

**MINISTERO
DELLE INFRASTRUTTURE E DELLA MOBILITÀ SOSTENIBILI
STRUTTURA TECNICA DI MISSIONE
COMUNE DI TORINO**



**METROPOLITANA AUTOMATICA DI TORINO
LINEA 2 – TRATTA POLITECNICO – REBAUDENGO**

**PROGETTAZIONE DEFINITIVA
Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo - Bologna**

PROGETTO DEFINITIVO		INFRATRASPORTI.TO S.r.l.																					
DIRETTORE PROGETTAZIONE Responsabile integrazione discipline specialistiche	IL PROGETTISTA																						
Ing. R. Crova Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 60385	Ing. F. Rizzo Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 9337K	STRUTTURE E METODI COSTRUTTIVI STAZIONI SUPERFICIALI – STAZIONE BOLOGNA RELAZIONE DI CALCOLO OPERE DI SOSTEGNO E STRUTTURE ACCESSI STAZIONE																					
		ELABORATO										REV.		SCALA	DATA								
		Int.	Est.											-	07/10/2022								
BIM MANAGER Geom. L. D'Accardi		MT	L2	T1	A1	D	STR	SBO	R	003	0	1	-	07/10/2022									

AGGIORNAMENTI

Fg. 1 di 1

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	VISTO
0	EMISSIONE	22/12/21	VFI	ECa	FRi	RCr
1	EMISSIONE FINALE A SEGUITO DI VERIFICA PREVENTIVA	07/10/22	VFI	ECa	FRi	RCr
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-

<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="padding: 2px;">LOTTO 1</td> <td style="padding: 2px;">CARTELLA</td> <td style="padding: 2px;">9.1.5</td> <td style="padding: 2px;">3</td> <td style="padding: 2px;">MTL2T1A1D</td> <td style="padding: 2px;">STRSBOR003</td> </tr> </table>	LOTTO 1	CARTELLA	9.1.5	3	MTL2T1A1D	STRSBOR003	<p>STAZIONE APPALTANTE</p> <p>DIRETTORE DI DIVISIONE INFRASTRUTTURE E MOBILITÀ Ing. R. Bertasio</p> <p>RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. A. Strozziro</p>
LOTTO 1	CARTELLA	9.1.5	3	MTL2T1A1D	STRSBOR003		

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

INDICE

1	GENERALITA'	6
2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	12
2.1	NORMATIVE DI RIFERIMENTO	12
3	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	13
3.1	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	13
4	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	15
5	OPERE TEMPORANEE	18
5.1	MODELLO DI CALCOLO	18
5.1.1	CRITERI DI MODELLAZIONE	18
5.1.2	ANALISI DEI CARICHI	22
5.2	RISULTATI DELLE ANALISI E VERIFICHE STRUTTURALI	23
5.2.1	RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE	23
5.2.1.1	Schema A	23
5.2.1.2	Schema B	23
5.2.1.3	Schema C	24
5.2.2	VERIFICHE SLU-STR DELLA PARATIA	25
5.2.3	VERIFICHE SLU-GEO COLLASSO DELL'INSIEME TERRENO-OPERA	25
5.2.4	VERIFICA SLU-STR DEL PUNTONE	26
5.2.5	VERIFICA SLU-STR DEL CORDOLO DI SUPERFICIE	27
5.2.6	VERIFICA SLU-STR DELLA TRAVE DI RIPARTIZIONE	27
5.2.7	VERIFICA DEFORMAZIONI MASSIME DELLE STRUTTURE DI SOSTEGNO	28
6	RIVESTIMENTI DEFINITIVI	31
6.1	PRINCIPALI ASSUNZIONI DELLA PROGETTAZIONE	31
6.1.1	MODELLAZIONE NUMERICA E SCHEMATIZZAZIONE STRUTTURALE DEL MODELLO	31
6.1.2	CARATTERIZZAZIONE SISMICA	32
6.1.3	COMBINAZIONI DI CARICO	33
6.1.4	RIGIDENZE DEL SUOLO ADOTTATE NEI MODELLI NUMERICI	34
6.2	ANALISI NUMERICA E VERIFICHE STRUTTURALI	35
6.2.1	ACCESSO A SBALZO	35
6.2.1.1	Carichi	35
6.2.1.2	Risultati dell'analisi e verifiche strutturali	39
6.2.2	ACCESSO CHIUSO	41

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

6.2.2.1	Carichi	41
6.2.2.2	Risultati dell'analisi e verifiche strutturali	46
6.2.3	VASCA ANTINCENDIO	48
6.2.3.1	Carichi	48
6.2.3.2	Risultati dell'analisi e verifiche strutturali	50
7	VALIDAZIONE DEI MODELLI DI CALCOLO	51
	APPENDICE A	57
	APPENDICE B	63
	APPENDICE C	66
	APPENDICE D	68
	APPENDICE E	72
	APPENDICE F	79
	APPENDICE G	83
	APPENDICE H	86
	APPENDICE I	89
	APPENDICE J	100
	APPENDICE K	108

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.	Schema A	7
Figura 2.	Schema B	8
Figura 3.	Schema C	9
Figura 4.	Disposizione in pianta diversi schemi di calcolo – schema	11
Figura 5.	Esempio di disposizione degli schemi per l'accesso Lato Nord	11
Figura 6.	Modello di calcolo PLAXIS (Schema C)	19
Figura 7.	Modello costitutivo Hardening Soil	19
Figura 8.	Schema A - Mesh di calcolo Plaxis	23
Figura 9.	Schema B - Mesh di calcolo Plaxis	24

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Figura 10. Schema C - Mesh di calcolo Plaxis	24
Figura 11. Particolare armatura trave di testa	27
Figura 12. Spostamenti Totali - Schema A	28
Figura 13. Spostamenti Totali - Schema B	29
Figura 14. Spostamenti Totali - Schema C	29
Figura 15. Schematizzazione metodo di Wood	32
Figura 16. Modello numerico – Accesso schema a sbalzo	35
Figura 17. Peso proprio – Accesso schema a sbalzo	36
Figura 18. Spinta orizzontale del terreno – Accesso schema a sbalzo	37
Figura 19. Pavimentazione – Accesso schema a sbalzo	37
Figura 20. Folla – Accesso schema a sbalzo	38
Figura 21. Traffico -Accesso schema a sbalzo	38
Figura 22. Spinta sismica Direzione X – Accesso schema a sbalzo	39
Figura 23. Schema di distribuzione dell’armatura principale – Accesso schema a sbalzo	39
Figura 24. Schema di distribuzione dell’armatura a taglio – Accesso schema a sbalzo	40
Figura 25. Modello numerico – Accesso schema chiuso	41
Figura 26. Peso proprio – Accesso schema chiuso	41
Figura 27. Spinta orizzontale del terreno – Accesso schema chiuso	42
Figura 28. Spinta idrostatica – Accesso schema chiuso	43
Figura 29. Ritombamento – Accesso schema chiuso	43
Figura 30. Pavimentazione – Accesso schema chiuso	44
Figura 31. Folla – Accesso schema chiuso	44
Figura 32. Traffico – Accesso schema chiuso	45
Figura 33. Spinta sismica direzione X – Accesso schema chiuso	45
Figura 34. Schema di distribuzione dell’armatura principale – Accesso schema chiuso	46
Figura 35. Schema di distribuzione dell’armatura a taglio – Accesso schema chiuso	46
Figura 36. Schema di calcolo – Muri Vasca di accumulo antincendio	48
Figura 37. Spinta idrostatica – Vasca di accumulo antincendio	49
Figura 38. Spinta sismica – Vasca di accumulo antincendio	49
Figura 39. Output PLAXIS: Inviluppo dello sforzo assiale, del taglio e del momento flettente - Schema A	59
Figura 40. Output PLAXIS: Inviluppo dello sforzo assiale, del taglio e del momento flettente – Schema B	61
Figura 41. Output PLAXIS: Inviluppo dello sforzo assiale, del taglio e del momento flettente – Schema C	62
Figura 42. Spostamenti orizzontali parete di micropali – Schema A	64
Figura 43. Spostamenti orizzontali parete di micropali – Schema B	64
Figura 44. Spostamenti orizzontali parete di micropali – Schema C	65
Figura 45. Sforzo assiale, taglio e momento di progetto per i diversi stage di calcolo – Schema A	69
Figura 46. Tensione di verifica secondo NTC - tensione a snervamento acciaio – Schema A69	

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Figura 47. Sforzo assiale, taglio e momento di progetto per i diversi stage di calcolo – Schema B	70
Figura 48. Tensione di verifica secondo NTC - tensione a snervamento acciaio – Schema B70	
Figura 49. Sforzo assiale, taglio e momento di progetto per i diversi stage di calcolo – Schema C	71
Figura 50. Tensione di verifica secondo NTC - tensione a snervamento acciaio – Schema C71	
Figura 51. Rapporto tra tensione tangenziale massima e tensione tangenziale mobilitata – Schema A	73
Figura 52. Tensioni orizzontali efficaci paratia - Lato monte e valle – Schema A	74
Figura 53. Confronto tensioni limite attive e passive con tensioni orizzontali Plaxis – Schema A	74
Figura 54. Rapporto tra tensione tangenziale massima e tensione tangenziale mobilitata – Schema B	75
Figura 55. Tensioni orizzontali efficaci paratia - Lato monte e valle – Schema B	76
Figura 56. Confronto tensioni limite attive e passive con tensioni orizzontali Plaxis – Schema B	76
Figura 57. Rapporto tra tensione tangenziale massima e tensione tangenziale mobilitata – Schema C	77
Figura 58. Tensioni orizzontali efficaci paratia - Lato monte e valle – Schema C	78
Figura 59. Confronto tensioni limite attive e passive con tensioni orizzontali Plaxis – Schema C	78
Figura 60. Verifica Puntone – Schema B	81
Figura 61. Verifica Puntone – Schema C	82
Figura 62. Particolare armature trave di testa	84
Figura 63. Momento flettente M3-3	90
Figura 64. Taglio combinato	90
Figura 65. Momento flettente M3-3	91
Figura 66. Taglio combinato	91
Figura 67. Momento flettente M3-3	92
Figura 68. Taglio combinato	92
Figura 69. Momento flettente M3-3	93
Figura 70. Taglio combinato	93
Figura 71. Momento flettente M3-3	94
Figura 72. Taglio combinato	94
Figura 73. Momento flettente M3-3	101
Figura 74. Taglio combinato	101
Figura 75. Momento flettente M3-3	102
Figura 76. Taglio combinato	102
Figura 77. Momento flettente M3-3	103
Figura 78. Taglio combinato	103
Figura 79. Momento flettente M3-3	104

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Figura 80. Taglio combinato	104
Figura 81. Momento flettente M3-3	105
Figura 82. Taglio combinato	105
Figura 83. Muro Vasca di accumulo - Momento flettente – SLE	109
Figura 84. Muro Vasca di accumulo - Taglio – SLE	109
Figura 85. Muro Vasca di accumulo - Momento flettente – SLU Statico	110
Figura 86. Muro Vasca di accumulo - Taglio – SLU Statico	110
Figura 87. Muro Vasca di accumulo - Momento flettente – SLU Sisma	111
Figura 88. Muro Vasca di accumulo - Taglio – SLU Sisma	111
Figura 89. Muro Vasca di accumulo - Momento flettente – Involuppo SLU	112
Figura 90. Muro Vasca di accumulo - Taglio – Involuppo SLU	112

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

1 GENERALITA'

La presente relazione si inserisce nell'ambito della progettazione definitiva della Metropolitana Automatica di Torino – Linea2. In particolare, il presente elaborato descrive i calcoli e le verifiche relative alle opere provvisorie di sostegno per lo scavo degli accessi e dei vani di ventilazione, così come i rivestimenti definitivi delle stesse strutture appena elencate.

Le opere provvisorie sono caratterizzate da cortine di micropali tipo ODEX iniettati in fori di 220 mm con tubo di acciaio del diametro di 193.7 mm spessore 8.0 mm. L'interasse tra i pali è di 0.40 m e risultano collegati in testa per mezzo di una trave di coronamento in calcestruzzo armato.

Dove necessario, sono previsti livelli di puntoni tipo 219.1/8 e 298.5/8 messi in contrasto alla trave di coronamento o, mediante trave di ripartizione, al diaframma di stazione.

I rivestimenti definitivi invece dimensionati e riportati qui riguardano le fodere, soletta di copertura e soletta di fondo degli accessi, griglie di ventilazione e vasche antincendio, che hanno uno spessore di 60 cm ciascuno.

Per quanto riguardano le opere temporanee, in funzione delle quote di scavo da dover raggiungere ed in funzione dei vincoli costruttivi, sono previste le seguenti tipologie di pareti:

- **Schema A:** micropali di lunghezza 6 metri a sostegno di uno scavo di 3 metri
Tale schema è impiegato negli accessi in stazione e per gli scavi necessari per la realizzazione dei diaframmi del corpo stazione.
- **Schema B:** micropali di lunghezza 8 metri con un livello di puntoni a sostegno di 6 metri di scavo. Il puntone è posizionato rispettivamente in testa in corrispondenza dell'asse del cordolo di testata.
- **Schema C:** micropali di lunghezza 13 metri con due livelli di puntoni a sostegno di 10 metri di scavo. I due puntoni sono posizionati rispettivamente uno in testa e l'altro ad una distanza di 5 m dal cordolo di testata.

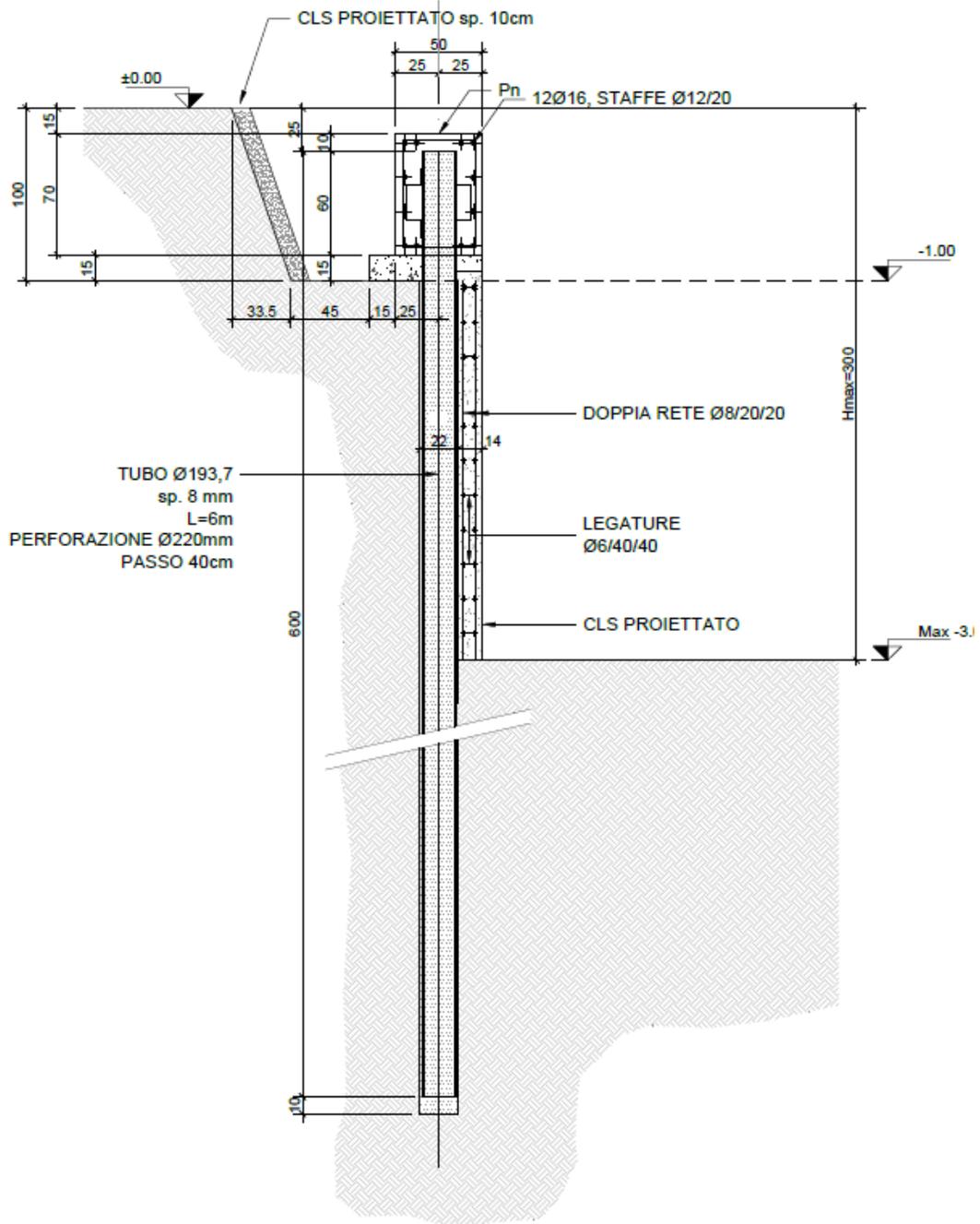


Figura 1. Schema A

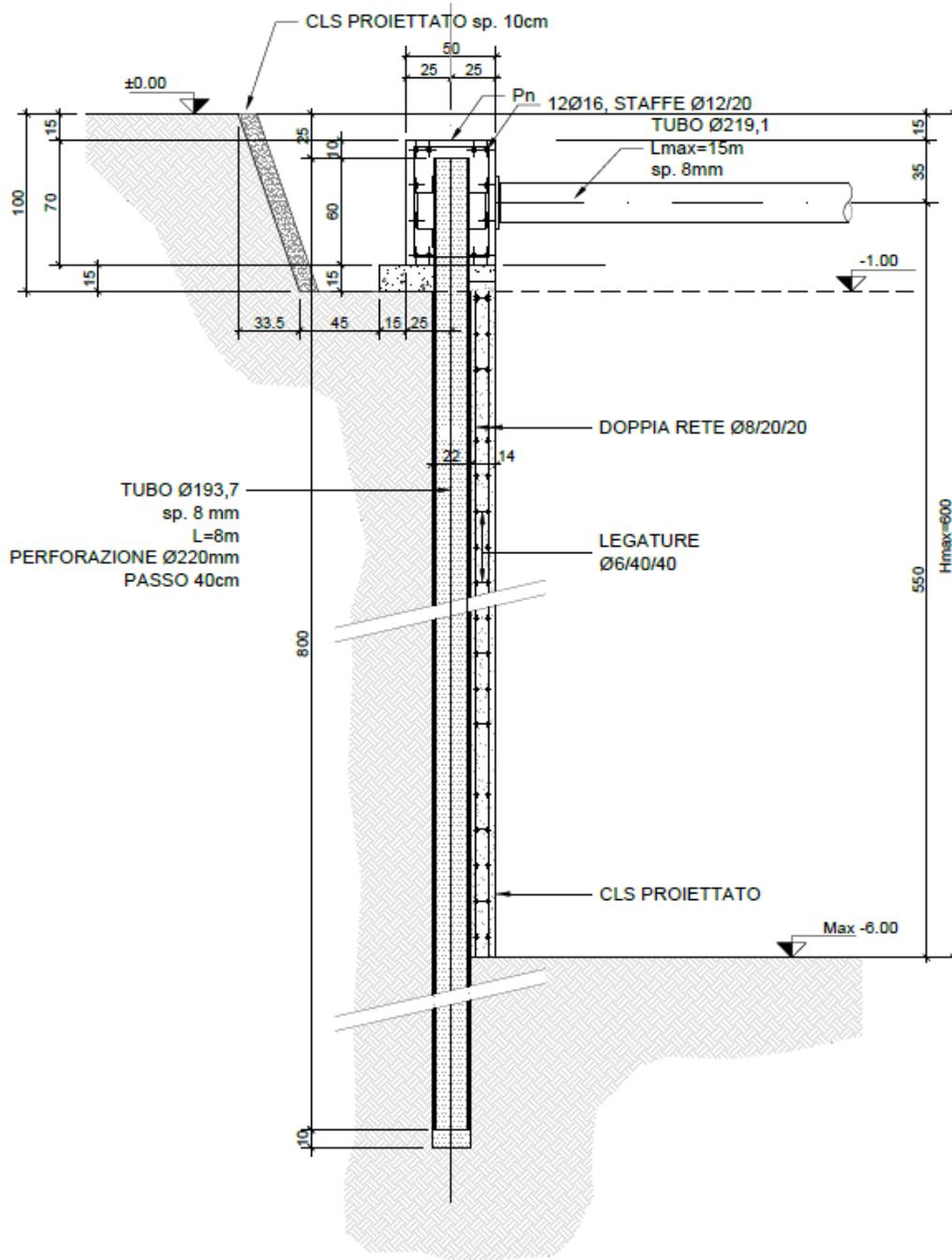


Figura 2. Schema B

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Successivamente per gli scatolari in c.a. in oggetto sono state individuate le sezioni strutturali rappresentative per la definizione degli spessori e delle incidenze dei rinforzi in acciaio dei rivestimenti definitivi; tali strutture sono indicate di seguito:

- Accesso a sbalzo: Parte più superficiale degli accessi, schema strutturale di una parete a sbalzo alta 5.5m con soletta di fondazione, entrambi con spessore 60cm;
- Accesso chiuso: Parte più profonda degli accessi, schema strutturale di uno scatolare continuo di altezza 6.5m con soletta di fondazione e copertura, tutti con spessore 60cm;
- Vasca antincendio: Struttura interna alla stazione.

Di seguito vengono indicate le applicazioni delle sezioni tipo di scavo per la stazione in oggetto.

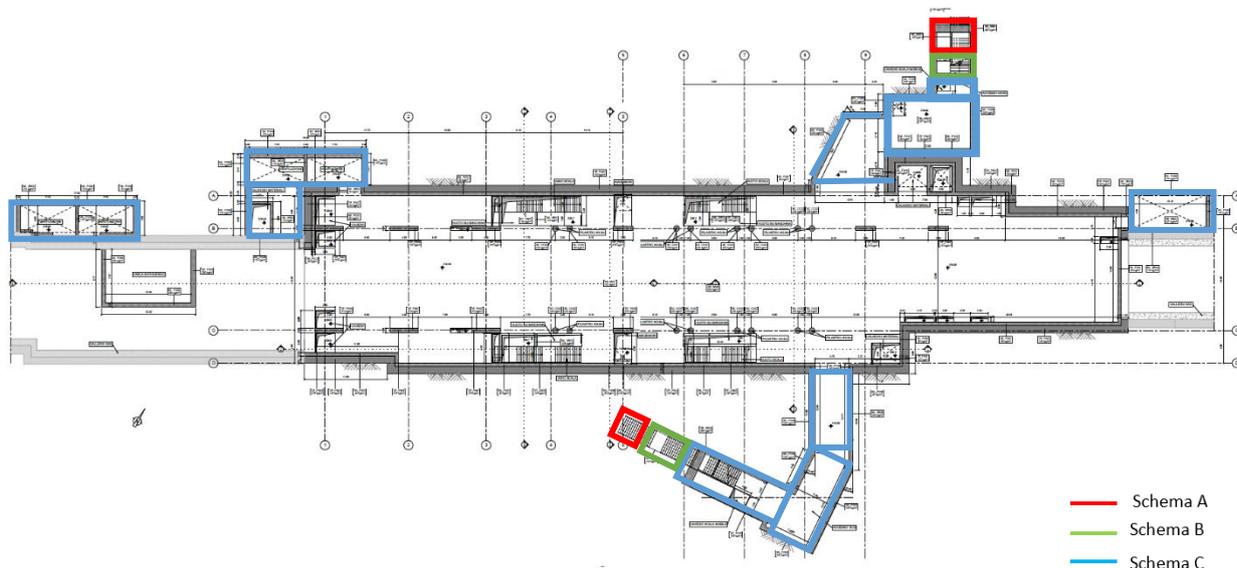


Figura 4. Disposizione in pianta diversi schemi di calcolo – schema

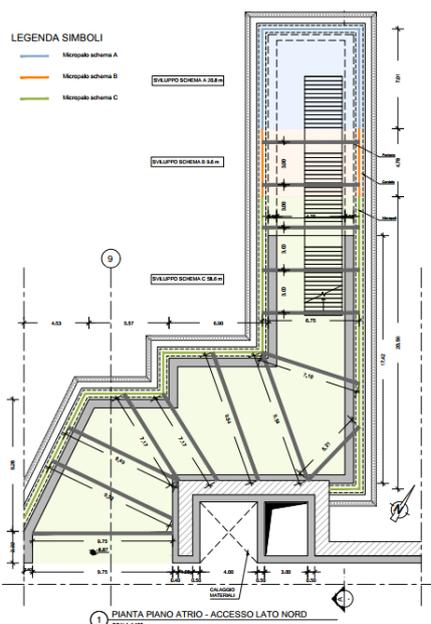


Figura 5. Esempio di disposizione degli schemi per l'accesso Lato Nord

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Normative di riferimento

Le analisi strutturali e le verifiche di sicurezza sono state effettuate in accordo con le prescrizioni delle seguenti normative.

1. Legge n°1086 del 05/11/1971: "Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica"
2. DM 17 gennaio 2018: Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le costruzioni" (GU n.42 del 20/02/2018);
3. Circolare 21 gennaio 2019 n.7: Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"»
4. D.M. 21/10/2015: "Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio delle metropolitane";
5. D.M. 16/02/2007 – Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione.
6. UNI 9502-2001: "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso".
7. UNI 9503-2007: "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi in acciaio".
8. UNI EN 206-1:2016, "Calcestruzzo – Parte 1: specificazione, prestazione, produzione e conformità".
9. UNI 11104-2016, "Calcestruzzo – Parte 1: specificazione, prestazione, produzione e conformità - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1".
10. Legge 2 febbraio 1974, n. 64: "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche"
11. D.G.R. 30 Dicembre 2019, n. 6-887: "Presenza d'atto e approvazione dell'aggiornamento della classificazione sismica del territorio della Regione Piemonte"

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

12. D.G.R. 26 Novembre 2021, n. 10-4161: "Approvazione delle nuove procedure di semplificazione attuative di gestione e controllo delle attività urbanistico-edilizie ai fini della prevenzione del rischio sismico".

3 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

3.1 Caratteristiche dei materiali

Con riferimento ai materiali utilizzati nell'ambito del progetto, si riportano nel seguito le principali caratteristiche utilizzate nel dimensionamento strutturale.

