

**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		 INFRASTRUTTURE per la mobilità												INFRATRASPORTI 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	PROGETTO STRUTTURALE – GALLERIA ARTIFICIALE TRATTE D’OPERA GA4 RELAZIONE DI CALCOLO													
		ELABORATO						REV.		SCALA	DATA				
		Int.	Est.					-	28/07/2023						
BIM MANAGER Geom. L. D’Accardi		MT	L2	T1	A1	D	STR	GA4	R	001	0	3	-	28/07/2023	

AGGIORNAMENTI

Fig. 1 di 1


REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	VISTO
0	EMISSIONE	18/01/22	GGI	ECA	FRI	RCR
1	Emissione finale a seguito di verifica preventiva	30/11/22	GGI	ECA	FRI	RCR
2	Emissione finale a seguito di verifica preventiva	29/03/23	FCA	ECA	FRI	RCR
3	Emissione finale a seguito di verifica preventiva	28/07/23	ECA	ECA	FRI	RCR
-	-	-	-	-	-	-

<table border="1"> <tr> <td>LOTTO 1</td> <td>CARTELLA</td> <td>9.5.1</td> <td>38</td> <td>MTL2T1A1D</td> <td>STRGA4R001</td> </tr> </table>						LOTTO 1	CARTELLA	9.5.1	38	MTL2T1A1D	STRGA4R001	STAZIONE APPALTANTE DIRETTORE DI DIVISIONE INFRASTRUTTURE E MOBILITÀ Ing. R. Bertasio RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. A. Strozziro					
LOTTO 1	CARTELLA	9.5.1	38	MTL2T1A1D	STRGA4R001												


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

INDICE


1.	PREMESSA	14
2.	DOCUMENTI E NORMATIVE DI RIFERIMENTO	16
2.1	NORMATIVE DI RIFERIMENTO	16
2.2	PROGRAMMI DI CALCOLO	19
3.	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	20
3.1	CALCESTRUZZO PER DIAFRAMMI: C25/30	20
3.2	CALCESTRUZZO PER PIEDRITTI DI SOPRAELEVAZIONE, SOLETTA E STRUTTURE INTERNE: C30/37	20
3.3	ACCIAIO DA CEMENTO ARMATO: B450C	21
3.4	ACCIAIO PER CARPENTERIA METALLICA – MICROPALI	21
3.5	MISCELE CEMENTIZIE PER INIEZIONI A BASSA PRESSIONE – MICROPALI	21
3.6	COPRIFERRO MINIMO E COPRIFERRO NOMINALE: DIAFRAMMI	22
3.7	COPRIFERRO MINIMO E COPRIFERRO NOMINALE: SOLETTA E STRUTTURE INTERNE	22
4.	DESCRIZIONE DELLE OPERE	25
5.	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	27
5.1	CONTESTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO	27
5.2	PARAMETRI GEOTECNICI DI RIFERIMENTO	29
6.	CARATTERIZZAZIONE SISMICA	30
6.1	VALUTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA DI BASE	30
6.2	FATTORE DI AMPLIFICAZIONE DELLO SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO	31
6.3	CATEGORIA DI SOTTOSUOLO	31
6.4	VALUTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA DI PROGETTO	32
7.	CRITERI DI CALCOLO DELLE OPERE	35
7.1	CENNI NORMATIVI	35
7.2	ANALISI DELL'INTERAZIONE PARATIA-TERRENO	38
7.3	CARICHI APPLICATI ALLE STRUTTURE	40

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

7.4	SPINTA DEL TERRENO	42
7.5	ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE	44
7.6	CAPACITÀ PORTANTE	46
7.6.1	CAPACITÀ PORTANTE LATERALE	46
7.6.2	CAPACITÀ PORTANTE DI BASE	47
7.7	VERIFICHE AL GALLEGGIAMENTO	48
8.	DIMENSIONAMENTO E VERIFICHE DEI DIAFRAMMI DEFINITIVI	50
8.1	FASI DI CALCOLO	51
8.2	ANALISI DEI CARICHI	54
8.3	VALUTAZIONE DELLA ROBUSTEZZA	57
8.4	RISULTATI DI CALCOLO	58
8.5	VERIFICA STRUTTURALE DIAFRAMMA	61
8.5.1	VERIFICA STRUTTURALE – SLE	65
8.6	VERIFICA PUNTELLI METALLICI	66
8.7	VERIFICA TRAVE DI RIPARTIZIONE	69
8.8	MOBILITAZIONE DELLA SPINTA PASSIVA	72
8.9	ANALISI DI STABILITÀ	74
8.10	VERIFICA AL GALLEGGIAMENTO (BREVE TERMINE)	76
8.11	VERIFICA AL GALLEGGIAMENTO (LUNGO TERMINE)	83
8.12	VERIFICA DI CAPACITÀ PORTANTE	85
9.	DIMENSIONAMENTO E VERIFICHE DELLE BERLINESI PROVVISORIALI	88
9.1	FASI DI CALCOLO	89
9.2	RISULTATI DI CALCOLO	90
9.3	VERIFICA STRUTTURALE MICROPALO	93
9.4	MOBILITAZIONE DELLA SPINTA PASSIVA	94
9.5	VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE	96
10.	VALIDAZIONE DEI MODELLI ESEGUITI	98
11.	DIMENSIONAMENTO E VERIFICHE DELLA SOLETTA DI COPERTURA E DELLE STRUTTURE INTERNE	99
11.1	CRITERI DI CALCOLO	99

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

11.1.1	VALORE AMMISSIBILE DI APERTURA DELLE FESSURE	99
11.1.2	LIMITI TENSIONALI PER LE VERIFICHE ALLO SLE	99
11.2	GEOMETRIA DELL'OPERA	100
12.	DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE INTERNE	101
12.1	ANALISI DEI CARICHI DELLE STRUTTURE INTERNE	101
12.1.1	PERMANENTI STRUTTURALI (G1)	101
12.1.2	PERMANENTI PORTATI (G2)	101
12.1.3	CARICHI VARIABILI (Q)	102
12.1.4	SPINTA DELLA FALDA (G1 FALDA)	105
12.1.5	RITIRO (ΔT)	105
12.1.6	AZIONI TRASMESSE DAI DIAFRAMMI	109
12.1.7	CARICHI SISMICI (S1, S2, S3)	112
12.1.8	AZIONE DELLE TERRE (N SLE TERRE, NSLU TERRE)	114
12.2	COMBINAZIONI DI CARICO	115
12.3	MODELLO DI CALCOLO	118
12.3.1	CONDIZIONI DI VINCOLO	122
12.4	FIGURE DEI CARICHI	126
12.5	SOLLECITAZIONI	136
12.6	DEFORMATE	145
13.	VERIFICHE STRUTTURE INTERNE	147
13.1	FONDAZIONE ESTREMI	149
13.2	FONDAZIONE MEZZERIA	151
13.3	MURI LATERALI ESTREMITÀ TRA FONDAZIONE E SOLETTONE INTERMEDIO 2	153
13.4	MURI LATERALI MEZZERIA TRA FONDAZIONE E SOLETTONE INTERMEDIO 2	155
13.5	MURI LATERALI ESTREMITÀ TRA SOLETTONE INTERMEDIO 2 E SOLETTONE INTERMEDIO 1	157
13.6	MURI LATERALI MEZZERIA TRA SOLETTONE INTERMEDIO 2 ED INTERMEDIO 1	159
13.7	MURI LATERALI ESTREMITÀ TRA COPERTURA E SOLETTONE INTERMEDIO 1	161
13.8	MURI LATERALI MEZZERIA TRA COPERTURA E SOLETTONE INTERMEDIO 1	163
13.9	MURO INTERNO	165
13.10	SOLETTONE INTERMEDIO 1, ESTREMITÀ	167
13.11	SOLETTONE INTERMEDIO 1, MEZZERIA	169
13.12	SOLETTONE INTERMEDIO 2, ESTREMITÀ	171

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

13.13 SOLETTONE INTERMEDIO 2, MEZZERIA 173

13.14 BANCHINA 1 175

13.15 BANCHINA 2 177

13.16 VALORI LIMITE INFLESSIONE 179

14. DIMENSIONAMENTO E VERIFICHE DELLA SOLETTA DI COPERTURA 180

14.1 ANALISI DEI CARICHI DELLA SOLETTA 180

14.1.1 PERMANENTI STRUTTURALI (G1) 180

14.1.2 PERMANENTI PORTATI (G2) 180

14.1.3 CARICHI VARIABILI DA TRAFFICO (Q) 181

14.1.4 RITIRO 181

14.1.5 AZIONI TRASMESSE DAI DIAFRAMMI 185

14.2 COMBINAZIONI DI CARICO 186

14.3 MODELLO DI CALCOLO 189

14.4 SOLLECITAZIONI 190

14.5 VERIFICHE SOLETTA DI COPERTURA 194

14.5.1 ESTREMI 195

14.5.2 MEZZERIA 197

14.6 VALORI LIMITE INFLESSIONE 199

14.7 RESISTENZA AL FUOCO 200

14.8 VERIFICA EFFETTI LONGITUDINALI DA RITIRO 202

14.9 GIUDIZIO DI ACCETTABILITÀ DEI RISULTATI 205

**15. DIMENSIONAMENTO E VERIFICHE DELLA SOLETTA DI COPERTURA
SEZIONE 19 IN FASE TEMPORANEA 208**

15.1 ANALISI DEI CARICHI DELLA SOLETTA 208

15.1.1 PERMANENTI STRUTTURALI (G1) 208

15.1.2 PERMANENTI PORTATI (G2) 208

15.1.3 CARICHI VARIABILI (Q) 208

15.1.4 RITIRO 209

15.1.5 AZIONI TRASMESSE DAI DIAFRAMMI 212


15.2 COMBINAZIONI DI CARICO 213

15.3 MODELLO DI CALCOLO 216

15.4 SOLLECITAZIONI 217

15.5 VERIFICHE SOLETTA DI COPERTURA 219

15.5.1 ESTREMI 220

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d’opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

15.5.2 MEZZERIA 221

16. DIMENSIONAMENTO E VERIFICHE DELLA SOLETTA DI COPERTURA
SEZIONE 19 A LUNGO TERMINE 222

16.1	ANALISI DEI CARICHI DELLA SOLETTA	222
16.1.1	PERMANENTI STRUTTURALI (G1)	222
16.1.2	PERMANENTI PORTATI (G2)	222
16.1.3	CARICHI VARIABILE (Q)	223
16.1.4	RITIRO	223
16.1.5	AZIONI TRASMESSE DAI DIAFRAMMI	227
16.2	COMBINAZIONI DI CARICO	228
16.3	MODELLO DI CALCOLO	231
16.4	SOLLECITAZIONI E DEFORMATA	232
16.5	VERIFICHE SOLETTA DI COPERTURA	236
16.5.1	APPOGGIO CENTRALE	237
16.5.2	MEZZERIA	238
16.5.3	ESTREMO INCASTRATO	239
17.	ALLEGATO 1: FASI DI CALCOLO DIAFRAMMI DEFINITIVI	240
18.	ALLEGATO 2: FASI DI CALCOLO BERLINESE PROVVISORIALE	265

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.	Estratto modello BIM della galleria artificiale GA04	14
Figura 2.	Key-plan linea 2 della Metropolitana di Torino	15
Figura 3.	Esempio di sezione trasversale della galleria artificiale	25
Figura 4.	Quadro strutturale tratto dal progetto CARG (Fonte: Forno M.G., 2012)	27
Figura 5.	Modellazione piana della paratia	38
Figura 6.	Schematizzazione terreno ed ancoraggi	39
Figura 7.	Schematizzazione metodo di Wood	41
Figura 8.	Valori di Ka e Kp ottenuti con superficie di scorrimento formata da spirale logaritmica (Navfac, 1971)	44
Figura 9.	Diagramma per la valutazione del coefficiente Nq (Berezantzev, 1965)	47
Figura 10.	Dimensioni del modello di calcolo realizzato mediante Paratie Plus	50
Figura 11.	Schema di carico 1 previsto per la soletta di copertura	54
Figura 12.	Modello di carico LM71 previsto per la soletta di copertura	55
Figura 13.	Spostamento massimo nella condizione di lungo termine - SLE	59


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Figura 14. Involuppo di momento flettente – SLE	59
Figura 15. Involuppo di momento flettente – SLU / SLV	60
Figura 16. Involuppo di taglio – SLU / SLV	60
Figura 17. Diagramma di momento flettente agente e momento flettente resistente (SLU/SLV)	62
Figura 18. Diagramma di taglio agente e taglio resistente (SLU/SLV)	64
Figura 19. Verifica strutturale diaframma nella sezione più gravosa (Gabbia N°2 – lato terreno)	65
Figura 20. Andamento del carico assiale nei puntelli metallici nella condizione peggiore (SLU_App – A1+M1+R1)	67
Figura 21. Verifica di resistenza dei puntelli metallici (A1+M1+R1)	68
Figura 22. Verifica di resistenza della trave di ripartizione (Tmax)	70
Figura 23. Verifica di resistenza della trave di ripartizione (Mmax)	71
Figura 24. Resistenza passiva mobilitata in condizioni di stato limite di esercizio (SLE)	72
Figura 25. Resistenza passiva mobilitata in condizioni di stato limite ultimo (A2+M2)	73
Figura 26. Resistenza passiva mobilitata in condizioni sismiche (SISMA)	73
Figura 27. Verifica di stabilità globale in condizioni statiche	75
Figura 28. Verifica di stabilità globale in condizioni sismiche (kv positiva)	75
Figura 29. Verifica di stabilità globale in condizioni sismiche (kv negativa)	76
Figura 30. Meccanismo di rottura del tappo di fondo	78
Figura 31. Verifica al sollevamento in condizioni di breve termine	82
Figura 32. Taglio massimo agente sulla soletta di copertura (A1+M1+R3)	86
Figura 33. Rappresentazione grafica della berlinese oggetto di studio	88
Figura 34. Involuppo degli spostamenti sulla berlinese provvisoriale (SLE)	90
Figura 35. Involuppo dei momenti flettenti sulla berlinese provvisoriale (A1+M1+R1)	91
Figura 36. Involuppo del taglio sulla berlinese provvisoriale (A1+M1+R1)	91
Figura 37. Involuppo dei momenti flettenti sulla berlinese provvisoriale (A2+M2+R1)	92
Figura 38. Involuppo del taglio sulla berlinese provvisoriale (A2+M2+R1)	92
Figura 39. Verifica strutturale del tubolare in acciaio (A1+M1+R1)	93
Figura 40. Verifica strutturale del tubolare in acciaio (A2+M2+R1)	94
Figura 41. Resistenza passiva mobilitata in condizioni di esercizio (SLE)	95
Figura 42. Resistenza passiva mobilitata in condizioni di stato limite ultimo (A2+M2+R1)	95
Figura 43. Verifica di stabilità globale della berlinese provvisoriale in condizioni statiche	97
Figura 44. Schema di carico della metro	102
Figura 45. Distribuzione del carico sulla soletta	104
Figura 46. Modello delle strutture interne soggette a spinta idrostatica della falda e conseguenti sollecitazioni assiali	110
Figura 47. Combinazioni di carico previste dalle NTC2018	115
Figura 48. Licenza del Software Sap2000 impiegato ai fini dell'analisi	118
Figura 49. Proprietà meccaniche della sezione della copertura del modello	119
Figura 50. Numerazione dei nodi	121
Figura 51. Numerazione delle aste	122


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Figura 52. Grafico spostamento assoluto-profondità paratie	123
Figura 53. Andamento delle rigidezze	124
Figura 54. Vincoli del modello	125
Figura 55. G2 carichi permanenti portati	126
Figura 56. N sle (terre)	127
Figura 57. N SLU (terre)	128
Figura 58. Falda	129
Figura 59. Ritiro	130
Figura 60. Q metro	131
Figura 61. Q locali tecnici	132
Figura 62. S1 azione sismica	133
Figura 63. S3 inerzia sismica della struttura	134
Figura 64. S2 inerzia sismica dei permanenti portati	135
Figura 65. ENV M SLU/SLV	136
Figura 66. ENV M SLU/SLV fondazione	136
Figura 67. ENV N SLU/SLV	137
Figura 68. ENV N SLU/SLV fondazione	137
Figura 69. ENV V SLU/SLV	138
Figura 70. ENV V SLU/SLV fondazione	138
Figura 71. ENV M RARA	139
Figura 72. ENV M RARA fondazione	139
Figura 73. ENV N RARA	140
Figura 74. ENV N RARA fondazione	140
Figura 75. ENV M FREQUENTE	141
Figura 76. ENV M FREQUENTE fondazione	141
Figura 77. ENV N FREQUENTE	142
Figura 78. ENV N FREQUENTE fondazione	142
Figura 79. ENV M QUASI PERMANENTE	143
Figura 80. ENV M QUASI PERMANENTE fondazione	143
Figura 81. ENV N QUASI PERMANENTE	144
Figura 82. ENV N QUASI PERMANENTE fondazione	144
Figura 83. DEFORMATA SLU	145
Figura 84. DEFORMATA SLV	146
Figura 85. DEFORMATA SLE RARA	146
Figura 86. Convenzioni adottate per la verifica sezione in c.a.	147
Figura 87. Legenda delle componenti strutturali	148
Figura 88. Verifica sezione soletta fondazione in c.a. allo SLU e SLE Rara (Estremi)	149
Figura 89. Verifica sezione soletta di fondazione in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Estremi)	150
Figura 90. Verifica sezione soletta di fondazione in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)	151
Figura 91. Verifica sezione soletta di fondazione in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Mezzeria)	152


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Figura 92. Verifica sezione muri laterali tra fondazione e solettone intermedio 2 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Estremi)	153
Figura 93. Verifica sezione muri laterali tra fondazione e solettone intermedio 2 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Estremi)	154
Figura 94. Verifica sezione muri laterali tra fondazione e solettone intermedio 2 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)	155
Figura 95. Verifica sezione muri laterali tra fondazione e solettone intermedio 2 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Mezzeria)	156
Figura 96. Verifica sezione muri laterali tra solettone intermedio 2 e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Estremi)	157
Figura 97. Verifica sezione muri laterali tra solettone intermedio 2 e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Estremi)	158
Figura 98. Verifica sezione muri laterali tra solettone intermedio 2 e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)	159
Figura 99. Verifica sezione muri laterali tra solettone intermedio 2 e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Mezzeria)	160
Figura 100. Verifica sezione muri laterali tra copertura e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Estremi)	161
Figura 101. Verifica sezione muri laterali tra copertura e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Estremi)	162
Figura 102. Verifica sezione muri laterali tra copertura e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)	163
Figura 103. Verifica sezione muri laterali tra copertura e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Mezzeria)	164
Figura 104. Verifica sezione muro interno in c.a. allo SLU e SLE Rara	165
Figura 105. Verifica sezione muro interno in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente	166
Figura 106. Verifica sezione solettone intermedio 1 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Estremi)	167
Figura 107. Verifica sezione solettone intermedio 1 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Estremi)	168
Figura 108. Verifica sezione solettone intermedio 1 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)	169
Figura 109. Verifica sezione solettone intermedio 1 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Mezzeria)	170
Figura 110. Verifica sezione solettone intermedio 2 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Estremi)	171
Figura 111. Verifica sezione solettone intermedio 2 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Estremi)	172
Figura 112. Verifica sezione solettone intermedio 2 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)	173
Figura 113. Verifica sezione solettone intermedio 2 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Mezzeria)	174
Figura 114. Verifica sezione banchina 1 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)	175
Figura 115. Verifica sezione banchina 1 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente	176
Figura 116. Verifica sezione banchina 2 in c.a. allo SLU e SLE Rara	177
Figura 117. Verifica sezione banchina 2 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente	178
Figura 118. Modello portale soggetto a ritiro	183


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d’opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Figura 119. Trazione agente in soletta conseguente al ritiro	184
Figura 120. Combinazioni di carico previste dalle NTC2018	186
Figura 121. Modelli del solaio di copertura	189
Figura 122. G2 carichi permanenti portati	189
Figura 123. Q carichi variabili	190
Figura 124. Momento flettente (SLU)	191
Figura 125. Taglio schema (SLU)	191
Figura 126. Momento flettente (SLE Rara)	192
Figura 127. Momento flettente (SLE Frequente)	192
Figura 128. Momento flettente (SLE Quasi Permanente)	193
Figura 129. Convenzioni adottate per la verifica sezione in c.a.	194
Figura 130. Verifica sezione soletta di copertura in c.a. allo SLU e SLE Rara (Estremi)	195
Figura 131. Verifica sezione soletta di copertura in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Estremi)	196
Figura 132. Verifica sezione soletta di copertura in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)	197
Figura 133. Verifica sezione soletta di copertura in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Mezzeria)	198
Figura 134. Dimensioni minime spessore soletta e copriferro in caso di incendio (UNI EN 1992-1-2:2005 – Tabella 5.8)	200
Figura 135. Sezioni degli elementi strutturali e distanza dall’asse a (UNI EN 1992-1-2:2005)	201
Figura 136. Carico permanente portato su trave appoggiata – validazione risultati	206
Figura 137. Carico variabile su trave appoggiata – validazione risultati	206
Figura 138. Momenti in mezzeria ottenuto mediante SAP2000 – validazione risultati	207
Figura 139. Modello portale soggetto a ritiro	211
Figura 140. Trazione agente in soletta conseguente al ritiro	211
Figura 141. Combinazioni di carico previste dalle NTC2018	213
Figura 142. Momento flettente (SLU)	217
Figura 143. Taglio schema (SLU)	218
Figura 144. Convenzioni adottate per la verifica sezione in c.a.	219
Figura 145. Verifica sezione soletta di copertura in c.a. sezione 19 in fase temporanea allo SLU (Estremi)	220
Figura 146. Verifica sezione soletta di copertura in c.a. sezione 19 in fase temporanea allo SLU (Mezzeria)	221
Figura 147. Modello portale soggetto a ritiro	225
Figura 148. Trazione agente in soletta conseguente al ritiro	225
Figura 1. Combinazioni di carico previste dalle NTC2018	228
Figura 2. Modelli del solaio di copertura	231
Figura 3. Modelli del solaio di copertura con incastri agli estremi	231
Figura 4. G2 carichi permanenti portati	232
Figura 5. Q carichi variabili	232
Figura 6. Momento flettente appoggi (SLU)	232
Figura 7. Momento flettente incastro agli estremi (SLU)	233


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Figura 8. Taglio schema (SLU)	233
Figura 9. Momento flettente (SLE Rara)	233
Figura 10. Momento flettente incastro agli estremi (SLE Rara)	234
Figura 11. Deformata della soletta di copertura (SLE Rara)	234
Figura 12. Convenzioni adottate per la verifica sezione in c.a.	236
Figura 13. Verifica sezione 19 soletta di copertura in c.a. sezione 19 a lungo termine allo SLU e SLE Rara (Appoggio centrale)	237
Figura 14. Verifica sezione 19 soletta di copertura in c.a. sezione 19 a lungo termine allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)	238
Figura 15. Verifica sezione 19 soletta di copertura in c.a. sezione 19 a lungo termine allo SLU e SLE Rara (Estremi)	239
Figura 16. Fase 1: condizione geostatica	241
Figura 17. Fase 2: applicazione carichi preesistenze e scavo a quota realizzazione diaframmi	242
Figura 18. Fase 3: realizzazione diaframmi	243
Figura 19. Fase 4: realizzazione tampone di fondo	244
Figura 20. Fase 5: ribasso fino a quota realizzazione soletta di copertura	245
Figura 21. Fase 6: realizzazione soletta di copertura	246
Figura 22. Fase 7: ritombamento e finiture superficiali	247
Figura 23. Fase 8: installazione primo ordine di puntelli metallici	248
Figura 24. Fase 9: secondo scavo di ribasso	249
Figura 25. Fase 10: installazione secondo ordine di puntelli metallici	250
Figura 26. Fase 11: terzo scavo di ribasso	251
Figura 27. Fase 12: installazione terzo ordine di puntelli metallici	252
Figura 28. Fase 13: fondo scavo	253
Figura 29. Fase 14: extra-scavo secondo NTC2018	254
Figura 30. Fase 15: realizzazione soletta di fondazione	255
Figura 31. Fase 16: rialzo a quota di fondo scavo	256
Figura 32. Fase 17: rimozione terzo ordine di puntelli metallici	257
Figura 33. Fase 18: realizzazione primo ordine di soletta in c.a.	258
Figura 34. Fase 19: rimozione secondo ordine di puntelli metallici	259
Figura 35. Fase 20: realizzazione secondo ordine di soletta in c.a.	260
Figura 36. Fase 21: rimozione terzo ordine di puntelli metallici	261
Figura 37. Fase 22: condizione di lungo termine	262
Figura 38. Fase 23 SLE: simulazione effetto fluage	263
Figura 39. Fase 23 SLU/SLV: simulazione condizione sismica	264
Figura 40. Fase 1: condizione geostatica	265
Figura 41. Fase 2: applicazione carico preesistenze	266
Figura 42. Fase 3: realizzazione berlinese di micropali	266
Figura 43. Fase 4: scavo a -1.0 m	267
Figura 44. Fase 5: scavo a -2.0 m	267
Figura 45. Fase 6: scavo a -3.0 m	268
Figura 46. Fase 7: scavo a -3.3 m (fondo scavo)	268


