella parte conclusiva del paragrafo, mentre qui di seguito si riportano i grafici delle sollecitazioni su di esso gravanti.

10.2.1 Sollecitazioni di calcolo in combinazione sismica (SLV)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni sismiche calcolate per il muro frontale della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale orizzontale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale verticale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre orizzontali del muro frontale (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle estere);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre verticali del muro frontale (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne)
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano del muro frontale, agente nel piano verticale YZ (positivo se uscente dal piano del muro);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano del muro frontale, agente nel piano orizzontale XZ (positivo se uscente dal piano del muro).

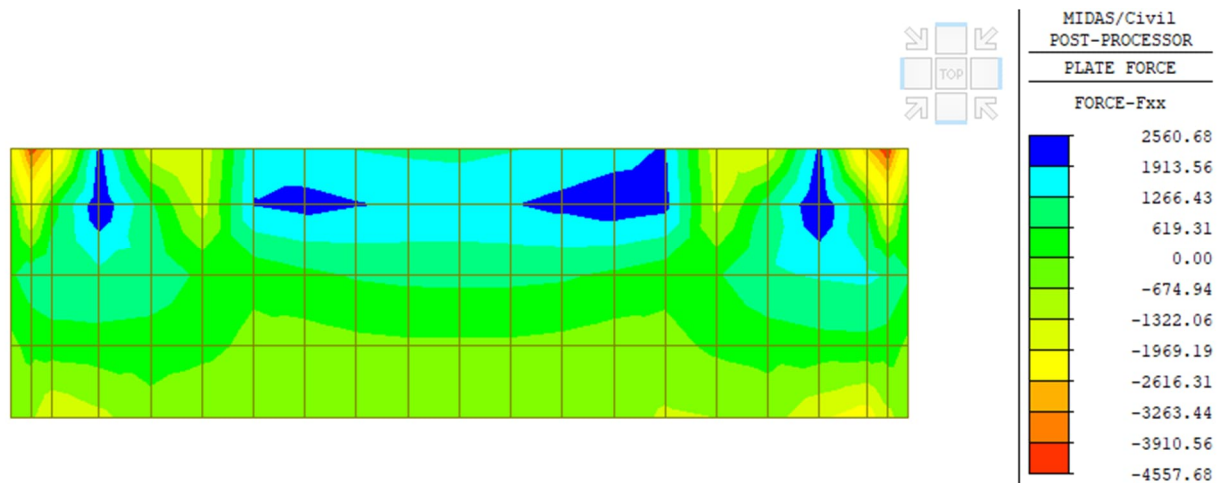


Figura 62 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro frontale: F_{xx} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

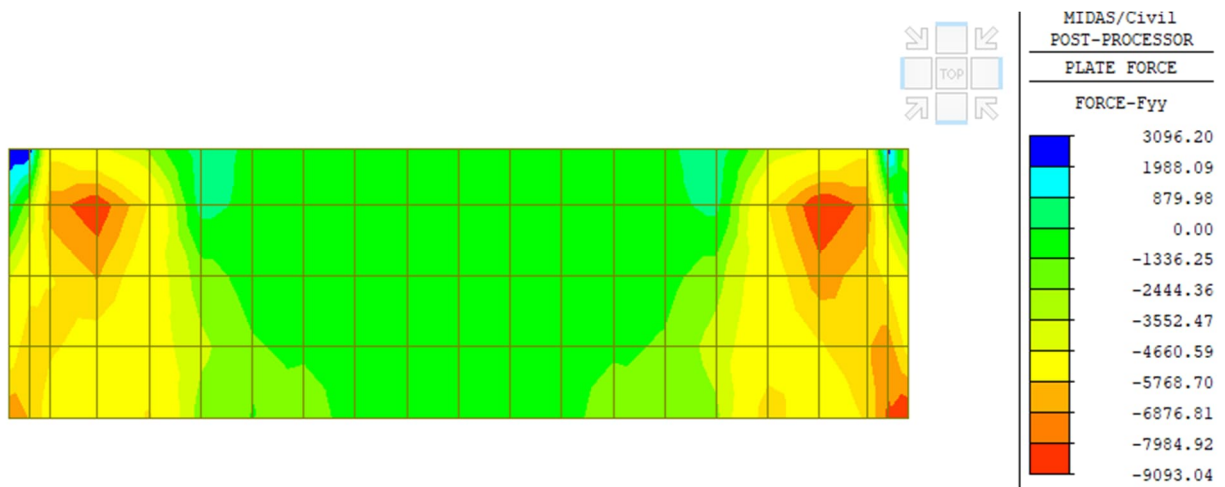


Figura 63 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro frontale: F_{yy} [kN/m]

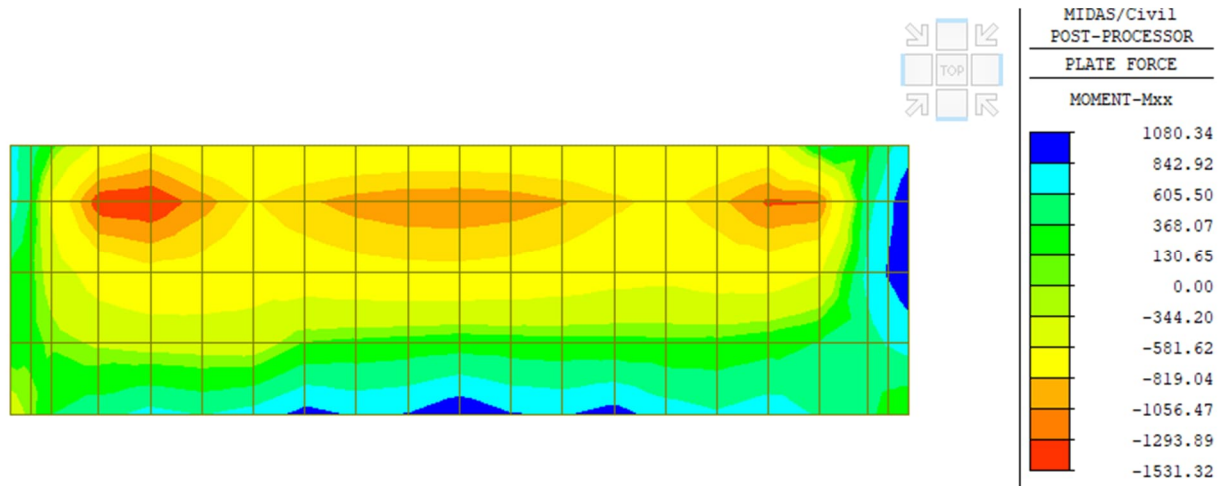


Figura 64 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro frontale: M_{xx} [kNm/m]

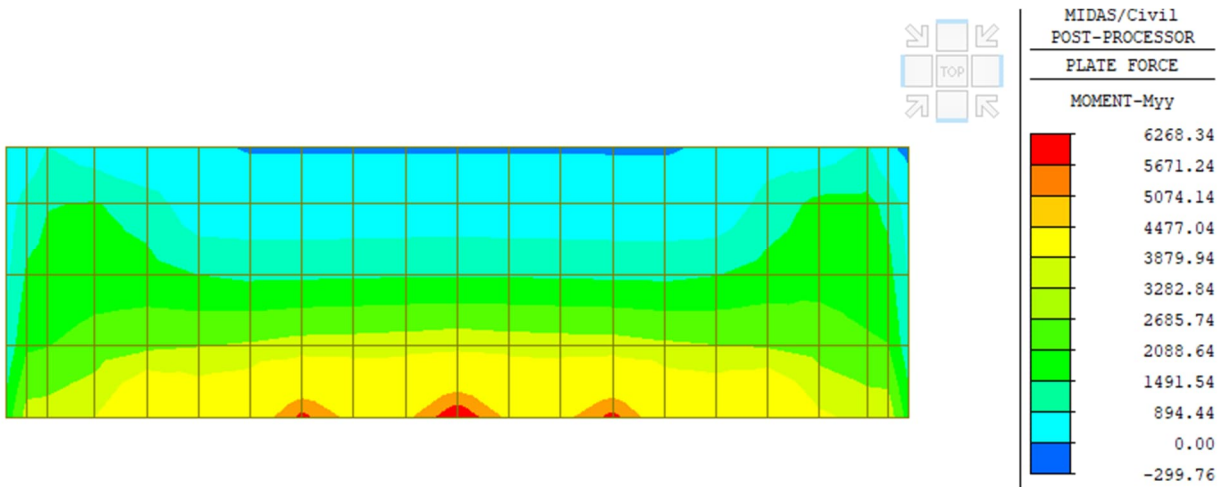


Figura 65 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro frontale: M_{yy} [kNm/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

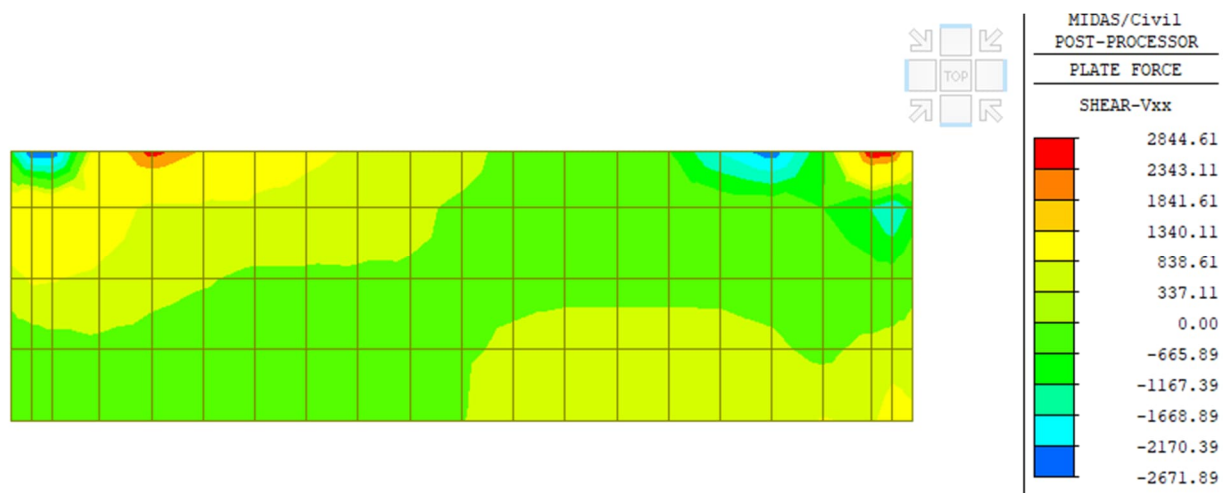


Figura 66 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro frontale: V_{xx} [kN/m]

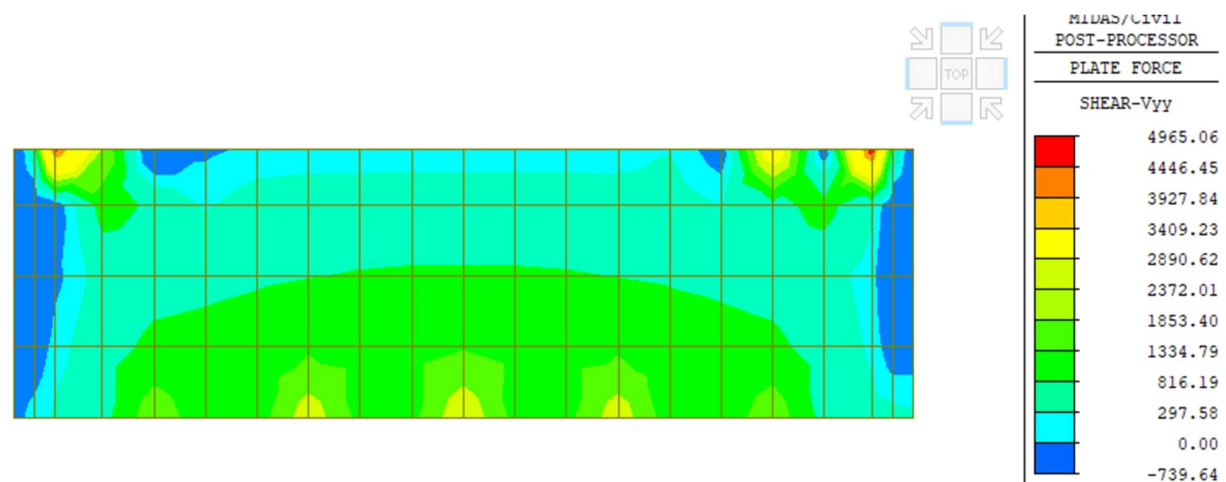


Figura 67 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro frontale: V_{yy} [kN/m]

10.2.2 Sollecitazioni di calcolo ultime in combinazione statica (SLU)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni di stato limite ultimo statici (SLU), calcolate per il muro frontale della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale orizzontale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale verticale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre orizzontali del muro frontale (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle estere);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre verticali del muro frontale (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne)
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano del muro frontale, agente nel piano verticale YZ (positivo se uscente dal piano del muro);

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano del muro frontale, agente nel piano orizzontale XZ (positivo se uscente dal piano del muro).

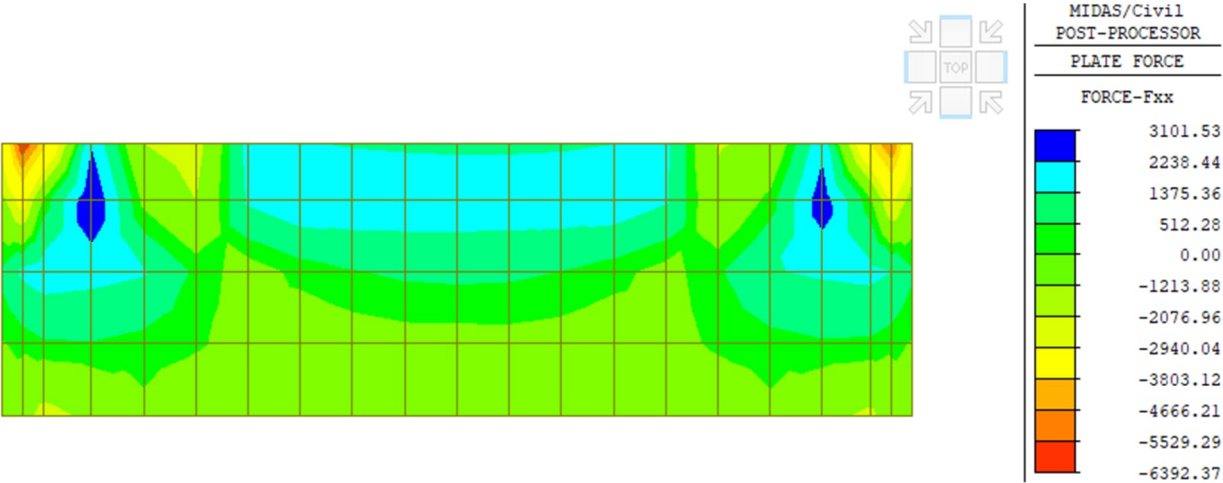


Figura 68 – Inviluppo Sollecitazioni SLU muro frontale: F_{xx} [kN/m]

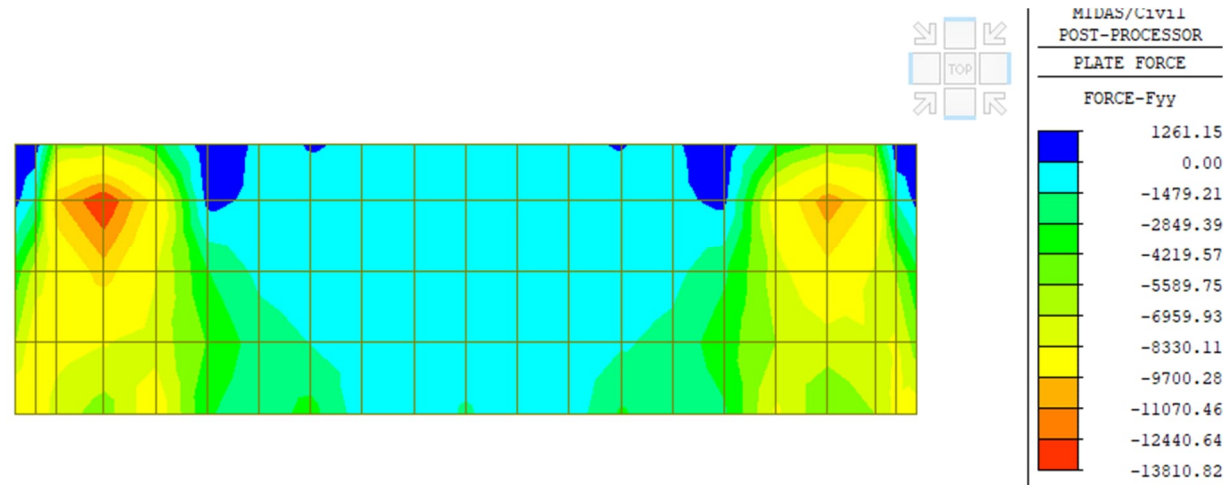


Figura 69 – Inviluppo Sollecitazioni SLU muro frontale: F_{yy} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

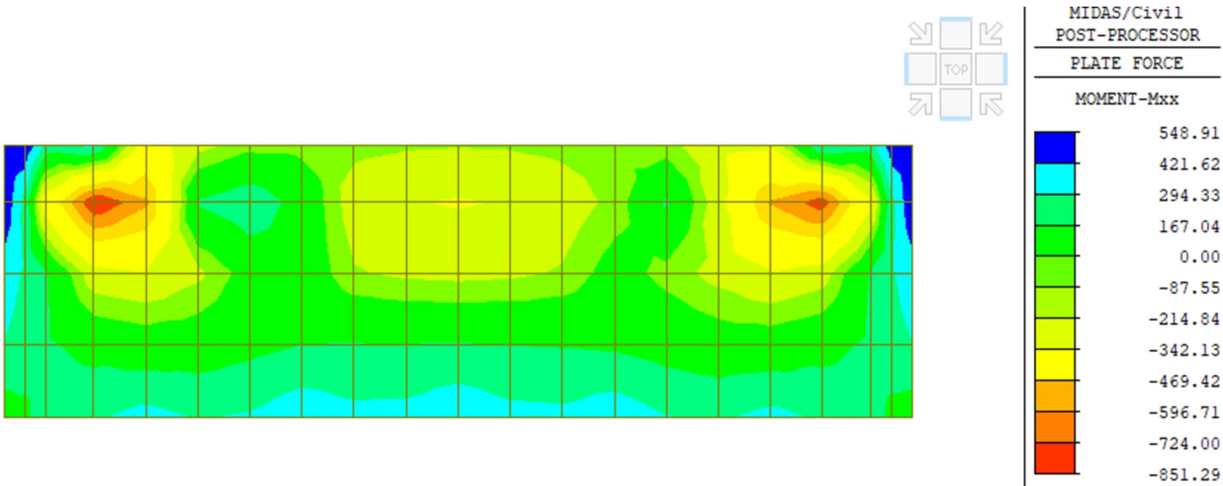


Figura 70 – Involuppo Sollecitazioni SLU muro frontale: M_{xx} [kNm/m]

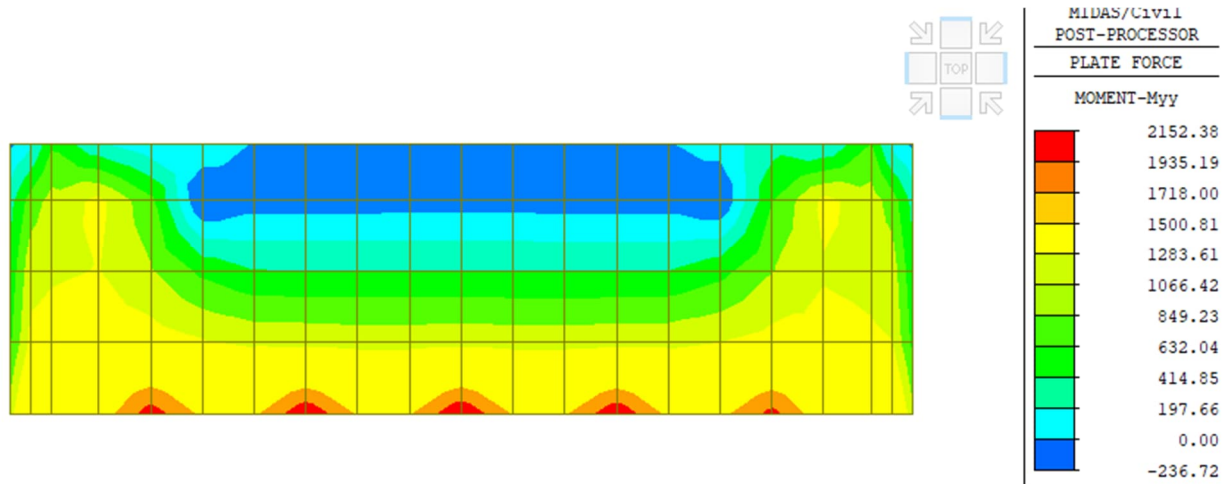


Figura 71 – Involuppo Sollecitazioni SLU muro frontale: M_{yy} [kNm/m]

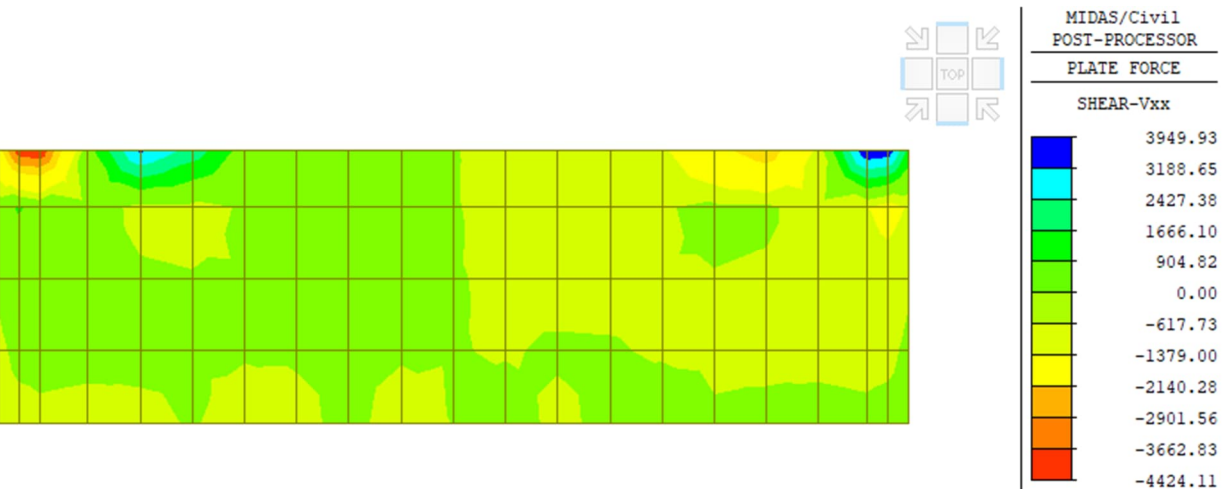


Figura 72 – Involuppo Sollecitazioni SLU muro frontale: V_{xx} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

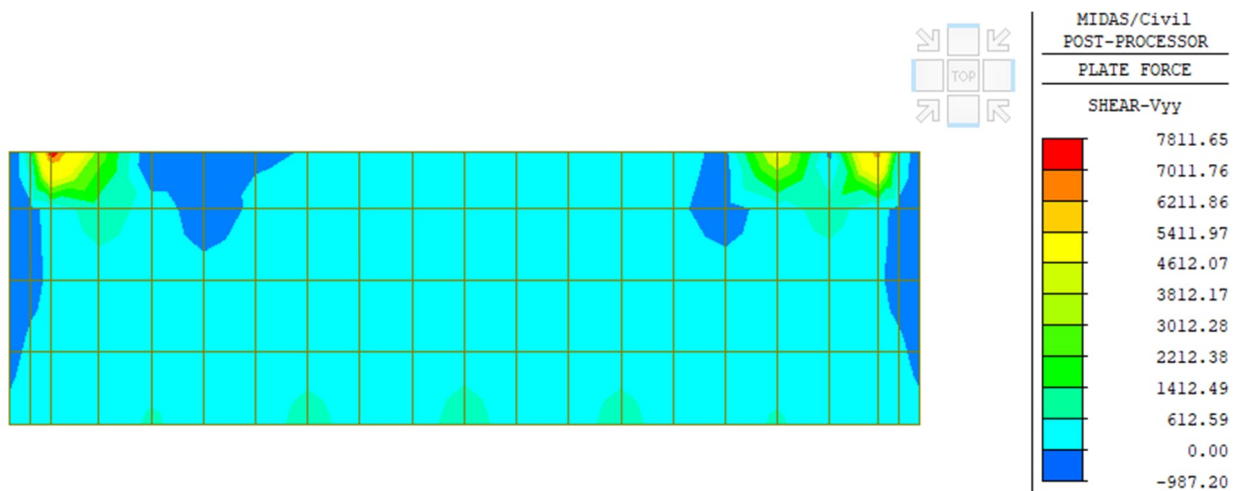


Figura 73 – Involuppo Sollecitazioni SLU muro frontale: V_{yy} [kN/m]

10.2.3 Sollecitazioni in combinazione caratteristica (SLE)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni in combinazione caratteristica (SLE), calcolate per il muro frontale della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale orizzontale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale verticale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre orizzontali del muro frontale (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle estere);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre verticali del muro frontale (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne)
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano del muro frontale, agente nel piano verticale YZ (positivo se uscente dal piano del muro);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano del muro frontale, agente nel piano orizzontale XZ (positivo se uscente dal piano del muro).

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

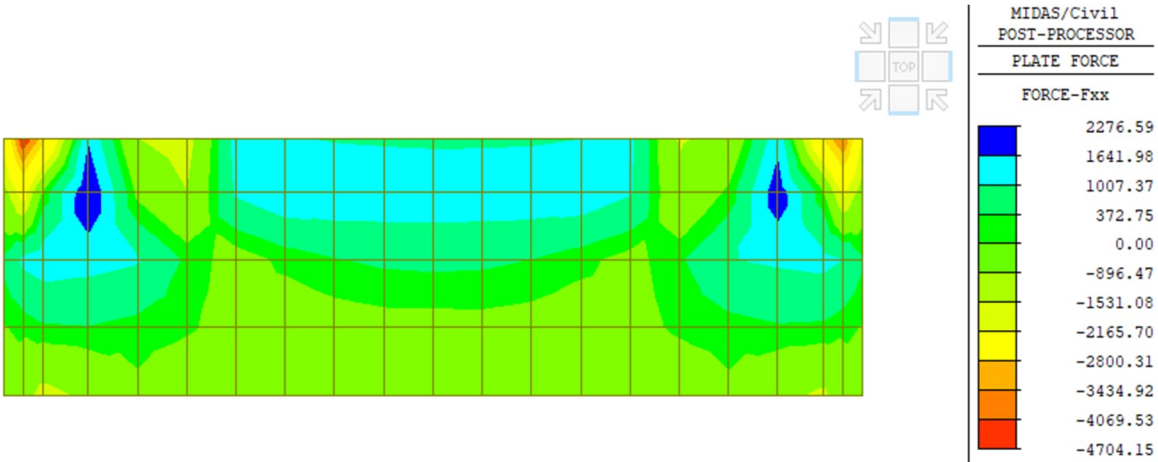


Figura 74 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro frontale: F_{xx} [kN/m]

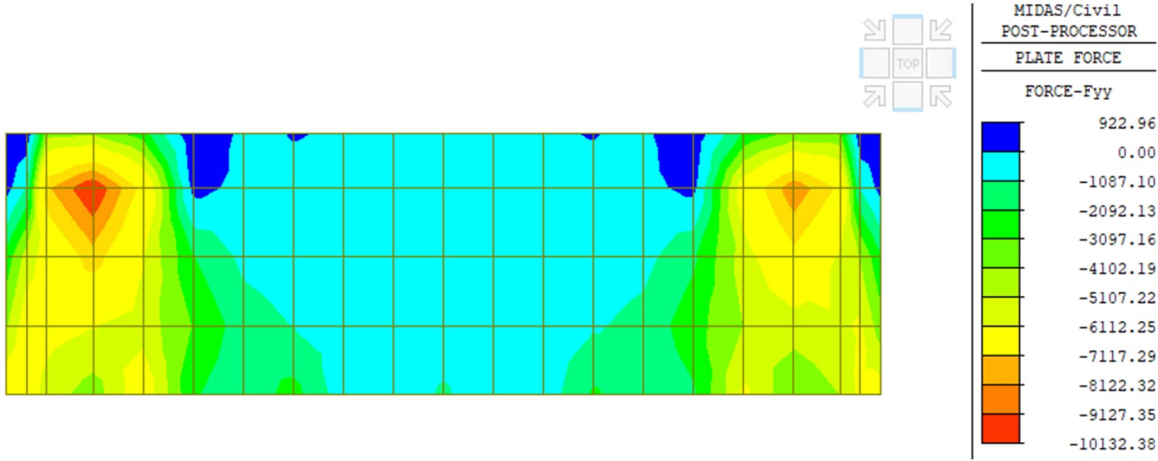


Figura 75 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro frontale: F_{yy} [kN/m]

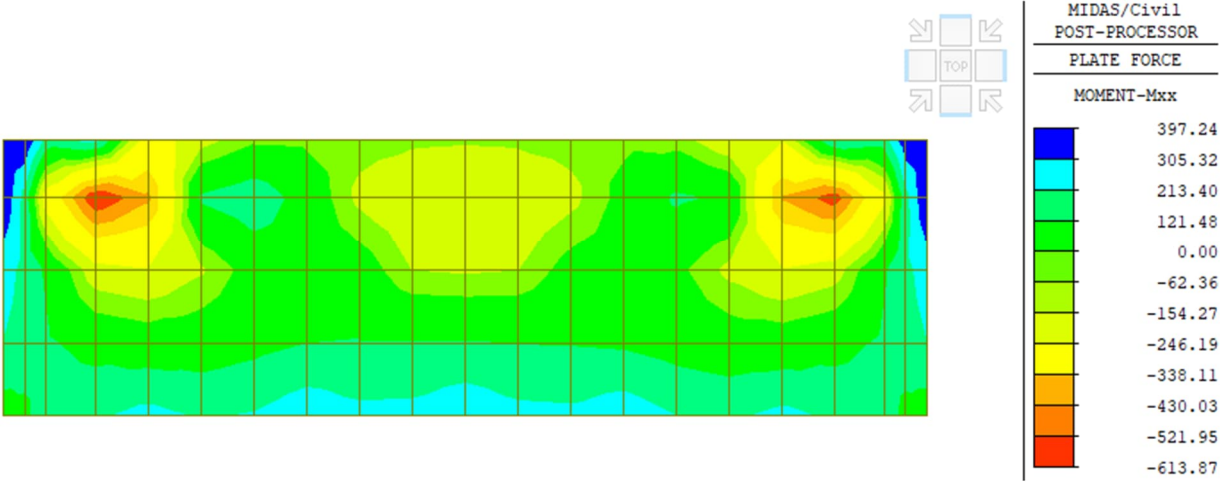


Figura 76 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro frontale: M_{xx} [kNm/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

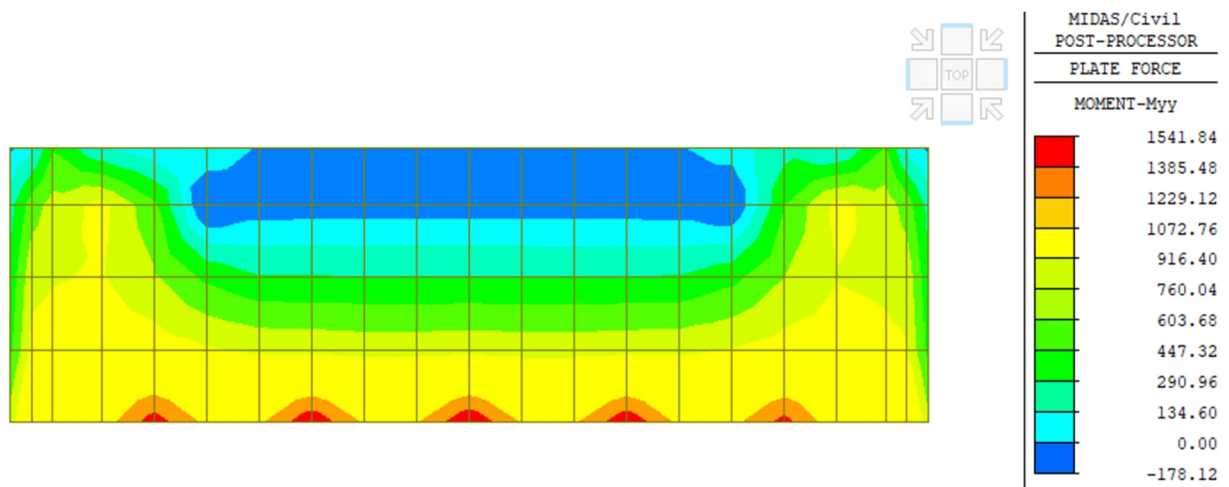


Figura 77 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro frontale: M_{yy} [kNm/m]

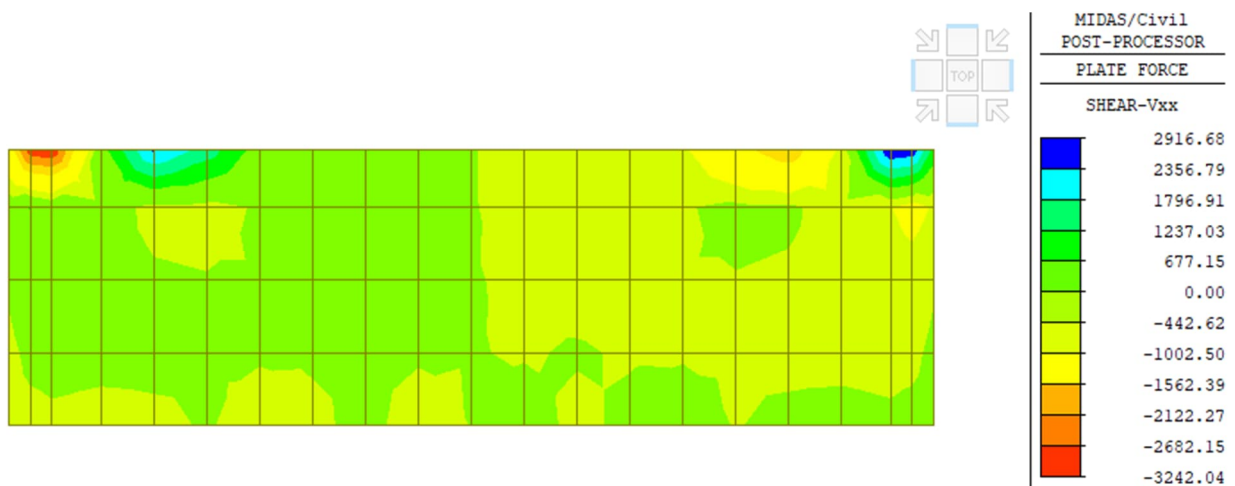


Figura 78 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro frontale: V_{xx} [kN/m]

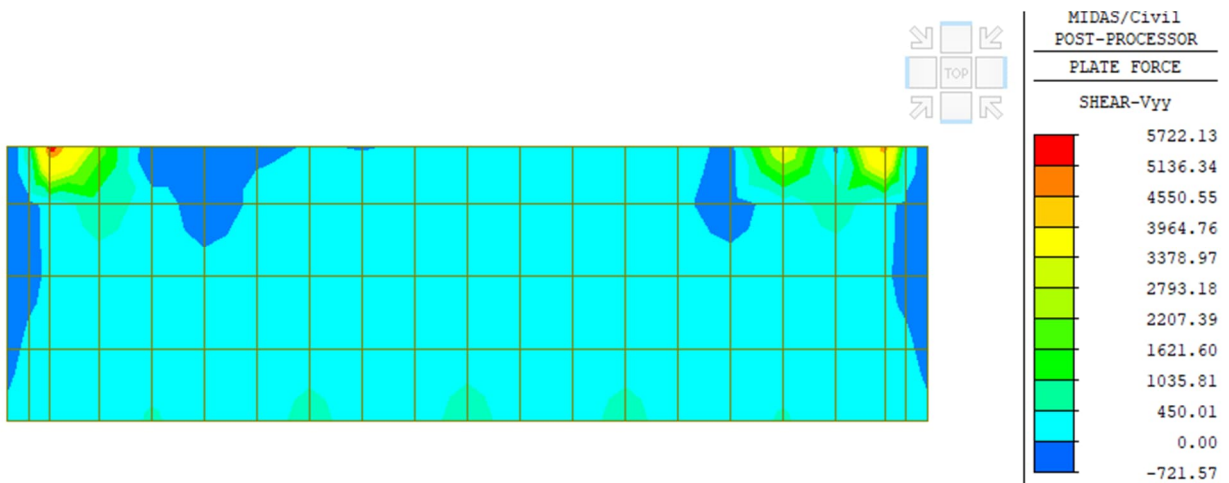


Figura 79 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro frontale: V_{yy} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

10.2.4 Sollecitazioni in combinazione frequente (SLE)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni in combinazione frequente (SLE), calcolate per il muro frontale della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale orizzontale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale verticale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre orizzontali del muro frontale (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle estere);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre verticali del muro frontale (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne)
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano del muro frontale, agente nel piano verticale YZ (positivo se uscente dal piano del muro);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano del muro frontale, agente nel piano orizzontale XZ (positivo se uscente dal piano del muro).

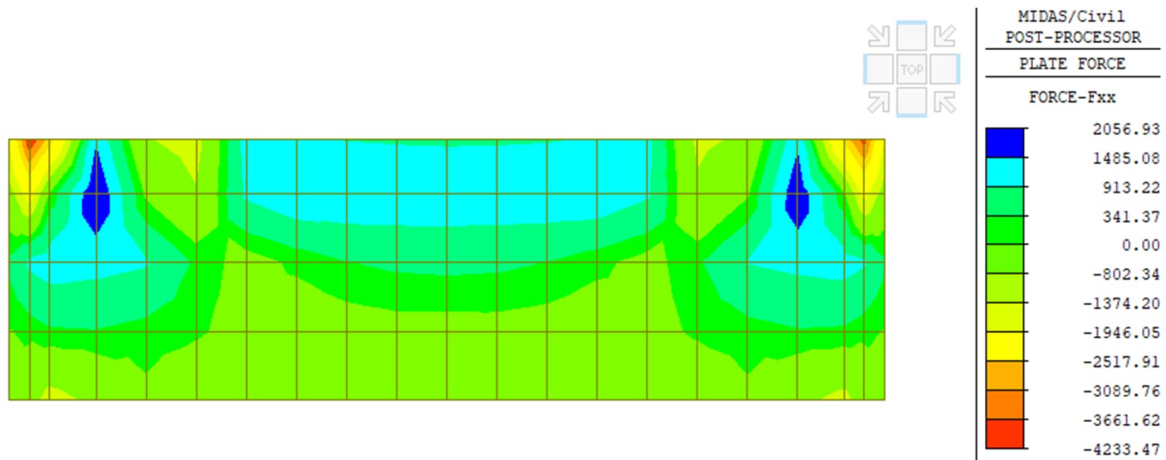


Figura 80 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro frontale: F_{xx} [kN/m]

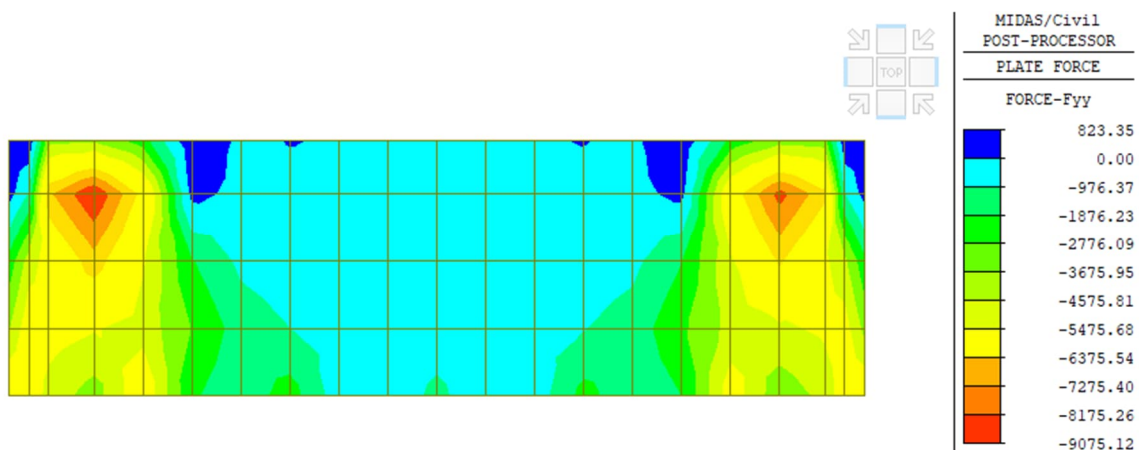


Figura 81 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro frontale: F_{yy} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

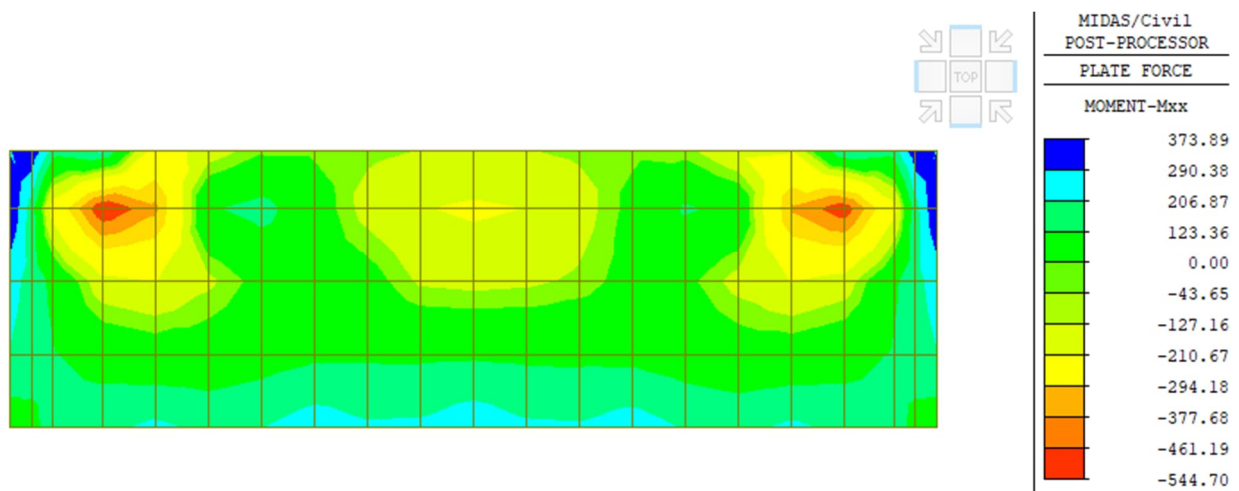


Figura 82 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro frontale: M_{xx} [kNm/m]

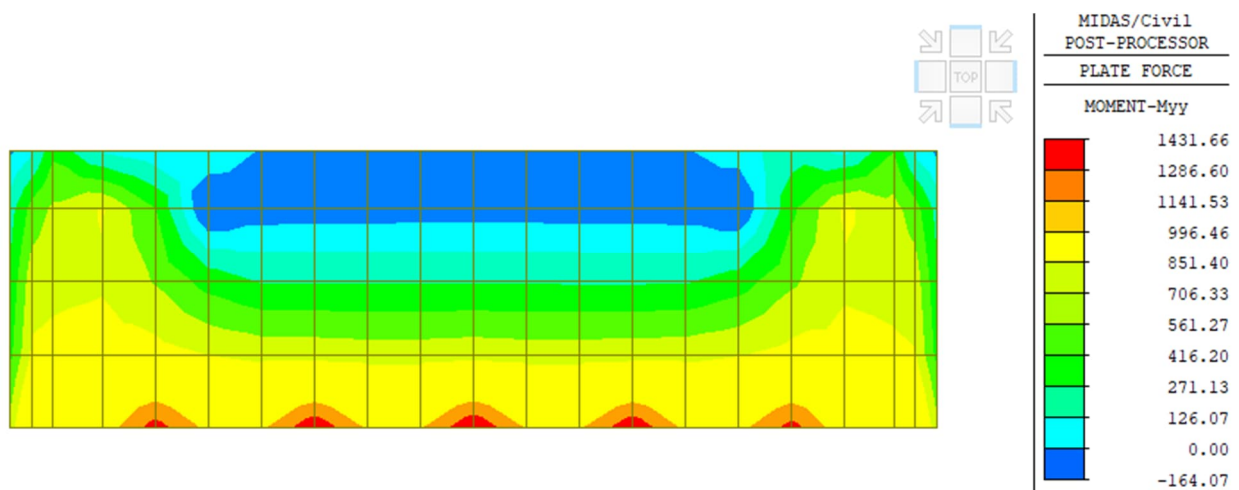


Figura 83 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro frontale: M_{yy} [kNm/m]

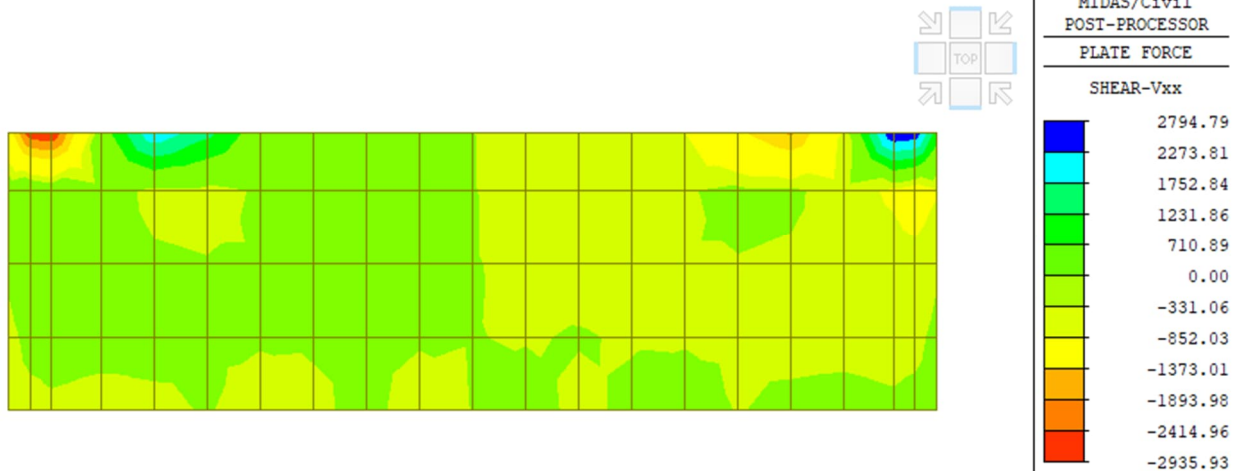


Table 14. Figura 84 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro frontale: V_{xx} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

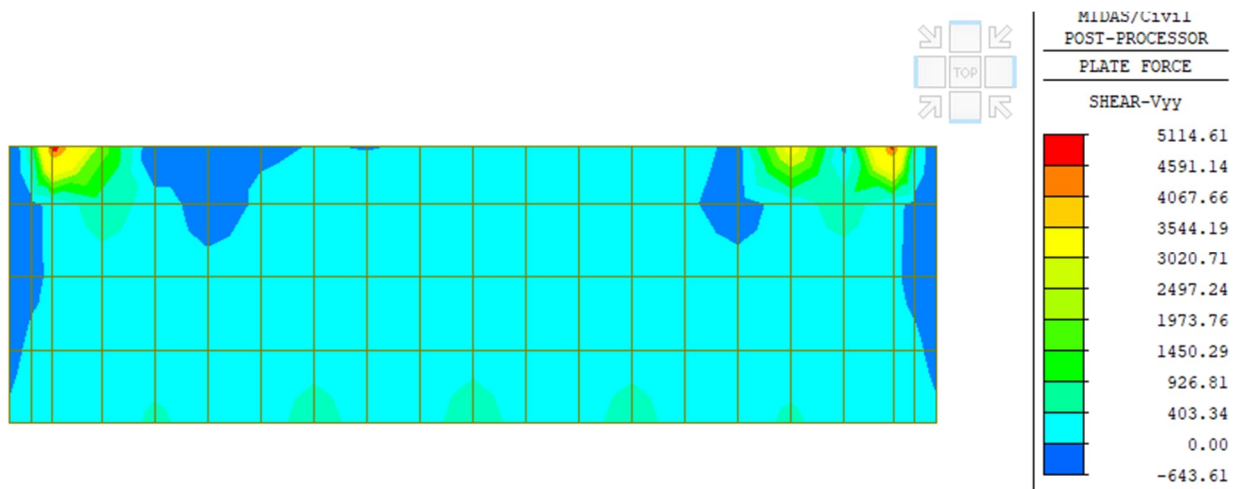


Figura 85 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro frontale: V_{yy} [kN/m]

10.2.5 Sollecitazioni in combinazione quasi permanente (SLE)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni in combinazione quasi permanente (SLE), calcolate per il muro frontale della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale orizzontale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale verticale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre orizzontali del muro frontale (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre verticali del muro frontale (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne);
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano del muro frontale, agente nel piano verticale YZ (positivo se uscente dal piano del muro);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano del muro frontale, agente nel piano orizzontale XZ (positivo se uscente dal piano del muro).