- **Calcestruzzo**

Calcestruzzo utilizzato per cordoli di testata

Tipo:	C25/30
Modulo di deformazione:	$E_c=31400$ MPa
Resistenza caratteristica cubica:	$R_{ck}=30$ MPa
Resistenza caratteristica cilindrica:	$f_{ck}=25$ MPa
Peso per unità di volume:	$\gamma=25$ KN/m ³

Malta di iniezione per micropali

Tipo:	C20/25
Modulo di deformazione:	$E_c=30000$ MPa
Resistenza caratteristica cubica:	$R_{ck}=25$ MPa
Resistenza caratteristica cilindrica:	$f_{ck}=20$ MPa
Peso per unità di volume:	$\gamma=25$ KN/m ³

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Calcestruzzo utilizzato per i solai di stazione e strutture interne

Tipo:	C30/37
Modulo di deformazione:	$E_c=32000$ MPa
Resistenza caratteristica cubica:	$R_{ck}=37$ MPa
Resistenza caratteristica cilindrica:	$f_{ck}=30$ MPa
Peso per unità di volume:	$Y=25$ KN/m ³
Classe di Esposizione	XC3 (Calcestruzzo all'interno di edifici con umidità dell'aria moderata oppure elevata / Calcestruzzo esposto all'esterno protetto dalla pioggia)

• **Acciaio di armatura**

Tipo:	B450C
Modulo di deformazione:	$E_c=210000$ MPa
Resistenza a snervamento caratteristica:	$f_{ck}=450$ MPa
Resistenza a snervamento di progetto:	$f_{cd}=391.3$ MPa
Peso per unità di volume:	$\gamma=75$ KN/m ³

• **Profilati e tubi in acciaio (puntoni, micropali, travi ripartizione)**

Tipo:	S355 J0	
	$t \leq 40\text{mm}$	$40\text{mm} < t \leq 80\text{mm}$
Modulo di deformazione:	$E_c=210000$ MPa	$E_c=210000$ MPa
Resistenza a snervamento caratteristica:	$f_{yk}=355$ MPa	$f_{yk}=335$ MPa
Resistenza a snervamento di progetto:	$f_{yd}=338$ MPa	$f_{yd}=319$ MPa
Resistenza a rottura caratteristica:	$f_{yk}=510$ MPa	$f_{yk}=470$ MPa
Peso per unità di volume:	$\gamma=78$ KN/m ³	$\gamma=78$ KN/m ³

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

- **Saldature**

Le saldature dovranno essere in accordo alla UNI 5132 (elettrodi di classe 2,3,4) e dovranno essere realizzate a cordoni esterni.

4 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

La campagna di indagine ha portato alla determinazione dei seguenti parametri geotecnici per la stazione in oggetto:

Tabella 1 Parametri fisico-meccanici del terreno

Unità geologica	Profondità da p.c. [m]	g [kN/m ³]	c' [kPa]	φ' [°]	E [MPa]	v' [-]
U1	0-2.0	19	0	29	15	0.3
U2	2.0-30	19	10	36	150	0.3

I livelli di falda di riferimento sono distinti per condizioni di breve periodo e lungo periodo come indicato di seguito:

Tabella 2 Livelli di falda

	m da p.c.	m.s.l.m
Livello piezometrico 2021 (MTL2T1A0DGEOSBOT001)	-12.6	+212.32
Livello piezometrico 2018 da p.c.	-12.0	+212.92
B T (+1.5 da livello piezometrico di riferimento) - Fase costruttiva	-10.5	+214.42
L T (+3 da breve termine) - Ultimo stage	-7.5	+217.42

Allo scopo di validare un tipologico valido per le varie condizioni di falda delle stazioni, per le strutture interne degli accessi e la vasca di accumulo è stato ipotizzato un livello di falda di lungo periodo pari a -3.0m da piano campagna.

A seconda della verifica che si intende effettuare, verranno utilizzati coefficienti che riducono i parametri meccanici di resistenza del terreno o coefficienti che amplificano gli effetti delle azioni. In particolare, seguendo quanto prescritto al punto 6.2.3 delle Norme Tecniche per le Costruzioni, si sono considerati i seguenti approcci di verifica:

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

- Verifiche SLU-GEO: A₁ - C₂
- Verifiche SLU-STR: A₁ - C₁

Tabella 3 Coefficienti amplificativi dei carichi secondo NTC

Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G ₁	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti G ₂ ⁽¹⁾	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Q1}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G₂ si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}

Tabella 4 Coefficienti riduttivi dei parametri di resistenza del terreno secondo NTC

Tab. 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

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

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Tabella 5 Coefficienti riduttivi della resistenza globale del sistema secondo NTC

Tab. 6.5.I - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi di muri di sostegno

Verifica	Coefficiente parziale (R3)
Capacità portante della fondazione	$\gamma_R = 1,4$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$
Ribaltamento	$\gamma_R = 1,15$
Resistenza del terreno a valle	$\gamma_R = 1,4$

Tabella 6 Riassunto parametri utilizzati nel calcolo

Unità geologica	γ [kN/m ³]	c_k' [kPa]	ϕ_k' [°]	K0 [-]
U1	19	0	29	0.5152
U2	19	10	36	0.4122

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

5 OPERE TEMPORANEE

5.1 Modello di calcolo

Le analisi strutturali e geotecniche sono state effettuate mediante il software di calcolo agli elementi finiti PLAXIS2D, bidimensionale. Tale software di calcolo fa uso del metodo degli elementi finiti per simulare il comportamento del terreno soggetto a modifiche nel suo stato tensionale. Mediante tale programma FEM è stato possibile simulare tutte le fasi di lavoro portando in conto il comportamento non lineare del terreno.

I modelli di calcolo sono stati generati con una maglia di elementi triangolari a 15 nodi impostando la posizione dei bordi in maniera tale che nessun disturbo venga indotto alla soluzione numerica.

Tutte le strutture sono state modellate mediante elementi già implementati nella libreria del software. In particolare, si è utilizzato:

- per le pareti di micropali: elementi "plate"
- per i puntoni di rinforzo: elementi "node to node anchor";

Le travi di ripartizione non sono state simulate in questa fase di analisi.

Nel seguito verranno presentati i criteri di modellazione ed i risultati per tutte le lavorazioni descritte.

5.1.1 Criteri di modellazione

Attraverso l'analisi numerica si intende simulare il percorso delle tensioni e delle deformazioni nel terreno conseguente allo scavo.

La condizione geostatica è stata inizializzata ipotizzando un coefficiente di spinta a riposo K_0 ottenuto attraverso la relazione di Jaky:

$$K_0 = 1 - \text{sen}\varphi'$$

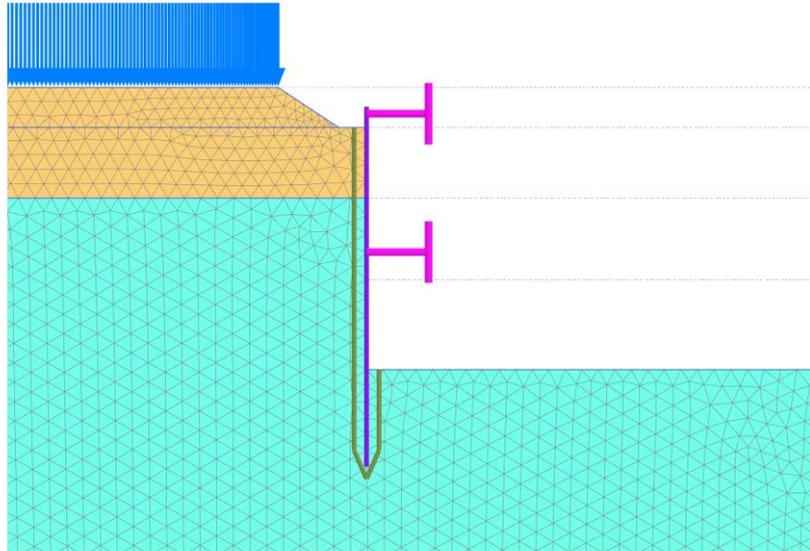
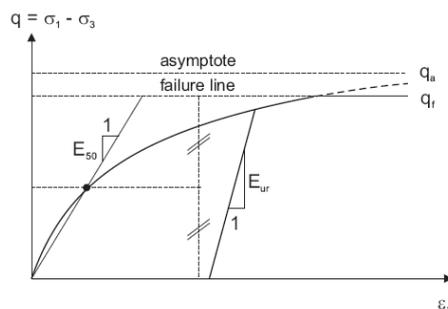


Figura 6. Modello di calcolo PLAXIS (Schema C)

Per il terreno è stato utilizzato un modello costitutivo elasto-plastico incrudente tipo "Hardening Soil". In tale modello, esattamente come in quello di Mohr Coulomb, la legge di resistenza è di tipo attritivo scandita dalla coesione c' e dall'angolo di attrito ϕ' . L'angolo di dilatanza ψ è posto uguale 0° . Attraverso il modello "Hardening Soil" è possibile descrivere con maggiore dettaglio il comportamento del terreno lontano dalle condizioni di rottura attraverso l'impostazione di tre parametri: E_{50} , modulo di deformabilità secante al 50% del carico di rottura, modulo edometrico E_{oed} e modulo di scarico e ricarico E_{ur} .



$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{\sigma'_1}{P_{ref}} \right)^m$$

$$E_{oed} = \alpha \cdot \sigma'_1{}^m$$

$$P_{ref} = 100 \text{ kPa}$$

Figura 7. Modello costitutivo Hardening Soil

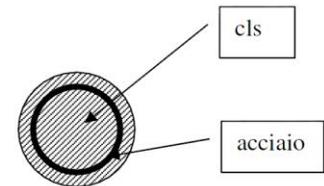
L'attrito tra parete e terreno è stato simulato nel software mediante l'introduzione di una interfaccia. L'attrito è stato posto pari al 50% della resistenza al taglio del terreno.

Di seguito si riportano le caratteristiche con le quali sono stati modellati gli elementi strutturali:



- **Parete di micropali:** tali elementi sono stati modellati come elementi "beam" attraverso le caratteristiche di rigidezza flessionale ed assiale.

- diametro esterno palo in acciaio	$D_A=193.7 \text{ mm}$
- spessore palo in acciaio	$t=8\text{mm}$
- momento di inerzia palo in acciaio	$I_S=1.814e7 \text{ mm}^4$
- modulo elasticità acciaio	$E_S=210000 \text{ MPa}$
- diametro di perforazione palo	$D_P=220.0 \text{ mm}$
- momento di inerzia area malta	$I_C=9.483e7 \text{ mm}^4$
- modulo di elasticità malta	$E_C=22000 \text{ MPa}$
- interasse tra i pali	$i=400 \text{ mm}$



L'inerzia equivalente, scegliendo il calcestruzzo come materiale rispetto al quale omogeneizzare la sezione, risulta:

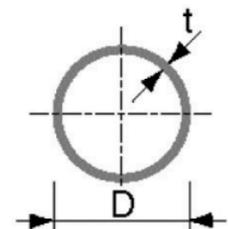
$$I_{EQ} = (E_C I_C + E_S I_S) / (i \times E_C) = 7.68e-4 \text{ m}^4$$

$$h_{EQ} = (12 \times I_{EQ})^{1/3} = 0.210 \text{ m}$$

- **Puntone di rinforzo:** tali elementi sono stati modellati come elementi "node to node anchor" reagenti solo a compressione. Le caratteristiche delle sezioni utilizzate come puntone provvisorio di rinforzo sono riportate nel seguito:

- **Tipologia di puntone 1**

- diametro esterno puntone (tubo di acciaio)	$D_P=219.1 \text{ mm}$
- spessore puntone (tubo di acciaio)	$t=8.0 \text{ mm}$
- peso a metro lineare puntone	$p=413.8 \text{ N/m}$
- area della sezione in acciaio del puntone	$A_P=5305.5 \text{ mm}^2$
- momento di inerzia della sezione	$I_P=2.96e7 \text{ mm}^4$
- modulo elasticità acciaio	$E_S=210000 \text{ MPa}$
- lunghezza media puntone (schema B, C / D)	$L=7.6 / 13 \text{ m}$
- interasse medio puntone (schema B, C / D)	$i=3 / 3.5 \text{ m}$



La rigidezza del puntone a metro lineare risulta dunque:

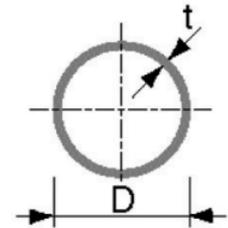
$$\text{Puntone } L=7.6\text{m} / i=3\text{m} \quad K_1=EA_P/L=1.47e8 \text{ N/m} \quad K_1^*=K_1/i=4.89e7 \text{ N/m/m}$$

$$\text{Puntone } L=13\text{m} / i=3.5\text{m} \quad K_2=EA_P/L=8.57e7 \text{ N/m} \quad K_2^*=K_2/i=2.45e7 \text{ N/m/m}$$



- **Tipologia di puntone 2**

- *diametro esterno puntone (tubo di acciaio)* $D_P=298.5 \text{ mm}$
- *spessore puntone (tubo di acciaio)* $t=8.0 \text{ mm}$
- *peso a metro lineare puntone* $p=562.11 \text{ N/m}$
- *area della sezione in acciaio del puntone* $A_P=7301.06 \text{ mm}^2$
- *momento di inerzia della sezione* $I_P=7.71e7 \text{ mm}^4$
- *modulo elasticità acciaio* $E_S=210000 \text{ MPa}$
- *lunghezza media puntone (schema D)* $L=13 \text{ m}$
- *interasse medio puntoni (schema D)* $i=3.5 \text{ m}$



$$\text{Puntone } L=13\text{m} / i=3.5\text{m} \quad K_3=EA_P/L=1.18e8 \text{ N/m} \quad K_3^*=K_3/i=3.37e7 \text{ N/m/m}$$

Lo scavo è stato simulato mediante diverse fasi di calcolo al fine di seguire la non linearità di comportamento del terreno. Con riferimento alla tabella 6, si riportano le fasi costruttive simulate nel software per tutti gli schemi considerati:

Tabella 7 Fasi di scavo per i diversi schemi di analisi

Schema A	Schema B
<u>Stage 1</u> Inizializzazione tensioni geostatiche; <u>Stage 2</u> Pre-scavo ed inizializzazione del carico variabile a tergo della parete; <u>Stage 3</u> Installazione parete di micropali; <u>Stage 4</u> Scavo sino alla quota di fondo scavo.	<u>Stage 1</u> Inizializzazione tensioni geostatiche; <u>Stage 2</u> Pre-scavo ed inizializzazione del carico variabile a tergo della parete; <u>Stage 3</u> Installazione parete di micropali e puntone di testa; <u>Stage 4</u> Scavo sino alla quota di fondo scavo.
Schema C	
<u>Stage 1</u> Inizializzazione tensioni geostatiche; <u>Stage 2</u> Pre-scavo ed inizializzazione del carico variabile a tergo della parete; <u>Stage 3</u> Installazione parete di micropali e puntone di testa; <u>Stage 4</u> Scavo sino alla quota di installazione del secondo livello di puntoni; <u>Stage 5</u> Installazione secondo livello di puntoni Scavo sino alla quota di fondo scavo.	

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

5.1.2 Analisi dei carichi

Per quanto riguarda i carichi utilizzati nell'analisi numerica, si possono distinguere:

Peso proprio

Il peso proprio degli elementi strutturali è applicato automaticamente dal software.

Spinta del terreno

Le spinte sono state valutate automaticamente dal software, a seconda dell'analisi effettuata, nota la stratigrafia di cui al paragrafo 4 della presente.

Spinta idrostatica

La falda non interviene nel calcolo in quanto situata per l'intero tratto a profondità di molto superiori rispetto a quelle di interesse.

Carichi variabili – traffico

Un carico variabile pari a 20 kN/m² uniformemente distribuito è applicato a tergo della parete in tutte le fasi di calcolo.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

5.2 RISULTATI DELLE ANALISI E VERIFICHE STRUTTURALI

5.2.1 Risultati delle analisi numeriche

5.2.1.1 Schema A

Lo schema A è caratterizzato da micropali di lunghezza 6 metri a sostegno di uno scavo di 3 metri. Tale schema è impiegato negli accessi in stazione nella sezione più superficiale.

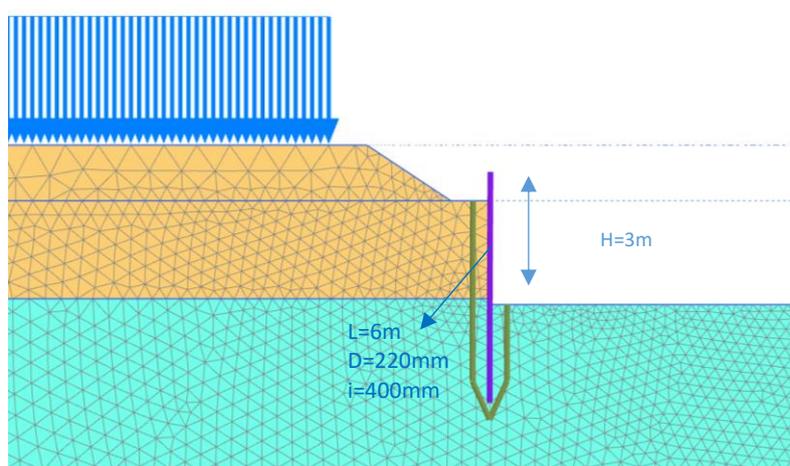


Figura 8. Schema A - Mesh di calcolo Plaxis

5.2.1.2 Schema B

Lo Schema B è caratterizzato da micropali di lunghezza 8 metri con un livello di vincolo in testa a sostegno di uno scavo di 6 metri. Tale schema è impiegato per lo scavo degli accessi in sezione di altezza intermedia.

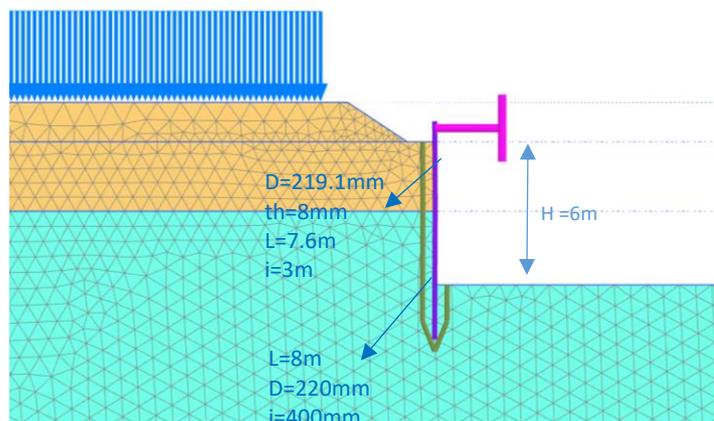


Figura 9. Schema B - Mesh di calcolo Plaxis

5.2.1.3 Schema C

Lo Schema C è caratterizzato da micropali di lunghezza 13 metri con due livelli di vincolo, uno in testa e un altro posto successivamente 5m sotto, a sostegno di uno scavo totale di 10 metri. Tale schema è impiegato per lo scavo e la realizzazione degli accessi così come delle ventilazioni in sezione di altezza massima.

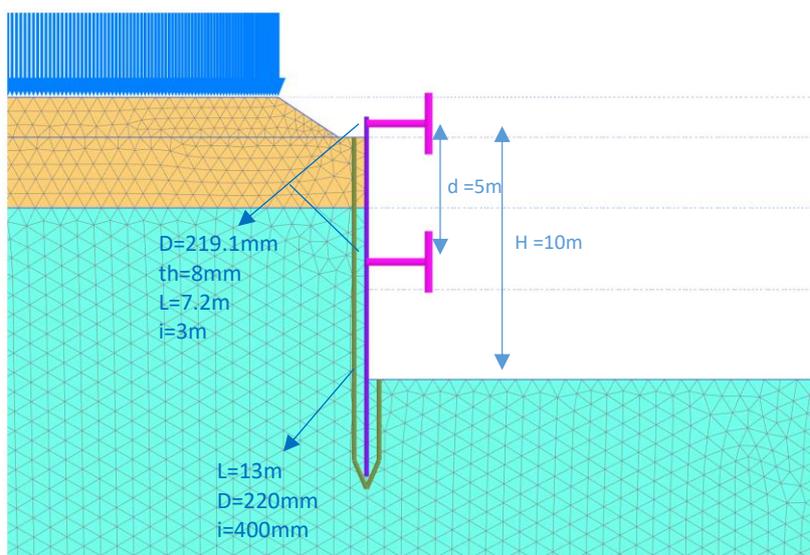


Figura 10. Schema C - Mesh di calcolo Plaxis

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

5.2.2 Verifiche SLU-STR della paratia

Dall'analisi di interazione terreno-struttura mediante il software PLAXIS, si ottengono i valori caratteristici delle sollecitazioni sui micropali. Per le verifiche si provvederà ad amplificare tali azioni secondo l'approccio normativo A1 C1 mediante i coefficienti parziali del gruppo $A_1+M_1+R_1$. Le sollecitazioni sulla parete sono state amplificate, in via cautelativa, non operando una distinzione in termini di azioni "permanenti" (terreno a tergo della parete) ed azioni "variabili" (sovraccarico di 20 kPa).

Tutti gli effetti delle azioni sono stati amplificati per il coefficiente amplificativo delle azioni variabili 1.5.

Secondo quanto prescritto al 6.2.3.1 delle NTC18, sia per le pareti, sia per il puntone si è garantito il soddisfacimento della disuguaglianza:

$$E_d \geq R_d$$

con

$$E_d = \gamma_E \cdot E \left[F_K; \frac{X_K}{\gamma_M}; a_d \right] \quad R_d = \frac{1}{\gamma_R} \cdot R \left[\gamma_F F_K; \frac{X_K}{\gamma_M}; a_d \right]$$

Ipotizzando come sezione resistente la sola sezione in acciaio del micropalo, La verifica della parete verticale viene eseguita secondo quanto prescritto dalle NTC18: a partire dalla sollecitazione di sforzo assiale, taglio e momento flettente sul singolo palo, si è provveduto a valutare la tensione normale e la tensione tangenziale sulla sezione combinandole secondo la relazione:

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

5.2.3 Verifiche SLU-GEO collasso dell'insieme terreno-opera

La verifica è stata condotta secondo l'approccio A_1-C_2 utilizzando i coefficienti del gruppo $A_2+M_2+R_2$ in accordo con le NTC18, ipotizzando un meccanismo globale di collasso. In particolare, è stato realizzato un modello Plaxis riducendo i parametri di resistenza del terreno secondo i coefficienti del gruppo M_2 .

Al fine di scongiurare l'attivazione di un meccanismo plastico, in questa analisi la parete di micropali ed i puntoni presentano comportamento elasto-plastico; le soglie di plasticizzazione sono scandite, rispettivamente, dal momento di plasticizzazione e dal carico critico di

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

compressione. Il soddisfacimento della verifica SLU-GEO si traduce nel garantire che le strutture rimangano in campo elastico e che non siano totalmente mobilitate le resistenze a monte e a valle della parete.

Tabella 8 Riassunto parametri utilizzati nel calcolo per la SLU-GEO

Terreno	γ (KN/m ³)	Φ_d' (°)	c_d' (kPa)
Terreni di riporto - U1	19	23.9	0
Ghiaia e sabbie - U2	19	30.2	8

Le spinte ottenute mediante l'analisi Plaxis con i parametri di resistenza ridotti sono state messe a confronto con le spinte teoriche limite sulla parete al fine di stabilire un coefficiente di sicurezza nei riguardi di un collasso generalizzato. Le spinte teoriche limite del terreno sono state calcolate cautelativamente mediante le relazioni di Rankine trascurando l'effetto legato all'attrito del terreno:

$$K_A = \frac{1 - \text{sen}\varphi_d}{1 + \text{sen}\varphi_d} \qquad K_P = \frac{1 + \text{sen}\varphi_d}{1 - \text{sen}\varphi_d}$$

5.2.4 Verifica SLU-STR del puntone

Per quanto riguarda le verifiche del puntone compresso, le sollecitazioni caratteristiche ottenute dall'analisi numerica sono state incrementate per il fattore pari a 1.5.

Il massimo carico assiale nel puntone deve essere tale da non produrre l'instabilità del profilo. La verifica di instabilità del profilo in acciaio è stata condotta secondo quanto prescritto al §4.2.4.1.3 della Normativa tecnica:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yk}}} = 0.81$$

$$\text{Classe 1 } \frac{d}{t} \leq 50\varepsilon^2$$

$$\text{Classe 2 } \frac{d}{t} \leq 70\varepsilon^2$$

$$\text{Classe 3 } \frac{d}{t} \leq 90\varepsilon^2$$

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

$$N_{CR} = \frac{\pi^2 EI}{l_0^2}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

con:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A' f_{yk}}{N_{CR}}} \quad \Phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad \chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.15$$

Si riporta nel seguito la verifica per il puntone maggiormente caricato.

5.2.5 Verifica SLU-STR del cordolo di superficie

Per il dimensionamento del cordolo in cemento armato in testa alla parete di micropali si utilizza lo schema di trave su più appoggi uniformemente caricata dagli scarichi dei puntoni per unità di lunghezza. In via cautelativa, la trave è stata verificata ipotizzando un momento massimo pari a:

$$M_{Max} = \frac{1}{8} q l^2 \quad V_{Max} = 0.6 q l$$

Dove q rappresenta la reazione del puntone ed L il loro interasse.

La sezione risulta verificata con una armatura di 12Φ16 disposti come da figura. Il copriferro è di 5 cm. L'armatura a taglio è costituita da Φ12/20.

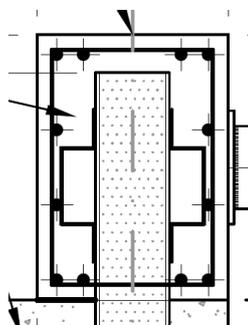


Figura 11. Particolare armatura trave di testa

5.2.6 Verifica SLU-STR della trave di ripartizione

Per il dimensionamento della trave di ripartizione del secondo livello di puntoni, si utilizza lo schema di trave su più appoggi uniformemente caricata dagli scarichi dei puntoni per unità di lunghezza.