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Figura 47. Fase 8: extra scavo da NTC 2018

269

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Classi di esposizione e copriferro impiegati	23
Tabella 2. Parametri di resistenza e deformabilità per le unità geotecniche di riferimento	29
Tabella 3. Parametri di resistenza e deformabilità per le unità geotecniche di riferimento	29
Tabella 4. Sintesi dei parametri di pericolosità sismica di base	33
Tabella 5. Sintesi delle azioni sismiche di progetto	34
Tabella 6. Coefficienti parziali per le azioni	36
Tabella 7. Coefficienti parziali per le resistenze dei materiali naturali	36
Tabella 8. Coefficienti parziali per le verifiche di opere di materiali sciolti	37
Tabella 9. Valori di $q_{b,max}$ per terreni a grana grossa (Gwizdala, 1984)	48
Tabella 10. Coefficienti parziali sulle azioni per le verifiche nei confronti di stati limite di sollevamento	49
Tabella 11. Parametri di resistenza e deformabilità impiegati nelle analisi numeriche	50
Tabella 12. Sintesi risultati di calcolo principali	58
Tabella 13. Sintesi delle verifiche di sicurezza previste per i diaframmi (Verifica SLU)	61
Tabella 14. Sintesi armature longitudinali previste per i diaframmi (Verifica SLU)	61
Tabella 15. Sintesi verifiche e armature trasversali previste per i diaframmi (Verifica SLU)	62
Tabella 16. Risultati verifiche allo Stato Limite di Esercizio/Fluage (Estradosso – lato terreno)	63
Tabella 17. Risultati verifiche allo Stato Limite di Esercizio/Fluage (Intradosso – lato galleria)	63
Tabella 18. Azioni massime sui puntelli metallici al variare della configurazione analizzata	66
Tabella 19. Risultati delle verifiche di stabilità globale	74
Tabella 20. Valori di capacità portante al variare della profondità (AGI, 1984)	85
Tabella 21. Sintesi risultati di calcolo principali (berlinese provvisoria)	90
Tabella 22. Risultati delle verifiche di stabilità globale	96
Tabella 23. Calcolo del carico idrostatica della falda	105
Tabella 24. Valutazione dell'azione dovuto al ritiro del calcestruzzo della soletta di copertura	106
Tabella 25. Valutazione dell'azione dovuto al ritiro del calcestruzzo della soletta intermedia	107
Tabella 26. Valutazione dell'azione dovuto al ritiro del calcestruzzo della soletta di fondazione	108
Tabella 27. Azioni trasmesse dai diaframmi alla struttura interna	109
Tabella 28. Azioni trasmesse dai diaframmi alla struttura interna deputare dal contributo della spinta idrostatica	110
Tabella 29. Coefficiente di ripartizione del carico r	113
Tabella 30. Calcolo azioni del terreno agenti sulle fodere della struttura interna ripartite in funzione della rigidità flessionale	114
Tabella 31. Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I – NTC2018) – (¹) Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}	116
Tabella 32. Valori dei coefficienti di combinazione (Tab. 2.5.I – NTC2018)	116



 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Tabella 33. Combinazioni di carico impiegate per le analisi in oggetto	117
Tabella 34. Calcolo della costante di sottofondo mediante la formula di Vogt	120
Tabella 35. Parametri operativi per la verifica del CLS armato	147
Tabella 36. Verifica di deformabilità dei solai allo stato limite di esercizio RARA	179
Tabella 37. Valutazione dell'azione dovuto al ritiro del calcestruzzo	182
Tabella 38. Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I – NTC2018) – (¹) Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}	187
Tabella 39. Valori dei coefficienti di combinazione (Tab. 2.5.I – NTC2018)	187
Tabella 40. Combinazioni di carico impiegate per le analisi in oggetto	188
Tabella 41. Azione assiale sulla soletta (SLE / SLU)	193
Tabella 42. Parametri operativi per la verifica del CLS armato	194
Tabella 43. Verifica di deformabilità della copertura allo stato limite di esercizio RARA	199
Tabella 44. Valutazione dell'azione dovuto al ritiro del calcestruzzo	209
Tabella 45. Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I – NTC2018) – (¹) Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}	214
Tabella 46. Valori dei coefficienti di combinazione (Tab. 2.5.I – NTC2018)	214
Tabella 47. Combinazioni di carico impiegate per le analisi in oggetto	215
Tabella 48. Azione assiale sulla soletta (SLE / SLU)	218
Tabella 49. Parametri operativi per la verifica del CLS armato	219
Tabella 1. Valutazione dell'azione dovuto al ritiro del calcestruzzo	223
Tabella 2. Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I – NTC2018) – (¹) Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}	228
Tabella 3. Valori dei coefficienti di combinazione (Tab. 2.5.I – NTC2018)	229
Tabella 4. Combinazioni di carico impiegate per le analisi in oggetto	229
Tabella 5. Azione assiale sulla soletta (SLE / SLU)	234
Tabella 6. Parametri operativi per la verifica del CLS armato	236

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

1. PREMESSA

La presente relazione tecnica ha per oggetto la Progettazione Definitiva delle opere di sostegno della galleria artificiale e le relative strutture interne previste per la GA04 della linea 2 della Metropolitana di Torino. In particolare, saranno trattate le fasi realizzative, le analisi strutturali e le relative verifiche di sicurezza di quelle opere previste tra la Stazione Cimarosa alla PK 12+397.85 circa e la Stazione Corelli alla PK 13+025.01.

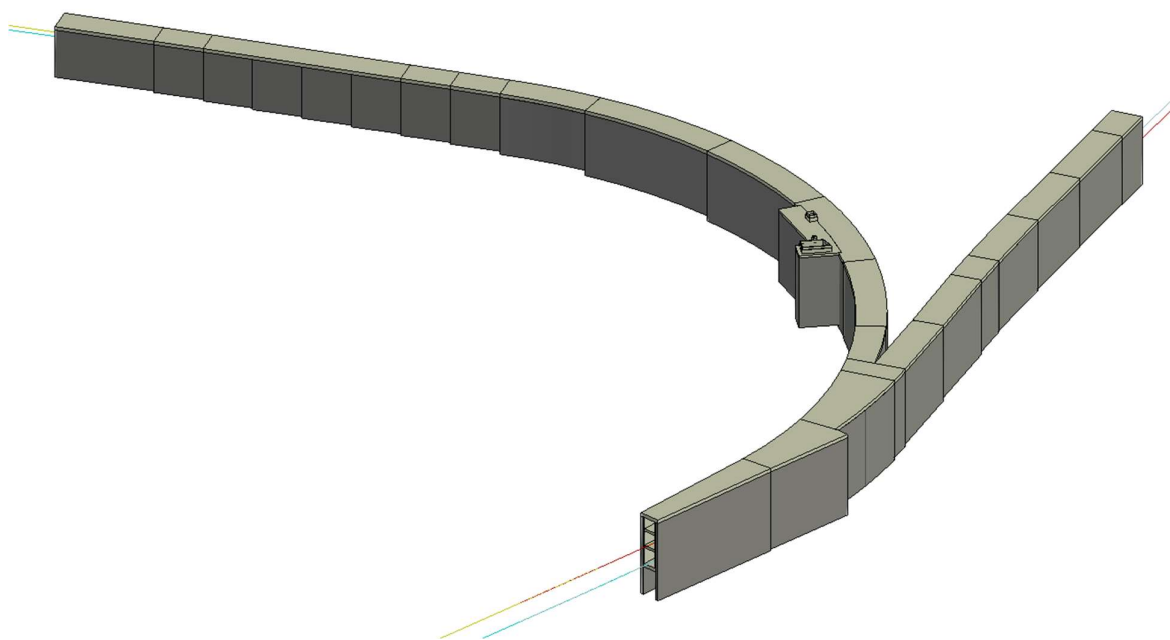



Figura 1. Estratto modello BIM della galleria artificiale GA04

Il 1° lotto funzionale della Linea 2 della Metropolitana di Torino, incluso tra le stazioni Rebaudengo e Politecnico, si colloca interamente nel territorio comunale di Torino, presenta una lunghezza di circa 9,5 km, e, procedendo da nord verso sud, si sviluppa a partire dalla stazione di corrispondenza con la stazione F.S. Rebaudengo-Fossata, proseguendo poi lungo la ex trincea ferroviaria posta tra via Gottardo e via Sempione. Il tracciato, a partire dalla fermata Corelli passa lungo via Bologna, al fine di servire meglio gli insediamenti dell'area interessata esistenti e futuri con le fermate intermedie Cimarosa-Tabacchi, Bologna e Novara. Dopo la fermata Novara, il tracciato si allontana dall'asse di Via Bologna mediante una curva in direzione sud-est e si immette sotto l'asse di Corso Verona fino alla Stazione Verona ubicata in Largo Verona. Dopo la fermata Verona, sotto attraversato il fiume Dora e Corso Regina Margherita, la linea entra nel centro

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d’opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

storico della città con le fermate Mole/Giardini Reali e Carlo Alberto, portandosi poi in corrispondenza di via Lagrange, sino ad arrivare alla stazione Porta Nuova, posta lungo via Nizza, che sarà di corrispondenza sia con la linea F.S. che con la Linea 1 della metropolitana di Torino.

Dalla fermata Porta Nuova il tracciato prosegue lungo l’allineamento di via Pastrengo, per poi portarsi su corso Duca degli Abruzzi fino alla fermata Politecnico.

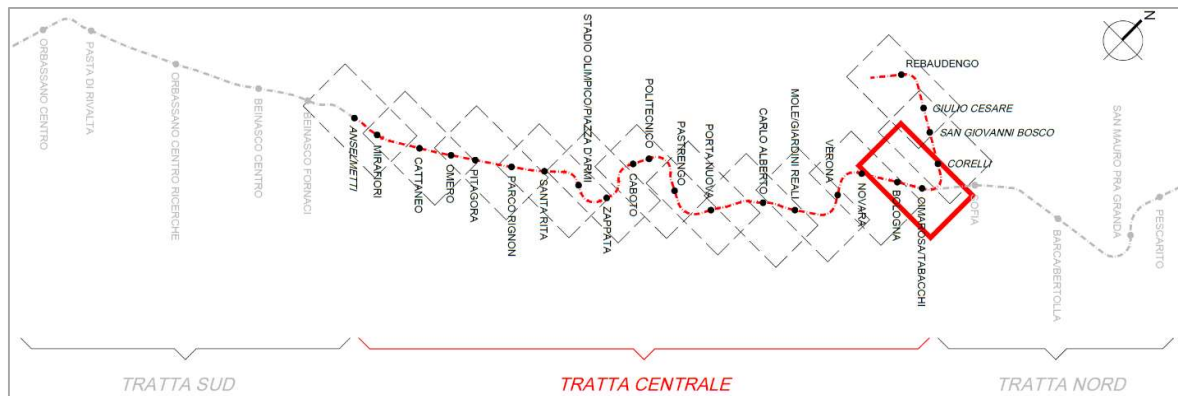



Figura 2.Key-plan linea 2 della Metropolitana di Torino

Nella presente relazione saranno trattati i seguenti argomenti:

- documenti e normative di riferimento per la progettazione definitiva delle opere;
- descrizione delle opere e delle caratteristiche dei materiali impiegati per la realizzazione;
- descrizione del contesto geologico, idrogeologico e caratterizzazione geotecnica;
- caratterizzazione sismica dell’area di riferimento;
- criteri di calcolo delle opere, dimensionamento e verifica delle stesse.


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

2. DOCUMENTI E NORMATIVE DI RIFERIMENTO

2.1 Normative di riferimento


La progettazione definitiva delle opere sarà condotta in accordo alle seguenti norme:

- [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" - NTC2018 - (GU n.42 del 20/02/2018).
- [3] Circolare esplicativa del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 21 gennaio 2019, n.7 del Consiglio superiore dei Lavori Pubblici recante "Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni, di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018" (GU Serie Generale n.35 del 11-02-2019 - Suppl. Ordinario n. 5).
- [4] UNI EN 206:2016, "Calcestruzzo – Parte 1: specificazione, prestazione, produzione e conformità".
- [5] UNI 11104-2016, "Calcestruzzo: specificazione, prestazione, produzione e conformità – Specificazioni complementari per l'applicazione della EN 206".
- [6] Stucchi M., et al., 2004 - Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale MPS04. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. (<https://doi.org/10.13127/sh/mps04/ag>).
- [7] Azioni sismiche - Spettri di risposta ver.1.03 (Software sperimentale disponibile dal sito del CSLLPP, <http://cslp.mit.gov.it>).
- [8] Eurocodice 2 – Progettazione delle strutture in calcestruzzo
- [9] Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica
- [10] Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica
- [11] Azioni sismiche - Spettri di risposta ver.1.03 (Software sperimentale disponibile dal sito del CSLLPP, <http://cslp.mit.gov.it>)
- [12] Legge 2 febbraio 1974, n. 64: "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche"
- [13] D.G.R. 30 Dicembre 2019, n. 6-887: "Presenza d'atto e approvazione dell'aggiornamento della classificazione sismica del territorio della Regione Piemonte"
- [14] 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"


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Quando necessario, sono state altresì assunti a riferimento i Codici Normativi Europei nella loro ultima revisione) sottoelencati:

- [15] Eurocode 0 - Criteri generali di progettazione strutturale
- [16] UNI EN 1990:2006 Criteri generali di progettazione strutturale
- [17] Eurocodice 1 – Azioni sulle strutture
- [18] UNI EN 1991-1-1:2004 Parte 1-1: Azioni in generale - Pesì per unità di volume, pesì propri e sovraccarichi per gli edifici
- [19] UNI EN 1991-1-2:2004 Parte 1-2: Azioni in generale - Azioni sulle strutture esposte al fuoco
- [20] UNI EN 1991-1-3:2015 Parte 1-3: Azioni in generale - Carichi da neve
- [21] UNI EN 1991-1-4:2010 Parte 1-4: Azioni in generale - Azioni del vento
- [22] UNI EN 1991-1-5:2004 Parte 1-5: Azioni in generale - Azioni termiche
- [23] UNI EN 1991-1-6:2005 Parte 1-6: Azioni in generale - Azioni durante la costruzione
- [24] UNI EN 1991-1-7:2014 Parte 1-7: Azioni in generale - Azioni eccezionali
- [25] UNI EN 1991-2:2005 Parte 2: Carichi da traffico sui ponti
- [26] UNI EN 1991-3:2006 Parte 3: Azioni indotte da gru e da macchinari
- [27] UNI EN 1991-4:2006 Parte 4: Azioni su silos e serbatoi
- [28] Eurocodice 2 – Progettazione delle strutture in calcestruzzo
- [29] UNI EN 1992-1-1:2015 Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici
- [30] UNI EN 1992-1-2:2005 Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio
- [31] UNI EN 1992-2:2006 Parte 2: Ponti di calcestruzzo - Progettazione e dettagli costruttivi
- [32] UNI EN 1992-3:2006 Parte 3: Strutture di contenimento liquidi
- [33] Eurocodice 3 – Progettazione delle strutture in acciaio
- [34] UNI EN 1993-1-1:2014 Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici
- [35] UNI EN 1993-1-2:2005 Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio
- [36] UNI EN 1993-1-3:2007 Parte 1-3: Regole generali - Regole supplementari per l'impiego dei profilati e delle lamiere sottili piegati a freddo
- [37] UNI EN 1993-1-4:2015 Parte 1-4: Regole generali - Regole supplementari per acciai inossidabili
- [38] UNI EN 1993-1-5:2017 Parte 1-5: Elementi strutturali a lastra
- [39] UNI EN 1993-1-6:2017 Parte 1-6: Resistenza e stabilità delle strutture a guscio

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

- [40] UNI EN 1993-1-7:2007 Parte 1-7: Strutture a lastra ortotropa caricate al di fuori del piano
- [41] UNI EN 1993-1-8:2005 Parte 1-8: Progettazione dei collegamenti
- [42] UNI EN 1993-1-9:2005 Parte 1-9: Fatica
- [43] UNI EN 1993-1-10:2005 Parte 1-10: Resilienza del materiale e proprietà attraverso lo spessore
- [44] UNI EN 1993-1-11:2007 Parte 1-11: Progettazione di strutture con elementi tesi
- [45] UNI EN 1993-1-12:2007 Parte 1-12: Regole aggiuntive per l'estensione della EN 1993 fino agli acciai di grado S 700
- [46] UNI EN 1993-2:2007 Parte 2: Ponti di acciaio
- [47] UNI EN 1993-3-1:2007 Parte 3-1: Torri, pali e ciminiere - Torri e pali
- [48] UNI EN 1993-3-2:2007 Parte 3-2: Torri, pali e ciminiere - Ciminiere
- [49] UNI EN 1993-4-1:2017 Parte 4-1: Silos
- [50] UNI EN 1993-4-2:2007 Parte 4-2: Serbatoi
- [51] UNI EN 1993-4-3:2007 Parte 4-3: Condotte
- [52] UNI EN 1993-5:2007 Parte 5: Pali e palancole
- [53] UNI EN 1993-6:2007 Parte 6: Strutture per apparecchi di sollevamento
- [54] Eurocodice 4 – Progettazione delle strutture composte acciaio-calcestruzzo
- [55] UNI EN 1994-1-1:2005 Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici
- [56] UNI EN 1994-1-2:2005 Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio
- [57] UNI EN 1994-2:2006 Parte 2: Regole generali e regole per i ponti
- [58] Eurocodice 5 – Progettazione delle strutture in legno
- [59] UNI EN 1995-1-1:2014 Parte 1-1: Regole generali - Regole comuni e regole per gli edifici
- [60] UNI EN 1995-1-2:2005 Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio
- [61] UNI EN 1995-2:2005 Parte 2: Ponti
- [62] Eurocodice 6 – Progettazione delle strutture in muratura
- [63] UNI EN 1996-1-1:2013 Parte 1-1: Regole generali per strutture di muratura armata e non armata
- [64] UNI EN 1996-1-2:2005 Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio
- [65] UNI EN 1996-2:2006 Parte 2: Considerazioni progettuali, selezione dei materiali ed esecuzione delle murature

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

- [66] UNI EN 1996-3:2006 Parte 3: Metodi di calcolo semplificato per strutture di muratura non armata
- [67] Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica
- [68] UNI EN 1997-1:2013 Parte 1: Regole generali
- [69] UNI EN 1997-2:2007 Parte 2: Indagini e prove nel sottosuolo
- [70] Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica
- [71] UNI EN 1998-1:2013 Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici
- [72] UNI EN 1998-2:2011 Parte 2: Ponti
- [73] UNI EN 1998-3:2005 Parte 3: Valutazione e adeguamento degli edifici
- [74] UNI EN 1998-4:2006 Parte 4: Silos, serbatoi e condotte
- [75] UNI EN 1998-5:2005 Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici
- [76] UNI EN 1998-6:2005 Parte 6: Torri, pali e camini

2.2 Programmi di calcolo

Per il dimensionamento delle paratie:


- Paratie Plus ver. 21.0.2 – CaAS 2021

Per le analisi di stabilità:

- Slope/W – GeoSlope ver. 8.13 – GEOSTUDIO 2012

Per le strutture:

- SAP2000 ver. 23.1.0

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

3.1 Calcestruzzo per diaframmi: C25/30

Classe di esposizione:XC2

Resistenza caratteristica a compressione: $f_{ck} = 0.83 \cdot R_{ck} = 24.90$ MPa

Resistenza media a compressione: $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 32.90$ MPa

Modulo Elastico: $E_{cm} = 22000 \cdot (f_{cm}/10)^{0.3} = 31447.16$ MPa

Resistenza di calcolo a compressione: $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c = 0.85 \cdot f_{ck} / 1.5 = 14.11$ MPa

Resistenza a trazione media: $f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 2.55$ MPa

Resistenza a trazione: $f_{ctk} = 0.7 \cdot f_{ctm} = 1.79$ MPa

Resistenza a trazione di calcolo: $f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c = 1.19$ MPa

3.2 Calcestruzzo per piedritti di sopraelevazione, soletta e strutture interne: C30/37

Classe di esposizione:XC3

Resistenza caratteristica a compressione: $f_{ck} = 0.83 \cdot R_{ck} = 30.71$ MPa

Resistenza media a compressione: $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 38.71$ MPa


Modulo Elastico: $E_{cm} = 22000 \cdot (f_{cm}/10)^{0.3} = 33019.43$ MPa

Resistenza di calcolo a compressione: $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c = 0.85 \cdot f_{ck} / 1.5 = 17.40$ MPa

Resistenza a trazione media: $f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 2.94$ MPa

Resistenza a trazione: $f_{ctk} = 0.7 \cdot f_{ctm} = 2.06$ MPa

Resistenza a trazione di calcolo: $f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c = 1.37$ MPa

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

3.3 Acciaio da cemento armato: B450C

Tensione di rottura caratteristica $f_{tk} \geq 540$ MPa

Tensione di snervamento caratteristica $f_{yk} \geq 450$ MPa

Tensione di snervamento di calcolo $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = f_{yk}/1.15 = 391.3$ MPa

Allungamento caratteristico $\geq 7.5\%$

Modulo elastico $E_s = 210000$ MPa

3.4 Acciaio per carpenteria metallica – Micropali

Classe acciaio carpenteria metallica: S355JR

Tensione di snervamento caratteristica: $f_{yk} \geq 355$ MPa

Tensione di rottura caratteristica: $f_{tk} \geq 510$ MPa

Resistenza di calcolo: $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_{M0} = f_{yk}/1.05 = 338.10$ MPa


3.5 Miscela cementizie per iniezioni a bassa pressione – Micropali

Classe di esposizione: XC2

Classe di resistenza: C25/30

Rapporto a/c massimo: 0.50

Fluidificante 1%-2% in peso sul cemento

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

3.6 Copriferro minimo e copriferro nominale: Diaframmi

Al fine di preservare le armature dai fenomeni di aggressione ambientale, dovrà essere previsto un idoneo copriferro; il suo valore, misurato tra la parete interna del cassero e la generatrice dell'armatura metallica più vicina, individua il cosiddetto "copriferro nominale".

Il copriferro viene calcolato secondo le prescrizioni dell'Eurocodice 2 (UNI EN 1992-1-1, §4.4.1): il copriferro nominale è definito come il copriferro minimo (c_{min}) più un margine di progetto per gli scostamenti ΔC_{dev} :

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev}$$

Il copriferro minimo (c_{min}) è pari a:

$$C_{min} = \max (C_{min,b}; C_{min,dur} + \Delta C_{dur,\gamma} - \Delta C_{dur,st} - \Delta C_{dur,add}; 10 \text{ mm})$$

in cui:


- $c_{min,b}$ è il copriferro minimo dovuto al requisito di aderenza e vale 20 mm (diametro massimo delle barre isolate);
- $c_{min,dur}$ è il copriferro minimo dovuto alle condizioni ambientali (30 mm);
- $\Delta C_{dur,\gamma}$ riduzione del copriferro per margine di sicurezza (0 mm);
- $\Delta C_{dur,st}$ riduzione del copriferro per utilizzo di acciaio inossidabile (0 mm);
- $\Delta C_{dur,add}$ riduzione del copriferro per utilizzo di protezione aggiuntiva (0 mm).