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

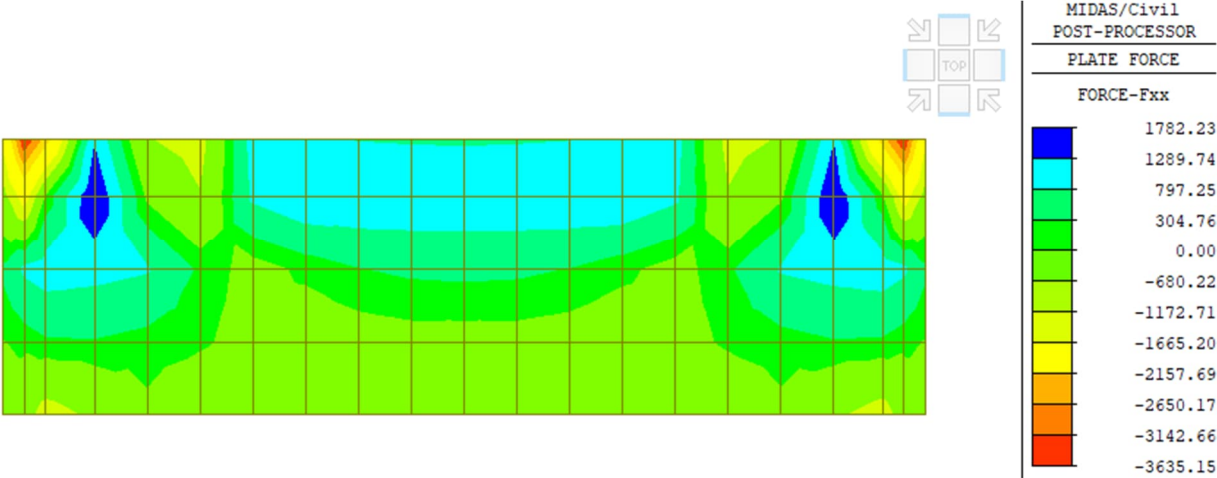


Figura 86 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro frontale: Fxx [kN/m]

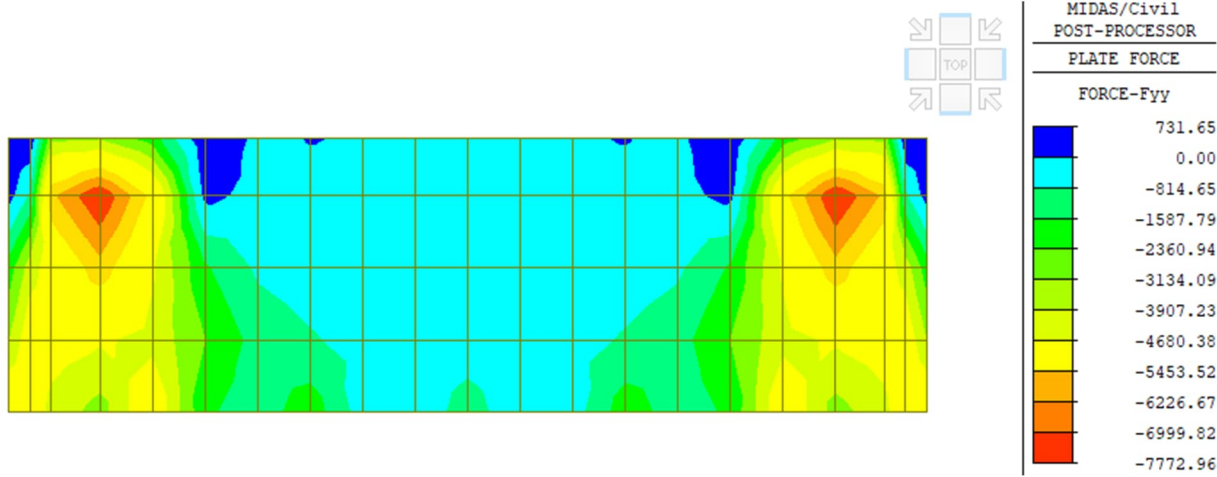


Figura 87 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro frontale: Fyy [kN/m]

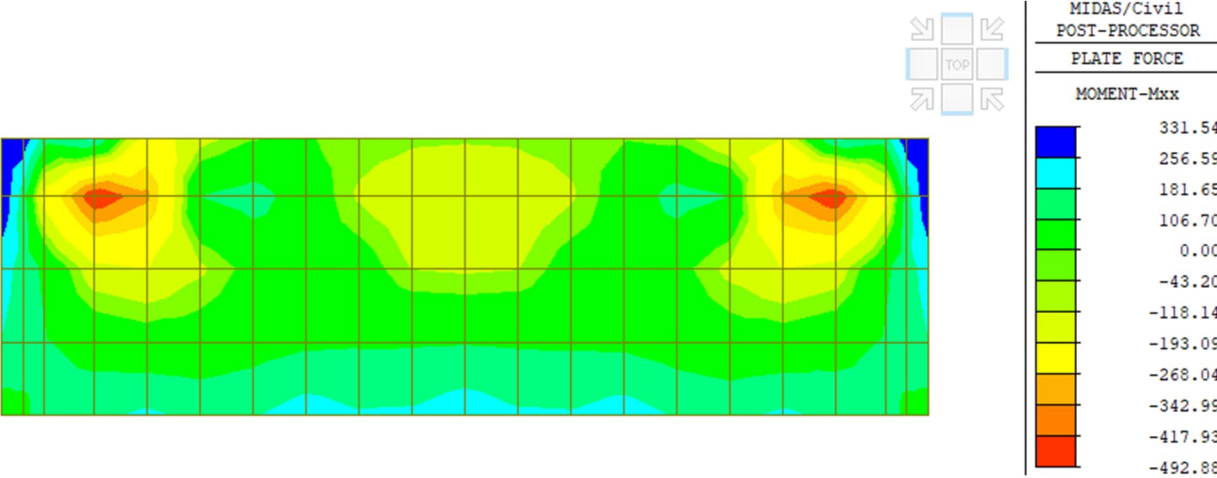


Figura 88 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro frontale: Mxx [kNm/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

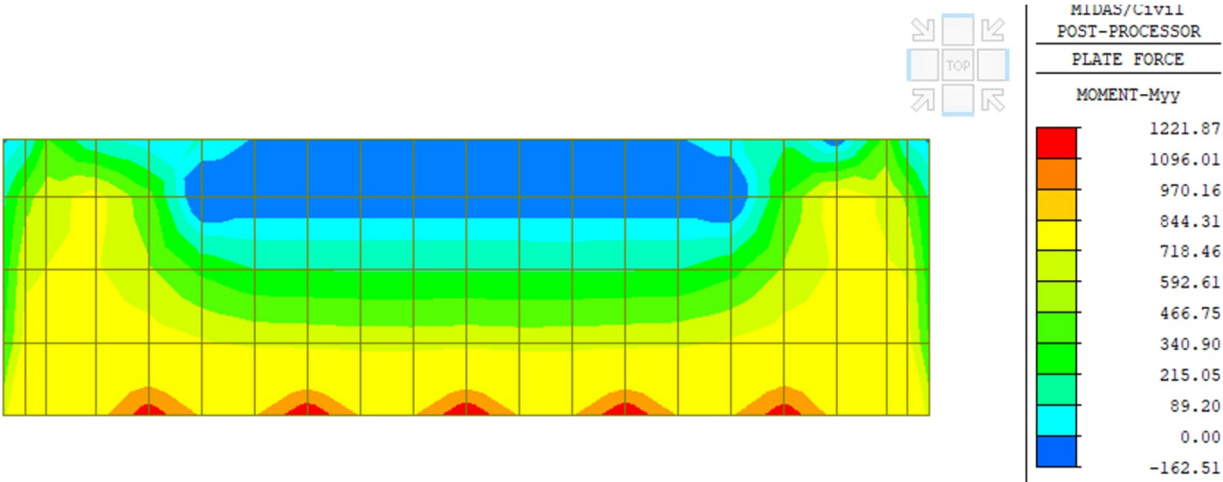


Figura 89 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro frontale: M_{yy} [kNm/m]

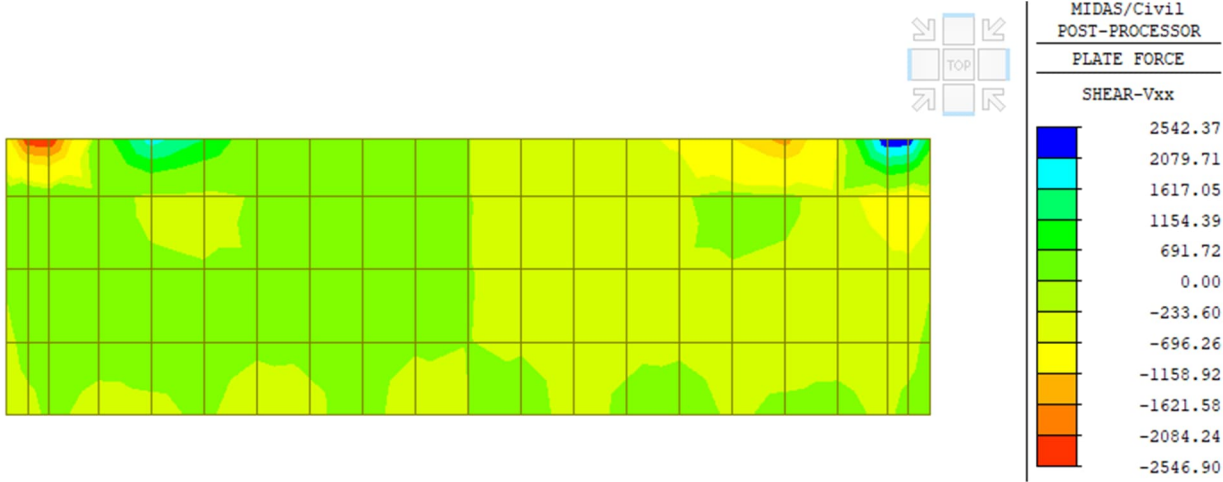


Figura 90 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro frontale: V_{xx} [kN/m]

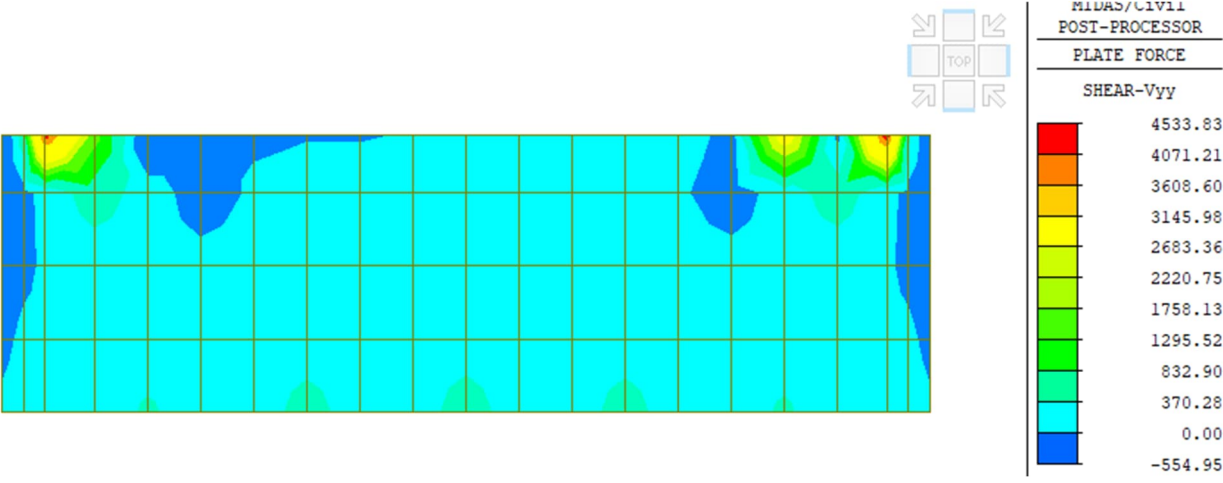


Figura 91 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro frontale: V_{yy} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

10.2.6 Risultati verifiche SLU e SLE

In questo paragrafo si riportano i risultati delle verifiche di stato limite ultimo e di stato limite di esercizio eseguite sul muro frontale della spalla. Le verifiche sono state eseguite su una sezione rettangolare larga 1.0 m e alta 2.5m, rappresentativa di una porzione orizzontale di muro situata alla base del muro stesso. La sezione resistente si considera armata nel modo seguente:

- Doppio strato di Ø30/20: Armatura verticale posteriore (lato rilevato);
- Singolo strato di Ø30/20: Armatura verticale anteriore;
- Spilli Ø20/40x40: Armatura a taglio.

Le sollecitazioni di calcolo adottate nelle verifiche sono quelle riportate nelle rappresentazioni grafiche precedenti, anche riassunte in tabella seguente. La sollecitazione di taglio è stata calcolata mettendo in quadratura i tagli V_{xx} e V_{yy} , considerando che la massima sollecitazione in corrispondenza del piano appoggi sarà ripresa da apposita armatura ivi localizzata. Ciò premesso, la verifica a taglio in condizioni sismiche sarà eseguita considerando le sollecitazioni medie sul paramento.

Tabella 24 –Sollecitazioni di calcolo muro frontale

Combinazione [-]	N_{sd} [kN/m]	M_{sd} [kNm/m]	V_{sd} [kN/m]
Quasi permanente	-2360.94	1221.87	784.60
Frequente	-2776.09	1431.66	942.68
Caratteristica	-3097.16	1541.84	1098.41
Fondamentale (SLU)	-4219.57	2152.38	1541.66
Sismica (SLV)	-2444.4	6268.34	3009.81

I risultati delle verifiche strutturali di stato limite ultimo statiche e sismiche e quelli delle verifiche di stato limite di esercizio sono riportati nel seguente prospetto. Come si vede, tutte le verifiche sono soddisfatte.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B2300040001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

FOGLIO VERSIONE R21

INPUT

SOLLECITAZIONI DI VERIFICA

Combinazione	N _{sd} [kN]	M _{sd} [kNm]	V _{sd} [kN]
SLE Quasi Permanente	-2360.9	1221.9	784.6
SLE Frequente	-2776.1	1431.7	942.7
SLE Rara	-3097.2	1541.8	1098.4
SLU	-4219.6	2152.4	1541.7
SLV	-2444.4	6268.3	3009.8

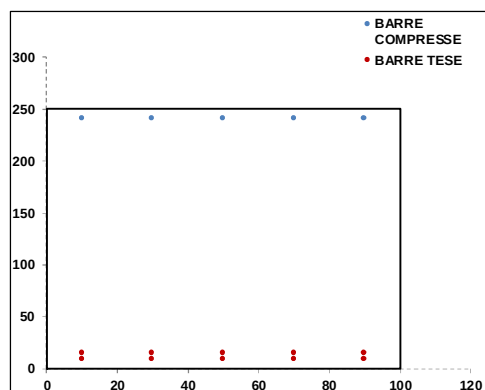
CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE IN C.A.

Geometria della sezione			
Base (ortogonale al Taglio)	B [cm]	100	
Altezza (parallela al Taglio)	H [cm]	250	
Altezza utile della sezione	d [cm]	238.00	
Area di calcestruzzo	A _c [cm ²]	25000	

Armatura longitudinale tesa		1° STRATO	2° STRATO	3° STRATO
Numero Barre	n	5.00	5.00	0.00
Diametro	φ [mm]	30	30	0
Posizione dal lembo esterno	c [mm]	90	150	50
Area strato	A _s [cm ²]	35.34	35.34	0.00
Percentuale di armatura	ρ [%]		0.297%	

Armatura longitudinale compressa		1° STRATO	2° STRATO	3° STRATO
Numero Barre	n	5.00	0.00	0.00
Diametro	φ [mm]	30	0	0
Posizione dal lembo esterno	c' [mm]	90	0	50
Area strato	A _s ' [cm ²]	35.34	0.00	0.00
Percentuale di armatura	ρ [%]		0.148%	

Armatura trasversale		1° TIPO	2° TIPO	3° TIPO
Diametro	φ [mm]	20	0	0
Numero bracci	n _{bt}	2.5	0	0
Passo	s _w [mm]	400	0	0
Inclinazione	α [deg]	90	90	90
Area di armatura a metro	A _{sw} /s _w [cm ² /m]	19.63	0.00	0.00



CARATTERISTICHE REOLOGICHE DEI MATERIALI

Calcestruzzo			
Resistenza cubica a compressione	R _{ck}	40	
Resistenza cilindrica caratteristica a compressione	f _{ck} [MPa]	33.20	
Resistenza cilindrica media a compressione	f _{cm} [MPa]	41.20	
Resistenza media a trazione	f _{ctm} [MPa]	3.10	
Resistenza caratteristica a trazione	f _{ctk} [MPa]	2.17	
Resistenza di progetto a compressione	f _{cd} [MPa]	18.81	
Resistenza di progetto delle bielle compresse	f _{cd} ' [MPa]	9.79	

Acciaio			
Resistenza caratteristica a snervamento	f _{yk} [MPa]	450	
Resistenza di progetto a snervamento	f _{yd} [MPa]	391	

OUTPUT

VERIFICHE IN ESERCIZIO

Verifica Tensionale			
Calcestruzzo SLE Quasi Permanente	σ _c [Mpa]	1.97	σ limit < 14.94
Calcestruzzo SLE Rara	σ _c [Mpa]	2.53	σ limit < 19.92
Acciaio SLE Rara	σ _s [Mpa]	1.03	σ limit < 360.00

Verifica di fessurazione			
Altezza efficace	h _{ceff} [cm]	6.70	6.55
Area efficace	A _{ceff} [cm ²]	670	655
Percentuale di armatura all'interno dell' area efficace	P _{D,eff} [%]	10.5445%	10.7897%
Coefficiente dipendente dalla durata del carico	k _t	0.4	0.6
Coefficiente dipendente dall'aderenza delle armature	k ₁	0.8	0.8
Coefficiente dipendente dalla distribuzione deformazioni	k ₂	0.5	0.5
Coefficiente dipendente dal copriferro	k ₃	3.4	3.4
Tensione di trazione nella barra di acciaio	σ _s [MPa]	1.4	1.6
Spaziatura massima delle fessure	s _{r,max} [mm]	303	302
Differenza di deformazione media acciaio-calcestruzzo	(ε _{sm} - ε _{cm})	0.0004%	0.0005%
Apertura delle fessure di calcolo	w _d [mm]	0.001	0.001
Valore limite di apertura delle fessure	w _{lim} [mm]	0.200	0.300

VERIFICA DI RESISTENZA A TAGLIO

Sollecitazioni di progetto			
Taglio sollecitante = max Taglio(SLU,SLV)	V _{Ed} [kN]	3009.8	
Sforzo Normale concomitante al massimo taglio	N _{Ed} [kN]	-2444.4	

Verifica di resistenza in assenza di armatura specifica			
Resistenza di progetto senza armatura specifica	V _{Rd1} [kN]	1139.02	
Coefficiente di sicurezza	V _{Rd1} /V _{sd}	0.38	

Verifica di resistenza dell'armatura specifica			
CoTan(θ) di progetto	cotan(θ)	2.5	
Resistenza a taglio delle bielle compresse in cls	V _{Rd2} [kN]	7606	
Resistenza a taglio dell'armatura	V _{Rd3} [kN]	4114	
Resistenza a taglio di progetto	V _{Rd} [kN]	4114	
Coefficiente di sicurezza	V _{Rd} /V _{Ed}	1.37	

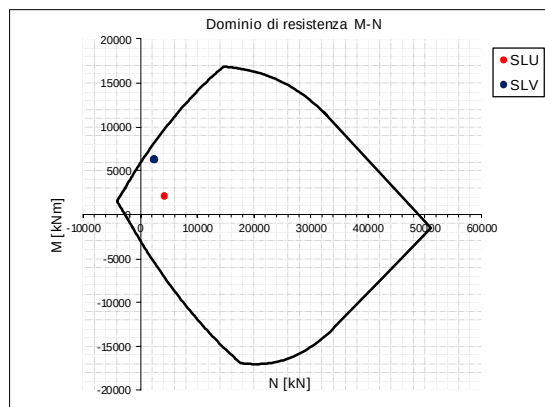
VERIFICA DI RESISTENZA A PRESSO-FLESSIONE

Sollecitazioni di progetto			
Momento sollecitante	M _{Ed} [kNm]	2152.4	6268.3
Sforzo Normale concomitante	N _{Ed} [kN]	-4219.6	-2444.4

Verifica di resistenza in termini di momento			
Momento resistente	M _{Rd} [kNm]	9715.0	8181.9
Coefficiente di sicurezza	M _{Rd} /M _{Ed}	4.51	1.31

Verifica di resistenza in termini di sforzo normale			
Sforzo normale resistente	N _{Rd} [kN]	-	-
Coefficiente di sicurezza	N _{Rd} /N _{sd}	-	-

Coefficiente di sicurezza minimo			
		-	-



STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

10.3 Muro paraghiaia

I risultati delle verifiche strutturali eseguite sul muro paraghiaia della spalla sono riportati nella parte conclusiva del paragrafo, mentre qui di seguito si riportano i grafici delle sollecitazioni su di esso gravanti.

10.3.1 Sollecitazioni di calcolo in combinazione sismica (SLV)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni sismiche calcolate per il muro paraghiaia della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale orizzontale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale verticale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre orizzontali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle estere);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre verticali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne)
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano del muro, agente nel piano verticale YZ (positivo se uscente dal piano del muro);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano del muro, agente nel piano orizzontale XZ (positivo se uscente dal piano del muro).

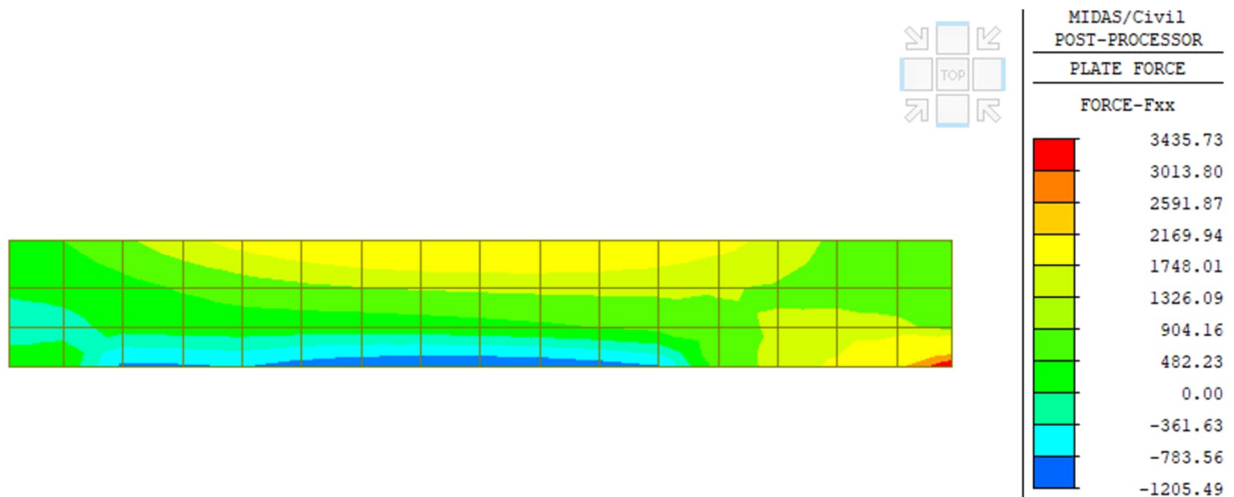


Figura 92 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro paraghiaia: F_{xx}

[kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

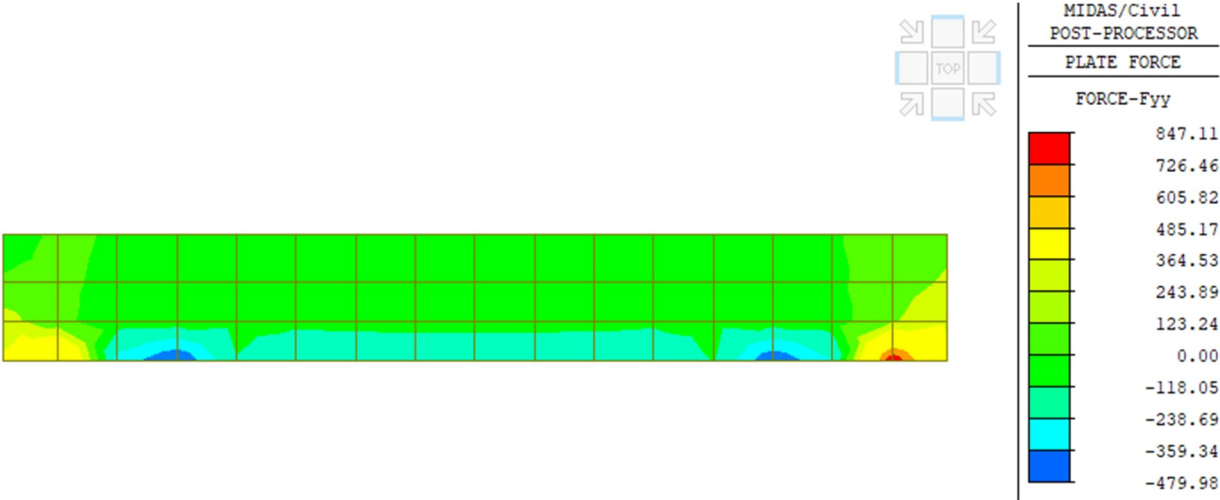


Figura 93 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro paraghiaia: F_{yy} [kN/m]

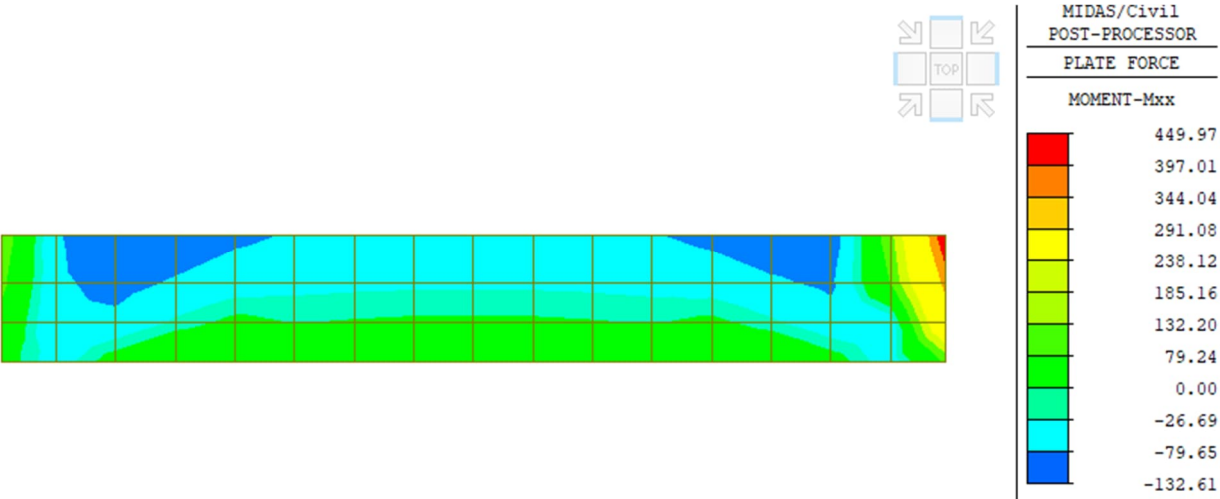


Figura 94 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro paraghiaia: M_{xx} [kNm/m]

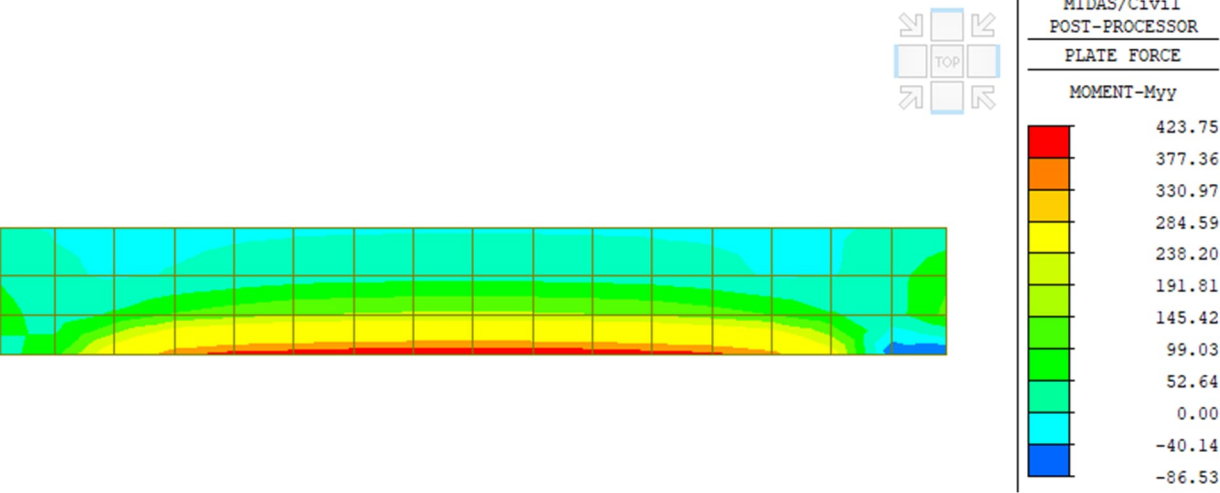


Figura 95 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro paraghiaia: M_{yy} [kNm/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

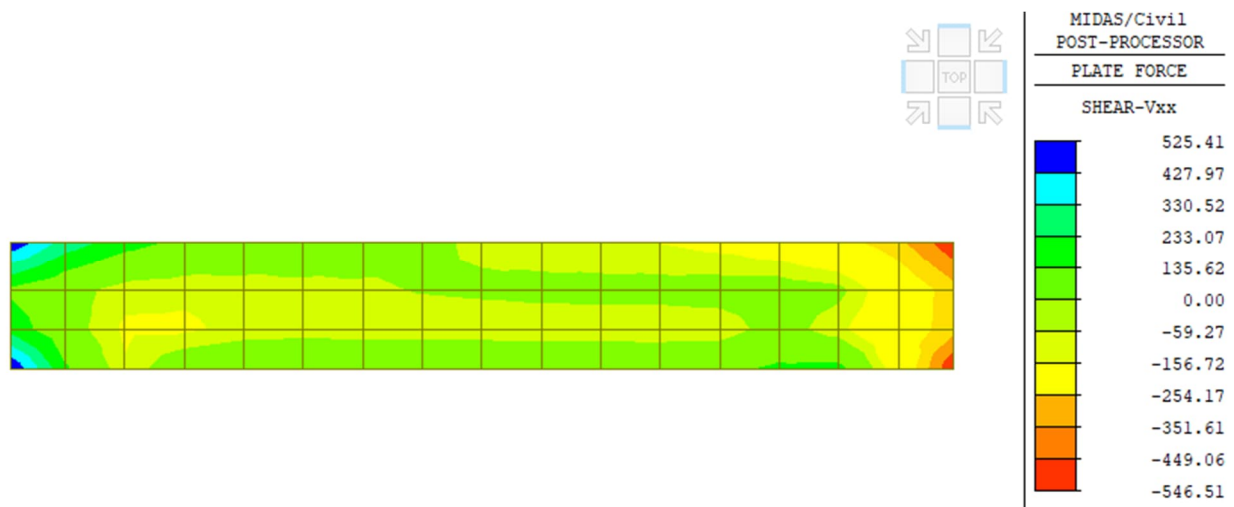


Figura 96 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro paraghiaia: V_{xx} [kN/m]

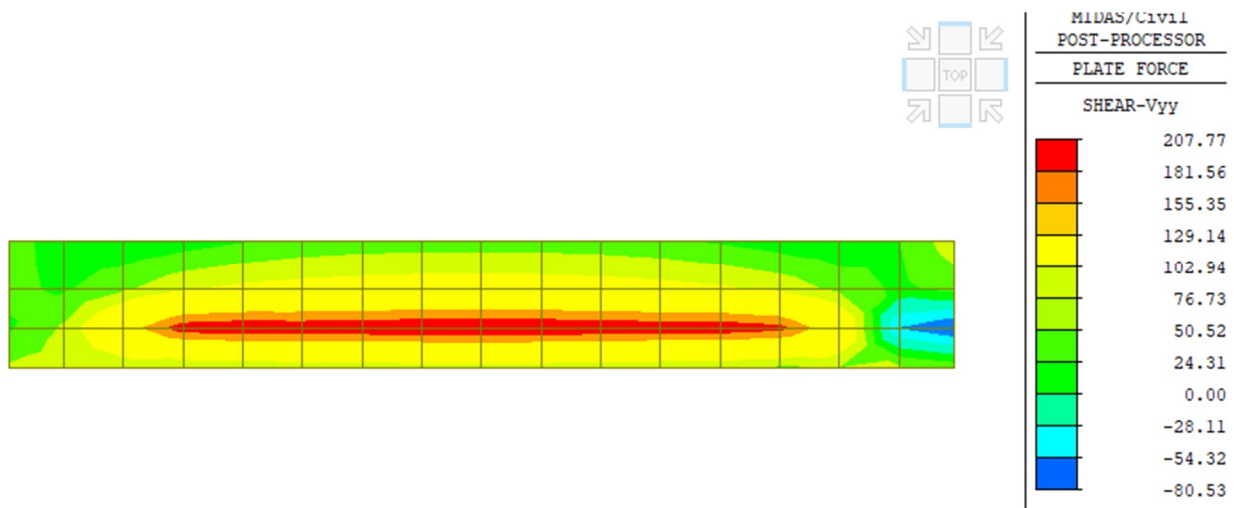


Figura 97 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro paraghiaia: V_{yy} [kN/m]

10.3.2 Sollecitazioni di calcolo ultime in combinazione statica (SLU)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni di stato limite ultimo statiche (SLU), calcolate per il muro paraghiaia della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale orizzontale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale verticale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre orizzontali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre verticali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne)

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano del muro, agente nel piano verticale YZ (positivo se uscente dal piano del muro);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano del muro, agente nel piano orizzontale XZ (positivo se uscente dal piano del muro).

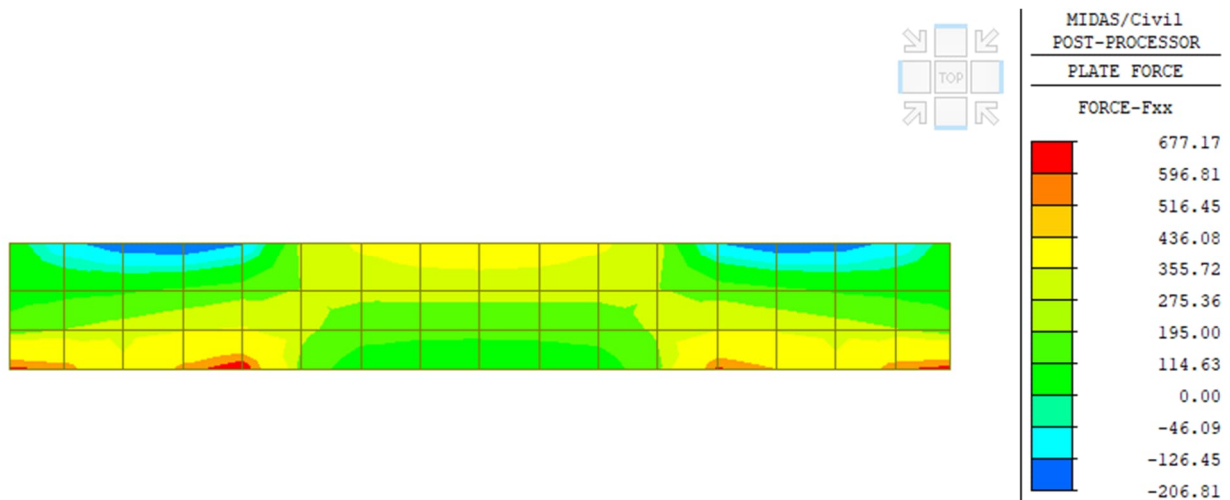


Figura 98 – Involuppo Sollecitazioni SLU paraghiaia: F_{xx} [kN/m]

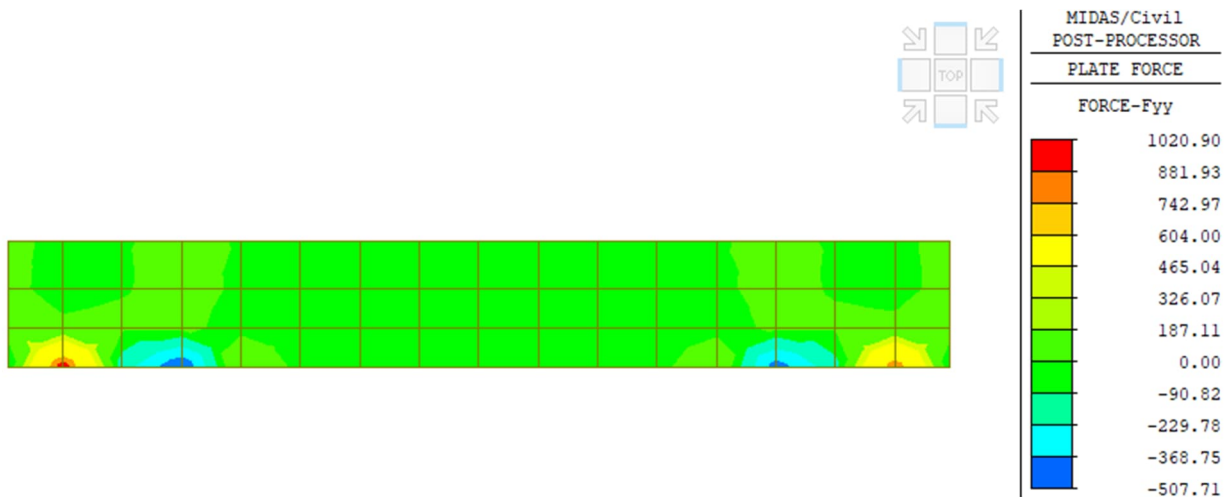


Figura 99 – Involuppo Sollecitazioni SLU muro paraghiaia: F_{yy} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

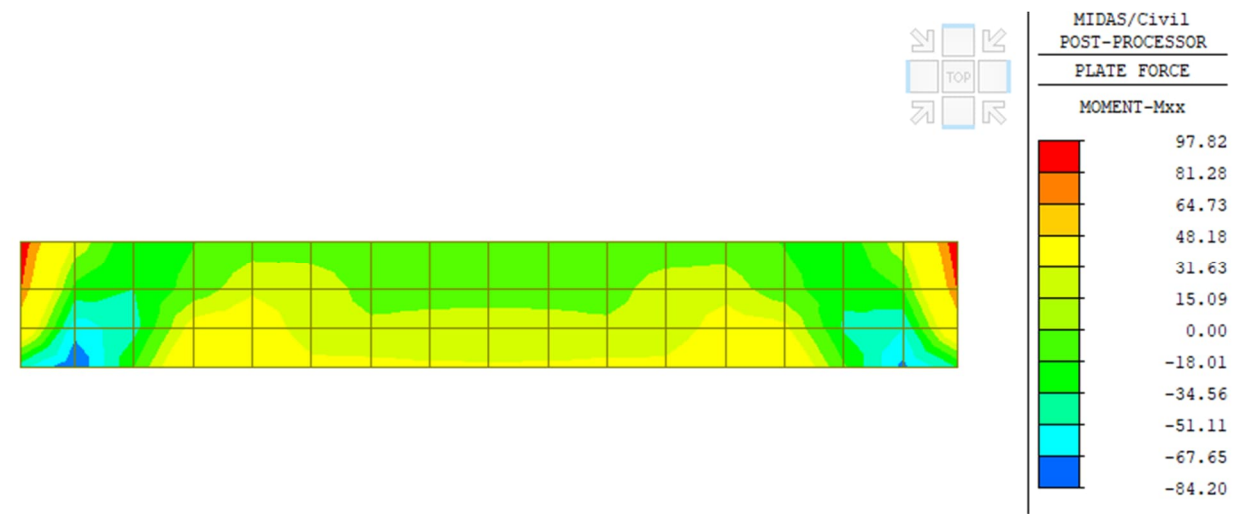


Figura 100 – Involuppo Sollecitazioni SLU muro paraghiaia: M_{xx} [kNm/m]

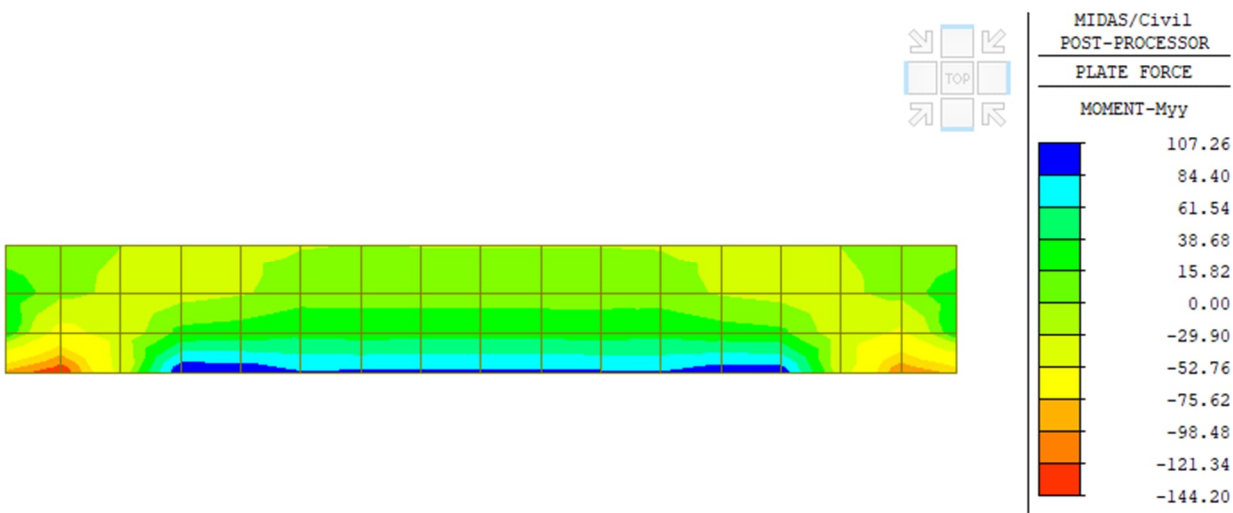


Figura 101 – Involuppo Sollecitazioni SLU muro paraghiaia: M_{yy} kNm/m]

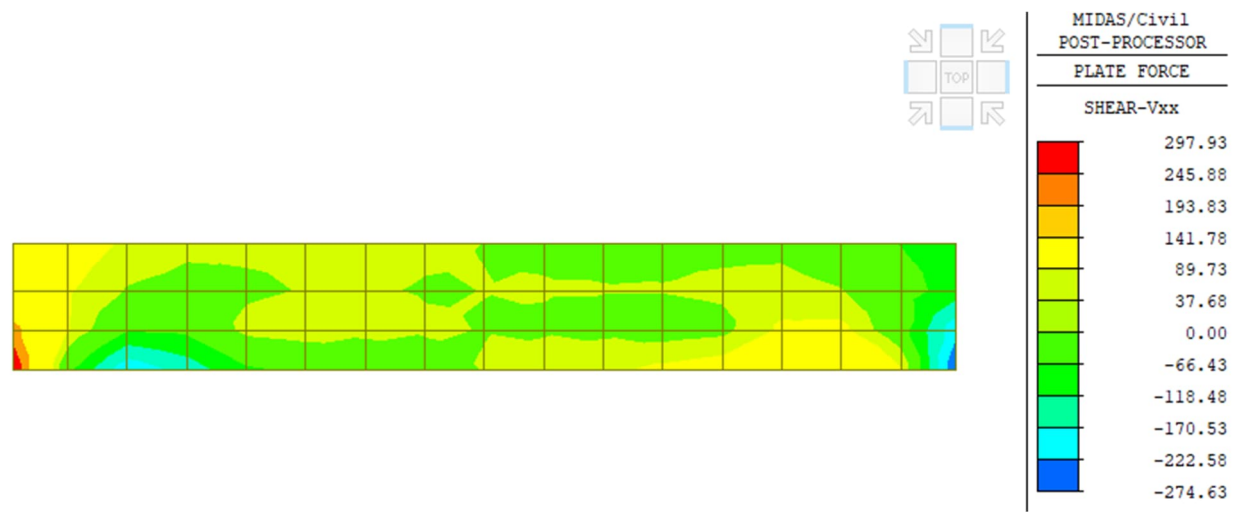


Figura 102 – Involuppo Sollecitazioni SLU muro paraghiaia: V_{xx} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

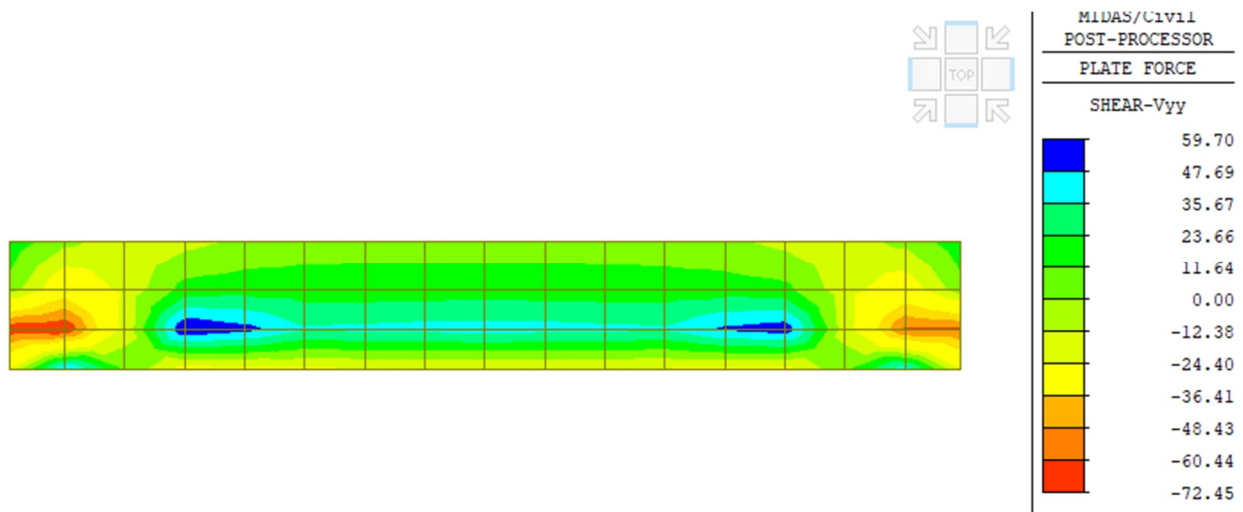


Figura 103 – Involuppo Sollecitazioni SLU muro paraghiaia: V_{yy} [kN/m]

10.3.3 Sollecitazioni in combinazione caratteristica (SLE)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni in combinazione caratteristica (SLE), calcolate per il muro paraghiaia della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale orizzontale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale verticale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre orizzontali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre verticali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne);
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano del muro, agente nel piano verticale YZ (positivo se uscente dal piano del muro);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano del muro, agente nel piano orizzontale XZ (positivo se uscente dal piano del muro).

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

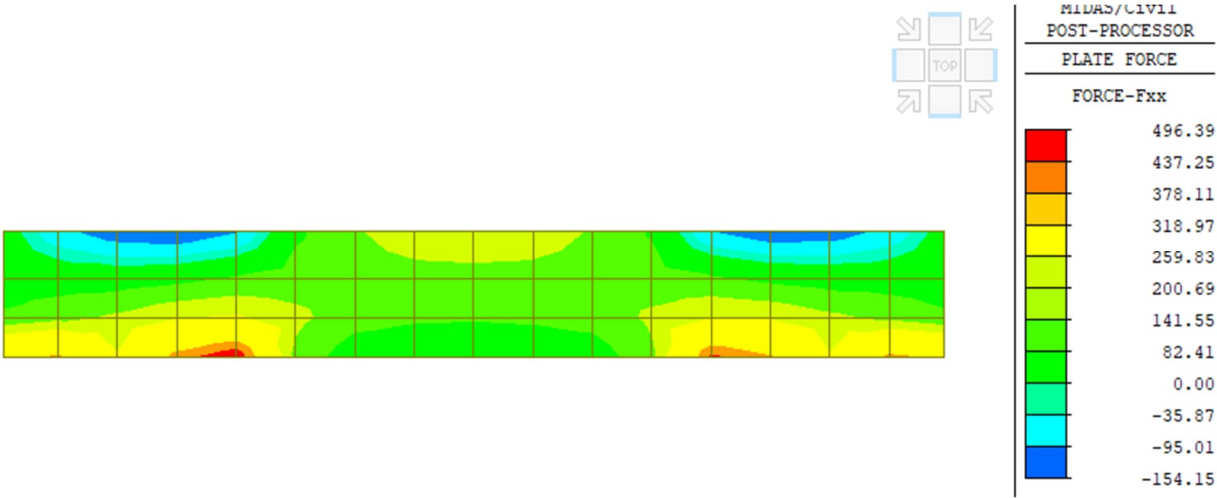


Figura 104 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro paraghiaia: Fxx [kN/m]

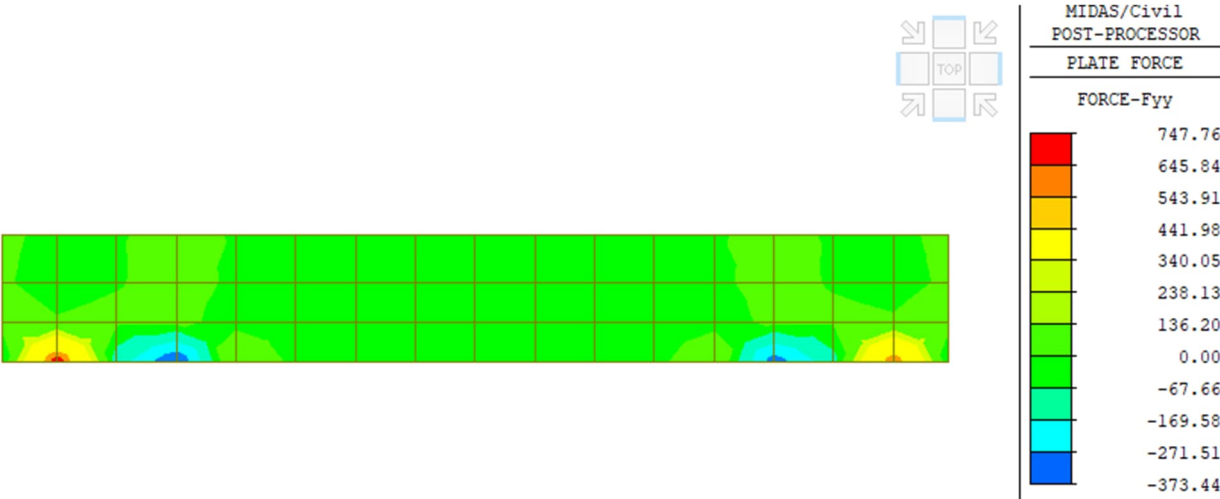


Figura 105 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro paraghiaia: Fyy [kN/m]

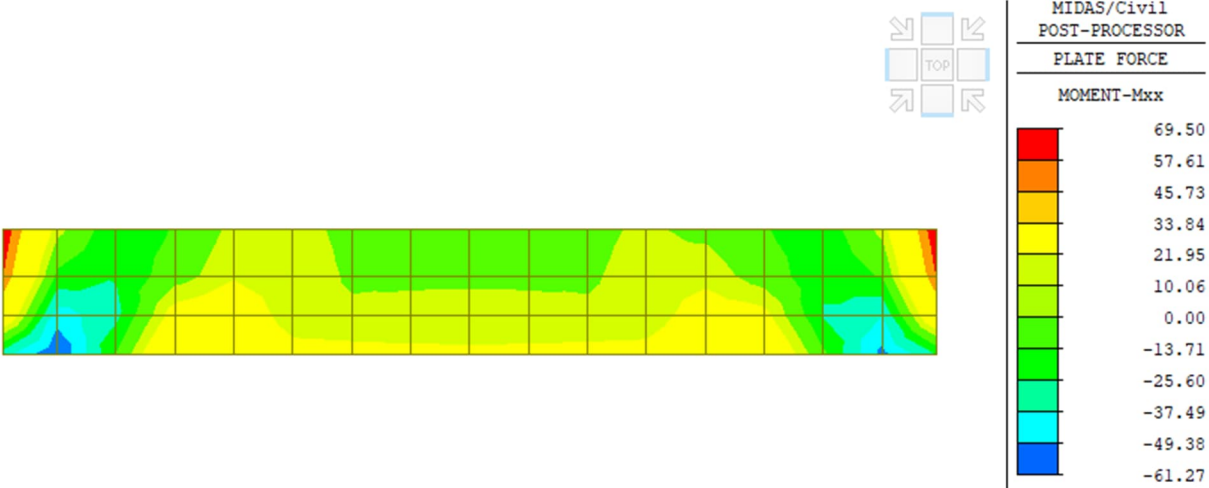


Figura 106 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro paraghiaia: Mxx [kNm/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

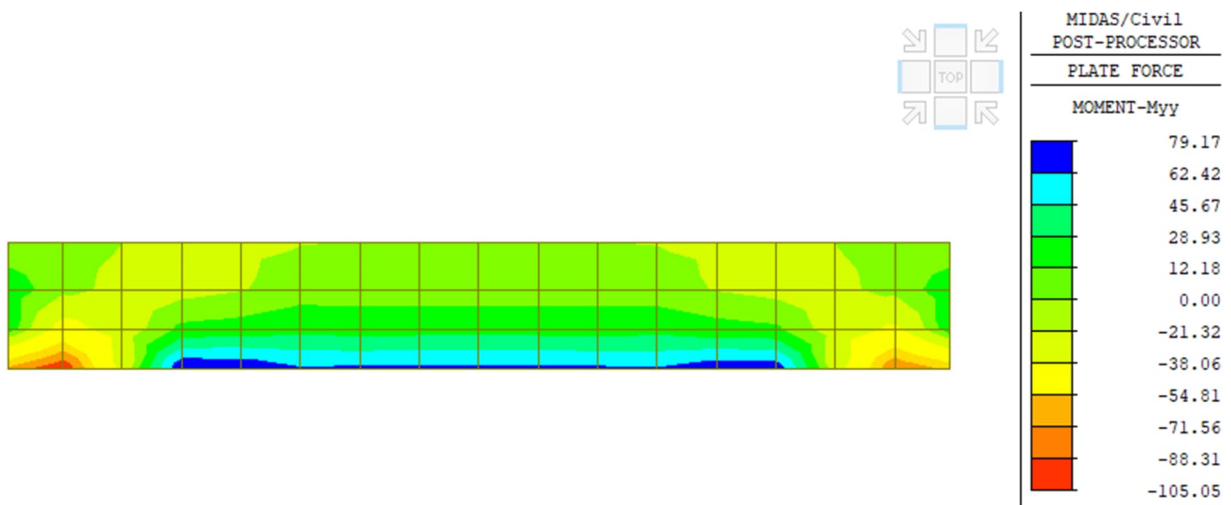


Figura 107 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro paraghiaia: M_{yy} [kNm/m]

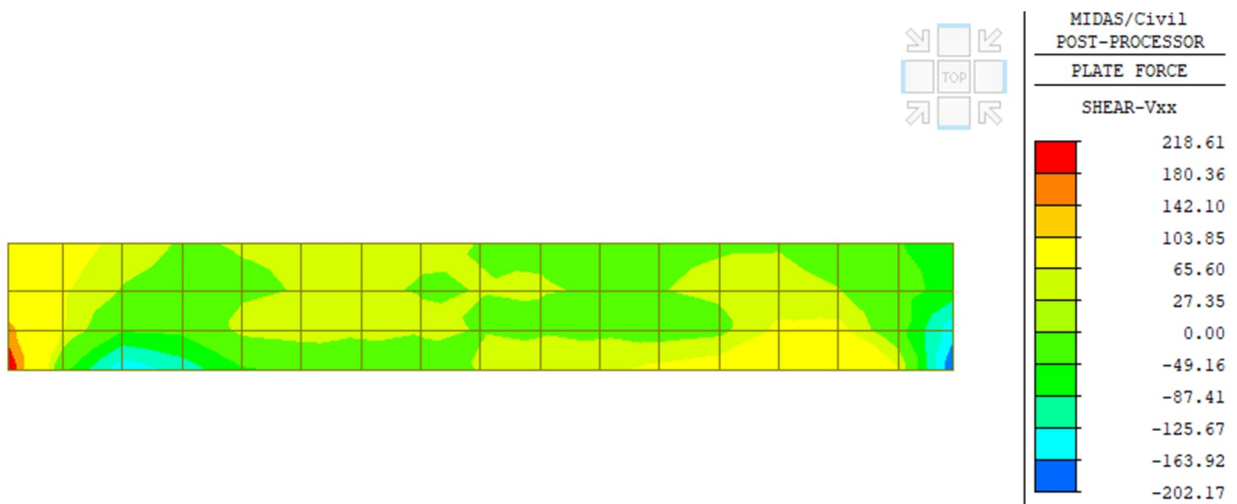


Figura 108 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro paraghiaia: V_{xx} [kN/m]

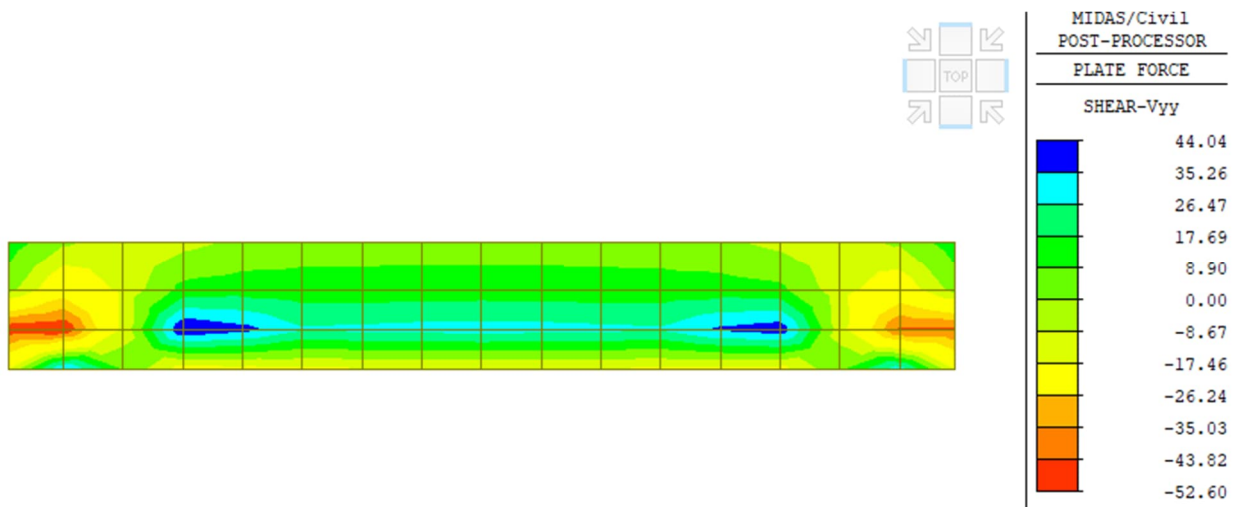


Figura 109 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro paraghiaia: V_{yy} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

10.3.4 Sollecitazioni in combinazione frequente (SLE)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni in combinazione frequente (SLE), calcolate per il muro paraghiaia della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale orizzontale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale verticale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre orizzontali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle estere);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre verticali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne)
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano del muro, agente nel piano verticale YZ (positivo se uscente dal piano del muro);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano del muro, agente nel piano orizzontale XZ (positivo se uscente dal piano del muro).