La trave è stata verificata ipotizzando un momento ed un taglio massimo pari a:

$$M_{Max} = \frac{1}{10} q l^2 \quad V_{Max} = 0.6 q l$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Dove q rappresenta la reazione del puntone ed L il loro interasse.

La trave di ripartizione è costituita da una HEB300. La verifica è stata condotta secondo quanto prescritto al punto 4.2.4.1.2 delle NTC.

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

5.2.7 Verifica deformazioni massime delle strutture di sostegno

Lo spostamento massimo ammissibile stabilito dalle NTC218 paragrafo 7.11.6.3 è pari a $u_s=0.005H$ dove H è l'altezza complessiva della paratia.

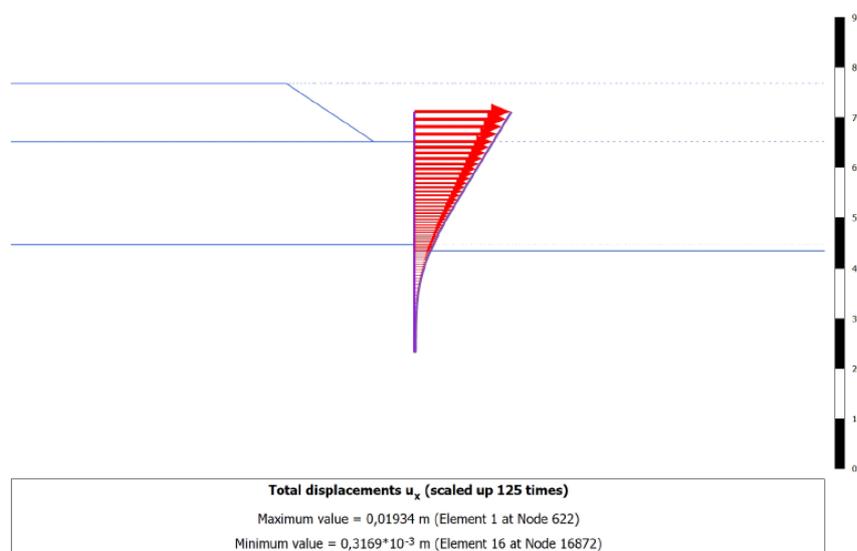


Figura 12. Spostamenti Totali - Schema A



CITTA' DI TORINO

Metropolitana di Torino - Linea 2
Tratta: Politecnico-Rebaudengo
Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna

Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione

MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

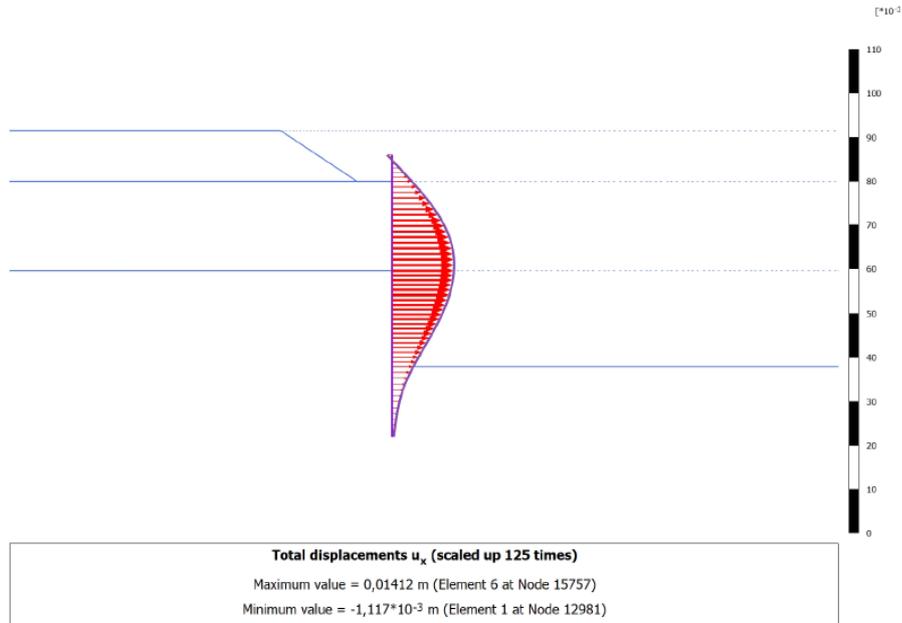


Figura 13. Spostamenti Totali - Schema B

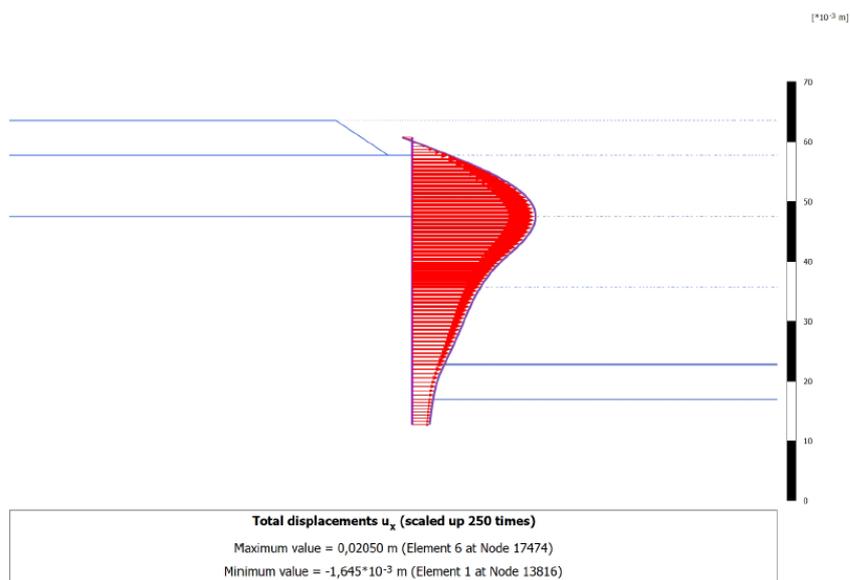


Figura 14. Spostamenti Totali - Schema C

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Tabella 9 – Verifica delle deformazioni massime delle paratie di micropali

Tipologia di scavo	u _s (mm)	H(m)	0.005H (mm)	u _s ≤ 0.005H
Schema A	19.34	6	30	✓
Schema B	14.12	8	40	✓
Schema C	20.50	13	65	✓

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

6 RIVESTIMENTI DEFINITIVI

6.1 PRINCIPALI ASSUNZIONI DELLA PROGETTAZIONE

6.1.1 Modellazione numerica e schematizzazione strutturale del modello

L'analisi e la progettazione strutturale delle strutture interne definitive degli accessi, vasche di accumulo e griglie di ventilazione, è stata schematizzata utilizzando diversi modelli strutturali rappresentativi dei principali componenti costituenti la struttura.

Gli accessi sono stati analizzati in due sezioni principali, la prima posta nella parte più superficiale dell'accesso dove non è presente la soletta di copertura ma in corrispondenza dell'altezza massima, risultando quindi in una struttura a sbalzo composta dalle pareti e la soletta di fondazione. La seconda sezione di calcolo posta dove l'accesso ha raggiunto il piano di atrio, collocandosi all'altezza massima dell'accesso quindi con presenza della soletta di copertura, per cui il modello risulta come uno scatolare continuo chiuso.

Le vasche d'accumulo sono rappresentate invece da uno scatolare chiuso sia da soletta di copertura, sia dalla soletta di fondazione di dimensioni definite.

L'analisi strutturale è stata condotta mediante programma di calcolo automatico ad elementi finiti Autodesk Robot Structural Analysis Professional. La struttura è stata schematizzata attraverso elementi finiti quadrangolari e triangolari di dimensioni 30cmx30cm tipo "plate-shell".

La struttura è vincolata alla base tramite un letto di molle con coefficiente di Winkler per tutte le superfici a contatto col terreno, mentre dei vincoli rigidi in direzione longitudinale per gli elementi simulati continui.

Per la verifica strutturale degli stati limite ultimo (SLU) e di esercizio (SLE), vengono utilizzati i fattori e le combinazioni dei carichi, nonché i coefficienti di sicurezza dei materiali indicati nelle NTC2018. I metodi di analisi utilizzati sono di tipo statico non lineare.

Negli elementi shell le sollecitazioni di calcolo sono state ricavate con il metodo di Wood & Armer (1968) secondo gli assi locali.

- $M_{xx} (+)$ = Momenti flettenti (W&A) che tende le fibre superiori in direzione x
- $M_{xx} (-)$ = Momenti flettenti (W&A) che tende le fibre inferiori in direzione x
- $M_{yy} (+)$ = Momenti flettenti (W&A) che tende le fibre superiori in direzione y
- $M_{yy} (-)$ = Momenti flettenti (W&A) che tende le fibre inferiori in direzione y
- $Q (1-2)$ = Sollecitazione di taglio combinato
- UZ = Spostamenti in direzione z

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Per lo stato limite di esercizio (SLE) vengono verificate le larghezze delle fessure e le tensioni nei materiali.

6.1.2 Caratterizzazione sismica

Con riferimento al capitolato, le azioni sismiche verranno prese in conto considerando un valore dell'accelerazione massima orizzontale del sito pari a:

$$a_{max} / g = S_s \cdot S_T \cdot a_g / g$$

Vi saranno effetti amplificativi dovuti alla stratigrafia ed alla topografia del suolo, tenuti in conto con i seguenti coefficienti:

- *Coefficiente topografico (S_T)*: per superfici pianeggianti è considerato pari a **1**.
- *Coefficiente stratigrafico (S_S)*: Per sottosuolo di categoria B è considerato pari a **1.2**.

Di conseguenza il valore dell'accelerazione orizzontale massima in superficie è:

$$a_{max} / g = S_s \cdot S_T \cdot a_g / g = 1.2 \cdot 1 \cdot 0.067 = 0.0804$$

Assimilando l'opera come una struttura scatolare non in grado di spostarsi, le spinte delle terre sono calcolate in regime di spinta a riposo che comporta il calcolo delle spinte sismiche in tali condizioni; l'incremento dinamico di spinta del terreno è determinato calcolato secondo la teoria di (WOOD 1973), che fornisce la sovraspinta sismica del terreno su una parete interrata.

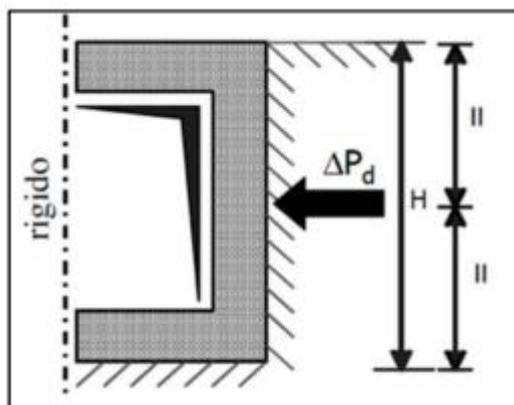


Figura 15. Schematizzazione metodo di Wood

Il metodo di Wood è utilizzato nel caso di manufatti scatolari e l'incremento di spinta legato al sisma può essere stimato secondo la relazione:

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

$$\Delta P_d = \frac{a_g}{g} \cdot S \cdot \gamma \cdot H^2$$

In cui g è il peso specifico del terreno supposto uniforme, dove $\frac{a_g}{g}$ è l'accelerazione orizzontale massima in superficie ($\frac{a_{max}}{g}$). Poiché tale risultante ha il punto di applicazione a metà dell'altezza H del muro, è possibile considerare una pressione uniforme di entità pari a:

$$\Delta p_d = \frac{a_g}{g} \cdot S \cdot \gamma \cdot H$$

6.1.3 Combinazioni di carico

In accordo con le NTC2018 le combinazioni di carico considerate e verificate nel seguito sono:

- Stato limite di servizio SLE
- Stato limite ultimo verifiche STR: Combinazione A1+M1 SLU1
- Stato limite ultimo verifiche GEO: Combinazione A2+M2 SLU2
- Sisma verifiche STR: Combinazione A1 (unitari)+M1 SISMA STR
- Sisma verifiche GEO: Combinazione A2 (unitari)+M2 SISMA GEO

A seconda della verifica che si intende effettuare, verranno utilizzati coefficienti che riducono i parametri meccanici di resistenza del terreno o coefficienti che amplificano gli effetti delle azioni; così è stato possibile quindi definire le diverse combinazioni di carico di seguito elencate:

Tabella 10 Combinazioni dei carichi SLU per verifiche strutturali

CARICHI		A1+M1+R1	SISMA STR_X	SISMA STR_Y
Perm. strutturali	Peso proprio	1.3	1	1
Perm. non strutturali	Spinta laterale del terreno_STR	1.5	1	1
	Spinta laterale del terreno_GEO	0	0	0
	Ricarica terreno	1.5	1	1
	Pavimentazione	1.5	1	1
Variabili	Folla	1.5	0.6	0.6
	Traffico	1.5	0.6	0.6
Azioni sismiche	Sovraspinta del sisma in direzione X	0	1	0
	Sovraspinta del sisma in direzione Y	0	0	1
Coeff. Parziali geotecnici del terreno	Peso dell'unità del volume	1	1	1
	Coesione efficace	1	1	1
	Tangente dell'angolo della resistenza a taglio	1	1	1

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Tabella 11 Combinazioni dei carichi SLU per verifiche geotecniche

CARICHI		A2+M2+R2	SISMA GEO_X	SISMA GEO_Y
Perm. strutturali	Peso proprio	1	1	1
Perm. non strutturali	Spinta laterale del terreno_STR	0	1	1
	Spinta laterale del terreno_GEO	1.3	0	0
	Ricarica terreno	1.3	1	1
	Pavimentazione	1.3	1	1
Variabili	Folla	1.3	0.6	0.6
	Traffico	1.3	0.6	0.6
Azioni sismiche	Sovrappinta del sisma in direzione X	0	1	0
	Sovrappinta del sisma in direzione Y	0	0	1
Coeff. Parziali geotecnici del terreno	Peso dell'unità del volume	1	1	1
	Coesione efficace	1	1	1
	Tangente dell'angolo della resistenza a taglio	1.25	1.25	1.25

Tabella 12 Combinazioni dei carichi SLE per verifiche strutturali

CARICHI		SLE RARA	SLE FREQ	SLE QP
Perm. strutturali	Peso proprio	1	1	1
Perm. non strutturali	Spinta laterale del terreno_STR	1	1	1
	Spinta laterale del terreno_GEO	0	0	0
	Ricarica terreno	1	1	1
	Pavimentazione	1	1	1
Variabili	Folla	1	0.7	0.6
	Traffico	1	0.7	0.6
Azioni sismiche	Sovrappinta del sisma in direzione X	0	1	0
	Sovrappinta del sisma in direzione Y	0	0	1
Coeff. Parziali geotecnici del terreno	Peso dell'unità del volume	1	1	1
	Coesione efficace	1	1	1
	Tangente dell'angolo della resistenza a taglio	1	1	1

6.1.4 Rigidezze del suolo adottate nei modelli numerici

Per stimare il modulo di reazione verticale del terreno si utilizza il Metodo proposto da *Bowles* (1982), adottato anche dal Comitato ACI 336.2R-88 (riapprovato 2002).

$$K_s = \frac{E_s}{B(1 - \nu^2)I_w}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Dove: I_w : Fattore di forma base

B : Larghezza base

Es: Modulo di Young del suolo

Tabella 12 – Valori di rigidezza utilizzate nei principali modelli di calcolo

Modello numerico / struttura	K_s (kN/m/m ²)
Accesso sezione a sbalzo / sezione chiusa	27470

6.2 Analisi numerica e verifiche strutturali

6.2.1 Accesso a Sbalzo

Le strutture interne dell'accesso nella parte più superficiale sono costituite dalle sole pareti e la soletta di fondazione. Tutti gli elementi hanno uno spessore di 60cm.



Figura 16. Modello numerico – Accesso schema a sbalzo

6.2.1.1 Carichi

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Carichi permanenti strutturali

Peso proprio della struttura considerato automaticamente: $\gamma_{cls} = 25 \text{ kN/m}^3$



Figura 17. Peso proprio – Accesso schema a sbalzo

Carichi permanenti non strutturali

Spinta laterale del terreno considerata come carico distribuito triangolare pari a $k_0 \cdot \gamma \cdot h$:

- per le verifiche strutturali e stato utilizzato

$$\begin{aligned}
 k_0 &= 1 - \sin 29^\circ & 0 - 2 \text{ m} \\
 k_0 &= 1 - \sin 36^\circ & 2 - 30 \text{ m}
 \end{aligned}$$

- per le verifiche geotecniche e stato utilizzato

$$\begin{aligned}
 k_0 &= 1 - \sin 23.9^\circ & 0 - 2 \text{ m} \\
 k_0 &= 1 - \sin 30.2^\circ & 2 - 30 \text{ m}
 \end{aligned}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

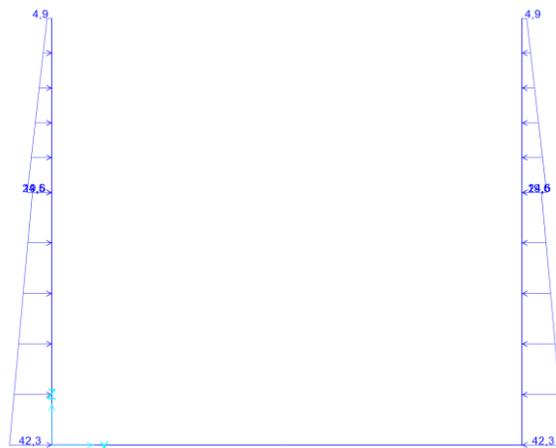


Figura 18. Spinta orizzontale del terreno – Accesso schema a sbalzo

Pavimento sono stati considerati 15 cm di pavimentazione con $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$

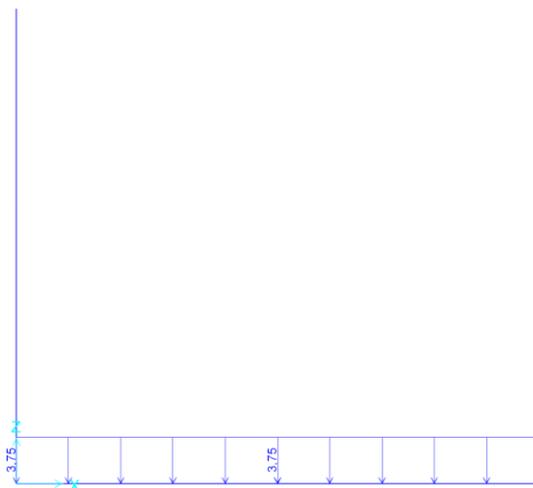


Figura 19. Pavimentazione – Accesso schema a sbalzo

Carichi variabili

Risultano applicati i seguenti carichi:

Folla $q_{folla} = 5 \text{ kN/m}^3$

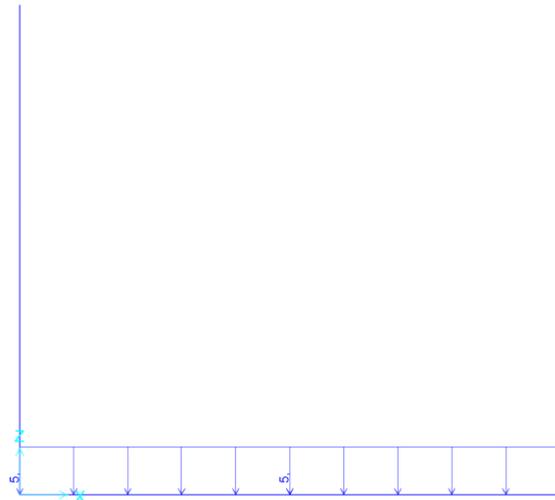


Figura 20. Folla – Accesso schema a sbalzo

Traffico è stato preso in considerazione il traffico direttamente sopra la stazione e nelle vicinanze, quest'ultimo è stato quindi riportato come carico orizzontale uniformemente distribuito sulle pareti utilizzando la formula $k_0 \cdot 20kN$ con k_0 variabile seguendo le indicazioni riportate nella condizione di carico di spinta del terreno.

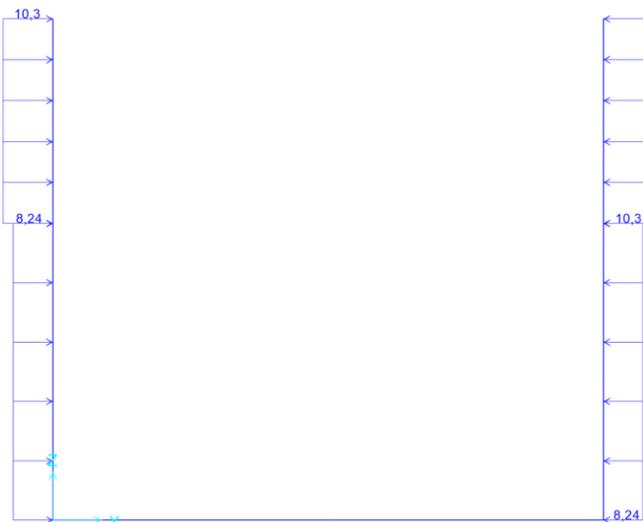


Figura 21. Traffico -Accesso schema a sbalzo

Carichi sismici sono stati considerati agenti in entrambe le direzioni longitudinale e trasversale calcolati seguendo la teoria di Wood come specificato al capitolo 6.1.2.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

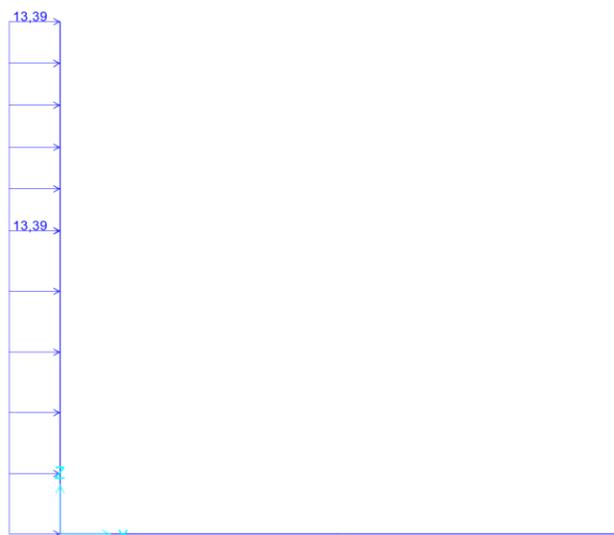


Figura 22. Spinta sismica Direzione X – Accesso schema a sbalzo

6.2.1.2 Risultati dell'analisi e verifiche strutturali

I risultati dell'analisi e le successive verifiche strutturali hanno portato alla definizione della seguente armatura per gli elementi che compongono l'accesso a sbalzo. Inoltre, sono state individuate delle zone particolari che richiedono un maggior quantitativo di armatura, per cui il rinforzo è stato disposto seguendo gli schemi riportati sotto:

Armatura Principale

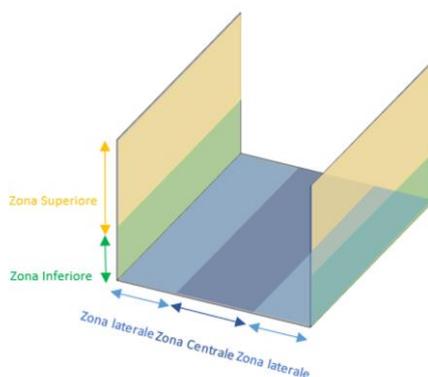


Figura 23. Schema di distribuzione dell'armatura principale – Accesso schema a sbalzo

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Armatura a Taglio

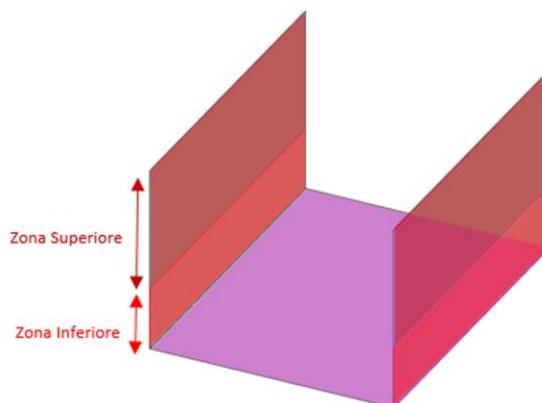


Figura 24. Schema di distribuzione dell'armatura a taglio – Accesso schema a sbalzo

Tabella 13 Armatura Muri – Accesso schema a sbalzo

	Posizione	Armatura			
		Principale			Staffe
Muri	Zona Superiore	Trasversale	Esterno	Ø24/200	Ø10/200/200
			Interno	Ø24/200	
		Longitudinale	Esterno	Ø20/200	
			Interno	Ø20/200	
Zona Inferiore	Trasversale	Esterno	Ø24/100	Ø10/200/200	
		Interno	Ø24/200		
	Longitudinale	Esterno	Ø20/200		
		Interno	Ø20/200		

Tabella 14 Armatura Soletta di fondo – Accesso schema a sbalzo

	Posizione	Armatura			
		Armatura principale			Staffe
Soletta di fondo	Zona Laterale	Trasversale	Superiore	Ø24/200	Ø10/200/200
			Inferiore	Ø24/00	
		Longitudinale	Superiore	Ø20/200	
			Inferiore	Ø20/200	
	Zona Centrale	Trasversale	Superiore	Ø24/200	
			Inferiore	Ø24/200	
Longitudinale		Superiore	Ø20/200		
		Inferiore	Ø20/200		

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

6.2.2 Accesso Chiuso

Le strutture interne dell'accesso nella parte più profonda sono costituite dalle pareti, la soletta di fondo e la soletta di copertura. Tutti gli elementi hanno uno spessore di 60cm.

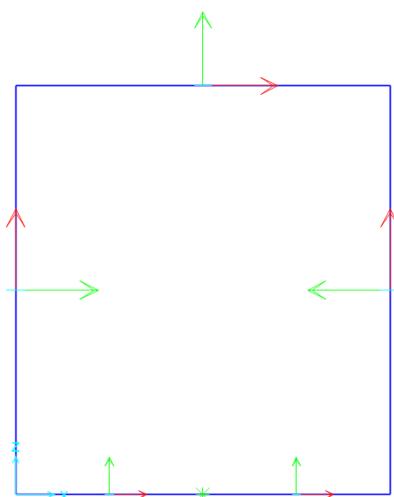


Figura 25. Modello numerico – Accesso schema chiuso

6.2.2.1 Carichi

Carichi permanenti strutturali

Peso proprio della struttura considerato automaticamente: $\gamma_{cls} = 25 \text{ kN/m}^3$.