Nel caso in esame, nella zona interna della galleria (ad intradosso diaframmi) sarà realizzata una controparete in c.a.; pertanto, il copriferro dei diaframmi non tiene conto dell'eventuale incremento dovuto all'azione del fuoco.

Pertanto, si ha $c_{min} = 45$ mm. Nel caso in esame, sarà adottato un copriferro nominale pari a 75 mm per tutte le opere in oggetto (coerentemente con quanto indicato nel manuale di progettazione).

3.7 Copriferro minimo e copriferro nominale: Soletta e strutture interne

Al fine di preservare le armature dai fenomeni di aggressione ambientale, dovrà essere previsto un idoneo copriferro; il suo valore, misurato tra la parete interna del cassero e la generatrice dell'armatura metallica più vicina, individua il cosiddetto "copriferro nominale". I valori dei

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

copriferro sono calcolati in accordo alla tabella C 4.1.6.1.3 della Circolare 21 gennaio 2019 inerente alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni.

Tabella 1. Classi di esposizione e copriferro impiegati

Tipologia	Classe di esposizione	Ambiente	Classe calcestruzzo	C_{min} [mm]
Diaframmi	XC2	Ordinario	C25/30	25+10*+10* *=45
Solaio di copertura	XC3	Ordinario	C30/37	20+10*+10* *=40
Fodere	XC3	Ordinario	C30/37	20+10*+10* *=40
Solai interni	XC3	Ordinario	C30/37	20+10*+10* *=40
Pilastrini interni	XC3	Ordinario	C30/37	25+10*+10* *=45
Solaio di fondo	XC3	Ordinario	C30/37	20+10*+10* *=40


*per costruzioni con vita nominale di 100 anni

**per tolleranze di posa dell'armatura

Tabella C4.1.IV - Copriferri minimi in mm

			barre da c.a. elementi a piastra		barre da c.a. altri elementi		cavi da c.a.p. elementi a piastra		cavi da c.a.p. altri elementi	
C_{min}	C_o	ambiente	$C \geq C_o$	$C_{min} \leq C < C_o$	$C \geq C_o$	$C_{min} \leq C < C_o$	$C \geq C_o$	$C_{min} \leq C < C_o$	$C \geq C_o$	$C_{min} \leq C < C_o$
C25/30	C35/45	ordinario	15	20	20	25	25	30	30	35
C30/37	C40/50	aggressivo	25	30	30	35	35	40	40	45
C35/45	C45/55	molto ag.	35	40	40	45	45	50	50	50

Per quanto concerne il solaio di copertura, il solaio di fondazione, i solai interni e le fodere si considera una classe di esposizione XC3 e si assume un copriferro minimo pari a 20 mm, a tale

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

valore va aggiunta la tolleranza di posa pari a 10 mm e, dato che la struttura ha vita nominale di 100 anni, si aggiungono ulteriormente altri 10 mm. Pertanto, il c_{min} risulta essere pari a:

$$c_{min} = 20 + 10 + 10 = 40 \text{ mm}$$


Il copriferro nominale è definito come il copriferro minimo (c_{min}) più un margine di progetto per gli scostamenti Δc_{dev} . Per il solaio di copertura, il solaio di fondazione e le fodere si assume:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 40 + 10 = 50 \text{ mm}$$

Per i solai interni si assume:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 40 + 5 = 45 \text{ mm}$$

Nel caso in esame sarà adottato un copriferro nominale pari a 50 mm per la soletta di copertura, il solaio di fondazione e le fodere, ed una copriferro nominale di 45 mm per i solai interni.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

4. DESCRIZIONE DELLE OPERE

La galleria artificiale oggetto di studio della presente relazione tecnica e di calcolo si sviluppa tra la Stazione Cimarosa alla PK 12+397.85 e la Stazione Corelli alla PK 13+025.01. I diaframmi previsti nel tratto tra Pozzo Cimarosa e Stazione Corelli sono stati verranno adeguati sulla base dei tipologici sviluppati per la GA01. Si riporta nella seguente figura un esempio della struttura multipiano oggetto di studio.

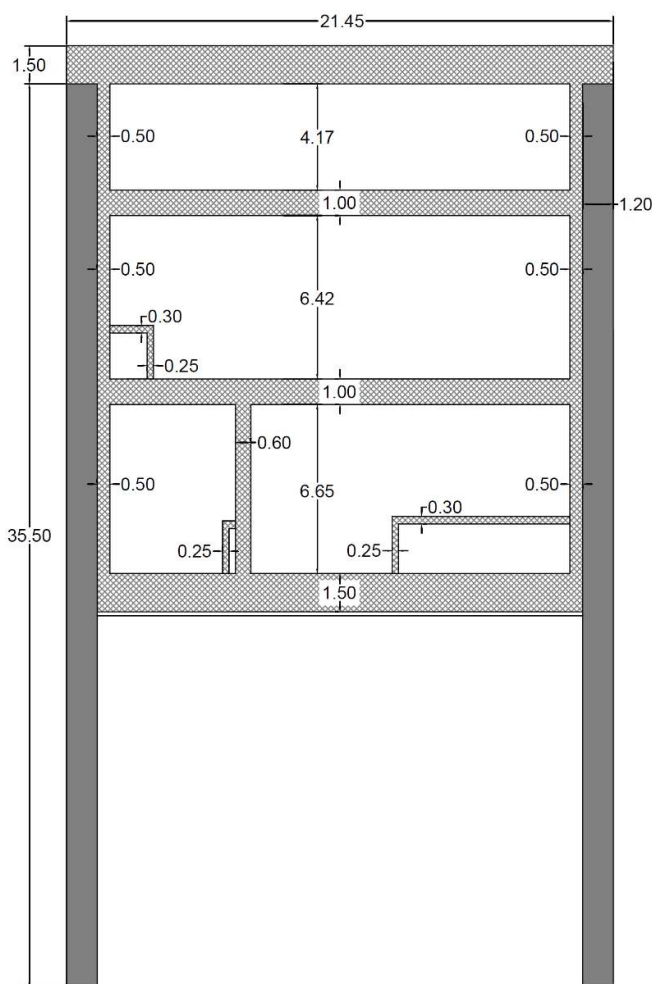




Figura 3. Esempio di sezione trasversale della galleria artificiale

La galleria artificiale verrà realizzata attraverso la tecnologia esecutiva di tipo top-down, caratterizzata da uno scavo sostenuto da diaframmi e dal solaio di copertura. In particolare, le fasi realizzative prevedono:

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

- deviazione della viabilità esistente, posizionamento recinzioni di cantiere e barriere acustiche;
- esecuzione di eventuali opere di consolidamento e di sostegno dello scavo;
- esecuzione cordoli guida per diaframmi e realizzazione pannelli di paratia;
- esecuzione dei trattamenti di consolidamento del tampone di fondo;
- scavo di ribasso sino alla quota di imposta del solettone di copertura;
- scapitozzatura delle paratie al fine di ricostruire il nodo tra la paratia stessa e la copertura;
- esecuzione del solettone;
- esecuzione impermeabilizzazione solettone di copertura e relativo massetto di protezione;
- ritombamento superficiale;
- esecuzione degli scavi di ribasso successivi e posizionamento di eventuali puntelli metallici di contrasto sino al raggiungimento della quota di imposta del solettone di fondo;
- preparazione del piano di posa del solettone mediante getto di CLS magro di pulizia e livellamento (circa 15 cm) con interposto strato di impermeabilizzazione;
- esecuzione del solettone di fondo
- realizzazione successiva di contropareti e solette intermedie con contestuale rimozione dei puntelli metallici provvisori sino al raggiungimento della soletta di copertura;
- Esecuzione di tutte le strutture interne con finiture.

I diaframmi presentano uno spessore variabile da 1.0 a 1.2 m e lunghezza totale variabile da circa un minimo di circa 20 m fino ad un massimo di circa 34 m; la distanza tra le paratie è anch'essa variabile da un minimo pari a 7.7 m ad un massimo di 22.7 m, la soletta di copertura ha uno spessore di 1.5 m, le solette intermedie uno spessore di 1.0 m e infine il solettone di fondo uno spessore di 1.5 m.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d’opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

5. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA


5.1 Contesto geologico e idrogeologico

L’area lungo la quale si realizzerà la linea 2 della Metropolitana di Torino è ubicata nella cosiddetta “pianura piemontese settentrionale” delimitata a Nord-Ovest dalle Alpi e verso Sud-Est dai rilievi collinari della Collina di Torino e del Monferrato. Tale struttura è caratterizzata da una potente serie di età pliocenico superiore – olocenica formata dagli apporti successivi di due ampi conoidi fluvio-glaciali appartenenti al fiume Dora Riparia e torrente Stura di Lanzo. All’interno dei depositi fluvio-glaciali, si rinvengono termini litologici legati ai litotipi del bacino idrografico di alimentazione, per esempio serpentiniti e ultrabasiti del Massiccio Ultrabasico di Lanzo, gneiss e quarziti del Complesso del Dora Maira. I materiali di natura continentale sono sovrapposti ad una serie marina pliocenica composta da depositi sabbiosi, sabbioso-limosi fino a totalmente limosi. Ad ulteriore profondità si rinvengono formazioni marine di età terziaria di natura prevalentemente marnosa ed arenaceo-conglomeratica costituenti la Collina di Torino. Come si può osservare dalla figura sottostante, il fianco occidentale della Collina di Torino, con struttura anticlinale con asse circa NE-SW, si immerge al di sotto dei depositi quaternari della pianura.



Figura 4. Quadro strutturale tratto dal progetto CARG (Fonte: Forno M.G., 2012)

I terreni presenti in superficie appartengono quindi all’ambiente continentale e risalgono al periodo Pleistocenico (Era Quaternaria); tali depositi sono formati in prevalenza da materiali ghiaiosi, sabbiosi e limosi all’interno dei quali si rinvengono localmente ciottoli silicatici, silicei e calcarei. I ciottoli possono avere dimensioni molto variabili (fino a pluridecimetriche, in media di 10-30 cm), e generalmente sono composti da quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri. A minori profondità si possono incontrare lenti limoso-argillose attribuibili al fiume Po. La caratteristica principale dei depositi pleistocenici di origine fluvio-glaciale è la presenza in forma discontinua e localizzata, di orizzonti e livelli con grado di cementazione (e/o addensamento) variabile. I livelli conglomeratici, dotati di maggior cementazione, sono caratteristici del sottosuolo di Torino e sono conosciuti con il nome di “puddinghe”. I depositi fluvio-glaciali possono presentare caratteristiche

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

notevolmente variabili in termini di resistenza e deformabilità geotecnica in funzione del grado di cementazione ma anche dal punto di vista granulometrico.


A maggiori profondità, al di sotto dei depositi del Quaternario, si possono riscontrare i seguenti materiali geologici, dipendendo dalla zona della città in considerazione:

- depositi lacustri e fluviolacustri del Villafranchiano (Pleistocene inferiore-Pliocene superiore) che possono essere di due differenti tipologie:
 - materiale di ambiente lacustre-palustre, caratterizzati da una granulometria predominante fine e costituiti da alternanza di limi e argille;
 - materiali di ambiente fluviale, più grossolani e rappresentati da livelli sabbioso-ghiaiosi;
- la successione marina Pliocenica (composta da limi argillosi, limi sabbiosi e sabbie grigio-azzurre con fossili);
- la successione marina Oligo-Miocenica della Collina di Torino (formata da marne, siltiti, arenarie e conglomerati marini).

In base agli studi idrogeologici realizzati nella città di Torino e considerando le esperienze previe di progetti simili, possono essere identificati due principali livelli idrogeologici:

- Complesso ghiaioso-sabbioso, sede dell'acquifero libero principale, è formato dai depositi grossolani del Quaternario (ciottoli, ghiaie, e sabbie in matrice sabbioso-limoso) con potenza tra i 30-40 m. In genere i depositi quaternari possono essere caratterizzati da una permeabilità maggiore a 1.0E-04 m/s (permeabilità da media a alta) e localmente presentano un grado di permeabilità inferiore (permeabilità media, compresa tra 1.0E-06 m/s e 1.0E-04 m/s).
- Complesso argilloso-limoso-ghiaioso, sede di un acquifero profondo di tipo "multifalda" situato ad una profondità indicativa tra 40 e 200 m dal p.c. Questo acquifero è costituito da alternanze di depositi medio grossolani e fini appartenenti ai depositi fluviolacustri del Villafranchiano (con una permeabilità media, compresa tra 1.0E-06 m/s e 1.0E-04 m/s), chiusi al tetto da depositi argillosi (potenti fino a 20-30 m e con permeabilità medio-bassa, da 1.0E-08 m/s a 1.0E-06 m/s).

Si può concludere che i lavori della Linea 2 interferiranno esclusivamente con l'acquifero superficiale del complesso ghiaioso-sabbioso, con eccezione della tratta compresa tra le stazioni di Zappata e Caboto lungo la quale la soletta della galleria attraverserà i depositi del Villafranchiano. Con riferimento all'esperienza della Linea 1 della Metropolitana di Torino, la falda superficiale si colloca ad una profondità variabile tra i 14 m ed i 16 m dal piano campagna e l'oscillazione annuale può raggiungere un valore massimo di 2.0 m.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

5.2 Parametri geotecnici di riferimento

Con riferimento alla relazione Geotecnica, sono state individuate 7 unità geotecniche, caratterizzate da un comportamento meccanico-deformativo similare.

Nella seguente tabella si riportano gli intervalli di valori proposti per i parametri di resistenza e deformabilità delle unità geotecniche interessate dalla realizzazione delle opere in sotterraneo della linea 2 della Metropolitana di Torino.

Tabella 2. Parametri di resistenza e deformabilità per le unità geotecniche di riferimento

Unità	γ_{nat}	ϕ'	c'	C_u	E	ν
	[kN/m ³]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[-]
U1	18-19	29-32	0	-	10-25	0.3
U2	18-21	36-38	0-20	-	150-170	0.3
U3	19-20	38-40	30-50	-	170-200	0.3
U4	19-20	38-40	50-100	-	200-260	0.3
U5	18-20	30-32	15-25	100-150	90-100	0.35
U6	19-21	22-26	35-40	70-310	50-80	0.35
U7	20-21	26-28	25-50	100-200	100-200	0.35

**U1: Terreno superficiale; U2: Ghiaie e sabbie da sciolte a debolmente cementate; U3: Ghiaie e sabbie mediamente cementate; U4: Ghiaie e sabbie altamente cementate; U5: Limi argillosi ed argille limose; U6: Alternanza di sabbie fini-medie debolmente limose e limi argillosi-sabbiosi; U7: Argille limose compatte e localmente litificate (marne di Sant'Agata).*

Tabella 3. Parametri di resistenza e deformabilità per le unità geotecniche di riferimento


Unità	γ_{nat}	ϕ'	c'	C_u	E	ν
	[kN/m ³]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[-]
JET**	20	35	150	-	450	0.3-0.4

***Il Jet-grouting impiegato per la realizzazione del tampone di fondo ricade sempre all'interno dell'unità U2.*

Riguardo il livello piezometrico della falda reale nel tratto di galleria artificiale GA04, esso risulta variabile tra le seguenti quote:

- GA04: 212.0 – 212.7 m slm

Per ulteriori dettagli e/o approfondimenti in merito alla caratterizzazione geotecnica dei materiali si rimanda all'elaborato specialistico.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

6. CARATTERIZZAZIONE SISMICA

La caratterizzazione sismica prevede:

- la definizione dell'accelerazione sismica di riferimento su substrato rigido di base;
- l'individuazione della classe di sottosuolo, per la valutazione dell'amplificazione stratigrafica;
- l'individuazione di un valore di riferimento per la magnitudo massima attesa.

6.1 Valutazione dell'azione sismica di base

La valutazione dell'azione sismica per il dimensionamento degli elementi delle infrastrutture, si basa sulla mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale in cui la pericolosità è quantificata dall'accelerazione di picco (normalizzata rispetto all'accelerazione di gravità), a_g/g , in condizioni ideali di sottosuolo rigido e superficie orizzontale, associata a diverse probabilità di superamento in 50 anni. I valori di a_g/g sono dati su una griglia di punti equi-spaziati di 10km. Sulla stessa griglia sono dati anche in valori dei parametri caratteristici dello spettro di risposta elastico su substrato rigido (Cfr. §3.2 "azione sismica" delle NTC 2018 che, per i valori di a_g , F_o , T^*_c necessari per la determinazione delle azioni sismiche, si rimanda agli allegati A e B delle NTC 2018), per le probabilità di superamento associate agli stati limite di verifica previsti dalla normativa di riferimento.


L'azione sismica così individuata viene successivamente variata, nei modi chiaramente precisati dalle NTC, per tener conto delle modifiche prodotte dalle condizioni locali stratigrafiche del sottosuolo effettivamente presente nel sito di costruzione e dalla morfologia della superficie. Tali modifiche caratterizzano la risposta sismica locale.

La normativa delinea il processo di individuazione dell'azione sismica di progetto che prevede:

- la definizione della vita utile dell'opera, V_R , sulla base della correlazione tra vita nominale V_N e classe d'uso C_U : $V_R = V_N \times C_U$
- la stima del periodo di ritorno, T_R , sulla base delle probabilità di superamento, P_{VR} , associata agli stati limite di verifica, secondo la formula: $T_R = V_R / \ln(1 - P_{VR})$
- la stima dei valori dei parametri caratteristici dello spettro di risposta elastico su suolo rigido (parametri d'azione) in funzione di T_R .

I parametri d'azione sono:

- a_g/g , accelerazione massima normalizzata, su sito di riferimento rigido orizzontale;
- F_o , moltiplicatore di a_g/g che quantifica l'amplificazione spettrale massima su sito di riferimento rigido orizzontale, ed ha valore minimo pari a 2.2;

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

- T^*_C , periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale su sito di riferimento rigido.
- Gli stati limite di verifica previsti dalla NTC2018 sono elencati di seguito, con le corrispondenti probabilità di superamento in 50 anni:
 - Stato limite ultimo di collasso, SLC, $P_{RV} = 5\%$;
 - Stato limite ultimo di vulnerabilità, SLV, $P_{RV} = 10\%$;
 - Stato limite di esercizio, di danno, SLD, $P_{RV} = 63\%$;
 - Stato limite di esercizio, di operatività, SLO, $P_{RV} = 81\%$.

6.2 Fattore di amplificazione dello spettro di risposta elastico

In coerenza con le prescrizioni normative, l'accelerazione orizzontale massima in superficie, a_{max}/g , si ottiene moltiplicando l'accelerazione massima di base, a_g/g , per un fattore di amplificazione stratigrafica, S_s , ed uno di amplificazione topografica, S_T :

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


Il fattore di amplificazione stratigrafica dipende dalla classe di sottosuolo definita sulla base di indagini specifiche per la valutazione delle velocità di propagazione delle onde di taglio, V_s , nel sottosuolo di sedime delle singole opere, e si calcola secondo la formulazione riportata nella normativa di riferimento (paragrafo 3.2.3.2.1, Tabella 3.2.IV), in funzione dei parametri spettrali F_0 ed a_g/g .

La classe di sottosuolo modifica anche il valore del periodo T_C di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione, attraverso il coefficiente C_C secondo la formulazione riportata in norma (paragrafo 3.2.3.2.1, Tabella 3.2.IV).

Nel caso specifico, l'andamento altimetrico dell'area attraversata dall'infrastruttura di progetto, prevalentemente pianeggiante, con rilievi di pendenza minore di 15° , giustifica l'assunzione di una categoria topografica T1, a cui corrisponde $S_T = 1$ (Tabella 3.2.III e Tabella 3.2.V).

6.3 Categoria di sottosuolo

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II delle NTC2018, si può fare riferimento a un approccio

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d’opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_S .

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall’espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

dove:

h_i = spessore dell’i-esimo strato;

$V_{S,i}$ = velocità delle onde di taglio nell’i-esimo strato;


N = numero di strati;

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s.

6.4 Valutazione dell’azione sismica di progetto

Sulla base delle caratteristiche delle opere in progetto, sono stati scelti i seguenti parametri:

- **Vita nominale: 100 anni** (Tipo di costruzione di categoria 3 – grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica);
- **Classe d’uso: III** Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significanti. Industrie con attività pericolose per l’ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d’uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provoca situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso;
- **Coefficienti C_u : 1.5** (funzione della classe d’uso).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

I parametri di pericolosità sismica di base sono stati elaborati a partire dalle coordinate del sito di riferimento. Con riferimento alle opere in oggetto:

- **Latitudine:45.087869°**
- **Longitudine:7.707457°**

Sulla base di tali parametri di ingresso si ottengono i seguenti valori di pericolosità sismica:

Tabella 4.Sintesi dei parametri di pericolosità sismica di base

Parametri stati limite	u.m.	SLD	SLV
Probabilità di superamento (P_{VR})	%	63	10
Tempo di ritorno (T_R)	anni	151	1424
Accelerazione orizzontale massima su suolo rigido (a_g)	g	0.039	0.067
Fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale (F₀)	-	2.679	2.851
Tempo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale (T*c)	s	0.232	0.291

La categoria di sottosuolo è stata definita in funzione dei materiali naturali interessati dalle opere in progetto; in particolare nel caso in esame si adotta la categoria di sottosuolo **B** (*Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s*).

Per quanto riguarda le condizioni topografiche è stata attribuita alle opere in oggetto la categoria T1 (*Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$*).

Sulla base di quanto sopra esposto, i parametri sismici di progetto che saranno impiegate per le analisi delle opere in oggetto risultano:



 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d’opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Tabella 5.Sintesi delle azioni sismiche di progetto

Stato Limite	Coefficienti sismici	Depositi di paleofrana
SLD	Ss	1.200
	Cc	1.474
	St	1.100
	a _{max} (g)	0.047
SLV	Ss	1.200
	Cc	1.408
	St	1.000
	a _{max} (g)	0.081

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

7. CRITERI DI CALCOLO DELLE OPERE

In ottemperanza con la normativa vigente, i calcoli sono condotti con il metodo semi-probabilistico agli stati limite.

Le verifiche di sicurezza relative agli stati limite ultimi (SLU) e le analisi relative alle condizioni di esercizio (SLE) sono state effettuate nel rispetto dei criteri delle NTC2018.

In generale, le analisi degli stati limite di esercizio (SLE) sono utilizzate per ottenere informazioni circa gli spostamenti attesi sotto i carichi di esercizio e per verificarne l'ammissibilità nei confronti della funzionalità dell'opera.

Le analisi agli stati limite ultimi (SLU) sono impiegate per le verifiche di resistenza degli elementi strutturali e per le verifiche geotecniche.

7.1 Cenni Normativi

I criteri per la verifica e il dimensionamento di seguito esposti si applicano a tutte le opere che hanno funzione di sostegno quali muri e berlinesi.

In accordo con quanto prescritto dalla Normativa vigente, per ogni Stato Limite Ultimo (SLU) deve essere rispettata la seguente condizione:

$$E_d < R_d$$

in cui E_d rappresenta il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione, mentre R_d è il valore di progetto della resistenza. Per quanto concerne le azioni di progetto E_d , queste possono essere determinate applicando i coefficienti parziali sulle azioni caratteristiche, oppure, successivamente, sulle sollecitazioni prodotte dalle azioni caratteristiche.

Le azioni sull'opera di sostegno sono quelle dovute al peso proprio del terreno e del materiale di riempimento, ai sovraccarichi e all'acqua. In particolar modo, nella valutazione dei sovraccarichi a tergo di un'opera di sostegno, è necessario tenere in conto dell'eventuale presenza di costruzioni, di depositi di materiale, di veicoli in transito o di apparecchi di sollevamento.