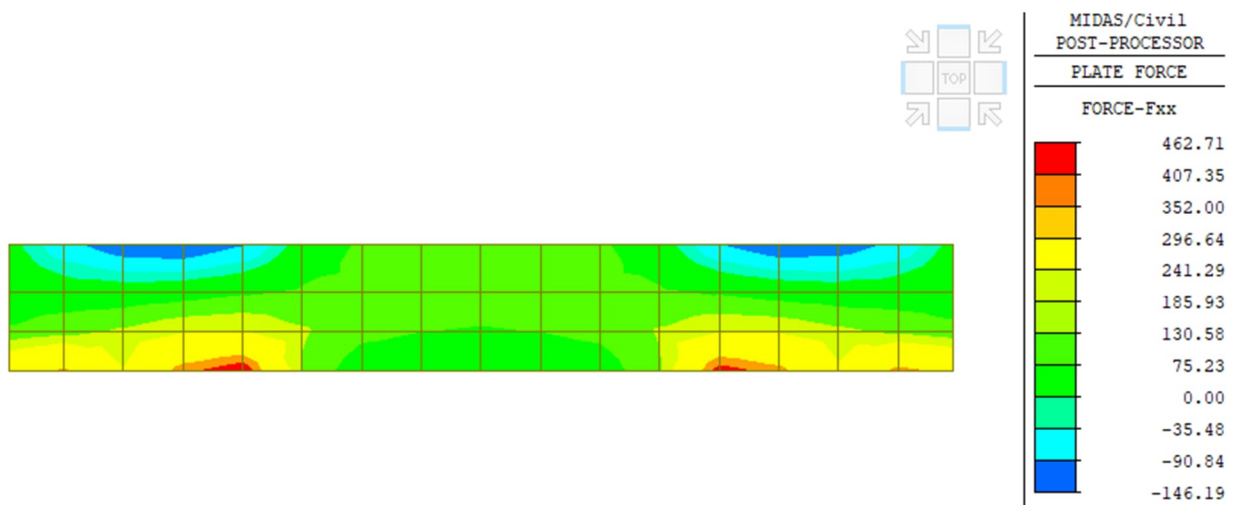


Figura 110 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro paraghiaia: F_{xx} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

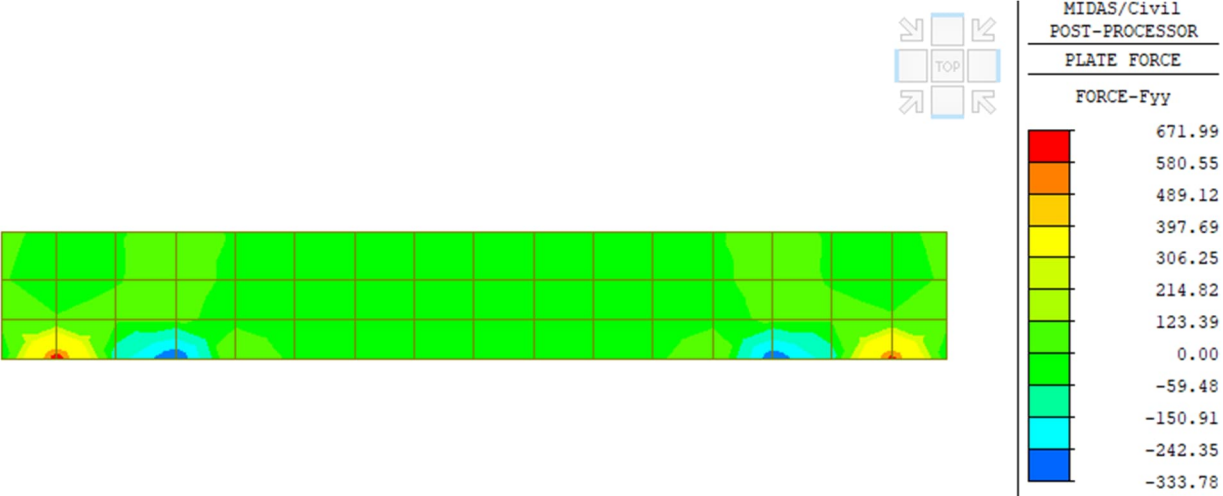


Figura 111 – Inviluppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro paraghiaia: F_{yy} [kN/m]

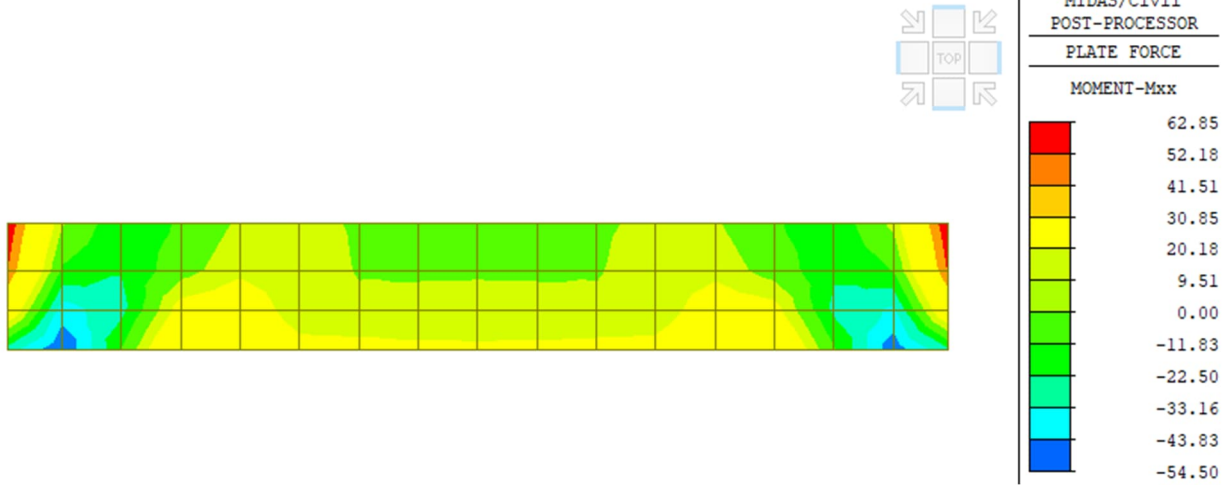


Figura 112 – Inviluppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro paraghiaia: M_{xx}[kNm/m]

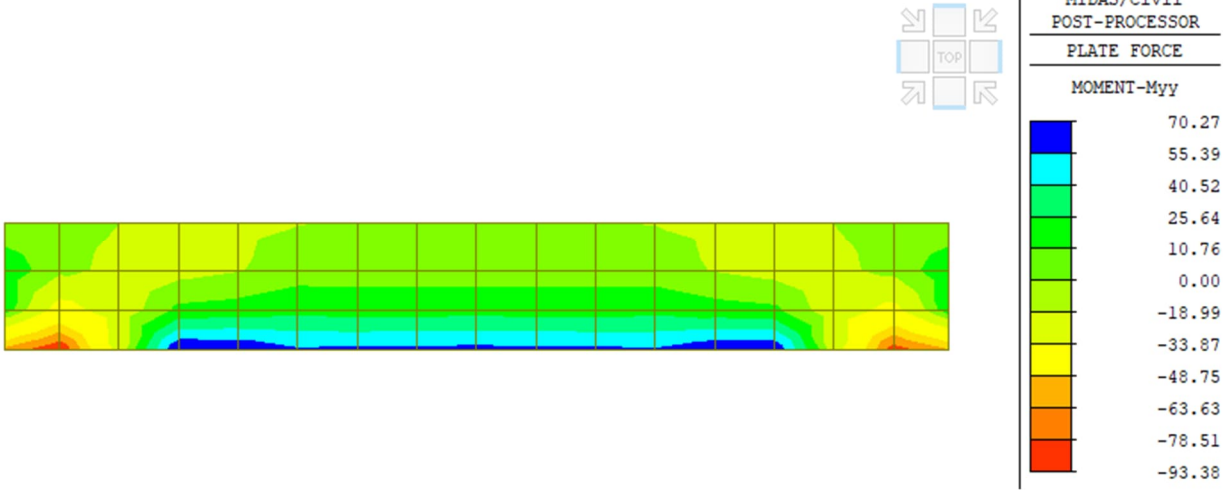


Figura 113 – Inviluppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro paraghiaia: M_{yy}[kNm/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandatara) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

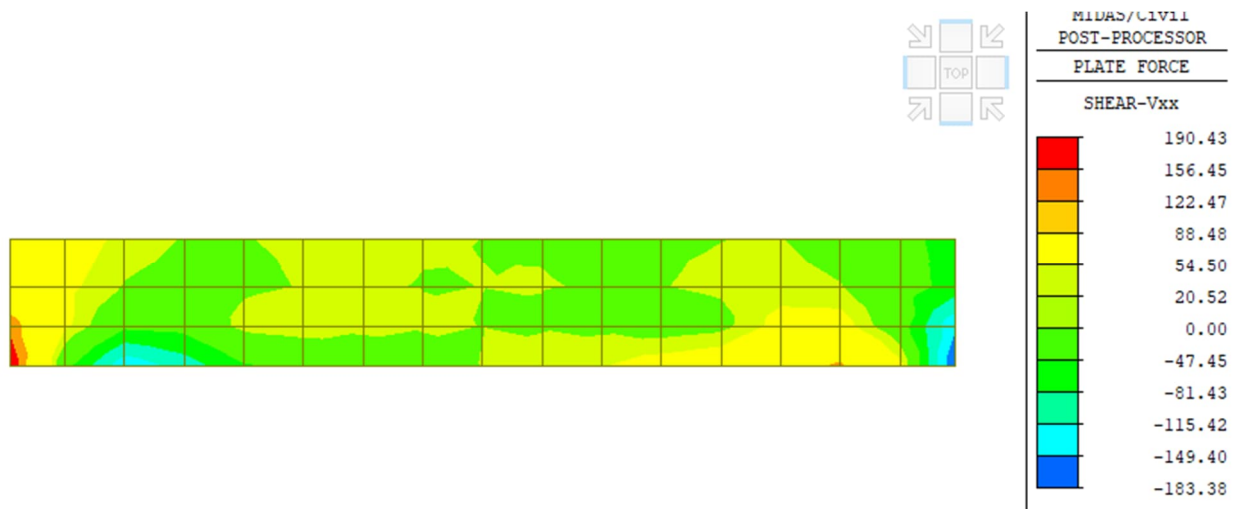


Figura 114 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro paraghiaia: V_{xx} [kN/m]

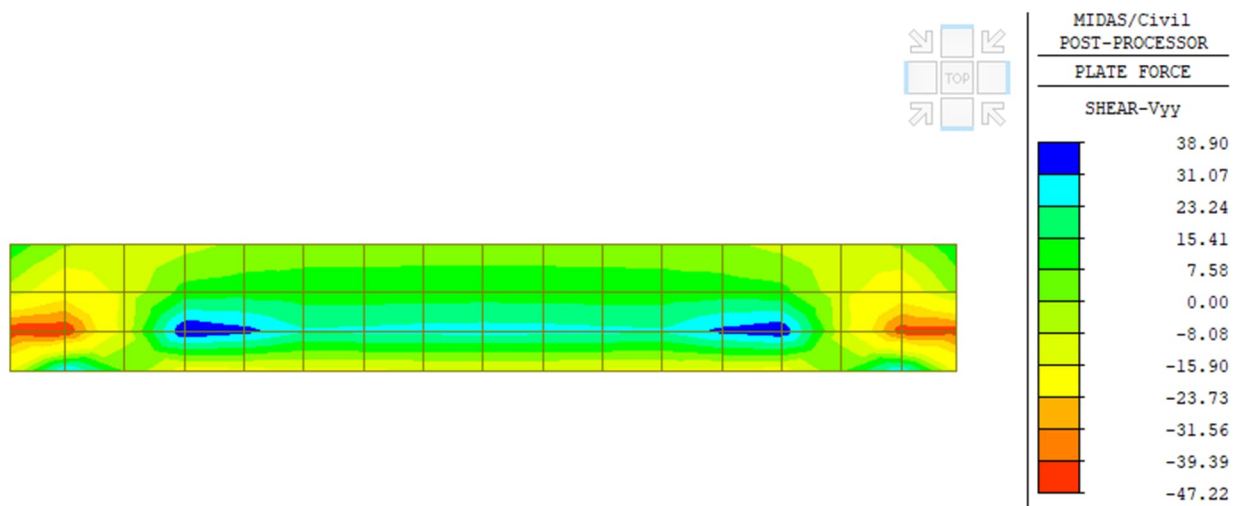


Figura 115 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro paraghiaia: V_{yy} [kN/m]

10.3.5 Sollecitazioni in combinazione quasi permanente (SLE)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni in combinazione quasi permanente (SLE), calcolate per il muro paraghiaia della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale orizzontale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale verticale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre orizzontali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle estere);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre verticali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne)

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano del muro, agente nel piano verticale YZ (positivo se uscente dal piano del muro);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano del muro, agente nel piano orizzontale XZ (positivo se uscente dal piano del muro).

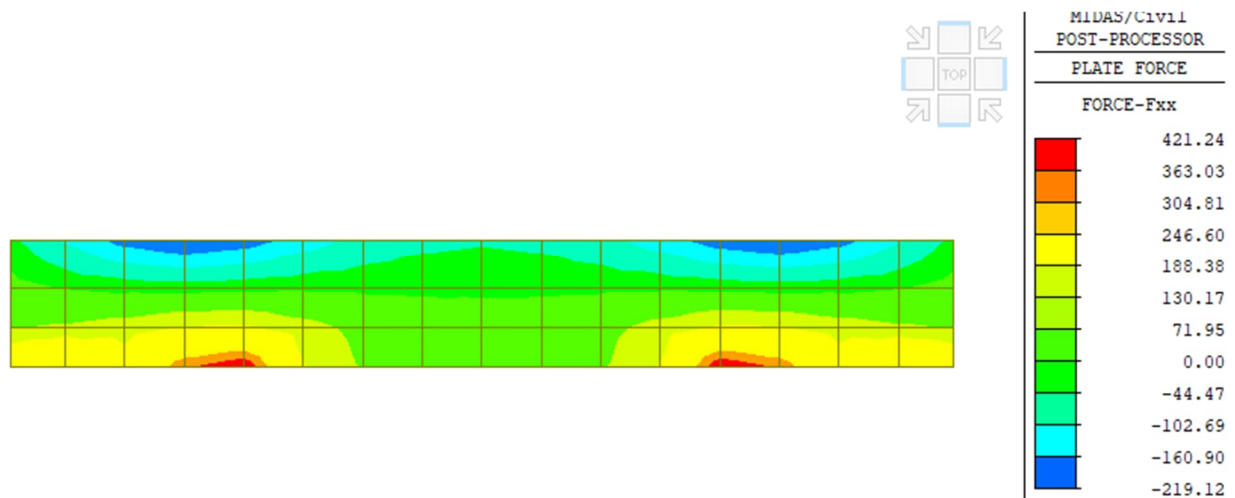


Figura 116 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro paraghiaia: F_{xx} [kN/m]

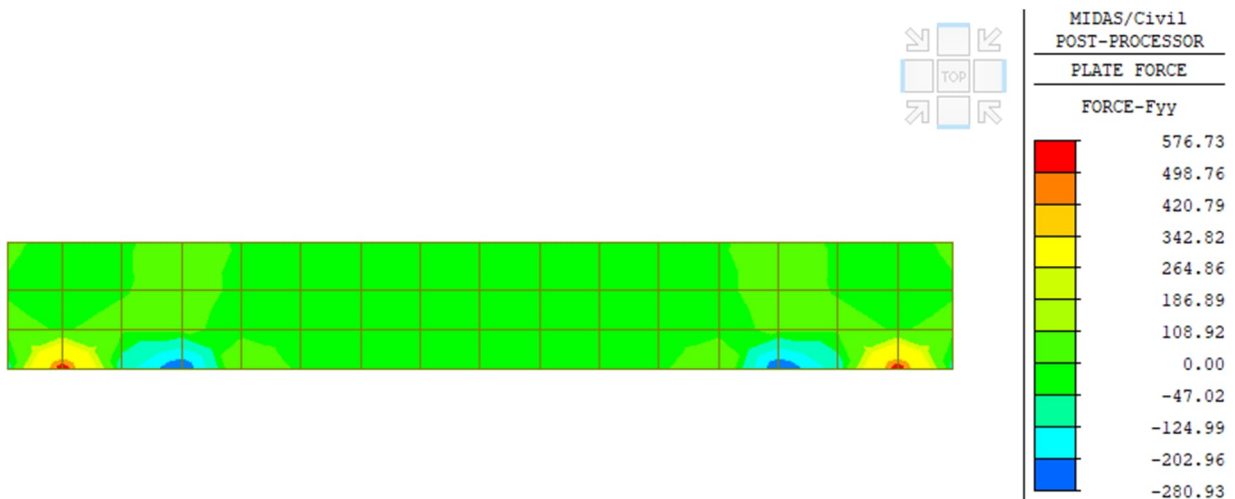


Figura 117 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro paraghiaia: F_{yy} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

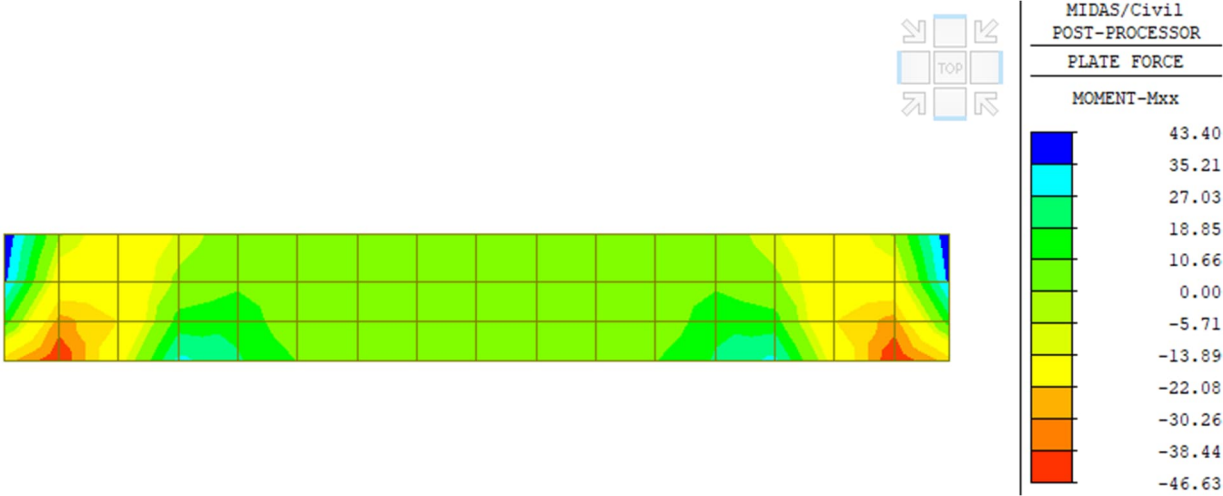


Figura 118 – Inviluppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro paraghiaia: M_{xx} [kNm/m]

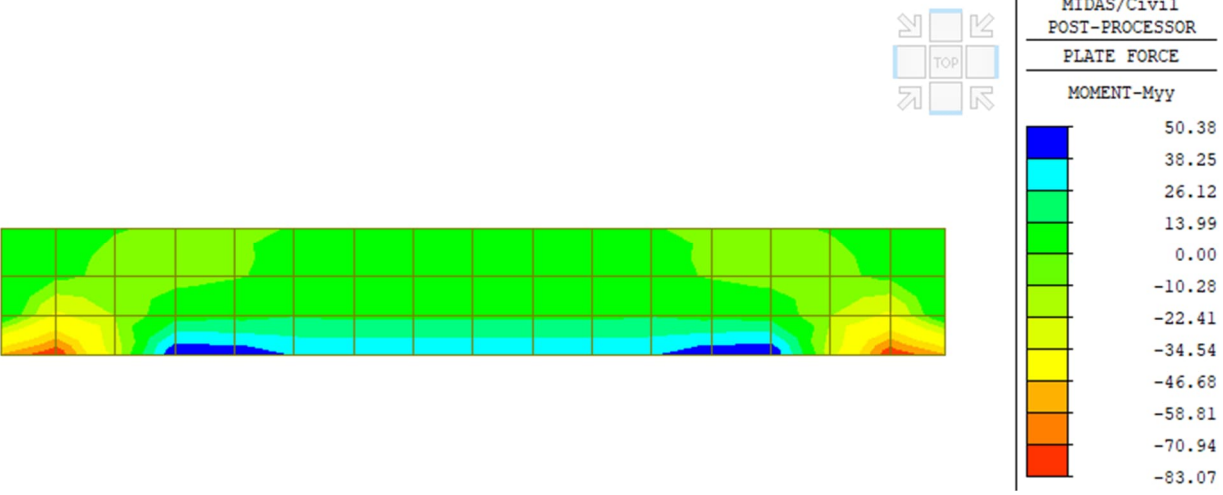


Figura 119 – Inviluppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro paraghiaia: M_{yy} [kNm/m]

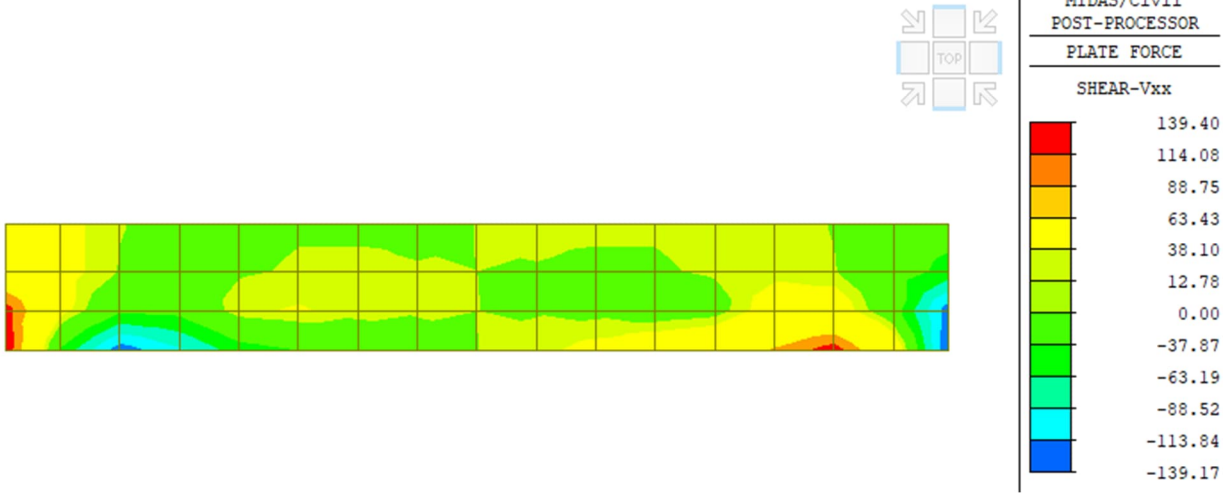


Figura 120 – Inviluppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro paraghiaia: V_{xx} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

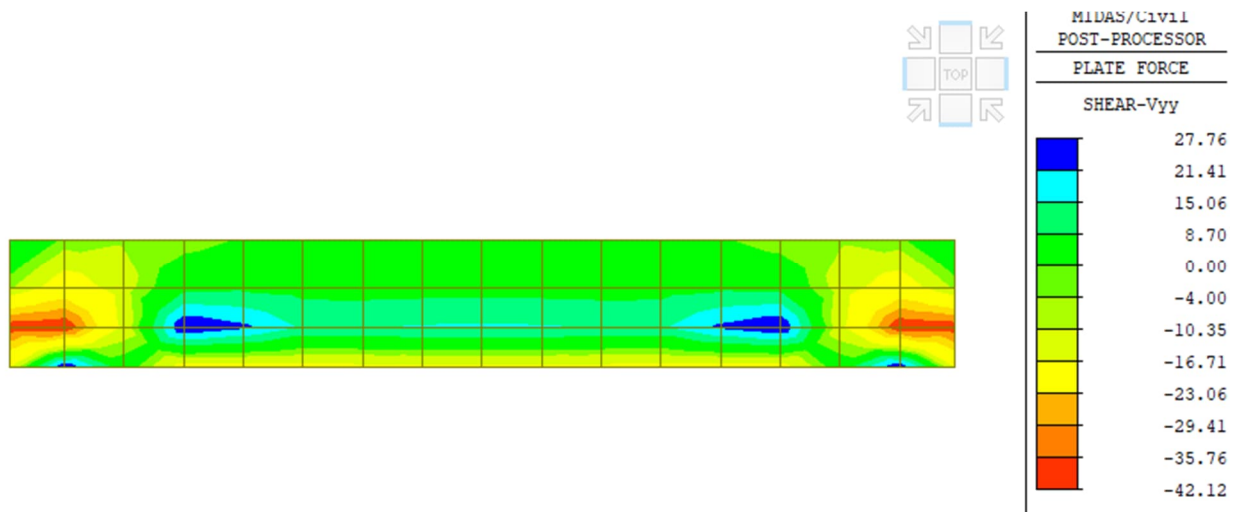


Figura 121 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro paraghiaia: V_{yy} [kN/m]

10.3.6 Risultati verifiche SLU e SLE

In questo paragrafo si riportano i risultati delle verifiche di stato limite ultimo e di stato limite di esercizio eseguite sul muro paraghiaia della spalla. Le verifiche sono state eseguite su una sezione rettangolare larga 1.0 m e alta 0.6m, rappresentativa di una porzione orizzontale di muro situata alla base del muro stesso. La sezione resistente si considera armata nel modo seguente:

- $\varnothing 20/10$: Armatura verticale interna (lato terreno);
- $\varnothing 20/20$: Armatura verticale esterna;
- Spilli $\varnothing 16/40 \times 40$: Armatura a taglio.

Le sollecitazioni di calcolo adottate nelle verifiche sono quelle riportate nelle rappresentazioni grafiche precedenti, riassunte in tabella seguente. I tagli sollecitanti sono stati calcolati mettendo in quadratura le componenti V_{xx} e V_{yy} a base muro, trascurando i picchi localizzati che si hanno in corrispondenza dei vertici inferiori del paramento (vedere tagli SLV). Tali singolarità sono fittizie e figlie della modellazione adottata, che concentra in un unico punto (nodo di intersezione di elementi diversi) meccanismi di trasmissione delle forze che nella realtà avvengono in modo diffuso.

Tabella 25 –Sollecitazioni di calcolo muro paraghiaia

Combinazione [-]	N_{sd} [kN/m]	M_{sd} [kNm/m]	V_{sd} [kN/m]
Quasi permanente	-124.99	50.38	69.02
Frequente	-150.91	70.27	90.25
Caratteristica	-169.58	78.17	97.88
Fondamentale (SLU)	-229.78	107.26	132.67
Sismica (SLV)	-238.69	423.75	260.25

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>ST</td><td>712</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	ST	712	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	ST	712	r00								

I risultati delle verifiche strutturali di stato limite ultimo statiche e sismiche e quelli delle verifiche di stato limite di esercizio sono riportati nel seguente prospetto. Come si vede, tutte le verifiche sono soddisfatte.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

FOGLIO VERSIONE R21

INPUT

SOLLECITAZIONI DI VERIFICA

Combinazione	N _{sd} [kN]	M _{sd} [kNm]	V _{sd} [kN]
SLE Quasi Permanente	-125	50	69.01879
SLE Frequente	-151	70	90.24803
SLE Rara	-170	78	97.87763
SLU	-230	107	133
SLV	-239	424	260

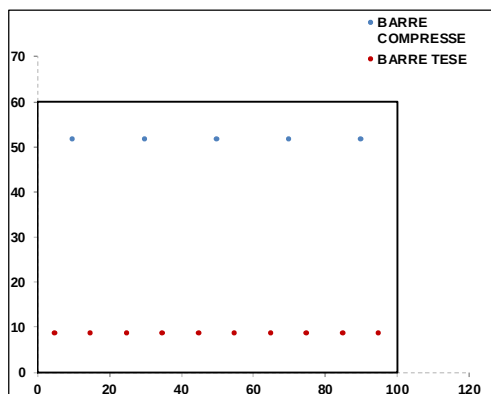
CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE IN C.A.

Geometria della sezione		
Base (ortogonale al Taglio)	B [cm]	100
Altezza (parallela al Taglio)	H [cm]	60
Altezza utile della sezione	d [cm]	51.50
Area di calcestruzzo	A _c [cm ²]	6000

Armatura longitudinale tesa		1° STRATO	2° STRATO	3° STRATO
Numero Barre	n	10.00	0.00	0.00
Diametro	φ [mm]	20	0	0
Posizione dal lembo esterno	c [mm]	85	50	50
Area strato	A _s [cm ²]	31.42	0.00	0.00
Percentuale di armatura	ρ [%]	0.610%		

Armatura longitudinale compressa		1° STRATO	2° STRATO	3° STRATO
Numero Barre	n	5.00	0.00	0.00
Diametro	φ [mm]	20	0	0
Posizione dal lembo esterno	c' [mm]	85	50	50
Area strato	A _s ' [cm ²]	15.71	0.00	0.00
Percentuale di armatura	ρ [%]	0.305%		

Armatura trasversale		1° TIPO	2° TIPO	3° TIPO
Diametro	φ [mm]	16	0	0
Numero bracci	n _{bi}	2.5	0	0
Passo	s _v [mm]	400	0	0
Inclinazione	α [deg]	90	90	90
Area di armatura a metro	A _{sw} /s _w [cm ² /m]	12.57	0.00	0.00



CARATTERISTICHE REOLOGICHE DEI MATERIALI

Calcestruzzo		
Resistenza cubica a compressione	R _{ck}	40
Resistenza cilindrica caratteristica a compressione	f _{ck} [MPa]	33.20
Resistenza cilindrica media a compressione	f _{cm} [MPa]	41.20
Resistenza media a trazione	f _{ctm} [MPa]	3.10
Resistenza caratteristica a trazione	f _{ctk} [MPa]	2.17
Resistenza di progetto a compressione	f _{cd} [MPa]	18.81
Resistenza di progetto delle bielle compresse	f _{cd} [MPa]	9.79
Acciaio		
Resistenza caratteristica a snervamento	f _{yk} [MPa]	450
Resistenza di progetto a snervamento	f _{yd} [MPa]	391

OUTPUT

VERIFICHE IN ESERCIZIO

Verifica Tensionale		σ limit
Calcestruzzo SLE Quasi Permanente	σ _c [Mpa]	1.23 < 14.94
Calcestruzzo SLE Rara	σ _c [Mpa]	1.91 < 19.92
Acciaio SLE Rara	σ _s [Mpa]	30.74 < 360.00

Verifica di fessurazione		Quasi-perm	Frequent
Altezza efficace	h _{ceff} [cm]	11.25	11.74
Area efficace	A _{ceff} [cm ²]	1125	1174
Percentuale di armatura all'interno dell'area efficace	ρ _{p,eff} [%]	2.7927%	2.6751%
Coefficiente dipendente dalla durata del carico	k _t	0.4	0.6
Coefficiente dipendente dall'aderenza delle armature	k ₁	0.8	0.8
Coefficiente dipendente dalla distribuzione deformazioni	k ₂	0.5	0.5
Coefficiente dipendente dal copriferro	k ₃	3.4	3.4
Tensione di trazione nella barra di acciaio	σ _s [MPa]	17.7	27.6
Spaziatura massima delle fessure	s _{r,max} [mm]	377	382
Differenza di deformazione media acciaio-calcestruzzo	(ε _{sm} - ε _{cm})	0.0051%	0.0079%
Apertura delle fessure di calcolo	w _d [mm]	0.019	0.030
Valore limite di apertura delle fessure	w _{lim} [mm]	0.200	0.300

VERIFICA DI RESISTENZA A TAGLIO

Sollecitazioni di progetto		V _{Ed} [kN]	260.2
Taglio sollecitante = max Taglio(SLU,SLV)		N _{Ed} [kN]	-238.7
Sforzo Normale concomitante al massimo taglio			

Verifica di resistenza in assenza di armatura specifica		V _{rd1} [kN]	304.16
Resistenza di progetto senza armatura specifica		V _{rd1} /V _{sd}	1.17
Coefficiente di sicurezza			

Verifica di resistenza dell'armatura specifica		cot(θ)	2.5
CoTan (θ) di progetto		V _{rd2} [kN]	1598
Resistenza a taglio delle bielle compresse in cls		V _{rd3} [kN]	570
Resistenza a taglio dell'armatura		V _{rd} [kN]	570
Resistenza a taglio di progetto		V _{rd} /V _{Ed}	-
Coefficiente di sicurezza			

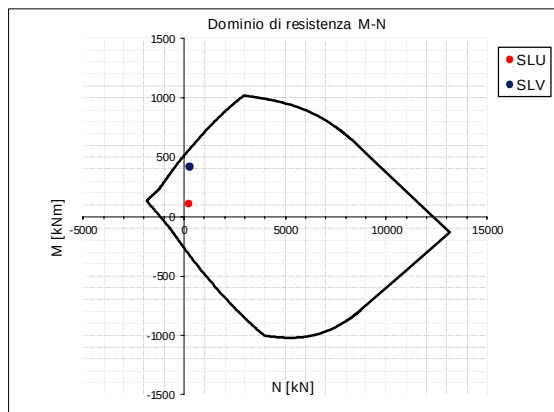
VERIFICA DI RESISTENZA A PRESSO-FLESSIONE

Sollecitazioni di progetto		SLU	SLV
Momento sollecitante	M _{Ed} [kNm]	107.3	423.8
Sforzo Normale concomitante	N _{Ed} [kN]	-229.8	-238.7

Verifica di resistenza in termini di momento		SLU	SLV
Momento resistente	M _{Rd} [kNm]	558.6	560.4
Coefficiente di sicurezza	M _{Rd} /M _{Ed}	5.21	1.32

Verifica di resistenza in termini di sforzo normale		SLU	SLV
Sforzo normale resistente	N _{Rd} [kN]	-	-
Coefficiente di sicurezza	N _{Rd} /N _{Ed}	-	-

Coefficiente di sicurezza minimo		-	-
----------------------------------	--	---	---



STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

10.4 Muro andatore

I risultati delle verifiche strutturali eseguite sul muro andatore sono riportati nella parte conclusiva del paragrafo, mentre qui di seguito si riportano i grafici delle sollecitazioni su di esso gravanti.

10.4.1 Sollecitazioni di calcolo in combinazione sismica (SLV)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni sismiche calcolate per il muro andatore della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale orizzontale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale verticale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre orizzontali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle estere);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre verticali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne);
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano del muro, agente nel piano verticale YZ (positivo se uscente dal piano del muro);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano del muro, agente nel piano orizzontale XZ (positivo se uscente dal piano del muro).

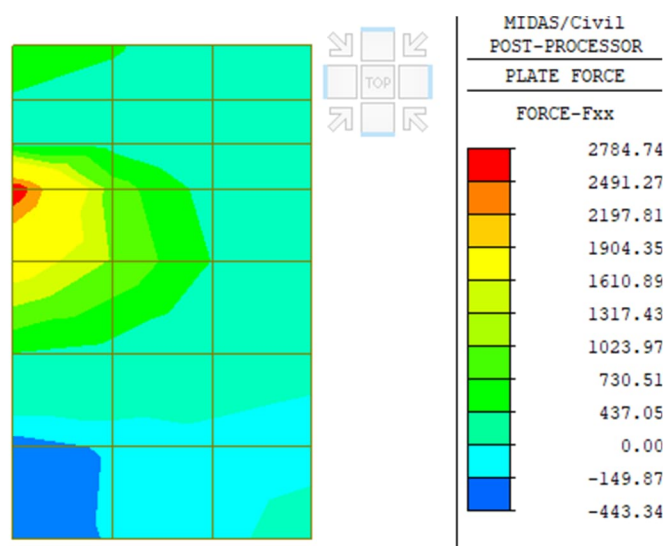


Figura 122 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro andatore: F_{xx} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

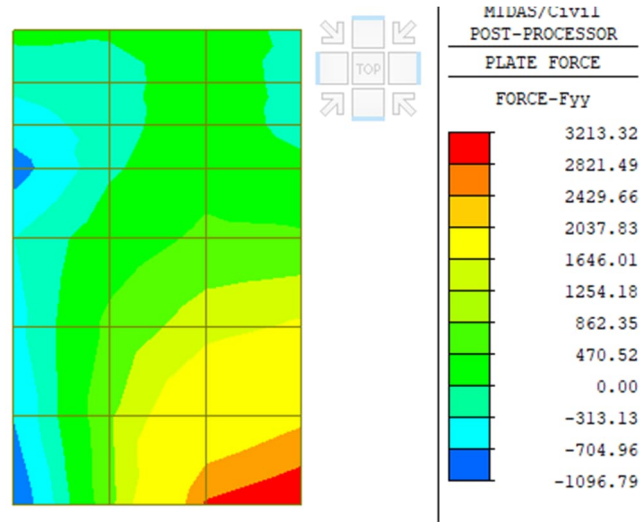


Figura 123 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro andatore: F_{yy} [kN/m]

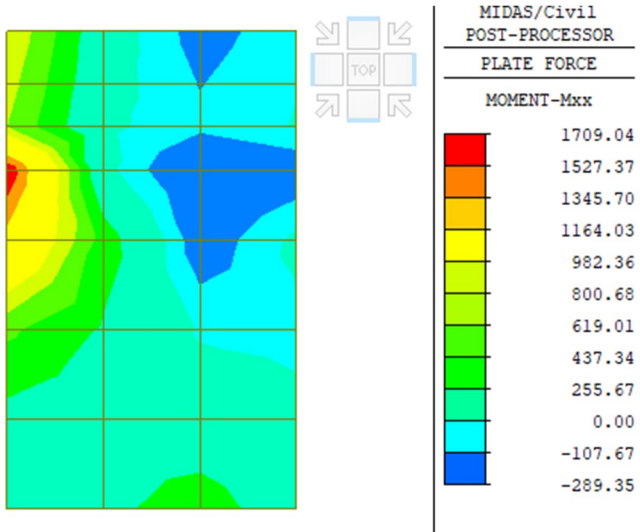
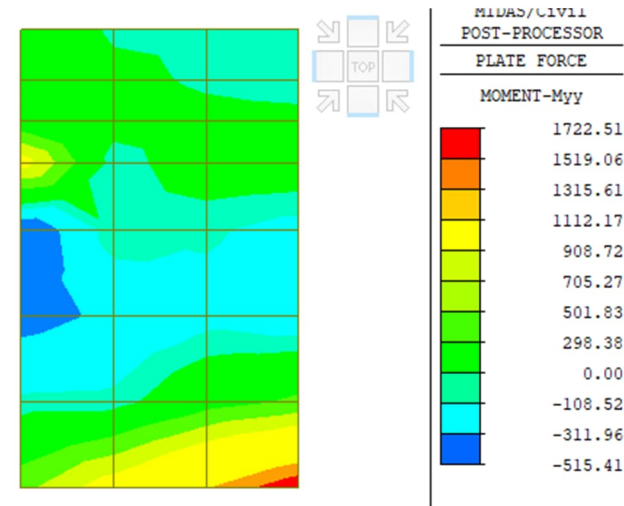


Figura 124 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro andatore: M_{xx} [kNm/m]



STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Table 15. Figura 125 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro andatore: M_{yy} [kNm/m]

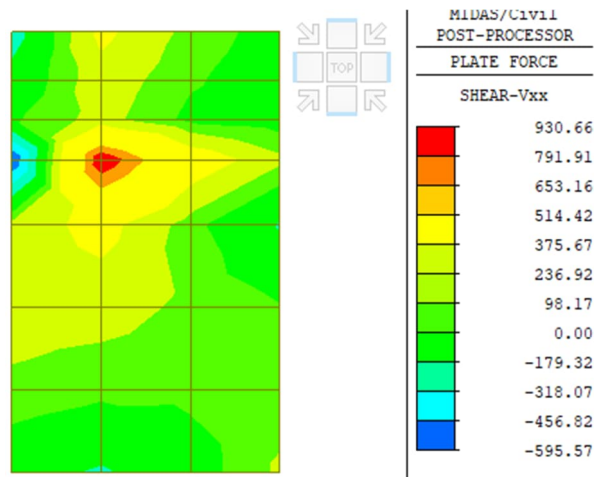


Figura 126 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro andatore: V_{xx} [kN/m]

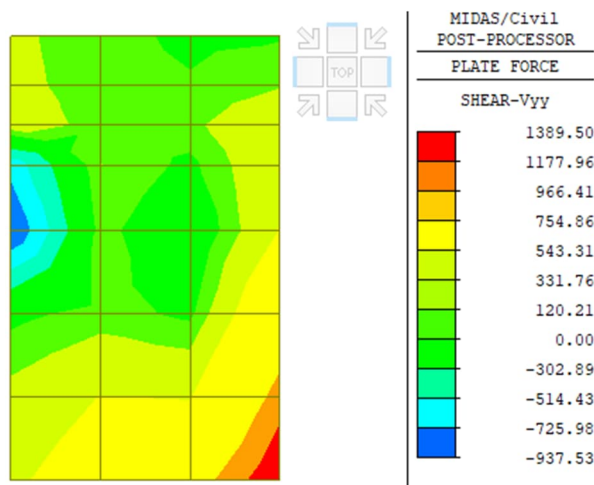


Figura 127 – Involuppo Sollecitazioni SLV muro andatore: V_{yy} [kN/m]

10.4.2 Sollecitazioni di calcolo ultime in combinazione statica (SLU)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni di stato limite ultimo statiche (SLU), calcolate per il muro andatore della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale orizzontale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale verticale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre orizzontali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle estere);

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre verticali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne)
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano del muro, agente nel piano verticale YZ (positivo se uscente dal piano del muro);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano del muro, agente nel piano orizzontale XZ (positivo se uscente dal piano del muro).

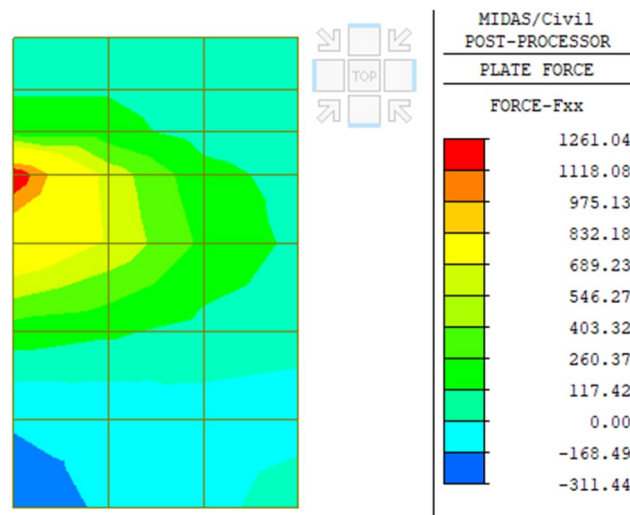


Figura 128 – Involuppo Sollecitazioni SLU andatore: F_{xx} [kN/m]

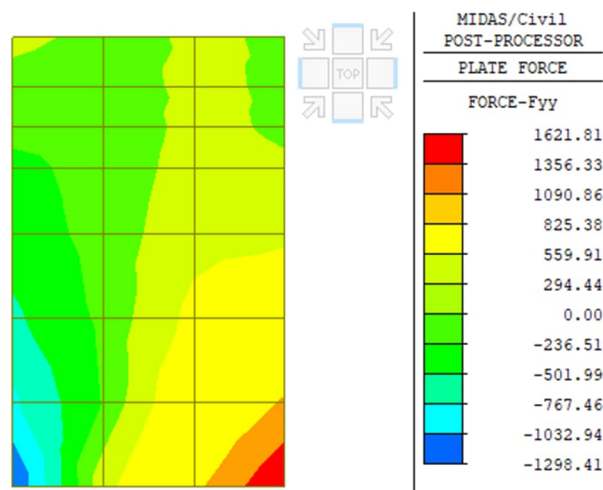


Figura 129 – Involuppo Sollecitazioni SLU muro andatore: F_{yy} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

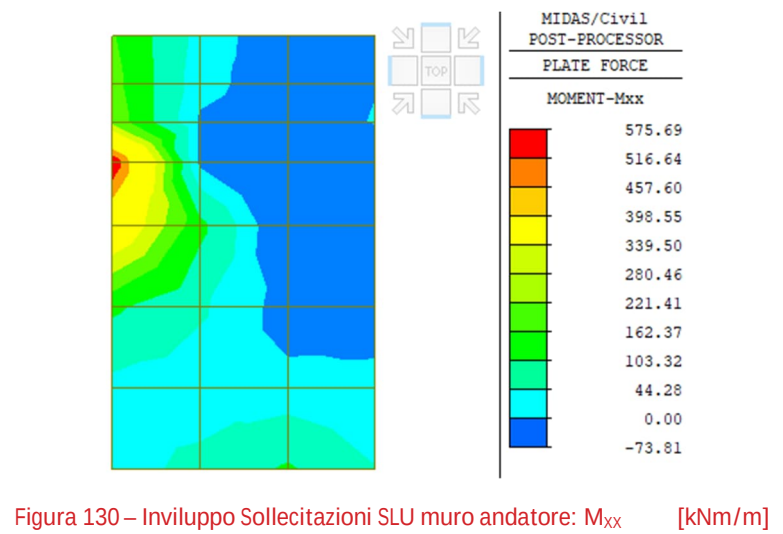


Figura 130 – Involuppo Sollecitazioni SLU muro andatore: M_{xx} $[kNm/m]$

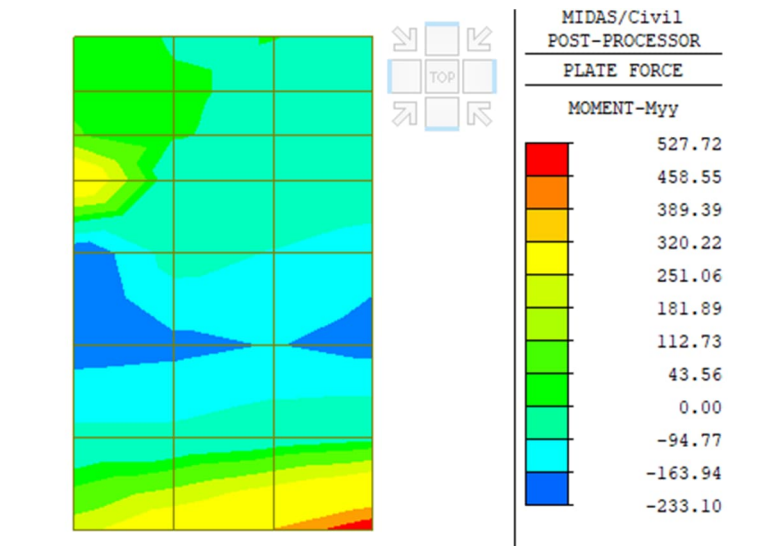


Figura 131 – Involuppo Sollecitazioni SLU muro andatore: M_{yy} kNm/m

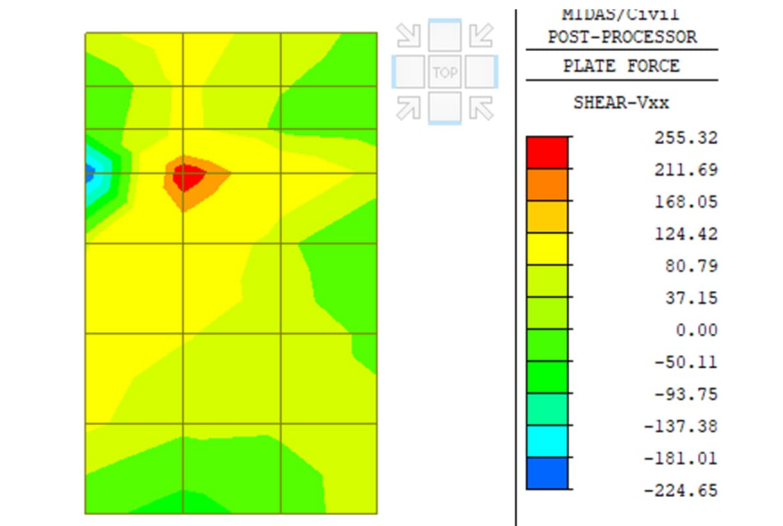


Figura 132 – Involuppo Sollecitazioni SLU muro andatore: V_{xx} $[kN/m]$

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

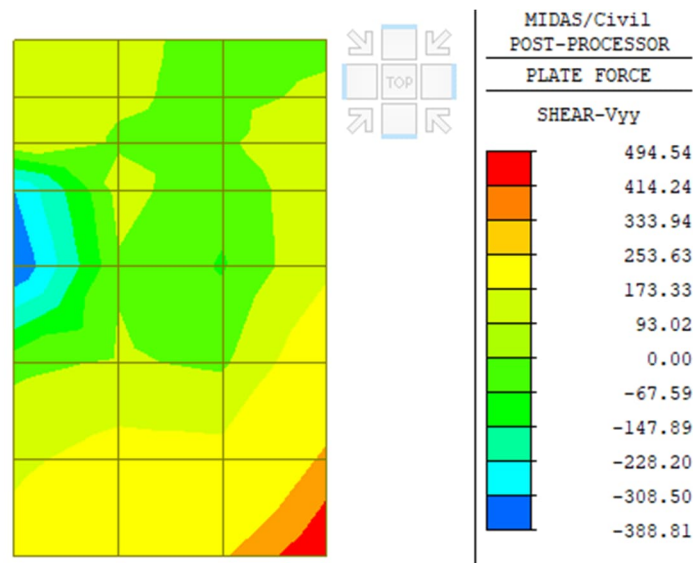


Figura 133 – Involuppo Sollecitazioni SLU muro andatore: V_{yy} [kN/m]

10.4.3 Sollecitazioni in combinazione caratteristica (SLE)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni in combinazione caratteristica (SLE), calcolate per il muro andatore della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale orizzontale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale verticale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre orizzontali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle estere);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre verticali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne)
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano del muro, agente nel piano verticale YZ (positivo se uscente dal piano del muro);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano del muro, agente nel piano orizzontale XZ (positivo se uscente dal piano del muro).