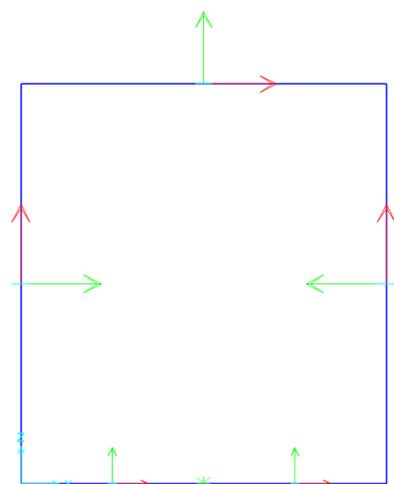


Figura 26. Peso proprio – Accesso schema chiuso

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Carichi permanenti non strutturali

Spinta laterale del terreno considerata come carico distribuito triangolare pari a $k_0 \cdot \gamma \cdot h$:

- per le verifiche strutturali e stato utilizzato:

$$k_0 = 1 - \sin 29^\circ \quad 0 - 2\text{m}$$

$$k_0 = 1 - \sin 36^\circ \quad 2 - 30\text{m}$$

- per le verifiche geotecniche e stato utilizzato

$$k_0 = 1 - \sin 23.9^\circ \quad 0 - 2\text{m}$$

$$k_0 = 1 - \sin 30.2^\circ \quad 2 - 30\text{m}$$

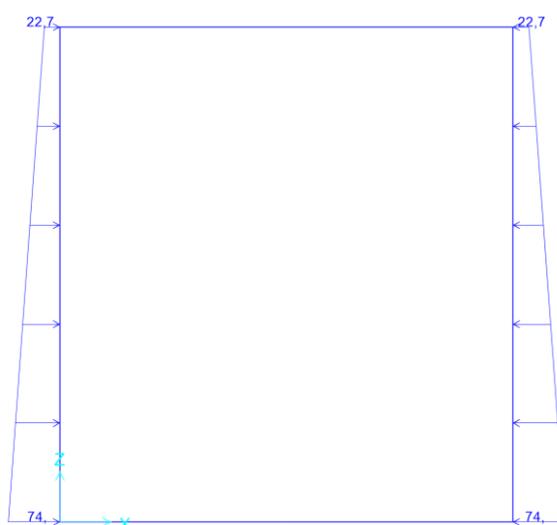


Figura 27. Spinta orizzontale del terreno – Accesso schema chiuso

Spinta idraulica considerata come carico distribuito triangolare pari a $k_0 \cdot \gamma_w \cdot h_w$:

Con h_w **-2m** da piano campagna cautelativamente per la stazione in esame.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

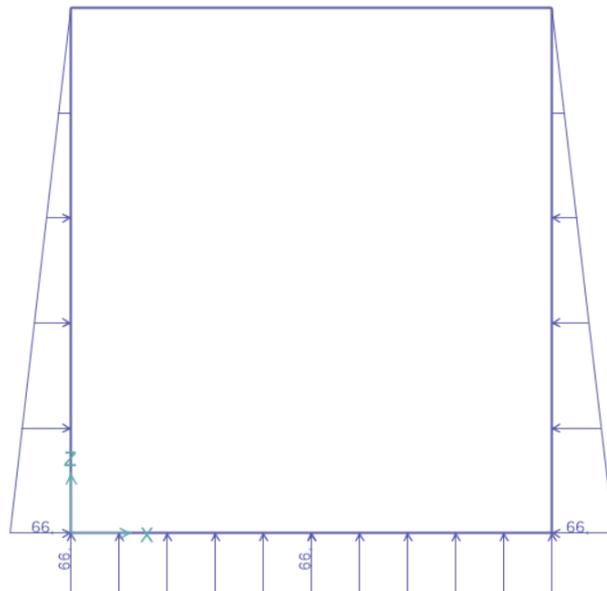


Figura 28. Spinta idrostatica – Accesso schema chiuso

Ritombamento è stato considerato del materiale di riporto da ricoprire l'accesso fino ad arrivare a quota piano campagna, per cui è stato applicato un carico finale $H \cdot \gamma$ con $\gamma = 20 \text{ kN}/\text{m}^3$.

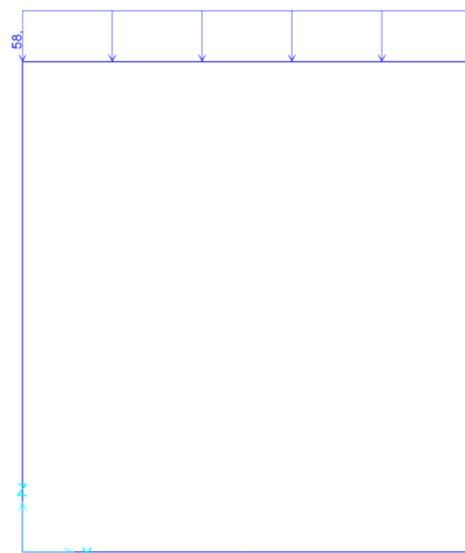


Figura 29. Ritombamento – Accesso schema chiuso

Pavimento sono stati considerati 15 cm di pavimentazione con $\gamma = 25 \text{ kN}/\text{m}^3$.

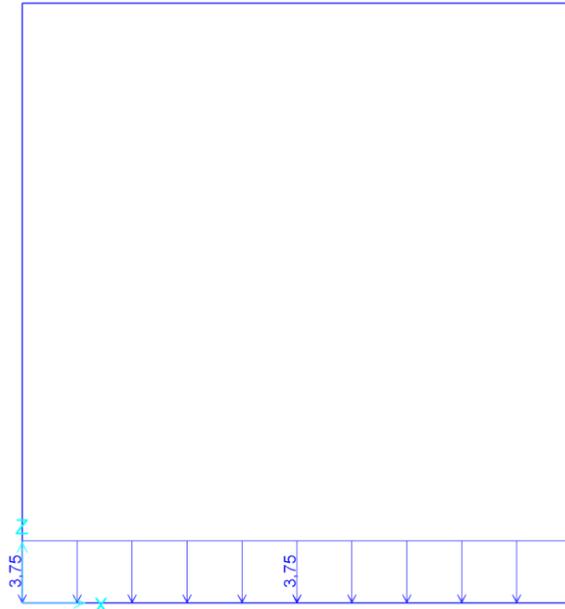


Figura 30. Pavimentazione – Accesso schema chiuso

Carichi variabili

Risultano applicati i seguenti carichi:

Folla $q_{folla} = 5 \text{ kN/m}^3$

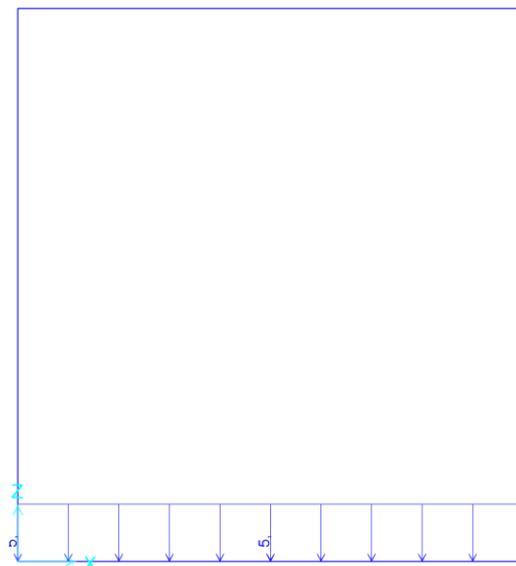


Figura 31. Folla – Accesso schema chiuso

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Traffico è stato preso in considerazione il traffico direttamente sopra la stazione e nelle vicinanze, quest'ultimo è stato quindi riportato come carico orizzontale uniformemente distribuito sulle pareti utilizzando la formula $k_0 \cdot 20kN$ con k_0 variabile seguendo le indicazioni riportate nella condizione di carico di spinta del terreno.

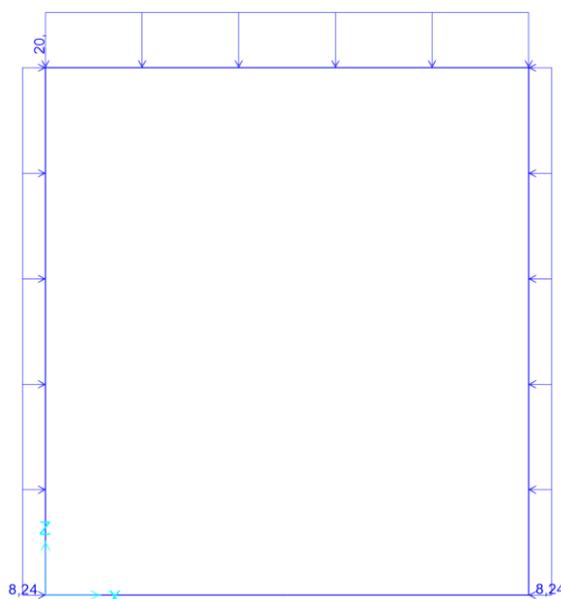


Figura 32. Traffico – Accesso schema chiuso

Carichi sismici sono stati considerati agenti in entrambe le direzioni longitudinale e trasversale calcolati seguendo la teoria di Wood come specificato al capitolo 6.1.2.

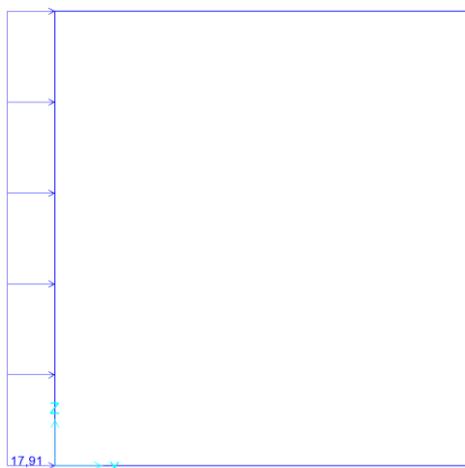


Figura 33. Spinta sismica direzione X – Accesso schema chiuso

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

6.2.2.2 Risultati dell'analisi e verifiche strutturali

I risultati dell'analisi e le successive verifiche strutturali hanno portato alla definizione della seguente armatura per gli elementi che compongono l'accesso chiuso, inoltre sono state individuate delle zone particolari che richiedono un maggior quantitativo di armatura, per cui il rinforzo è stato disposto seguendo gli schemi riportati sotto:

Armatura Principale

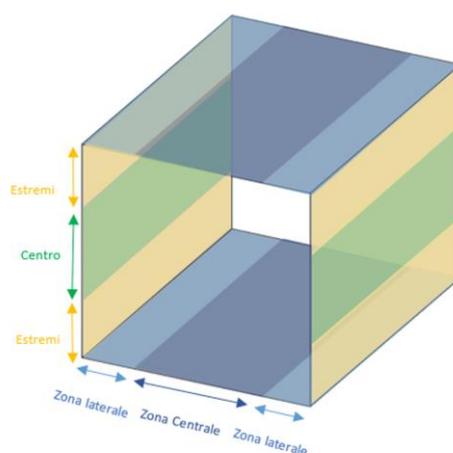


Figura 34. Schema di distribuzione dell'armatura principale – Accesso schema chiuso

Armatura a Taglio

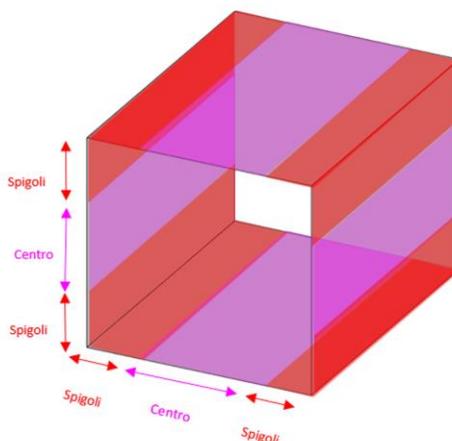


Figura 35. Schema di distribuzione dell'armatura a taglio – Accesso schema chiuso

Tabella 15 Armatura principale Soletta di copertura – Accesso schema chiuso

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Tabella 16 Armatura principale Soletta di copertura – Accesso schema chiuso

	Posizione	Armatura		
		Soletta di copertura	Zona Laterale	Trasversale
Inferiore	Ø24/200			
Longitudinale	Superiore			Ø18/200
	Inferiore			Ø18/200
Zona Centrale	Trasversale	Superiore	Ø24/200	
		Inferiore	Ø24/200	
	Longitudinale	Superiore	Ø18/200	
		Inferiore	Ø18/200	

Tabella 17 Armatura principale Muri – Accesso schema chiuso

	Posizione	Armatura			
		Principale			Staffe
Muri	Zona Superiore	Trasversale	Esterno	Ø24/200	Ø10/200/200
			Interno	Ø24/200	
		Longitudinale	Esterno	Ø20/200	
			Interno	Ø20/200	
	Zona Inferiore	Trasversale	Esterno	Ø24/100	Ø10/200/200
			Interno	Ø24/200	
		Longitudinale	Esterno	Ø20/200	
			Interno	Ø20/200	

Tabella 18 Armatura principale Soletta di fondo – Accesso schema chiuso

	Posizione	Armatura		
		Soletta di fondo	Zona Laterale	Trasversale
Inferiore	Ø24/200			
Longitudinale	Superiore			Ø18/200
	Inferiore			Ø18/200
Zona Centrale	Trasversale	Superiore	Ø24/200	
		Inferiore	Ø24/200	
	Longitudinale	Superiore	Ø18/200	
		Inferiore	Ø18/200	

Tabella 19 Armatura a taglio – Accesso schema chiuso

Posizione	Staffe
Spigoli	Ø10/200/200
Centro	Ø10/200/200

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

6.2.3 Vasca antincendio

Le strutture interne della vasca d'accumulo antincendio sono costituite da pareti interne su tre lati, mentre il quarto lato corrisponde al diaframma, la soletta di copertura e la soletta di fondo sono quelle relative al piano copertura e atrio della stazione. I muri hanno uno spessore di 50cm mentre la soletta di copertura e fondo sono spesse 1.2m e 1.0m rispettivamente.

Dato che le solette sono state dimensionate nel report MTL2T1A1DSTRSCIR002, nel presente capitolo saranno presentate le verifiche relative alle pareti della vasca. La foderatura tra il solaio di copertura e il solaio dell'atrio tra quota -2,6m e -8,7m è stata schematizzata come una trave appoggiata-appoggiata di spessore 50cm e larghezza unitaria.



Figura 36. Schema di calcolo – Muri Vasca di accumulo antincendio

6.2.3.1 Carichi

Dato che dalle condizioni del modello funzionale la vasca antincendio risulta interna alla stazione, l'unico carico presente nella vasca riguarda la spinta dell'acqua quando la suddetta struttura sarà piena. Per cui i carichi considerati sono:

Spinta idraulica interna considerata come carico distribuito triangolare pari a $\gamma_w \cdot h_w$:

Considerando la vasca quasi piena fino all'altezza di h_w **4m** al suo interno.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

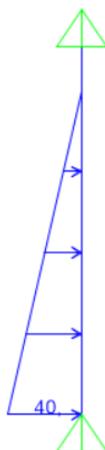


Figura 37. Spinta idrostatica – Vasca di accumulo antincendio

A favore di sicurezza il peso proprio è stato trascurato.

Carichi variabili

Carichi sismici è stato calcolato seguendo la teoria di Wood come specificato al capitolo 6.1.2 della presente relazione. Inoltre, è stata considerata l'applicazione di tale carico in base al rapporto delle inerzie tra foderi (spessore 50cm) e diaframma (spessore 120cm).

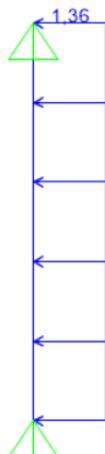


Figura 38. Spinta sismica – Vasca di accumulo antincendio

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

6.2.3.2 Risultati dell'analisi e verifiche strutturali

I risultati dell'analisi e le successive verifiche strutturali hanno portato alla definizione della seguente armatura per le pareti della vasca antincendio:

Tabella 20 Armatura principale Muri – Vasca di accumulo antincendio

Muri vasca antincendio	Armatura		
	Trasversale	Esterno	Ø16/200
		Interno	Ø16/200
	Longitudinale	Esterno	Ø16/200
Interno		Ø16/200	

Tabella 21 Armatura a taglio Muri – Vasca di accumulo antincendio

Muri Vasca	Staffe
	Ø8/200/400



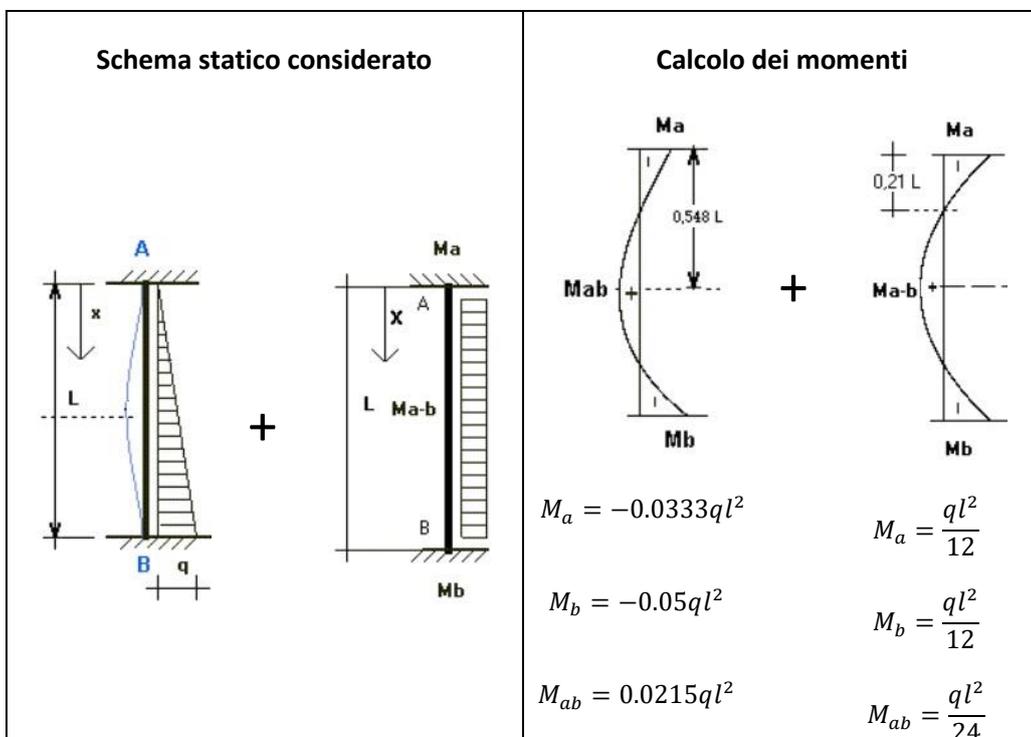
7 VALIDAZIONE DEI MODELLI DI CALCOLO

Nel presente capitolo si presentano le verifiche sintetiche atte a consentire il giudizio di accettabilità dei risultati così come previsto dal §10.2.1 del D.M. 17/01/2018, ricostruendo le sollecitazioni di momento flettente massimo in condizioni statiche confrontando i risultati provenienti dal software utilizzati per il dimensionamento delle strutture definitive (SAP2000) con i valori di momento determinati mediante soluzioni analitiche. Sono state applicate le note soluzioni in forma chiusa della Scienza delle Costruzioni per calcolare i momenti flettenti dei muri e la soletta di copertura dell'accesso chiuso, considerando uno schema statico d'incastro e i diversi carichi applicati ai suddetti elementi.

Di seguito sono riportati gli schemi considerati e i risultati ottenuti.

Muri

- Spinta del terreno





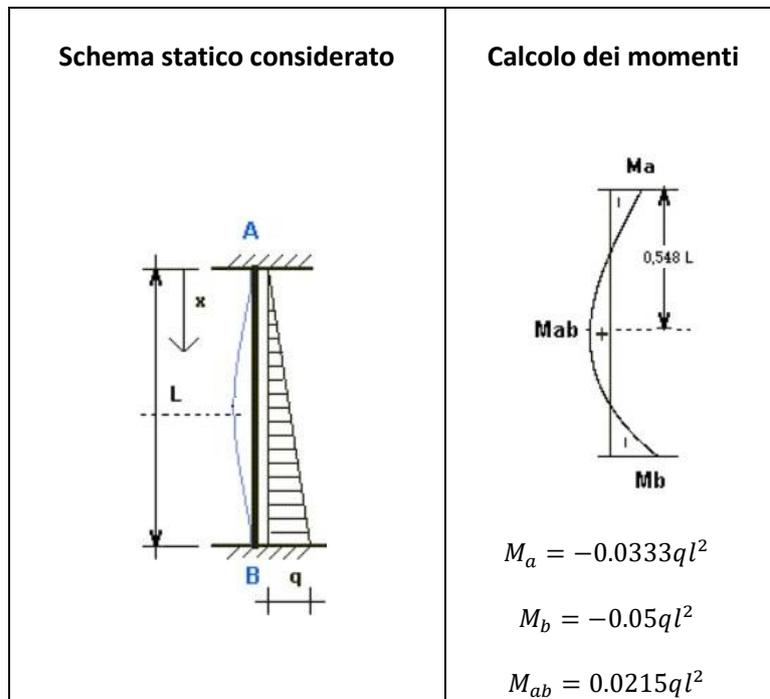
I momenti agenti dovuti alla spinta del terreno sono:

$$M_a = -127.5 \text{ kNm}$$

$$M_b = -157.8 \text{ kNm}$$

$$M_{ab} = 72.5 \text{ kNm}$$

- Spinta idraulica



I momenti agenti dovuti alla spinta idraulica sono:

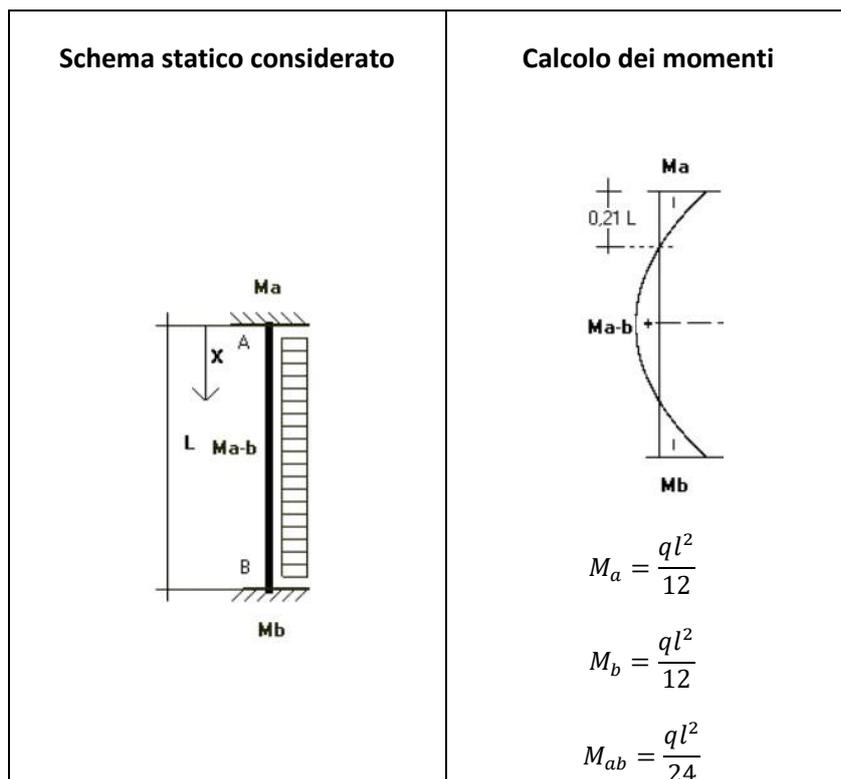
$$M_a = -77 \text{ kNm}$$

$$M_b = -116.8 \text{ kNm}$$

$$M_{ab} = 50.2 \text{ kNm}$$



• Sovraccarico del traffico



I momenti agenti dovuti alla sovrappinta laterale derivante dal traffico sono:

$$M_a = -24.3 \text{ kNm}$$

$$M_b = -24.3 \text{ kNm}$$

$$M_{ab} = 12.15 \text{ kNm}$$

Sovrapponendo gli effetti dei carichi, i momenti complessivi agenti sui muri in combinazione a Stato Limite di Esercizio sono:

$$M_a = -229 \text{ kNm}$$

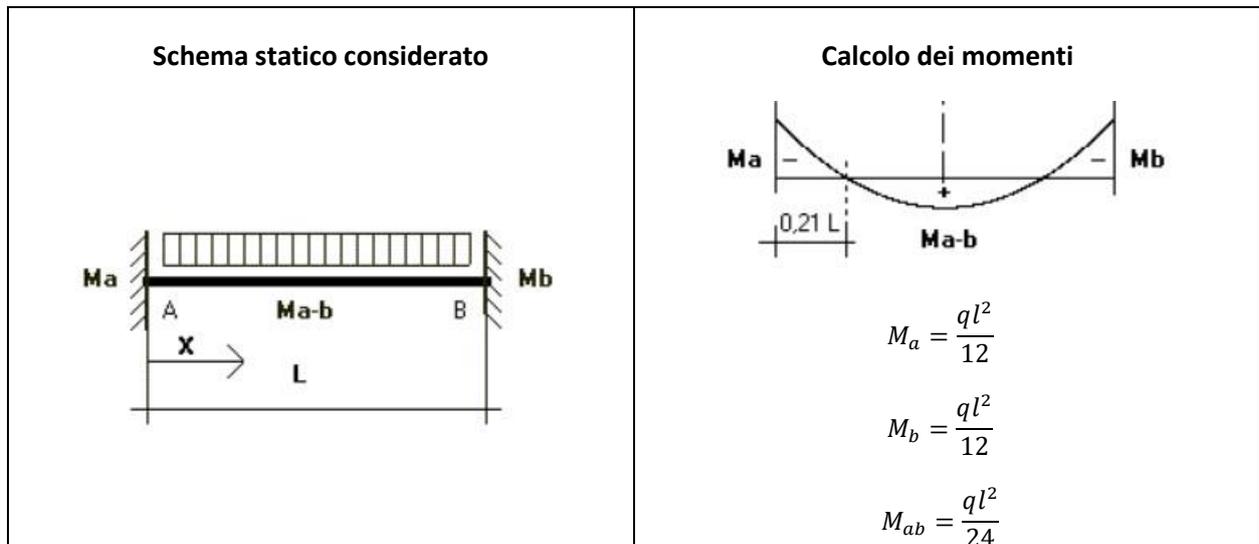
$$M_b = -299 \text{ kNm}$$

$$M_{ab} = 135 \text{ kNm}$$



Soletta di copertura

I carichi agenti sulla soletta di copertura sono tutti riconducibili ad un unico schema di carico come mostrato di seguito:



I momenti agenti dovuti ai diversi carichi applicati sulla soletta di copertura sono:

- **Peso proprio**

$$M_a = 36.45 \text{ kNm}$$

$$M_b = 36.45 \text{ kNm}$$

$$M_{ab} = 18.23 \text{ kNm}$$

- **Ritombamento**

$$M_a = 143.4 \text{ kNm}$$

$$M_b = 143.4 \text{ kNm}$$

$$M_{ab} = 71.7 \text{ kNm}$$



• **Traffico**

$$M_a = 48.6 \text{ kNm}$$

$$M_b = 48.6 \text{ kNm}$$

$$M_{ab} = 24.3 \text{ kNm}$$

I momenti complessivi agenti sui muri in combinazione a Stato Limite di Esercizio sono:

$$M_a = -228.45 \text{ kNm}$$

$$M_b = -228.45 \text{ kNm}$$

$$M_{ab} = 114.2 \text{ kNm}$$

Di seguito si riporta la comparazione dei momenti flettenti ottenuti con i due approcci di calcolo analitico e numerico:

Momenti analitici	$M_a = -228.45 \text{ kNm}$	$M_{ab} = 114.2 \text{ kNm}$	$M_b = -228.45 \text{ kNm}$
$M_a = -229 \text{ kNm}$			
$M_{ab} = 135 \text{ kNm}$			
$M_b = -299 \text{ kNm}$			
	Momenti modellazione		

La variazione dei risultati tra i due modelli di calcolo in termini di momento flettente è dell'ordine del 25-30%. Le grosse differenze sono dovute a che il calcolo analitico tende ad essere più conservativo, dall'altro

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

canto il modello aggiunge gli effetti di tridimensionalità e considera le molle del terreno, andando ad attenuare ancora gli effetti dei carichi.