I valori dei coefficienti parziali da assumersi per la determinazione degli effetti delle azioni nelle verifiche agli Stati Limite Ultimi sono riportati nella seguente tabella (Tab. 2.6.I delle NTC 2018):


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Tabella 6.Coefficienti parziali per le azioni

		Coefficiente	EQU	A1	A2
		γ_F			
Carichi permanenti G_1	Favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali $G_2^{(4)}$	Favorevoli	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevoli	γ_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3


⁽⁴⁾ Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. carichi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.

Il valore di progetto della resistenza R_d può essere determinato in modo analitico, con riferimento al valore caratteristico dei parametri geotecnici del terreno, opportunamente ridotto in funzione del coefficiente parziale specificato nella Tab 6.2.II delle NTC2018.

Tabella 7.Coefficienti parziali per le resistenze dei materiali naturali

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

Le analisi finalizzate al dimensionamento strutturale nelle quali si consideri l'interazione terreno – struttura si dovranno eseguire con i valori caratteristici dei parametri geotecnici, amplificando l'effetto delle azioni con i coefficienti parziali del gruppo A1, così come previsto al §6.2.4.2 della normativa vigente.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Per il calcolo e la verifica si devono considerare i seguenti stati limite ultimi, accertando che le resistenze superino le azioni agenti per ciascuno stato limite considerato:

- SLU di tipo geotecnico (GEO)
 - Collasso per rotazione intorno a un punto dell'opera (atto di moto rigido);
 - Collasso per carico limite verticale;
 - Sfilamento di uno o più ancoraggi;
 - Instabilità del fondo scavo;
 - Instabilità globale del complesso opera di sostegno – terreno.
- SLU di tipo strutturale (STR)
 - Raggiungimento della resistenza di uno o più sistemi di contrasto;
 - Raggiungimento della resistenza della struttura della paratia.

La verifica di stabilità globale del complesso opera di sostegno – terreno deve essere effettuata secondo l'approccio 1, con la Combinazione 2 (A2+M2+R2) tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.8.I. Le rimanenti verifiche devono essere effettuate secondo l'Approccio 1 considerando le due combinazioni di coefficienti:

- Combinazione 1: (A1+M1+R1)
- Combinazione 2: (A2+M2+R1)

Tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I e 6.2.II, con i coefficienti del gruppo R1 pari all'unità.


Tabella 8. Coefficienti parziali per le verifiche di opere di materiali sciolti

COEFFICIENTE	R2
γ_R	1,1

Nelle condizioni di esercizio, gli spostamenti dell'opera di sostegno e del terreno circostante devono essere valutati per verificarne la compatibilità con la funzionalità dell'opera e con la sicurezza e funzionalità di manufatti adiacenti, anche a seguito di modifiche indotte sul regime delle pressioni interstiziali.

Inoltre, secondo quanto prescritto al §6.5.2.2 della normativa vigente, il modello geotecnico deve tenere conto delle possibili variazioni del profilo del terreno a monte e a valle del paramento rispetto ai valori nominali. Nel caso in cui la funzione di sostegno sia affidata alla resistenza del volume di terreno a valle dell'opera, la quota di valle deve essere diminuita di una quantità pari al minore dei seguenti valori:

- 10% dell'altezza di terreno da sostenere nel caso di opere a sbalzo;
- 10% della differenza di quota fra il livello inferiore di vincolo e il fondo scavo nel caso di opera vincolata;
- 0.5 m.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Il livello della superficie libera dell'acqua deve essere scelto sulla base di misure e sulla possibile evoluzione del regime delle pressioni interstiziali anche legati a eventi di carattere eccezionale e a possibili malfunzionamenti del sistema di drenaggio. In assenza di particolari sistemi di drenaggio, nelle verifiche allo Stato Limite Ultimo, si deve ipotizzare che la superficie libera della falda non sia inferiore a quella del livello di sommità dei terreni a bassa permeabilità ($k < 10^{-6}$ m/s).

7.2 Analisi dell'interazione paratia-terreno

Al fine di rappresentare il comportamento dell'opera di sostegno durante le varie fasi di lavoro si è utilizzato un metodo di calcolo capace di simulare l'interazione terreno-paratia. L'analisi è stata sviluppata con il software Paratie Plus 2019 di CeAS.

Paratie Plus è un codice agli elementi finiti che simula il problema di uno scavo sostenuto da diaframmi flessibili e permette di valutare il comportamento della parete di sostegno durante tutte le fasi intermedie e nella configurazione finale.

Il problema è visto come un problema piano in cui viene analizzata una "fetta" di parete di larghezza unitaria, come mostrato nella seguente figura.

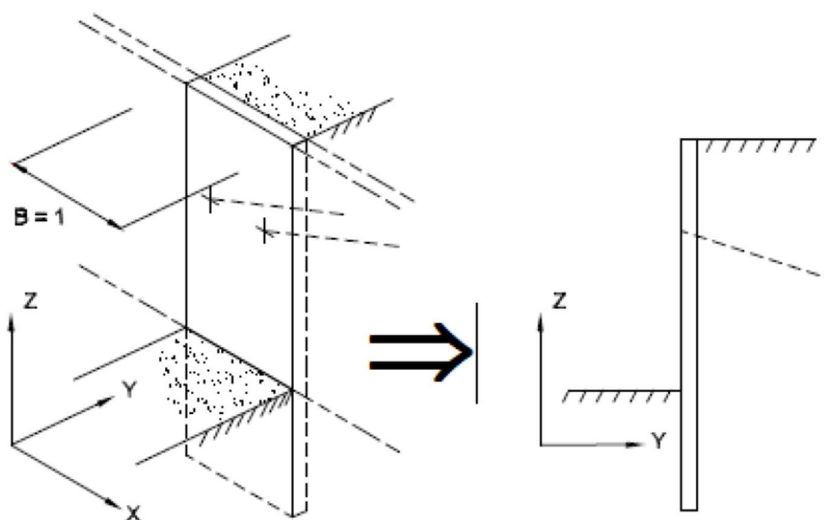



Figura 5. Modellazione piana della paratia

La modellazione numerica dell'interazione terreno-struttura è del tipo "trave su suolo elastico"; le pareti di sostegno vengono rappresentate con elementi finiti trave il cui comportamento è definito

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

dalla rigidità flessionale EJ , mentre il terreno viene simulato attraverso elementi elastoplastici monodimensionali (molle) connesse ai nodi delle paratie: ad ogni nodo convergono uno o al massimo due elementi di terreno.

Il limite di questo schema sta nell'ammettere che ogni porzione di terreno, schematizzata da una "molla", abbia comportamento del tutto indipendente dalle porzioni adiacenti; l'interazione tra le varie regioni di terreno è affidata alla rigidità flessionale della parete.

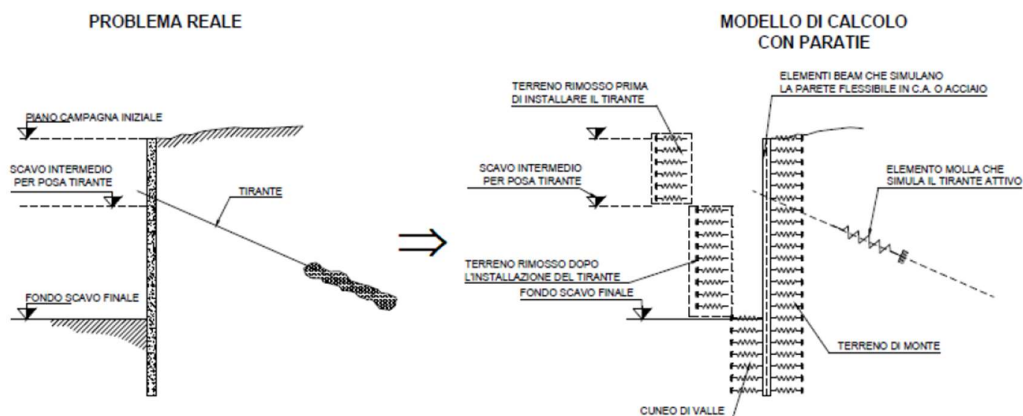



Figura 6. Schematizzazione terreno ed ancoraggi

La realizzazione dello scavo sostenuto da una o due paratie, eventualmente tirantate/puntellate, viene seguita in tutte le varie fasi attraverso un'analisi "statica incrementale": ogni passo di carico coincide con una ben precisa configurazione caratterizzata da una certa quota di scavo, da un certo insieme di tiranti/vincoli applicati, da una ben precisa disposizione di carichi applicati. Poiché il comportamento degli elementi finiti è di tipo elastoplastico, ogni configurazione dipende in generale dalle configurazioni precedenti e lo sviluppo di deformazioni plastiche ad un certo passo condiziona la risposta della struttura nei passi successivi. La soluzione ad ogni nuova configurazione (step) viene raggiunta attraverso un calcolo iterativo alla Newton-Raphson (Bathe, 1996).

L'analisi ha lo scopo di indagare la risposta strutturale in termini di deformazioni laterali subite dalla parete durante le varie fasi di scavo e di conseguenza la variazione delle pressioni orizzontali nel terreno. Per far questo, in corrispondenza di ogni nodo è necessario definire due gradi di libertà, cioè lo spostamento orizzontale e la rotazione attorno all'asse X ortogonale al piano della struttura (positiva se antioraria).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

7.3 Carichi applicati alle strutture

Al fine di massimizzare le azioni sollecitanti per la definizione dei carichi (permanenti, accidentali, ecc.) per le relative combinazioni (Stati Limite Ultimi, Stati limiti di Esercizio, Stati limiti di Danno, etc.) saranno prese in considerazione tutte le prescrizioni del citato DM 17 gennaio 2018: Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le costruzioni" (GU n.42 del 20/02/2018).

I software FEM più comuni consentono l'applicazione di forze e momenti concentrati o distribuiti esterni, per situazioni molto speciali. I carichi da considerare sono riepilogati di seguito.

- **Peso della struttura.** Il peso proprio della struttura è calcolato in base alla geometria degli elementi strutturali e al peso specifico assunto per i materiali (CLS) pari a:

$$\gamma_{cls} = 25.0 \text{ kN/m}^3$$

- **Spinte del suolo.** La spinta del terreno viene solitamente calcolata dai software considerando la storia di carico dell'opera di sostegno, in diverse fasi di costruzione, considerando la pressione attiva (K_a) e la pressione passiva (K_p). L'attrito terreno-struttura sarà considerato sul lato attivo e passivo durante la fase temporanea della costruzione ma non in condizioni permanenti di lungo termine. Pertanto, nelle analisi, l'angolo di attrito della parete δ è uguale a:


$$\delta = \frac{1}{2} \varphi \text{ per diaframmi, pali e micropali durante la fase di costruzione.}$$

$$\delta = 0^\circ \text{ per diaframmi (strutture permanenti) in condizione di lungo termine.}$$

- **Spinta pressione idraulica in caso di presenza di falda.** Nella fase transitoria della costruzione i diaframmi saranno progettati al fine di sopportare la spinta del suolo e la spinta idraulica dovuta alla falda quando presente. A lungo termine, invece, si considereranno i diaframmi come strutture permanenti per la sola spinta del suolo. Per quanto riguarda la spinta idraulica, a favore di sicurezza, si considererà che i giunti fra un diaframma e l'altro non saranno più in grado di "trattenere" l'acqua di falda che, quindi, andrà a esercitare la propria pressione per la sua interezza sulle fodere interne opportunamente impermeabilizzate.

I livelli di breve termine (fase di costruzione) e lungo termine (fase di esercizio) sono così definiti:

- Breve termine: livello indicato sul profilo + 1.5m (livello di falda considerato nella verifica a galleggiamento del tappo di fondo).
 - Lungo termine: livello di breve termine + 3.0m (livello di falda considerato nella verifica a sifonamento e a galleggiamento della stazione).
- **Sovraccarichi esterni per circolazione mezzi.** Fatte salve situazioni singolari dove il ricoprimento non ha uno spessore adeguato a ridistribuire i carichi stradali da normativa agenti sull'estradosso della soletta (per queste configurazioni rimangono valide le indicazioni definite dalle NTC2018), per simulare la presenza di circolazione di mezzi di cantiere (nella fase di costruzione) e traffico stradale (nella fase definitiva) a

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

tergo delle opere di sostegno, sarà considerato un carico nastriforme di 20 kPa applicato uniformemente su tutto il solaio di copertura e come spinta dal solo lato di azione del sisma. Tale sovraccarico sarà considerato anche in fase di costruzione quale carico di cantiere e/o riapertura al traffico.

- **Carichi degli edifici posti a tergo delle opere di contenimento.** Per tenere in conto di questa situazione si considererà, quale scarico a quota fondazione dell'edificio, un carico di 10 kPa per ogni piano dell'edificio stesso.
- **Carichi sismici.** Per quello che riguarda l'applicazione della spinta sismica, si utilizzerà il metodo di Wood (1973). Tale metodo fornisce la sovraspinta sismica del terreno su una parete interrata.

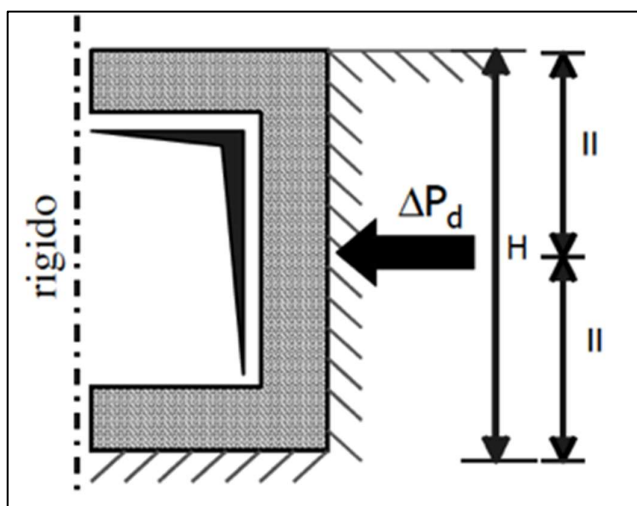



Figura 7. Schematizzazione metodo di Wood

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

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

In cui γ è il peso specifico del terreno supposto uniforme. Poiché tale risultante ha il punto di applicazione a metà dell'altezza H del muro, è possibile assumere una pressione uniforme di entità pari a:

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

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

7.4 Spinta del terreno

Nel modello di calcolo realizzato mediante il software Paratie Plus, la spinta del terreno viene determinata investigando l'interazione statica tra terreno e la struttura deformabile a partire da uno stato di spinta a riposo del terreno sulla paratia.

I parametri che identificano il tipo di legge costitutiva possono essere distinti in due sottoclassi: parametri di spinta e parametri di deformabilità del terreno.

I parametri di spinta sono il coefficiente di spinta a riposo K_0 , il coefficiente di spinta attiva K_a e il coefficiente di spinta passiva K_p .

Il coefficiente di spinta a riposo fornisce lo stato tensionale presente in sito prima delle operazioni di scavo. Esso lega la tensione orizzontale efficace σ'_h a quella verticale σ'_v attraverso la seguente relazione:

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v$$

K_0 dipende dalla resistenza del terreno, attraverso il suo angolo di attrito efficace ϕ' e dalla sua storia geologica. Si può assumere che:

$$K_0 = K_0^{NC} \cdot (OCR)^m$$

dove

$$K_0^{NC} = 1 - \sin \phi'$$

e il coefficiente di spinta a riposo per un terreno normalconsolidato ($OCR = 1$). OCR rappresenta il grado di sovraconsolidazione e "m" un parametro empirico, di solito compreso tra 0.4 e 0.7.


I coefficienti di spinta attiva e passiva sono forniti dalla teoria di Rankine per una parete liscia dalle seguenti espressioni:

$$K_a = \tan^2(45 - \phi'/2)$$

$$K_p = \tan^2(45 + \phi'/2)$$

Per tener conto dell'angolo di attrito δ tra paratia e terreno, assunto per il caso in esame pari a 0.5 volte l'angolo di resistenza al taglio, il software Paratie Plus impiega rispettivamente per i coefficienti di spinta attiva e passiva le formulazioni di Coulomb e Lancellotta.

Di seguito si riporta la formulazione di Coulomb per la determinazione del coefficiente di spinta attiva impiegato dal software di calcolo Paratie Plus:

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi' - \beta)}{\cos^2 \beta \cdot \cos(\beta + \delta) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi') \cdot \sin(\phi' - i)}{\cos(\beta + \delta) \cdot \cos(\beta - i)}} \right]^2}$$

Dove β è l'angolo di inclinazione del diaframma rispetto alla verticale e "i" l'angolo di inclinazione del terreno a monte della paratia rispetto all'orizzontale.

Di seguito si riporta la formulazione di Lancellotta per la determinazione del coefficiente di spinta passiva impiegato dal software di calcolo Paratie Plus:

$$K_p = \left[\frac{\cos \delta}{1 - \sin \phi'} \cdot \left(\cos \delta + \sqrt{\sin^2 \phi' - \sin^2 \delta} \right) \right] \cdot e^{2\theta \cdot \tan \phi'}$$

dove

$$2\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \delta}{\sin \phi'} \right) + \delta$$

Il software di calcolo calcola automaticamente i coefficienti di spinta a riposo, attivi e passivi in accordo alle formulazioni sopra citate e riportate per semplicità nella figura seguente.

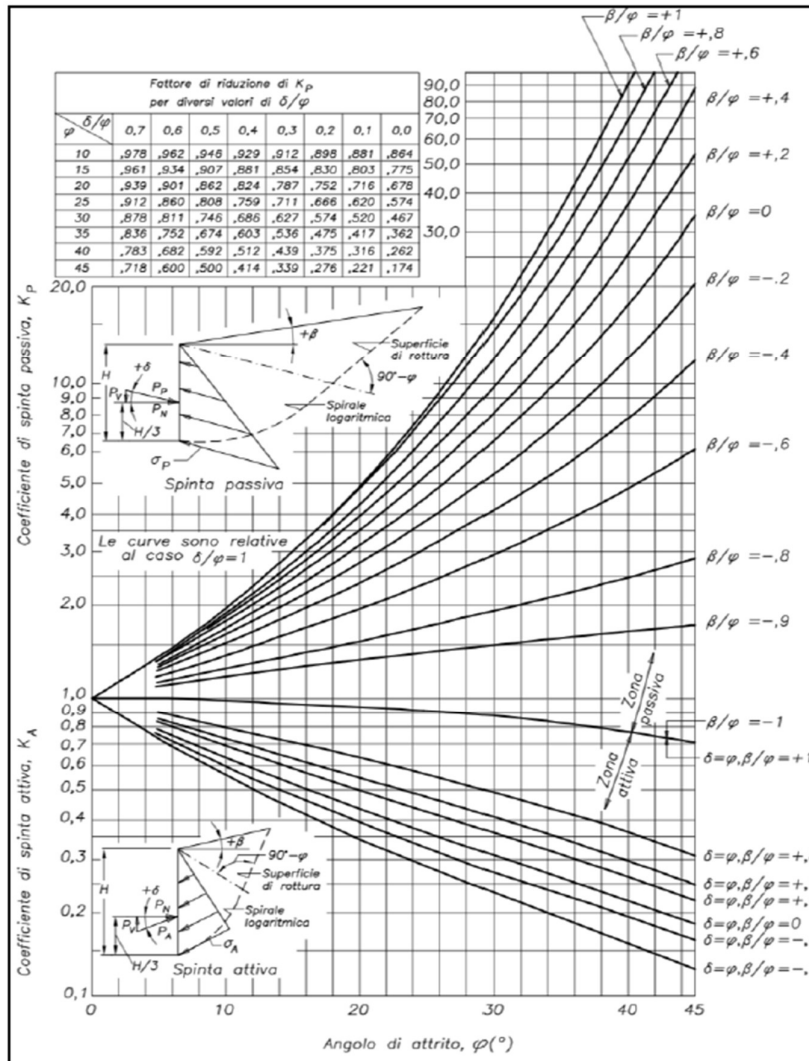



Figura 8. Valori di K_a e K_p ottenuti con superficie di scorrimento formata da spirale logaritmica (Navfac, 1971)

7.5 Analisi di stabilità globale

Il calcolo della stabilità è stato eseguito per mezzo del Metodo di Bishop, definendo dei punti di entrata e di uscita delle potenziali superfici di scorrimento. Nel dettaglio si considerano: le superfici critiche analizzate e la superficie critica, a cui è associato il coefficiente di sicurezza più basso (FS^{MIN}).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Per le verifiche di stabilità globale è impiegato il codice Slope/W, dedicato allo studio della stabilità dei pendii che permette di calcolare il fattore di sicurezza dei pendii in terreno e in roccia.

Il codice Slope/W utilizza il metodo dell'equilibrio limite e permette di prendere in considerazione superfici di scorrimento definite in diversi modi, condizioni stratigrafiche e idrostratigrafiche complesse mediante l'utilizzo di diversi modelli costitutivi per i materiali e condizioni di pressioni neutre variabili. Sono inoltre utilizzabili diversi metodi di analisi e possono essere applicate condizioni di carico di vario tipo.

La versione del software adottata per le verifiche condotte nel presente documento è Slope/W – GeoSlope ver. 8.13 – GEOSTUDIO 2012.

L'esame delle condizioni di stabilità dei rilevati è stato condotto utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite.

Il coefficiente di sicurezza a rottura lungo la superficie di scorrimento viene definito come rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie e quella effettivamente mobilitata:

$$F_s = \frac{T_{disp}}{T_{mob}}$$


Il codice Slope/W è stato utilizzato nel presente documento per condurre le analisi di stabilità sia in campo statico che in campo sismico (adottando il metodo pseudo-statico) costituenti le verifiche SLU richieste dalla Normativa per le opere in terreni sciolti.

Nelle analisi sono state escluse, perché considerate non significative, le superfici di rottura corticali (con profondità minori di 0.5 m circa).

L'analisi delle condizioni di stabilità dei pendii in condizioni sismiche può essere seguita mediante metodi pseudostatici, metodi degli spostamenti e metodi di analisi dinamica.

Nelle analisi si deve tenere conto dei comportamenti di tipo fragile, che si manifestano nei terreni a grana fina sovraconsolidati e nei terreni a grana grossa addensati con una riduzione della resistenza al taglio al crescere delle deformazioni. Inoltre, si deve tener conto dei possibili incrementi di pressione interstiziale indotti in condizioni sismiche nei terreni saturi. Nei metodi pseudostatici l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso W del volume di terreno potenzialmente instabile. Tale forza dipende dalle caratteristiche del moto sismico atteso nel volume di terreno potenzialmente instabile e dalla capacità di tale volume di subire spostamenti senza significative riduzioni di resistenza. Nelle verifiche allo stato limite ultimo, in mancanza di studi specifici, le componenti orizzontale e verticale di tale forza possono esprimersi come $F_h = k_h W$ ed $F_v = k_v W$, con k_h e k_v rispettivamente pari ai coefficienti sismici orizzontale e verticale calcolati come segue:

$$k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{max}}{g}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

dove β_s rappresenta il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito di riferimento.

Come riportato nel paragrafo §7.11.4 delle NTC2018, nelle verifiche di sicurezza si deve controllare che la resistenza del sistema sia maggiore delle azioni impiegando lo stesso approccio di cui al §6.8.2 per le opere di materiali sciolti e fronti di scavo, ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a $\gamma_R = 1.2$. Si deve inoltre tener conto della presenza di manufatti interagenti con l'opera.

7.6 Capacità portante

Per la valutazione della capacità portante – lato terreno – delle opere di sostegno in oggetto è necessario determinare i valori di resistenza forniti dalle unità geotecniche attraversate in termini di:

- capacità portante laterale Q_l ;
- capacità portante di base Q_b ;

Una volta definite le singole componenti che contribuiscono alla definizione della resistenza ultima lato terreno, è possibile determinare il valore della capacità portante complessiva mediante la seguente espressione:

$$Q_t = Q_l + Q_b - W_d$$

Dove W_d rappresenta il peso proprio dell'elemento strutturale.


Vista la natura granulare dei terreni presenti nell'area oggetto di studio, saranno condotte le verifiche secondo le raccomandazioni AGI (1984) in condizioni drenate.