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

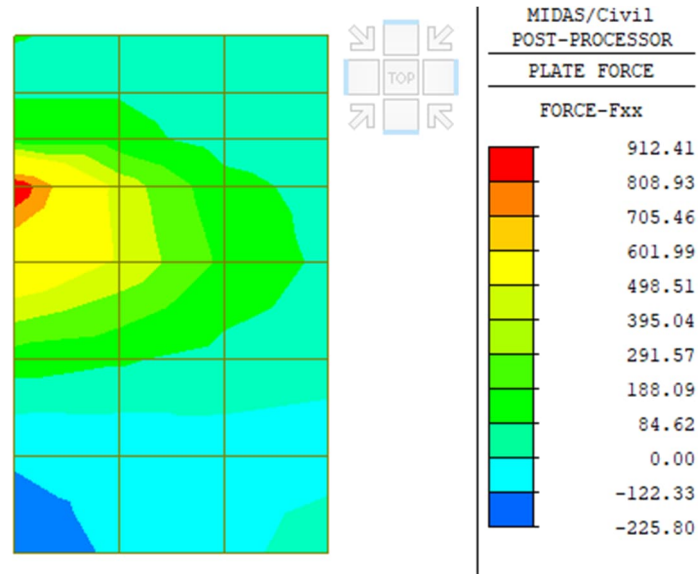


Figura 134 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro andatore: Fxx [kN/m]

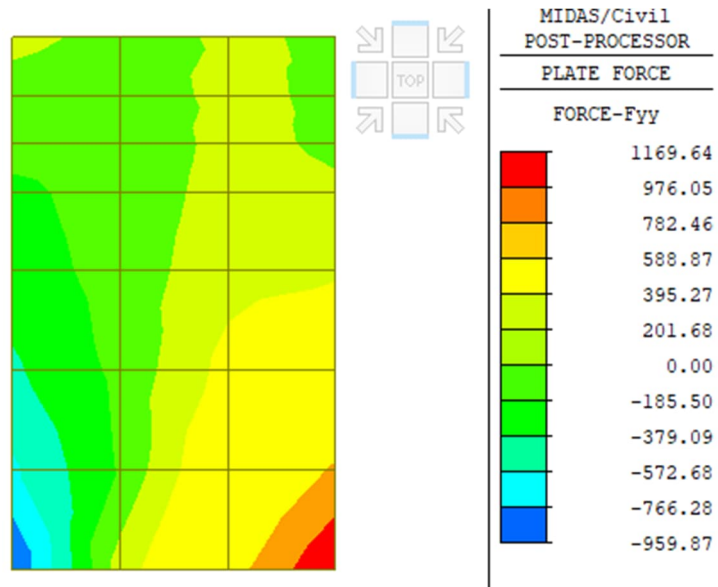


Figura 135 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro andatore: Fyy [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

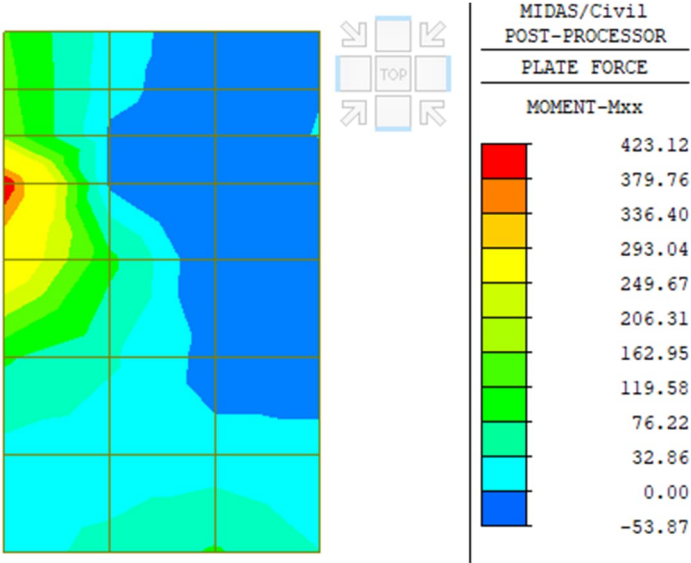


Figura 136 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro andatore: M_{xx} [kNm/m]

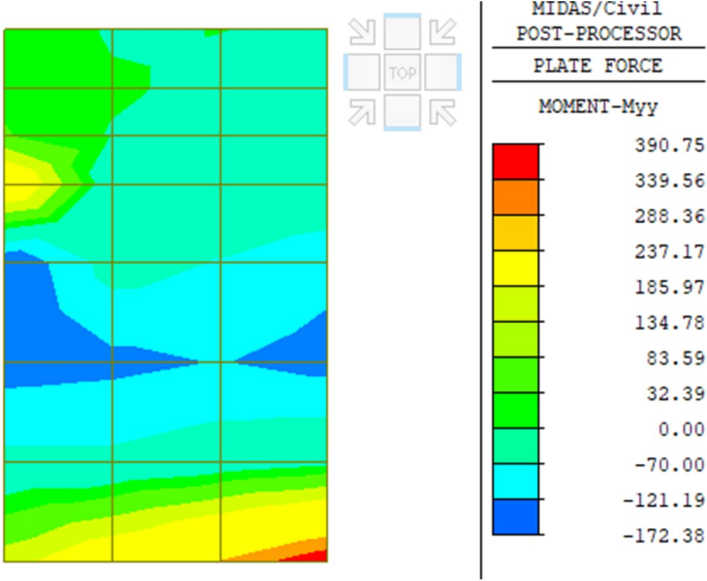


Figura 137 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro andatore: M_{yy} [kNm/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandatara) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

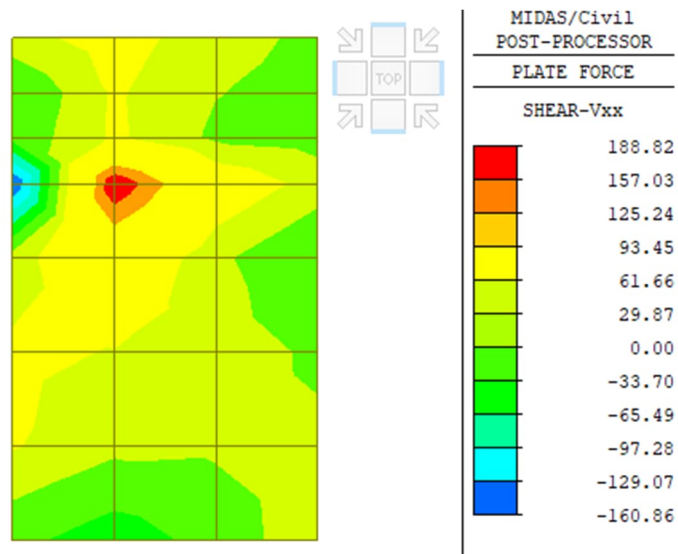


Figura 138 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro andatore: V_{xx} [kN/m]

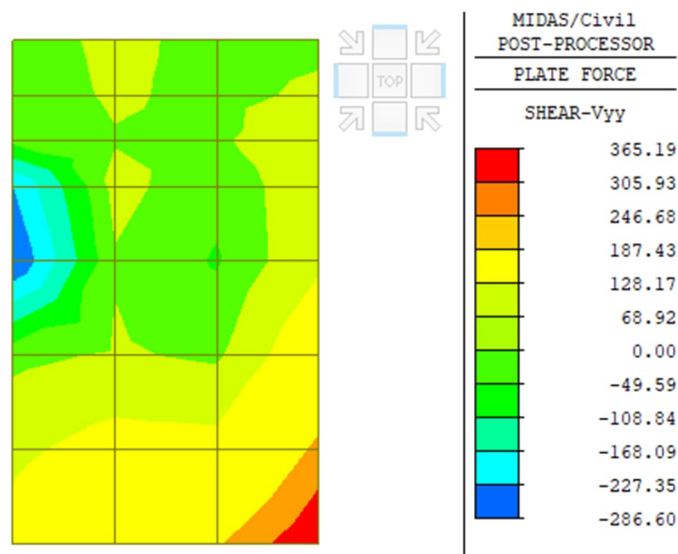


Figura 139 – Involuppo Sollecitazioni SLE (CARATTERISTICA) muro andatore: V_{yy} [kN/m]

10.4.4 Sollecitazioni in combinazione frequente (SLE)

Nelle figure seguenti si riportano gli involuppi delle sollecitazioni in combinazione frequente (SLE), calcolate per il muro andatore della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale orizzontale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale verticale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre orizzontali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle estere);

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre verticali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne)
- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano del muro, agente nel piano verticale YZ (positivo se uscente dal piano del muro);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano del muro, agente nel piano orizzontale XZ (positivo se uscente dal piano del muro).

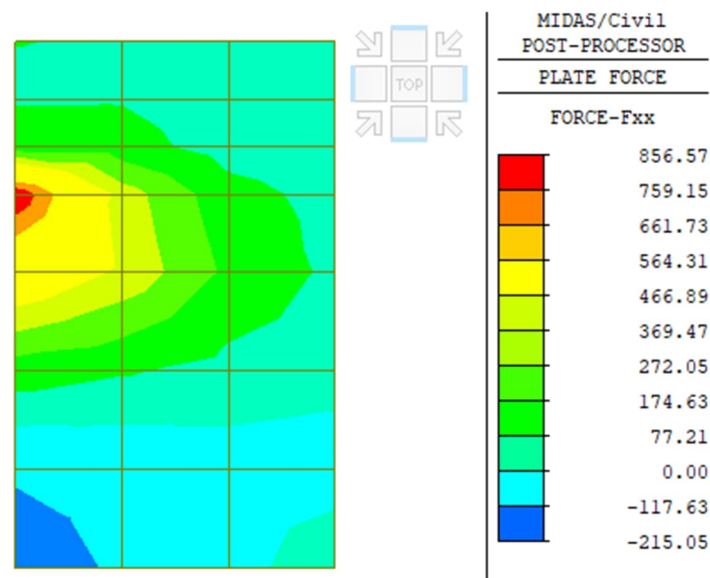


Figura 140 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro andatore: F_{xx} [kN/m]

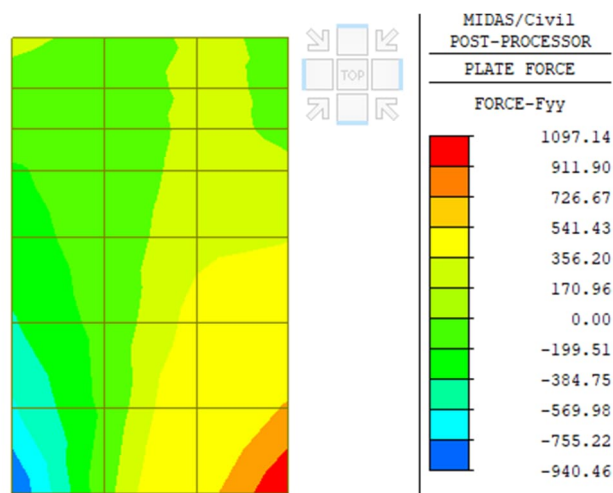


Figura 141 – Involuppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro andatore: F_{yy} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

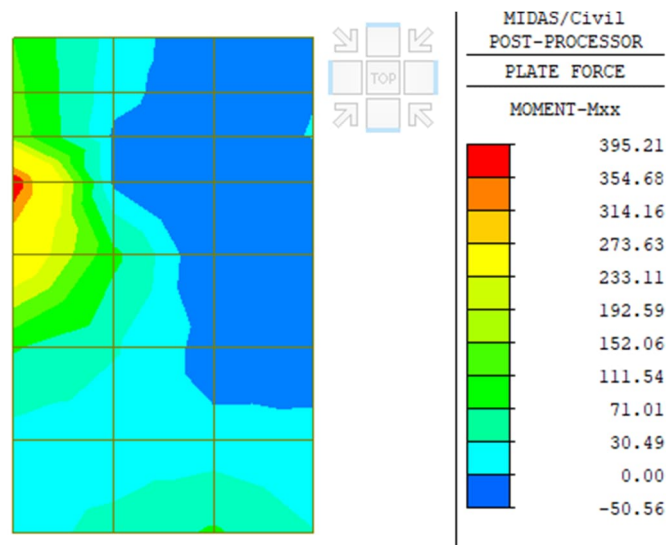


Figura 142 – Inviluppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro andatore: M_{xx} [kNm/m]

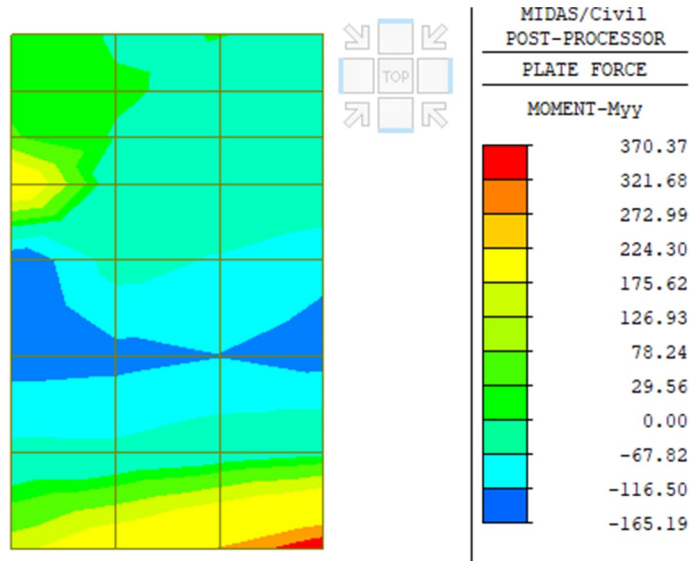


Figura 143 – Inviluppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro andatore: M_{yy} [kNm/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

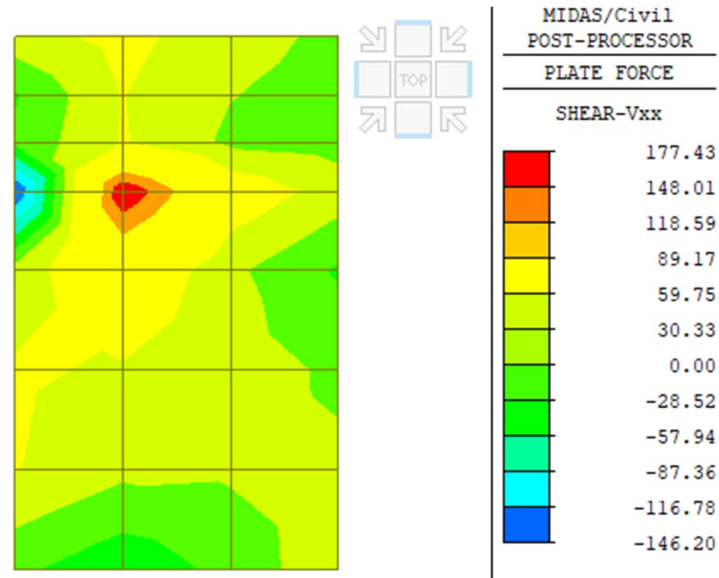


Table 16. Figura 144 – Inviluppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro andatore: V_{xx} [kN/m]

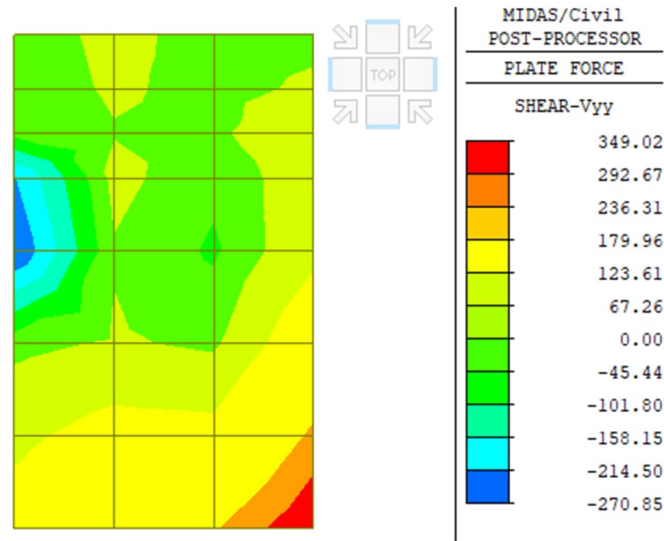


Figura 145 – Inviluppo Sollecitazioni SLE (FREQUENTE) muro andatore: V_{yy} [kN/m]

10.4.5 Sollecitazioni in combinazione quasi permanente (SLE)

Nelle figure seguenti si riportano gli inviluppi delle sollecitazioni in combinazione quasi permanente (SLE), calcolate per il muro andatore della spalla. Tali sollecitazioni rispettano le seguenti convenzioni:

- F_{xx} = Sforzo normale orizzontale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- F_{yy} = Sforzo normale verticale (se positivo di trazione, se negativo di compressione);
- M_{xx} = Momento flettente che tende le fibre orizzontali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle estere);
- M_{yy} = Momento flettente che tende le fibre verticali del muro (se positivo tende le fibre interne lato terra, se negativo quelle esterne)

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- V_{xx} = Sforzo di taglio ortogonale al piano del muro, agente nel piano verticale YZ (positivo se uscente dal piano del muro);
- V_{yy} = Sforzo di taglio uscente dal piano del muro, agente nel piano orizzontale XZ (positivo se uscente dal piano del muro).

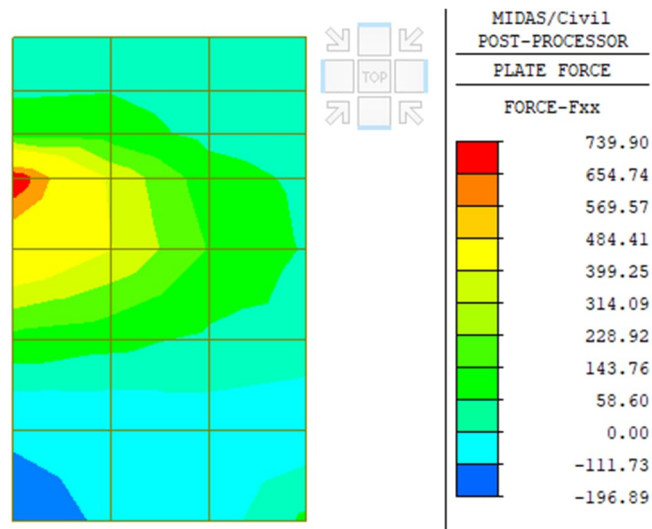


Figura 146 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro andatore: F_{xx} [kN/m]

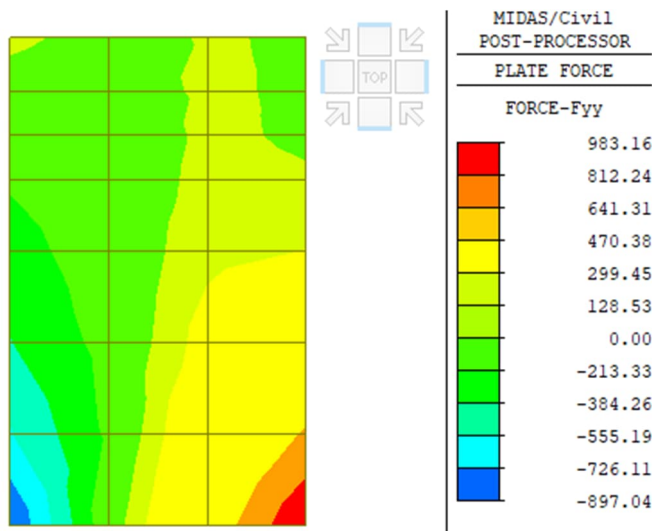


Figura 147 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro andatore: F_{yy} [kN/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

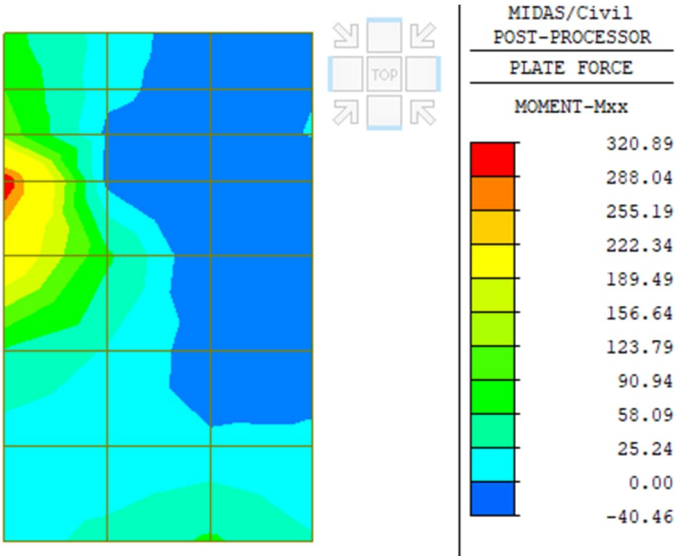


Figura 148 – Inviluppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro andatore: M_{xx} [kNm/m]

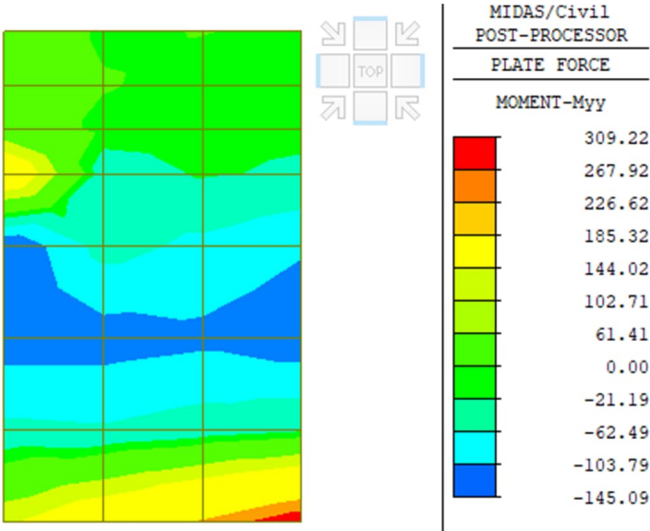


Figura 149 – Inviluppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro andatore: M_{yy} [kNm/m]

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

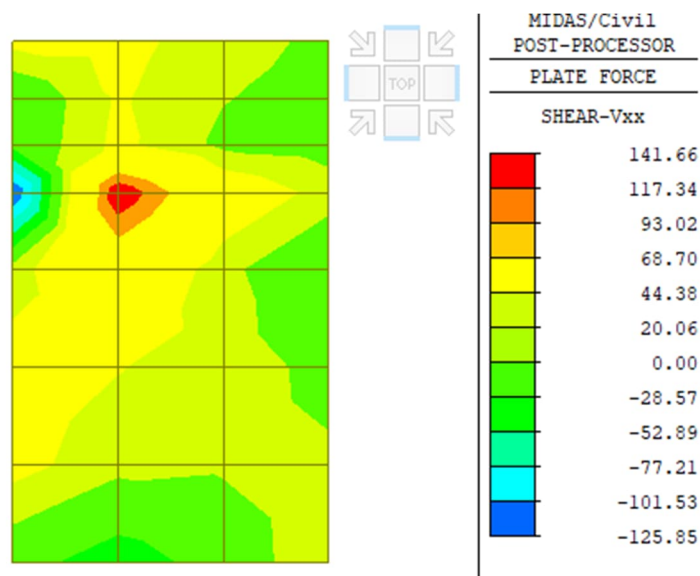


Figura 150 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro andatore: V_{xx} [kN/m]

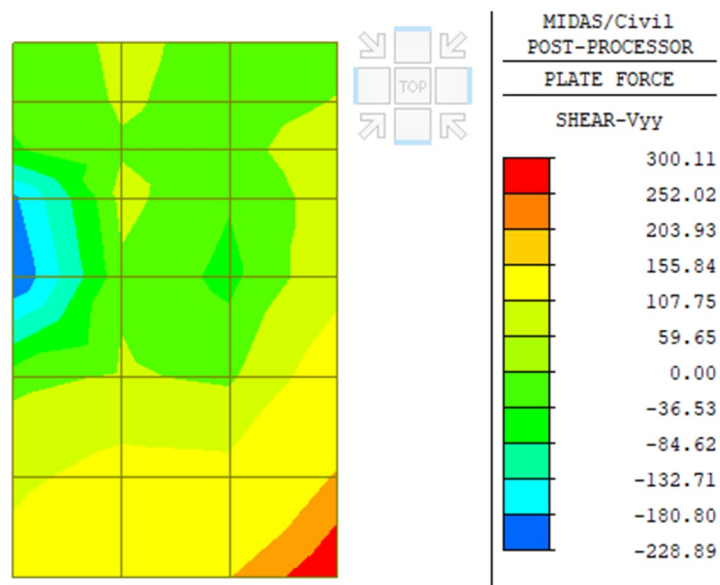


Figura 151 – Involuppo Sollecitazioni SLE (QUASI PERMANENTE) muro andatore: V_{yy} [kN/m]

10.4.6 Risultati verifiche SLU e SLE

In questo paragrafo si riportano i risultati delle verifiche di stato limite ultimo e di stato limite di esercizio eseguite sul muro andatore della spalla. Le verifiche sono state eseguite su una sezione rettangolare larga 1.0 m e alta 1.2 m, rappresentativa di una porzione orizzontale di muro situata alla base del muro stesso (porzione posteriore del muro, dove è presente una piccola porzione soggetta a trazione). La sezione resistente si considera armata nel modo seguente:

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

- $\varnothing 30/10 + \varnothing 24/20$ (II strato): Armatura verticale interna (lato terra);
- $\varnothing 24/20$: Armatura verticale esterna;
- Spilli $\varnothing 20/40 \times 40$: Armatura a taglio.

Le sollecitazioni di calcolo adottate nelle verifiche sono quelle riportate nelle rappresentazioni grafiche precedenti, anche riassunte in tabella seguente. La sollecitazione di taglio è stata calcolata mettendo in quadratura i tagli V_{xx} e V_{yy} a base muro.

Tabella 26 –Sollecitazioni di calcolo muro andatore

Combinazione [-]	N_{sd} [kN/m]	M_{sd} [kNm/m]	V_{sd} [kN/m]
Quasi permanente	983.16	309.22	304.74
Frequente	1097.14	370.37	359.79
Caratteristica	1169.64	390.75	377.92
Fondamentale (SLU)	1621.81	527.72	513.27
Sismica (SLV)	3213.32	1722.51	1401.02

I risultati delle verifiche strutturali di stato limite ultimo statiche e sismiche e quelli delle verifiche di stato limite di esercizio sono riportati nel seguente prospetto. Come si vede, tutte le verifiche sono soddisfatte.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

FOGLIO VERSIONE R21

INPUT					OUTPUT					
SOLLECITAZIONI DI VERIFICA					VERIFICHE IN ESERCIZIO					
Combinazione	N _{sd} [kN]	M _{sd} [kNm]	V _{sd} [kN]							
SLE Quasi Permanente	983.2	309.2	304.7							
SLE Frequente	1097.1	370.4	359.8							
SLE Rara	1169.6	390.8	377.9							
SLU	1621.8	527.7	513.3							
SLV	3213.3	1722.5	1401.0							
CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE IN C.A.										
Geometria della sezione										
Base (ortogonale al Taglio)		B [cm]	100							
Altezza (parallela al Taglio)		H [cm]	120							
Altezza utile della sezione		d [cm]	109.84							
Area di calcestruzzo		A _c [cm ²]	12000							
Armadura longitudinale tesa										
		1° STRATO	2° STRATO	3° STRATO						
Numero Barre	n	10.00	5.00	0.00						
Diametro	φ [mm]	30	24	0						
Posizione dal lembo esterno	c [mm]	90	138	50						
Area strato	A _s [cm ²]	70.69	22.62	0.00						
Percentuale di armatura	ρ [%]		0.849%							
Armadura longitudinale compressa										
		1° STRATO	2° STRATO	3° STRATO						
Numero Barre	n	5.00	0.00	0.00						
Diametro	φ [mm]	24	0	0						
Posizione dal lembo esterno	c' [mm]	90	50	50						
Area strato	A _{s'} [cm ²]	22.62	0.00	0.00						
Percentuale di armatura	ρ [%]		0.206%							
Armadura trasversale										
		1° TIPO	2° TIPO	3° TIPO						
Diametro	φ [mm]	20	0	0						
Numero bracci	n _{bi}	2.5	0	0						
Passo	S _w [mm]	400	0	0						
Inclinazione	α [deg]	90	90	90						
Area di armatura a metro	A _{sw} /S _w [cm ² /m]	19.63	0.00	0.00						
CARATTERISTICHE REOLOGICHE DEI MATERIALI										
Calcestruzzo										
Resistenza cubica a compressione		R _{ck}	40							
Resistenza cilindrica caratteristica a compressione		f _{ck} [MPa]	33.20							
Resistenza cilindrica media a compressione		f _{cm} [MPa]	41.20							
Resistenza media a trazione		f _{ctm} [MPa]	3.10							
Resistenza caratteristica a trazione		f _{ctk} [MPa]	2.17							
Resistenza di progetto a compressione		f _{cd} [MPa]	18.81							
Resistenza di progetto delle bielle compresse		f _{cd} [MPa]	9.79							
Acciaio										
Resistenza caratteristica a snervamento		f _{yk} [MPa]	450							
Resistenza di progetto a snervamento		f _{yd} [MPa]	391							
Verifica Tensionale										
Calcestruzzo SLE Quasi Permanente	σ _c [Mpa]	0.00		σ limit	< 14.94					
Calcestruzzo SLE Rara	σ _c [Mpa]	0.00			< 19.92					
Acciaio SLE Rara	σ _s [Mpa]	105.16			< 360.00					
Verifica di fessurazione										
		Quasi-perm	Frequent							
Altezza efficace	h _{ceff} [cm]	25.41	25.41							
Area efficace	A _{ceff} [cm ²]	2541	2541							
Percentuale di armatura all'interno dell' area efficace	ρ _{D,eff} [%]	3.6721%	3.6721%							
Coefficiente dipendente dalla durata del carico	k _t	0.4	0.6							
Coefficiente dipendente dall'aderenza delle armature	k ₁	0.8	0.8							
Coefficiente dipendente dalla distribuzione deformazioni	k ₂	0.4	0.4							
Coefficiente dipendente dal copriferro	k ₃	3.4	3.4							
Tensione di trazione nella barra di acciaio	σ _s [MPa]	86.2	99.1							
Spaziatura massima delle fessure	S _{r,max} [mm]	357	352							
Differenza di deformazione media acciaio-calcestruzzo	(ε _{sm} - ε _{cm})	0.0246%	0.0283%							
Apertura delle fessure di calcolo	w _d [mm]	0.088	0.100							
Valore limite di apertura delle fessure	w _{lim} [mm]	0.200	0.300							
VERIFICA DI RESISTENZA A TAGLIO										
Sollecitazioni di progetto										
Taglio sollecitante = max Taglio(SLU,SLV)				V _{Ed} [kN]	1401.0					
Sforzo Normale concomitante al massimo taglio				N _{Ed} [kN]	0.0					
Verifica di resistenza in assenza di armatura specifica										
Resistenza di progetto senza armatura specifica				V _{Rd1} [kN]	572.40					
Coefficiente di sicurezza				V _{Rd1} /V _{Sd}	0.41					
Verifica di resistenza dell'armatura specifica										
CoTan (θ) di progetto				cotα(θ)	2.5					
Resistenza a taglio delle bielle compresse in cls				V _{Rd2} [kN]	3337					
Resistenza a taglio dell'armatura				V _{Rd3} [kN]	1899					
Resistenza a taglio di progetto				V _{Rd} [kN]	1899					
Coefficiente di sicurezza				V _{Rd} /V _{Ed}	1.36					
VERIFICA DI RESISTENZA A PRESSO-FLESSIONE										
Sollecitazioni di progetto										
				SLU	SLV					
Momento sollecitante				M _{Ed} [kNm]	527.7	1722.5				
Sforzo Normale concomitante				N _{Ed} [kN]	1621.8	3213.3				
Verifica di resistenza in termini di momento										
Momento resistente				M _{Rd} [kNm]	2615.6	1871.5				
Coefficiente di sicurezza				M _{Rd} /M _{Ed}	4.96	1.09				
Verifica di resistenza in termini di sforzo normale										
				SLU	SLV					
Sforzo normale resistente				N _{Rd} [kN]	#N/D	3532.9				
Coefficiente di sicurezza				N _{Rd} /N _{Sd}	#N/D	1.10				
Coefficiente di sicurezza minimo					#N/D	1.09				

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

11. SOLLECITAZIONI IN INTRADOSSO FONDAZIONE

In tabella seguente sono riportate le sollecitazioni di calcolo per la palificata, che sono calcolate all'intradosso della platea di fondazione nel sistema di riferimento mostrato in figura.

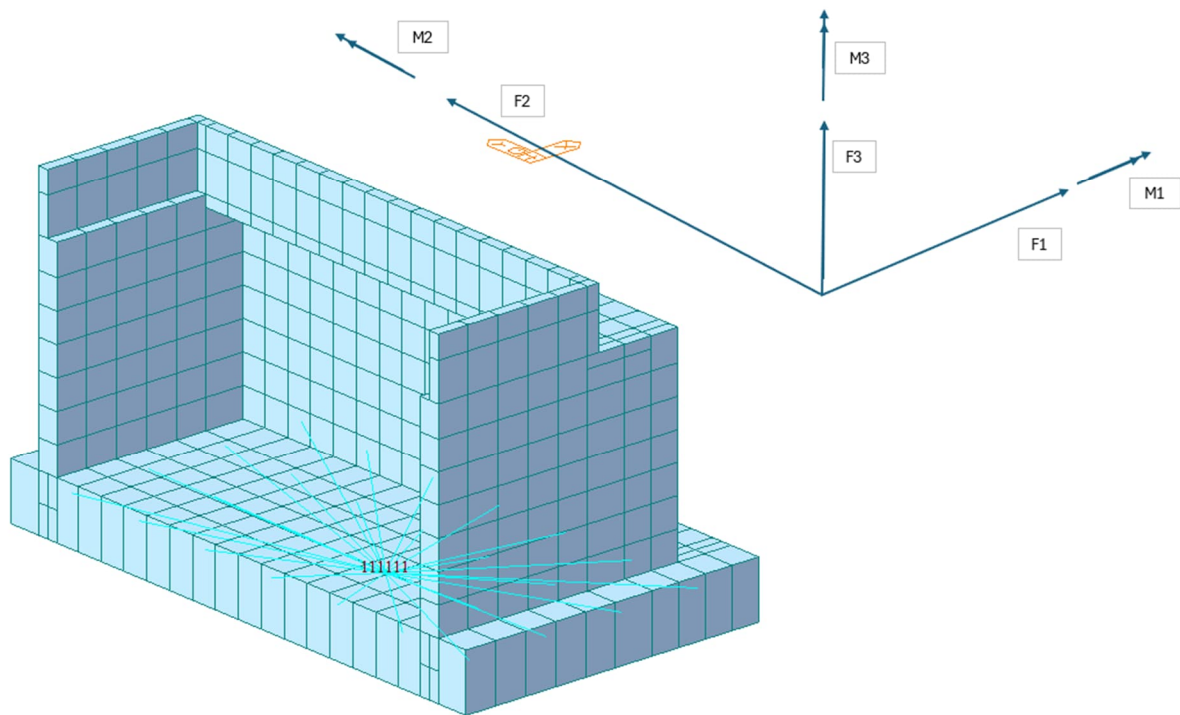


Figura 152 – Sistema di riferimento sollecitazioni di calcolo palificata

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Tabella 27: Sollecitazioni di calcolo palificata

	F1	F2	F3	M1	M2	M3
	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
Sisma_X	48812	-5125	-101465	36870	262332	3285
	49052	5255	-101465	-38079	264564	-3070
	48728	-5125	-96958	36870	272334	3285
	48968	5255	-96958	-38079	274566	-3070
Sisma_Y	26603	-17236	-101651	124310	131428	10698
	27403	17366	-101651	-125519	138868	-10484
	26519	-17236	-97145	124310	141429	10698
	27319	17366	-97145	-125519	148869	-10484
Sisma_Z	26981	-5125	-106909	36870	122364	3285
	27221	5255	-106909	-38079	124596	-3070
	26701	-5125	-91887	36870	155701	3285
	26941	5255	-91887	-38079	157933	-3070
SLU	19016	537	-104443	26900	106869	887
	22366	423	-112488	39772	140491	698
	21537	578	-111966	44951	134628	953
	23001	488	-109980	33030	144964	805
	22416	410	-110412	33755	139593	676
	21525	410	-109980	33755	131238	676
	23735	537	-139260	26900	123393	887
	27085	423	-147305	39772	157015	698
	26256	578	-146783	44951	151153	953
	27720	488	-144797	33030	161489	805
	27135	410	-145229	33755	156117	676
	26244	410	-144797	33755	147762	676
CARATT	17172	358	-102788	17933	86983	591
	19654	286	-108894	28298	112140	472
	19039	388	-108361	31304	107546	641
	20015	328	-107037	23357	114437	542
	19691	276	-107357	23841	111475	456
	19031	276	-107037	23841	105286	456
FREQ	16916	205	-101133	8725	81870	338
	18773	95	-105051	12767	99607	157
	17152	78	-99478	-725	81333	129
QP	16906	65	-99478	-605	79045	107

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

12. DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DELLE OPERE DI FONDAZIONE

Le sollecitazioni di input sono state calcolate durante l'analisi della sovrastruttura e sono riportate nel precedente capitolo.

Le sollecitazioni provenienti dalla sovrastruttura sono riferite al baricentro geometrico della fondazione alla base del plinto (quota testa pali).

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei pali di fondazione il cui dimensionamento e verifica sono previsti nel presente capitolo.

Tabella 28: Tabella riassuntiva pali di fondazione Ponte Motta-Budrio

Tipo Fondazione	Diametro Palo	N° Pali	interasse	Lunghezza Pali	Incidenza
[-]	[m]	[-]	[m]	[m]	[m]
SP DX	1,2	28	3,6	54	140
SP SX	1,2	28	3,6	46	165

12.1 Spalla A (Lato DX)

12.1.1 Sollecitazioni provenienti dalla sovrastruttura

Tabella 29: Sollecitazioni provenienti dalla sovrastruttura

	F1	F2	F3	M1	M2	M3
	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
Sisma_X	48812	-5125	-101465	36870	262332	3285
	49052	5255	-101465	-38079	264564	-3070
	48728	-5125	-96958	36870	272334	3285
	48968	5255	-96958	-38079	274566	-3070
Sisma_Y	26603	-17236	-101651	124310	131428	10698
	27403	17366	-101651	-125519	138868	-10484
	26519	-17236	-97145	124310	141429	10698
	27319	17366	-97145	-125519	148869	-10484
Sisma_Z	26981	-5125	-106909	36870	122364	3285
	27221	5255	-106909	-38079	124596	-3070
	26701	-5125	-91887	36870	155701	3285
	26941	5255	-91887	-38079	157933	-3070
SLU	19016	537	-104443	26900	106869	887
	22366	423	-112488	39772	140491	698
	21537	578	-111966	44951	134628	953
	23001	488	-109980	33030	144964	805
	22416	410	-110412	33755	139593	676
	21525	410	-109980	33755	131238	676

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

	23735	537	-139260	26900	123393	887
	27085	423	-147305	39772	157015	698
	26256	578	-146783	44951	151153	953
	27720	488	-144797	33030	161489	805
	27135	410	-145229	33755	156117	676
	26244	410	-144797	33755	147762	676
CARATT	17172	358	-102788	17933	86983	591
	19654	286	-108894	28298	112140	472
	19039	388	-108361	31304	107546	641
	20015	328	-107037	23357	114437	542
	19691	276	-107357	23841	111475	456
	19031	276	-107037	23841	105286	456
FREQ	16916	205	-101133	8725	81870	338
	18773	95	-105051	12767	99607	157
	17152	78	-99478	-725	81333	129
QP	16906	65	-99478	-605	79045	107

12.1.2 Ripartizione delle sollecitazioni sui pali

Partendo dalle sollecitazioni riportate nella tabella precedente e riferite al baricentro geometrico della fondazione, mediante la posizione geometrica dei pali e le formule descritte al §9.1, si ottengono le sollecitazioni agenti sui pali più caricati.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

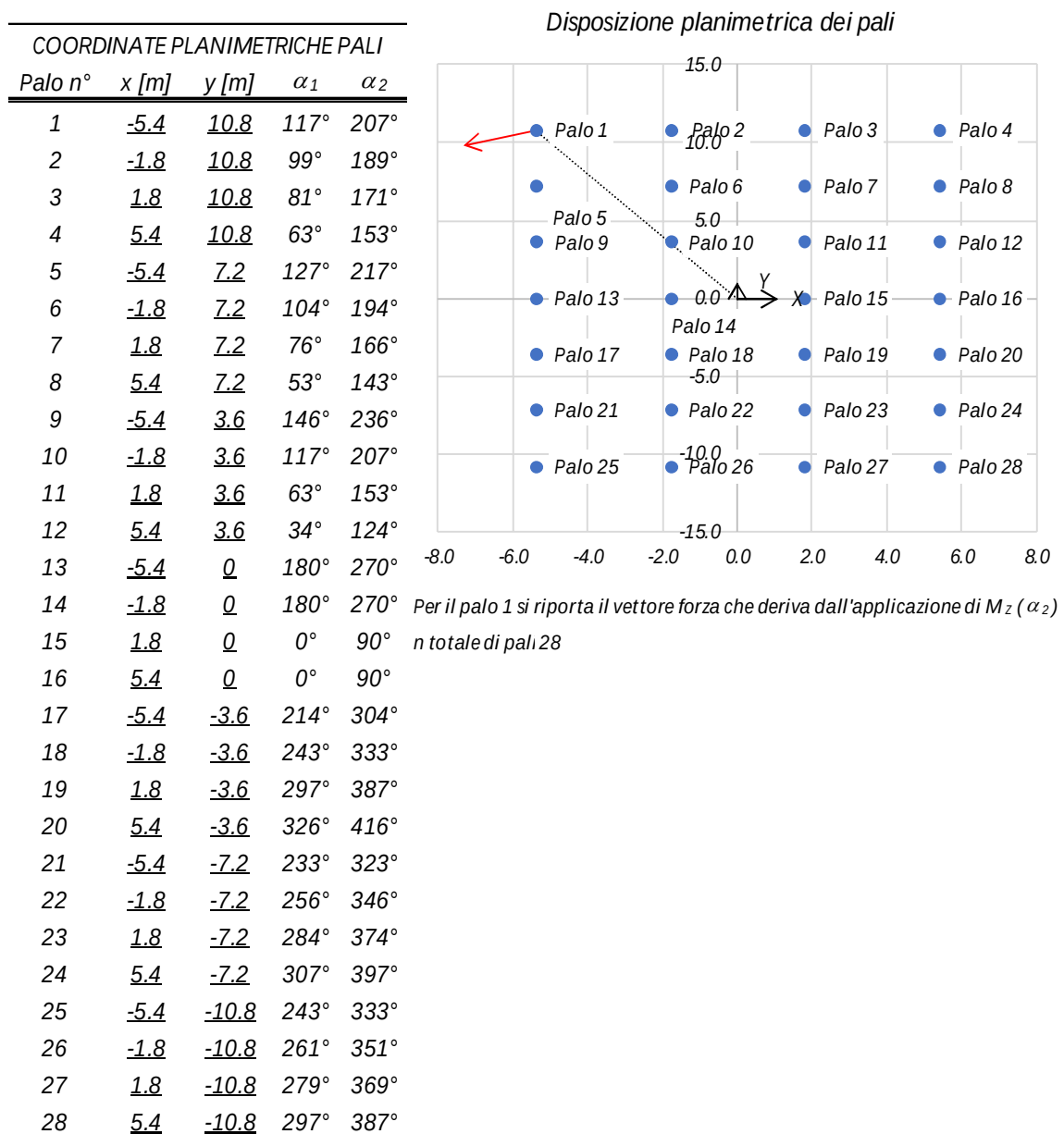


Figura 153: Distribuzione geometrica dei pali per la ripartizione dei carichi

Per ogni combinazione di carico si riportano le massime sollecitazioni ottenute nel caso di:

- Massima compressione;
- Massima trazione (se presente);
- Massimo taglio.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Tabella 30: Coppia di sollecitazioni (N e V) massime in testa al palo

COMBINAZIONI DI CARICO		N_{Ed} [kN]	V_{Ed} [kN]	Sollecitazione
SLE QP	QP	-4498	604	Massima compressione
	QP	-2607	604	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	QP	-2607	604	Massimo taglio
SLE Frequente	FREQ2	-5033	671	Massima compressione
	FREQ2	-2471	671	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	FREQ2	-2471	671	Massimo taglio
SLE Rara	CARATT2	-5435	705	Massima compressione
	CARATT4	-2287	718	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	CARATT4	-2287	718	Massimo taglio
SLU	SLU8	-7426	971	Massima compressione
	SLU3	-2062	775	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	SLU10	-3003	995	Massimo taglio
SLV	Sisma_X2	-7057	1780	Massima compressione
	Sisma_X4	89	1777	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	Sisma_X2	-191	1780	Massimo taglio

Partendo dallo sforzo di taglio in testa al palo, è stato calcolato il momento flettente sul palo stesso secondo la teoria di Matlock e Reese descritta al §9.5.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Spalla DX

scala grafico

strati terreno	descrizione	quote (m)	k_h (kN/m ³)	n_h (kN/m ³)
p.c.=strato 1	Rilevato esistente	0.0	8333	4000
✓ strato 2	Sabbia limosa	-7.1	32000	4000
✓ strato 3	Sabbia e ghiaia	-9.0	95833	10000
✓ strato 4	Limo argilloso	-12.8	23333	
✓ strato 5	Limo sabbioso	-18.0	26667	
✓ strato 6	Limo argilloso	-20.0	33333	

Prof. testa palo 2.5 (m)

Diametro del palo 1.2 (m)

J palo 0.10179 (m⁴)

Lunghezza del palo 54 (m)

Forza orizzontale in testa 1780 (kN)

Momento in testa 0 (kNm)

E cls 31447 (Mpa)

dimensione elementi 0.2 (m)

☒ palo impedito di ruotare

☐ palo impedito di traslare

☐ palo libero

Calcolo

α_m 2.80 (m)

$M_0 = \alpha_m \cdot H$

Figura 154: Calcolo del coefficiente α_m

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Le terne delle massime sollecitazioni in testa ai pali, calcolate per ogni combinazione, risultano essere le seguenti.

Tabella 31: Terna di sollecitazioni (N, V e M) massime in testa al palo

COMBINAZIONI DI CARICO		N_{Ed} [kN]	V_{Ed} [kN]	M_o [kNm]	Sollecitazione
SLE QP	QP	-4498	604	1692	Massima compressione
	QP	-2607	604	1692	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	QP	-2607	604	1692	Massimo taglio
SLE Frequente	FREQ2	-5033	671	1880	Massima compressione
	FREQ2	-2471	671	1880	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	FREQ2	-2471	671	1880	Massimo taglio
SLE Rara	CARATT2	-5435	705	1973	Massima compressione
	CARATT4	-2287	718	2010	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	CARATT4	-2287	718	2010	Massimo taglio
SLU	SLU8	-7426	971	2720	Massima compressione
	SLU3	-2062	775	2170	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	SLU10	-3003	995	2785	Massimo taglio
SLV	Sisma_X2	-7057	1780	4984	Massima compressione
	Sisma_X4	89	1777	4976	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	Sisma_X2	-191	1780	4984	Massimo taglio

12.1.3 Effetto gruppo

Come riportato al §13.1.7 di [24], per palificate in terreni coesivi l'efficienza risulta minore dell'unità. Per un gruppo costituito da m file di pali con n pali per ciascuna fila, si potrà adottare la formula empirica di Converse-Labarre:

$$E = 1 - \frac{\arctg(d/i) (m-1)n + (n-1)m}{\pi/2 \quad mn}$$

nella quale i rappresenta l'interasse tra i pali del gruppo.

Nel progetto, nonostante la presenza di terreni incoerenti, è stato conservativamente assunto un effetto gruppo pari a $E=0,8$.

12.1.4 Verifica a capacità portante

Nei paragrafi successivi si riportano le verifiche a capacità portante nei confronti dei carichi assiali.

Per una ottimizzazione della fondazione, si è seguito il seguente approccio, ampiamente utilizzato nel campo dell'ingegneria geotecnica:

- le verifiche sono state svolte nei confronti degli stati limite d'esercizio per il singolo palo, considerando un fattore pari almeno a 1,25 (§12.1.4.1);
- le verifiche allo stato limite ultimo (SLU e SLV) sono state eseguite rispetto l'intera palificata (§12.1.4.2).

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Nella verifica allo SLE è stata considerata la sola resistenza laterale del singolo palo, dal momento che la resistenza alla punta si considera mobilitata solo nei confronti dello SLU (per incompatibilità dei cedimenti SLE nei confronti dell'operatività della struttura).

È stata inoltre svolta la verifica a trazione, in questo specifico studio presente solo allo SLV, per verificare lo sfilamento (§12.1.4.1).

La stratigrafia e la quota falda adottate in questa verifica, e nelle successive, sono state definite in accordo alle informazioni geologiche e geotecniche disponibili alla data di redazione del seguente progetto.

12.1.4.1 Verifica a capacità portante del singolo palo

Di seguito si riporta il calcolo della capacità portante del singolo palo, considerando l'effetto gruppo tramite il coefficiente stimato nel paragrafo precedente.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

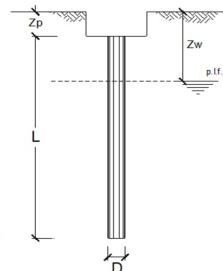
CALCOLO DELLA CAPACITA' PORTANTE DI UN PALO TRIVELLATO DI GRANDE DIAMETRO

ai sensi del D.M. 17/01/2018

OPERA: Spalla DX

Diametro del palo (D): 1.2 (m)
Quota testa palo dal p.c. (z_p): 4.5 (m)
Area del palo (A_p): 1.131 (m²)
Quota della falda dal p.c. (z_w): 10 (m)
Tecnica di scavo Bentonite

Scalzamento: 0 (m)



CARICO ASSIALE DI COMPRESSIONE SUL SINGOLO PALO:

§6.4.3.1 D.M. 17/01/2018

Approccio 2: (A1+M1+R3)

Carico assiale di compressione di progetto	N _d (SLU)		(kN)
	N _d (SLV)		(kN)
	N _d (SLE)	5435	(kN)
	N _d (SLD)		(kN)

CARICO ASSIALE DI TRAZIONE SUL SINGOLO PALO:

§6.4.3.1 D.M. 17/01/2018

Approccio 2: (A1+M1+R3)

Carico assiale di trazione di progetto	N _d (SLU)		(kN)
	N _d (SLV)	-89	(kN)

Numero di strati 8 $\frac{1}{1}$

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI

Strato	Stratigrafia		Spess. da p.c.	Unità geotecnica	Tipo di terreno	Parametri del terreno						
	da	a				γ	c'	φ'	c _u	c _{u,inc}	α	τ _{lim}
(-)	(m)	(m)	(m)	(-)	(-)	(kN/m ³)	(kPa)	(°)	(kPa)	(-)	(-)	(kPa)
1	0.00	11.40	11.40	Rilevato esistente	Sabbie limose	19	3	30			0	150
2	11.40	13.40	2.00	Sabbia limosa	Sabbie limose	19	5	32			0	150
3	13.40	17.10	3.70	Sabbia e ghiaia	Sabbie	19	0	35			0	150
4	17.10	22.30	5.20	Limo argilloso	Coesivo	19			80		0.4	100
5	22.30	24.40	2.10	Limo sabbioso	Coesivo	19			100		0.4	100
6	24.40	33.40	9.00	Limo argilloso	Coesivo	19			140		0.4	100
7	33.40	36.70	3.30	Limo sabbioso	Coesivo	19			190		0.4	100
8	36.70	65.00	28.30	Limo argilloso	Coesivo	19			290		0.4	100

Fattori di correlazione per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali indagate

Numero di verticali indagate	1	2	3	4	5	7	≥ 10
ξ ₃	1.70	1.65	1.60	1.55	1.50	1.45	1.40
ξ ₄	1.70	1.55	1.48	1.42	1.34	1.28	1.21

n°2 verticali

Lunghezza del palo (L _p):	54	(m)
Peso del palo (P _p):	978	(kN)
Profondità punta palo:	58.5	(m)

Strato	Spess. Strati _{pal}	distanza punta palo-strato successivo
(-)	(m)	(m)
1	6.90	0.00
2	2.00	0.00
3	3.70	0.00
4	5.20	0.00
5	2.10	0.00
6	9.00	0.00
7	3.30	0.00
8	21.80	6.50

ok, superiore a 3D

CAPACITA' PORTANTE CARATTERISTICA

Resistenza alla base:	R _b =	3365	(kN)
Resistenza laterale:	R _s =	11822	(kN)
Resistenza totale:	R _t = R _b + R _s =	15187	(kN)

CAPACITA' PORTANTE DI PROGETTO A COMPRESSIONE

Approccio 2: (A1+M1+R3) §6.4.3.1 D.M. 17/01/2018

Resistenza alla base:	R _{b,c} =	1511	(kN)
Resistenza laterale:	R _{s,c} =	6230	(kN)
Resistenza compr.:	R _{d,c} = R _{b,c} + R _{s,c} =	7741	(kN)

CAPACITA' PORTANTE DI PROGETTO A TRAZIONE

Approccio 2: (A1+M1+R3) §6.4.3.1 D.M. 17/01/2018

Resistenza laterale:	R _{s,t} =	-5732	(kN)
Resistenza traz.:	R _{d,t} = R _{s,t} =	-5732	(kN)

VERIFICA A COMPRESSIONE

	N _c (kN)	R _{s,c} (kN)	FS (-)
SLE	6413	11822	1.84
SLD			-

R_{s,d}/N_c ≥ 1.25

VERIFICA A TRAZIONE

	N _{d,t} (kN)	R _{d,t} (kN)	FS (-)
SLU - (A1+M1+R3)			-
SLV - (EQK+M1+R3)	-89	-5732	8.99

R_{d,t}/N_{d,t} ≥ 1

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

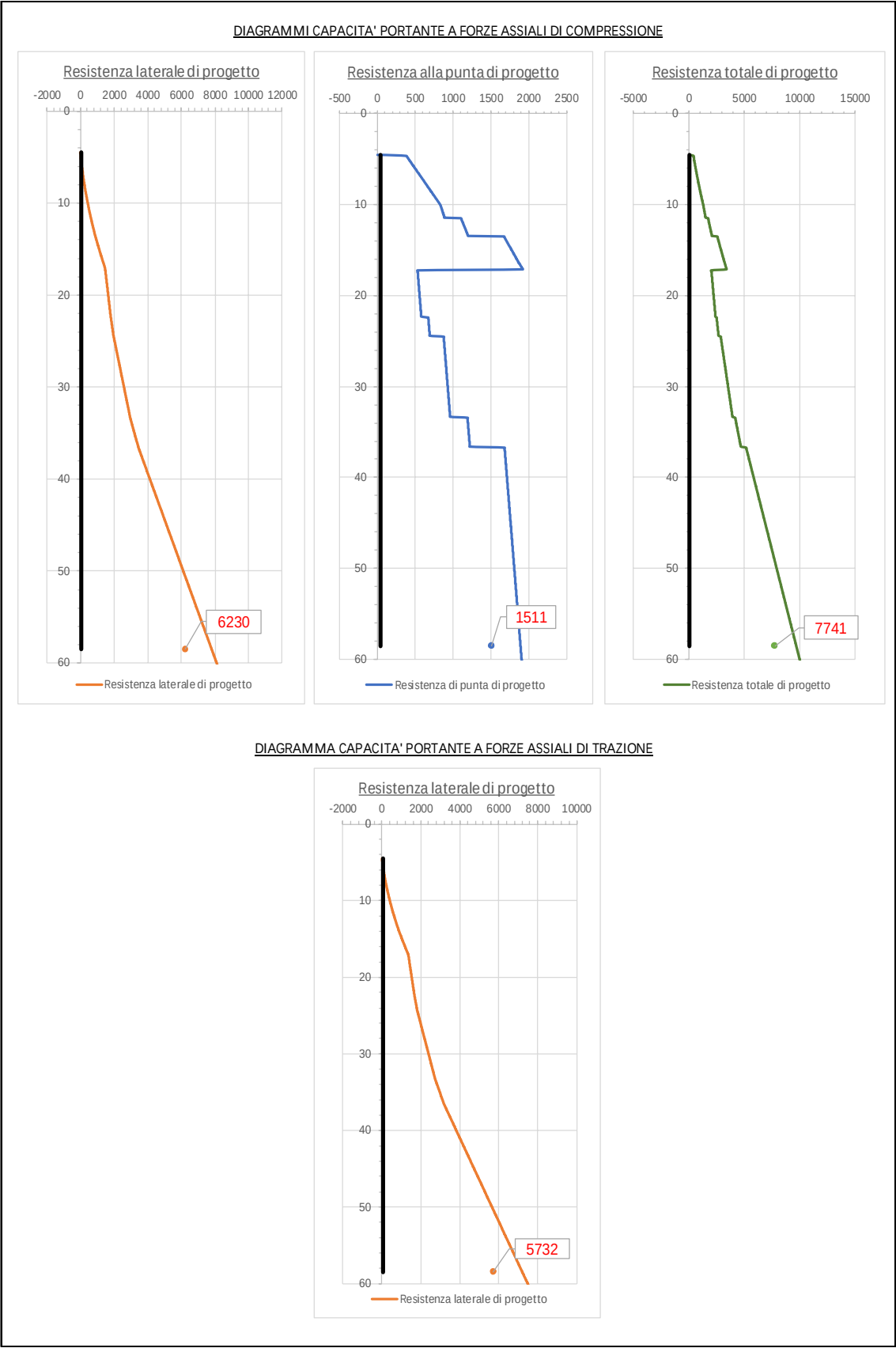


Figura 155: Calcolo della capacità portante del singolo palo (grafici)

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Nei grafici precedenti è possibile evidenziare l'apporto dell'effetto gruppo:

- o i punti rappresentano il valore della resistenza al piede del palo;
- o le curve rappresentano l'andamento della resistenza lungo il palo;

Solamente i valori delle resistenze al piede sono stati moltiplicati per il coefficiente 0,8; la differenza in ascissa tra il punto e la curva rappresenta quindi il delta di differenza fra la resistenza considerando l'effetto gruppo unitario e la resistenza considerando invece l'effetto gruppo pari a 0,8.