In conclusione, le comparazioni tra modellazione geotecnica e strutturale, unitamente alle verifiche speditive e valutazioni di correttezza del comportamento atteso delle modellazioni, mostrano l'attendibilità, la robustezza e la validità delle elaborazioni eseguite.

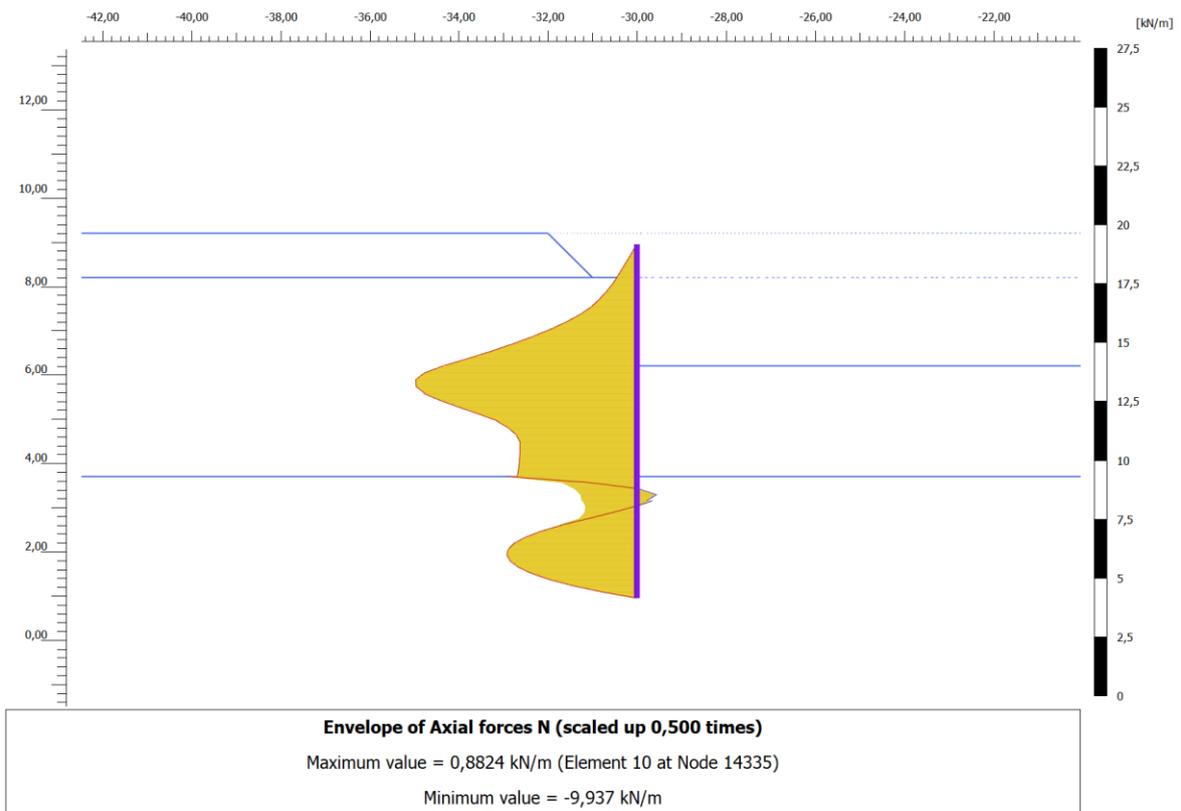
 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

APPENDICE A



Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi numeriche per i diversi schemi di opere di supporto degli accessi della linea 2 Metro Torino in termini di involuipi di sforzo assiale, taglio e momento flettente sulla parete.

- **Schema A**



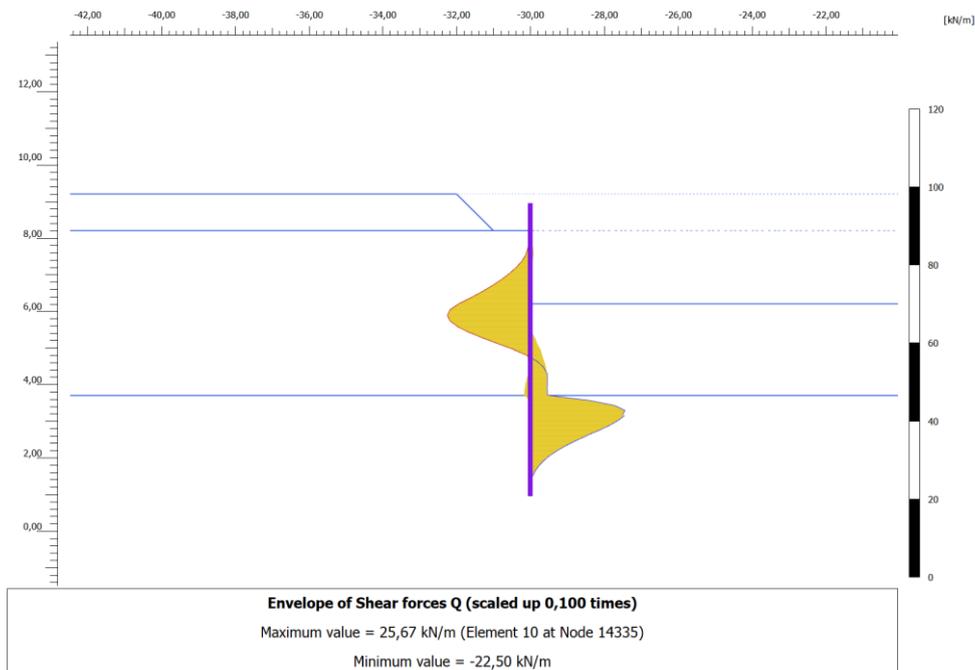
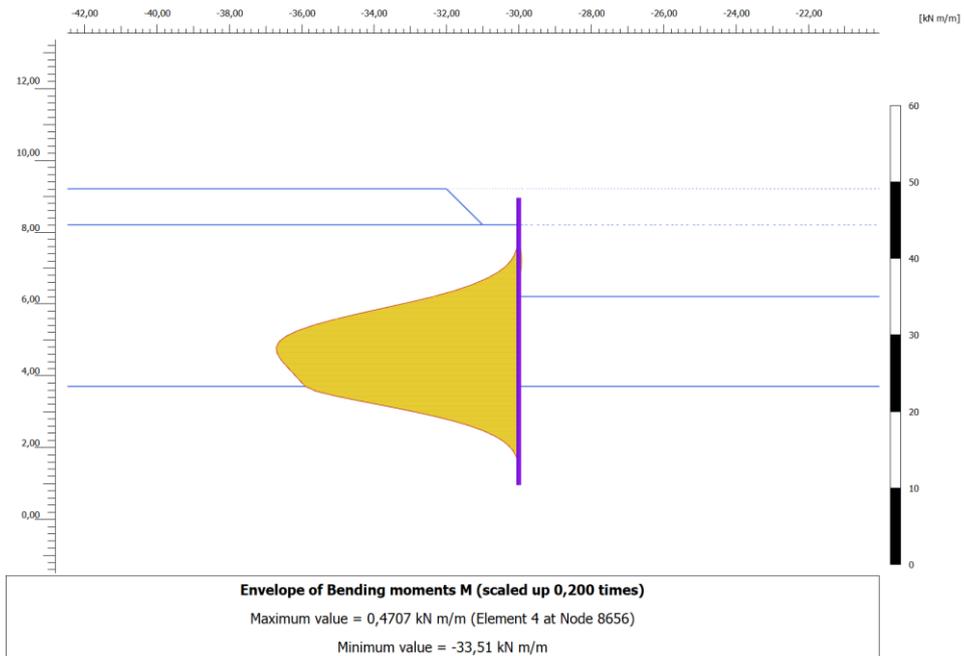
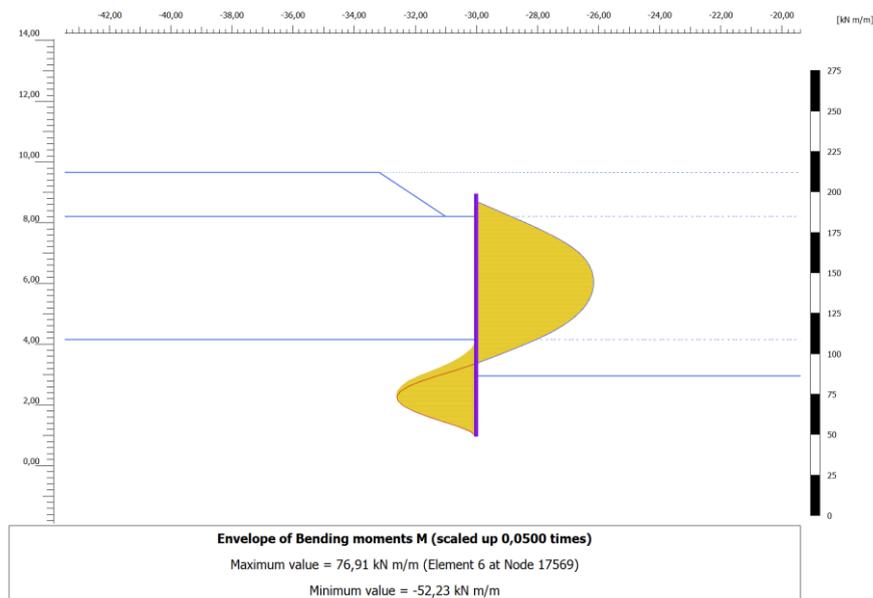
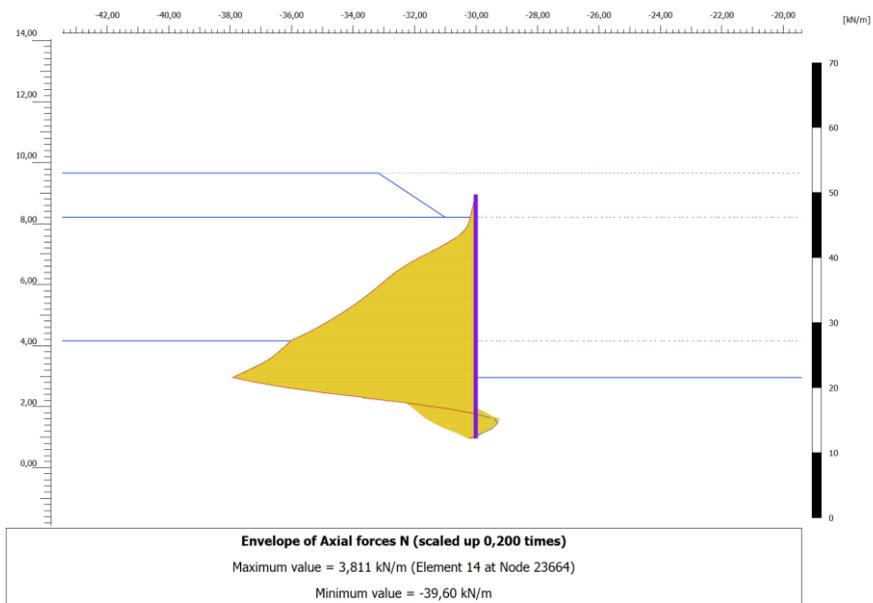


Figura 39. Output PLAXIS: Involuppo dello sforzo assiale, del taglio e del momento flettente - Schema A



• Schema B



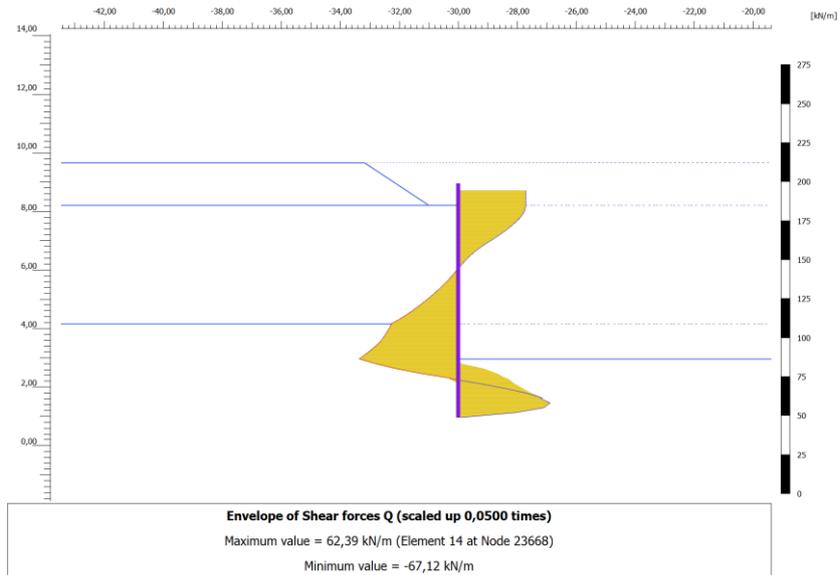
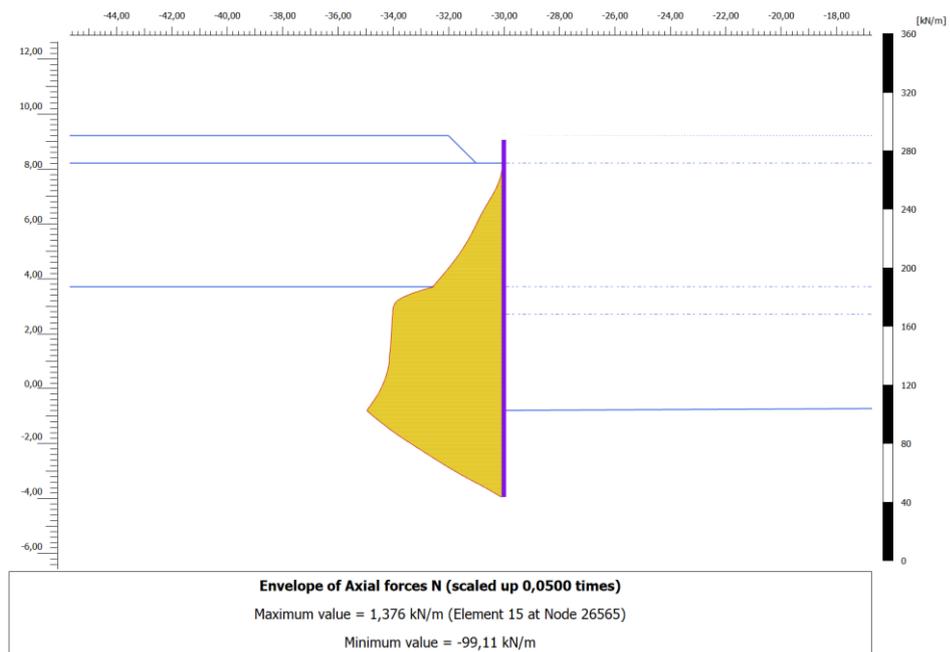


Figura 40. Output PLAXIS: Involuppo dello sforzo assiale, del taglio e del momento flettente – Schema B

• Schema C



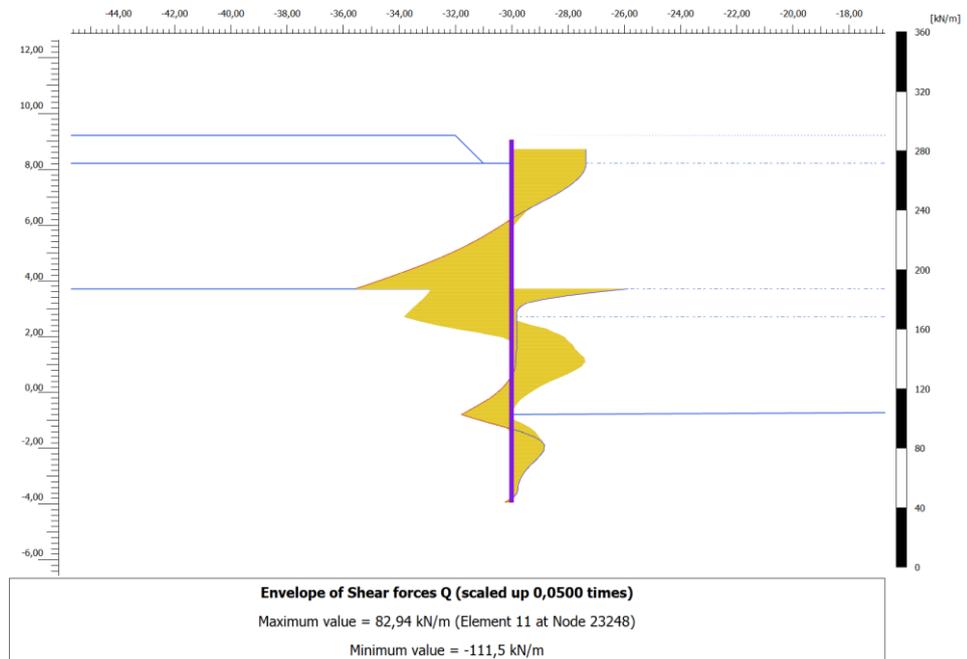
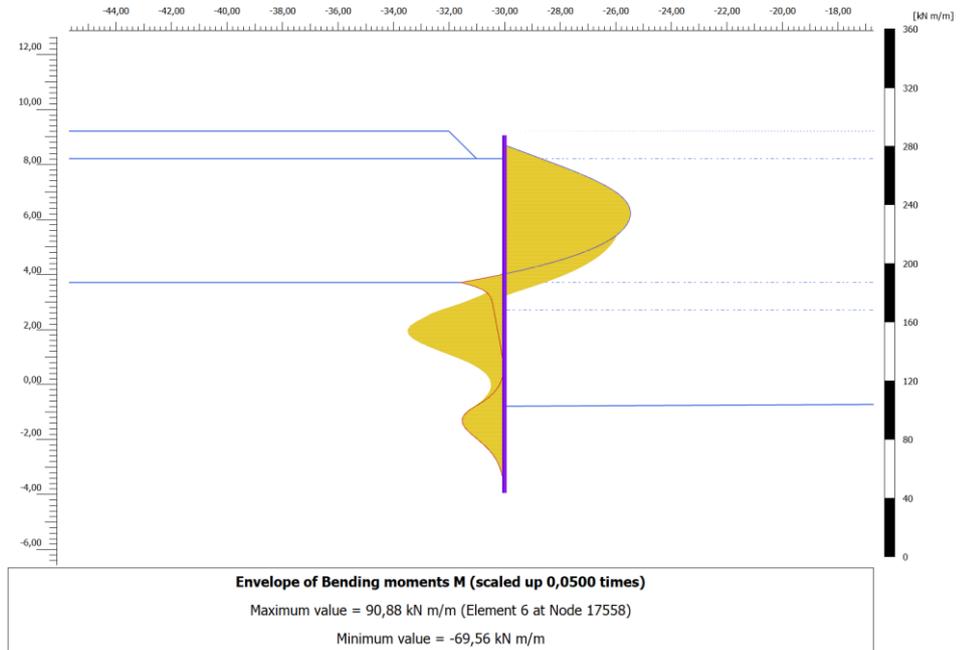


Figura 41. Output PLAXIS: Involuppo dello sforzo assiale, del taglio e del momento flettente – Schema C

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

APPENDICE B

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi numeriche per i diversi schemi di opere di supporto degli accessi della linea 2 Metro Torino in termini di spostamenti orizzontali della parete.

- **Schema A**

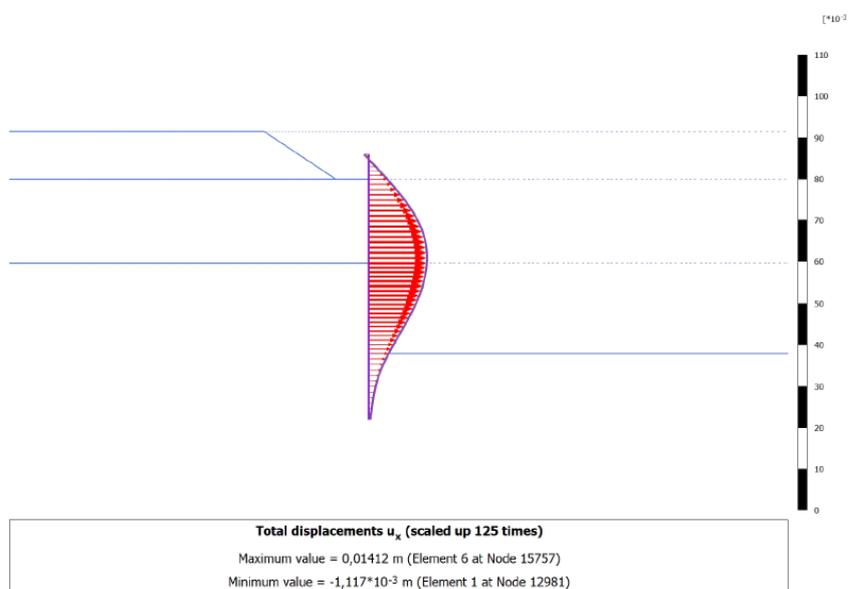


Figura 42. Spostamenti orizzontali parete di micropali – Schema A

- **Schema B**

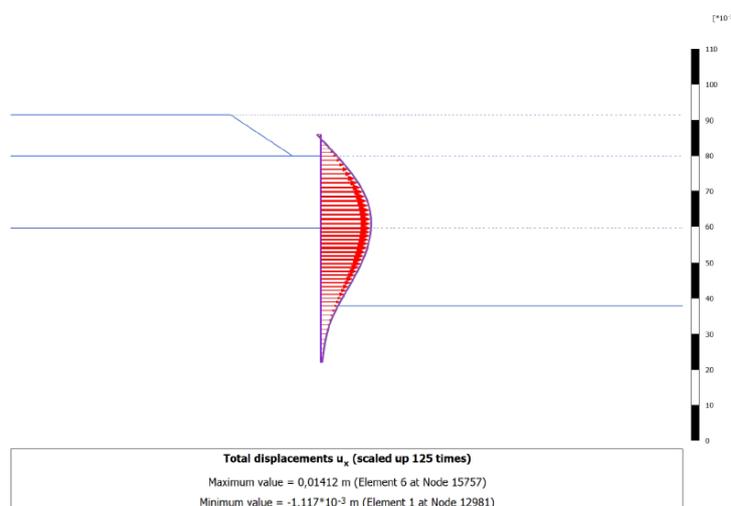


Figura 43. Spostamenti orizzontali parete di micropali – Schema B

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

- **Schema C**

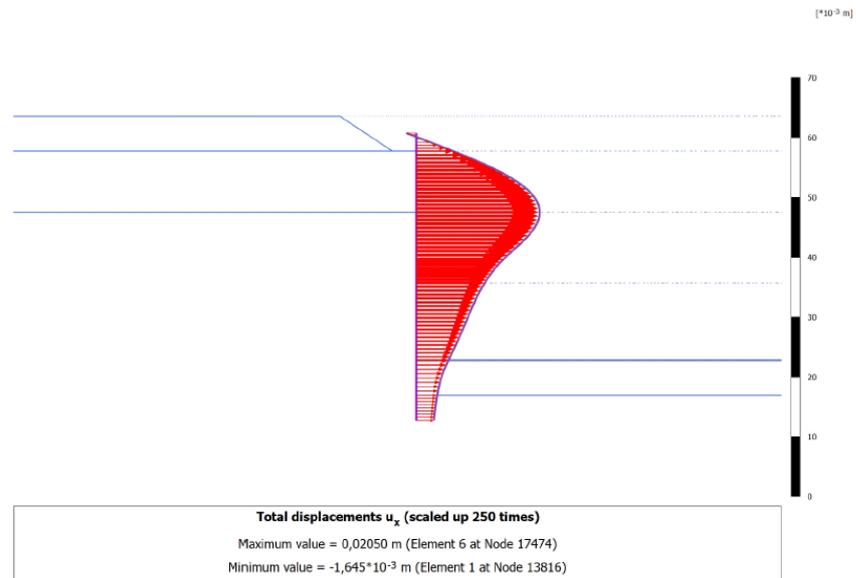


Figura 44. Spostamenti orizzontali parete di micropali – Schema C

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

APPENDICE C

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi numeriche per i diversi schemi di opere di supporto degli accessi della linea 2 Metro Torino in termini di sforzo assiale agente sui puntone per le sezioni di calcolo in cui essi sono presenti.