7.6.1 Capacità portante laterale

La resistenza laterale di calcolo è stata determinata, in base al tipo di terreno attraversato, come segue:

$$\tau_l = k \cdot \sigma'_v \cdot \tan \phi'$$

con k rappresentante un coefficiente empirico variabile con la profondità tra 0.4 e 0.7, assunto in questa sede pari a 0.5.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

La capacità portante laterale sarà in definitiva pari a:

$$Q_l = \tau_l \cdot A_l$$

con A_l area laterale.

7.6.2 Capacità portante di base

La resistenza di base di calcolo è stata determinata, in base al tipo di terreno attraversato, come segue:

$$q_b = N_q \cdot \sigma'_v \leq q_{b,max}$$

dove N_q rappresenta un parametro definito mediante il grafico seguente, funzione dell'angolo di attrito del terreno oggetto di studio.

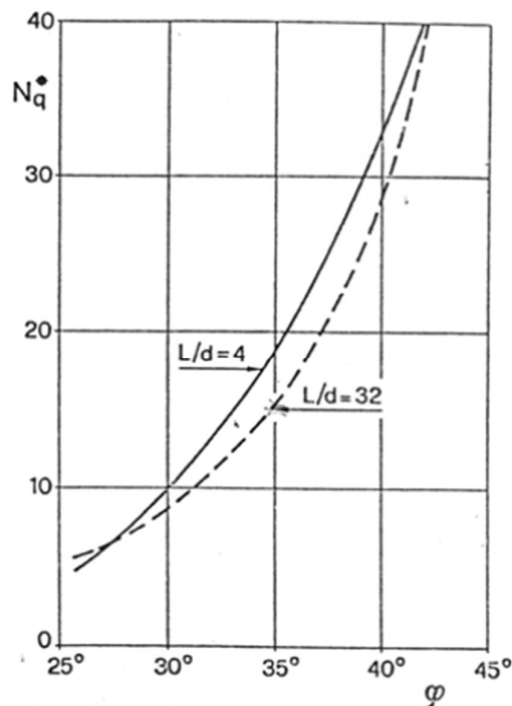



Figura 9. Diagramma per la valutazione del coefficiente N_q (Berezantzev, 1965)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Il valore di q_b non deve essere comunque superiore al limite inferiore $q_{b,max}$ riportato nella seguente tabella, funzione del litotipo attraversato.

Tabella 9. Valori di $q_{b,max}$ per terreni a grana grossa (Gwizdala, 1984)

Litotipo	$q_{b,max}$ [kPa]
Ghiaie	7500
Ghiaie sabbiose	5800
Sabbie	5800
Sabbie limose	4300

Si assume – cautelativamente – per il caso in esame un valore limite di $q_{b,max}$ pari a 4300 kPa.

La capacità portante di base sarà in definitiva pari a:

$$Q_b = q_b \cdot A_b$$

con A_b area di base.


7.7 Verifiche al galleggiamento

Per la verifica al galleggiamento delle strutture in c.a. sottofalda saranno considerate le seguenti configurazioni:

- Verifica di breve termine: dove il livello della falda considerato è pari al livello indicato sul profilo + 1.5 m;
- Verifica di lungo termine: dove il livello della falda considerato è pari al livello indicato nella verifica a breve termine + 3.0 m.

In entrambe le configurazioni, le verifiche saranno eseguite confrontando il valore di progetto della forza destabilizzante con il valore della sommatoria di tutte le azioni permanenti stabilizzanti, rispetto al quale dovrà risultare inferiore o al massimo uguale.

$$V_{dst,d} \leq G_{stb,d}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

L'azione sfavorevole destabilizzante è la pressione dell'acqua sotto la piastra di fondazione e sotto la punta delle pareti del diaframma.

Le azioni permanenti favorevoli alla stabilizzazione sono: peso proprio delle strutture e parziale ritombamento finale sulla soletta di copertura (W). Viceversa, il peso proprio delle apparecchiature all'interno della stazione (come ad esempio scale mobili, trasformatori, ventilatori, ecc...) non deve essere considerato come carico stabilizzante nel calcolo.


Nel caso in cui la disuguaglianza sopra descritta non fosse verificata, sarà necessario prevedere:

- In condizioni di breve termine: la realizzazione di un tappo di fondo;
- In condizioni di lungo termine: la realizzazione di elementi (ad esempio tiranti applicati alla soletta di fondo) in grado, con la loro azione di contrasto alle azioni destabilizzanti, di soddisfare la disuguaglianza di cui sopra.

L'effetto complessivo di questi elementi sarà valutato considerando opportuni coefficienti di sicurezza come definito nella normativa vigente, di cui al paragrafo 6.2.4.1.1 delle NTC 2018.

Tabella 10. Coefficienti parziali sulle azioni per le verifiche nei confronti di stati limite di sollevamento

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	Sollevamento (UPL)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9
	Sfavorevole		1,1
Carichi permanenti $G_2^{(2)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8
	Sfavorevole		1,5
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Qi}	0,0
	Sfavorevole		1,5

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

8. DIMENSIONAMENTO E VERIFICHE DEI DIAFRAMMI DEFINITIVI

Nel seguente capitolo saranno riportate le analisi numeriche e le rispettive verifiche di sicurezza eseguite per la sezione di calcolo della galleria artificiale posta in prossimità della Stazione Cimarosa, nella tratta compresa tra il Pozzo Cimarosa e la Stazione Cimarosa stessa. La sezione di calcolo impiegata per le analisi si trova alla PK 12+500 circa. I diaframmi previsti nel tratto tra Pozzo Cimarosa e Stazione Corelli sono stati verranno adeguati sulla base dei tipologici sviluppati per la GA01.

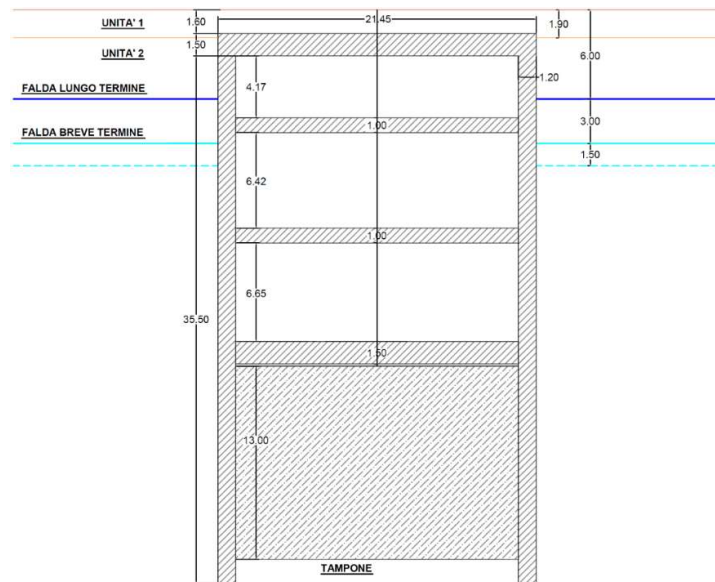


Figura 10. Dimensioni del modello di calcolo realizzato mediante Paratie Plus


Per il modello di calcolo della sezione oggetto di studio sono stati impiegati i parametri geotecnici riportati nella seguente tabella.

Tabella 11. Parametri di resistenza e deformabilità impiegati nelle analisi numeriche

Unità	H_{strato}	$\gamma_{nat,dry}$	ϕ'	c'	$E_{VC,op}$	$E_{UR,op}$
	[m]	[kN/m ³]	[°]	[kPa]	[MPa]	[MPa]
U1	1.9	19	30	0	15	24
U2	Da 1.9 in giù	21	35	5	30	48
JET	Da 24.00 a 37.00	21	35	150	450	720

**U1: Terreno superficiale; U2: Ghiaie e sabbie da sciolte a debolmente cementate.*

Per la sezione in esame sono state considerate le seguenti condizioni di carico:

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d’opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

- a) Applicazione dei carichi riferiti alla preesistenza BOCI16 al lato destro della galleria e carico accidentale dovuto al traffico stradale sopra la soletta e al lato destro (è stato scelto il lato corrispondente alla preesistenza BOCI16 al fine di massimizzare le azioni sul diaframma);
- b) Applicazione del carico riferito alla preesistenza BOCI16 (a destra della galleria) e carico accidentale riferito al traffico tranviario sopra la soletta e al lato sinistro della galleria;

Per entrambe le condizioni di carico sono state eseguite le analisi considerando due condizioni differenti di vincolo tra la soletta di copertura e i diaframmi; in particolare sono state analizzate le condizioni di incastro-incastro e appoggio-appoggio, quest’ultima per tenere conto dell’eventuale difettosità dell’incastro in fase realizzativa (tale configurazione concorre alla valutazione della robustezza della sezione di calcolo, insieme alle considerazioni svolte al §8.3 della presente relazione tecnica e di calcolo).


Per ultimo, sono stati analizzati per entrambe le condizioni di carico due differenti scenari legati alla robustezza della struttura durante le fasi costruttive. A tal riguardo, per ulteriori approfondimenti si rimanda al paragrafo §8.3 della presente relazione tecnica e di calcolo.

Per il dimensionamento dei tratti di galleria GA04 caratterizzati da due livelli interrati ed altezze di interpiano maggiori rispetto a quelle analizzate nella presente relazione, si rimanda alle analisi e verifiche effettuate per la Sezione 5 della GA05 e riportate al Capitolo 9 della specifica relazione di calcolo.

8.1 Fasi di calcolo

Le fasi di calcolo impiegati per l’analisi numerica sono di seguito sintetizzate:

- **Fase 1:** condizione geostatica (1.90 m di terreno superficiale sovrastante l’unità 2 principale e quota falda a -9.00 m da quota stradale – falda di progetto a breve termine);
- **Fase 2:** applicazione dei carichi delle strutture esistenti (BOCI16 pari a 40 kPa; per l’ubicazione e le caratteristiche del fabbricato si veda la cartella 4.6 – Indagini sui fabbricati) e ribasso fino alla quota di realizzazione dei diaframmi (-2.35 m rispetto al piano stradale);
- **Fase 3:** realizzazione dei diaframmi (lunghezza diaframmi pari a 35.5 m e spessore 1.20 m);
- **Fase 4:** realizzazione del tampone di fondo (13 m di jet grouting);
- **Fase 5:** esecuzione scavo fino alla quota di -6.60 m da piano stradale (tale da garantire una luce netta interna di 3.5 m dopo l’esecuzione della soletta – per ragioni legate alla sicurezza);
- **Fase 6:** realizzazione della soletta di copertura (spessore pari a 1.50 m);
- **Fase 7:** ritombamento e applicazione del carico accidentale in superficie (carico stradale o tranviario – per il carico fare riferimento all’analisi dei carichi riportato al §8.2 della presente relazione), si precisa che a favore di sicurezza si applica il carico del rinterro e il carico accidentale tranviario già nella fase 7 per massimizzare le sollecitazioni nei diaframmi e in copertura, anche se nelle fasi esecutive è prevista l’applicazione di tali carichi a valle del completamento delle strutture interne;
- **Fase 8:** installazione del primo ordine di puntelli metallici provvisionali;

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

- **Fase 9:** scavo di ribasso fino alla quota di -13.70 m da piano stradale (e conseguente ribasso della falda);
- **Fase 10:** installazione del secondo ordine di puntelli metallici provvisionali;
- **Fase 11:** scavo di ribasso fino alla quota di -20.00 m da piano stradale (e conseguente ribasso della falda);
- **Fase 12:** installazione del terzo ordine di puntelli metallici provvisionali;
- **Fase 13:** scavo di ribasso fino alla quota di -24.00 m (e conseguente ribasso della falda - fondo scavo);
- **Fase 14:** simulazione extra-scavo di 50 cm come imposto dalle NTC 2018 al §6.5.2.2;
- **Fase 15:** realizzazione del solettone di fondo (spessore pari a 1.50 m);
- **Fase 16:** ritombamento fino alla quota di fondo scavo;
- **Fase 17:** rimozione del terzo ordine di puntelli metallici provvisionali;
- **Fase 18:** realizzazione primo ordine di soletta in c.a. (spessore pari a 1.00 m);
- **Fase 19:** rimozione del secondo ordine di puntelli metallici provvisionali;
- **Fase 20:** realizzazione secondo ordine di soletta in c.a. (spessore pari a 1.00 m);
- **Fase 21:** rimozione del primo ordine di puntelli metallici provvisionali;
- **Fase 22:** innalzamento quota della falda a -6.00 m da piano stradale e rimozione del tampone di fondo (condizione di lungo termine);
 - **Fase 23 (SLE):** simulazione dell'effetto del fluage dei diaframmi; per simulare tale effetto si applica al modulo elastico del CLS un coefficiente di viscosità pari a $\varphi = 2.75$, come di seguito indicato:

$$E_{CLS,FL} = E_{CLS} \cdot \frac{1}{1 + \varphi(\infty, t_0)}$$

- **Fase 23 (SLU/SLV):** applicazione di un'azione sismica pseudostatica secondo il noto metodo di Wood.

I puntelli metallici e le solette in cemento armato sono modellati mediante elementi strutturali predefiniti dal software Paratie Plus rispettivamente con il nome "Puntone" e "Soletta".

Tali elementi valutano la rigidità assiale mediante la relazione seguente:

$$K = \frac{E \cdot A}{l \cdot i}$$

dove:


E = rappresenta il modulo elastico dell'elemento di contrasto


A = area della sezione dell'elemento di contrasto

l = lunghezza dell'elemento di contrasto

i = interasse tra gli elementi di contrasto

Per la rappresentazione delle fasi di calcolo, riferirsi all'Allegato 1 al §17 della presente relazione tecnica e di calcolo.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

8.2 Analisi dei carichi

Poiché la soletta di copertura risulta incastrata al diaframma, l'effetto dei carichi agenti in superficie condiziona anche i diaframmi stessi (per inversione del momento flettente agente). Per tale ragione, si considera – cautelativamente – sul modello di calcolo di Paratie Plus il peggiore tra i seguenti scenari di carico possibili:

- carico da traffico stradale;
- carico tranviario;
- valore minimo pari a 20 kPa.

Per i carichi da traffico agenti sulla soletta di copertura si è fatto riferimento – in quanto condizione di carico più gravosa – allo schema di carico 1 previsto al §5.1.3.3.3 della Normativa vigente (NTC2018).

Lo schema di carico 1 è costituito da carichi concentrati su due assi in tandem, applicati su impronte di pneumatico di forma quadrata e lato 0.40 m, e da carichi uniformemente distribuiti come mostrato nella figura seguente. Questo schema è da assumere a riferimento sia per le verifiche globali, sia per le verifiche locali, considerando un solo tandem per corsia, disposto in asse alla corsia stessa. Il carico tandem, se presente, va considerato per intero.

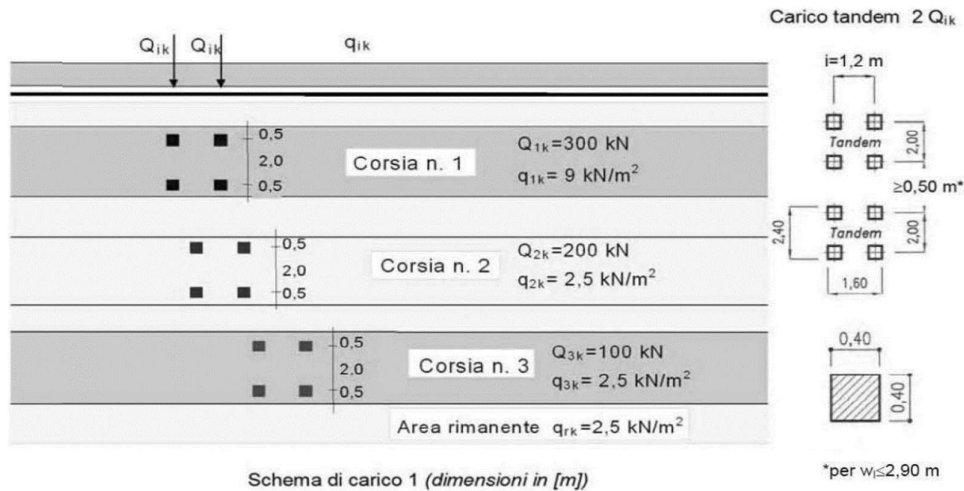



Figura 11. Schema di carico 1 previsto per la soletta di copertura

A partire dal piano stradale il carico si diffonderà fino alla mezzzeria della soletta di copertura; a tal proposito si considera un angolo di diffusione pari a 45° per il terreno e di circa 14° (1/4) per la soletta in c.a. Per un'altezza di terreno pari a 1.6 m (per il caso in esame) e della soletta pari ad 1.5 m si ha:

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

$$\Delta L_{TERRENO} = 2 \cdot H_{TERRENO} \cdot \tan 45^\circ = 2 \cdot 1.6 \cdot \tan 45^\circ = 3.2 \text{ m}$$

$$\Delta L_{SOLETTA} = 2 \cdot \frac{H_{SOLETTA}}{2} \cdot \tan 14^\circ = 2 \cdot 0.75 \cdot \tan 14^\circ = 0.4 \text{ m}$$

$$\Delta L = \Delta L_{TERRENO} + \Delta L_{SOLETTA} = 3.6 \text{ m}$$

L'impronta di carico in superficie è pari a 1.6 x 2.4 m (L1xL2) come indicato in Figura 11, che diffuso fino alla mezzeria della soletta risulta pari a 5.2 x 6.0 m (L1+ΔL x L2+ΔL). Si ha dunque che:

$$q_{TOT,Stradale} = q_1 + q_2 = \frac{600}{5.2 \cdot 6.0} + 9 = 28.4 \text{ kPa}$$

Per i carichi tranviari agenti sulla soletta di copertura si è fatto riferimento – in quanto condizione di carico più gravosa – al modello di carico LM71 previsto al §5.2.2.2.1.1 della Normativa vigente (NTC2018).

Tale modello di carico schematizza gli effetti statici prodotti dal traffico ferroviario normale (come mostrato nella figura seguente) costituito da: quattro assi da 250 kN disposti ad interasse di 1.60 m e un carico distribuito di 80 kN/m in entrambe le direzioni, a partire da 0.8 m dagli assi di estremità e per una lunghezza illimitata. Tale carico va moltiplicato a sua volta per un coefficiente di adattamento "α" che, per il modello di carico LM71 e posto pari a 1.1.

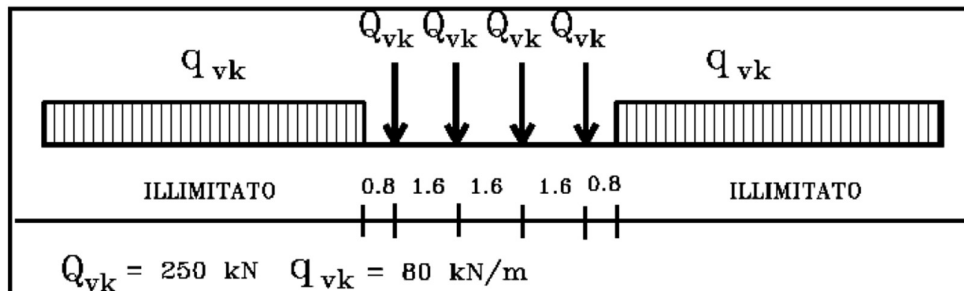



Figura 12. Modello di carico LM71 previsto per la soletta di copertura

A partire dal piano stradale il carico si diffonderà fino alla mezzeria della soletta di copertura; a tal proposito si considera un angolo di diffusione pari a 45° per il terreno e di circa 14° (1/4) per la soletta in c.a. e per l'armamento tranviario. Per un'altezza di terreno pari a 1.6 m (per il caso in esame), della soletta pari ad 1.5 m e 0.7 m dell'armamento tranviario si ha:

$$\Delta L_{TERRENO} = 2 \cdot H_{TERRENO} \cdot \tan 45^\circ = 2 \cdot (1.6 - 0.7) \cdot \tan 45^\circ = 1.8 \text{ m}$$

$$\Delta L_{SOLETTA} = 2 \cdot \frac{H_{SOLETTA}}{2} \cdot \tan 14^\circ = 2 \cdot 0.75 \cdot \tan 14^\circ = 0.4 \text{ m}$$

$$\Delta L_{ARMAMENTO} = 2 \cdot H_{ARMAMENTO} \cdot \tan 14^\circ = 2 \cdot 0.38 \cdot \tan 14^\circ = 0.2 \text{ m}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Il carico tranviario si diffonde a partire dalla quota di imposta della traversina; infatti, si ha che dal pacchetto dell'armamento tranviario di 70 cm bisogna sottrarre l'altezza della rotaia, pari a 18 cm e della traversina, pari a 14 cm (il carico si diffonderà per i rimanenti 38 cm).

$$\Delta L = \Delta L_{TERRENO} + \Delta L_{SOLETTA} + \Delta L_{ARMAMENTO} = 2.4 \text{ m}$$

Si ha pertanto un carico infinitamente esteso pari a:

$$Q = \frac{250 \cdot 4}{6.4} = 156.25 \text{ kN/m}$$

L'impronta di carico in superficie sarà definita dalla lunghezza della traversina, pari a 2.3 m, che diffuso fino alla mezzeria della soletta risulta pari a 4.7 m ($L_{TRAVERSINA} + \Delta L$). Si ha dunque che:

$$q_{TOT,Tranviario} = \frac{156.25}{4.7} \cdot 1.1 = 36.8 \text{ kPa}$$

Pertanto, si considera il carico variabile dato dal traffico tranviario pari a 36.8 kPa, in quanto il peggiore tra quelli considerati.

Il carico $q_{vk} = 80 \text{ kN/m}$ è tenuto in conto al lato sinistro della soletta (applicato sul terreno – cautelativamente – in condizione asimmetrica), per massimizzare il carico sul diaframma trasferito ad esso dal terreno. Per quest'ultimo l'impronta di carico in superficie sarà definita dalla lunghezza della traversina, pari a 2.3 m, che diffuso fino alla mezzeria della soletta risulta pari a 4.7 m ($L_{TRAVERSINA} + \Delta L$). Si ha dunque che:

$$q_{vk,Tranviario} = \frac{80}{4.7} \cdot 1.1 = 18.9 \text{ kPa}$$


Sulla soletta di copertura vanno considerati i carichi permanenti rappresentati dal terreno e dalla sovrastruttura tranviaria. Quest'ultima è costituita da una coppia di rotaie ancorate ad una traversina di sezione circa pari a 14 x 26 cm e lunghezza 230 cm; quest'ultima è annegata in uno strato di calcestruzzo e rivestita dagli strati di binder ed usura. Inferiormente, il pacchetto è delimitato da un supporto antivibrante. L'intera sovrastruttura ha uno spessore di 70 cm.

Considerando un'estensione di superficie di 1 metro quadrato, il peso della coppia di rotaie risulta pari a:

$$P_f = P_u \cdot n = 59.74 \cdot 2 = 119.48 \text{ kg/m}^2$$

Per il peso si è tenuto conto di una coppia di rotaie del tipo Ri60N.

Il peso della traversina risulta essere di circa 70 kg; considerando un interasse di 75 cm tra traverse successive, si ottiene un peso per unità di superficie di circa 61 kg/m².

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

La parte restante di sovrastruttura, per semplicità, può essere assimilata come un'unica sezione in calcestruzzo di altezza pari a 70 cm, per la quale si ottiene di conseguenza un peso per unità di superficie di circa 1680 kg/m².

Si può quindi desumere che il carico permanente della sovrastruttura tranviaria è dato dalla somma di tali contributi, e risulta essere pari a 18.25 kPa, come di seguito esplicitato:

$$\frac{(119.48 + 61 + 1680) \cdot 9.81}{1000} = 18.25 \text{ kPa}$$

Si ha che il carico permanente portato dalla soletta è pertanto:

$$p = 18.25 + (1.6 - 0.7) \cdot 18 = 34.5 \text{ kPa}$$

8.3 Valutazione della robustezza

Una struttura si definisce robusta se:


- a) le parti della struttura che sono fondamentali per la sicurezza sono poco sensibili ad eventi inattesi o a difetti di costruzione;
- b) non si verifica il collasso estensivo della struttura nel caso in cui un singolo elemento della struttura subisca un cedimento strutturale.