12.1.4.2 Calcolo dei domini di interazione della palificata

Nel presente capitolo si riporta il dimensionamento dei pali di fondazione effettuato con il metodo dei domini di interazione descritto al §9.3.1. La figura seguente riporta solamente la verifica della combinazione più sfavorevole. Per tutti i FS relativi a tutte le combinazioni, si rimanda alla Tabella 32.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

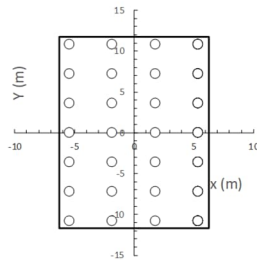

Lingua **IT**

CALCOLO DEL DOMINIO D'INTERAZIONE DELLA PALIFICATA

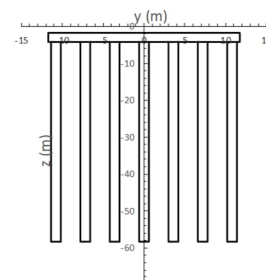
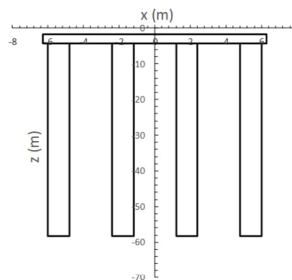
GEOMETRIA DELLA PALIFICATA

Definire la geometria della palificata automaticamente?

Numero Pali (massimo 100 pali)
 Diametro pali
 File in direzione x (massimo 10 file)
 File in direzione y (massimo 10 file)
 Interasse in direzione x
 Interasse in direzione y
 Distanza del palo dal bordo del soletto
 Spessore del soletto
 Lunghezza pali
 Distanza tra la testa del palo e il p.c. (+ fuori terra / - fondazione interrata)



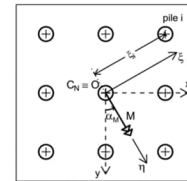
	SI	Compilare le celle che seguono
N	28	(-)
D	1.20	(m)
m	4	(m)
n	7	(m)
l _m	3.60	(m)
l _n	3.60	(m)
f	0.90	(m)
s	2.50	(m)
L	54.00	(m)
e	-4.30	(m)



CARICHI AGENTI SULLA PALIFICATA

Carico verticale di progetto
 Momento di progetto (ruota attorno all'asse x)
 Momento di progetto (ruota attorno all'asse y)
 Momento risultante di progetto
 Inclinazione del vettore momento risultante rispetto (x,y)

N _{Ed}	146783.25	(kN)
M _{Ed,x}	44950.50	(kN m)
M _{Ed,y}	151152.66	(kN m)
M _{Ed}	157694.88	(kN m)
α _{Ed}	16.56	(°)



CAPACITA' PORTANTE E MOMENTO RESISTENTE DEL PALO SINGOLO

Capacita' portante di progetto a compressione del palo singolo
 Capacita' portante di progetto a trazione del palo singolo
 Momento resistente di progetto del palo singolo soggetto a compressione
 Momento resistente di progetto del palo singolo soggetto a trazione

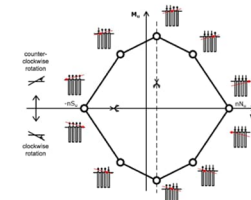
N _{U,Ed}	6420.31	(kN)
S _{U,Ed}	6710.29	(kN)
M _{Ed,c}	0.00	(kN m)
M _{Ed,t}	0.00	(kN m)

METODO DI Leora et al. (2019)

Carico verticale ultimo della palificata rispetto ad un cinetismo
 con rotazione rispetto al punto i-esimo
 Capacita' portante di progetto a compressione del j-esimo palo
 Capacita' portante di progetto a trazione del j-esimo palo
 Momento ultimo della palificata rispetto ad un cinetismo
 con rotazione rispetto al punto i-esimo
 Momento resistente di progetto del palo j-esimo soggetto a compressione
 Momento resistente di progetto del palo j-esimo soggetto a trazione
 Coordinata x' rispetto al sistema di riferimento (x', h) del palo j-esimo
 Punti di rotazione (anti-oraria) dei cinetismi
 Punti di rotazione (oraria) dei cinetismi
 Numero di pali della palificata

$$\begin{cases} V_{u,i} = \sum_{j=1}^{p+1} (N_{u,j}) - \sum_{j=1}^p (S_{u,j}) \\ M_{u,i} = \sum_{j=1}^{p+1} (M_{p,j} - N_{u,j} \xi_j) + \sum_{j=1}^p (M_{p,j} + S_{u,j} \xi_j) \end{cases} \quad \text{con } i = 1, \dots, p+1.$$

$$\begin{cases} V_{u,k} = \sum_{j=1}^p (N_{u,j}) - \sum_{j=1}^{p+1} (S_{u,j}) \\ M_{u,k} = \sum_{j=1}^p (S_{u,j} \xi_j - M_{p,j}) - \sum_{j=1}^{p+1} (M_{p,j} + N_{u,j} \xi_j) \end{cases} \quad \text{con } i = 1, \dots, p+1.$$



VERIFICA A CAPACITA' PORTANTE DELLA PALIFICATA

Carico verticale di progetto
 Momento risultante di progetto

Calcolo del dominio di interazione della palificata

Punto di massima Trazione (i min)
 Punto di massima Compressione (i max)
 Definire il punto (N_u, M_u) rispetto al quale si vuole eseguire la verifica
 Definire rispetto a quale condizione si vuole eseguire la verifica
 Carico verticale ultimo della palificata
 Momento ultimo della palificata
 Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_{Ed}, M_u)
 Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_u, M_{Ed})
 Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_u, M_u)

N _{Ed}	146783.25	(kN)
M _{Ed}	157694.88	(kN m)
RUN		
i _{min}	1	(-)
i _{max}	309	(-)
i	291	(-)
	(N _{Ed} , M _u)	(-)
N _u	158282.13	(kN)
M _u	168784.90	(kN m)
M _u /M _{Ed}	1.070	(-)
N _u /N _{Ed}	-	(-)
(N _u , M _u)/(N _{Ed} , M _{Ed})	-	(-)

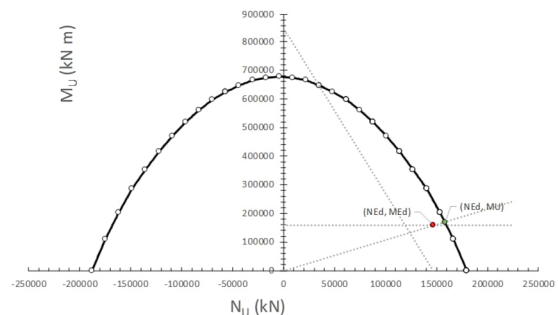


Figura 156: Dominio di interazione più sfavorevole dell'intera palificata – Combinazione SLU_9

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00


Lingua **IT**

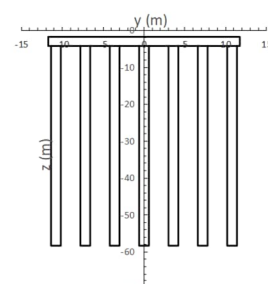
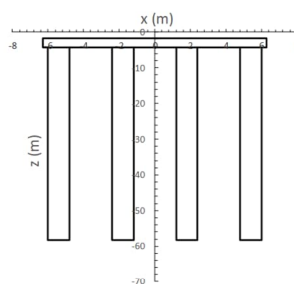
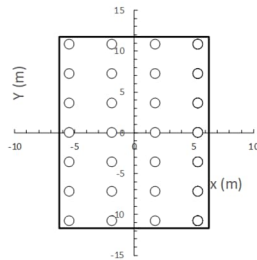
CALCOLO DEL DOMINIO D'INTERAZIONE DELLA PALIFICATA

GEOMETRIA DELLA PALIFICATA

Definire la geometria della palificata automaticamente?

Numero Pali (massimo 100 pali)
 Diametro pali
 File in direzione x (massimo 10 file)
 File in direzione y (massimo 10 file)
 Interasse in direzione x
 Interasse in direzione y
 Distanza del palo dal bordo del soletto
 Spessore del soletto
 Lunghezza pali
 Distanza tra la testa del palo e il p.c. (+ fuori terra / - fondazione interrata)

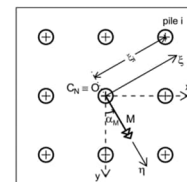
	SI	Compilare le celle che seguono
N	28	(-)
D	1.20	(m)
m	4	(m)
n	7	(m)
l _m	3.60	(m)
l _n	3.60	(m)
f	0.90	(m)
s	2.50	(m)
L	54.00	(m)
e	-4.30	(m)

Input
Output


CARICHI AGENTI SULLA PALIFICATA

Carico verticale di progetto
 Momento di progetto (ruota attorno all'asse x)
 Momento di progetto (ruota attorno all'asse y)
 Momento risultante di progetto
 Inclinazione del vettore momento risultante rispetto (x,y)

N _{Ed}	101464.61	(kN)
M _{Ed,x}	38078.73	(kN m)
M _{Ed,y}	264564.49	(kN m)
M _{Ed}	267290.77	(kN m)
α _{Ed}	8.19	(°)



CAPACITA' PORTANTE E MOMENTO RESISTENTE DEL PALO SINGOLO

Capacita portante di progetto a compressione del palo singolo
 Capacita portante di progetto a trazione del palo singolo
 Momento resistente di progetto del palo singolo soggetto a compressione
 Momento resistente di progetto del palo singolo soggetto a trazione

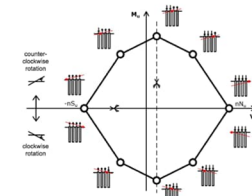
N _{U,Ed}	6762.71	(kN)
S _{U,Ed}	6710.29	(kN)
M _{Ed,c}	0.00	(kN m)
M _{Ed,t}	0.00	(kN m)

METODO DI Leora et al. (2019)

Carico verticale ultimo della palificata rispetto ad un cinetismo
 con rotazione rispetto al punto i-esimo
 Capacita portante di progetto a compressione del j-esimo palo
 Capacita portante di progetto a trazione del j-esimo palo
 Momento ultimo della palificata rispetto ad un cinetismo
 con rotazione rispetto al punto i-esimo
 Momento resistente di progetto del palo j-esimo soggetto a compressione
 Momento resistente di progetto del palo j-esimo soggetto a trazione
 Coordinata x' rispetto al sistema di riferimento (x', h) del palo j-esimo
 Punti di rotazione (anti-oraria) dei cinetismi
 Punti di rotazione (oraria) dei cinetismi
 Numero di pali della palificata

$$\begin{cases} V_{u,i} = \sum_{j=1}^{p-1} (N_{u,j}) - \sum_{j=1}^{p-1} (S_{u,j}) \\ M_{u,i} = \sum_{j=1}^{p-1} (M_{p,j} - N_{u,j} \xi_j) + \sum_{j=1}^{p-1} (M_{p,j} + S_{u,j} \xi_j) \end{cases} \quad \text{con } i = 1, \dots, p+1.$$

$$\begin{cases} V_{u,k} = \sum_{j=k}^p (N_{u,j}) - \sum_{j=k}^p (S_{u,j}) \\ M_{u,k} = \sum_{j=k}^p (S_{u,j} \xi_j - M_{p,j}) - \sum_{j=k}^p (M_{p,j} + N_{u,j} \xi_j) \end{cases} \quad \text{con } i = 1, \dots, p+1.$$



VERIFICA A CAPACITA' PORTANTE DELLA PALIFICATA

Carico verticale di progetto
 Momento risultante di progetto

Calcolo del dominio di interazione della palificata

Punto di massima Trazione (i min)
 Punto di massima Compressione (i max)
 Definire il punto (N_u, M_u) rispetto al quale si vuole eseguire la verifica
 Definire rispetto a quale condizione si vuole eseguire la verifica
 Carico verticale ultimo della palificata
 Momento ultimo della palificata
 Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_{Ed}, M_u)
 Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_u, M_{Ed})
 Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_u, M_u)

N _{Ed}	101464.61	(kN)
M _{Ed}	267290.77	(kN m)
RUN		
i _{min}	1	(-)
i _{max}	309	(-)
i	262	(-)
	(N _{Ed} , M _u)	(-)
N _u	131789.37	(kN)
M _u	347262.48	(kN m)
M _u /M _{Ed}	1.299	(-)
N _u /N _{Ed}	-	(-)
(N _u , M _u)/(N _{Ed} , M _{Ed})	-	(-)

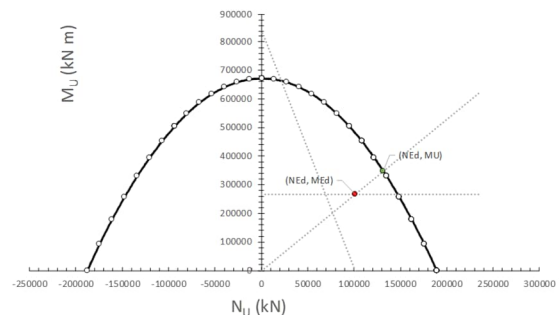


Figura 157: Dominio di interazione più sfavorevole dell'intera palificata – Combinazione SISMA_X2

Il calcolo con il metodo dei domini di interazione è stato effettuato per tutte le combinazioni SLU ed SLV permutate. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei FS della palificata ottenuti mediante il metodo dei domini:

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandatara) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Tabella 32: FS per ogni combinazione di calcolo

TYPE	PROG	COMB	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ	MU/MEd
-	-	-	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	-
SLU	513	SLU1	19016.1	537.0	-104443.1	26899.7	106868.5	886.6	1.54
SLU	514	SLU3	21537.2	577.5	-111965.9	44950.5	134628.1	953.5	1.41
SLU	515	SLU7	23735.1	537.0	-139260.4	26899.7	123393.1	886.6	1.17
SLU	516	SLU8	27084.6	423.0	-147304.9	39772.4	157015.4	698.4	1.10
SLU	517	SLU9	26256.2	577.5	-146783.3	44950.5	151152.7	953.5	1.07
SLU	518	SLU10	27720.2	487.5	-144797.3	33030.0	161489.0	804.9	1.08
SLU	519	SLU11	27135.2	409.5	-145229.3	33755.4	156117.4	676.1	1.08
SLU	520	SLU12	26244.2	409.5	-144797.3	33755.4	147762.2	676.1	1.10
SLV	521	Sisma_X1	48812.0	-5125.3	-101464.6	36869.7	-262332.5	3284.6	1.31
SLV	522	Sisma_X2	49052.0	5255.3	-101464.6	-38078.7	-264564.5	-3070.0	1.30
SLV	523	Sisma_X3	48728.0	-5125.3	-96958.2	36869.7	-272333.5	3284.6	1.37
SLV	524	Sisma_X4	48968.0	5255.3	-96958.2	-38078.7	-274565.5	-3070.0	1.33
SLV	525	Sisma_Y1	26603.5	-17235.9	-101651.3	124309.6	-131428.0	10698.4	1.62
SLV	526	Sisma_Y2	27403.5	17365.9	-101651.3	-125518.6	-138868.0	-10483.8	1.56
SLV	527	Sisma_Y3	26519.5	-17235.9	-97144.8	124309.6	-141429.0	10698.4	1.65
SLV	528	Sisma_Y4	27319.5	17365.9	-97144.8	-125518.6	-148869.0	-10483.8	1.58
SLV	529	Sisma_Z1	26981.5	-5125.3	-106908.8	36869.7	-122364.1	3284.6	1.57
SLV	530	Sisma_Z2	27221.5	5255.3	-106908.8	-38078.7	-124596.1	-3070.0	1.54
SLV	531	Sisma_Z3	26701.5	-5125.3	-91887.3	36869.7	-155700.9	3284.6	1.65
SLV	532	Sisma_Z4	26941.5	5255.3	-91887.3	-38078.7	-157932.9	-3070.0	1.68

Per una miglior chiarezza espositiva si riportano nella seguente tabella solamente i FS minimi della palificata:

Tabella 33: FS minimi della palificata

Combinazione	SLU	SLV
FS	1,07	1,30

12.1.5 Verifiche a carico limite orizzontale dei pali

Il carico limite dei pali sottoposti all'azione di una forza orizzontale applicata in testa viene calcolato secondo la teoria sviluppata da Broms per terreni coesivi ed incoerenti descritta al 9.4.1.1. Di seguito si riportano i risultati.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

H₀ Broms	γ_R	1.3	Resistenza globale
A1+M1+R3	ξ_3	1.65	Verticali di indagine
	η	0.8	Efficienza palificata

Opera: Spalla mobile

Stratigrafia da testa palo

Unità	Nome	Tipo	γ kN/mc	c' kPa	ϕ °	K _p	C _u
1	Rilevato esistente	Incoerente	18			1.00	
2	Sabbia limosa	Incoerente	19			1.00	
3	Sabbia e ghiaia	Incoerente	19			1.00	
4	Limo argilloso	Coesivo	19			1.00	80
5	Limo sabbioso	Coesivo	19			1.00	100
6	Limo argilloso	Coesivo	19			1.00	140
7	Limo sabbioso	Coesivo	19			1.00	190
8	Limo argilloso	Coesivo	19			1.00	290

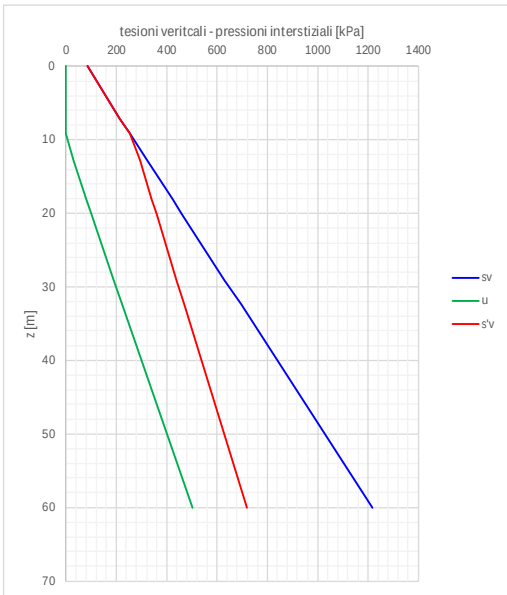
d _{palo}	1.2	m
L _{palo}	54	m
Z _{testa palo}	4.5	m
Z _{cu}	10	m
$\gamma_{interra}$	19	kN/mc
q (tensione totale a testa palo)	85.5	kPa

Per Broms modificato: possibilità di tener conto di un sovraccarico di monte

M _{Ed}	7474	kNm
T _{Ed}	995	kN

Stratigrafia da testa palo

Unità	Nome	Z _{u,i} m	spessore m	s _v kPa	u kPa	s' _v kPa	p kN/m
1	Rilevato esistente	0	7.1	85.5	0	85.5	308
		7.1		213	0	213	768
		7.1		213	0	213	768
		7.1		213.3	0	213.3	768
2	Sabbia limosa	7.1	2	213.3	0	213.3	768
		9.1		251.3	0	251.3	905
3	Sabbia e ghiaia	9.1	3.7	251.3	0	251.3	905
		12.8		321.6	28	293.6	1057
4	Limo argilloso	12.8	5.3	321.6	28	293.6	864
		18.1		422.3	81	341.3	864
5	Limo sabbioso	18.1	2	422.3	81	341.3	1080
		20.1		460.3	101	359.3	1080
6	Limo argilloso	20.1	9	460.3	101	359.3	1512
		29.1		631.3	191	440.3	1512
7	Limo sabbioso	29.1	3.3	631.3	191	440.3	2052
		32.4		694	224	470	2052
8	Limo argilloso	32.4	27.6	694	224	470	3132
		60		1218.4	500	718.4	3132



Meccanismo	T _{MAX} kN	M _{MAX} kNm	a(*) m	f(**) m
Palo Corto	102916	3624969	-	-
Palo intermedio	23889	368273	39.35	-
Palo lungo	3737	7474	-	7.05

(*) a = profondità punto di rotazione

(**) f = profondità formazione seconda cerniera plastica

Resistenza di progetto	T _{Rd,s} [kN]	3737	Resistenza caratteristica palo singolo
	T _{Rd,s} [kN]	1742	Resistenza di progetto palo singolo
	T _{Rd,g} [kN]	1394	Resistenza di progetto palificata

Verifica	T _{Ed} [kN]	995	OK
	T _{Rd} [kN]	1394	
	FS	1.40	

Figura 158: Risultati della verifica a carico limite orizzontale

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>ST</td><td>712</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	ST	712	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	ST	712	r00								

12.1.6 Verifiche strutturali dei pali

La verifica strutturale viene effettuata nel caso di:

- Massima compressione del palo;
- Massima trazione del palo (se presente);
- Massimo momento flettente;

per tutte le porzioni del palo.

Si riportano di seguito i diagrammi delle sollecitazioni agenti e resistenti lungo il fusto del palo per ogni combinazione analizzata.

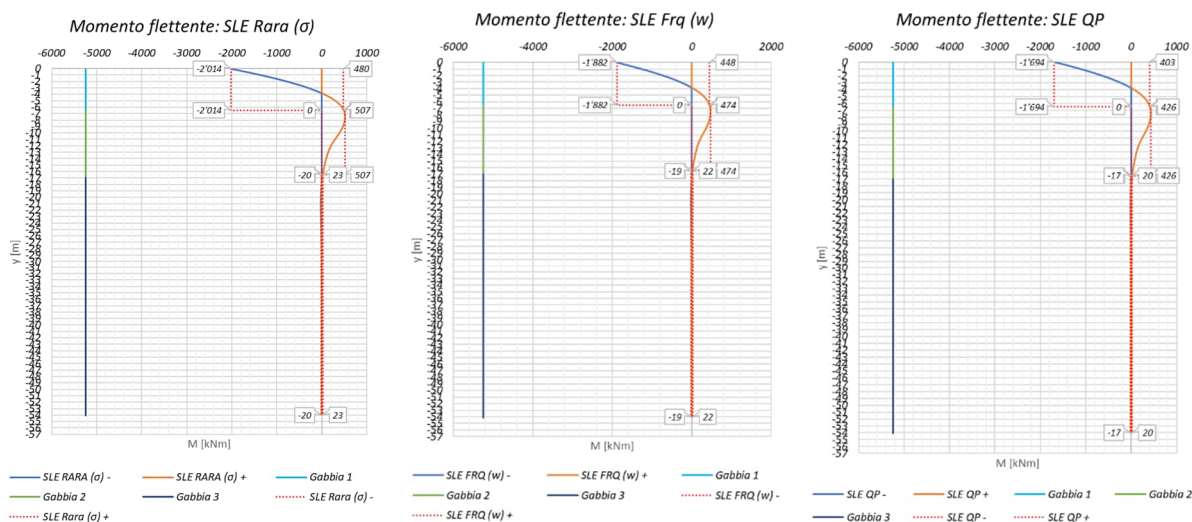


Figura 159: Diagrammi di momento flettente agente per le diverse combinazioni SLE

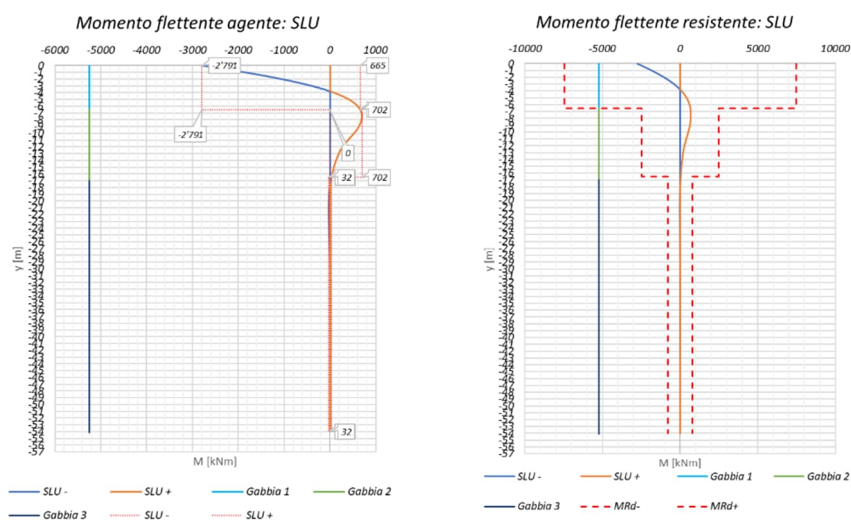


Figura 160: Diagrammi di momento flettente agente e resistente per le diverse combinazioni SLU

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

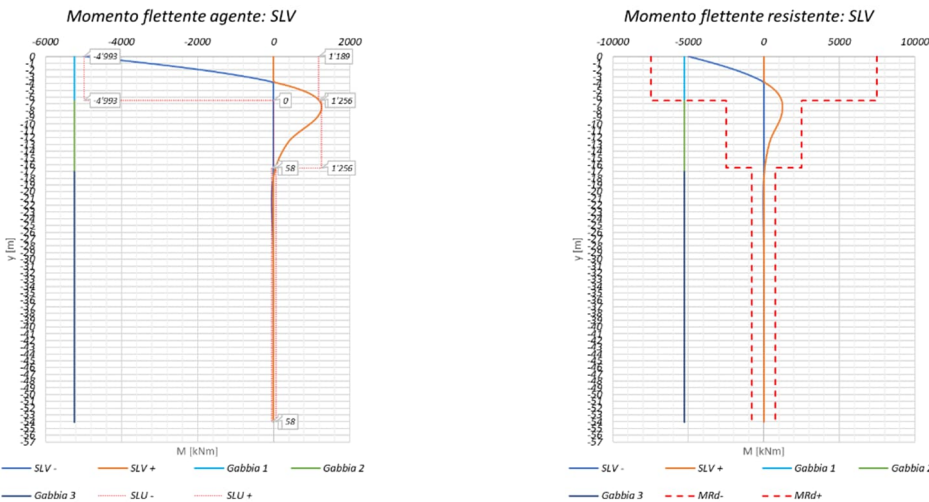


Figura 161: Diagrammi di momento flettente agente e resistente per le diverse combinazioni SLV

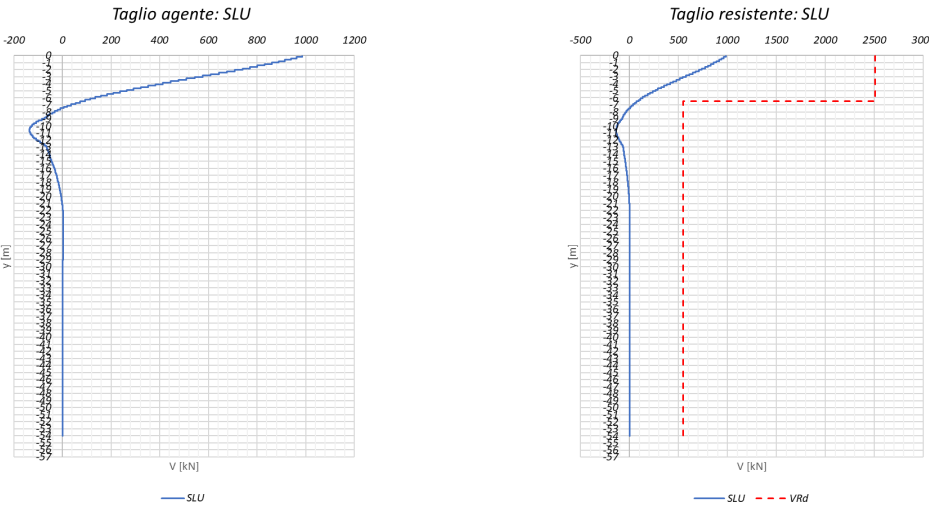


Figura 162: Diagrammi di taglio agente e resistente per le diverse combinazioni SLU

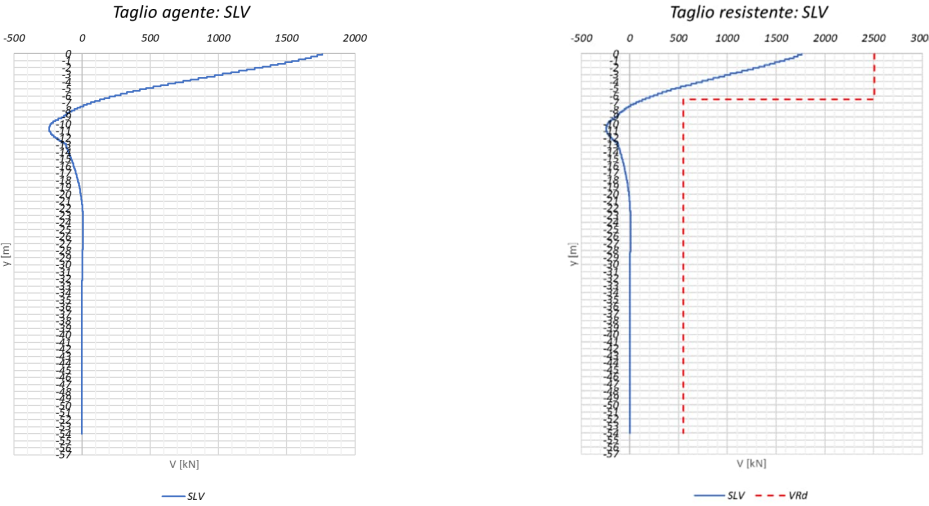


Figura 163: Diagrammi di taglio agente e resistente per le diverse combinazioni SLV

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Tabella 34: Sollecitazioni flettenti e di verifica allo SLU e SLV

Momento flettente agente: Lato monte						Momento flettente agente: Lato scavo				
SLE RARA (σ) -	SLE FRQ (w) -	SLE QP -	SLU -	SLV -		SLE RARA (σ) +	SLE FRQ (w) +	SLE QP +	SLU +	SLV +
-2014	-1882	-1694	-2791	-4993	Porzione 1	480	448	403	665	1189
0	0	0	0	0	Porzione 2	507	474	426	702	1256
-20	-19	-17	-28	-50	Porzione 3	23	22	20	32	58

In accordo al §9.7 si prevede all'interno del palo l'armatura seguente:

Tabella 35: Armatura adottata nel palo

Quota	D	L	A _s	A _w
[-]	[m]	[m]	[mm]	[mm]
Primi 10D da testa palo	1,2	6,5	2X20 Φ 32+20 Φ 32	Spirale Φ 14/100
		10,5	20 Φ 30	Spirale Φ 8/150
Oltre i 10D da testa palo		37	20 Φ 16	

Di seguito si riportano le verifiche strutturali delle tre porzioni di gabbie di armatura dei pali:

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Spalla DX_Upper_MaxTraz_Gabbia1

INPUT

SOLLECITAZIONI DI VERIFICA

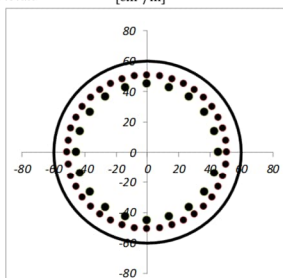
Combinazione	N _{Ed} [kN]	M _{Ed} [kNm]	V _{Ed} [kN]
SLE Quasi Permanente	-2607	1692	0
SLE Frequente	-2471	1880	0
SLE Rara	-2287	2010	0
SLU	-2062	2170	775
SLV	89	4976	1777

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE IN C.A.

Geometria della sezione			
Diametro	D	120	[cm]
Copri ferro netto	c	6.0	[cm]
Area calcestruzzo	A _{cl}	11310	[cm ²]
Copri ferro baricentrico	c _{baric}	10.9	[cm]
Altezza utile della sezione	d	109.1	[cm]

Armatura longitudinale			
	1° STRATO	2° STRATO	
Numero Barre	n _{bars} [-]	40	20
Diametro	Φ [mm]	32	32
Posizione dal lembo esterno	c _{baric} [cm]	9.0	14.8
Area strato	A _s [cm ²]	321.70	160.85
Rapporto di armatura	ρ [%]	4.267%	
% minima di armatura	ρ _{min} [%]	0.40%	

Armatura trasversale (spirale/staffe/spilli)			
	1° TIPO	2° TIPO	3° TIPO
Diametro	φ [mm]	14	0
Numero bracci	n _{bl}	2	0
Passo	s _v [cm]	10	0
Area armatura a metro per tipo	A _{sv} /s _v	30.79	0
Area armatura a metro totale		30.79	



Disposizione delle barre nella sezione trasversale

Verifica Interassi e interferri			
	1° STRATO	2° STRATO	
Interferro di progetto	[cm]	5.00	11.00
Interferro minimo	[cm]	6.40	6.40
Interasse di progetto	[cm]	8.00	14.00
Interasse massimo	[cm]	30.00	

CARATTERISTICHE REOLOGICHE DEI MATERIALI

Calcestruzzo		
Resistenza cubica a compressione	R _{ck} [MPa]	37
Resistenza cilindrica caratteristica a compressione	f _{ck} [MPa]	30
Resistenza cilindrica media a compressione	f _{cm} [MPa]	38.00
Resistenza media a trazione per flessione	f _{ctm} [MPa]	2.90
Resistenza di progetto a compressione	f _{cd} [MPa]	17.00
Modulo elastico calcestruzzo	E _{cm} [MPa]	32837

Acciaio		
Barre: ad Aderenza migliorata		
Resistenza caratteristica a snervamento	f _{yk} [MPa]	450
Coefficiente parziale di sicurezza	γ _s	1.15
Resistenza di progetto a snervamento	f _{td} [MPa]	391.3
Modulo elastico	E	210000

OUTPUT

VERIFICHE IN ESERCIZIO

Approccio di verifica:

NTC18 / EC 2 - 2

Verifica Tensionale			σ limite
Calcestruzzo SLE Quasi Permanente	σ _c [MPa]	7.61	< 13.50
Calcestruzzo SLE Rara	σ _c [MPa]	8.78	< 18.00
Acciaio SLE Rara	σ _s [MPa]	112.3	< 360.00

Verifica di fessurazione			Quasi perm.	Frequente
Altezza efficace del calcestruzzo teso	h _{ceff} [cm]	17.92	18.88	
Area efficace del calcestruzzo teso	A _{ceff} [cm ²]	1057	1140	
	A ₁ [cm ²]	80.42	96.51	
Rapporto dell'acciaio sull'area di calcestruzzo efficace	ρ _{peff} [%]	7.61%	8.47%	
Fattore dipendente dalla durata del carico	k _t	0.4	0.6	
Coefficiente funzione delle proprietà di aderenza dell'armatura	k ₁	0.8	0.8	
Coefficiente funzione della distribuzione delle deformazioni	k ₂	0.5	0.5	
Funzione dipendente dal copri ferro	k ₃	3.4	3.4	
	k ₄	0.425	0.425	
Tensione di verifica:		media	media	
Massima tensione nell'armatura alla formazione della fessura	σ _s [MPa]	68.7	82.6	
Distanza massima tra le fessure (eq.7.11 di EN 1992-1-1)	s _{r,max} [mm]	323.1	315.9	
Differenza tra deformazione media dell'armatura e del cls	(ε _{sm} - ε _{cm})	0.020%	0.024%	
Ampiezza delle fessure	w _d [mm]	0.063	0.075	
Ampiezza delle fessure limite	w _{lim} [mm]	0.300	0.400	

VERIFICA DI RESISTENZA A TAGLIO

Per la verifica a taglio si fa riferimento al metodo di Clarke-Birjandi 1993:

	sin(α) = 2r/πr con (0 < α < π/2)	[-]	0.541
	Av = r ² [π/2 + α + sin(α)cos(α)]	[cm ²]	9351
	d = r[1 + sin(α)]	[cm]	92.5
	b _w = A _v /d	[cm]	101.1

Sollecitazioni di progetto		
Ttaglio sollecitante = max Taglio (SLU,SLV)	V _{Ed} [kN]	1777
Sforzo Normale concomitante al massimo taglio	N _{Ed} [kN]	0

Verifica di resistenza in assenza di armatura specifica		
Resistenza a taglio di progetto	V _{Rd1} [kN]	644
Coefficiente di sicurezza	V _{Rd1} /V _{Ed}	0.36

Verifica di resistenza dell'armatura specifica		
CoTan(θ) di progetto	cot(θ)	2.5
Resistenza a taglio delle bielle compresse in cls	V _{Rd1} (θ) [kN]	2605
Resistenza a taglio dell'armatura	V _{Rd1} (θ) [kN]	2506
Resistenza a taglio di progetto	V _{Rd} [kN]	2506
Coefficiente di sicurezza	V _{Rd} /V _{Ed}	1.41

VERIFICA DI RESISTENZA A PRESO-FLESSIONE

Sollecitazioni di progetto		
Momento sollecitante	M _{Ed} [kNm]	2170
Sforzo Normale concomitante	N _{Ed} [kN]	-2062

Verifica di resistenza		
Momento resistente	M _{Rd} [kNm]	7356
Coefficiente di sicurezza	M _{Rd} /M _{Ed}	3.39

DOMINIO M-N

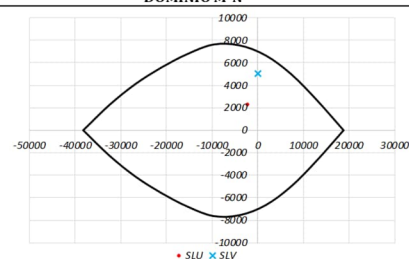


Figura 164: Verifica STR – M_{max}, N_{min} – Gabbia1 (L<10D)

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Spalla DX_Upper_MaxSoll_Gabbia2

INPUT

SOLLECITAZIONI DI VERIFICA

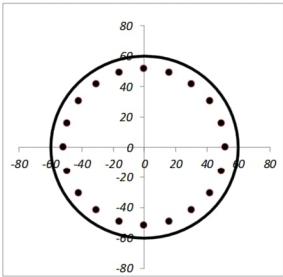
Combinazione	N _{Ed} [kN]	M _{Ed} [kNm]	V _{Ed} [kN]
SLE Quasi Permanente	0	426	0
SLE Frequente	0	474	0
SLE Rara	0	507	0
SLU	0	702	135
SLV	0	1256	241

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE IN C.A.

Geometria della sezione			
Diametro	D	120	[cm]
Copri ferro netto	c	6.0	[cm]
Area calcestruzzo	A _{cl}	11310	[cm ²]
Copri ferro baricentrico	c _{baric}	8.3	[cm]
Altezza utile della sezione	d	111.7	[cm]

Armatura longitudinale			
	1° STRATO	2° STRATO	
Numero Barre	n _{bars} [-]	20	0
Diametro	Φ [mm]	30	32
Posizione dal lembo esterno	c _{baric} [cm]	8.3	0.0
Area strato	A _s [cm ²]	141.37	0.00
Rapporto di armatura	ρ [%]	1.250%	
% minima di armatura	ρ _{min} [%]	0.40%	

Armatura trasversale (spirale/staffe/spilli)			
	1° TIPO	2° TIPO	3° TIPO
Diametro	φ [mm]	8	0
Numero bracci	n _{bl}	2	0
Passo	s _v [cm]	15	0
Area armatura a metro per tipo	A _{sv} /s _v	6.70	0
Area armatura a metro totale	[cm ² /m]	6.70	



Disposizione delle barre nella sezione trasversale

Verifica Interassi e interferri			
	1° STRATO	2° STRATO	
Interferro di progetto	[cm]	13.00	-
Interferro minimo	[cm]	6.00	-
Interasse di progetto	[cm]	16.00	-
Interasse massimo	[cm]	25.00	-

CARATTERISTICHE REOLOGICHE DEI MATERIALI

Calcestruzzo			
Resistenza cubica a compressione	R _{ck} [MPa]	37	
Resistenza cilindrica caratteristica a compressione	f _{ck} [MPa]	30	
Resistenza cilindrica media a compressione	f _{cm} [MPa]	38.00	
Resistenza media a trazione per flessione	f _{ctm} [MPa]	2.90	
Resistenza di progetto a compressione	f _{cd} [MPa]	17.00	
Modulo elastico calcestruzzo	E _{cm} [MPa]	32837	

Acciaio			
Barre: ad Aderenza migliorata			
Resistenza caratteristica a snervamento	f _{yk} [MPa]	450	
Coefficiente parziale di sicurezza	γ _s	1.15	
Resistenza di progetto a snervamento	f _{td} [MPa]	391.3	
Modulo elastico	E	210000	

OUTPUT

VERIFICHE IN ESERCIZIO

Approccio di verifica: NTC18 / EC 2 - 2

Verifica Tensionale			σ limite
Calcestruzzo SLE Quasi Permanente	σ _c [MPa]	0.00	< 13.50
Calcestruzzo SLE Rara	σ _c [MPa]	0.00	< 18.00
Acciaio SLE Rara	σ _s [MPa]	0.0	< 360.00

Verifica di fessurazione			Quasi perm.	Frequente
Altezza efficace del calcestruzzo teso	h _{ceff} [cm]	-	-	12.56
Area efficace del calcestruzzo teso	A _{ceff} [cm ²]	-	-	630
	A ₁ [cm ²]	-	-	21.21
Rapporto dell'acciaio sull'area di calcestruzzo efficace	ρ _{peff} [%]	-	-	3.37%
Fattore dipendente dalla durata del carico	k _t	0.4	0.6	
Coefficiente funzione delle proprietà di aderenza dell'armatura	k ₁	0.8	0.8	
Coefficiente funzione della distribuzione delle deformazioni	k ₂	0.5	0.5	
Funzione dipendente dal copri ferro	k ₃	3.4	3.4	
	k ₄	0.425	0.425	
Tensione di verifica:		media	media	
Massima tensione nell'armatura alla formazione della fessura	σ _s [MPa]	0.0	0.0	
Distanza massima tra le fessure (eq.7.11 di EN 1992-1-1)	s _{r,max} [mm]	-	-	382.6
Differenza tra deformazione media dell'armatura e del cls	(ε _{sm} - ε _{cm})	-	-	0.000%
Ampiezza delle fessure	w _d [mm]	0.000	0.000	
Ampiezza delle fessure limite	w _{lim} [mm]	0.300	0.400	

VERIFICA DI RESISTENZA A TAGLIO

Per la verifica a taglio si fa riferimento al metodo di Clarke-Birjandi 1993:			
	$\sin(\alpha) = 2r / nr$	$\cos(0 < \alpha < \pi/2)$	[-]
	$A_v = r^2 [n/2 + \alpha + \sin(\alpha)\cos(\alpha)]$		[cm ²]
	$d = r[1 + \sin(\alpha)]$		[cm]
	$w_b = A_v/d$		[cm]
			0.549
			9396
			929
			101.1

Sollecitazioni di progetto		
Ttaglio sollecitante = max Taglio (SLU,SLV)	V _{Ed} [kN]	241
Sforzo Normale concomitante al massimo taglio	N _{Ed} [kN]	0

Verifica di resistenza in assenza di armatura specifica		
Resistenza a taglio di progetto	V _{Rd1} [kN]	534
Coefficiente di sicurezza	V _{Rd1} /V _{Ed}	2.21

Verifica di resistenza dell'armatura specifica		
CoTan(θ) di progetto	cot(θ)	2.5
Resistenza a taglio delle bielle compresse in cls	V _{Rd1} (θ) [kN]	2618
Resistenza a taglio dell'armatura	V _{Rd1} (θ) [kN]	548
Resistenza a taglio di progetto	V _{Rd} [kN]	548
Coefficiente di sicurezza	V _{Rd} /V _{Ed}	2.27

VERIFICA DI RESISTENZA A PRESSO-FLESSIONE

Sollecitazioni di progetto			
Momento sollecitante	M _{Ed} [kNm]	702	1256
Sforzo Normale concomitante	N _{Ed} [kN]	0	0

Verifica di resistenza			
Momento resistente	M _{Rd} [kNm]	2503	2503
Coefficiente di sicurezza	M _{Rd} /M _{Ed}	3.56	1.99

DOMINIO M-N

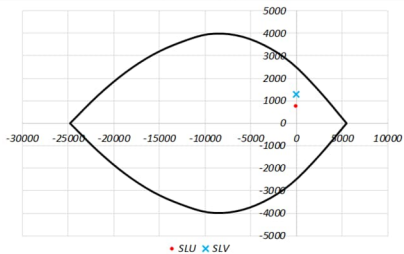


Figura 165: Verifica STR – M_{max}, N_{min} – Gabbia2 (L<10D)

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Spalla DX_Upper_MaxSoll_Gabbia3

INPUT

SOLLECITAZIONI DI VERIFICA

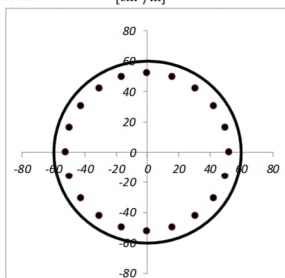
Combinazione	N _{Ed} [kN]	M _{Ed} [kNm]	V _{Ed} [kN]
SLE Quasi Permanente	0	20	0
SLE Frequente	0	22	0
SLE Rara	0	23	0
SLU	0	32	25
SLV	0	58	45

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE IN C.A.

Geometria della sezione			
Diametro	D	120	[cm]
Copriferro netto	c	6.0	[cm]
Area calcestruzzo	A _{cl}	11310	[cm ²]
Copriferro baricentrico	c _{baric}	7.6	[cm]
Altezza utile della sezione	d	112.4	[cm]

Armatura longitudinale			
	1° STRATO	2° STRATO	
Numero Barre	n _{bars} [-]	20	0
Diametro	Φ [mm]	16	32
Posizione dal lembo esterno	c _{baric} [cm]	7.6	0.0
Area strato	A _s [cm ²]	40.21	0.00
Rapporto di armatura	ρ [%]	0.356%	
% minima di armatura	ρ _{min} [%]	0.30%	

Armatura trasversale (spirale/staffe/spilli)			
	1° TIPO	2° TIPO	3° TIPO
Diametro	φ [mm]	8	0
Numero bracci	n _{bl}	2	0
Passo	s _v [cm]	15	0
Area armatura a metro per tipo	A _{sv} /s _v	6.70	0
Area armatura a metro totale	[cm ² /m]	6.70	



Disposizione delle barre nella sezione trasversale

Verifica Interassi e interferri			
	1° STRATO	2° STRATO	
Interferro di progetto	[cm]	15.00	-
Interferro minimo	[cm]	6.40	-
Interasse di progetto	[cm]	16.00	-
Interasse massimo	[cm]	20.00	-

CARATTERISTICHE REOLOGICHE DEI MATERIALI

Calcestruzzo			
Resistenza cubica a compressione	R _{ck} [MPa]	37	
Resistenza cilindrica caratteristica a compressione	f _{ck} [MPa]	30	
Resistenza cilindrica media a compressione	f _{cm} [MPa]	38.00	
Resistenza media a trazione per flessione	f _{ctm} [MPa]	2.90	
Resistenza di progetto a compressione	f _{cd} [MPa]	17.00	
Modulo elastico calcestruzzo	E _{cm} [MPa]	32837	

Acciaio			
Barre: ad Aderenza migliorata			
Resistenza caratteristica a snervamento	f _{yk} [MPa]	450	
Coefficiente parziale di sicurezza	γ _s	1.15	
Resistenza di progetto a snervamento	f _{td} [MPa]	391.3	
Modulo elastico	E	210000	

OUTPUT

VERIFICHE IN ESERCIZIO

Approccio di verifica:

NTC18 / EC 2-2

Verifica Tensionale			σ limite
Calcestruzzo SLE Quasi Permanente	σ _c [MPa]	0.00	< 13.50
Calcestruzzo SLE Rara	σ _c [MPa]	0.00	< 18.00
Acciaio SLE Rara	σ _s [MPa]	0.0	< 360.00

Verifica di fessurazione			Quasi perm.	Frequente
Altezza efficace del calcestruzzo teso	h _{ceff} [cm]	-	-	-
Area efficace del calcestruzzo teso	A _{ceff} [cm ²]	-	-	-
Rapporto dell'acciaio sull'area di calcestruzzo efficace	ρ _{peff} [%]	-	-	-
Fattore dipendente dalla durata del carico	k _t	0.4	0.6	
Coefficiente funzione delle proprietà di aderenza dell'armatura	k ₁	0.8	0.8	
Coefficiente funzione della distribuzione delle deformazioni	k ₂	0.5	0.5	
Funzione dipendente dal copriferro	k ₃	3.4	3.4	
	k ₄	0.425	0.425	
Tensione di verifica:		media	media	
Massima tensione nell'armatura alla formazione della fessura	σ _s [MPa]	0.0	0.0	
Distanza massima tra le fessure (eq.7.11 di EN 1992-1-1)	s _{r,max} [mm]	-	-	
Differenza tra deformazione media dell'armatura e del cls	(ε _{sm} - ε _{cm})	-	-	
Ampiezza delle fessure	w _d [mm]	0.000	0.000	
Ampiezza delle fessure limite	w _{lim} [mm]	0.300	0.400	

VERIFICA DI RESISTENZA A TAGLIO

Per la verifica a taglio si fa riferimento al metodo di Clarke-Birjandi 1993:

	$\sin(\alpha) = 2r_s / \pi r$	$\cos(0 < \alpha < \pi/2)$	[-]	0.556
	$A_v = r^2 [n/2 + \alpha + \sin(\alpha)\cos(\alpha)]$		[cm ²]	9441
	$d = r[1 + \sin(\alpha)]$		[cm]	93.4
	$b_w = A_v / d$		[cm]	101.1

Sollecitazioni di progetto

Taglio sollecitante = max Taglio (SLU,SLV)	V _{Ed} [kN]	45
Sforzo Normale concomitante al massimo taglio	N _{Ed} [kN]	0

Verifica di resistenza in assenza di armatura specifica

Resistenza a taglio di progetto	V _{Rd1} [kN]	352
Coefficiente di sicurezza	V _{Rd1} /V _{Ed}	7.87

Verifica di resistenza dell'armatura specifica

CoTan(θ) di progetto	cot(θ)	2.5
Resistenza a taglio delle bielle compresse in cls	V _{Rd1} (θ) [kN]	2630
Resistenza a taglio dell'armatura	V _{Rd1} (θ) [kN]	551
Resistenza a taglio di progetto	V _{Rd} [kN]	551
Coefficiente di sicurezza	V _{Rd} /V _{Ed}	12.32

VERIFICA DI RESISTENZA A PRESSO-FLESSIONE

Sollecitazioni di progetto			
	SLU	SLV	
Momento sollecitante	M _{Ed} [kNm]	32	58
Sforzo Normale concomitante	N _{Ed} [kN]	0	0

Verifica di resistenza			
	SLU	SLV	
Momento resistente	M _{Rd} [kNm]	784	784
Coefficiente di sicurezza	M _{Rd} /M _{Ed}	24.38	13.63

DOMINIO M-N

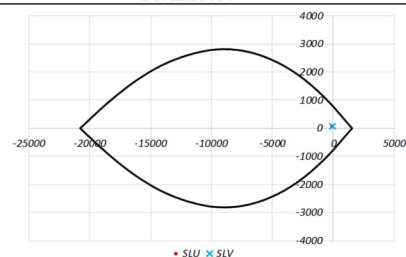
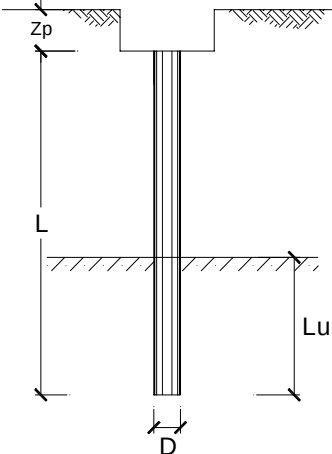


Figura 166: Verifica STR – M_{max}, N_{min} – Gabbia3 (L>10D)

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

12.1.7 Verifica dei cedimenti

Di seguito si riporta il calcolo dei cedimenti del palo singolo e della palificata.