- **Schema B**

Tabella 22 Output Plaxis: Sforzo assiale sul puntone – Schema B

Structural element ▲	Node ▲	Local number ▲	X ▲ [m]	Y ▲ [m]	N ▲ [kN]	N _{min} ▲ [kN]	N _{max} ▲ [kN]	Φ _z ▲ [°]	Length ▲ [m]
FixedEndAnchor_1_1	14099	1	-30,000	8,700	-137,622	-137,622	0,000	0,000	1,000

- **Schema C**

Tabella 23 Output Plaxis: Sforzo assiale sui puntone – Schema C

Primo puntone

Structural element ▲	Node ▲	Local number ▲	X ▲ [m]	Y ▲ [m]	N ▲ [kN]	N _{min} ▲ [kN]	N _{max} ▲ [kN]	Φ _z ▲ [°]	Length ▲ [m]
FixedEndAnchor_1_1	12778	1	-30,000	8,700	-159,032	-159,032	0,000	0,000	1,000

Secondo puntone

Structural element ▲	Node ▲	Local number ▲	X ▲ [m]	Y ▲ [m]	N ▲ [kN]	N _{min} ▲ [kN]	N _{max} ▲ [kN]	Φ _z ▲ [°]	Length ▲ [m]
FixedEndAnchor_2_1	23248	1	-30,000	3,700	-576,938	-576,938	0,000	0,000	1,000

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

APPENDICE D



Di seguito sono riportate le verifiche SLU-STR della paratia di micropali per i diversi schemi di supporto analizzati per la Linea 2 di Metro Torino. È possibile osservare i diagrammi di sforzo assiale, taglio e momento oltre alle tensioni combinate confrontate con la tensione a snervamento di progetto, seguendo quanto descritto al Capitolo 5.2.2:

• **Schema A**

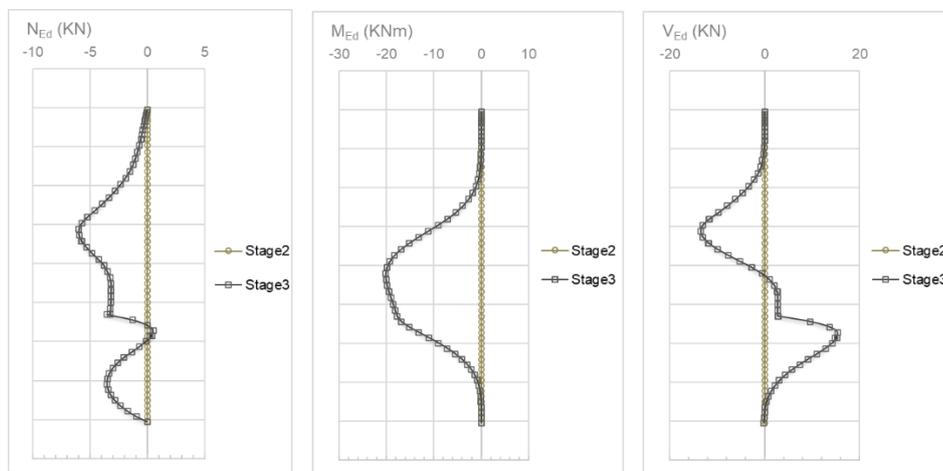


Figura 45. Sforzo assiale, taglio e momento di progetto per i diversi stage di calcolo – Schema A

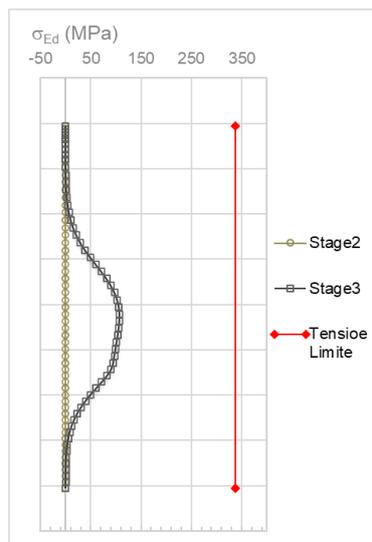


Figura 46. Tensione di verifica secondo NTC - tensione a snervamento acciaio – Schema A

La verifica per lo Schema A risulta soddisfatta adottando un micropalo F193.7x8mm ogni 400mm.



• **Schema B**

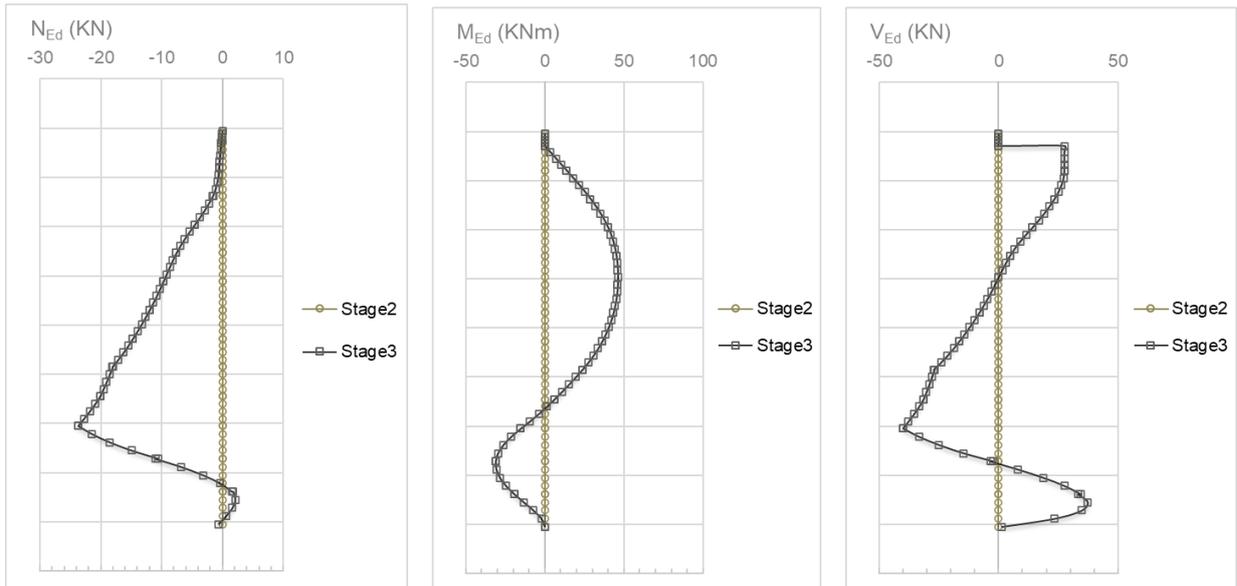


Figura 47. Sforzo assiale, taglio e momento di progetto per i diversi stage di calcolo – Schema B

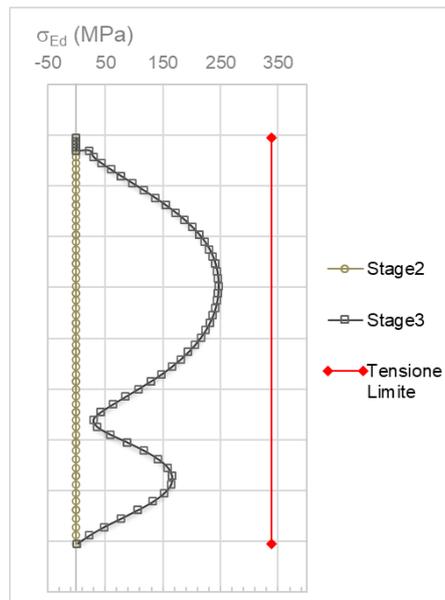


Figura 48. Tensione di verifica secondo NTC - tensione a snervamento acciaio – Schema B

La verifica per lo Schema B risulta soddisfatta adottando un micropalo F193.7x8mm ogni 400mm.



• **Schema C**

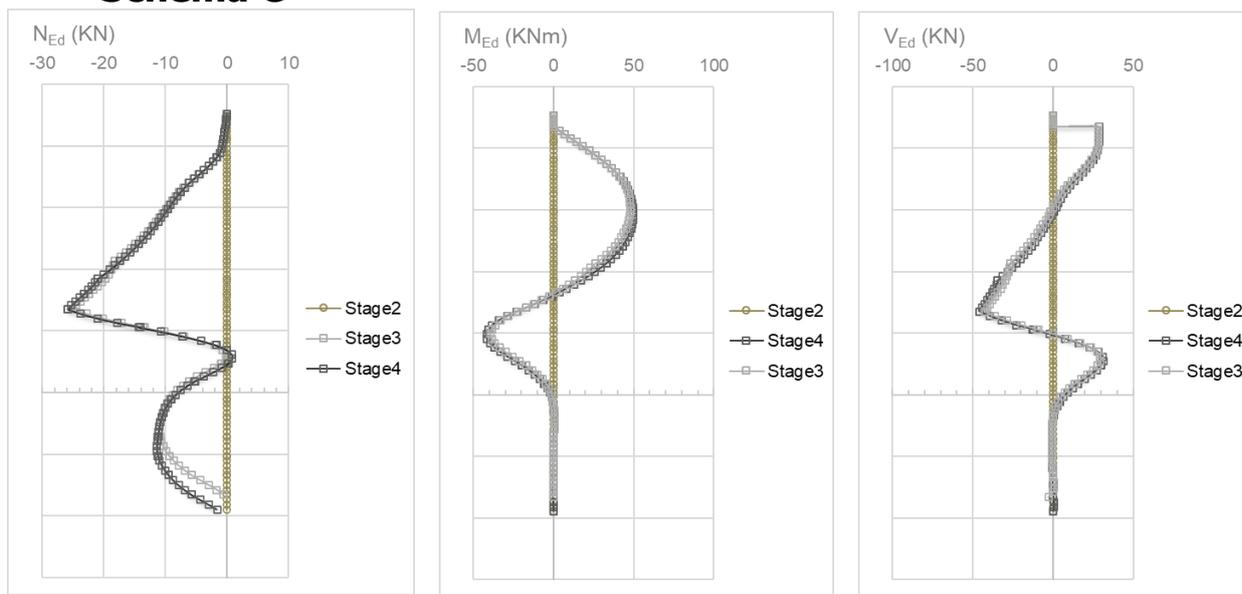


Figura 49. Sforzo assiale, taglio e momento di progetto per i diversi stage di calcolo – Schema C

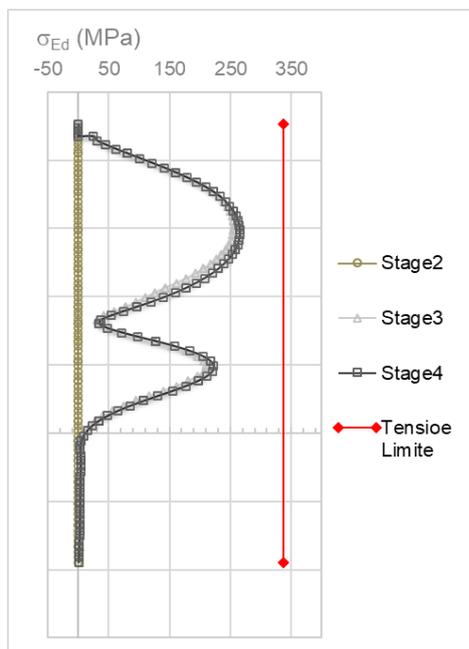


Figura 50. Tensione di verifica secondo NTC - tensione a snervamento acciaio – Schema C

La verifica per lo Schema C risulta soddisfatta adottando un micropalo F193.7x8mm ogni 400mm.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

APPENDICE E

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Di seguito sono riportati i risultati delle analisi geotecniche effettuate per le diverse sezioni di calcolo.

- **Schema A**

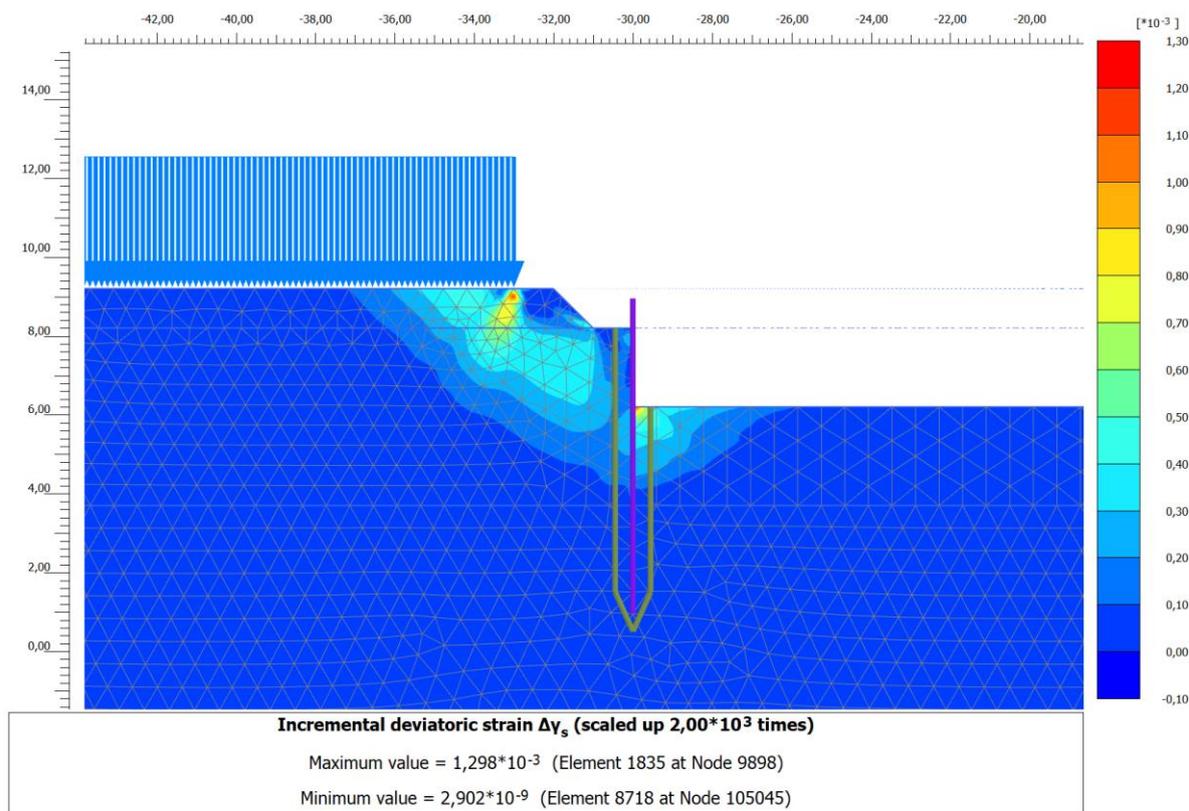


Figura 51. Rapporto tra tensione tangenziale massima e tensione tangenziale mobilitata – Schema A

La figura 28 mostra il rapporto tra tensione tangenziale limite e tensione tangenziale agente in corrispondenza dell'ultimo step di calcolo (più critico ai fini di questa analisi). L'output fornisce indicazioni riguardo la mobilitazione delle spinte limite sulla parete.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

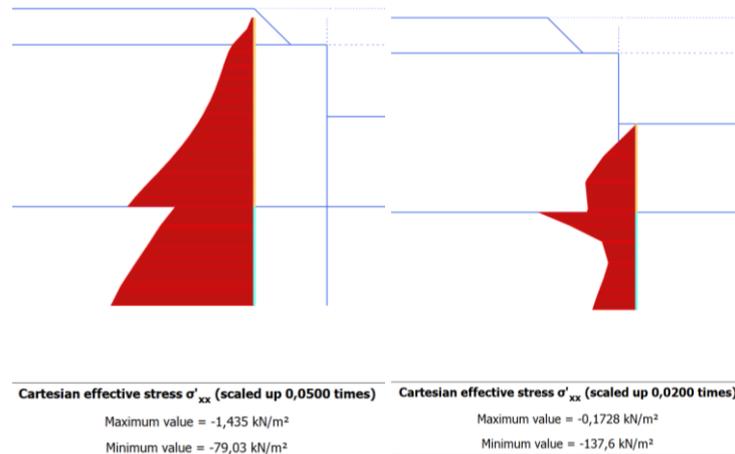


Figura 52. Tensioni orizzontali efficaci paratia - Lato monte e valle – Schema A

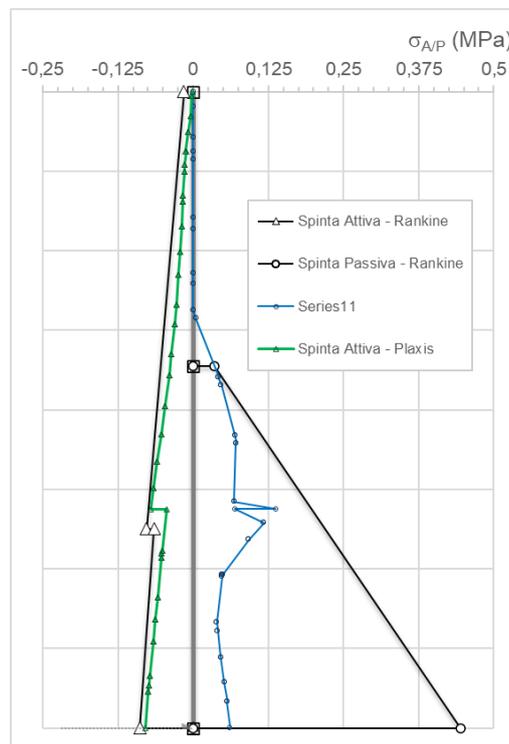


Figura 53. Confronto tensioni limite attive e passive con tensioni orizzontali Plaxis – Schema A

E' possibile osservare come, oltre al margine di sicurezza garantito dall'aver eseguito una analisi con i parametri di resistenza ridotti del fattore 1.25, la resistenza passiva a monte risulta attivata in una percentuale largamente inferiore al 50% rispetto alla spinta calcolabile con Rankine. Ciò garantisce un ulteriore margine di sicurezza nei riguardi del meccanismo.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

- **Schema B**

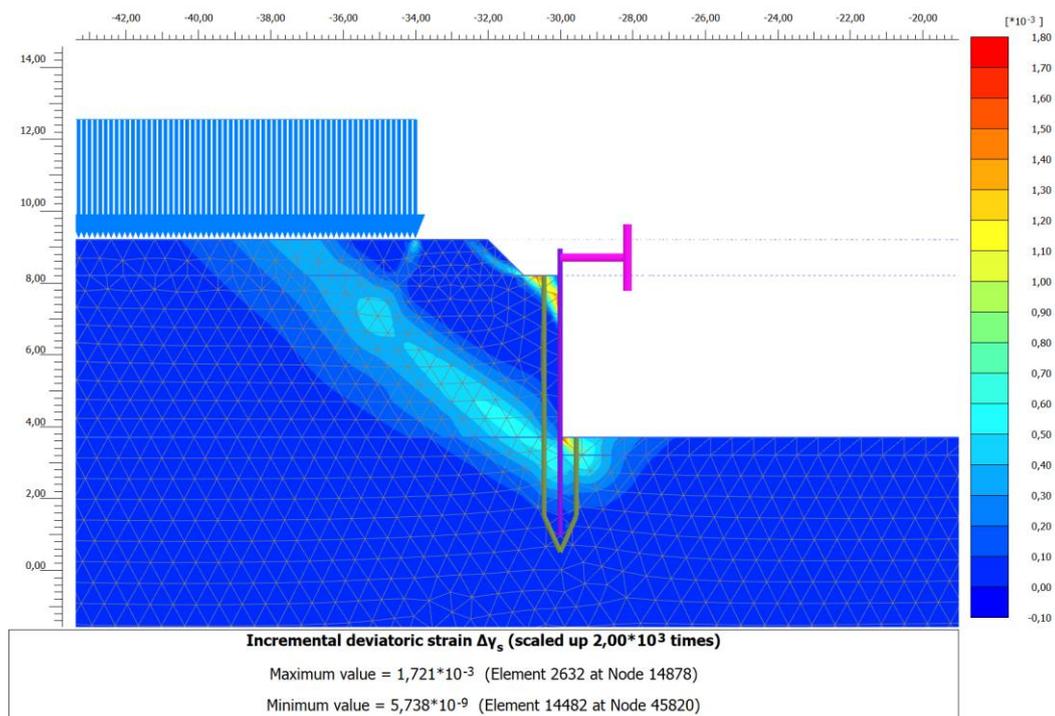


Figura 54. Rapporto tra tensione tangenziale massima e tensione tangenziale mobilitata – Schema B

La figura 28 mostra il rapporto tra tensione tangenziale limite e tensione tangenziale agente in corrispondenza dell'ultimo step di calcolo (più critico ai fini di questa analisi). L'output fornisce indicazioni riguardo la mobilitazione delle spinte limite sulla parete.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

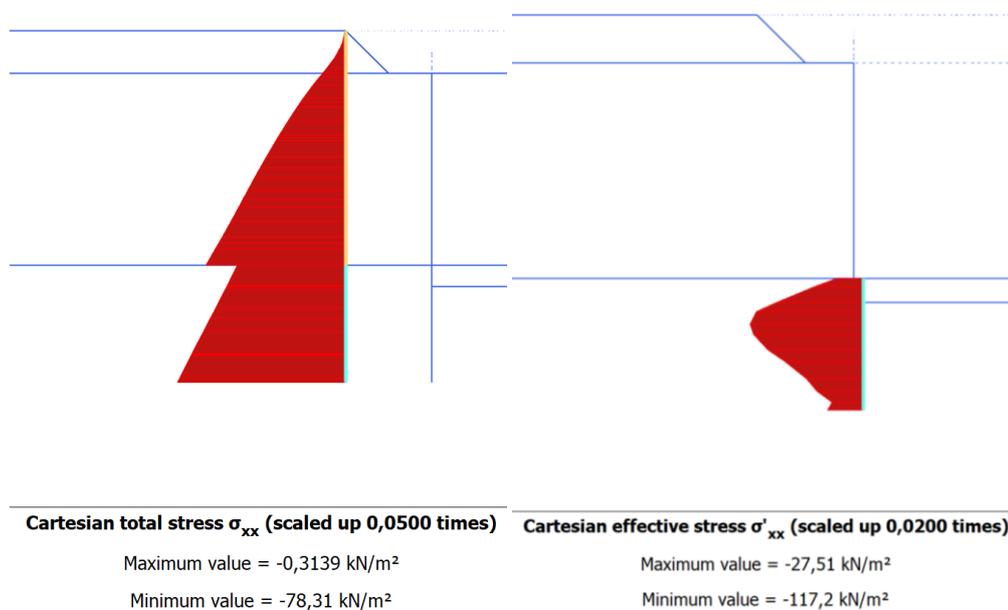


Figura 55. Tensioni orizzontali efficaci paratia - Lato monte e valle – Schema B

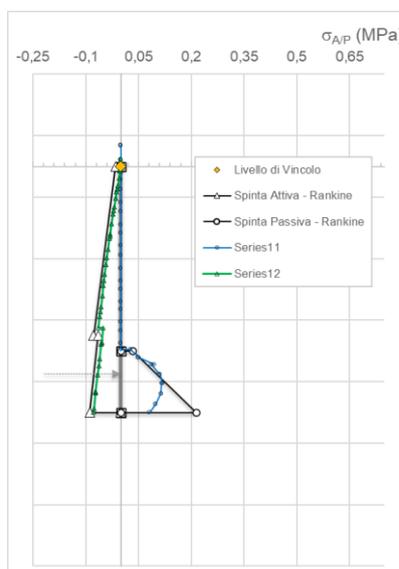


Figura 56. Confronto tensioni limite attive e passive con tensioni orizzontali Plaxis – Schema B

È possibile osservare come, oltre al margine di sicurezza garantito dall'aver eseguito una analisi con i parametri di resistenza ridotti del fattore 1.25, la resistenza passiva a monte risulta attivata in una percentuale largamente inferiore al 50% rispetto alla spinta calcolabile con Rankine. Ciò garantisce un ulteriore margine di sicurezza nei riguardi del meccanismo.