Dato che il primo requisito è difficile da dimostrare se non in termini di controllo di qualità dei materiali e di esecuzione dei lavori, il criterio della robustezza, in questo progetto, si applica al secondo punto.

L'approccio dei progettisti si è pertanto focalizzato nella selezione di dettagli costruttivi e materiali adeguati e nel progettare elementi strutturali chiave con margini di sicurezza strutturale e geotecnica superiori.

Per le strutture quali le stazioni interrato o i pozzi di ventilazione, le fasi di costruzione rappresentano sicuramente le circostanze in cui la struttura risulta essere più vulnerabile dato che le strutture definitive interne non sono state completate e gli schemi strutturali iperstatici non possono contribuire a contrastare eventi inattesi.

Il progetto, pertanto, si è concentrato sugli elementi strutturali più vulnerabili durante le fasi di costruzione che sono rappresentati dalle strutture di contrasto temporanee in acciaio che possono essere danneggiate durante le lavorazioni o che possono essere suscettibili di eventi inattesi o difetti costruttivi. Questo perché il principale metodo di costruzione delle stazioni e delle strutture interrate in generale è il metodo definito "Top-Down" che prevede lo scavo completo della struttura interrata prima del completamento delle strutture interne (ad eccezione della soletta di copertura che viene realizzata per prima). Pertanto, si prevede l'installazione di più livelli di puntoni in acciaio che verranno installati in fasi successive e la loro funzionalità è essenziale per contrastare le spinte esterne delle terre e della falda.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Pertanto, i seguenti elementi strutturali verranno esaminati dal punto di vista della robustezza durante le fasi costruttive delle opere interrato:

- puntoni provvisori in acciaio;
- paratie di diaframmi.

Nel seguito verranno pertanto esaminati gli elementi sopracitati nell'ipotesi che un puntone di uno dei livelli intermedi di contrasto subisca un cedimento strutturale o perda efficacia, per cui l'interasse dei puntoni raddoppia rispetto a quanto previsto in progetto. Inoltre, per massimizzare gli effetti sulle paratie o sui puntoni provvisori, verranno presi in considerazione due scenari possibili:

1. si incrementa l'interasse del livello dei puntoni più caricati al fine di massimizzare le sollecitazioni sulle paratie;
2. si incrementa l'interasse del livello di puntoni immediatamente sopra oppure sotto a quelli più caricati, al fine di massimizzare le azioni sui puntoni più sollecitati.

Data l'eccezionalità di tali scenari, le analisi dei modelli di calcolo esaminati verranno eseguite con coefficienti moltiplicatori dei carichi unitari (SLE) mentre le analisi strutturali dei singoli elementi verranno eseguite agli stati limite ultimo SLU.

8.4 Risultati di calcolo

Nella seguente tabella si riporta una sintesi dei risultati in termini di spostamento e spinta passiva mobilitata al fondo dello scavo; i valori riportati sono quelli massimi riscontrati tra tutte le configurazioni di carico e schema di vincolo tra diaframma e soletta considerati (ad esclusione delle condizioni di carico eccezionali che tengono conto della robustezza degli elementi - per ulteriori dettagli, riferirsi a quanto riportato al §8 della presente relazione tecnica e di calcolo).

Tabella 12. Sintesi risultati di calcolo principali

Combinazione	Spostamenti	Spinta passiva mobilitata
	[mm]	[%]
SLE	29.7	45.0
SLV	-	50.5
A2+M2+R1	-	59.2

Nelle seguenti figure si riportano l'involuppo dello spostamento nella configurazione peggiore, l'involuppo del momento flettente in condizioni di stato limite di esercizio e stato limite ultimo e l'involuppo del taglio in condizione di stato limite ultimo. Nei diagrammi delle caratteristiche delle sollecitazioni sono riportate tutte le configurazioni e schemi di vincolo considerati in fase di analisi (per ulteriori dettagli, riferirsi a quanto riportato al §8 della presente relazione tecnica e di calcolo).

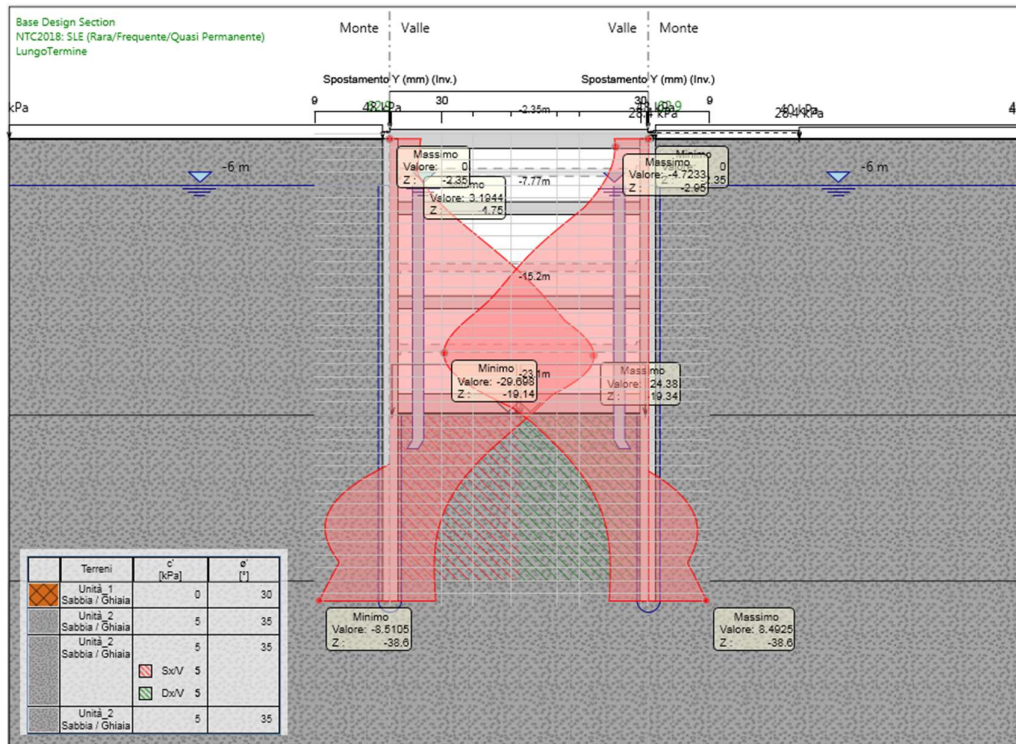


Figura 13.Spostamento massimo nella condizione di lungo termine - SLE

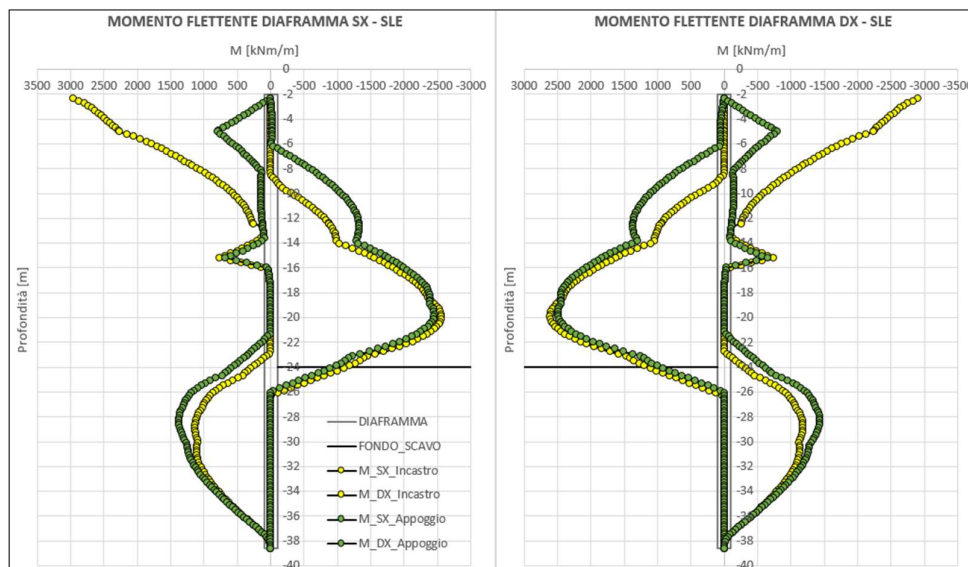


Figura 14.Inviluppo di momento flettente – SLE

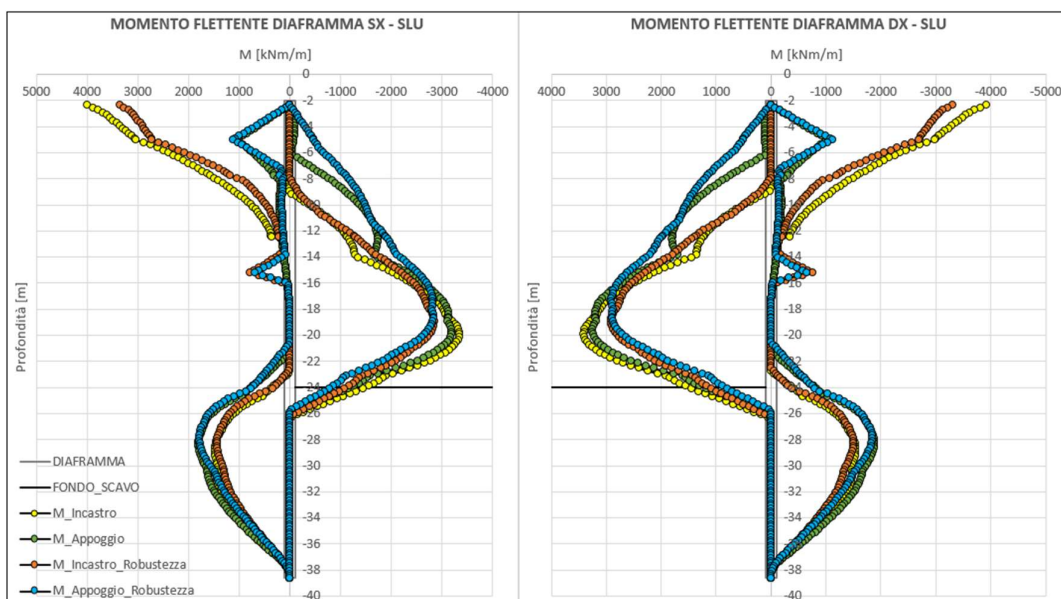


Figura 15. Inviluppo di momento flettente – SLU / SLV

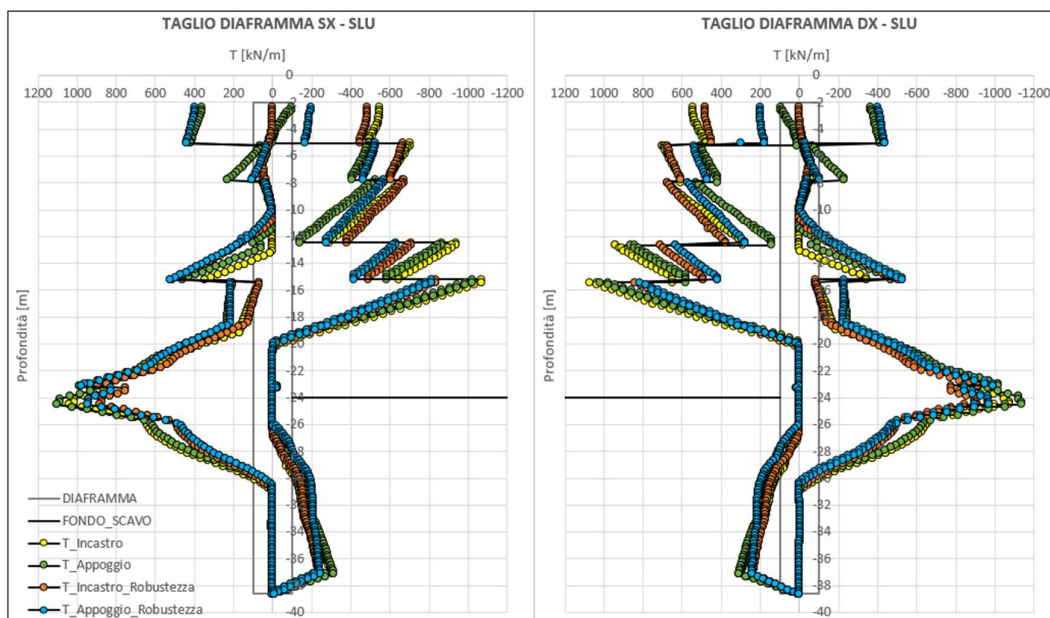



Figura 16. Inviluppo di taglio – SLU / SLV

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

8.5 Verifica strutturale diaframma

Nel seguente paragrafo saranno illustrate le verifiche strutturali dei diaframmi oggetti di studio. In particolare, saranno riportati gli schemi di armatura previsti ai vari livelli di profondità e le conseguenti verifiche dell'elemento strutturale a taglio e momento flettente secondo gli schemi sollecitativi riportati al §8.4 della presente relazione tecnica e di calcolo.

Lungo lo sviluppo della paratia saranno previsti – al fine di ottimizzare la quantità di armatura prevista in funzione dei livelli sollecitativi – le seguenti armature (**le profondità sono riportate rispetto al piano stradale*):

Tabella 13. Sintesi delle verifiche di sicurezza previste per i diaframmi (Verifica SLU)

GABBIA	Profondità* (terreno/galleria) [m]	Momento flettente (lato terreno) [kNm/m]	Momento flettente (lato galleria) [kNm/m]	Momento resistente (lato terreno) [kNm/m]	Momento resistente (lato galleria) [kNm/m]	Fattore sicurezza (lato terreno) [-]	Fattore sicurezza (lato galleria) [-]
N°1A	-2.4 / -10.4	-3988.5	1584.4	-6405.0	3679.1	1.6	2.3
N°1B	-10.4 / -14.4	-707.0	2333.0	-1929.1	3793.9	2.7	1.6
N°2	-24.4 / -19.9	-894.9	3404.4	-1313.0	5723.9	1.5	1.7
N°3	-28.3 / -22.5	-1888.4	2393.6	-3103.5	4591.4	1.6	1.9
N°4	-32.5 / -	-1427.3	-	-2446.6	-	1.7	-

**le profondità sono riportate rispetto al piano stradale.*

Tabella 14. Sintesi armature longitudinali previste per i diaframmi (Verifica SLU)

GABBIA	Quota inizio gabbia [m]	Quota fine gabbia [m]	Armatura di forza lato terreno**	Armatura di forza lato galleria**
N°1A	-2.4	-10.4	7.2Φ40+7.2Φ40	4.0Φ40+4.0Φ40
N°1B	-10.4	-14.4	4.0Φ40	4.0Φ40+4.0Φ40
N°2	-12.4	-24.4	4.0Φ30	(4.8Φ40+4Φ26) + (4.8Φ40+4Φ26)
N°3	-22.4	-34.4	4.8Φ32+4.8Φ32	4.8Φ40+4.8Φ40
N°4	-32.4	-38.4	4.0Φ30+4.0Φ30	4.0Φ30

***tutte le quantità di armatura sono normalizzate rispetto ad un concio di larghezza pari a 2.5 m.*

Per le verifiche di resistenza dei diaframmi è stato tenuto in conto il relativo peso del diaframma, che agisce – in funzione della profondità – come uno sforzo normale. A tale sforzo normale si sottrae il contributo dettato dal sollevamento che, genera uno sforzo di trazione nella zona di incastro tra soletta di copertura e diaframma. Tale valore risulta pari a 439.8 kN/m per diaframma; per la sua quantificazione riferirsi alla verifica al galleggiamento di lungo termine riportata al §8.11 della presente relazione tecnica e di calcolo.

Per la valutazione dello sforzo normale tenuto in conto bisogna riferirsi alla formulazione seguente:

$$N_z = (z - 2.4) \cdot 25 \cdot 1.2 - 439.8$$



dove 2.4 m rappresenta la quota dell'asse della soletta di copertura (punto di incastro tra diaframma e soletta considerato nel modello di calcolo), 1.2 m lo spessore del diaframma e 25 kN/m³ il suo peso specifico.

Tabella 15. Sintesi verifiche e armature trasversali previste per i diaframmi (Verifica SLU)

Profondità* [m]	Taglio agente [kN/m]	Taglio resistente [kN/m]	Fattore sicurezza [-]	Lunghezza [m]	Armatura a taglio***
-2.4 ÷ -11.0 (-5.2)	700.6	804.3	1.1	8.6	1.6 Br. Φ14/25
-11.0 ÷ -14.0 (-12.6)	943.2	1019.4	1.1	3.0	1.6 Br. Φ14/20
-14.0 ÷ -18.0 (-15.4)	1072.9	1340.6	1.2	4.0	1.6 Br. Φ14/15
-18.0 ÷ -21.0 (-20.9)	636	804.3	1.3	3.0	1.6 Br. Φ14/25
-21.0 ÷ -26.0 (-24.3)	1136.7	1340.6	1.2	5.0	1.6 Br. Φ14/15
-26.0 ÷ -30.0 (-25.9)	654.6	817	1.2	4.0	1.6 Br. Φ14/25
-30.0 ÷ -38.4 (-37.1)	311.3	670.3	2.2	8.4	1.6 Br. Φ14/30

*le profondità sono riportate rispetto al piano stradale (tra parentesi la quota relativa al taglio agente riportato).

***staffe da 1.6 braccia è riferito alla normalizzazione di 4 braccia (doppia staffa) in un concio da 2.5 m per eseguire una verifica al metro lineare (4 / 2.5 = 1.6 braccia/m).

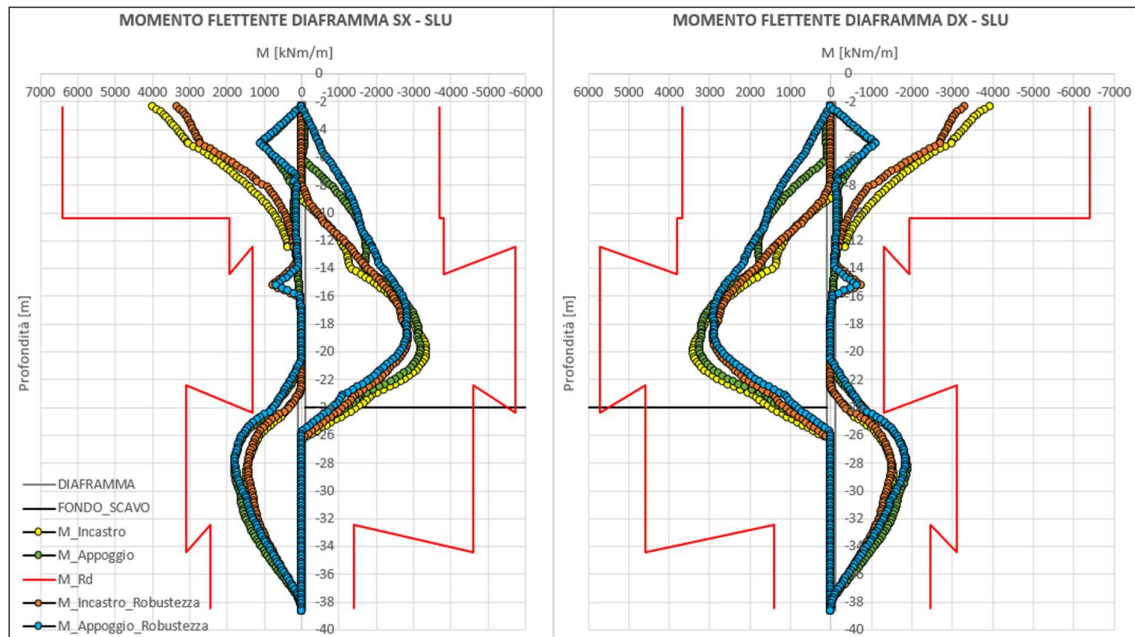


Figura 17. Diagramma di momento flettente agente e momento flettente resistente (SLU/SLV)



Tabella 16. Risultati verifiche allo Stato Limite di Esercizio/Fluage (Estradosso – lato terreno)

GABBIA	Z	M _{SLE}	$\sigma_{c,min}$	$\sigma_{s,min}$	$\sigma_{s,max}$	W _k
	[m]	[kNm/m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]
N°1A	-3.0	-2724.6	-8.4	-84.1	180.7	0.286
N°1B	-10.4	-521.7	-2.3	-18.4	124.4	-
N°2	-24.4	-675.4	-3.5	-28.0	200.7	-
N°3	-28.3	-1434.0	-5.9	-51.7	178.2	0.299
N°4	-32.5	-1092.1	-6.1	-67.0	165.2	0.263

Tabella 17. Risultati verifiche allo Stato Limite di Esercizio/Fluage (Intradosso – lato galleria)

GABBIA	Z	M _{SLE}	$\sigma_{c,min}$	$\sigma_{s,min}$	$\sigma_{s,max}$	W _k
	[m]	[kNm/m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]
N°1A	-10.4	1168.1	-3.7	-29.9	136.4	0.218
N°1B	-14.4	1554.7	-6.4	-69.4	172.4	0.299
N°2	-19.9	2605.9	-10.2	-121.2	178.8	0.283
N°3	-22.5	1834.0	-7.0	-71.5	161.7	0.265
N°4	-	-	-	-	-	-

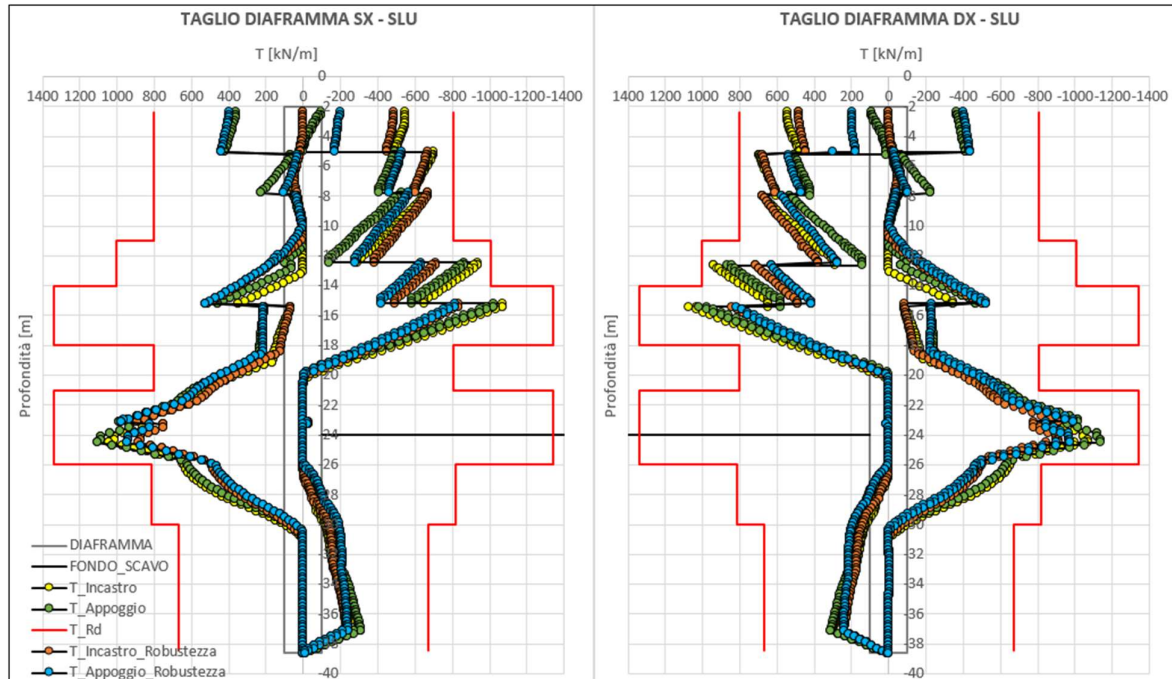


Figura 18. Diagramma di taglio agente e taglio resistente (SLU/SLV)