CALCOLO DEL PALO SINGOLO E DELLA PALIFICATA					
OPERA: Spalla DX					
DATI DI INPUT:	Fine costr.		Esercizio		
	SLE-QP		SLE-RAR		
	Diametro del Palo (D):	1.2 (m)	1.2 (m)		
	Carico sul palo (P):	4498.0 (kN)	5435.0 (kN)		
	Lunghezza del Palo (L):	54.0 (m)	54.0 (m)		
	Lunghezza Utile del Palo (Lu):	54.0 (m)	54.0 (m)		
	Peso del Palo (P_palo):	1526.8 (kN)	1526.8 (kN)		
	$\pi \cdot (D^2 / 4) \cdot L \cdot \gamma_{palo}$				
	Carico base palo (P_base):	6024.8 (kN)	6961.8 (kN)		
	$P + P_{palo}$				
Modulo di Deformazione (E_m):	80.0 (MPa)	80.0 (MPa)			
Numero di pali della Palificata (n):	28.0 (-)	28.0 (-)			
Spaziatura dei pali (s):	3.6 (m)	3.6 (m)			
CEDIMENTO DEL PALO SINGOLO:					
$\delta = (\beta \cdot P) / (E_m \cdot L_{utile})$ <i>Poulos & Davis (1968)</i>					
	SLE-QP		SLE-RAR		$\Delta \delta = 0.5 \text{ (mm)}$
Coefficiente di forma $\beta = 0,5 + \text{Log}(L_{utile} / D)$:	2.15 (-)	2.15 (-)			
Cedimento del palo $\delta = (\beta \cdot P) / (E_m \cdot L_{utile})$	3.0 (mm)	3.5 (mm)			
CEDIMENTO DELLA PALIFICATA:					
$\delta_p = R_s \cdot \delta = n \cdot R_g \cdot \delta$ <i>Poulos & Davis (1981)</i>					
	SLE-QP		SLE-RAR		$\Delta \delta_p = 5.7 \text{ (mm)}$
Coefficiente di Gruppo $R = (n \cdot s / L)^{0,5}$ <i>Randolph (1994)</i>	1.37 (-)	1.37 (-)			
$R_g = 0,5 / R + 0,13 / R^2$ <i>Mandolini et al. (1997)</i>	0.44 (-)	0.44 (-)			
Cedimento della palificata $\delta_p = R_s \cdot \delta = n \cdot R_g \cdot \delta$	36.6 (mm)	42.3 (mm)			

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

12.1.8 Verifiche in condizioni di Liquefazione

Le sollecitazioni provenienti dalla sovrastruttura, come già riportato ai capitoli precedenti, sono riferite al baricentro della fondazione alla quota di testa dei pali (intradosso plinto). Da queste, la procedura per le verifiche in presenza di liquefazione si è svolta come segue:

- Per le verifiche geotecniche e strutturali, partendo sempre da tali valori, vengono calcolate le sollecitazioni considerando i parametri residui riportati al 9.8.4. I valori di taglio e sforzo assiale rimangono gli stessi.

12.1.8.1 *Calcolo momento adimensionale*

Secondo la teoria di Matlock e Reese descritta precedentemente, è stato calcolato il momento adimensionale del palo in accordo alla nuova configurazione stratigrafica che prevede l'utilizzo dei parametri residui per i terreni soggetti a liquefazione.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Spalla DX

scala grafico

strati terreno	descrizione	quote (m)	k_h (kN/m ³)	n_h (kN/m ³)
p.c.=strato 1	Rilevato esistente	0.0	4000	
✓ strato 2	Sabbia limosa	-7.1	13667	
✓ strato 3	Sabbia e ghiaia	-9.0	16000	
✓ strato 4	Limo argilloso	-12.8	23333	
✓ strato 5	Limo sabbioso	-18.0	26667	
✓ strato 6	Limo argilloso	-20.0	33333	

Prof. testa palo 2.5 (m)

Diametro del palo 1.2 (m)

J palo 0.10179 (m⁴)

Lunghezza del palo 54 (m)

Forza orizzontale in testa 1780 (kN)

Momento in testa 0 (kNm)

E cls 31447 (Mpa)

dimensione elementi 0.2 (m)

☒ palo impedito di ruotare

☐ palo impedito di traslare

☐ palo libero

Calcolo

α_m 3.77 (m)

$M_0 = \alpha_m \cdot H$

Figura 167: Calcolo del coefficiente α_m

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

12.1.8.2 Ripartizione delle sollecitazioni sui pali

Le terne delle massime sollecitazioni in testa ai pali, per la combinazione SLV, risultano essere le seguenti:

Tabella 36: Terne di sollecitazioni (N, V e M) massime in testa al palo

SLV	Sisma_X2	-7057	1780	6711	Massima compressione
	Sisma_X4	89	1777	6700	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	Sisma_X2	-191	1780	6711	Massimo taglio

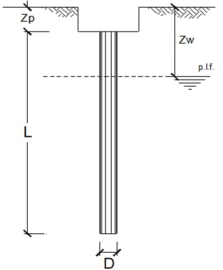
STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

12.1.8.3 Calcolo della portanza trasversale del singolo palo

CALCOLO DELLA CAPACITA' PORTANTE DI UN PALO TRIVELLATO DI GRANDE DIAMETRO
ai sensi del D.M. 17/01/2018
OPERA: Spalla DX

Diametro del palo (D): 1.2 (m)
 Quota testa palo dal p.c. (z_p): 4.5 (m)
 Area del palo (A_p): 1.131 (m²)
 Quota della falda dal p.c. (z_w): 10 (m)
 Tecnica di scavo: Bentonite

Scalzamento: 0 (m)



CARICO ASSIALE DI COMPRESSIONE SUL SINGOLO PALO:
 §6.4.3.1 D.M. 17/01/2018
 Approccio 2: (A1+M1+R3)

Carico assiale di compressione di progetto

N _d (SLU)		(kN)
N _d (SLV)		(kN)
N _d (SLE)	5435	(kN)
N _d (SLD)		(kN)

CARICO ASSIALE DI TRAZIONE SUL SINGOLO PALO:
 §6.4.3.1 D.M. 17/01/2018
 Approccio 2: (A1+M1+R3)

Carico assiale di trazione di progetto

N _d (SLU)		(kN)
N _d (SLV)	-89	(kN)

Numero di strati: 8

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI

Strato	Stratigrafia		Spess. da p.c.	Unità geotecnica	Tipo di terreno	Parametri del terreno						
	da	a				γ	c'	φ'	c _u	c _{u,inc}	α	τ _{lim}
(-)	(m)	(m)	(m)	(-)	(-)	(kN/m ³)	(kPa)	(°)	(kPa)	(-)	(-)	(kPa)
1	0.00	11.40	11.40	Rilevato esistente	Sabbie limose	19					0	150
2	11.40	13.40	2.00	Sabbia limosa	Sabbie limose	19					0	150
3	13.40	17.10	3.70	Sabbia e ghiaia	Sabbie	19					0	150
4	17.10	22.30	5.20	Limo argilloso	Coesivo	19			80		0.4	100
5	22.30	24.40	2.10	Limo sabbioso	Coesivo	19			100		0.4	100
6	24.40	33.40	9.00	Limo argilloso	Coesivo	19			140		0.4	100
7	33.40	36.70	3.30	Limo sabbioso	Coesivo	19			190		0.4	100
8	36.70	60.00	23.30	Limo argilloso	Coesivo	19			290		0.4	100

Fattori di correlazione per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali indagate

Numero di verticali indagate	1	2	3	4	5	7	≥ 10
ξ ₃	1.70	1.65	1.60	1.55	1.50	1.45	1.40
ξ ₄	1.70	1.55	1.48	1.42	1.34	1.28	1.21

n°2 verticali

Lunghezza del palo (L_p): 54 (m)
 Peso del palo (P_p): 978 (kN)
 Profondità punta palo: 58.5 (m)

Strato	Spess. Strati_pal	distanza punta palo-strato successivo
(-)	(m)	(m)
1	6.90	0.00
2	2.00	0.00
3	3.70	0.00
4	5.20	0.00
5	2.10	0.00
6	9.00	0.00
7	3.30	0.00
8	21.80	1.50

attenzione inferiore a 3D

CAPACITA' PORTANTE CARATTERISTICA

Resistenza alla base:	R _b =	3365	(kN)
Resistenza laterale:	R _s =	9589	(kN)
Resistenza totale:	R _t = R _b + R _s =	12955	(kN)

CAPACITA' PORTANTE DI PROGETTO A COMPRESSIONE
 Approccio 2: (A1+M1+R3) §6.4.3.1 D.M. 17/01/2018

Resistenza alla base:	R _{b,c} =	1511	(kN)
Resistenza laterale:	R _{s,c} =	5054	(kN)
Resistenza compr.:	R _{d,c} = R _{b,c} + R _{s,c} =	6565	(kN)

CAPACITA' PORTANTE DI PROGETTO A TRAZIONE
 Approccio 2: (A1+M1+R3) §6.4.3.1 D.M. 17/01/2018

Resistenza laterale:	R _{s,t} =	-4649	(kN)
Resistenza traz.:	R _{d,t} = R _{s,t} =	-4649	(kN)

VERIFICA A COMPRESSIONE

	N _c (kN)	R _{s,c} (kN)	FS (-)
SLE	6413	9589	1.50
SLD			-

R_{s,c}/N_c ≥ 1.25

VERIFICA A TRAZIONE

	N _{d,t} (kN)	R _{d,t} (kN)	FS (-)
SLU - (A1+M1+R3)			-
SLV - (EQK+M1+R3)	-89	-4649	7.29

R_{d,t}/N_{d,t} ≥ 1

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

DIAGRAMMI CAPACITA' PORTANTE A FORZE ASSIALI DI COMPRESSIONE

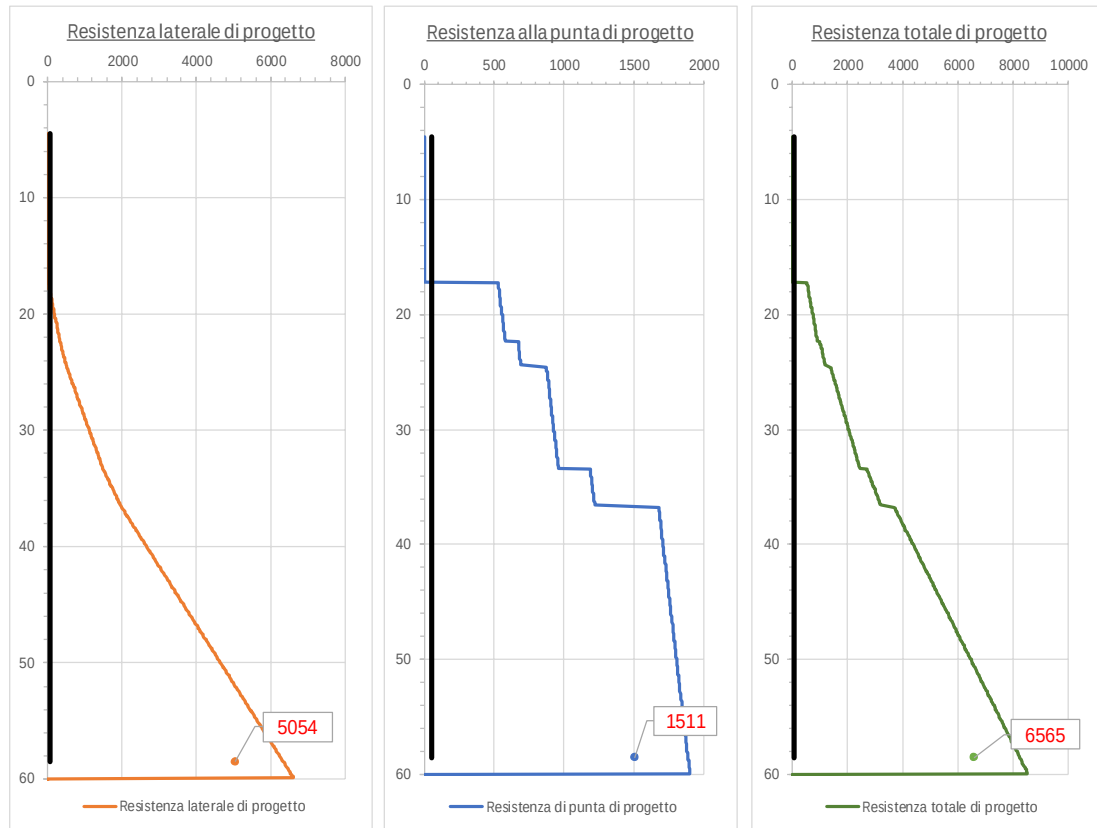
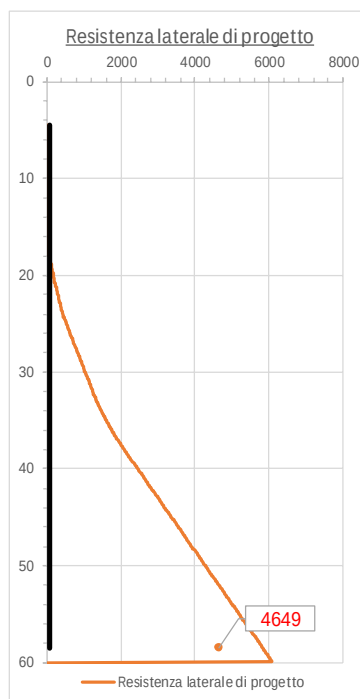


DIAGRAMMA CAPACITA' PORTANTE A FORZE ASSIALI DI TRAZIONE



STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

12.1.8.4 Calcolo dei domini di interazione



Lingua IT

CALCOLO DEL DOMINIO D'INTERAZIONE DELLA PALIFICATA

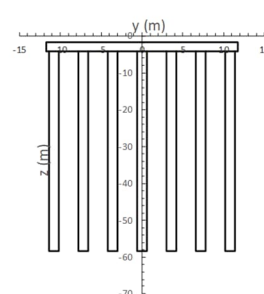
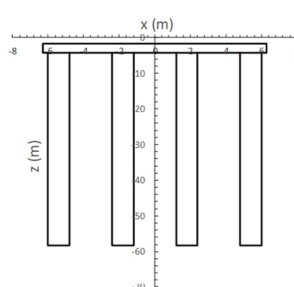
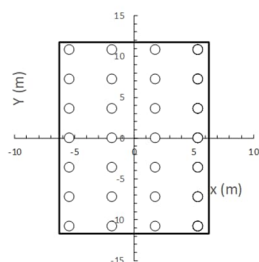
GEOMETRIA DELLA PALIFICATA

Definire la geometria della palificata automaticamente ?

Numero Pali (massimo 100 pali)
Diametro pali
File in direzione x (massimo 10 file)
File in direzione y (massimo 10 file)
Interasse in direzione x
Interasse in direzione y
Distanza del palo dal bordo del soletto
Spessore del soletto
Lunghezza pali
Distanza tra la testa del palo e il p.c. (+ fuori terra / - fondazione interrata)

	SI	Compilare le celle che seguono
N	28	(-)
D	1.20	(m)
m	4	(m)
n	7	(m)
l _m	3.60	(m)
l _n	3.60	(m)
f	0.90	(m)
s	2.50	(m)
L	54.00	(m)
e	-4.30	(m)

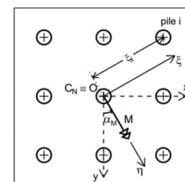
Input
Output



CARICHI AGENTI SULLA PALIFICATA

Carico verticale di progetto
Momento di progetto (ruota attorno all'asse x)
Momento di progetto (ruota attorno all'asse y)
Momento risultante di progetto
Inclinazione del vettore momento risultante rispetto (x,y)

N _{Ed}	101464.61	(kN)
M _{Edx}	38078.73	(kN m)
M _{Edy}	264584.49	(kN m)
M _{Ed}	267290.77	(kN m)
α _{Ed}	8.19	(°)



CAPACITA' PORTANTE E MOMENTO RESISTENTE DEL PALO SINGOLO

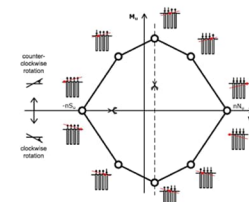
Capacità portante di progetto a compressione del palo singolo
Capacità portante di progetto a trazione del palo singolo
Momento resistente di progetto del palo singolo soggetto a compressione
Momento resistente di progetto del palo singolo soggetto a trazione

N _{U,Ed}	5586.71	(kN)
S _{U,Ed}	5627.29	(kN)
M _{Ed,c}	0.00	(kN m)
M _{Ed,t}	0.00	(kN m)

METODO DI Leoni et al. (2019)

Carico verticale ultimo della palificata rispetto ad un cinematisimo con rotazione rispetto al punto i-esimo
Capacità portante di progetto a compressione del j-esimo palo
Capacità portante di progetto a trazione del j-esimo palo
Momento ultimo della palificata rispetto ad un cinematisimo con rotazione rispetto al punto i-esimo
Momento resistente di progetto del palo j-esimo soggetto a compressione
Momento resistente di progetto del palo j-esimo soggetto a trazione
Coordinata x' rispetto al sistema di riferimento (x', h) del palo j-esimo
Punti di rotazione (anti-oraria) dei cinematismi
Punti di rotazione (oraria) dei cinematismi
Numero di pali della palificata

$$\begin{aligned}
 &V_{u,i} \\
 &N_{u,i} \\
 &S_{u,i} \\
 &M_{u,i} \\
 &M_{r,i} \\
 &\xi_j \\
 &i \\
 &k \\
 &p
 \end{aligned}
 \begin{cases}
 V_{u,i} = \sum_{j=1}^{p-1} (N_{u,j}) - \sum_{j=1}^{p-1} (S_{u,j}) \\
 M_{u,i} = \sum_{j=1}^{p-1} (M_{u,j} - N_{u,j} \xi_j) + \sum_{j=1}^{p-1} (M_{r,j} + S_{u,j} \xi_j) \\
 \text{con } i = 1, \dots, p+1. \\
 V_{u,i} = \sum_{j=i}^p (N_{u,j}) - \sum_{j=i}^p (S_{u,j}) \\
 M_{u,i} = \sum_{j=i}^p (S_{u,j} \xi_j - M_{r,j}) - \sum_{j=i}^p (M_{u,j} + N_{u,j} \xi_j) \\
 \text{con } i = 1, \dots, p+1.
 \end{cases}$$

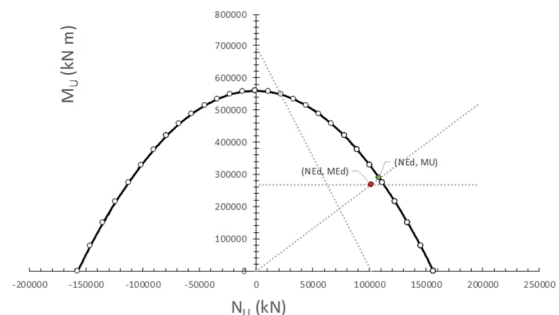


VERIFICA A CAPACITA' PORTANTE DELLA PALIFICATA

Carico verticale di progetto
Momento risultante di progetto
Calcolo del dominio di interazione della palificata

Punto di massima Trazione (i min)
Punto di massima Compressione (i max)
Definire il punto (N_u, M_u) rispetto al quale si vuole eseguire la verifica
Definire rispetto a quale condizione si vuole eseguire la verifica
Carico verticale ultimo della palificata
Momento ultimo della palificata
Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_{Ed}, M_u)
Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_u, M_{Ed})
Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_u, M_u)

N _{Ed}	101464.61	(kN)
M _{Ed}	267290.77	(kN m)
RUN		
i _{min}	1	(-)
i _{max}	309	(-)
i	262	(-)
N _u	108513.46	(kN)
M _u	289037.44	(kN m)
M _u /M _{Ed}	1.081	(-)
N _u /N _{Ed}	-	(-)
(N _u , M _u)/(N _{Ed} , M _{Ed})	-	(-)



STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

12.1.8.5 Verifiche strutturali

Spalla DX_Upper_MaxSoll_Gabbia1_liquef

INPUT

SOLLECITAZIONI DI VERIFICA

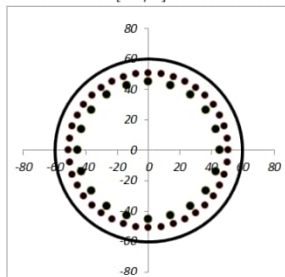
Combinazione	N _{Ed} [kN]	M _{Ed} [kNm]	V _{Ed} [kN]
SLE Quasi Permanente	-2607	2279	0
SLE Frequente	-2471	2531	0
SLE Rara	-2287	2707	0
SLU	-3003	3750	995
SLV	89	6700	1777

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE IN C.A.

Geometria della sezione			
Diametro	D	120	[cm]
Copriferro netto	c	6.0	[cm]
Area calcestruzzo	A _{da}	11310	[cm ²]
Copriferro baricentrico	c _{baric}	10.9	[cm]
Altezza utile della sezione	d	109.1	[cm]

Armatura longitudinale			
	1° STRATO	2° STRATO	
Numero Barre	n _{barra} [-]	40	20
Diametro	Φ [mm]	32	32
Posizione dal lembo esterno	c _{baric} [cm]	9.0	14.8
Area strato	A _{st} [cm ²]	321.70	160.85
Rapporto di armatura	ρ [%]	4.267%	
% minima di armatura	ρ _{min} [%]	0.40%	

Armatura trasversale (spirale/staffe/spilli)			
	1° TIPO	2° TIPO	3° TIPO
Diametro	φ [mm]	14	0
Numero bracci	n _{br}	2	0
Passo	s _w [cm]	10	0
Area armatura a metro per tipo	A _{ptw} /s _w	30.79	0
Area armatura a metro totale	[cm ² /m]	30.79	



Disposizione delle barre nella sezione trasversale

Verifica Interassi e interferri			
		1° STRATO	2° STRATO
Interferro di progetto	[cm]	5.00	11.00
Interferro minimo	[cm]	6.40	6.40
Interasse di progetto	[cm]	8.00	14.00
Interasse massimo	[cm]	30.00	

CARATTERISTICHE REOLOGICHE DEI MATERIALI

Calcestruzzo		
Resistenza cubica a compressione	R _{ck} [MPa]	37
Resistenza cilindrica caratteristica a compressione	f _{ck} [MPa]	30
Resistenza cilindrica media a compressione	f _{cm} [MPa]	38.00
Resistenza media a trazione per flessione	f _{ctm} [MPa]	2.90
Resistenza di progetto a compressione	f _{cd} [MPa]	17.00
Modulo elastico calcestruzzo	E _{cm} [MPa]	32837

Acciaio		
Barre: ad Aderenza migliorata		
Resistenza caratteristica a snervamento	f _{yk} [MPa]	450
Coefficiente parziale di sicurezza	γ _s	1.15
Resistenza di progetto a snervamento	f _{sd} [MPa]	391.3
Modulo elastico	E	210000

OUTPUT

VERIFICHE IN ESERCIZIO

Approccio di verifica:

NTC18 / EC 2 -2

Verifica Tensionale			σ limite
Calcestruzzo SLE Quasi Permanente	σ _c [MPa]	9.96	< 13.50
Calcestruzzo SLE Rara	σ _c [MPa]	11.56	< 18.00
Acciaio SLE Rara	σ _s [MPa]	160.6	< 360.00

Verifica di fessurazione			Quasi perm.	Frequente
Altezza efficace del calcestruzzo teso	h _{ceff} [cm]	19.58	20.26	
Area efficace del calcestruzzo teso	A _{ceff} [cm ²]	1202	1263	
	A _z [cm ²]	96.51	96.51	
Rapporto dell'acciaio sull'area di calcestruzzo efficace	ρ _{peff} [%]	8.03%	7.64%	
Fattore dipendente dalla durata del carico	k _c	0.4	0.6	
Coefficiente funzione delle proprietà di aderenza dell'armatura	k ₁	0.8	0.8	
Coefficiente funzione della distribuzione delle deformazioni	k ₂	0.5	0.5	
Funzione dipendente dal copriferro	k ₃	3.4	3.4	
	k ₄	0.425	0.425	

Tensione di verifica:			media	media
Massima tensione nell'armatura alla formazione della fessura	σ _s [MPa]	107.5	127.6	
Distanza massima tra le fessure (eq.7.11 di EN 1992-1-1)	s _{f,max} [mm]	319.3	322.8	
Differenza tra deformazione media dell'armatura e del cls	(ε _{sm} - ε _{cm})	0.036%	0.037%	
Ampiezza delle fessure	w _d [mm]	0.114	0.120	
Ampiezza delle fessure limite	w _{lim} [mm]	0.300	0.400	

VERIFICA DI RESISTENZA A TAGLIO

Per la verifica a taglio si fa riferimento al metodo di Clarke-Birjandi 1993:

	$\sin(\alpha) = 2r \cdot \alpha / \pi r$ con $(0 < \alpha < \pi/2)$	[-]	0.541
	$A_v = r^2 [n/2 + \alpha \sin(\alpha) \cos(\alpha)]$	[cm ²]	9351
	$d = r[1 + \sin(\alpha)]$	[cm]	92.5
	$w_v = A_v / d$	[cm]	101.1

Sollecitazioni di progetto		
Taglio sollecitante = max Taglio (SLU,SLV)	V _{Ed} [kN]	1777
Sforzo Normale concomitante al massimo taglio	N _{Ed} [kN]	0

Verifica di resistenza in assenza di armatura specifica		
Resistenza a taglio di progetto	V _{Rd1} [kN]	644
Coefficiente di sicurezza	V _{Rd1} /V _{Ed}	0.36

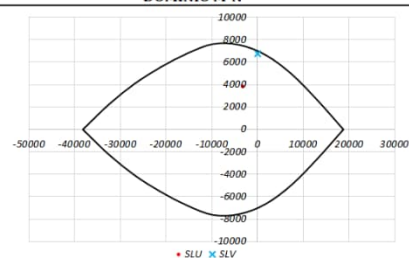
Verifica di resistenza dell'armatura specifica		
CoTan[θ] di progetto	cotani(θ)	2.5
Resistenza a taglio delle bielle compresse in cls	V _{Rd2} (θ) [kN]	2605
Resistenza a taglio dell'armatura	V _{Rd3} (θ) [kN]	2506
Resistenza a taglio di progetto	V _{Ed} [kN]	2506
Coefficiente di sicurezza	V _{Rd3} /V _{Ed}	1.41

VERIFICA DI RESISTENZA A PRESSO-FLESSIONE

Sollecitazioni di progetto		
Momento sollecitante	M _{Ed} [kNm]	3750
Sforzo Normale concomitante	N _{Ed} [kN]	-3003

Verifica di resistenza		
Momento resistente	M _{Rd} [kNm]	7474
Coefficiente di sicurezza	M _{Rd} /M _{Ed}	1.99

DOMINIO M-N



STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Spalla DX_Upper_MaxSoll_Gabbia2_liquef

INPUT

SOLLECITAZIONI DI VERIFICA

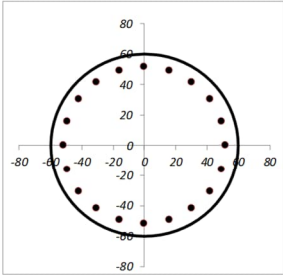
Combinazione	N _{Ed} [kN]	M _{Ed} [kNm]	V _{Ed} [kN]
SLE Quasi Permanente	0	0	0
SLE Frequente	0	0	0
SLE Rara	0	0	0
SLU	0	0	0
SLV	0	1965	378

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE IN C.A.

Geometria della sezione			
Diametro	D	120	[cm]
Copri ferro netto	c	6.0	[cm]
Area calcestruzzo	A _{cl}	11310	[cm ²]
Copri ferro baricentrico	c _{baric}	8.3	[cm]
Altezza utile della sezione	d	111.7	[cm]

Armatura longitudinale		1° STRATO	2° STRATO
Numero Barre	n _{bars} [-]	20	0
Diametro	Φ [mm]	30	32
Posizione dal lembo esterno	c _{baric} [cm]	8.3	0.0
Area strato	A _{sl} [cm ²]	141.37	0.00
Rapporto di armatura	ρ [%]	1.250%	
% minima di armatura	ρ _{min} [%]		0.40%

Armatura trasversale (spirale/staffe/spilli)		1° TIPO	2° TIPO	3° TIPO
Diametro	φ [mm]	8	0	0
Numero bracci	n _{bl}	2	0	0
Passo	s _v [cm]	15	0	0
Area armatura a metro per tipo	A _{sv} /s _v	6.70	0	0
Area armatura a metro totale	[cm ² /m]		6.70	



Disposizione delle barre nella sezione trasversale

Verifica Interassi e interferri		1° STRATO	2° STRATO
Interferro di progetto	[cm]	13.00	-
Interferro minimo	[cm]	6.00	-
Interasse di progetto	[cm]	16.00	-
Interasse massimo	[cm]	25.00	-

CARATTERISTICHE REOLOGICHE DEI MATERIALI

Calcestruzzo			
Resistenza cubica a compressione	R _{ck} [MPa]	37	
Resistenza cilindrica caratteristica a compressione	f _{ck} [MPa]	30	
Resistenza cilindrica media a compressione	f _{cm} [MPa]	38.00	
Resistenza media a trazione per flessione	f _{ctm} [MPa]	2.90	
Resistenza di progetto a compressione	f _{cd} [MPa]	17.00	
Modulo elastico calcestruzzo	E _{cm} [MPa]	32837	

Acciaio	Barre: ad Aderenza migliorata		
Resistenza caratteristica a snervamento	f _{yk} [MPa]	450	
Coefficiente parziale di sicurezza	γ _s	1.15	
Resistenza di progetto a snervamento	f _{td} [MPa]	391.3	
Modulo elastico	E	210000	

OUTPUT

VERIFICHE IN ESERCIZIO

Approccio di verifica: NTC18 / EC 2 - 2

Verifica Tensionale		σ limite
Calcestruzzo SLE Quasi Permanente	σ _c [MPa]	0.00
Calcestruzzo SLE Rara	σ _c [MPa]	0.00
Acciaio SLE Rara	σ _s [MPa]	0.1

Verifica di fessurazione		Quasi perm.	Frequente
Altezza efficace del calcestruzzo teso	h _{ceff} [cm]	-	-
Area efficace del calcestruzzo teso	A _{ceff} [cm ²]	-	-
	A _l [cm ²]	-	-
Rapporto dell'acciaio sull'area di calcestruzzo efficace	ρ _{peff} [%]	-	-
Fattore dipendente dalla durata del carico	k _t	0.4	0.6
Coefficiente funzione delle proprietà di aderenza dell'armatura	k ₁	0.8	0.8
Coefficiente funzione della distribuzione delle deformazioni	k ₂	1.0	1.0
Funzione dipendente dal copri ferro	k ₃	3.4	3.4
	k ₄	0.425	0.425
Tensione di verifica:		media	media
Massima tensione nell'armatura alla formazione della fessura	σ _s [MPa]	0.0	0.0
Distanza massima tra le fessure (eq.7.11 di EN 1992-1-1)	s _{r,max} [mm]	-	-
Differenza tra deformazione media dell'armatura e del cls	(ε _{sm} - ε _{cm})	-	-
Ampiezza delle fessure	w _d [mm]	0.000	0.000
Ampiezza delle fessure limite	w _{lim} [mm]	0.300	0.400

VERIFICA DI RESISTENZA A TAGLIO

Per la verifica a taglio si fa riferimento al metodo di Clarke-Birjandi 1993:			
	$\sin(\alpha) = 2r_v / \pi r$	$\cos(0 < \alpha < \pi/2)$	[-]
	$A_v = r^2 [\pi/2 + \alpha + \sin(\alpha)\cos(\alpha)]$		[cm ²]
	$d = r[1 + \sin(\alpha)]$		[cm]
	$b_w = A_v / d$		[cm]
			0.549
			9396
			929
			101.1

Sollecitazioni di progetto		
Taglio sollecitante = max Taglio (SLU,SLV)	V _{Ed} [kN]	378
Sforzo Normale concomitante al massimo taglio	N _{Ed} [kN]	0

Verifica di resistenza in assenza di armatura specifica		
Resistenza a taglio di progetto	V _{Rd1} [kN]	534
Coefficiente di sicurezza	V _{Rd1} /V _{Ed}	1.41

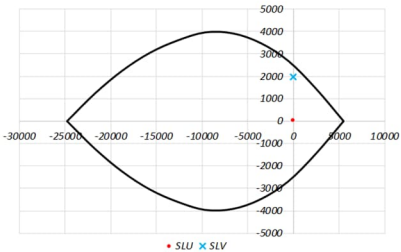
Verifica di resistenza dell'armatura specifica		
CoTan(θ) di progetto	cotan(θ)	2.5
Resistenza a taglio delle bielle compresse in cls	V _{Rd1} (θ) [kN]	2618
Resistenza a taglio dell'armatura	V _{Rd1} (θ) [kN]	548
Resistenza a taglio di progetto	V _{Rd} [kN]	548
Coefficiente di sicurezza	V _{Rd} /V _{Ed}	1.45

VERIFICA DI RESISTENZA A PRESSO-FLESSIONE

Sollecitazioni di progetto		SLU	SLV
Momento sollecitante	M _{Ed} [kNm]	0	1965
Sforzo Normale concomitante	N _{Ed} [kN]	0	0

Verifica di resistenza		SLU	SLV
Momento resistente	M _{Rd} [kNm]	2503	2503
Coefficiente di sicurezza	M _{Rd} /M _{Ed}	-	1.27

DOMINIO M-N



STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Spalla DX_Upper_MaxSoll_Gabbia3_liquef

INPUT

SOLLECITAZIONI DI VERIFICA

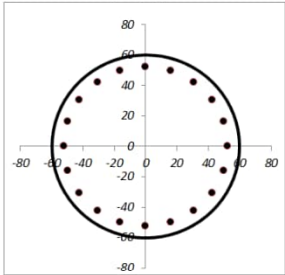
Combinazione	N _{Ed} [kN]	M _{Ed} [kNm]	V _{Ed} [kN]
SLE Quasi Permanente	0	0	0
SLE Frequente	0	0	0
SLE Rara	0	0	0
SLU	0	0	0
SLV	0	90	100

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE IN C.A.

Geometria della sezione			
Diametro	D	120	[cm]
Copriferro netto	c	6.0	[cm]
Area calcestruzzo	A _{da}	11310	[cm ²]
Copriferro baricentrico	c _{baric}	7.6	[cm]
Altezza utile della sezione	d	112.4	[cm]

Armatura longitudinale	1° STRATO	2° STRATO
Numero Barre	n_{barre} [-]	20 0
Diametro	Φ [mm]	16 32
Posizione dal lembo esterno	c_{base} [cm]	7.6 0.0
Area strato	A_R [cm ²]	40.21 0.00
Rapporto di armatura	ρ [%]	0.356%
% minima di armatura	ρ_{min} [%]	0.30%

Armatura trasversale (spirale/staffe/spilli)		1° TIPO	2° TIPO	3° TIPO
Diametro	ϕ [mm]	8	0	0
Numero bracci	n_{br}	2	0	0
Passo	S_w [cm]	15	0	0
Area armatura a metro per tipo	A_{tr}/S_w	6.70	0	0
Area armatura a metro totale	[cm ² /m]	6.70		



Verifica Interassi e interferri		1° STRATO	2° STRATO
Interferro di progetto	[cm]	15.00	-
Interferro minimo	[cm]	6.40	-
Interasse di progetto	[cm]	16.00	-
Interasse massimo	[cm]	20.00	

CARATTERISTICHE REOLOGICHE DEI MATERIALI

Calcestruzzo		
Resistenza cubica a compressione	R _{ck} [MPa]	37
Resistenza cilindrica caratteristica a compressione	f _{ck} [MPa]	30
Resistenza cilindrica media a compressione	f _{cm} [MPa]	38.00
Resistenza media a trazione per flessione	f _{ctm} [MPa]	2.90
Resistenza di progetto a compressione	f _{cd} [MPa]	17.00
Modulo elastico calcestruzzo	E _{cm} [MPa]	32837

Acciaio	Barre: ad Aderenza migliorata	
Resistenza caratteristica a snervamento	f_{yk} [Mpa]	450
Coefficiente parziale di sicurezza	γ_s	1.15
Resistenza di progetto a snervamento	f_{yd} [Mpa]	391.3
Modulo elastico	E [Mpa]	210000

OUTPUT

VERIFICHE IN ESERCIZIO

Approccio di verifica: NTC18 / EC 2 -2

Verifica Tensionale	σ _c [MPa]	σ _s [MPa]	σ limite
Calcestruzzo SLE Quasi Permanente	-0.01		< 13.50
Calcestruzzo SLE Rara	-0.01		< 18.00
Acciaio SLE Rara		0.2	< 360.00

Verifica di fessurazione		Quasi perm.	Frequente
Altezza efficace del calcestruzzo teso	h_{ceff} [cm]	-	-
Area efficace del calcestruzzo teso	A_{ceff} [cm ²]	-	-
	A_s [cm ²]	-	-
Rapporto dell'acciaio sull'area di calcestruzzo efficace	ρ_{peff} [%]	-	-
Fattore dipendente dalla durata del carico	k_c	0.4	0.6
Coefficiente funzione delle proprietà di aderenza dell'armatura	k_1	0.8	0.8
Coefficiente funzione della distribuzione delle deformazioni	k_2	1.0	1.0
Funzione dipendente dal copriferro	k_3	3.4	3.4
	k_4	0.425	0.425
Tensione di verifica:		media	media
Massima tensione nell'armatura alla formazione della fessura	σ_s [MPa]	0.0	0.0
Distanza massima tra le fessure (eq.7.11 di EN 1992-1-1)	$s_{r,\text{max}}$ [mm]	-	-
Differenza tra deformazione media dell'armatura e del cls	$(\epsilon_{\text{sm}} - \epsilon_{\text{cm}})$	-	-
Ampiezza delle fessure	w_d [mm]	0.000	0.000
Ampiezza delle fessure limite	w_{lim} [mm]	0.300	0.400

VERIFICA DI RESISTENZA A TAGLIO

Per la verifica a taglio si fa riferimento al metodo di Clarke-Birjandi 1993:			
	$\sin(\alpha) = 2r \sqrt{\pi r} \quad \text{con } (0 < \alpha < \pi/2)$	[-]	0.556
	$A_v = r^2 \left[\pi/2 + \alpha + \sin(\alpha) \cos(\alpha) \right]$	[cm ²]	9441
	$d = r[1 + \sin(\alpha)]$	[cm]	93.4
	$b_w = A_v/d$	[cm]	101.1

Sollecitazioni di progetto	V _{Ed} [kN]	N _{Ed} [kN]
Taglio sollecitante = max Taglio (SLU,SLV)	100	
Sforzo Normale concomitante al massimo taglio		0

Verifica di resistenza in assenza di armatura specifica	V _{Rd1} [kN]	V _{Rd1} /V _{Ed}
Resistenza a taglio di progetto	352	
Coefficiente di sicurezza		3.52

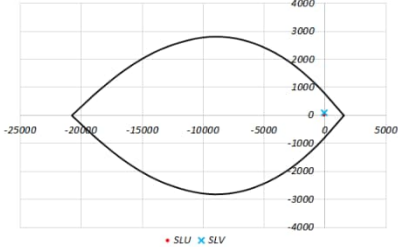
Verifica di resistenza dell'armatura specifica	cot(θ)	V _{Rd1} (θ) [kN]	V _{Rd1} (θ) [kN]	V _{Rd1} [kN]	V _{Rd1} /V _{Ed}
CoTan(θ) di progetto	2.5				
Resistenza a taglio delle bielle compresse in cls		2630			
Resistenza a taglio dell'armatura			551		
Resistenza a taglio di progetto				551	
Coefficiente di sicurezza					5.51

VERIFICA DI RESISTENZA A PRESSO-FLESSIONE

Sollecitazioni di progetto		SLU	SLV
Momento sollecitante	M _{Ed} [kNm]	0	90
Sforzo Normale concomitante	N _{Ed} [kN]	0	0

Verifica di resistenza		SLU	SLV
Momento resistente	M _{Rd} [kNm]	784	784
Coefficiente di sicurezza	M _{Rd} /M _{Ed}	-	8.72

DOMINIO M-N



STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

12.2 Spalla B (Lato SX)

12.2.1 Sollecitazioni provenienti dalla sovrastruttura

Le sollecitazioni sono le medesime della Spalla A (Lato DX), si rimanda alla Tabella 29 per i valori.

12.2.2 Ripartizione delle sollecitazioni sui pali

Partendo dalle sollecitazioni riportate nella tabella precedente e riferite al baricentro geometrico della fondazione, mediante la posizione geometrica dei pali e le formule descritte al §9.1, si ottengono le sollecitazioni agenti sui pali più carichi.

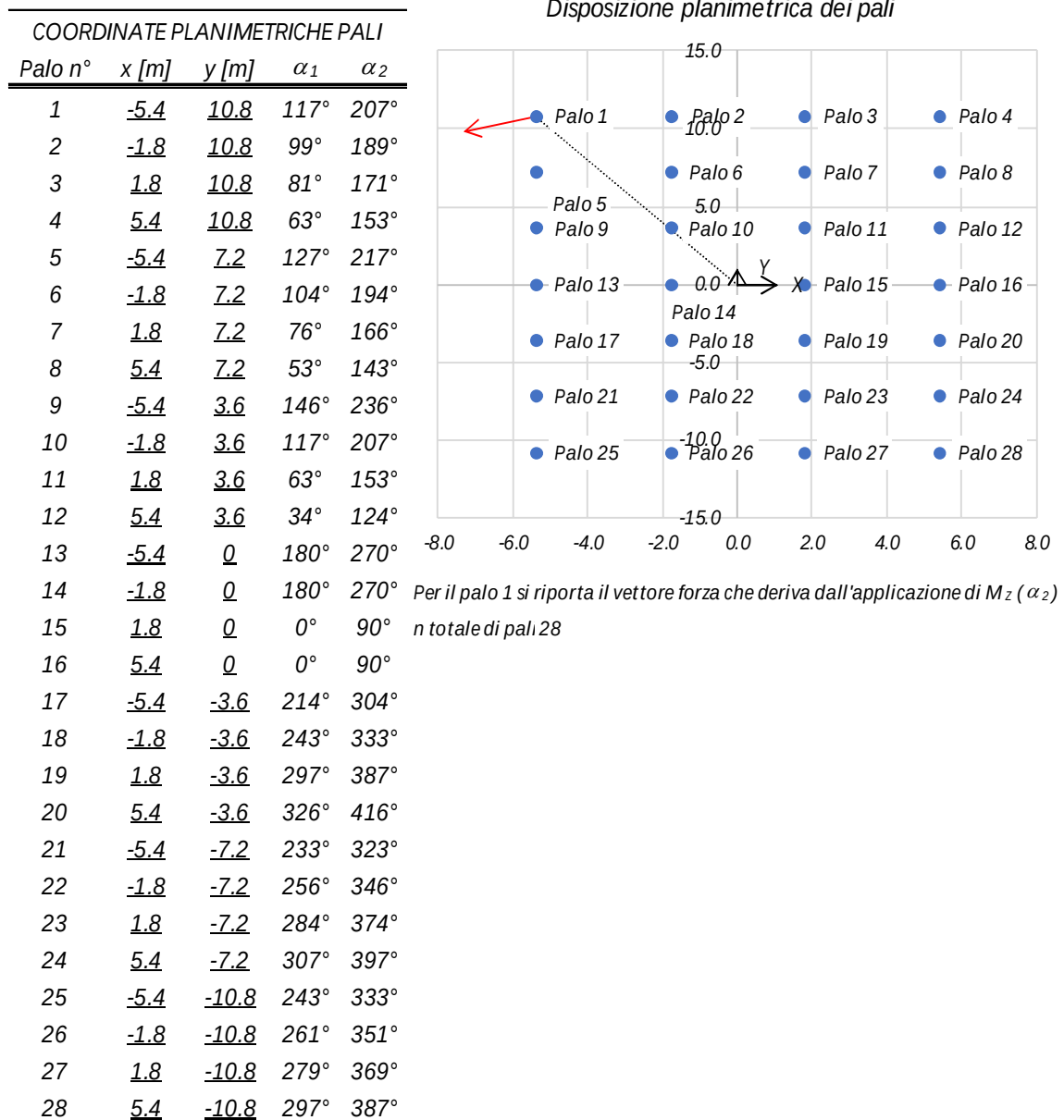


Figura 168: Distribuzione geometrica dei pali per la ripartizione dei carichi

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Per ogni combinazione di carico si riportano le massime sollecitazioni ottenute nel caso di:

- Massima compressione;
- Massima trazione (se presente);
- Massimo taglio.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Tabella 37: Coppia di sollecitazioni (N e V) massime in testa al palo

COMBINAZIONI DI CARICO		N_{Ed} [kN]	V_{Ed} [kN]	Sollecitazione
SLE QP	QP	-4498	604	Massima compressione
	QP	-2607	604	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	QP	-2607	604	Massimo taglio
SLE Frequente	FREQ2	-5033	671	Massima compressione
	FREQ2	-2471	671	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	FREQ2	-2471	671	Massimo taglio
SLE Rara	CARATT2	-5435	705	Massima compressione
	CARATT4	-2287	718	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	CARATT4	-2287	718	Massimo taglio
SLU	SLU8	-7426	971	Massima compressione
	SLU3	-2062	775	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	SLU10	-3003	995	Massimo taglio
SLV	Sisma_X2	-7057	1780	Massima compressione
	Sisma_X4	89	1777	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	Sisma_X2	-191	1780	Massimo taglio

Partendo dallo sforzo di taglio in testa al palo, è stato calcolato il momento flettente sul palo stesso secondo la teoria di Matlock e Reese descritta al §9.5.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Spalla SX

M

H

L

Kh

D

scala grafico

(kN/mc)

0

50000

100000

150000

-1

-6

-11

-16

-21

-26

-31

-36

-41

-46

(m)

strati terreno	descrizione	quote (m)	k _h (kN/m ³)	n _h (kN/m ³)
p.c.=strato 1	Rilevato esistente	0.0	8333	4000
✓ strato 2	Sabbia limosa	-3.0	18333	4000
✓ strato 3	Sabbia e ghiaia	-10.6	109167	10000
✓ strato 4	Limo argilloso	-11.6	26667	
✓ strato 5	Sabbia limosa	-18.5	70000	4000
✓ strato 6	Limo sabbioso	-20.7	40000	

Prof. testa palo

2.5 (m)

Diametro del palo

1.2 (m)

J palo

0.10179 (m⁴)

Lunghezza del palo

46 (m)

Forza orizzontale in testa

1780 (kN)

Momento in testa

0 (kNm)

E cls

31447 (Mpa)

dimensione elementi

0.2 (m)

☒ palo impedito di ruotare
☐ palo impedito di traslare
☐ palo libero

Calcolo

α_m

2.80 (m)

M₀ = α_m * H

Figura 169: Calcolo del coefficiente α_m

Pag. 172/211

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Le terne delle massime sollecitazioni in testa ai pali, calcolate per ogni combinazione, risultano essere le seguenti.

Tabella 38: Terna di sollecitazioni (N, V e M) massime in testa al palo

COMBINAZIONI DI CARICO		N_{Ed} [kN]	V_{Ed} [kN]	M_o [kNm]	Sollecitazione
SLE QP	QP	-4498	604	1692	Massima compressione
	QP	-2607	604	1692	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	QP	-2607	604	1692	Massimo taglio
SLE Frequente	FREQ2	-5033	671	1880	Massima compressione
	FREQ2	-2471	671	1880	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	FREQ2	-2471	671	1880	Massimo taglio
SLE Rara	CARATT2	-5435	705	1973	Massima compressione
	CARATT4	-2287	718	2010	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	CARATT4	-2287	718	2010	Massimo taglio
SLU	SLU8	-7426	971	2720	Massima compressione
	SLU3	-2062	775	2170	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	SLU10	-3003	995	2785	Massimo taglio
SLV	Sisma_X2	-7057	1780	4984	Massima compressione
	Sisma_X4	89	1777	4976	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	Sisma_X2	-191	1780	4984	Massimo taglio

12.2.3 Effetto gruppo

Come riportato al §13.1.7 di [24], per palificate in terreni coesivi l'efficienza risulta minore dell'unità. Per un gruppo costituito da m file di pali con n pali per ciascuna fila, si potrà adottare la formula empirica di Converse-Labarre:

$$E = 1 - \frac{\arctg(d/i) (m-1)n + (n-1)m}{\pi/2 \quad mn}$$

nella quale i rappresenta l'interasse tra i pali del gruppo.

Nel progetto, nonostante la presenza di terreni incoerenti, è stato conservativamente assunto un effetto gruppo pari a $E=0,8$.

12.2.4 Verifica a capacità portante

Nei paragrafi successivi si riportano le verifiche a capacità portante nei confronti dei carichi assiali.

Per una ottimizzazione della fondazione, si è seguito il seguente approccio, ampiamente utilizzato nel campo dell'ingegneria geotecnica:

- le verifiche sono state svolte nei confronti degli stati limite d'esercizio per il singolo palo, considerando un fattore pari almeno a 1,25 (§12.1.4.1);
- le verifiche allo stato limite ultimo (SLU e SLV) sono state eseguite rispetto l'intera palificata (§12.1.4.2).

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Nella verifica allo SLE è stata considerata la sola resistenza laterale del singolo palo, dal momento che la resistenza alla punta si considera mobilitata solo nei confronti dello SLU (per incompatibilità dei cedimenti SLE nei confronti dell'operatività della struttura).

È stata inoltre svolta la verifica a trazione, in questo specifico studio presente solo allo SLV, per verificare lo sfilamento (§12.1.4.1).

La stratigrafia e la quota falda adottate in questa verifica, e nelle successive, sono state definite in accordo alle informazioni geologiche e geotecniche disponibili alla data di redazione del seguente progetto.

12.2.4.1 Verifica a capacità portante del singolo palo

Di seguito si riporta il calcolo della capacità portante del singolo palo, considerando l'effetto gruppo tramite il coefficiente stimato nel paragrafo precedente.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

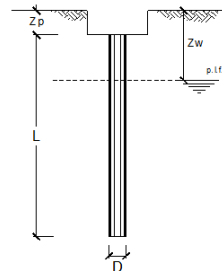
CALCOLO DELLA CAPACITA' PORTANTE DI UN PALO TRIVELLATO DI GRANDE DIAMETRO

ai sensi del D.M. 17/01/2018

OPERA: Spalla SX

Diametro del palo (D): 1.2 (m)
 Quota testa palo dal p.c. (z_p): 3.7 (m)
 Area del palo (A_p): 1.131 (m²)
 Quota della falda dal p.c. (z_w): 9.5 (m)
 Tecnica di scavo Bentonite

Scalzamento: 0 (m)



CARICO ASSIALE DI COMPRESSIONE SUL SINGOLO PALO:

§6.4.3.1 D.M. 17/01/2018

Approccio 2: (A1+M1+R3)

Carico assiale di compressione di progetto	N _d (SLU)	7426	(kN)
	N _d (SLV)	7057	(kN)
	N _d (SLE)	5435	(kN)
	N _d (SLD)		(kN)

CARICO ASSIALE DI TRAZIONE SUL SINGOLO PALO:

§6.4.3.1 D.M. 17/01/2018

Approccio 2: (A1+M1+R3)

Carico assiale di trazione di progetto	N _d (SLU)		(kN)
	N _d (SLV)	-89	(kN)

Numero di strati 10 $\frac{1}{10}$

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI

Strato	Stratigrafia		Spess. da p.c.	Unità geotecnica	Tipo di terreno	Parametri del terreno						
	da	a				γ	c'	φ'	c _u	c _{u,inc}	α	τ _{lim}
(-)	(m)	(m)	(m)	(-)	(-)	(kN/m ³)	(kPa)	(°)	(kPa)	(-)	(-)	(kPa)
1	0.00	6.70	6.70	Rilevato esistente	Sabbie	19	3	30			0	150
2	6.70	15.30	8.60	Sabbia limosa	Sabbie limose	19	3	32			0	150
3	15.30	22.20	6.90	Limo argilloso	Coesivo	19			70		0.6	100
4	22.20	23.80	1.60	Sabbia limosa	Sabbie limose	19	3	32			0	150
5	23.80	29.30	5.50	Limo sabbioso	Coesivo	19			110		0.4	100
6	29.30	31.30	2.00	Sabbia limosa	Sabbie limose	19	3	32			0	150
7	31.30	32.60	1.30	Limo argilloso	Coesivo	19			140		0.4	100
8	32.60	41.50	8.90	Sabbia limosa	Sabbie limose	19	5	34			0	150
9	41.50	45.50	4.00	Limo argilloso	Coesivo	19			200		0.4	100
10	45.50	60.00	14.50	Sabbia limosa	Sabbie limose	19	5	34			0	150

Fattori di correlazione per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali indagate

Numero di verticali indagate	1	2	3	4	5	7	>= 10
ξ ₃	1.70	1.65	1.60	1.55	1.50	1.45	1.40
ξ ₄	1.70	1.55	1.48	1.42	1.34	1.28	1.21

n°2 verticali

Lunghezza del palo (L _p):	46	(m)
Peso del palo (P _p):	846	(kN)
Profondità punta palo:	49.7	(m)

Strato	Spess. Strati _{pal}	distanza punta palo-strato successivo
(-)	(m)	(m)
1	3.00	0.00
2	8.60	0.00
3	6.90	0.00
4	1.60	0.00
5	5.50	0.00
6	2.00	0.00
7	1.30	0.00
8	8.90	0.00
9	4.00	0.00
10	4.20	10.30

ok, superiore a 3D

CAPACITA' PORTANTE CARATTERISTICA

Resistenza alla base:	R _b =	3891	(kN)
Resistenza laterale:	R _s =	11468	(kN)
Resistenza totale:	R _t = R _b + R _s =	15358	(kN)

CAPACITA' PORTANTE DI PROGETTO A COMPRESSIONE

Approccio 2: (A1+M1+R3) §6.4.3.1 D.M. 17/01/2018

Resistenza alla base:	R _{b,c} =	1747	(kN)
Resistenza laterale:	R _{s,c} =	6044	(kN)
Resistenza compr.:	R _{d,c} = R _{b,c} + R _{s,c} =	7790	(kN)

CAPACITA' PORTANTE DI PROGETTO A TRAZIONE

Approccio 2: (A1+M1+R3) §6.4.3.1 D.M. 17/01/2018

Resistenza laterale:	R _{s,t} =	-5560	(kN)
Resistenza traz.:	R _{d,t} = R _{s,t} =	-5560	(kN)

VERIFICA A COMPRESSIONE

	N _c (kN)	R _{s,c} (kN)	FS (-)
SLE	6281	11468	1.83
SLD			-

R_{s,d}/N_c ≥ 1.25

VERIFICA A TRAZIONE

	N _{d,t} (kN)	R _{d,t} (kN)	FS (-)
SLU - (A1+M1+R3)			-
SLV - (EQK+M1+R3)	-89	-5560	10.23

R_{d,t}/N_{d,t} ≥ 1

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

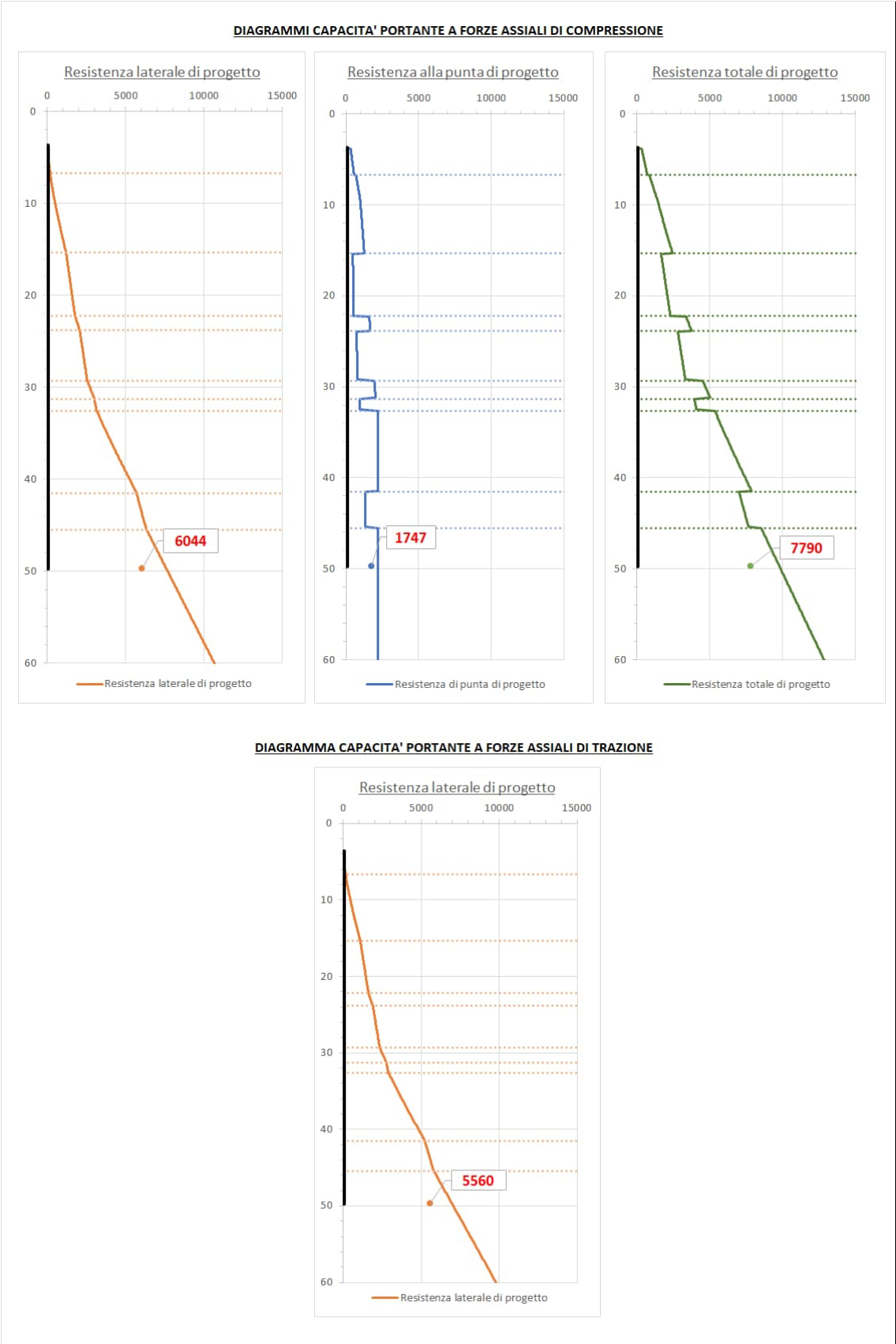


Figura 170: Calcolo della capacità portante del singolo palo (grafici)

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Nei grafici precedenti è possibile evidenziare l'apporto dell'effetto gruppo:

- o i punti rappresentano il valore della resistenza al piede del palo;
- o le curve rappresentano l'andamento della resistenza lungo il palo;

Solamente i valori delle resistenze al piede sono stati moltiplicati per il coefficiente 0,8; la differenza in ascissa tra il punto e la curva rappresenta quindi il delta di differenza fra la resistenza considerando l'effetto gruppo unitario e la resistenza considerando invece l'effetto gruppo pari a 0,8.