• Schema C

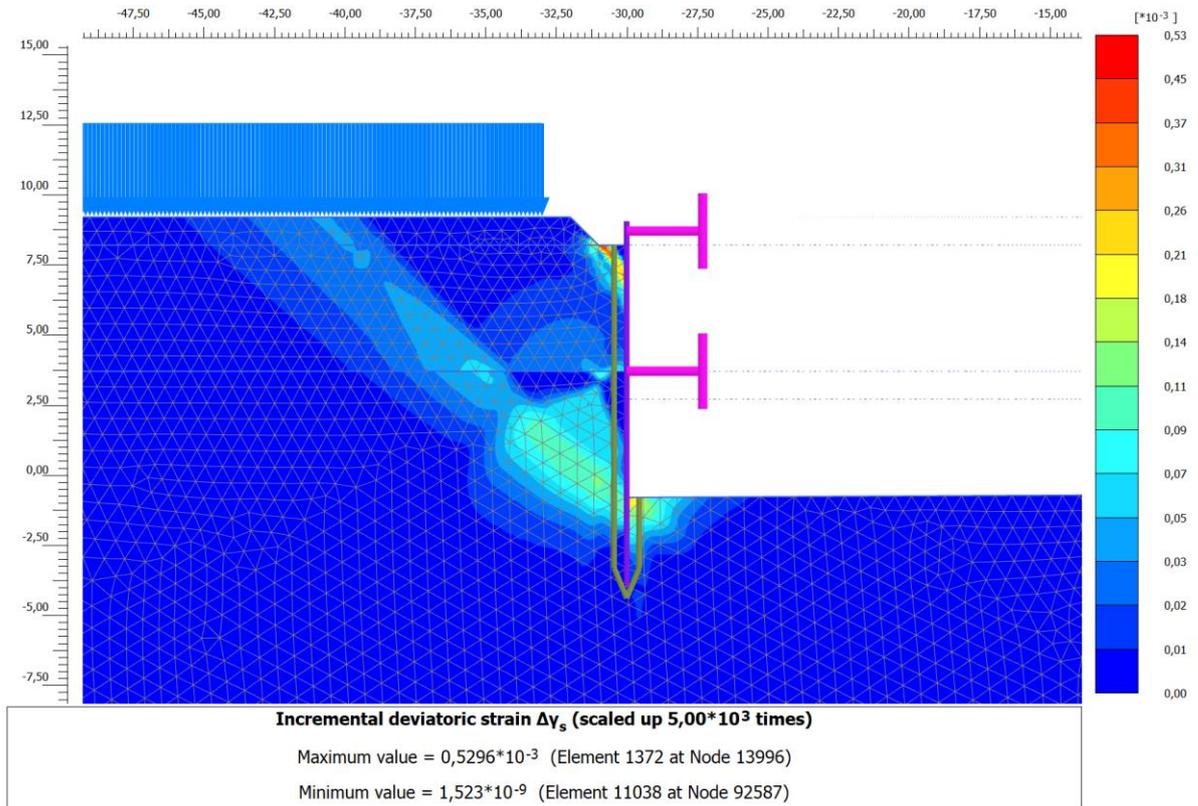
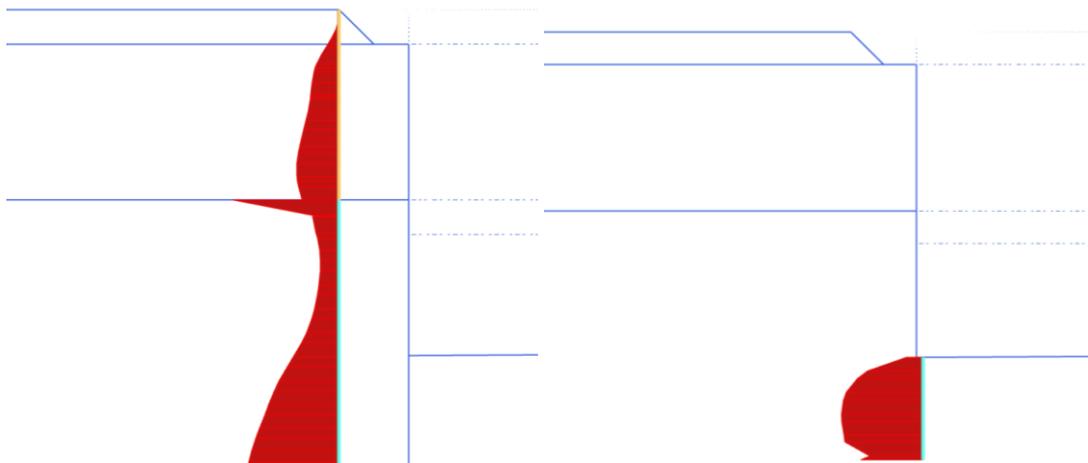


Figura 57. Rapporto tra tensione tangenziale massima e tensione tangenziale mobilitata – Schema C

La figura 28 mostra il rapporto tra tensione tangenziale limite e tensione tangenziale agente in corrispondenza dell'ultimo step di calcolo (più critico ai fini di questa analisi). L'output fornisce indicazioni riguardo la mobilitazione delle spinte limite sulla parete.



Cartesian effective stress σ'_{xx} (scaled up 0,0200 times)

Maximum value = -0,7191 kN/m²

Minimum value = -153,2 kN/m²

Cartesian effective stress σ'_{xx} (scaled up 0,0200 times)

Maximum value = -25,59 kN/m²

Minimum value = -124,4 kN/m²

Figura 58. Tensioni orizzontali efficaci paratia - Lato monte e valle – Schema C

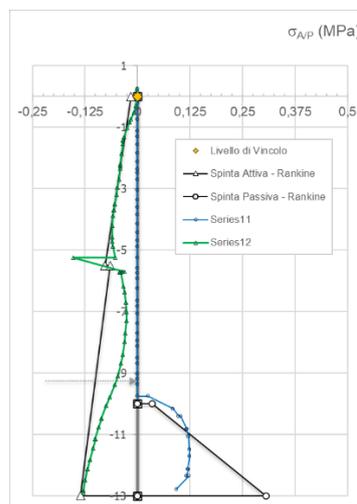


Figura 59. Confronto tensioni limite attive e passive con tensioni orizzontali Plaxis – Schema C

E' possibile osservare come, oltre al margine di sicurezza garantito dall'aver eseguito una analisi con i parametri di resistenza ridotti del fattore 1.25, la resistenza passiva a monte risulta attivata in una percentuale largamente inferiore al 50% rispetto alla spinta calcolabile con Rankine. Ciò garantisce un ulteriore margine di sicurezza nei riguardi del meccanismo.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

APPENDICE F

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Di seguito sono riportate le caratteristiche dei puntone che sono stati utilizzati per i diversi schemi di calcolo B, C e D, E; inoltre sono riportate le verifiche SLU-STR relative ad ogni tipologia di puntone, presentando solo il caso in cui il puntone risulta maggiormente caricato.

- **Schema B**

Dalle verifiche strutturali di seguito riportate è stato possibile adottare un puntone con le seguenti caratteristiche:

Tabella 24 Caratteristiche geometriche puntone adottato - Schema B

<i>Diametro esterno puntone (tubo di acciaio)</i>	D _P =219.1 mm
<i>Spessore puntone (tubo di acciaio)</i>	t=8.0 mm
<i>Lunghezza</i>	L=7.6m
<i>Interasse</i>	i=3m

Tabella 25 Sollecitazioni di progetto puntone – Schema B

Puntone	Y [m]	N _K [kN]	N _{K,MIN} [kN]	N _{D,MIN} [kN]
FixedEndAnchor_1_1	8.7	-137.62	-137.62	-206.4

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

VERIFICA PUNTONE PARATIA		
Tipo Tubo (mm)		219,1
		8
Interasse Tubo (m)		3
Lunghezza Tubo (m)		7,6
Diametro esterno	D _{Ext} (m)	0,2191
Diametro interno	D _{Int} (m)	0,2031
Area Palo acciaio	A (m ²)	0,005305522
Momento Inerzia Palo acciaio	I (m ⁴)	2,95963E-05
Modulo di resistenza	W _{EL} (mm ³)	0,000270163
Modulo di Young Acciaio	E (kPa)	210000000
Acciaio di costruzione	Tipo	S355
Tensione caratteristica a snervamento	f _{yk} (MPa)	355
Coefficiente materiali	γ (-)	1,05
Tensione di progetto a snervamento	f _{yd} (MPa)	338,1
INSTABILITA' PUNTONE		
ε	(-)	0,813616513
d/t	(-)	27,3875
CLASSE SEZIONE	(-)	1
Azione sollecitante Output	(KN/m)	45,8740293
Azione Per Verifica	(KN)	206,4
N _{CR}	KN	1062,0
λ	-	1,3317
α	-	0,21
Φ	-	1,506
χ	-	0,453
N _{b,Rd}	KN	812,4

Figura 60. Verifica Puntone – Schema B

- **Schema C**

Dalle verifiche strutturali di seguito riportate è stato possibile adottare la stessa tipologia di puntone su entrambi i livelli con le seguenti caratteristiche:

Tabella 26 Caratteristiche geometriche puntone adottati - Schema C

	Primo livello	Secondo livello
Diametro esterno puntone (tubo di acciaio)	D _p =219.1 mm	D _p =219.1 mm
Spessore puntone (tubo di acciaio)	t=8.0 mm	t=8.0 mm
Lunghezza	L=7.2m	L=7.2m
Interasse	i=3m	i=3m

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Tabella 27 Sollecitazioni di progetto puntone – Schema C

	Puntone	Y [m]	N _k [kN]	N _{k,MIN} [kN]	N _{D,MIN} [kN]
Primo puntone	FixedEndAnchor_1_1	8.7	-159.0	-159.0	-213.5
Secondo puntone	FixedEndAnchor_2_1	3.7	-576.9	-576.9	-865.4

Dato che è stato possibile applicare la stessa tipologia di puntone per entrambi i livelli dello schema C, di seguito è riportata la verifica del puntone che risulta caricato maggiormente; quindi, si va riferimento alle sollecitazioni ottenute per il secondo livello di puntone:

VERIFICA PUNTONE PARATIA		
Tipo Tubo (mm)		219,1
		8
Interasse Tubo (m)		3
Lunghezza Tubo (m)		7,2
Diametro esterno	D _{Ext} (m)	0,2191
Diametro interno	D _{Int} (m)	0,2031
Area Palo acciaio	A (m ²)	0,005305522
Momento Inerzia Palo acciaio	I (m ⁴)	2,95963E-05
Modulo di resistenza	W _{EL} (mm ³)	0,000270163
Modulo di Young Acciaio	E (kPa)	210000000
Acciaio di costruzione	Tipo	S355
Tensione caratteristica a snervamento	f _{yk} (MPa)	355
Coefficiente materiali	γ (-)	1,05
Tensione di progetto a snervamento	f _{yd} (MPa)	338,1
INSTABILITA' PUNTONE		
ε	(-)	0,813616513
d/t	(-)	27,3875
CLASSE SEZIONE	(-)	1
Azione sollecitante Output	(KN/m)	192,31267
Azione Per Verifica	(KN)	865,4
N _{CR}	KN	1183,3
λ	-	1,2616
α	-	0,21
Φ	-	1,407
χ	-	0,492
N _{b,Rd}	KN	883,2

Figura 61. Verifica Puntone – Schema C

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

APPENDICE G

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

- **Cordolo di testa per Accessi e Ventilazioni**

Seguendo quanto riportato in capitolo 5.2.5 è stata eseguita la verifica del cordolo di testa della paratia di micropali da essere applicata negli accessi e griglie di ventilazione; cioè per gli schemi di calcolo A, B e C. Utilizzando lo schema di trave su più appoggi uniformemente caricata dagli scarichi dei puntoni per unità di lunghezza

In via cautelativa, la trave è stata verificata ipotizzando un momento massimo pari a:

$$M_{Max} = \frac{1}{8}ql^2 \quad V_{Max} = 0.6ql$$

Dove q rappresenta la reazione del puntone in testa che risulta maggiormente caricato tra le sezioni analizzate ed L rappresenta il loro interasse.

Considerando quindi lo sforzo normale massimo relativo ottenuto sul puntone di testa dallo schema C, si ha:

$$M_{Max} = \frac{1}{8}ql^2 = \frac{1}{8} \cdot \frac{79.5kN}{m} \cdot (3m)^2 = 89.43KNm$$

$$V_{Max} = 0.6 \cdot 79.57kN/m \cdot 3m = 143.4 KN$$

Utilizzando un'armatura longitudinale di 12Φ16, un'armatura a taglio costituita da Φ12/20 e copriferro pari a 5cm; i valori di resistenza della sezione di calcestruzzo armato del cordolo di testa sono confrontati con le sollecitazioni di progetto:

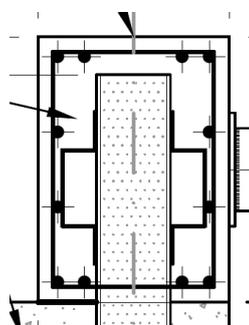


Figura 62. Particolare armature trave di testa

$$M_{E,d} = 89.43 KNm$$

$$M_{R,d} = 200.8 KNm$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

$$V_{E,d} = 143.1 \text{ KN}$$

$$V_{R,ds} = 265 \text{ KN}$$

La verifica risulta soddisfatta.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

APPENDICE H

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

- **Trave di ripartizione per Accessi e Ventilazioni**

Seguendo quanto riportato in capitolo 5.2.6 è stata eseguita la verifica della trave di ripartizione per il secondo livello di puntone da essere applicata negli accessi e griglie di ventilazione; cioè per lo schema di calcolo C. Utilizzando lo schema di trave su più appoggi uniformemente caricata dagli scarichi dei puntone per unità di lunghezza.

In via cautelativa, la trave è stata verificata ipotizzando un momento massimo pari a:

$$M_{Max} = \frac{1}{10} q l^2 \qquad V_{Max} = 0.6 q l$$

Dove q rappresenta la reazione del puntone posto al secondo livello dello schema C nel caso in esame, ed L rappresenta il loro interasse.

Considerando quindi lo sforzo normale massimo relativo ottenuto, si ha:

$$M_{Max} = \frac{1}{10} q l^2 = \frac{1}{10} \cdot 288.47 \text{ kN/m} \cdot (3\text{m})^2 = 259.62 \text{ KNm}$$

$$V_{Max} = 0.6 \cdot 288.47 \text{ kN/m} \cdot 3\text{m} = 519.25 \text{ KN}$$

Ipotizzando una trave di ripartizione HEB300 con le seguenti caratteristiche:

Tipo di Trave	HE 300B
Acciaio S	355
$f_{y,d}$ (MPa)	338.10
A (m ²)	1.49E-02
A _{taglio} (m ²)	4.74E-03
W _{El} (m ³)	1.68E-03

E' possibile procedere a realizzare la verifica secondo quanto prescritto al punto 4.2.4.1.2 delle NTC e utilizzando l'espressione:

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

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

Verifica	
σ_N (MPa)	0,00
σ_M (MPa)	154,75
τ (MPa)	109,48
σ_d (MPa)	244,76
$f_{y,d}$ (MPa)	338,10

Verifica Soddisfatta

La verifica risulta soddisfatta con una trave di ripartizione HEB300 sul secondo livello di puntoni per gli accessi e griglie di ventilazioni.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

APPENDICE I



Di seguito sono riportati i risultati delle analisi dello schema dell'accesso a sbalzo in termini di sollecitazioni per unità di lunghezza: M_{xx} , M_{yy} , $Q(1-2)$:

SLU STR A1+M1+R1

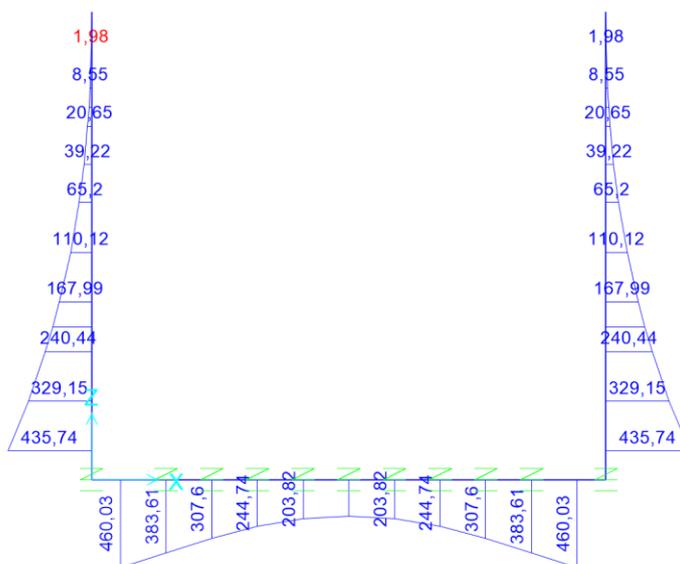


Figura 63. Momento flettente M3-3

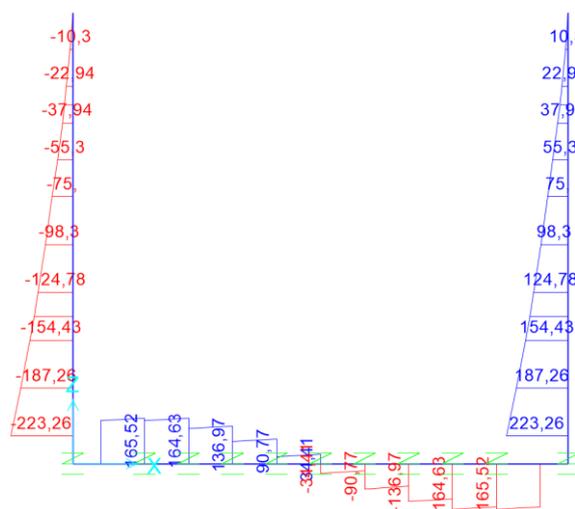


Figura 64. Taglio combinato



SLU STR SISMA X

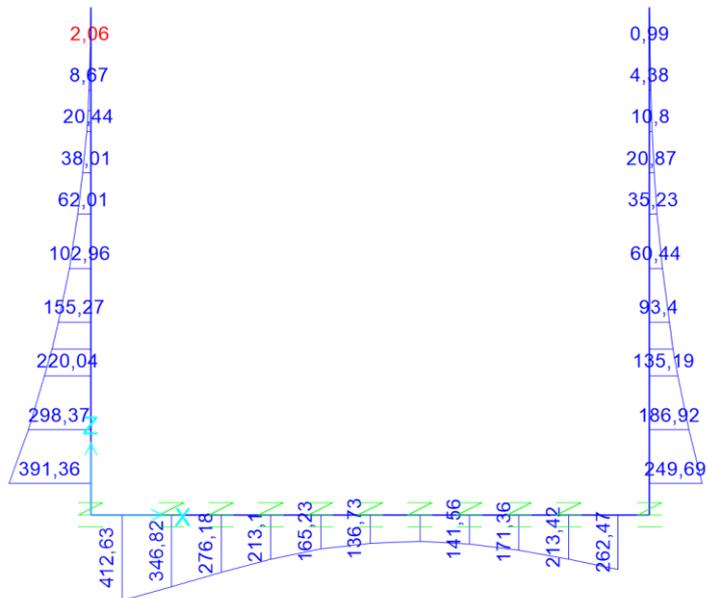


Figura 65. Momento flettente M3-3

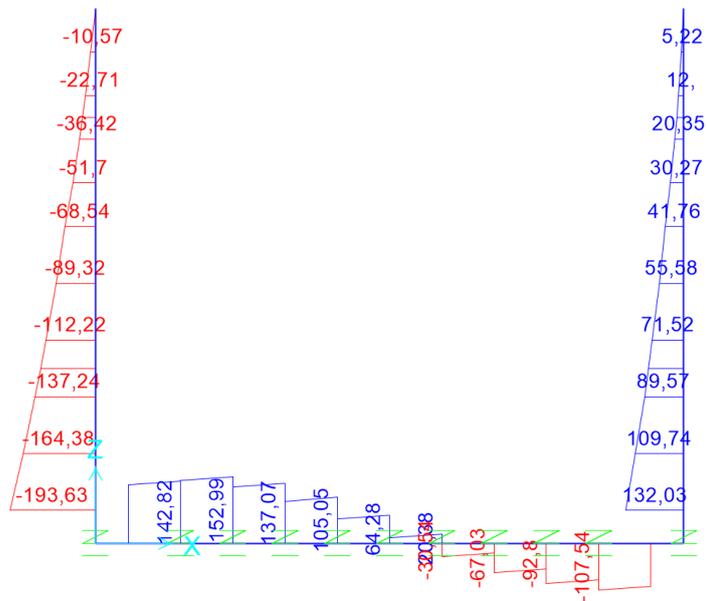


Figura 66. Taglio combinato



SLE RARA

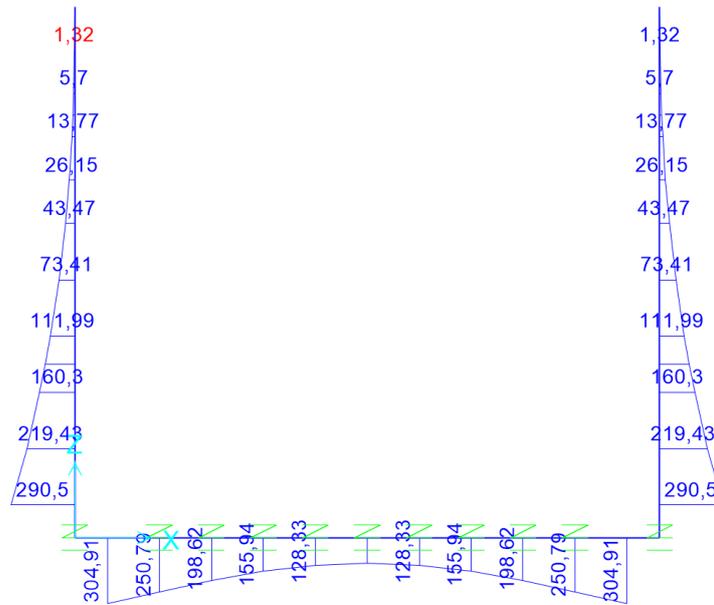


Figura 67. Momento flettente M3-3

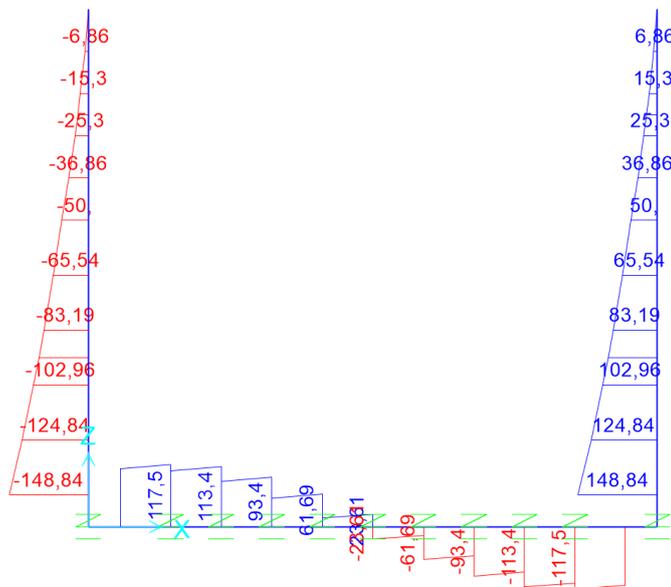


Figura 68. Taglio combinato



SLE FREQUENTE

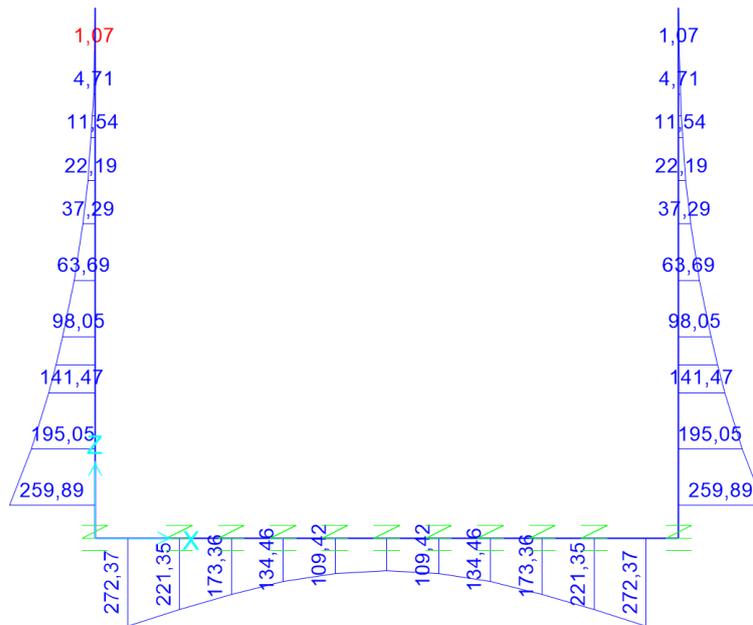


Figura 69. Momento flettente M3-3

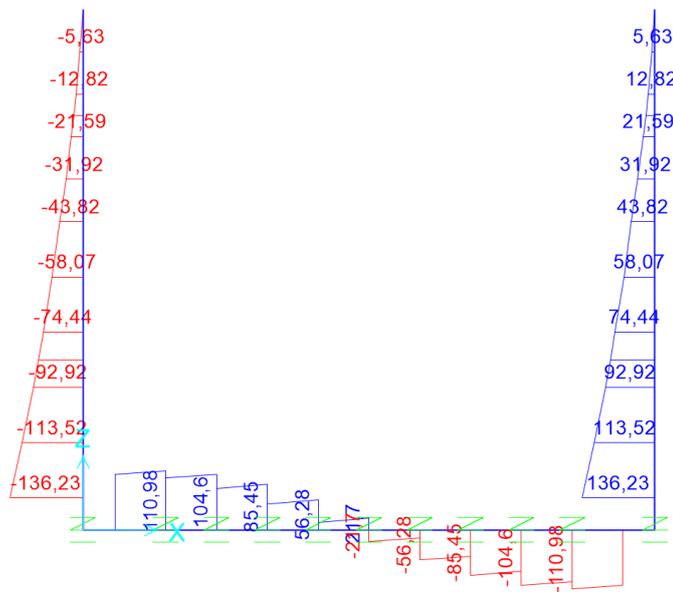


Figura 70. Taglio combinato



SLE QUASI PERMANENTE

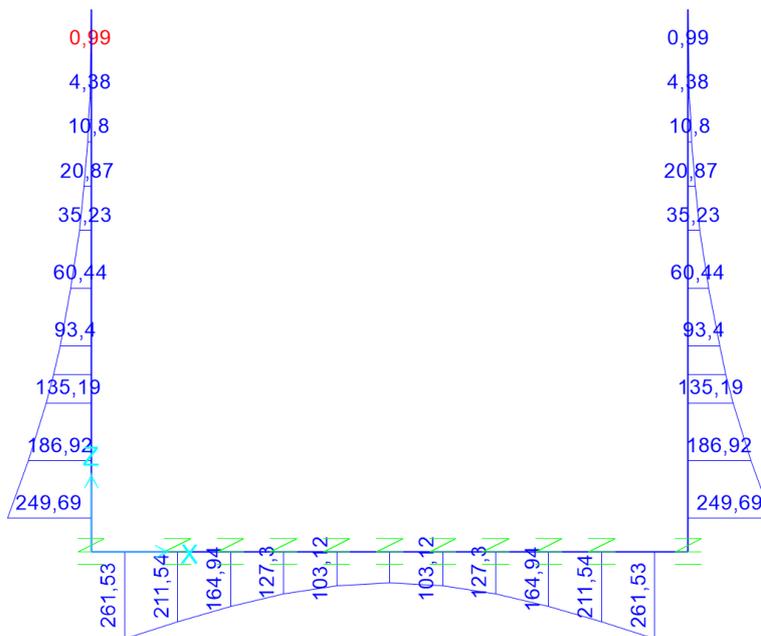


Figura 71. Momento flettente M3-3

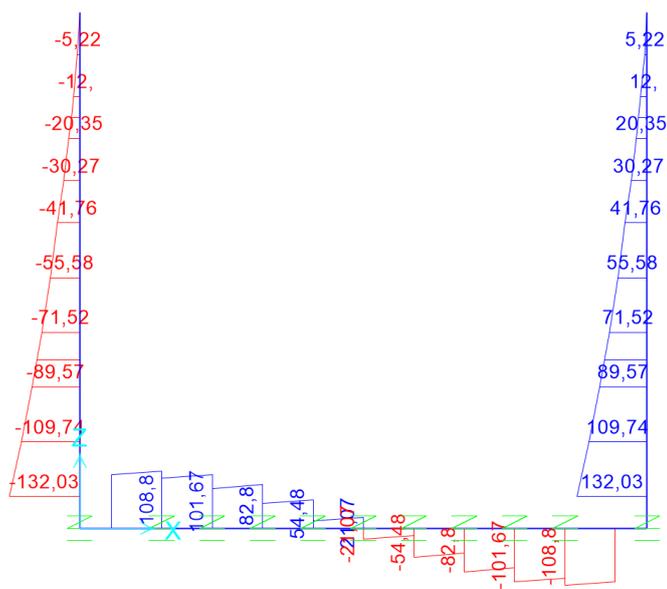


Figura 72. Taglio combinato

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Verifiche strutturali

Di seguito sono riportate le verifiche strutturali allo Stato Limite Ultimo, così come le verifiche allo Stato Limite di Esercizio considerando i rispettivi involucri di sollecitazioni appena mostrati. In entrambi i casi sono stati depurati i valori di picco e sono stati presi in considerazione i valori di momento negativo e taglio sulle facce degli elementi e non sull'asse neutro.