A titolo di esempio si riporta la verifica strutturale del diaframma riferita alla condizione più sfavorevole, cioè quella avente il coefficiente di sicurezza più basso.



geometria				
sezione trasversale				
B	H	c	d	z
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
100	120	8.9	109.6	98.6
armatura longitudinale				
nbarre	φ	d	A _{sl}	
	[mm]	[cm]	[cm ²]	
6.49	40	10.9	81.56	
6.49	40	14.9	81.56	
4	30	109.6	28.27	
armatura a taglio				
nbracci	φ	s	α	A _{sw}
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]
1.6	14	20	90	2.46

sollecitazioni e risultati			
SLE	SLU		
MEk	675.4 [kNm]	MEd	894.9 [kNm]
NEk	-220.2 [kN]	NEd	-220.2 [kN]
		VEd	943.2 [kN]
tensioni e fessure		presso-flessione	
M _{dec}	58.5 [kNm]	MRd	1313.0 [kNm]
M _{cr}	702.1 [kNm]	FS	1.47
		taglio	
y _n	-37.03 [cm]	VR _{dc}	356.5 [kN]
σ _{c,min}	-3.5 [MPa]	predisporre armatura a taglio	
σ _{s,min}	-28.0 [MPa]	VR _{ds}	1019.4 [kN]
σ _{s,max}	200.7 [MPa]	VR _{dmax}	2880.0 [kN]
		θ	25.0 [°]
k _z	0.5	sezione	duttile
ε _{sm-ε_{cm}}	- [%]	ai	105.8 [cm]
S _{r,max}	- [cm]		
w _k	- [mm]		

materiali			
calcestruzzo		acciaio	
R _{ck}	30 [MPa]	f _{yk}	450 [MPa]
f _{ck}	24.9 [MPa]	γ _s	1.15
γ _c	1.5	f _{yd}	391.3 [MPa]
α _{cc}	0.85	E _s	210000 [MPa]
f _{od}	14.1 [MPa]	ε _{uk}	75 [%]
v	0.540		
ε _{c2}	2.0 [%]		
ε _{cu2}	3.5 [%]		
α _e	15.0		
k _t	0.4	valori limite	
k ₁	0.8	0,45 f _{ck}	11.2 [MPa]
k ₃	3.4	0,8 f _{yk}	360.0 [MPa]
k ₄	0.425	w _{k,lim}	0.3 [mm]

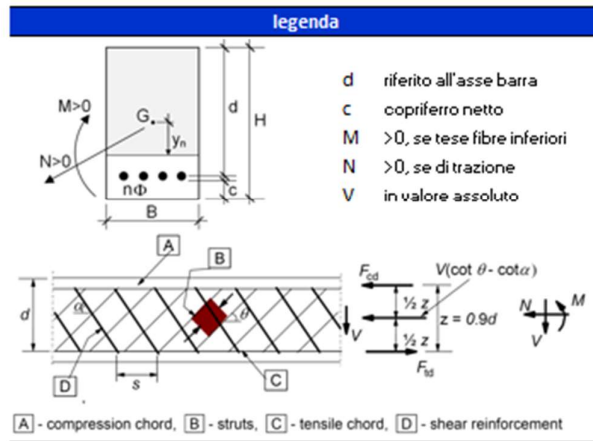



Figura 19. Verifica strutturale diaframma nella sezione più gravosa (Gabbia N°2 – lato terreno)

8.5.1 Verifica strutturale – SLE

Come criterio per lo spostamento limite delle paratie, si fa riferimento al par. 7.11.6.3.1 delle NTC 2018. Ammettendo che il tipo di opera non sviluppi meccanismi duttili, deve risultare uno spostamento permanente massimo $u_s \leq 0,005 H$ (H = altezza totale della paratia). La verifica risulta soddisfatta.

- Spostamento laterale massimo: 29.7 mm
- Altezza paratia H : 36.0 m
- $u_{s,lim} = 0.005 * 36.0 = 0.18 \text{ m} = 180 \text{ mm} > 29.7 \text{ mm}$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

8.6 Verifica puntelli metallici

I diaframmi oggetto di studio sono supportati lungo il loro sviluppo – nelle fasi provvisionali – da tre ordini di puntelli metallici in acciaio di sezione tubolare di diametro $\Phi 508$ spessore 20 mm, lunghezza 18.9 m e passo 4.1 m. Nella seguente tabella si riportano le azioni massime che insorgono nei puntelli metallici nelle varie configurazioni analizzate (si riportano esclusivamente le azioni massime tra le due configurazioni di carico sviluppate in fase di analisi):

Tabella 18. Azioni massime sui puntelli metallici al variare della configurazione analizzata

Ordine	SLU_Inc	SLU_App	ROB1_Inc	ROB1_App	ROB2_Inc	ROB2_App
	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]
I°	446.25	891.31	520.61	955.66	90.90*	209.84*
II°	869.82	974.35	325.69*	388.29*	687.09	795.37
III°	341.45	358.22	284.42	299.16	264.48	282.64

**elementi con passo di verifica pari a 8.2 m*

Le configurazioni riportate nella precedente tabella sono le seguenti:

- SLU_Inc = condizione di stato limite ultimo con incastro tra soletta e diaframmi
- SLU_App = condizione di stato limite ultimo con appoggio della soletta sui diaframmi
- ROB1_Inc = configurazione 1 robustezza (vedi §8.3 per ulteriori dettagli) con incastro tra soletta e diaframmi
- ROB1_App = configurazione 1 robustezza (vedi §8.3 per ulteriori dettagli) con appoggio della soletta sui diaframmi
- ROB2_Inc = configurazione 2 robustezza (vedi §8.3 per ulteriori dettagli) con incastro tra soletta e diaframmi
- ROB2_App = configurazione 2 robustezza (vedi §8.3 per ulteriori dettagli) con appoggio della soletta sui diaframmi

La condizione peggiore tra quelle analizzate per la verifica allo stato limite ultimo dei puntelli metallici è data dal II° ordine nella configurazione "SLU_App"; il valore della verifica risulta pari a 974.35 kN/m per il passo dei puntelli metallici corrispondente, pari a 4.1 m.

Si riporta nella seguente figura l'andamento dell'azione nei puntelli metallici secondo la condizione peggiore individuata.

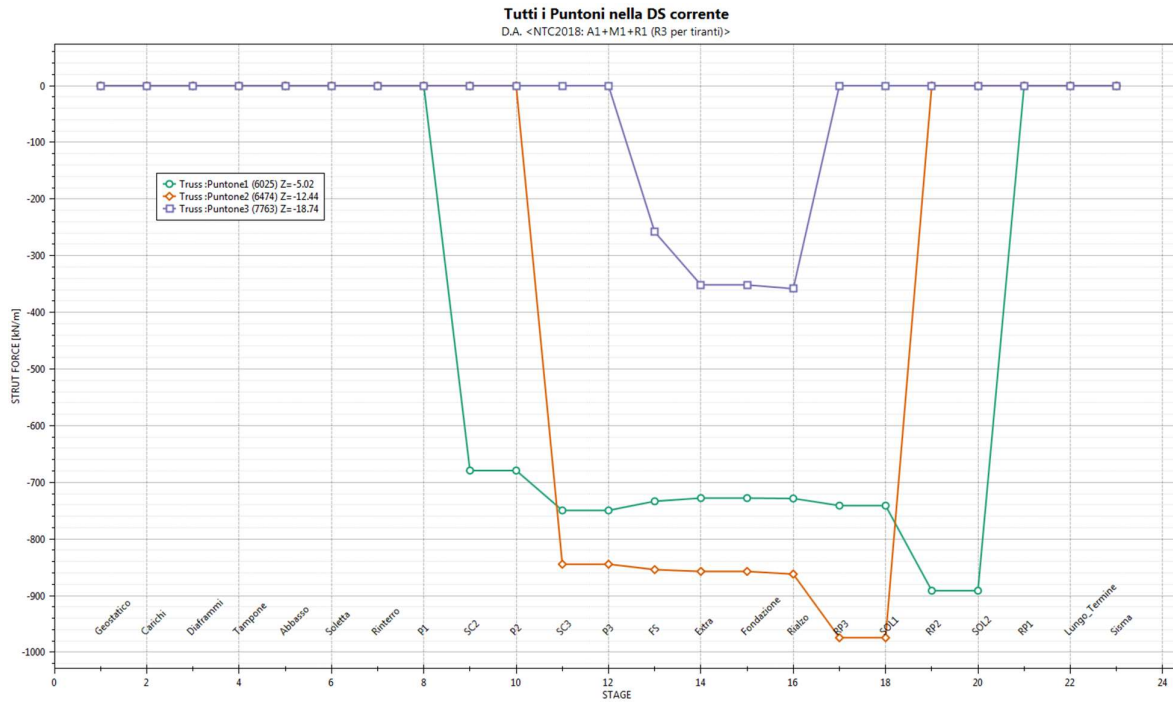



Figura 20. Andamento del carico assiale nei puntelli metallici nella condizione peggiore (SLU_App – A1+M1+R1)

Si riporta nella figura seguente la verifica strutturale a compressione del puntello metallico maggiormente caricato, la verifica all'instabilità dell'asta compressa e per ultimo la verifica a pressoflessione dello stesso.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

VERIFICA ASTA COMPRESSA

Caratteristiche dei materiali

tipologia acciaio	S355JR		
sezione formata	a caldo		
tensione di snervamento dell'acciaio	f _y	355	[MPa]
modulo di elasticità dell'acciaio	E	210000	[MPa]
coefficiente parziale sulle resistenze	γ _{M0}	1.05	[-]
coefficiente parziale sulle resistenze all'instabilità	γ _{M1}	1.10	[-]

Geometria del puntone

lunghezza	L	18.19	[m]
diametro esterno	d	508.0	[mm]
spessore	t	20.0	[mm]
area della sezione	A	306.6	[cm ²]
momento d'inerzia	I	91428	[cm ⁴]
modulo elastico a flessione	W _{el}	3600	[cm ³]
modulo plastico a flessione	W _{pl}	4766	[cm ³]
peso tubo	G	240.7	[Kg/m]

Determinazione della classe della sezione

coefficiente ε	ε	0.81	[-]
coefficiente ε ²	ε ²	0.66	[-]
rapporto larghezza - spessore	d/t	25.4	[-]
classe della sezione		1	

VERIFICA ASTA COMPRESSA

Verifica a compressione

sforzo normale massimo dal modello	N _{Ed}	974.35	[kN/m]
interasse puntoni	i	4.10	[m]
sforzo normale massimo	N _{Ed}	3995	[kN]
resistenza a compressione	N _{c,Rd}	10367	[kN m]

Verifica OK

$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$

Verifica all'instabilità dell'asta compressa

curva di instabilità	a		
coefficiente di imperfezione	α	0.21	[-]
carico critico di sbandamento	N _{cr}	5729581	[N]
snellezza adimensionale	λ	1.38	[-]
coefficiente φ	φ	1.57	[-]
coefficiente χ	χ	0.43	[-]
resistenza all'instabilità	N _{b,Rd}	4242	[kN]

Verifica OK

$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$

Verifica a pressoflessione

sforzo normale massimo dal modello	N _{Ed}	974.35	[kN/m]
interasse puntoni	i	4.10	[m]
sforzo normale massimo	N _{Ed}	3995	[kN]
resistenza a compressione	N _{pl,Rd}	10367	[kN m]
coefficiente riduttivo	1-n	0.61	[-]
momento flettente massimo	M _{Ed}	99.51	[kNm]
momento plastico resistente	M _{pl,Rd}	1611.21	[kNm]


Verifica OK

$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}(1-n)} \leq 1$

Figura 21.Verifica di resistenza dei puntelli metallici (A1+M1+R1)

Si riportano nel seguito i fattori di sicurezza relativi alla verifica dei puntelli metallici:

- Verifica a compressione → FS = 2.6
- Verifica all'instabilità dell'asta compressa → FS = 1.06
- Verifica a pressoflessione → FS = 16.2

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

8.7 Verifica trave di ripartizione

I puntelli metallici, disposti a passo 4.1 m, sono soggetti ad un carico assiale che verrà a sua volta ripartito sui diaframmi stessi in maniera uniforme mediante l'impiego di n°2 travi di ripartizioni metalliche accoppiate del tipo HEM 400. Nel caso in esame la verifica della trave di ripartizione sarà eseguita prendendo in conto le condizioni di carico più gravose.

Le condizioni di carico che forniscono gli effetti peggiori sulla trave di ripartizione sono (vedi azioni agenti sui puntelli metallici al paragrafo precedente nella Tabella 18):

- Configurazione SLU_App, II° ordine → Taglio massimo
- Configurazione ROB1_App, II° ordine → Momento flettente massimo

Secondo lo schema di trave continua su n appoggi, si hanno nella trave di ripartizione le seguenti sollecitazioni di taglio e momento flettente nelle due configurazioni individuate:

Combinazione di carico T_{max} :


$$M_d = \frac{q \cdot l^2}{10} = \frac{974.35 \cdot 4.1^2}{10} = 1637.88 \text{ kNm}$$

$$T_{d,max} = 0.6 \cdot q \cdot l = 0.6 \cdot 974.35 \cdot 4.1 = 2396.90 \text{ kN}$$

Combinazione di carico M_{max} :

$$M_{d,max} = \frac{q \cdot l^2}{10} = \frac{388.29 \cdot 8.2^2}{10} = 2610.86 \text{ kNm}$$

$$T_d = 0.6 \cdot q \cdot l = 0.6 \cdot 388.29 \cdot 8.2 = 1910.39 \text{ kN}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Si riportano nelle figure seguenti le verifiche della trave di ripartizione in oggetto secondo le due combinazioni di carico più gravose.

VERIFICA DELLE TRAVI DI RIPARTIZIONE - NTC 2018

Dati del profilato:

Tipo di profilato	HEM	400
Altezza del profilato	h	432 mm
Base del profilato	b	307 mm
Spessore dell'anima	a = t _w	21 mm
Spessore delle ali	e = t _f	40 mm
Raggio di curvatura	r	27 mm
Area della sezione	A	32578 mm ²

Definizione dell'azione di calcolo:

Sforzo massimo agente	N _{Ed}	974.35 [kN/ml]
Interasse degli elementi di contrasto	i	4.1 [m]
Momento agente sul profilato	M _{Ed}	1637.88 [kNm]
Taglio agente sul profilato	V _{Ed}	2396.90 [kN]

Calcolo della resistenza di progetto a taglio:

Tipologia di acciaio	S	355 [MPa]
Coefficiente di sicurezza	γ _{MO}	1.05 [-]
Piano di carico del profilato	Carico nel piano dell'anima	
n° di profilati considerati	n°	2 [-]
Area a taglio del singolo profilato	Av	11017.77896 mm ²
Resistenza di progetto a taglio	R _{c,Rd}	4301.33 [kN]

Definizione della tipologia di verifica da condurre:

Taglio agente sul profilato	V _{Ed}	2396.90 [kN]
Resistenza di progetto a taglio	V _{c,Rd}	4301.33 [kN]
Rapporto V _{Ed} /V _{c,Rd}	V _{Ed} /V _{c,Rd}	0.56 [-]
Tipo di verifica	Flessione e taglio	


Verifica strutturale del profilato per flessione retta:

Momento plastico nel piano dell'anima	W _{pl,y}	5570619.064 mm ³
Resistenza di progetto	M _{c,Rd} = M _{pl,Rd}	3766.80 [kNm]
Fattore di sicurezza della sezione	FS	2.30 OK

Verifica strutturale per profilato soggetto a flessione e taglio:

Momento plastico nel piano dell'anima	W _{pl,y}	5570619.064 mm ³
Coefficiente di riduzione	ρ	0.0131 [-]
Resistenza di progetto	M _{y,v,Rd}	3760.39 [kNm]
Condizione M _{y,v,Rd} ≤ M _{y,c,Rd}	OK	
Fattore di sicurezza della sezione	FS	2.30 OK

Figura 22. Verifica di resistenza della trave di ripartizione (Tmax)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

VERIFICA DELLE TRAVI DI RIPARTIZIONE - NTC 2018

Dati del profilato:

Tipo di profilato	HEM	400
Altezza del profilato	h	432 mm
Base del profilato	b	307 mm
Spessore dell'anima	a = t _w	21 mm
Spessore delle ali	e = t _f	40 mm
Raggio di curvatura	r	27 mm
Area della sezione	A	32578 mm ²

Definizione dell'azione di calcolo:

Sforzo massimo agente	N _{Ed}	388.29 [kN/ml]
Interasse degli elementi di contrasto	i	8.2 [m]
Momento agente sul profilato	M _{Ed}	2610.86 [kNm]
Taglio agente sul profilato	V _{Ed}	1910.39 [kN]

Calcolo della resistenza di progetto a taglio:

Tipologia di acciaio	S	355 [MPa]
Coefficiente di sicurezza	γ _{MO}	1.05 [-]
Piano di carico del profilato	Carico nel piano dell'anima	
n° di profilati considerati	n°	2 [-]
Area a taglio del singolo profilato	Av	11017.77896 mm ²
Resistenza di progetto a taglio	R _{c,Rd}	4301.33 [kN]

Definizione della tipologia di verifica da condurre:

Taglio agente sul profilato	V _{Ed}	1910.39 [kN]
Resistenza di progetto a taglio	V _{c,Rd}	4301.33 [kN]
Rapporto V _{Ed} /V _{c,Rd}	V _{Ed} /V _{c,Rd}	0.44 [-]
Tipo di verifica	Flessione retta	


Verifica strutturale del profilato per flessione retta:

Momento plastico nel piano dell'anima	W _{pl,y}	5570619.064 mm ³
Resistenza di progetto	M _{c,Rd} = M _{pl,Rd}	3766.80 [kNm]
Fattore di sicurezza della sezione	FS	1.44 OK

Verifica strutturale per profilato soggetto a flessione e taglio:

Momento plastico nel piano dell'anima	W _{pl,y}	5570619.064 mm ³
Coefficiente di riduzione	ρ	0.0125 [-]
Resistenza di progetto	M _{y,v,Rd}	3760.70 [kNm]
Condizione M _{y,v,Rd} ≤ M _{y,c,Rd}	OK	
Fattore di sicurezza della sezione	FS	1.44 OK

Figura 23. Verifica di resistenza della trave di ripartizione (Mmax)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

8.8 Mobilitazione della spinta passiva

La verifica delle spinte a valle della paratia è condotta in accordo all'approccio 1, Combinazione 2 (A2+M2+R1) e in condizioni sismiche; per completezza sarà riportata la mobilitazione della resistenza passiva di valle anche in condizioni di esercizio.

Per soddisfare le verifiche deve risultare che la spinta mobilitata a valle (Spinta reale efficace), moltiplicata per il coefficiente $\gamma_F = 1.0$, sia inferiore alla resistenza del terreno (Massima spinta ammissibile) corrispondente alla spinta passiva divisa per il coefficiente di resistenza $\gamma_R = 1.0$.

La verifica allo stato limite di esercizio consente di valutare il livello di infissione da assegnare alla paratia; in particolare, è buona prassi progettuale mantenere la percentuale di spinta passiva mobilitata secondo tale combinazione di carico (SLE) al di sotto del 50%. Per tale ragione la verifica in tale condizione può ritenersi soddisfatta.

Le verifiche risultano ampiamente soddisfatte (per i valori numerici riferirsi a quanto riportato in Tabella 12).

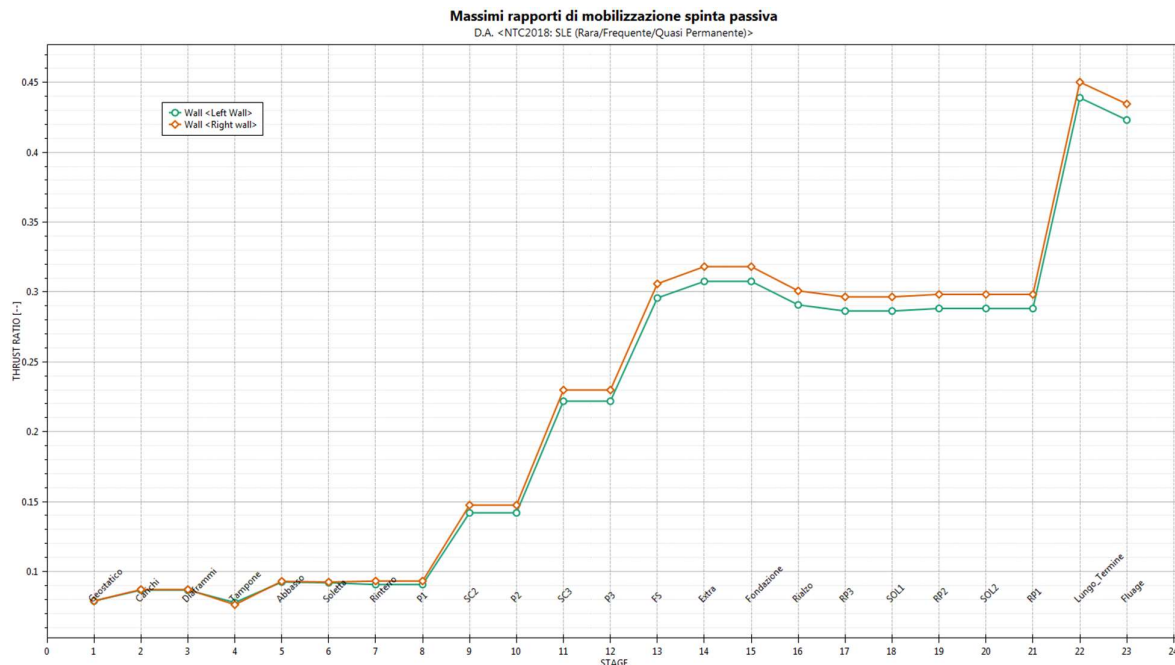


Figura 24. Resistenza passiva mobilitata in condizioni di stato limite di esercizio (SLE)

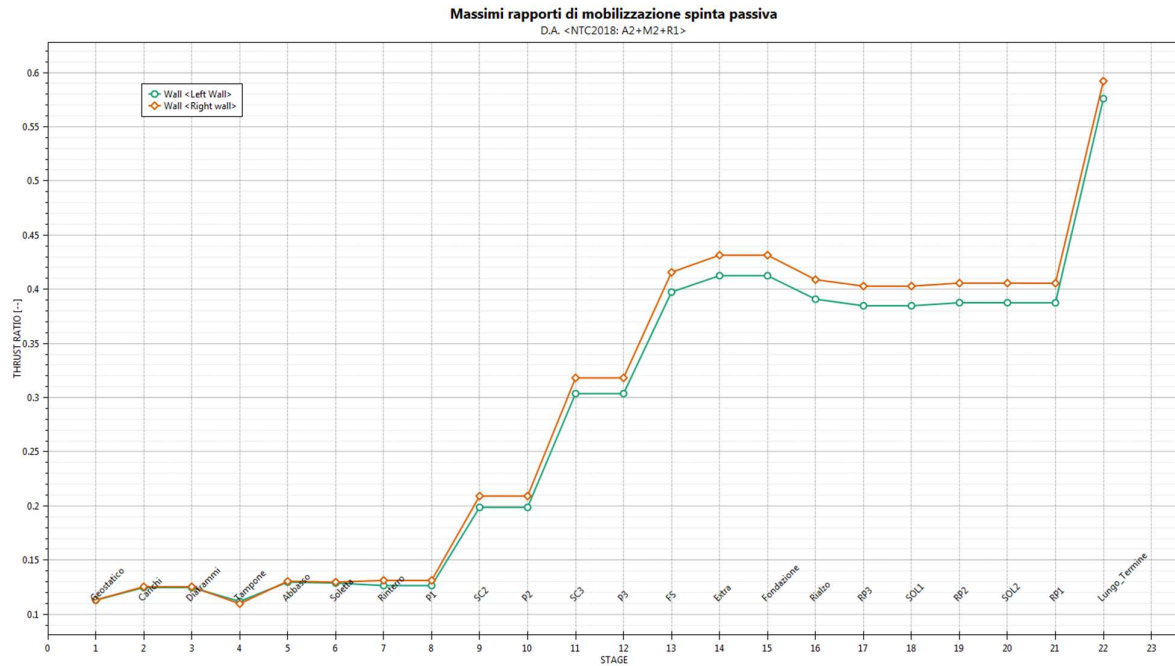


Figura 25. Resistenza passiva mobilitata in condizioni di stato limite ultimo (A2+M2)

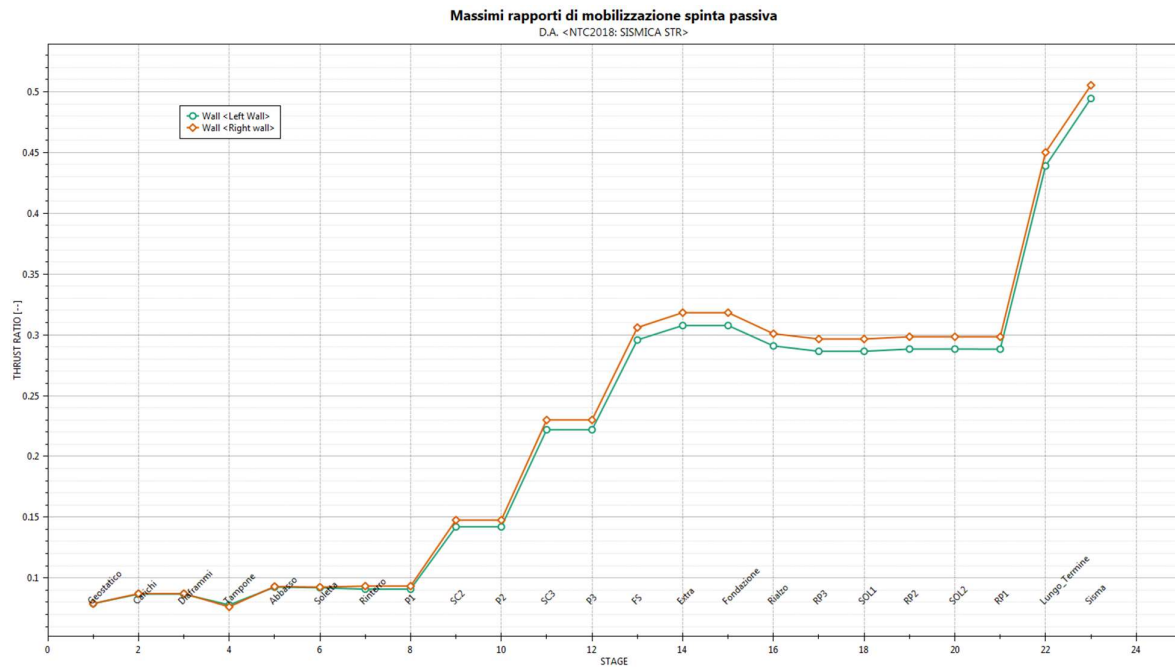



Figura 26. Resistenza passiva mobilitata in condizioni sismiche (SISMA)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

8.9 Analisi di stabilità

Nella seguente tabella si riportano i valori dei coefficienti di sicurezza minimi FS^{MIN} ottenuti a seguito delle analisi di stabilità in accordo a quanto riportato al §7.5 della presente relazione. In particolare, si riporta la verifica di stabilità per la condizione di carico più gravosa, pari a quella con il carico derivante dal traffico stradale.