12.2.4.2 Calcolo dei domini di interazione della palificata

Nel presente capitolo si riporta il dimensionamento dei pali di fondazione effettuato con il metodo dei domini di interazione descritto al §9.3.1. La figura seguente riporta solamente la verifica della combinazione più sfavorevole. Per tutti i FS relativi a tutte le combinazioni, si rimanda alla Tabella 39.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

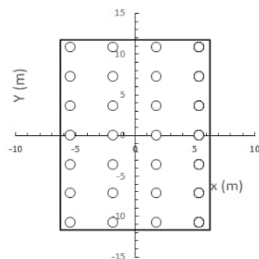

Lingua **IT**

CALCOLO DEL DOMINIO D'INTERAZIONE DELLA PALIFICATA

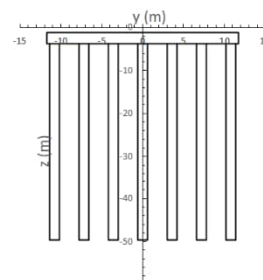
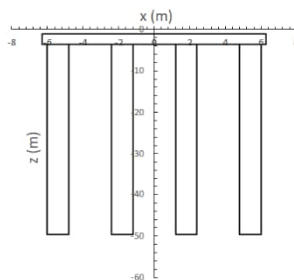
GEOMETRIA DELLA PALIFICATA

Definire la geometria della palificata automaticamente?

Numero Pali (massimo 100 pali)
 Diametro pali
 File in direzione x (massimo 10 file)
 File in direzione y (massimo 10 file)
 Interasse in direzione x
 Interasse in direzione y
 Distanza del palo dal bordo del soletto
 Spessore del soletto
 Lunghezza pali
 Distanza tra la testa del palo e il p.c. (+ fuori terra / - fondazione interrata)



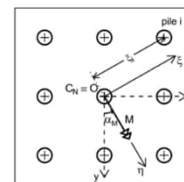
	SI	Compilare le celle che seguono
N	28	(-)
D	1.20	(m)
m	4	(m)
n	7	(m)
l _a	3.60	(m)
l _b	3.60	(m)
f	0.90	(m)
s	2.50	(m)
L	46.00	(m)
e	-3.70	(m)


Input
Output

CARICHI AGENTI SULLA PALIFICATA

Carico verticale di progetto
 Momento di progetto (ruota attorno all'asse x)
 Momento di progetto (ruota attorno all'asse y)
 Momento risultante di progetto
 Inclinazione del vettore momento risultante rispetto (x,y)

N _{Ed}	147304.88	(kN)
M _{Ed,x}	39772.35	(kN m)
M _{Ed,y}	157015.35	(kN m)
M _{Ed}	161974.26	(kN m)
α _M	14.21	(°)



CAPACITA' PORTANTE E MOMENTO RESISTENTE DEL PALO SINGOLO

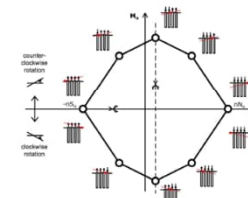
Capacita' portante di progetto a compressione del palo singolo
 Capacita' portante di progetto a trazione del palo singolo
 Momento resistente di progetto del palo singolo soggetto a compressione
 Momento resistente di progetto del palo singolo soggetto a trazione

N _{U,Rd}	6652.52	(kN)
S _{U,Rd}	6402.58	(kN)
M _{Ed,c}	0.00	(kN m)
M _{Ed,t}	0.00	(kN m)

METODO DI Laora et al. (2019)

Carico verticale ultimo della palificata rispetto ad un cinetismo
 con rotazione rispetto al punto i-esimo
 Capacita' portante di progetto a compressione del j-esimo palo
 Capacita' portante di progetto a trazione del j-esimo palo
 Momento ultimo della palificata rispetto ad un cinetismo
 con rotazione rispetto al punto i-esimo
 Momento resistente di progetto del palo j-esimo soggetto a compressione
 Momento resistente di progetto del palo j-esimo soggetto a trazione
 Coordinata x' rispetto al sistema di riferimento (x', h) del palo j-esimo
 Punti di rotazione (anti-oraria) dei cinetismi
 Punti di rotazione (oraria) dei cinetismi
 Numero di pali della palificata

$$\begin{aligned}
 &N_{U,i} \\
 &N_{U,j} \\
 &S_{U,j} \\
 &M_{U,i} \\
 &M_{U,j} \\
 &M_{U,k} \\
 &z_{ij} \\
 &i \\
 &k \\
 &p
 \end{aligned}
 \begin{cases}
 V_{c,i} = \sum_{j=1}^{p-1} (N_{U,j}) - \sum_{j=1}^{p-1} (S_{U,j}) \\
 M_{c,i} = \sum_{j=1}^{p-1} (M_{U,j}) - N_{U,i} \xi_i + \sum_{j=1}^{p-1} (M_{U,j} + S_{U,j} \xi_j) \\
 \text{con } i = 1, \dots, p+1.
 \end{cases}
 \begin{cases}
 V_{c,k} = \sum_{j=k}^p (N_{U,j}) - \sum_{j=k}^{p-1} (S_{U,j}) \\
 M_{c,k} = \sum_{j=k}^p (S_{U,j} \xi_j - M_{U,j}) - \sum_{j=k}^p (M_{U,j} + N_{U,j} \xi_j) \\
 \text{con } i = 1, \dots, p+1.
 \end{cases}$$



VERIFICA A CAPACITA' PORTANTE DELLA PALIFICATA

Carico verticale di progetto
 Momento risultante di progetto

Calcolo del dominio di interazione della palificata

Punto di massima Trazione (i min)
 Punto di massima Compressione (i max)
 Definire il punto (N_U, M_U) rispetto al quale si vuole eseguire la verifica
 Definire rispetto a quale condizione si vuole eseguire la verifica
 Carico verticale ultimo della palificata
 Momento ultimo della palificata
 Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_{Ed}, M_U)
 Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_U, M_{Ed})
 Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_U, M_U)

N _{Ed}	147304.88	(kN)
M _{Ed}	161974.26	(kN m)
RUN		
i _{min}	1	(-)
i _{max}	289	(-)
i	(N _{Ed} , M _U)	(-)
N _U	162534.12	(kN)
M _U	177758.26	(kN m)
M _U /M _{Ed}	1.097	(-)
N _U /N _{Ed}	-	(-)
(N _U , M _U)/(N _{Ed} , M _{Ed})	-	(-)

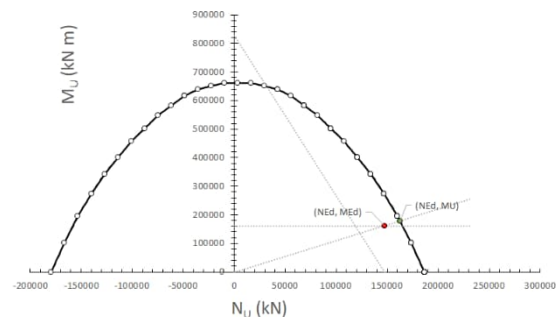


Figura 171: Dominio di interazione più sfavorevole dell'intera palificata – Combinazione SLU_8

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00


Lingua **IT**

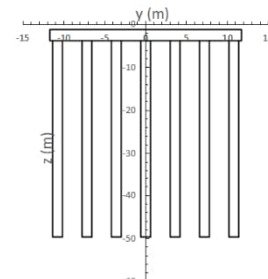
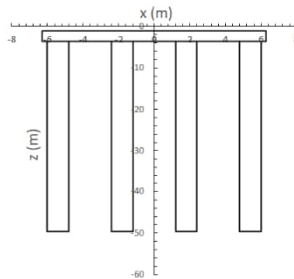
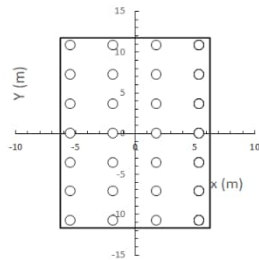
CALCOLO DEL DOMINIO D'INTERAZIONE DELLA PALIFICATA

GEOMETRIA DELLA PALIFICATA

Definire la geometria della palificata automaticamente?

Numero Pali (massimo 100 pali)
 Diametro pali
 File in direzione x (massimo 10 file)
 File in direzione y (massimo 10 file)
 Interasse in direzione x
 Interasse in direzione y
 Distanza del palo dal bordo del soletto
 Spessore del soletto
 Lunghezza pali
 Distanza tra la testa del palo e il p.c. (+ fuori terra / - fondazione interrata)

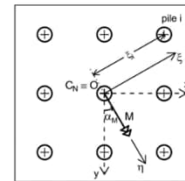
	SI	Compilare le celle che seguono
N	28	(-)
D	1.20	(m)
m	4	(m)
n	7	(m)
l _a	3.60	(m)
l _b	3.60	(m)
f	0.90	(m)
s	2.50	(m)
L	46.00	(m)
e	-3.70	(m)

Input
Output


CARICHI AGENTI SULLA PALIFICATA

Carico verticale di progetto
 Momento di progetto (ruota attorno all'asse x)
 Momento di progetto (ruota attorno all'asse y)
 Momento risultante di progetto
 Inclinazione del vettore momento risultante rispetto (x,y)

N _{Ed}	101464.61	(kN)
M _{Ed,x}	38078.73	(kN m)
M _{Ed,y}	264564.49	(kN m)
M _{Ed}	267290.77	(kN m)
α _M	8.19	(°)



CAPACITA' PORTANTE E MOMENTO RESISTENTE DEL PALO SINGOLO

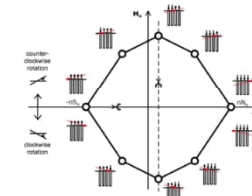
Capacita' portante di progetto a compressione del palo singolo
 Capacita' portante di progetto a trazione del palo singolo
 Momento resistente di progetto del palo singolo soggetto a compressione
 Momento resistente di progetto del palo singolo soggetto a trazione

N _{U,Rd}	6947.42	(kN)
S _{U,Rd}	6402.58	(kN)
M _{Ed,c}	0.00	(kN m)
M _{Ed,t}	0.00	(kN m)

METODO DI Laora et al. (2019)

Carico verticale ultimo della palificata rispetto ad un cinetismo con rotazione rispetto al punto i-esimo
 Capacita' portante di progetto a compressione del j-esimo palo
 Capacita' portante di progetto a trazione del j-esimo palo
 Momento ultimo della palificata rispetto ad un cinetismo con rotazione rispetto al punto i-esimo
 Momento resistente di progetto del palo j-esimo soggetto a compressione
 Momento resistente di progetto del palo j-esimo soggetto a trazione
 Coordinata x' rispetto al sistema di riferimento (x', h) del palo j-esimo
 Punti di rotazione (anti-oraria) dei cinetismi
 Punti di rotazione (oraria) dei cinetismi
 Numero di pali della palificata

$$\begin{aligned}
 &V_{i,j} = \sum_{j=1}^{n-1} (N_{u,j}) - \sum_{j=1}^{n-1} (S_{u,j}) \\
 &M_{i,j} = \sum_{j=1}^{n-1} (M_{p,j}) + \sum_{j=1}^{n-1} (M_{p,j} + S_{u,j} \xi_j) \\
 &\text{con } i = 1, \dots, p+1. \\
 &V_{c,j} = \sum_{j=1}^p (N_{u,j}) - \sum_{j=1}^p (S_{u,j}) \\
 &M_{c,j} = \sum_{j=1}^p (S_{u,j} \xi_j) - \sum_{j=1}^p (M_{p,j}) - \sum_{j=1}^p (M_{p,j} + N_{u,j} \xi_j) \\
 &\text{con } i = 1, \dots, p+1.
 \end{aligned}$$



VERIFICA A CAPACITA' PORTANTE DELLA PALIFICATA

Carico verticale di progetto
 Momento risultante di progetto

Calcolo del dominio di interazione della palificata

Punto di massima Trazione (i min)
 Punto di massima Compressione (i max)
 Definire il punto (N_u, M_u) rispetto al quale si vuole eseguire la verifica
 Definire rispetto a quale condizione si vuole eseguire la verifica
 Carico verticale ultimo della palificata
 Momento ultimo della palificata
 Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_{Ed}, M_u)
 Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_u, M_{Ed})
 Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_u, M_u)

N _{Ed}	101464.61	(kN)
M _{Ed}	267290.77	(kN m)
	RUN	
i _{min}	1	(-)
i _{max}	309	(-)
i	260	(-)
	(N _{Ed} , M _u)	(-)
N _u	135059.71	(kN)
M _u	355820.91	(kN m)
M _u /M _{Ed}	1.331	(-)
N _u /N _{Ed}	-	(-)
(N _u , M _u)/(N _{Ed} , M _{Ed})	-	(-)

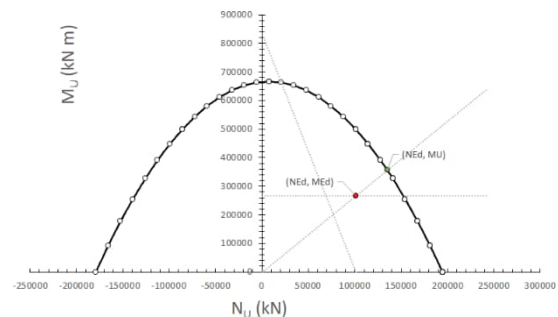


Figura 172: Dominio di interazione più sfavorevole dell'intera palificata – Combinazione SISMA_X2

Il calcolo con il metodo dei domini di interazione è stato effettuato per tutte le combinazioni SLU ed SLV permutate. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei FS della palificata ottenuti mediante il metodo dei domini:

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandatara) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Tabella 39: FS per ogni combinazione di calcolo

TYPE	PROG	COMB	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ	MU/MEd
-	-	-	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	-
SLU	513	SLU1	19016.1	537.0	-104443.1	26899.7	106868.5	886.6	1.61
SLU	514	SLU3	21537.2	577.5	-111965.9	44950.5	134628.1	953.5	1.47
SLU	515	SLU7	23735.1	537.0	-139260.4	26899.7	123393.1	886.6	1.17
SLU	516	SLU8	27084.6	423.0	-147304.9	39772.4	157015.4	698.4	1.10
SLU	517	SLU9	26256.2	577.5	-146783.3	44950.5	151152.7	953.5	1.12
SLU	518	SLU10	27720.2	487.5	-144797.3	33030.0	161489.0	804.9	1.12
SLU	519	SLU11	27135.2	409.5	-145229.3	33755.4	156117.4	676.1	1.12
SLU	520	SLU12	26244.2	409.5	-144797.3	33755.4	147762.2	676.1	1.14
SLV	521	Sisma_X1	48812.0	-5125.3	-101464.6	36869.7	-262332.5	3284.6	1.34
SLV	522	Sisma_X2	49052.0	5255.3	-101464.6	-38078.7	-264564.5	-3070.0	1.33
SLV	523	Sisma_X3	48728.0	-5125.3	-96958.2	36869.7	-272333.5	3284.6	1.40
SLV	524	Sisma_X4	48968.0	5255.3	-96958.2	-38078.7	-274565.5	-3070.0	1.39
SLV	525	Sisma_Y1	26603.5	-17235.9	-101651.3	124309.6	-131428.0	10698.4	1.67
SLV	526	Sisma_Y2	27403.5	17365.9	-101651.3	-125518.6	-138868.0	-10483.8	1.60
SLV	527	Sisma_Y3	26519.5	-17235.9	-97144.8	124309.6	-141429.0	10698.4	1.69
SLV	528	Sisma_Y4	27319.5	17365.9	-97144.8	-125518.6	-148869.0	-10483.8	1.62
SLV	529	Sisma_Z1	26981.5	-5125.3	-106908.8	36869.7	-122364.1	3284.6	1.55
SLV	530	Sisma_Z2	27221.5	5255.3	-106908.8	-38078.7	-124596.1	-3070.0	1.60
SLV	531	Sisma_Z3	26701.5	-5125.3	-91887.3	36869.7	-155700.9	3284.6	1.68
SLV	532	Sisma_Z4	26941.5	5255.3	-91887.3	-38078.7	-157932.9	-3070.0	1.71

Per una miglior chiarezza espositiva si riportano nella seguente tabella solamente i FS minimi della palificata:

Tabella 40: FS minimi della palificata

Combinazione	SLU	SLV
FS	1,10	1,33

12.2.5 Verifiche a carico limite orizzontale dei pali

Il carico limite dei pali sottoposti all'azione di una forza orizzontale applicata in testa viene calcolato secondo la teoria sviluppata da Broms per terreni coesivi ed incoerenti descritta al 9.4.1.1. Di seguito si riportano i risultati.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

H₀. Broms
A1+M1+R3
 γ_R **1.3** Resistenza globale
 ξ_3 **1.65** Verticali di indagine
 η **0.8** Efficienza palificata

Opera: Spalla mobile

Stratigrafia da testa palo

Unità	Nome	Tipo	γ kN/mc	c' kPa	ϕ °	K _p	C _u
1	Rilevato esistente	Incoerente	18	3	30	3.00	
2	Sabbia limosa	Incoerente	19	3	32	3.25	
3	Limo argilloso	Coesivo	19			1.00	80
4	Sabbia limosa	Incoerente	19	3	32	3.25	
5	Limo sabbioso	Coesivo	19			1.00	120
6	Sabbia limosa	Incoerente	19	3	32	3.25	
7	Limo argilloso	Coesivo	19			1.00	120
8	Sabbia limosa	Incoerente	19	5	34	3.54	

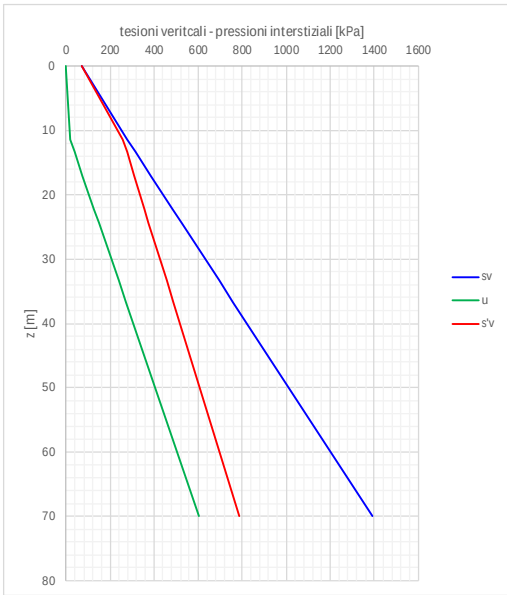
d _{palo}	1.2	m
L _{palo}	46	m
Z _{testa palo}	3.7	m
Z _{co}	9.5	m
$\gamma_{interra}$	19.5	kN/mc
q (tensione totale a testa palo)	72.15	kPa

Per Broms modificato: possibilità di tener conto di un sovraccarico di monte

M _{Ed}	7474	kNm
T _{Ed}	995	kN

Stratigrafia da testa palo

Unità	Nome	Z _{u,i} m	spessore m	s _v kPa	u kPa	s' _v kPa	p kN/m
1	Rilevato esistente	0	11.4	72.15	0	72.15	779
		11.4		277	19	258	2790
		11.4		277	19	258	2790
		11.4		277.35	19	258.35	2790
2	Sabbia limosa	11.4	2	277.35	19	258.35	3027
		13.4		315.35	39	276.35	3238
3	Limo argilloso	13.4	3.7	315.35	39	276.35	864
		17.1		385.65	76	309.65	864
4	Sabbia limosa	17.1	5.2	385.65	76	309.65	3628
		22.3		484.45	128	356.45	4176
5	Limo sabbioso	22.3	2.1	484.45	128	356.45	1296
		24.4		524.35	149	375.35	1296
6	Sabbia limosa	24.4	9	524.35	149	375.35	4398
		33.4		695.35	239	456.35	5347
7	Limo argilloso	33.4	3.3	695.35	239	456.35	1296
		36.7		758.05	272	486.05	1296
8	Sabbia limosa	36.7	33.3	758.05	272	486.05	6189
		70		1390.75	605	785.75	10005



Meccanismo	T _{MAX} kN	M _{MAX} kNm	a(*) m	f(**) m
Palo Corto	150969	4361919	-	-
Palo intermedio	47170	611513	37.73	-
Palo lungo	5725	7474	-	4.65

(*) a = profondità punto di rotazione

(**) f = profondità formazione seconda cerniera plastica

Resistenza di progetto	T _{Rd,s} [kN]	5725	Resistenza caratteristica palo singolo
	T _{Rd,s} [kN]	2669	Resistenza di progetto palo singolo
	T _{Rd,g} [kN]	2135	Resistenza di progetto palificata

Verifica	T _{Ed} [kN]	995	OK
	T _{Rd} [kN]	2135	
	FS	2.15	

Figura 173: Risultati della verifica a carico limite orizzontale

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

12.2.6 Verifiche strutturali dei pali

La verifica strutturale viene effettuata nel caso di:

- Massima compressione del palo;
- Massima trazione del palo (se presente);
- Massimo momento flettente;

per tutte le porzioni del palo.

Si riportano di seguito i diagrammi delle sollecitazioni agenti e resistenti lungo il fusto del palo per ogni combinazione analizzata.

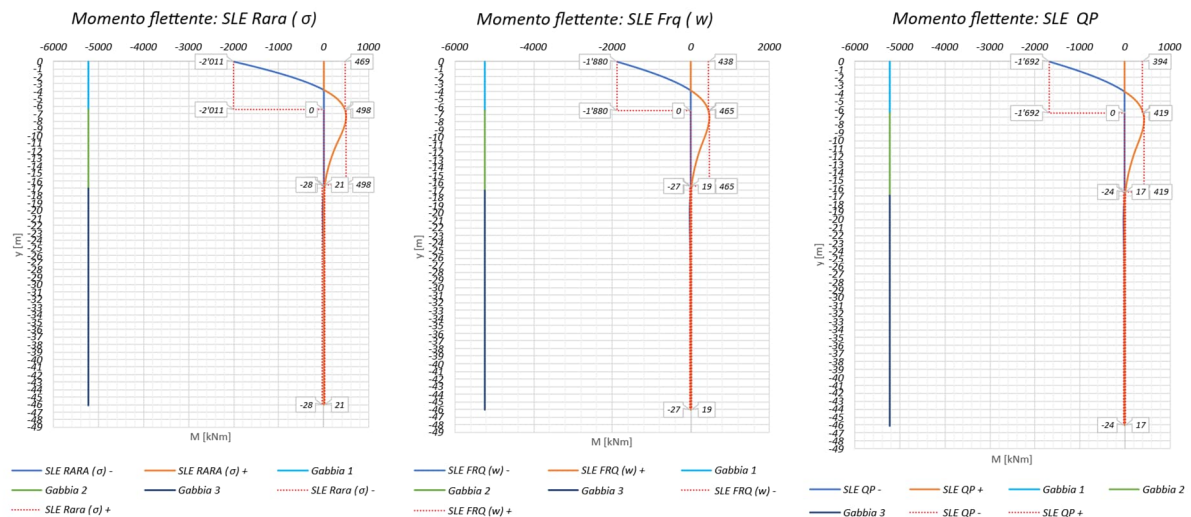


Figura 174: Diagrammi di momento flettente agente per le diverse combinazioni SLE

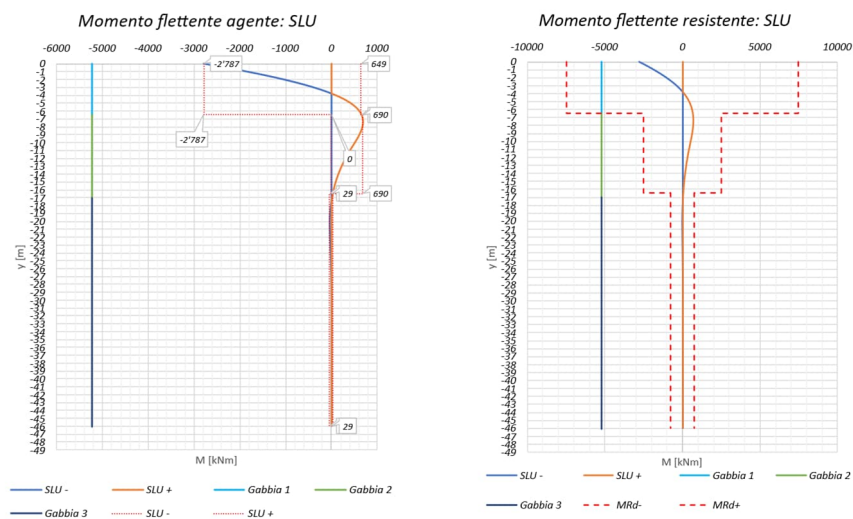


Figura 175: Diagrammi di momento flettente agente e resistente per le diverse combinazioni SLU

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

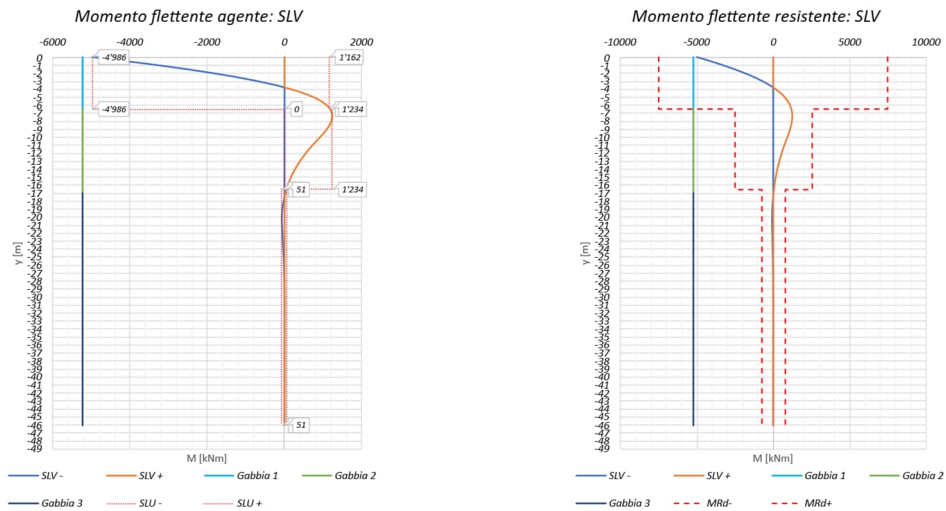


Figura 176: Diagrammi di momento flettente agente e resistente per le diverse combinazioni SLV

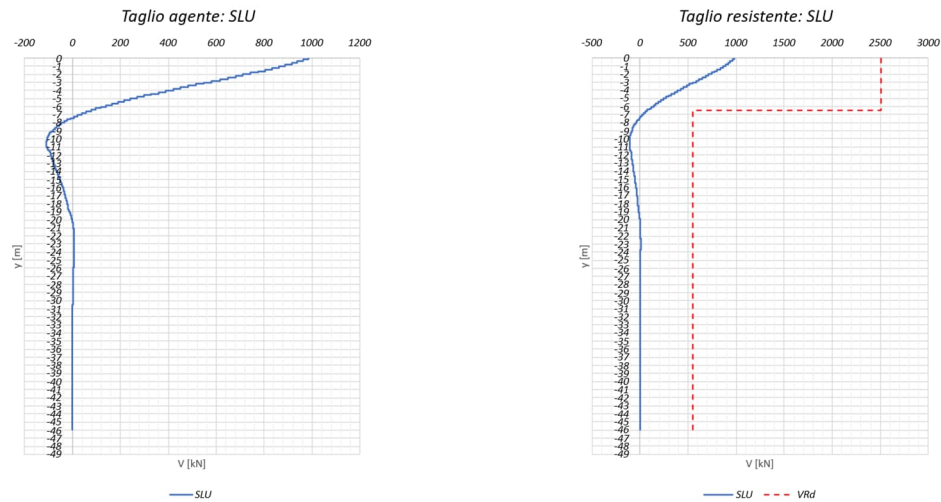


Figura 177: Diagrammi di taglio agente e resistente per le diverse combinazioni SLU

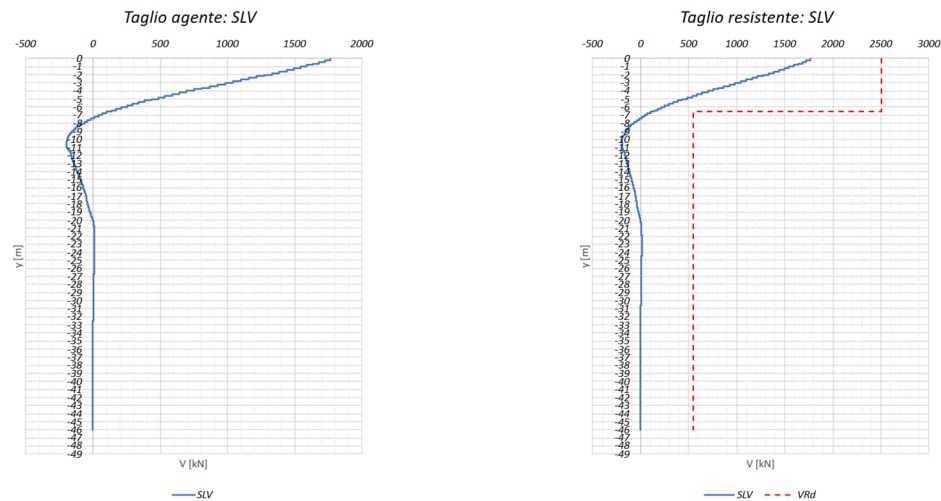


Figura 178: Diagrammi di taglio agente e resistente per le diverse combinazioni SLV

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Tabella 41: Sollecitazioni flettenti e di verifica allo SLU e SLV

Momento flettente agente: Lato monte						Momento flettente agente: Lato scavo				
SLE RARA (σ) -	SLE FRQ (w) -	SLE QP -	SLU -	SLV -		SLE RARA (σ) +	SLE FRQ (w) +	SLE QP +	SLU +	SLV +
-2011	-1880	-1692	-2787	-4986	Porzione 1	469	438	394	649	1162
0	0	0	0	0	Porzione 2	498	465	419	690	1234
-28	-27	-24	-39	-71	Porzione 3	21	19	17	29	51

In accordo al §9.7 si prevede all'interno del palo l'armatura seguente:

Tabella 42: Armatura adottata nel palo

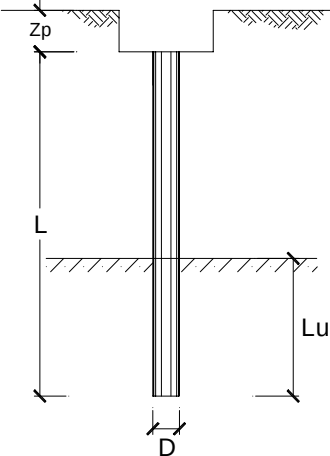
Quota	D	L	A _s	A _w
[-]	[m]	[m]	[mm]	[mm]
Primi 10D da testa palo	1,2	6,5	2X20 Φ 32+20 Φ 32	Spirale Φ 14/100
		10,5	20 Φ 30	
Oltre i 10D da testa palo		29	20 Φ 16	Spirale Φ 8/150

Poiché le terne di sollecitazioni risultano comparabili a quelle della Spalla A – lato destro, le verifiche strutturali della Spalla B si assumono coincidenti con quelle riportate al §12.1.6, riferite alla Spalla A.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

12.2.7 Verifica dei cedimenti

Di seguito si riporta il calcolo dei cedimenti del palo singolo e della palificata.

CALCOLO DEL PALO SINGOLO E DELLA PALIFICATA						
OPERA: Spalla A - Sud						
DATI DI INPUT:	Fine costr.		Esercizio			
	SLE-QP		SLE-RAR			
Diametro del Palo (D):	1.2	(m)	1.2	(m)		
Carico sul palo (P):	4498.0	(kN)	5435.0	(kN)		
Lunghezza del Palo (L):	46.0	(m)	46.0	(m)		
Lunghezza Utile del Palo (Lu):	46.0	(m)	46.0	(m)		
Peso del Palo (P _{palo}): $\pi \cdot (D^2 / 4) \cdot L \cdot \gamma_{palo}$	1300.6	(kN)	1300.6	(kN)		
Carico base palo (P _{base}): $P + P_{palo}$	5798.6	(kN)	6735.6	(kN)		
Modulo di Deformazione (E _m):	80.0	(MPa)	80.0	(MPa)		
Numero di pali della Palificata (n):	28.0	(-)	28.0	(-)		
Spaziatura dei pali (s):	3.6	(m)	3.6	(m)		
CEDIMENTO DEL PALO SINGOLO:						
$\delta = (\beta \cdot P) / (E_m \cdot L_{utile})$ Poulos & Davis (1968)						
	SLE-QP		SLE-RAR		$\Delta \delta = 0.5 \text{ (mm)}$	
Coefficiente di forma $\beta = 0,5 + \text{Log}(L_{utile} / D)$:	2.08	(-)	2.08	(-)		
Cedimento del palo $\delta = (\beta \cdot P) / (E_m \cdot L_{utile})$	$\delta =$	3.3	(mm)	3.8		
				(mm)		
CEDIMENTO DELLA PALIFICATA:						
$\delta_p = R_s \cdot \delta = n \cdot R_g \cdot \delta$ Poulos & Davis (1981)						
	SLE-QP		SLE-RAR		$\Delta \delta_p = 5.9 \text{ (mm)}$	
Coefficiente di Gruppo $R = (n \cdot s / L)^{0,5}$ Randolph (1994)	R =	1.48	(-)	1.48		
$R_g = 0,5 / R + 0,13 / R^2$ Mandolini et al. (1997)	R _g =	0.40	(-)	0.40		
Cedimento della palificata $\delta_p = R_s \cdot \delta = n \cdot R_g \cdot \delta$		36.5	(mm)	42.4		

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

12.2.8 Verifiche in condizioni di Liquefazione

Le sollecitazioni provenienti dalla sovrastruttura, come già riportato ai capitoli precedenti, sono riferite al baricentro della fondazione alla quota di testa dei pali (intradosso plinto). Da queste, la procedura per le verifiche in presenza di liquefazione si è svolta come segue:

- Per le verifiche geotecniche e strutturali, partendo sempre da tali valori, vengono calcolate le sollecitazioni considerando i parametri residui riportati al 9.8.4. I valori di taglio e sforzo assiale rimangono gli stessi.

12.2.8.1 *Calcolo momento adimensionale*

Secondo la teoria di Matlock e Reese descritta precedentemente, è stato calcolato il momento adimensionale del palo in accordo alla nuova configurazione stratigrafica che prevede l'utilizzo dei parametri residui per i terreni soggetti a liquefazione.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Spalla SX

scala grafico

strati terreno	descrizione	quote (m)	kh (kN/m³)	nh (kN/m³)
p.c.=strato 1	Rilevato esistente	0.0	5000	
✓ strato 2	Sabbia limosa	-3.0	7000	
✓ strato 3	Sabbia e ghiaia	-10.6	28000	
✓ strato 4	Limo argilloso	-11.6	26667	
✓ strato 5	Sabbia limosa	-18.5	70000	4000
✓ strato 6	Limo sabbioso	-20.7	40000	

Prof. testa palo 2.5 (m)

Diametro del palo 1.2 (m)

J palo 0.10179 (m⁴)

Lunghezza del palo 46 (m)

Forza orizzontale in testa 1790 (kN)

Momento in testa 0 (kNm)

E cls 31447 (Mpa)

dimensione elementi 0.2 (m)

☒ palo impedito di ruotare

☐ palo impedito di traslare

☐ palo libero

Calcolo

α_m 3.44 (m)

$M_0 = \alpha_m \cdot H$

Figura 179: Calcolo del coefficiente α_m

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

12.2.8.2 Ripartizione delle sollecitazioni sui pali

Le terne delle massime sollecitazioni in testa ai pali, per la combinazione SLV, risultano essere le seguenti:

Tabella 43: Terne di sollecitazioni (N, V e M) massime in testa al palo

SLV	Sisma_X2	-7057	1780	6124	Massima compressione
	Sisma_X4	89	1777	6113	Massima trazione "+" (o min. compr. "-")
	Sisma_X2	-191	1780	6124	Massimo taglio

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

12.2.8.3 Calcolo della portanza trasversale del singolo palo

CALCOLO DELLA CAPACITA' PORTANTE DI UN PALO TRIVELLATO DI GRANDE DIAMETRO
ai sensi del D.M. 17/01/2018
OPERA: Spalla SX

Diametro del palo (D): 1.2 (m)
 Quota testa palo dal p.c. (z_p): 3.7 (m)
 Area del palo (A_p): 1.131 (m²)
 Quota della falda dal p.c. (z_w): 9.5 (m)
 Tecnica di scavo: Bentonite

Scalzamento: 0 (m)

CARICO ASSIALE DI COMPRESSIONE SUL SINGOLO PALO:
 §6.4.3.1 D.M. 17/01/2018
 Approccio 2: (A1+M1+R3)

Carico assiale di compressione di progetto

N _d (SLU)		(kN)
N _d (SLV)		(kN)
N _d (SLE)	5435	(kN)
N _d (SLD)		(kN)

CARICO ASSIALE DI TRAZIONE SUL SINGOLO PALO:
 §6.4.3.1 D.M. 17/01/2018
 Approccio 2: (A1+M1+R3)

Carico assiale di trazione di progetto

N _d (SLU)		(kN)
N _d (SLV)	-89	(kN)

Numero di strati: 10

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI

Strato	Stratigrafia		Spess. da p.c.	Unità geotecnica	Tipo di terreno	Parametri del terreno						
	da	a				γ	c'	φ'	c _u	c _{u,inc}	α	τ _{lim}
(-)	(m)	(m)	(m)	(-)	(-)	(kN/m ³)	(kPa)	(°)	(kPa)	(-)	(-)	(kPa)
1	0.00	6.70	6.70	Rilevato esistente	Sabbie	19					0	150
2	6.70	15.30	8.60	Sabbia limosa	Sabbie limose	19					0	150
3	15.30	22.20	6.90	Limo argilloso	Coesivo	19			70		0.6	100
4	22.20	23.80	1.60	Sabbia limosa	Sabbie limose	19	3	32			0	150
5	23.80	29.30	5.50	Limo sabbioso	Coesivo	19			110		0.4	100
6	29.30	31.30	2.00	Sabbia limosa	Sabbie limose	19	3	32			0	150
7	31.30	32.60	1.30	Limo argilloso	Coesivo	19			140		0.4	100
8	32.60	41.50	8.90	Sabbia limosa	Sabbie limose	19	5	34			0	150
9	41.50	45.50	4.00	Limo argilloso	Coesivo	19			200		0.4	100
10	45.50	60.00	14.50	Sabbia limosa	Sabbie limose	19	5	34			0	150

Fattori di correlazione per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali indagate

Numero di verticali indagate	1	2	3	4	5	7	≥ 10
ξ ₃	1.70	1.65	1.60	1.55	1.50	1.45	1.40
ξ ₄	1.70	1.55	1.48	1.42	1.34	1.28	1.21

n°2 verticali

Lunghezza del palo (L_p): 46 (m)
 Peso del palo (P_p): 846 (kN)
 Profondità punta palo: 49.7 (m)

Strato	Spess. Strati _{pal}	distanza punta palo-strato successivo
(-)	(m)	(m)
1	3.00	0.00
2	8.60	0.00
3	6.90	0.00
4	1.60	0.00
5	5.50	0.00
6	2.00	0.00
7	1.30	0.00
8	8.90	0.00
9	4.00	0.00
10	4.20	10.30

 ok, superiore a 3D

CAPACITA' PORTANTE CARATTERISTICA

Resistenza alla base:	R _b =	3891 (kN)
Resistenza laterale:	R _s =	9667 (kN)
Resistenza totale:	R _t = R _b + R _s =	13558 (kN)

CAPACITA' PORTANTE DI PROGETTO A COMPRESSIONE
 Approccio 2: (A1+M1+R3) §6.4.3.1 D.M. 17/01/2018

Resistenza alla base:	R _{b,c} =	1747 (kN)
Resistenza laterale:	R _{s,c} =	5095 (kN)
Resistenza compr.:	R _{d,c} = R _{b,c} + R _{s,c} =	6841 (kN)

CAPACITA' PORTANTE DI PROGETTO A TRAZIONE
 Approccio 2: (A1+M1+R3) §6.4.3.1 D.M. 17/01/2018

Resistenza laterale:	R _{s,t} =	-4687 (kN)
Resistenza traz.:	R _{d,t} = R _{s,t} =	-4687 (kN)

VERIFICA A COMPRESSIONE

	N _c (kN)	R _{s,c} (kN)	FS (-)
SLE	6281	9667	1.54
SLD			-

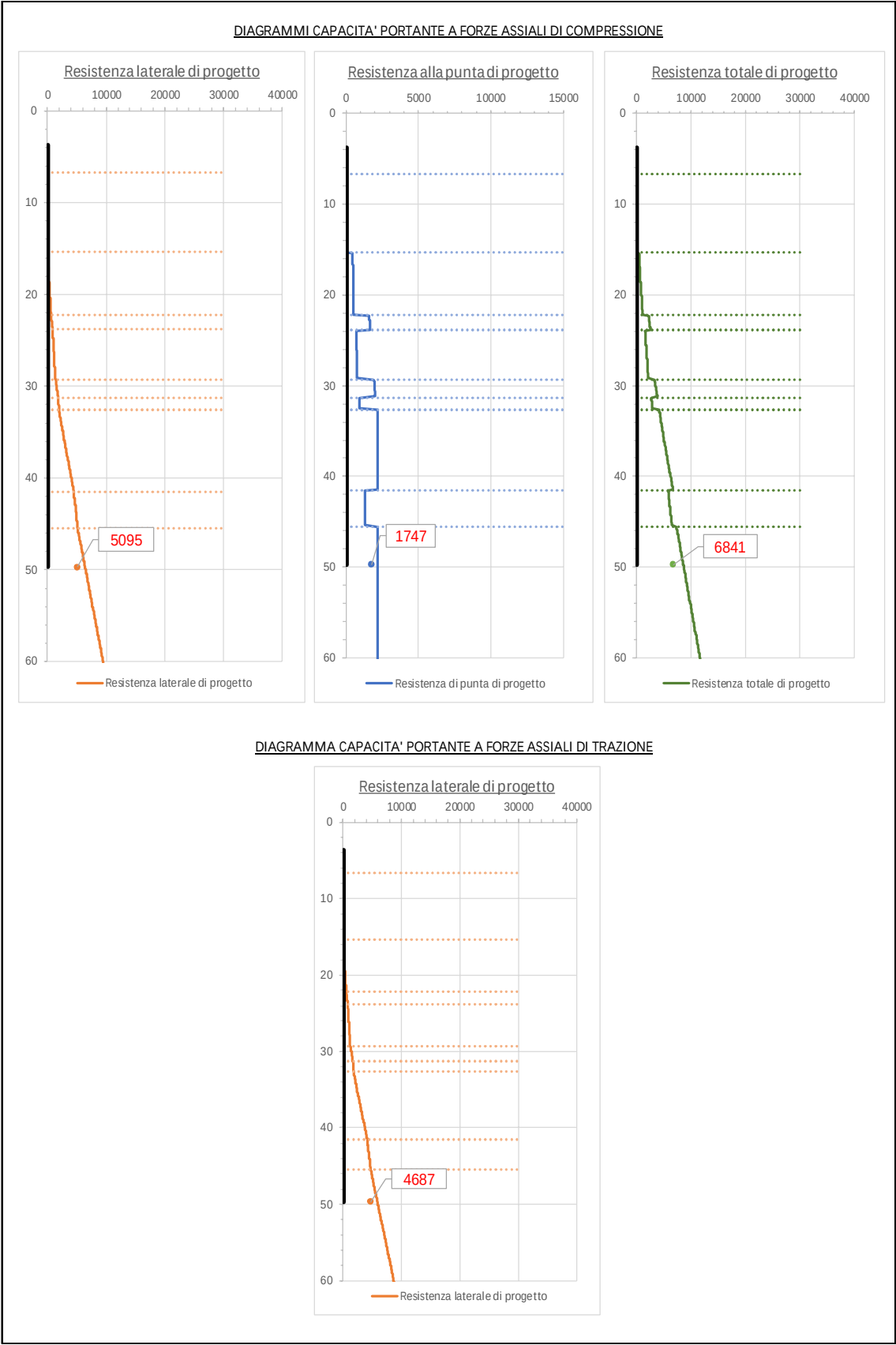
 R_{s,c}/N_c ≥ 1.25

VERIFICA A TRAZIONE

	N _{d,t} (kN)	R _{d,t} (kN)	FS (-)
SLU - (A1+M1+R3)			-
SLV - (EQK+M1+R3)	-89	-4687	8.62

 R_{d,t}/N_{d,t} ≥ 1

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00



STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

12.2.8.4 Calcolo dei domini di interazione



Lingua IT

CALCOLO DEL DOMINIO D'INTERAZIONE DELLA PALIFICATA

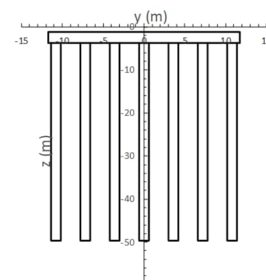
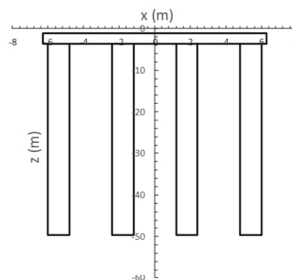
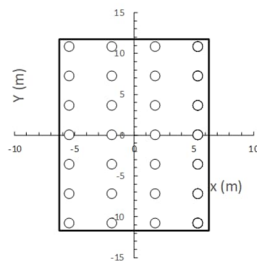
GEOMETRIA DELLA PALIFICATA

Definire la geometria della palificata automaticamente?

Numero Pali (massimo 100 pali)
Diametro pali
File in direzione x (massimo 10 file)
File in direzione y (massimo 10 file)
Interasse in direzione x
Interasse in direzione y
Distanza del palo dal bordo del soletto
Spessore del soletto
Lunghezza pali
Distanza tra la testa del palo e il p.c. (+ fuori terra / - fondazione interrata)

	SI	Compilare le celle che seguono
N	28	(-)
D	1.20	(m)
m	4	(m)
n	7	(m)
l _m	3.60	(m)
l _n	3.60	(m)
f	0.90	(m)
s	2.50	(m)
L	46.00	(m)
e	-3.70	(m)

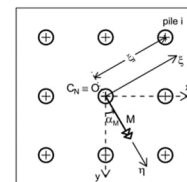
Input
Output



CARICHI AGENTI SULLA PALIFICATA

Carico verticale di progetto
Momento di progetto (ruota attorno all'asse x)
Momento di progetto (ruota attorno all'asse y)
Momento risultante di progetto
Inclinazione del vettore momento risultante rispetto (x,y)

N _{Ed}	101464.61	(kN)
M _{Ed,x}	38078.73	(kN m)
M _{Ed,y}	264564.49	(kN m)
M _{Ed}	267290.77	(kN m)
α _{Ed}	8.19	(°)



CAPACITA' PORTANTE E MOMENTO RESISTENTE DEL PALO SINGOLO

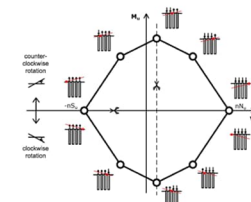
Capacità portante di progetto a compressione del palo singolo
Capacità portante di progetto a trazione del palo singolo
Momento resistente di progetto del palo singolo soggetto a compressione
Momento resistente di progetto del palo singolo soggetto a trazione

N _{U,Ed}	5998.42	(kN)
S _{U,Ed}	5529.58	(kN)
M _{Ed,c}	0.00	(kN m)
M _{Ed,t}	0.00	(kN m)

METODO DI Leoni et al. (2019)

Carico verticale ultimo della palificata rispetto ad un cinematisimo con rotazione rispetto al punto i-esimo
Capacità portante di progetto a compressione del j-esimo palo
Capacità portante di progetto a trazione del j-esimo palo
Momento ultimo della palificata rispetto ad un cinematisimo con rotazione rispetto al punto i-esimo
Momento resistente di progetto del palo j-esimo soggetto a compressione
Momento resistente di progetto del palo j-esimo soggetto a trazione
Coordinata x' rispetto al sistema di riferimento (x', h) del palo j-esimo
Punti di rotazione (anti-oraria) dei cinematismi
Punti di rotazione (oraria) dei cinematismi
Numero di pali della palificata

$$\begin{aligned}
 &V_{u,i} \\
 &N_{u,i} \\
 &S_{u,i} \\
 &M_{u,i} \\
 &M_{r,i} \\
 &\xi_i \\
 &i \\
 &k \\
 &p
 \end{aligned}
 \begin{cases}
 V_{u,i} = \sum_{j=1}^{p+1} (N_{u,j}) - \sum_{j=1}^{p+1} (S_{u,j}) \\
 M_{u,i} = \sum_{j=1}^{p+1} (M_{u,j}) - N_{u,i} \xi_i + \sum_{j=1}^{p+1} (M_{r,j} + S_{u,j} \xi_j) \\
 \text{con } i = 1, \dots, p+1.
 \end{cases}
 \begin{cases}
 V_{u,k} = \sum_{j=1}^{p+1} (N_{u,j}) - \sum_{j=1}^{p+1} (S_{u,j}) \\
 M_{u,k} = \sum_{j=1}^{p+1} (S_{u,j} \xi_j - M_{r,j}) - \sum_{j=1}^{p+1} (M_{r,j} + N_{u,j} \xi_j) \\
 \text{con } i = 1, \dots, p+1.
 \end{cases}$$

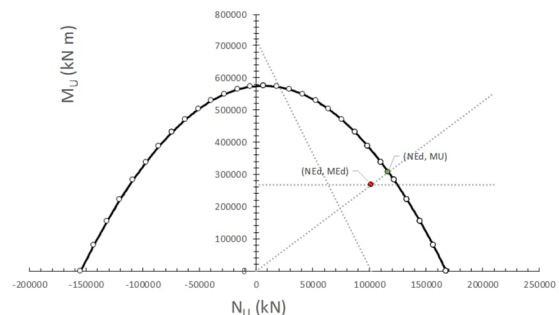


VERIFICA A CAPACITA' PORTANTE DELLA PALIFICATA

Carico verticale di progetto
Momento risultante di progetto
Calcolo del dominio di interazione della palificata

Punto di massima Trazione (i min)
Punto di massima Compressione (i max)
Definire il punto (N_u, M_u) rispetto al quale si vuole eseguire la verifica
Definire rispetto a quale condizione si vuole eseguire la verifica
Carico verticale ultimo della palificata
Momento ultimo della palificata
Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_{Ed}, M_u)
Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_u, M_{Ed})
Coefficiente di sicurezza a pressoflessione della palificata (N_u, M_u)

N _{Ed}	101464.61	(kN)
M _{Ed}	267290.77	(kN m)
RUN		
i _{min}	1	(-)
i _{max}	309	(-)
i	260	(-)
N _u	116803.90	(kN)
M _u	307258.69	(kN m)
M _u /M _{Ed}	1.150	(-)
N _u /N _{Ed}	-	(-)
(N _u , M _u)/(N _{Ed} , M _{Ed})	-	(-)



12.2.8.5 Verifiche strutturali

Poiché le terne di sollecitazioni risultano comparabili a quelle della Spalla A – lato destro, le verifiche strutturali della Spalla B si assumono coincidenti con quelle riportate al §12.1.8.5, riferite alla Spalla A.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

13. FONDAZIONI TORRINI PROVVISORI

In questo capitolo sono riportati i risultati delle verifiche strutturali e geotecniche eseguite per il dimensionamento delle fondazioni delle pile provvisorie impiegate per il varo a spinta dell'impalcato.