Nel caso delle verifiche allo Stato Limite di Esercizio sono stati utilizzati per la verifica delle tensioni in esercizio, controllo della fessurazione e deformazione i valori limiti per la combinazione quasi permanente; il momento resistente il M_{lim} nella condizione dello stato limite di esercizio (SLE) è determinato dalla seguente condizione:

$$M_{lim} = \min [M_{0.30} ; M_{s_c} ; M_{s_s}]$$

Dove,

$$M_{0.30} = M_{max} \text{ per una fessura limite } w_2 = 0,30\text{mm} \quad \text{NTC §4.1.2.2.4.}$$

$$M_{s_c} = M_{max} \text{ per } s_{c,max} = 0,45 f_{ck} \quad \text{NTC §4.1.2.2.5.1.}$$

$$M_{s_s} = M_{max} \text{ per } s_{s,max} = 0,80 f_{yk} \quad \text{NTC §4.1.2.2.5.2.}$$

Tabella 28 Capacità delle sezioni tipologiche

Sezione	H (cm)	d (cm)	As (cm ² /m)	As' (cm ² /m)	M _{lim} (kN.m/m)	M _{Rd} (kN.m/m)
Muro-Zona superiore	60	52.5	24/200	φ24/200	175	442.75
Muro-Zona Inferiore	60	52.5	φ24/100	φ24/200	415	842.55
Soletta di fondo-Laterale	60	52.5	φ24/100	φ24/200	415	842.55
Soletta di fondo-Centrale	60	52.5	φ24/200	φ24/200	175	442.75

Dal confronto dei momenti flettenti massimi M_{max} per SLE con i momenti limite M_{lim} di ciascuna sezione tipologica utilizzata, si verifica che $M_{max} < M_{lim}$

L'allegato A include come riferimento un esempio di calcolo dei momenti flettenti M_{lim} e M_{Rd} per la sezione T1, ottenuto tramite il software RC-SEC

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Accesso a sbalzo	Staffe	STATO LIMITE ULTIMO		
		$V_{Rd,s,ULS}$	$V_{Ed,ULS}$	Verifica
	Ø10/200/200	628	224	OK

Si osserva quindi che dal confronto dei momenti flettenti massimi allo SLU di ciascuna sezione, si verifica che $M_{Rd,ULS} < M_{Ed,ULS}$; così come per il taglio $V_{Rd,ULS} < V_{Ed,ULS}$.

Dal confronto dei momenti flettenti massimi M_{max} per SLE con i momenti limite M_{lim} di ciascuna sezione tipologica utilizzata, si verifica che $M_{Ed,SLE} < M_{lim,SLE}$.

Verifiche geotecniche

Capacità portante Accesso aperto

La verifica della capacità portante della soletta di base degli accessi è riportata nel seguito.

La capacità portante è valutata secondo la formulazione classica di Brinch-Hansen per le fondazioni dirette riportata nel seguito:

$$q_{ult} = (cN_c d_c s_c i_c g_c b_c + qN_q d_q s_q i_q g_q b_q + \frac{1}{2} \gamma B' N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma)$$

Con:

q_{ult} è la capacità portante ultima

N_c, N_q, N_γ sono i fattori di capacità; portante relativi a coesione, sovraccarico e peso proprio del terreno

d_c, d_q, d_γ sono fattori correttivi relativi alla profondità del piano di posa

s_c, s_q, s_γ sono fattori correttivi relativi alla dimensione della fondazione

q è la tensione verticale efficace al livello della base della fondazione

i_c, i_q, i_γ sono fattori correttivi relativi all'inclinazione della fondazione

Nell'applicazione presentata, i coefficienti g risultano uguali a 1.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

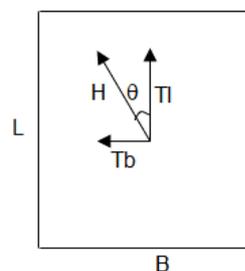
Secondo quanto prescritto dalle norme tecniche per le costruzioni al par. 6.4.3.1.1 il coefficiente parziale (R3) applicato all'aliquota di resistenza della capacità portante di base è pari a 1,35.

Tabella 29 Verifica capacità portante

Parametri geotecnici	
c_k	10 kPa
ϕ_k	36 °
γ_k	19 kN/mc
Dimensione fondazione	
B	6 m
L	9 m
θ Inclinazione del carico	0 °
α Inclinazione piano di posa	29 °
β Inclinazione piano campagna	0 °
Profondità piano di posa	
Profondità	5 m

Tensione efficace al piano di posa	
σ'_v (Analisi numerica)	100 kPa

Forza agente	
Carico caratteristico	1080 kN
Fattore sicurezza parziale	1,4
Carico di progetto	1512 kN



Capacità portante	
s_c	1,50
s_q	1,39
s_γ	0,73
d_c	1,28
d_q	1,17
$i_c i_q$	1,00
i_γ	1,00
g_c	1,00
g_q	1,00



CITTA' DI TORINO

Metropolitana di Torino - Linea 2
Tratta: Politecnico-Rebaudengo
Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna

Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione

MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

g_{γ}	1,00
b_c	0,62
b_q	0,63
b_{γ}	0,63
N_c	50,53
N_q	37,71
N_{γ}	40,01

q_c	602	kPa
q_q	3888	kPa
q_{γ}	1057	kPa

q_{ult}	5547	kPa
Fattore sicurezza parziale	1,35	
Resistenza di progetto	221866	kN
Carico di progetto	1512	kN
	Verificato	

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

APPENDICE J



Di seguito sono riportati i risultati delle analisi dello schema dell'accesso chiuso in termini di sollecitazioni per unità di lunghezza: M_{xx} , M_{yy} , $Q(1-2)$:

SLU STR A1+M1+R1

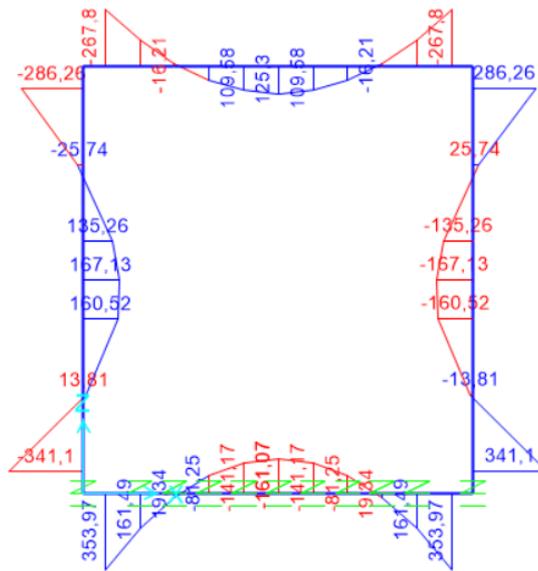


Figura 73. Momento flettente M3-3

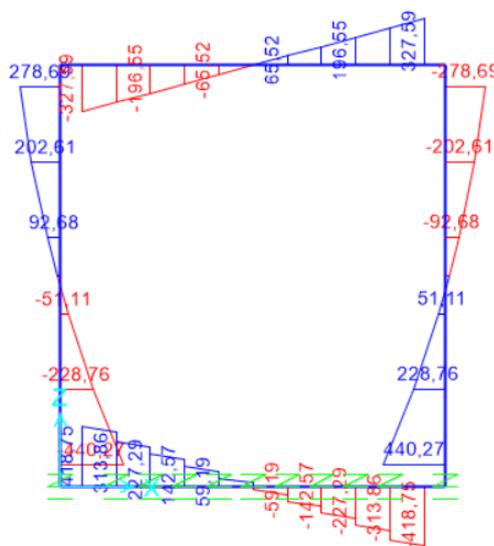


Figura 74. Taglio combinato



SLU STR SISMA X

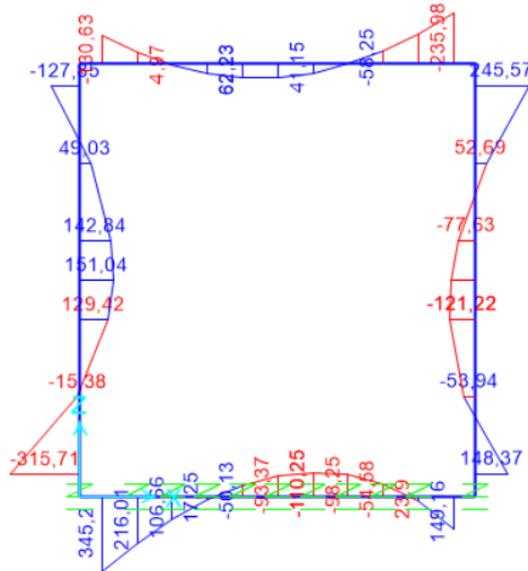


Figura 75. Momento flettente M3-3

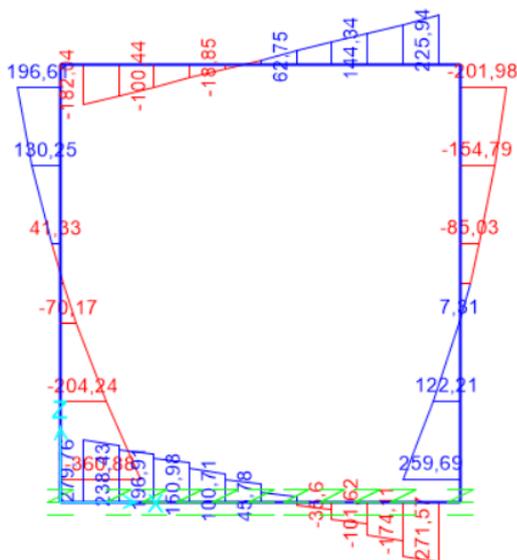


Figura 76. Taglio combinato



SLE RARA

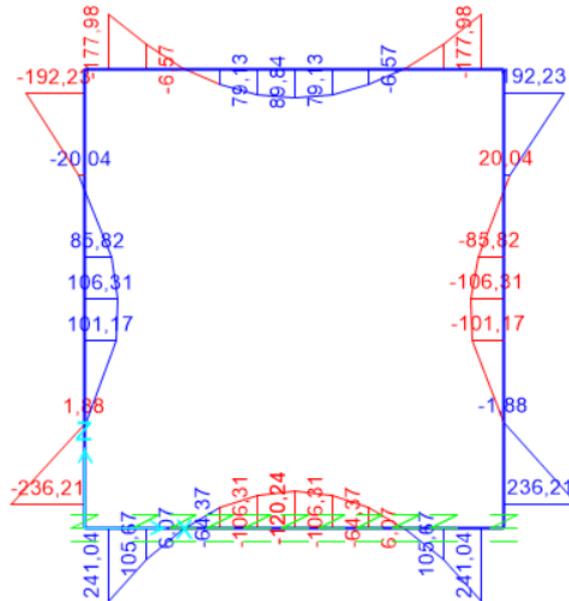


Figura 77. Momento flettente M3-3

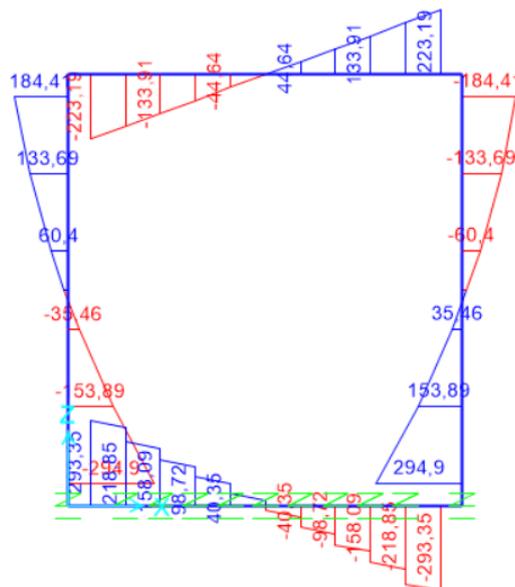


Figura 78. Taglio combinato



SLE FREQUENTE

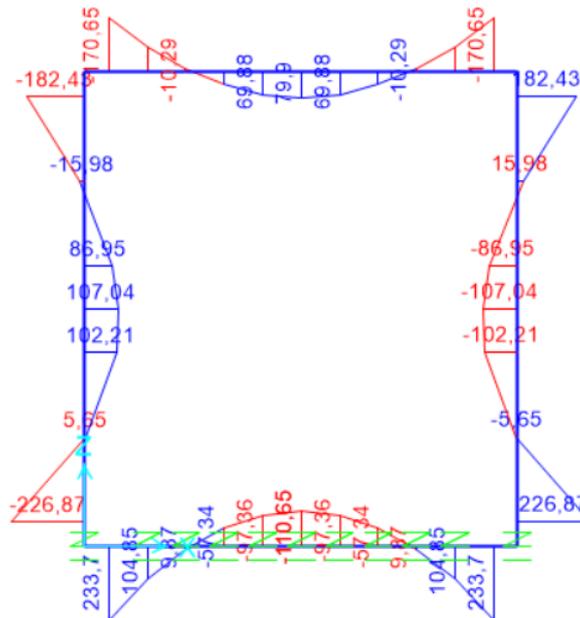


Figura 79. Momento flettente M3-3

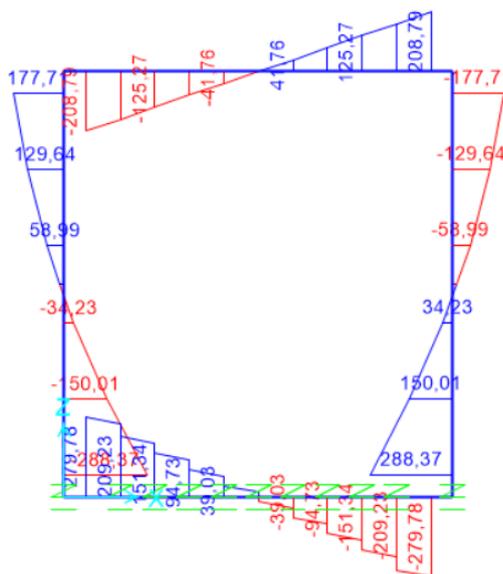


Figura 80. Taglio combinato



SLE QUASI PERMANENTE

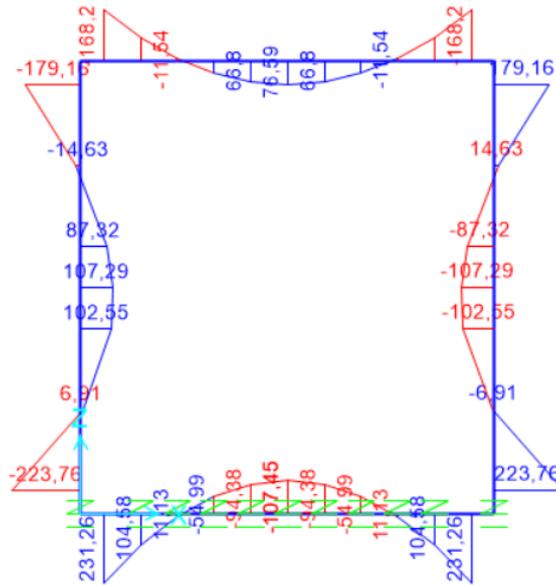


Figura 81. Momento flettente M3-3

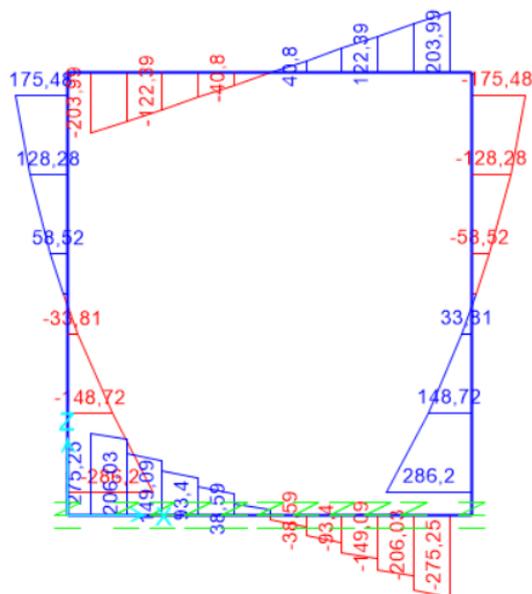


Figura 82. Taglio combinato

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Verifiche strutturali

Di seguito sono riportate le verifiche strutturali allo Stato Limite Ultimo, così come le verifiche allo Stato Limite di Esercizio considerando i rispettivi involucri di sollecitazioni appena mostrati. In entrambi i casi sono stati depurati i valori di picco e sono stati presi in considerazione i valori di momento negativo e taglio sulle facce degli elementi e non sull'asse neutro.

Nel caso delle verifiche allo Stato Limite di Esercizio sono stati utilizzati per la verifica delle tensioni in esercizio, controllo della fessurazione e deformazione i valori limiti per la combinazione quasi permanente; il momento resistente limite M_{lim} nella condizione dello stato limite di esercizio (SLE) è determinato dalla seguente condizione:

$$M_{lim} = \min [M_{0.30} ; M_{s_c} ; M_{s_s}]$$

Dove,

$$M_{0.30} = M_{max} \text{ per una fessura limite } w_2 = 0,30\text{mm} \quad \text{NTC §4.1.2.2.4.}$$

$$M_{s_c} = M_{max} \text{ per } s_{c,max} = 0,45 f_{ck} \quad \text{NTC §4.1.2.2.5.1.}$$

$$M_{s_s} = M_{max} \text{ per } s_{s,max} = 0,80 f_{yk} \quad \text{NTC §4.1.2.2.5.2.}$$

Tabella 30 Capacità delle sezioni tipologiche

Sezione	H (cm)	d (cm)	As (cm ² /m)	As' (cm ² /m)	M _{lim} (kN.m/m)	M _{Rd} (kN.m/m)
Muro-Zona superiore	60	52.5	φ24/200	φ24/200	175	442.75
Muro-Zona Inferiore	60	52.5	φ24/100	φ24/200	415	842.55
Soletta di fondo-Laterale	60	52.5	φ24/100	φ24/200	415	842.55
Soletta di fondo-Centrale	60	52.5	φ24/200	φ24/200	175	442.75
Soletta di copertura-Laterale	60	52.5	φ24/200	φ24/200	175	442.75
Soletta di copertura-Centrale	60	52.5	φ24/200	φ24/200	175	442.75

Dal confronto dei momenti flettenti massimi M_{max} per SLE con i momenti limite M_{lim} di ciascuna sezione tipologica utilizzata, si verifica che $M_{max} < M_{lim}$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

L'allegato A include come riferimento un esempio di calcolo dei momenti flettenti M_{lim} e M_{Rd} per la sezione T1, ottenuto tramite il software RC-SEC

Accesso chiuso	Staffe	STATO LIMITE ULTIMO		
		$V_{Rd,s, ULS}$	$V_{Ed, ULS}$	Verifica
	Ø10/200/200	628	440	OK

Si osserva quindi che dal confronto dei momenti flettenti massimi allo SLU di ciascuna sezione, si verifica che $M_{Rd, ULS} < M_{Ed, ULS}$; così come per il taglio $V_{Rd, ULS} < V_{Ed, ULS}$.

Dal confronto dei momenti flettenti massimi M_{max} per SLE con i momenti limite M_{lim} di ciascuna sezione tipologica utilizzata, si verifica che $M_{Ed, SLE} < M_{lim, SLE}$.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

APPENDICE K

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Output

Di seguito sono riportati i risultati delle analisi della vasca d'accumulo antincendio in termini di sollecitazioni:

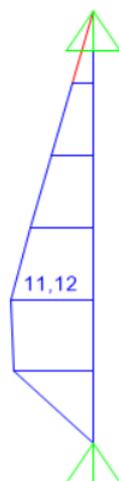


Figura 83. Muro Vasca di accumulo - Momento flettente – SLE

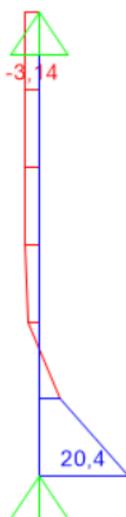


Figura 84. Muro Vasca di accumulo - Taglio – SLE

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

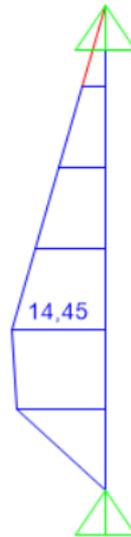


Figura 85. Muro Vasca di accumulo - Momento flettente – SLU Statico

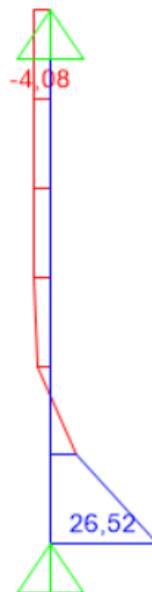


Figura 86. Muro Vasca di accumulo - Taglio – SLU Statico

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

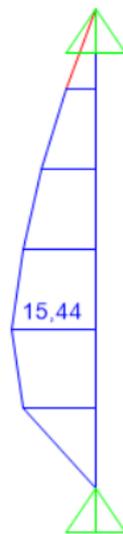


Figura 87. Muro Vasca di accumulo - Momento flettente – SLU Sisma

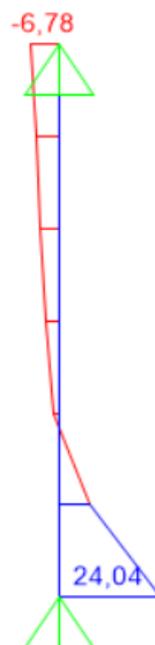


Figura 88. Muro Vasca di accumulo - Taglio – SLU Sisma

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

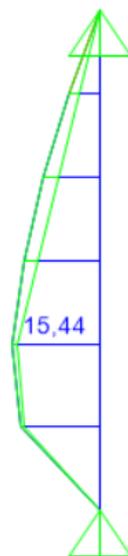


Figura 89. Muro Vasca di accumulo - Momento flettente – Inviluppo SLU

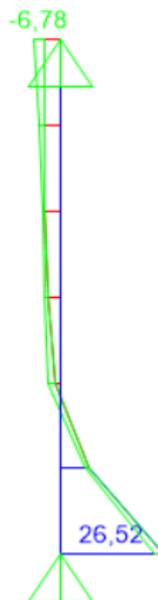


Figura 90. Muro Vasca di accumulo - Taglio – Inviluppo SLU

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino - Linea 2 Tratta: Politecnico-Rebaudengo Lotto Costruttivo 1: Rebaudengo-Bologna
Stazione Bologna - Relazione di calcolo opere di sostegno e strutture accessi stazione	MTL2T1A2DSTRSBOR003-0-1

Verifiche strutturali

Di seguito sono riportate le verifiche strutturali allo Stato Limite Ultimo, così come le verifiche allo Stato Limite di Esercizio considerando i rispettivi involucri di sollecitazioni appena mostrati.

Nel caso delle verifiche allo Stato Limite di Esercizio sono stati utilizzati per la verifica delle tensioni in esercizio, controllo della fessurazione e deformazione i valori limiti per la combinazione quasi permanente; il momento resistente limite M_{lim} nella condizione dello stato limite di esercizio (SLE) è determinato dalla seguente condizione:

$$M_{lim} = \min [M_{0.30} ; M_{s_c} ; M_{s_s}]$$

Dove,

$M_{0.30}$ = Mmax per una fessura limite $w_2 = 0,30\text{mm}$ NTC §4.1.2.2.4.

M_{s_c} = Mmax per $s_{c,max} = 0,45 f_{ck}$ NTC §4.1.2.2.5.1.

M_{s_s} = Mmax per $s_{s,max} = 0,80 f_{yk}$ NTC §4.1.2.2.5.2.

Tabella 31 Verifiche strutturali armatura principale Muri – Vasca antincendio

Armatura		STATO LIMITE ULTIMO			STATO LIMITE DI ESERCIZIO		
		$M_{Rd,ULS}$	$M_{Ed,ULS}$	Verifica	$M_{Rd,lim SLE}$	$M_{Ed,SLS}$	Verifica
Esterna	Ø16/200	175.5	15.44	OK	66	11.12	OK
Interna	Ø16/200						

Tabella 32 Verifiche strutturali armatura a taglio Soletta di copertura – Vasca antincendio

Staffe	STATO LIMITE ULTIMO		
	$V_{Rd,ULS}$	$V_{Ed,ULS}$	Verifica
Ø8/200/400	105	26.5	OK

Si osserva quindi che dal confronto dei momenti flettenti massimi allo SLU di ciascuna sezione, si verifica che $M_{Rd,ULS} < M_{Ed,ULS}$; così come per il taglio $V_{Rd,ULS} < V_{Ed,ULS}$.

Dal confronto dei momenti flettenti massimi M_{max} per SLE con i momenti limite M_{lim} di ciascuna sezione tipologica utilizzata, si verifica che $M_{Ed,SLE} < M_{lim,SLE}$.