Le pile provvisorie sono in totale 4 e sono composte ciascuna da due elevazioni metalliche fondate su un'unica platea in calcestruzzo. Quest'ultima ha pianta rettangolare di dimensioni 6.5x30 m ed è spessa 1.5 m. Preventivamente alla costruzione della platea è previsto il miglioramento del terreno di fondazione mediante la realizzazione di colonne di jet-grouting (colonne con diametro pari a 0.8m, interasse pari 1.2m e lunghezza pari a 10m) al di sotto delle aree direttamente caricate dai torrini metallici.

13.1 Criteri di dimensionamento e verifica di sicurezza delle fondazioni superficiali

Nel presente capitolo si riportano i criteri di dimensionamento e verifica delle fondazioni superficiali provvisorie delle pile per le operazioni di varo del ponte.

In conformità a quanto richiesto dalle norme tecniche per le costruzioni (NTC18) al §6.4.2.1 in riferimento alle fondazioni superficiali, si considerano i seguenti stati limite ultimi (SLU).

- collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno;
- collasso per scorrimento sul piano di posa;

Secondo quanto riportato al §6.4.2.1 delle NTC18 le verifiche SLU devono essere effettuate applicando l'approccio 2 della norma, con la combinazione $A_1 + M_1 + R_3$. In particolare, i coefficienti di combinazione delle azioni (A_1) coincidono con quelli impiegati nelle combinazioni utilizzate per le verifiche strutturali, i coefficienti parziali sui parametri di resistenza dei terreni (M_1) sono unitari (tab. 6.2.II NTC-18), e la resistenza globale del sistema è ridotta tramite i coefficienti (R_3) riportati nella tab. 6.4.I., di seguito riportata:

Tabella 44: NTC 2018 – Tab. 6.4.I

Verifica	Coeff. Parziale R_3
Carico limite	$\gamma_R = 2.3$
Scorrimento	$\gamma_R = 1.1$

In accordo con il paragrafo §7.11.5.3.1 delle NTC18 le verifiche sismiche allo stato limite ultimo SLV sono eseguite con i medesimi coefficienti parziali delle condizioni statiche (Tab.7.11.II delle NTC18).

In conformità a quanto richiesto dalle NTC18 al paragrafo §6.4.2.2, relativamente agli stati limite di esercizio (SLE), viene inoltre eseguita una valutazione dei cedimenti attesi in fondazione.

La valutazione è svolta utilizzando carichi e parametri geotecnici caratteristici, cioè non fattorizzati.

Nella valutazione della compatibilità dei cedimenti, è stato adottato un limite di cedimento, per il corretto e continuo funzionamento della struttura, pari a 5 cm.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>ST</td><td>712</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	ST	712	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	ST	712	r00								

13.1.1 Verifiche per carico limite della fondazione

Nelle verifiche capacità portante lo stato limite è rappresentato dal collasso per raggiungimento della resistenza limite del terreno di fondazione. La verifica è condotta confrontando il carico limite, N_{ult} , con il carico di progetto, N_{Ed} . In accordo con le NTC18, la verifica è soddisfatta se il carico agente è minore del carico ultimo questo ultimo ridotto del coefficiente $R_3 = 2.3$ come già in precedenza commentato.

$$N_{Ed} \leq N_{ult}$$

Il carico agente di progetto (la domanda) è la componente della risultante delle forze trasferite alla fondazione in direzione normale al piano di posa, comprendente il peso proprio della fondazione ed eventuali ricoprimenti (Circ. 7 SC6.4.2.1). Il carico ultimo di progetto (capacità) è il valore della forza normale al piano di posa ottenuta come prodotto fra il carico limite nel terreno e l'area di fondazione reagente.

$$N_{ult} = q_{lim} B' L'$$

Dove:

q_{lim} è la pressione limite ammissibile, o carico limite, del terreno di fondazione.

$$B' = B - 2e_B$$

$$L' = L - 2e_L$$

Nelle precedenti e_B ed e_L sono l'eccentricità della risultante del carico agente rispettivamente lungo i lati B e L della fondazione.

Per la valutazione della pressione limite ammissibile è stata impiegata la formula trinomia di Terzaghi nella sua espressione più completa che tiene conto della forma della fondazione, dell'inclinazione del carico agente, della inclinazione e profondità del piano di posa, nonché dell'inclinazione del terreno a valle della fondazione (Meyerhof).

In condizioni sismiche il carico ultimo è valutato mediante l'estensione di procedure classiche al caso di azione sismica, tenendo conto dell'effetto dell'inclinazione e dell'eccentricità delle azioni in fondazione.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

$$q_{lim} = c' \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot b_c \cdot g_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot b_q \cdot g_q + 0,5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot g_\gamma$$

N_c, N_q, N_γ : coefficienti di capacità portante

$$N_q = \tan^2(45 + \varphi'/2) \cdot e^{(\pi \cdot \tan \varphi' \cdot \tan \varphi')}$$

$$N_c = (N_q - 1) / \tan \varphi'$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan \varphi'$$

s_c, s_q, s_γ : fattori di forma

$$s_c = 1 + B^* N_q / (L^* N_c)$$

$$s_q = 1 + B^* \tan \varphi' / L^*$$

$$s_\gamma = 1 - 0,4 \cdot B^* / L^*$$

i_c, i_q, i_γ : fattori di inclinazione del carico

$$m_b = (2 + B^* / L^*) / (1 + B^* / L^*) \quad \theta = \arctg(T_b / T_l)$$

$$m_l = (2 + L^* / B^*) / (1 + L^* / B^*) \quad (m=2 \text{ nel caso di fondazione nastriforme e } m=(m_b \sin^2 \theta + m_l \cos^2 \theta) \text{ in tutti gli altri casi})$$

$$i_q = (1 - H / (N + B^* L^* c' \cotg \varphi'))^m$$

$$i_c = i_q - (1 - i_q) / (N_q - 1)$$

$$i_\gamma = (1 - H / (N + B^* L^* c' \cotg \varphi'))^{(m+1)}$$

d_c, d_q, d_γ : fattori di profondità del piano di appoggio

$$\text{per } D/B^* \leq 1; d_q = 1 + 2 D \tan \varphi' (1 - \sin \varphi')^2 / B^*$$

$$\text{per } D/B^* > 1; d_q = 1 + (2 \tan \varphi' (1 - \sin \varphi')^2) \cdot \arctan(D / B^*)$$

$$d_c = d_q - (1 - d_q) / (N_c \tan \varphi')$$

$$d_\gamma = 1$$

b_c, b_q, b_γ : fattori di inclinazione base della fondazione

$$b_q = (1 - \beta_f \tan \varphi')^2 \quad \beta_f + \beta_p = 0.00$$

$$\beta_f + \beta_p < 45^\circ$$

$$b_c = b_q - (1 - b_q) / (N_c \tan \varphi')$$

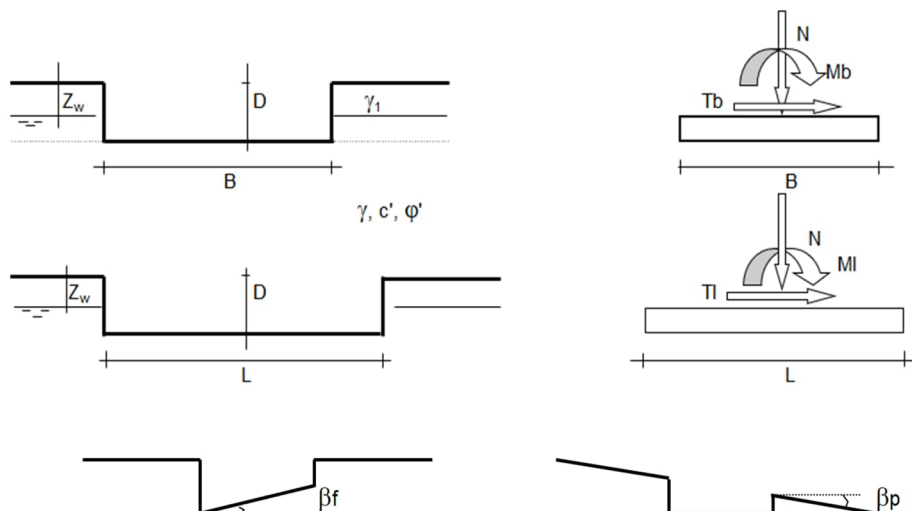
$$b_\gamma = b_q$$

g_c, g_q, g_γ : fattori di inclinazione piano di campagna

$$g_q = (1 - \tan \beta_p)^2 \quad \beta_f + \beta_p = 0.00$$

$$\beta_f + \beta_p < 45^\circ$$

$$g_c = g_q - (1 - g_q) / (N_c \tan \varphi')$$



STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

13.1.2 Analisi dei cedimenti

Si riportano nel seguito le metodologie ed i criteri di calcolo adottati per le analisi dei cedimenti.

Il calcolo dei cedimenti delle pile di progetto in condizioni di esercizio sarà eseguito in corrispondenza di sezioni rappresentative di tratte in cui le azioni agenti e la compressibilità stimata dei terreni di fondazione, delineano delle condizioni di rischio per il funzionamento delle operazioni di varo. È definito, infatti, un limite di cedimento per il corretto e continuo funzionamento dell'infrastruttura pari a 5cm.

L'analisi dei cedimenti è stata condotta tramite il software *Settle3* (versione 5.0.2.5) della Rocscience Inc.

Il programma, per la modellazione tridimensionale dei cedimenti nei terreni dovuti a carichi esterni, si basa sui principi della teoria dell'elasticità e della consolidazione di Terzaghi, consentendo una valutazione avanzata dei cedimenti sia immediati che nel tempo.

Il software permette di modellare in modo dettagliato stratigrafie complesse, con proprietà geotecniche variabili per ciascun livello, e di applicare carichi di forma e distribuzione arbitraria. È possibile considerare effetti idrogeologici quali la presenza della falda acquifera, nonché interventi di precarico, drenaggio verticale e miglioramento del terreno, con la possibilità di simulare il comportamento tempo-dipendente del sistema.

Tramite il codice di calcolo, è stato possibile:

- Modellare tridimensionalmente i carichi applicati e la geometria del sistema;
- Calcolare i cedimenti elastici e della consolidazione primaria secondo Terzaghi;
- Effettuare analisi del cedimento nel tempo, mediante definizione dei coefficienti di consolidazione verticale e orizzontale (c_v e c_h);
- Valutare degli effetti indotti da precarichi, sistemi di drenaggio e interventi di consolidazione.

13.1.2.1 Determinazione della zona compressibile H_c

Viene definita convenzionalmente zona compressibile (H_c) la profondità oltre la quale l'incremento delle tensioni verticali ($\delta\sigma_z$) risulti inferiore al 10% della tensione verticale efficace litostatica (σ'_{v0}) e il contributo al cedimento può essere considerato trascurabile.

13.1.2.2 Descrizione dei fenomeni

L'applicazione di un carico su un terreno genera una serie di fenomeni deformativi che portano al cedimento del piano di appoggio del carico e degli orizzonti di terreno ad esso sottostanti. Le modalità e le caratteristiche di questi cedimenti sono estremamente variabili e dipendono dalla tipologia di terreno, dalle sue caratteristiche fisico-meccaniche, dalle condizioni di drenaggio e dal tempo trascorso dall'applicazione del carico.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

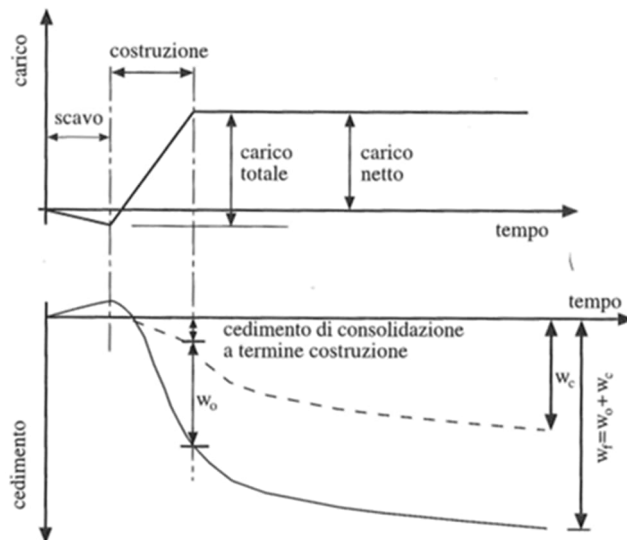


Figura 180: Decorso nel tempo del cedimento per terreni a grana fine (da Viggiani 2013)

All'atto di applicazione di un carico, il terreno si deforma istantaneamente producendo un cedimento immediato dipendente dalle caratteristiche di deformabilità del mezzo (Lancellotta 2004).

Se il terreno ha una elevata permeabilità le sovrappressioni vengono dissipate istantaneamente e il cedimento immediato diviene la componente predominante della deformazione indotta.

Al contrario, in presenza di terreni a bassa permeabilità e sufficientemente saturi, l'espulsione dell'acqua interstiziale risulta rallentata, e la deformazione si sviluppa in condizioni di volume quasi costante, ovvero in regime non drenato. Nei terreni a grana fine, l'applicazione del carico induce inizialmente un cedimento immediato, seguito dalla progressiva dissipazione delle sovrappressioni interstiziali. Questo processo genera un cedimento di consolidazione, associato al trasferimento graduale delle tensioni dalla fase fluida allo scheletro solido. Il cedimento di consolidazione rappresenta l'aliquota predominante di deformazione in terreni a grana fine e si verifica con velocità dipendenti dalle condizioni di drenaggio. In definitiva il cedimento totale (o finale) risultante dall'applicazione di un carico risulta composto da:

$$w_f = w_0 + w_c$$

in cui w_0 è il cedimento immediato, w_c è il cedimento di consolidazione primaria.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

13.1.2.2.1 Valutazione teorica dei vari tipi di cedimento

Cedimento immediato

Con riferimento alla teoria dell'elasticità il cedimento immediato in argille viene stimato con la seguente espressione:

$$s_i = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta\sigma_z - \nu_u \cdot (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)) \cdot h_i}{E_{ui}}$$

essendo:

s_i = cedimento immediato

$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$ = tensioni indotte dal carico

h_i = altezza dello strato i-esimo

n = numero di strati in cui è suddivisa la zona compressibile (H_c)

E_{ui} = modulo di deformazione non drenato dello strato i-esimo

ν_u = rapporto di Poisson = 0,5

Cedimento totale (immediato e di consolidazione primaria)

Con riferimento alla teoria dell'elasticità il cedimento immediato e di consolidazione primaria nei terreni coesivi viene stimato con la seguente espressione:

$$s_t = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta\sigma_z - \nu \cdot (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)) \cdot h_i}{E'_i}$$

essendo:

s_t = cedimento immediato e di consolidazione primaria

$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$ = tensioni indotte dal carico

h_i = altezza dello strato i-esimo

n = numero di strati in cui è suddivisa la zona compressibile (H_c)

E'_i = modulo di deformazione elastico drenato dello strato i-esimo

ν = rapporto di Poisson = 0,3

Per definizione il cedimento di consolidazione primaria è dato dalla differenza tra s_t e s_i .

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

13.1.2.3 Procedura di calcolo

L'analisi dei cedimenti è stata svolta in accordo alle metodologie di calcolo precedentemente esposte. Sono stati valutati i cedimenti istantanei e di consolidazione primaria, oltre al loro andamento nel tempo, in funzione delle caratteristiche dei terreni che costituiscono il sottosuolo. Il modello geotecnico di sottosuolo assunto nei calcoli è stato definito a partire dalla caratterizzazione generale, specializzando i valori di compressibilità (e/o rigidità) in base ai dati ottenuti dalle prove edometriche, in accordo a quanto esposto nella relazione di caratterizzazione geotecnica.

13.1.2.4 Scelta dei parametri di calcolo

Si è assunto un livello di falda pari a circa 1m da p.c.

Per le unità "Limo argilloso ed argilla limosa" e "Limo sabbioso" si è ritenuto opportuno calibrare i parametri di deformabilità dell'unità sulla base dei risultati delle prove geofisiche disponibili. Nel dettaglio, a partire dalla caratterizzazione proposta nella presente relazione geotecnica, è possibile assumere i seguenti parametri:

- Modulo edometrico: $E_{Ed} = \frac{(1-\nu) E}{(1+\nu) (1-\nu)}$
- Coefficiente di compressibilità volumetrica: $m_v = \frac{1}{E_{Ed}}$
- Coefficiente di permeabilità: $K=10^{-6}$ cm/s

Nella tabella seguente sono riportati per completezza tutti i parametri utilizzati nelle analisi:

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

Tabella 45: Parametri geotecnici utilizzati nelle analisi

PARAMETRI TERRENI		Unità Limo argilloso ed argilla limosa_1	Unità Limo argilloso ed argilla limosa_2	Unità Limo sabbioso
Proprietà fisico-meccaniche	γ (kN/m ³)	19		
	k_0 (-)	0,59	0,56	0,59
	K (cm/s)	1E-06	1E-06	1E-06
Resistenza (Criterio MC)	c' (kPa)	15	20	15
	ϕ' (°)	24	24	24
	Su (kPa)	120	170	120
Deformabilità	Eu(MPa)	84	119	84
	E _{Ed} (MPa)	333	444	389
	m_v (m ² /kN)	3,00E-05	2,25E-05	2,57E-05
PARAMETRI TERRENI		Rilevato esistente	Sabbia e Sabbia limosa	Sabbia e Ghiaia
Proprietà fisico-meccaniche	γ (kN/m ³)	18	19	19
	k_0 (-)	0,50	0,47	0,44
	K (cm/s)	-	-	-
Resistenza (Criterio MC)	c' (kPa)	3	3	0
	ϕ' (°)	30	32	34
	Su (kPa)	-	-	-
Deformabilità	E'(MPa)	15	25	30
	E _{Ed} (MPa)	-	-	-
	m_v (m ² /kN)	-	-	-

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

13.2 Verifiche strutturali della platea di fondazione

In questo paragrafo sono riportate le verifiche strutturali eseguite sulla platea di fondazione delle pile provvisorie.

13.2.1 Modello di calcolo e sollecitazioni di progetto

Le analisi strutturali della platea in calcestruzzo sono state eseguite con un modello bidimensionale della struttura reale, realizzato discretizzando il continuo reale con elementi di tipo shell. Detti elementi sono stati caratterizzati con le proprietà fisiche e meccaniche del conglomerato cementizio adottato per la loro costruzione ($R_{ck} = 30 \text{ MPa}$) e con spessore uguale a quello effettivo di 1.5 m.

In figura seguente si riporta una vista del modello di calcolo.

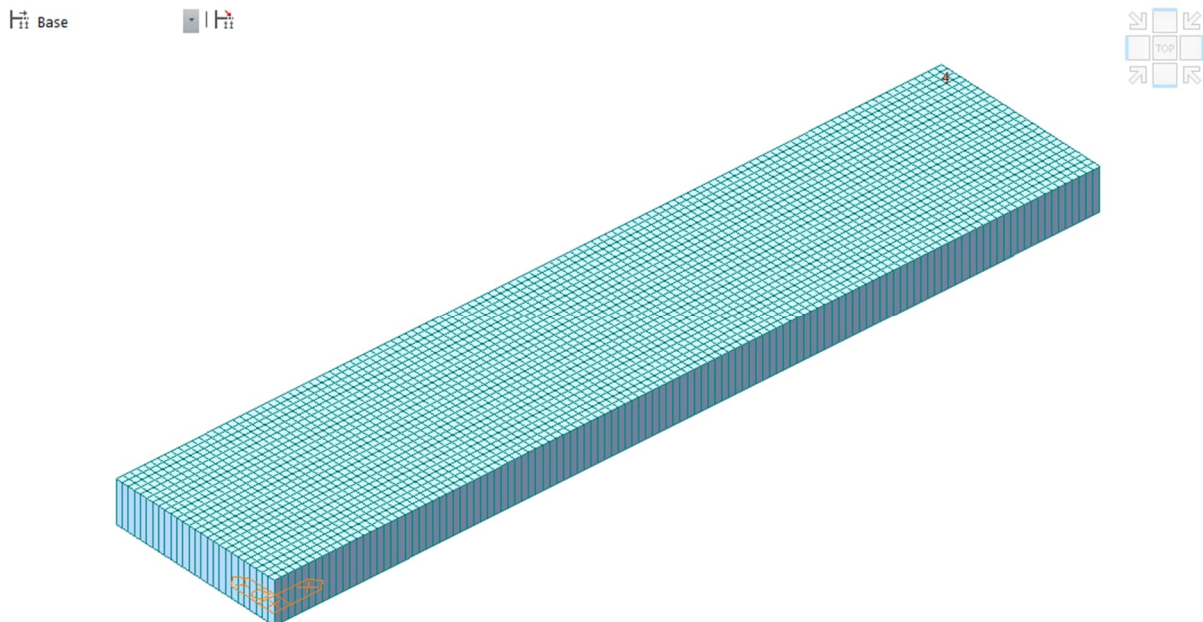


Figura 181: Vista 3D del modello di calcolo della platea

Il modello di calcolo è stato caricato con le azioni trasmesse dai torrini metallici, che sono stata applicate con carichi distribuiti su una porzione di soletta di dimensioni pari all'ingombro delle elevazioni (vedere figura seguente). Si fa presente a tal proposito che la massima forza verticale in esercizio che ciascuno dei due torrini scarica sulla platea è uguale a $N = 15450 \text{ kN}$.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

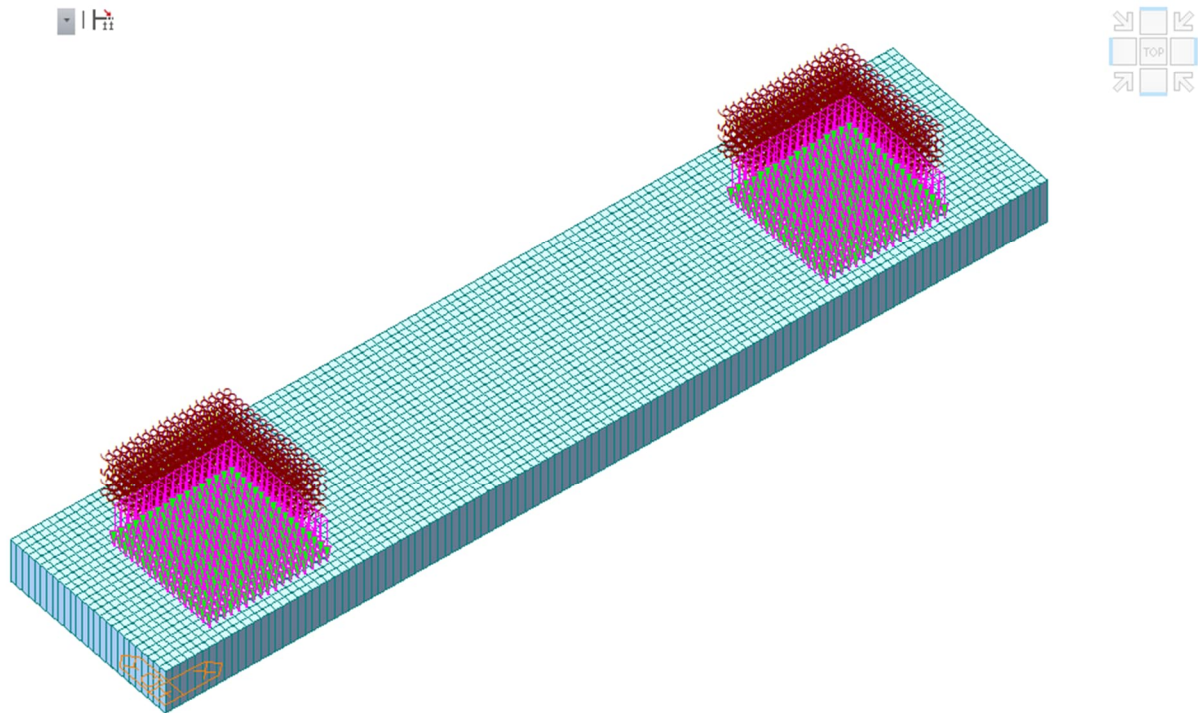


Figura 182: Applicazione dei carichi al modello di calcolo

Per quanto riguarda i vincoli esterni, il modello è stato vincolato in modo rigido in entrambe le direzioni orizzontali. In direzione verticale sono state invece applicate delle molle elastiche aventi rigidezze calcolate in funzione delle seguenti valori delle costanti di winkler:

- $K_v = 10000 \text{ kN/m}^3$ (per il terreno trattato con jet-grouting)
- $K_v = 5000 \text{ kN/m}^3$ (per il terreno non trattato collocato al di sotto della porzione centrale della platea)

Nelle figure seguenti sono riportati i principali diagrammi delle sollecitazioni ottenuti a seguito di analisi FEM:

- Momento flettente longitudinale M_{yy} causato dai carichi trasmessi dai torrini (momento flettente che tende e comprime le fibre di calcestruzzo disposte parallelamente al lato lungo della fondazione – un valore positivo del momento flettente sta ad indicare che le fibre tese sono quelle in intradosso platea)

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

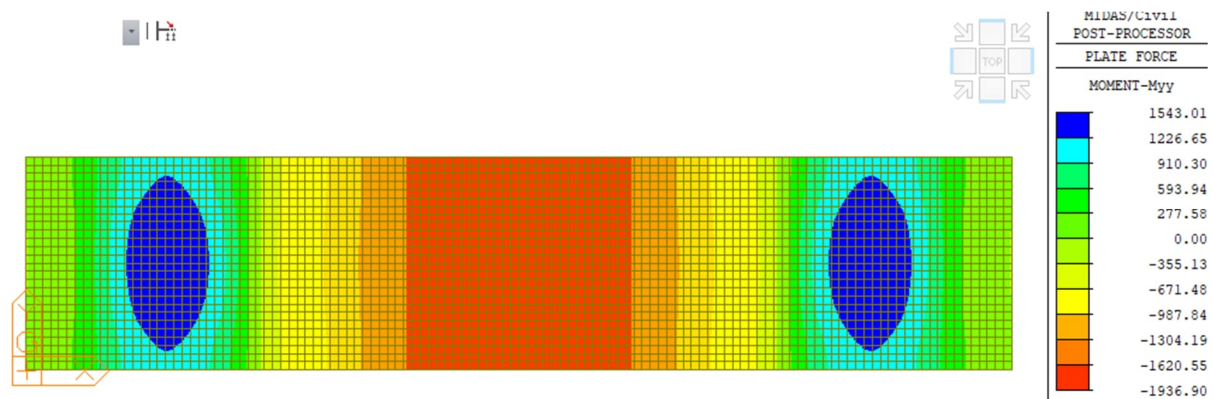


Figura 183: Momento flettente Myy per effetto delle azioni trasmesse dai torrini [kNm/m]

- Taglio Vyy causato dai carichi trasmessi dai torrini (taglio sulla sezione trasversale della platea, cioè sulla sezione ortogonale alla congiungente i due torrini)

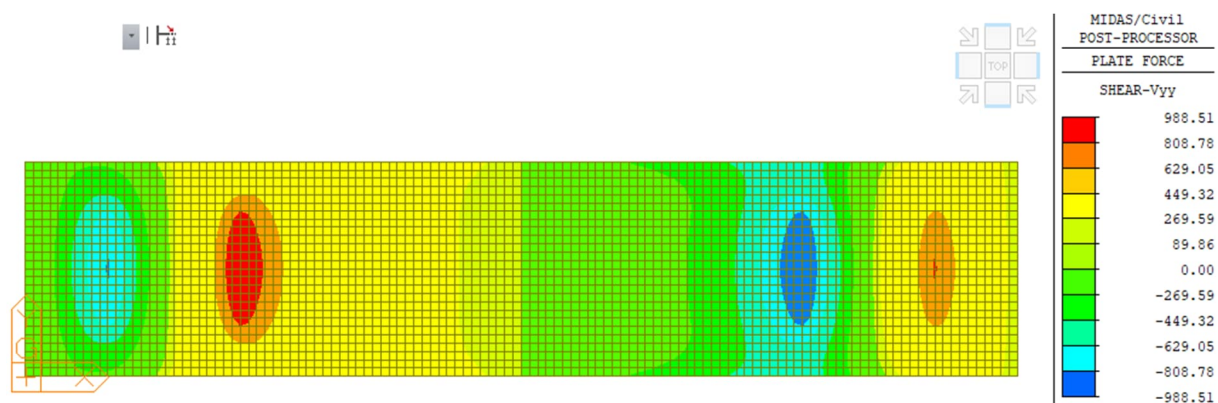


Figura 184: Taglio Vyy per effetto delle azioni trasmesse dai torrini [kN/m]

Le sollecitazioni elementari dovute al peso proprio della platea di fondazione e agli scarichi dei torrini sono state fra loro combinate al fine di ottenere le sollecitazioni di calcolo, utilizzate per lo svolgimento delle verifiche strutturali agli stati limite ultimi (SLU) e agli stati limite di esercizio (SLE).

I criteri di verifica sono quelli già discussi al capitolo 8, a cui si rimanda per eventuali approfondimenti.

Nelle figure seguenti si riportano i diagrammi delle sollecitazioni di momento flettente e taglio in combinazione fondamentale (SLU):

$$E_d = 1.0 \cdot G_1 + 1.35 \cdot G_{\text{torrini}}$$

Gli effetti del peso proprio sono stati amplificati con coefficiente di sicurezza unitario in quanto favorevoli.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

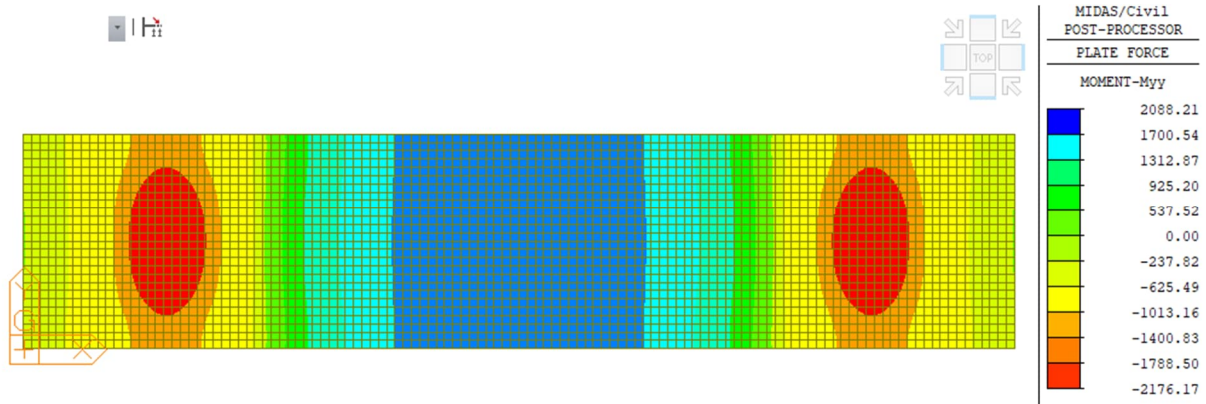


Figura 185: Momento flettente Myy,sd (SLU) [kNm/m]

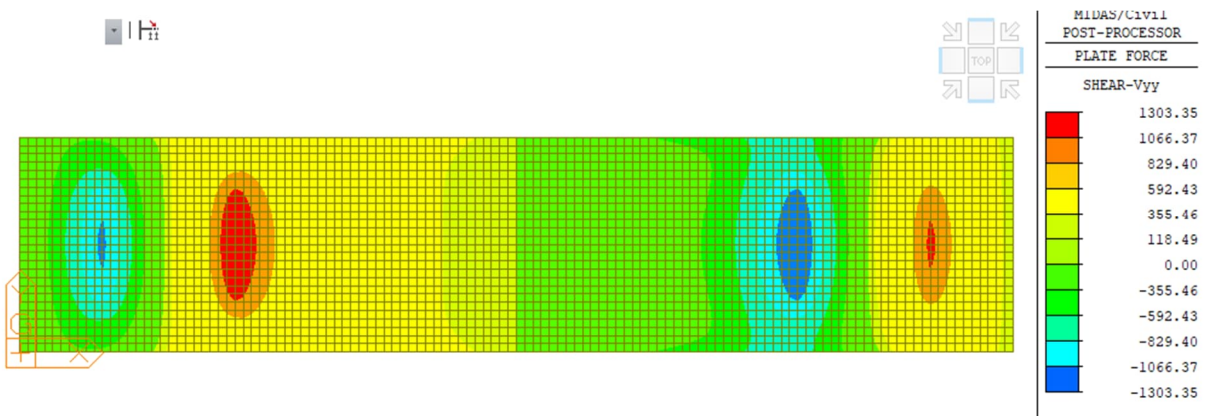


Figura 186: Taglio Vyy,sd (SLU) [kN/m]

13.2.2 Verifiche strutturali

In questo paragrafo sono illustrati i risultati delle verifiche strutturali eseguite sulla platea di fondazione provvisoria. Dette verifiche, stante la matura provvisoria della parte d'opera esaminata, sono state eseguite sia nei confronti degli stati limite ultimi (SLU), sia nei confronti degli stati limite di esercizio (SLE).

In tabella seguente si riassumono le sollecitazioni di calcolo della platea di fondazione. Le sollecitazioni in combinazione caratteristica sono calcolate sommando, senza amplificarle, quelle dei due casi di carico elementari: peso proprio e scarico torrini.

Tabella 46: Sollecitazioni di calcolo platea

Combinazione	Nsd [kN/m]	Msd [kNm/m]	Vsd [kN/m]
Caratteristica (SLE)	0.0	1548.2	1126.5
Fondamentale (SLU)	0.0	2176.2	1529.2

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>ST</td><td>712</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	ST	712	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	ST	712	r00								

Le sollecitazioni di taglio riportate in tabella sopra sono state calcolate mettendo in quadratura i massimi valori delle azioni taglianti nelle direzioni principali della fondazione (v_{xx} e v_{yy}).

Le verifiche sono state eseguite considerando una sezione resistente rettangolare spessa 1.5 m e larga 1.0 m, armata in modo simmetrico all'intradosso e all'estradosso con le seguenti armature:

- Doppio strato $\varnothing 26/20$ all'estradosso;
- Doppio strato $\varnothing 26/20$ all'intradosso;
- Staffe $\varnothing 20/40 \times 60$

Per quanto riguarda i materiali costruttivi si è considerato un calcestruzzo di classe di resistenza C25/30 ed un acciaio ordinario tipo B450C.

Le verifiche strutturali, come si vede nel seguente prospetto, risultano tutte soddisfatte.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

FOGLIO VERSIONE R21

INPUT					OUTPUT				
SOLLECITAZIONI DI VERIFICA					VERIFICHE IN ESERCIZIO				
Combinazione	N _{sd} [kN]	M _{sd} [kNm]	V _{sd} [kN]						
SLE Quasi Permanente	0	0	0						
SLE Frequente	0	0	0						
SLE Rara	0	1548	1126.509						
SLU	0	2176	1529						
SLV	0	0	0						
CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE IN C.A.									
Geometria della sezione									
Base (ortogonale al Taglio)		B [cm]	100						
Altezza (parallela al Taglio)		H [cm]	150						
Altezza utile della sezione		d [cm]	138.60						
Area di calcestruzzo		A _c [cm ²]	15000						
Armatura longitudinale tesa									
		1° STRATO	2° STRATO	3° STRATO					
Numero Barre	n	5.00	5.00	0.00					
Diametro	φ [mm]	26	26	0					
Posizione dal lembo esterno	c [mm]	88	140	50					
Area strato	A _s [cm ²]	26.55	26.55	0.00					
Percentuale di armatura	ρ [%]	0.383%							
Armatura longitudinale compressa									
		1° STRATO	2° STRATO	3° STRATO					
Numero Barre	n	5.00	5.00	0.00					
Diametro	φ [mm]	26	26	0					
Posizione dal lembo esterno	c' [mm]	88	140	50					
Area strato	A _{s'} [cm ²]	26.55	26.55	0.00					
Percentuale di armatura	ρ [%]	0.383%							
Armatura trasversale									
		1° TIPO	2° TIPO	3° TIPO					
Diametro	φ [mm]	20	0	0					
Numero bracci	n _{bi}	2.5	0	0					
Passo	S _w [mm]	600	0	0					
Inclinazione	α [deg]	90	90	90					
Area di armatura a metro	A _{sw} /S _w [cm ² /m]	13.09	0.00	0.00					
CARATTERISTICHE REOLOGICHE DEI MATERIALI									
Calcestruzzo									
Resistenza cubica a compressione		R _{ck}	30						
Resistenza cilindrica caratteristica a compressione		f _{ck} [MPa]	25.00						
Resistenza cilindrica media a compressione		f _{cm} [MPa]	33.00						
Resistenza media a trazione		f _{ctm} [MPa]	2.56						
Resistenza caratteristica a trazione		f _{ctk} [MPa]	1.80						
Resistenza di progetto a compressione		f _{cd} [MPa]	14.17						
Resistenza di progetto delle bielle compresse		f _{cd} [MPa]	7.65						
Acciaio									
Resistenza caratteristica a snervamento		f _{yk} [MPa]	450						
Resistenza di progetto a snervamento		f _{yd} [MPa]	391						

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

13.3 Verifiche geotecniche della platea di fondazione

In questo paragrafo sono riportate le verifiche geotecniche eseguite sulla platea di fondazione delle pile provvisorie. La verifica allo SLV non è stata sviluppata in considerazione del carattere provvisorio dell'opera.

Per le sollecitazioni agenti sulla fondazione si rimanda alla relazione di dettaglio relativa all'impalcato.

13.3.1 Carico limite

Fondazioni Dirette - Rettangolari

Verifica in tensioni efficaci

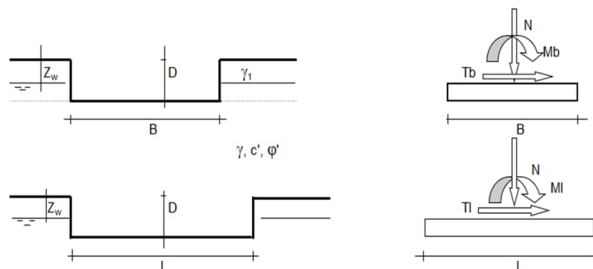
Ai sensi del D.M. 17/01/2018

$$q_{lim} = c' \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot b_c \cdot g_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot b_q \cdot g_q + 0,5 \cdot \gamma' \cdot B \cdot N_{\gamma} \cdot s_{\gamma} \cdot d_{\gamma} \cdot i_{\gamma} \cdot b_{\gamma} \cdot g_{\gamma}$$

D = Profondità del piano di appoggio
 e_B = Eccentricità in direzione B ($e_B = M_b/N$)
 e_L = Eccentricità in direzione L ($e_L = M_l/N$) (per fondazione nastriforme $e_L = 0$; $L^* = L$)
 B^* = Larghezza fittizia della fondazione ($B^* = B - 2 \cdot e_B$)
 L^* = Lunghezza fittizia della fondazione ($L^* = L - 2 \cdot e_L$)
(per fondazione nastriforme le sollecitazioni agenti sono riferite all'unità di lunghezza)

Input
Output

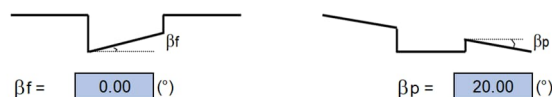
Metodo di calcolo		coefficienti parziali					
		azioni		proprietà del terreno		resistenze	
		permanenti	variabili	$\tan \phi'$	c'	q_{lim}	scorr
Σ	A1+M1+R3	1.30	1.50	1.00	1.00	2.30	1.10
Σ	SISMA	1.00	1.00	1.00	1.00	2.30	1.10
Definiti dal Progettista		1.00	1.00	1.00	1.00	2.30	1.10



DATI

(Per fondazione nastriforme $L = 100$ m)

B = 6.50 (m)
L = 30.00 (m)
D = 2.00 (m)



Peso unità di volume del terreno

γ_1 = 19.00 (kN/mc)
 γ = 19.00 (kN/mc)

Valori caratteristici di resistenza del terreno

c' = 3.00 (kN/mq)
 ϕ' = 32.00 (°)

Profondità della falda

Z_w = 1.00 (m)

Valori di progetto

c' = 3.00 (kN/mq)
 ϕ' = 32.00 (°)

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

VERIFICA DI SICUREZZA CAPACITA' PORTANTE

Nc, Nq, N_γ : coefficienti di capacità portante

$$N_q = \tan^2(45 + \varphi'/2) \cdot e^{(\pi \cdot \tan \varphi' / 4)}$$

$$N_c = (N_q - 1) / \tan \varphi'$$

$$N_{\gamma} = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan \varphi'$$

s_c, s_q, s_γ : fattori di forma

$$s_c = 1 + B \cdot N_q / (L \cdot N_c)$$

$$s_q = 1 + B \cdot \tan \varphi' / L$$

$$s_{\gamma} = 1 - 0,4 \cdot B / L$$

i_c, i_q, i_γ : fattori di inclinazione del carico

$$m_b = (2 + B / L) / (1 + B / L) \quad \theta = \arctg(T_b/T_l)$$

$$m_1 = (2 + L / B) / (1 + L / B) \quad (m=2 \text{ nel caso di fondazione nastriforme e } m=(m_b \sin^2 \theta + m_1 \cos^2 \theta) \text{ in tutti gli altri casi})$$

$$i_q = (1 - H / (N + B \cdot L \cdot c' \cot \varphi'))^m$$

$$i_c = i_q - (1 - i_q) / (N_q - 1)$$

$$i_{\gamma} = (1 - H / (N + B \cdot L \cdot c' \cot \varphi'))^{(m+1)}$$

d_c, d_q, d_γ : fattori di profondità del piano di appoggio

$$\text{per } D/B \leq 1; d_q = 1 + 2 D \tan \varphi' (1 - \sin \varphi')^2 / B$$

$$\text{per } D/B > 1; d_q = 1 + (2 \tan \varphi' (1 - \sin \varphi')^2) \cdot \arctan(D / B)$$

Considerare il fattore di profondità d_q?

NO

$$d_c = d_q - (1 - d_q) / (N_c \tan \varphi')$$

$$d_{\gamma} = 1$$

b_c, b_q, b_γ : fattori di inclinazione base della fondazione

$$b_q = (1 - \beta_f \tan \varphi')^2 \quad \beta_f + \beta_p = 20.00$$

$$\beta_f + \beta_p < 45^\circ$$

$$b_c = b_q - (1 - b_q) / (N_c \tan \varphi')$$

$$b_{\gamma} = b_q$$

g_c, g_q, g_γ : fattori di inclinazione piano di campagna

$$g_q = (1 - \tan \beta_p)^2 \quad \beta_f + \beta_p = 20.00$$

$$\beta_f + \beta_p < 45^\circ$$

$$g_c = g_q - (1 - g_q) / (N_c \tan \varphi')$$

$$g_{\gamma} = g_q$$

Verifica di sicurezza capacità portante

$$q_{lim} / \gamma_R \geq q$$

Carico limite unitario

$$q_{lim} = 541.58 \quad (\text{kN/m}^2)$$

Pressione massima agente

$$q = N / B \cdot L = 170.50 \quad (\text{kN/m}^2)$$

0.38

Coefficiente di sicurezza

$$F_s = q_{lim} / q = 3.18 > 2.3$$

combinazione PP2 - F2 - MAX PESO - MAX VENTO - Condizione 2

VERIFICA A SCORRIMENTO

Verifica di sicurezza allo scorrimento

$$S_d / \gamma_R \geq H_d$$

Azione Resistente

$$S_d = N \cdot \tan \phi' + c' \cdot T_B = 8374.82 \quad (\text{kN/m}^2)$$

Taglio massimo agente

$$H_d = 1350.00 \quad (\text{kN/m}^2)$$

Coefficiente di sicurezza allo scorrimento

$$F_{scorr} = 6.20 > 1.1$$

combinazione PP4 - F6 - MIN PESO - MAX VENTO - Condizione 2

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

13.3.2 Cedimenti

L'analisi dei cedimenti è stata svolta per le sezioni ritenute più gravose in termini di sviluppo dei cedimenti (Pila P2).

In Figura 187 sono illustrati i parametri inseriti nel modello di calcolo per quanto riguarda le unità geotecniche coesive e il corpo del rilevato.

Limo argilloso e argilla limosa_1

Name: Color: Hatch:

Unit Weight (kN/m3): Sat. Unit Wt. (kN/m3):

Poisson Ratio: K0:

Immediate Settlement **Primary Consolidation** Secondary Consolidation Datum Dependency Stage Factors

☒ Primary Consolidation

Material Type:

mv (m2/kN): mvur (m2/kN):

Time-dependent Consolidation Analysis:

☐ Cv (cm2/s):

☒ K (cm/s):

B-bar:

Limo argilloso e argilla limosa_2

Name: Color: Hatch:

Unit Weight (kN/m3): Sat. Unit Wt. (kN/m3):

Poisson Ratio: K0:

Immediate Settlement **Primary Consolidation** Secondary Consolidation Datum Dependency Stage Factors

☒ Primary Consolidation

Material Type:

mv (m2/kN): mvur (m2/kN):

Time-dependent Consolidation Analysis:

☐ Cv (cm2/s):

☒ K (cm/s):

B-bar:

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

Limo sabbioso

Name: Color: Hatch:

Unit Weight (kN/m3): Sat. Unit Wt. (kN/m3):

Poisson Ratio: K0:

Immediate Settlement: **Primary Consolidation** Secondary Consolidation Datum Dependency Stage Factors

☒ Primary Consolidation

Material Type:

mv (m2/kN): mvur (m2/kN):

Time-dependent Consolidation Analysis:

☐ Cv (cm2/s):

☒ K (cm/s):

B-bar:

Figura 187: Input parametri geotecnici delle unità inseriti nel software di calcolo

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO ST PROGRESSIVO 712 REV. r00

13.3.2.1 Sezione P2

Nella seguente figura è rappresentato il modello di calcolo per la sezione analizzata:

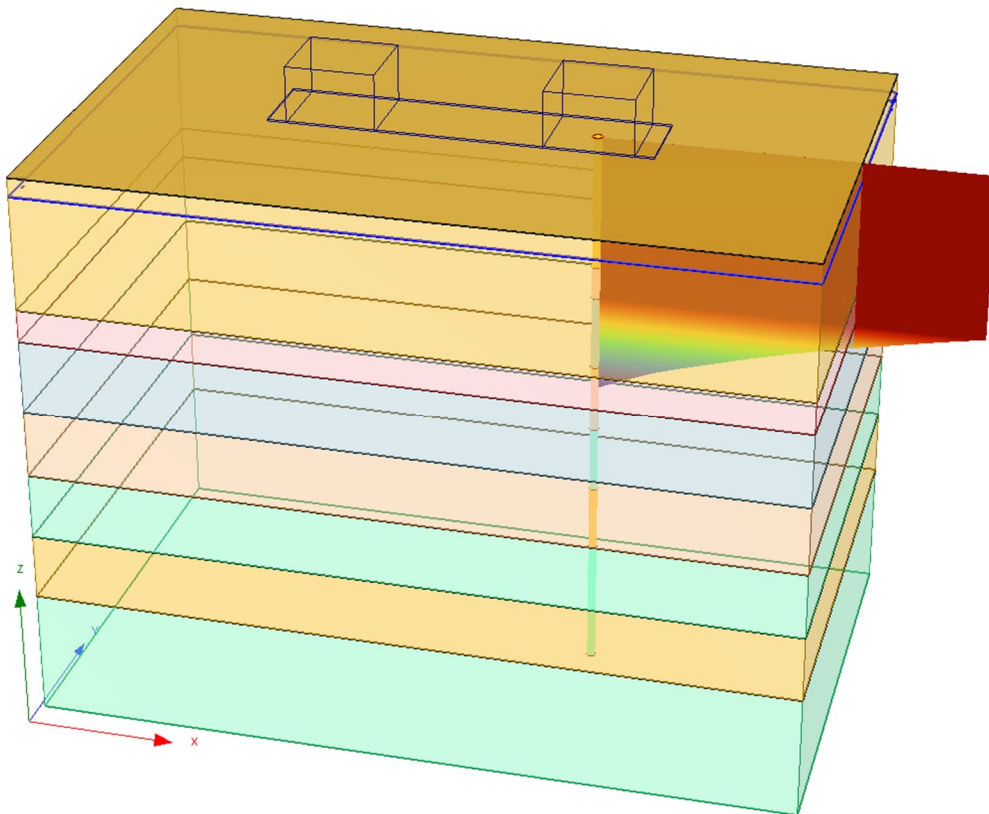


Figura 188: Modello di calcolo – Pila P2

Nella successiva tabella sono illustrati i risultati dell'analisi sotto forma di cedimenti nel tempo:

Tabella 47: Risultati analisi cedimenti – Pila P2

	Sez.P2
Altezza fondazione (m)	1.5
Larghezza fondazione (m)	6.5
Lunghezza fondazione (m)	30
Cedimento elastico (cm): t=1 mese e q1	0.18
Cedimento elastico (cm): t=3 mesi e q2	8.1
Cedimento MAX consolidazione (cm)_ t=6 mesi	0.56
Cedimento max totale (cm)_ t=6 mesi	8.7

I cedimenti residui sono superiori ai 5 cm, non compatibili con la funzionalità dell'infrastruttura. Sono quindi stati previsti degli interventi di consolidamento del terreno con JG.

STAZIONE APPALTANTE: Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE: SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
STRUTTURE Relazione di calcolo spalle e fondazioni	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO ST	PROGRESSIVO 712	REV. r00

13.3.2.2 Sezione P2 - JG

Nella seguente figura è rappresentato il modello di calcolo per la sezione analizzata:

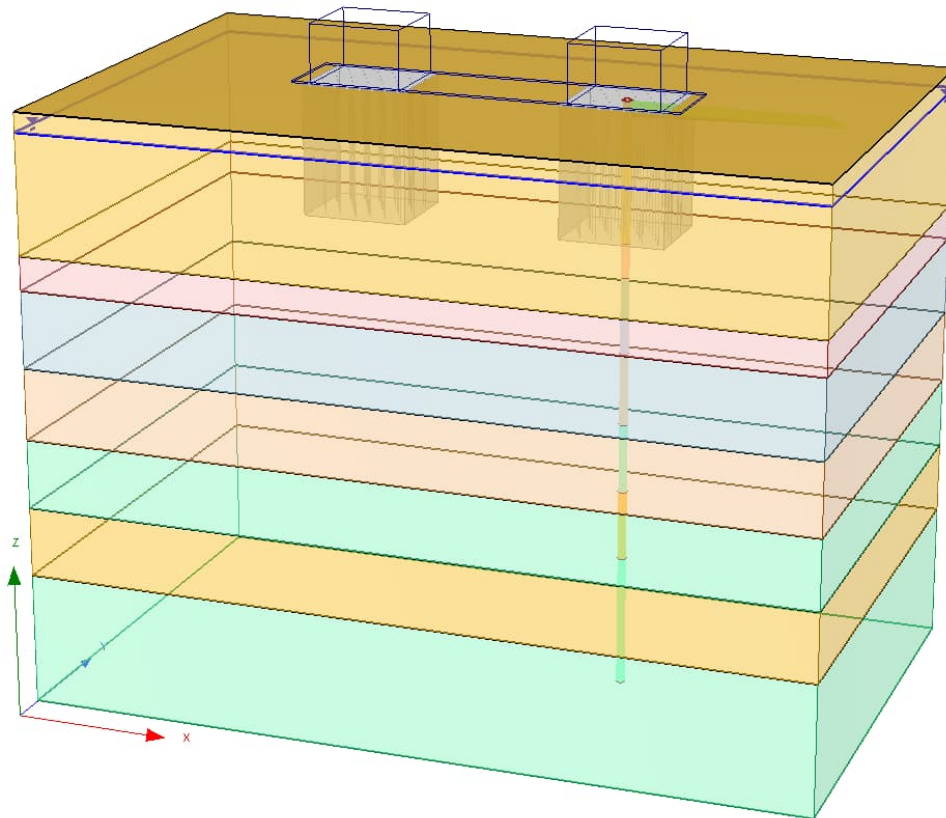


Figura 189: Modello di calcolo – Pila P2 JG

Nella successiva tabella sono illustrati i risultati dell'analisi sotto forma di cedimenti nel tempo:

Tabella 48: Risultati analisi cedimenti – Pila P2 JG

	Sez. P2 JG
Altezza fondazione (m)	1.5
Larghezza fondazione (m)	6.5
Lunghezza fondazione (m)	30
Cedimento elastico (cm): t=1 mese e q1	0.07
Cedimento elastico (cm): t=3 mesi e q2	3.7
Cedimento MAX consolidazione (cm)_ t=6 mesi	0.53
Cedimento max totale (cm)_ t=6 mesi	4.2

A valle dell'intervento di consolidamento del terreno di fondazione tramite JG, il massimo cedimento è inferiore ai 5 cm. I cedimenti risultano quindi compatibili con la funzionalità dell'infrastruttura.