Tabella 19. Risultati delle verifiche di stabilità globale

<i>Analisi</i>	<i>FS^{MIN} globale</i>
Condizioni statiche	7.090
Condizioni sismiche (k_v negativa)	5.989
Condizioni sismiche (k_v positiva)	6.223

Per la valutazione delle componenti orizzontale e verticale di tale forza si è fatto riferimento a quanto riportato al §7.5 della presente relazione; in particolare:

$$k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{max}}{g} \rightarrow 0.0306$$

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h \rightarrow \pm 0.0153$$


dove β_s rappresenta il coefficiente di riduzione dell'accelerazione sismica attesa nel sito di riferimento, il cui valore suggerito è pari a 0.38 per analisi allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV).

Essendo soddisfatte le relazioni:

$$FS^{MIN} \geq R2 = 1.1, \text{ in condizioni statiche;}$$

$$FS^{MIN} \geq R2 = 1.2, \text{ in condizioni sismiche;}$$

le analisi di stabilità globali risultano verificate.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dall'analisi di stabilità che mostrano le cinque superfici più critiche, ed evidenziano la superficie critica a cui è associato il coefficiente di sicurezza più basso.

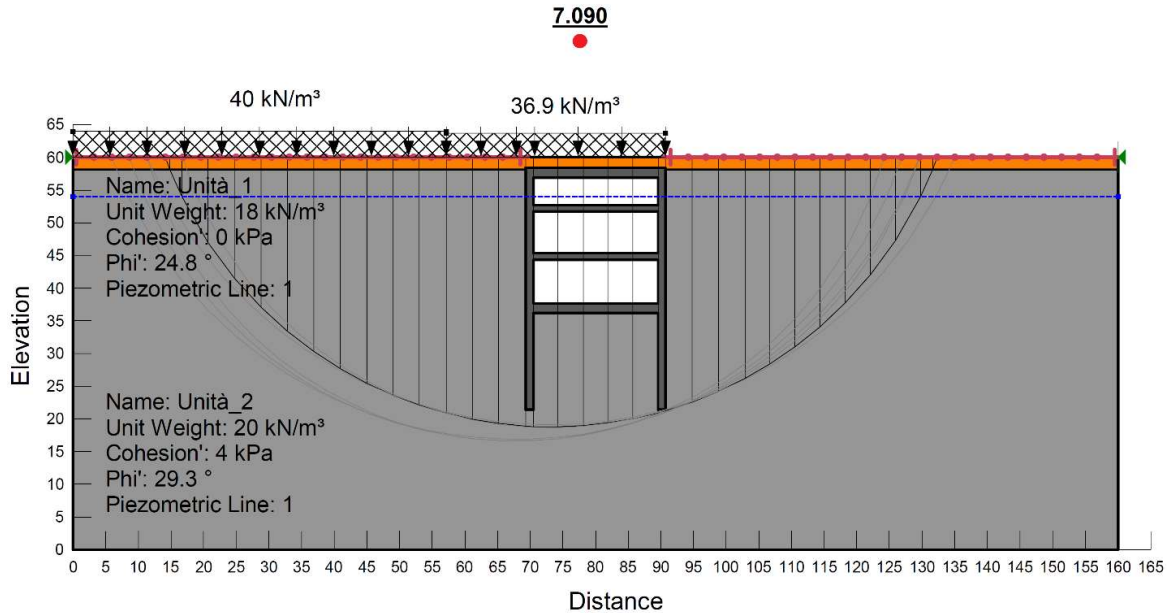


Figura 27.Verifica di stabilità globale in condizioni statiche

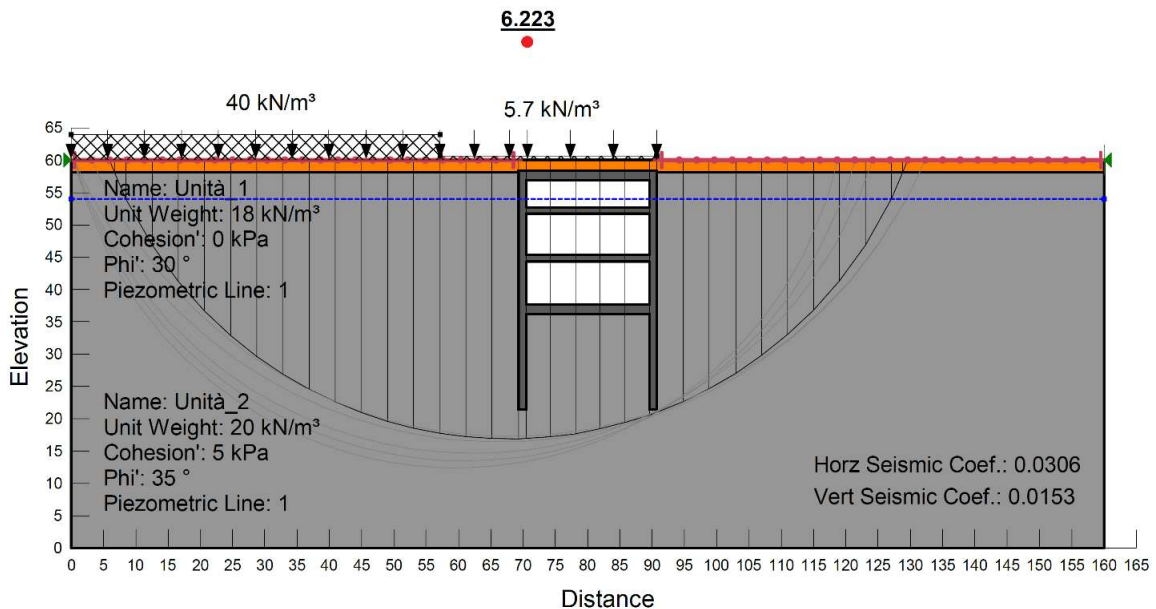



Figura 28.Verifica di stabilità globale in condizioni sismiche (kv positiva)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

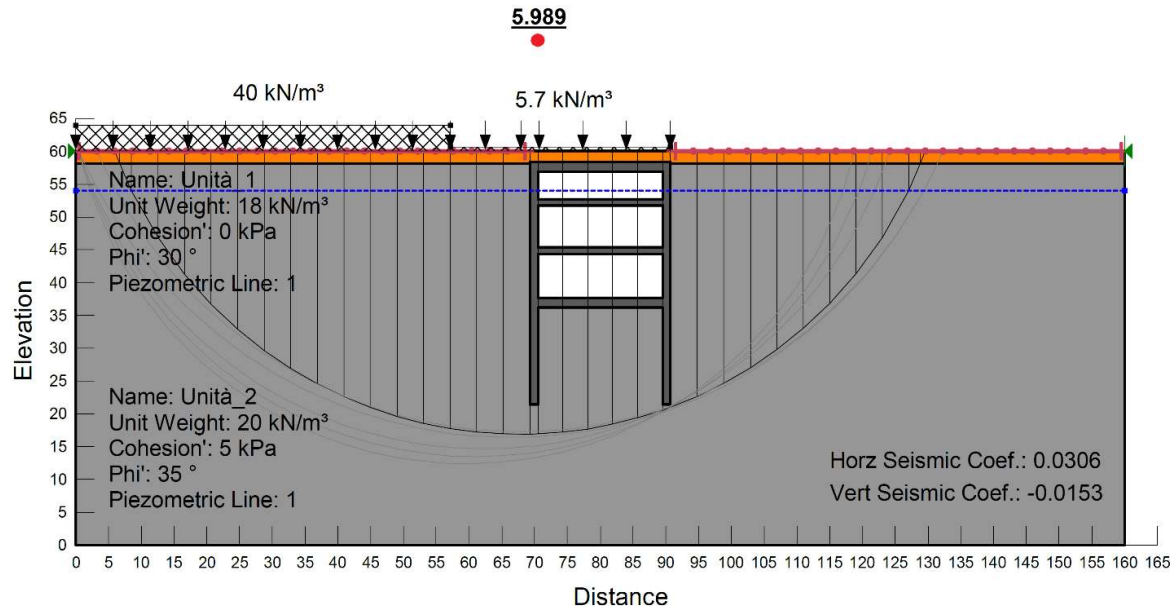


Figura 29.Verifica di stabilità globale in condizioni sismiche (kv negativa)

8.10 Verifica al galleggiamento (Breve termine)


Nel seguente paragrafo si riportano le verifiche al sollevamento della galleria artificiale nelle condizioni di breve termine. In particolare, a contrasto delle sotto spinte dell'acqua sarà realizzato un tappo di fondo in jet-grouting.

Nella verifica al sollevamento si tiene conto altresì dell'attrito che si sviluppo all'interfaccia tampone-diaframma. I parametri di resistenza all'interfaccia sono stati ottenuti riducendo la coesione e la tangente dell'angolo di attrito del 50% rispetto a quelli del grout:

$$c'_{jg-int,k} = 75 \text{ kPa}$$

$$\frac{1}{2}\phi'_{jg} \rightarrow \phi'_{jg-int,k} = 19.3^\circ$$

In accordo con la NTC i parametri caratteristici dovranno essere opportunamente ridotti come segue:

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

$$c'_{jg-int,d} = \frac{c'_{jg,k}}{1.25} = 60 \text{ kPa}$$

$$\tan \phi'_{jg-in,d} = \frac{\tan \phi'_{jg,k}}{1.25} \rightarrow \phi'_{jg-in,d} = 15.6^\circ$$

A favore di sicurezza, la tensione orizzontale (perpendicolare alla paratia) può essere valutata assumendo il coefficiente di spinta in quiete:

$$\sigma'_n = K_0 \cdot \sigma'_v$$

Il valore di K_0 è stato valutato in accordo con la formula di Jaky ($K_0 = 1 - \sin 15.6^\circ = 0.73$). La tensione verticale efficace è assunta uguale a quella totale (assunzione di tampone asciutto) con andamento lineare e crescente con la profondità. Data la distribuzione triangolare, il valore medio della tensione è quello calcolato a metà dello spessore del tampone.

$$\sigma'_n = \frac{\gamma \cdot L}{2} \cdot K_0$$

Considerare l'attrito porta ad effettuare ulteriori considerazioni in merito alla resistenza del tappo di fondo. Infatti, il tampone può essere schematizzato – nella peggiore delle ipotesi – come una trave semplicemente appoggiata alle due estremità, soggetta al carico idraulico alla base. La rottura del tampone di fondo è stata valutata in accordo con Modoni et al. (2016), imponendo l'equilibrio alla rotazione:

$$S_{w,d} = \gamma_{G1} \cdot \gamma_w \cdot (h_w + h_p) \cdot \frac{B^2}{8}$$

$$P_{tf} = \gamma_{G1} \cdot [\gamma_{soil} \cdot (h_p + h_{jg}) + \gamma_{jg} \cdot h_{jg}] \cdot \frac{B^2}{8}$$



Assumendo il meccanismo di rottura riportato nella figura seguente, il contributo resistente dato dal tappo di fondo può essere calcolato come segue:

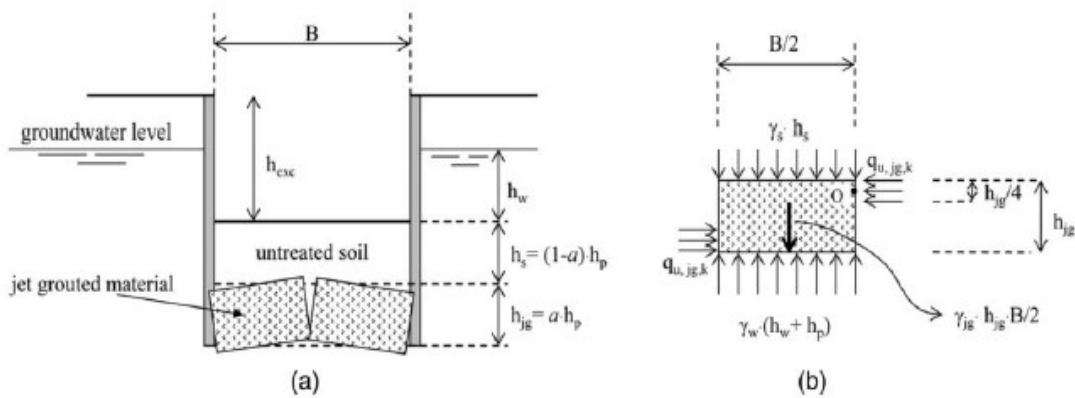


Figura 30. Meccanismo di rottura del tappo di fondo

$$R_d = \frac{3}{16} \cdot q_{u,jg,d} \cdot h_{jg}^2$$

dove $q_{u,jg,d}$ rappresenta la resistenza a compressione uniassiale di progetto del jet-grouting:

$$q_{u,jg,d} = \frac{q_{u,jg,k}}{1.25} \rightarrow q_{u,jg,k} = 2 \cdot c_{jg,k} \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi_{jg,k}}{1 - \sin \varphi_{jg,k}}}$$

Dove $c_{jg,k}$ e $\varphi_{jg,k}$ rappresentano i parametri di resistenza caratteristici del jet grouting.

Per questa verifica il tampone di fondo viene trattato come una componente strutturale e pertanto, in accordo con le NTC 2018 verranno utilizzati i coefficienti parziali (γ_{G1}) della colonna A1 (Tab. 2.6.I delle NTC 2018).



CITTA' DI TORINO

**Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta:
Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale
1 Rebaudengo-Bologna**

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Nel seguito si riporta la verifica al sollevamento a breve termine, tenendo conto di tutte le considerazioni sopra citate.

Progetto: **PROGETTO DEFINITIVO - METROPOLITANA AUTOMATICA DI TORINO - LINEA 2 - TRATTA REBAUDENGO-POLITECNICO**

Disciplina: **Geotecnica**

Oggetto: **GALLERIA ARTIFICIALE - GA4**

Attività: Verifica di stabilità e rottura del tampone di fondo a breve termine (NTC 2018)

Tratto: da pk 12+913,845 a pk 12+816,719

DATI DI INPUT

h_w	Altezza di falda da fondo scavo	4,7	m
$H_{w,tampone}$	Altezza di falda da base tampone	8,7	m
γ_w	Peso di volume acqua	9,81	kN/m3
H_{ef}	Altezza tampone di fondo	4	m
L_{ef}	Larghezza tampone di fondo	10,8	m
γ_{ef}	Peso di volume tampone di fondo	20	kN/m3
ϕ'_{ef}	Angolo di attrito tampone di fondo*	35	°
c'_{ef}	Coesione tampone di fondo**	150	kPa
$O_{red,1}$	Coefficiente riduttivo su ϕ'_{ef}	1	
$O_{red,tan}$	Coefficiente riduttivo su $\tan\phi'_d$	0,5	
$O_{red,c}$	Coefficiente riduttivo su c'_{ef}	0,5	
$\gamma_{M2,1}$	Coefficiente parziale sicurezza su $\tan\phi'_d$ (M2)	1,25	
$\gamma_{M2,c}$	Coefficiente parziale sicurezza su c'_{ef} (M2)	1,25	
$\beta_{\tan\phi'_d}$		0,28008302	
ϕ'_d	*Valore di calcolo	15,646657	°
ϕ'_d	*Valore di calcolo	0,27308568	rad
c'_d	**Valore di calcolo	60	kPa
σ_w	Pressione idrostatica alla base tampone	85,347	kPa
K_0	Coefficiente di spinta a riposo	0,73029595	
σ_v	Tensione verticale media	40	kPa
σ_n	Tensione normale alla paratia	29,2118379	kPa
τ	Tensione tangenziale sulla paratia	68,1817396	

INPUT
INTERMEDI
OUTPUT

VERIFICA DI STABILITA'

P_{ef}	Peso tampone di fondo	864,00	kN
R	Forza di attrito	545,453917	kN
S_w	Sottospinta idraulica	921,7476	kN
$\gamma_{G1,w}$	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	0,9	
$\gamma_{G1,w}$	Coefficienti amplificativi dei carichi (M2)	1	
γ_{inf}	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	1,1	
$S_{d,stab}$	Risultante delle forze stabilizzanti di calcolo	1323,05392	kN
$S_{d,instab}$	Risultante delle forze instabilizzanti di calcolo	1013,92236	kN
F_s	Fattore di sicurezza $S_{d,stab}/S_{d,instab}$	1,30488681	

VERIFICA DI ROTTURA

P_{ef}	Peso tampone di fondo	1166,400	kN
R	Forza di attrito	474,683688	kN
S_w	Sottospinta idraulica	1244,35926	kN
$\gamma_{G1,w}$	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	1	
$\gamma_{G1,w}$	Coefficienti amplificativi dei carichi (M2)	1	
γ_{inf}	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	1,3	
$S_{d,stab}$	Risultante delle forze stabilizzanti di calcolo	1641,084	kN
$S_{d,instab}$	Risultante delle forze instabilizzanti di calcolo	1617,66704	kN
F_s	Fattore di sicurezza $S_{d,stab}/S_{d,instab}$	1,01447557	



CITTA' DI TORINO

**Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta:
Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale
1 Rebaudengo-Bologna**

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Progetto: **PROGETTO DEFINITIVO - METROPOLITANA AUTOMATICA DI TORINO - LINEA 2 - TRATTA REBAUDENGO-POLITECNICO**
 Disciplina: **Geotecnica**
 Oggetto: **GALLERIA ARTIFICIALE - GA4**
 Attività: **Verifica di stabilità e rottura del tampone di fondo a breve termine (NTC 2018)**
 Tratto: **da pk 12+816,719 a pk 12+744,839**

DATI DI INPUT		
h_w	Altezza di falda da fondo scavo	7,2 m
$H_{w,tampone}$	Altezza di falda da base tampone	13,2 m
γ_w	Peso di volume acqua	9,81 kN/m ³
H_{tr}	Altezza tampone di fondo	6 m
L_{tr}	Larghezza tampone di fondo	10,9 m
γ_{tr}	Peso di volume tampone di fondo	20 kN/m ³
ϕ'_{tr}	Angolo di attrito tampone di fondo*	35 °
c'_{tr}	Coesione tampone di fondo**	150 kPa
$\alpha_{red, \phi}$	Coefficiente riduttivo su ϕ'_{tr}	1
$\alpha_{red, tan}$	Coefficiente riduttivo su $\tan \phi'_d$	0,5
$\alpha_{red, c}$	Coefficiente riduttivo su c'_{tr}	0,5
$\gamma_{M2, \phi}$	Coefficiente parziale sicurezza su $\tan \phi'_d$ (M2)	1,25
$\gamma_{M2, c}$	Coefficiente parziale sicurezza su c'_{tr} (M2)	1,25
$\beta \tan \phi'_d$		0,28008302
ϕ'_d	*Valore di calcolo	15,646657 °
ϕ''_d	*Valore di calcolo	0,27308568 rad
c''_d	**Valore di calcolo	60 kPa
σ_w	Pressione idrostatica alla base tampone	129,492 kPa
K_0	Coefficiente di spinta a riposo	0,73029595
σ_v	Tensione verticale media	60 kPa
σ_n	Tensione normale alla paratia	43,8177569 kPa
τ	Tensione tangenziale sulla paratia	72,2726095
VERIFICA DI STABILITA'		
P_{tr}	Peso tampone di fondo	1308,00 kN
R	Forza di attrito	867,271314 kN
S_w	Sottospinta idraulica	1411,4628 kN
$\gamma_{G1, w}$	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	0,9
$\gamma_{G1, w}$	Coefficienti amplificativi dei carichi (M2)	1
γ_{wef}	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	1,1
$S_{d,stab}$	Risultante delle forze stabilizzanti di calcolo	2044,47131 kN
$S_{d,instab}$	Risultante delle forze instabilizzanti di calcolo	1552,60908 kN
F_s	Fattore di sicurezza $S_{d,stab}/S_{d,instab}$	1,31679722
VERIFICA DI ROTTURA		
P_{tr}	Peso tampone di fondo	1782,150 kN
R	Forza di attrito	1068,0383 kN
S_w	Sottospinta idraulica	1923,11807 kN
$\gamma_{G1, w}$	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	1
$\gamma_{G1, w}$	Coefficienti amplificativi dei carichi (M2)	1
γ_{wef}	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	1,3
$S_{d,stab}$	Risultante delle forze stabilizzanti di calcolo	2850,188 kN
$S_{d,instab}$	Risultante delle forze instabilizzanti di calcolo	2500,05348 kN
F_s	Fattore di sicurezza $S_{d,stab}/S_{d,instab}$	1,14005093

INPUT
INTERMEDI
OUTPUT



CITTA' DI TORINO

**Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta:
Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale
1 Rebaudengo-Bologna**

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Progetto: **PROGETTO DEFINITIVO - METROPOLITANA AUTOMATICA DI TORINO - LINEA 2 - TRATTA REBAUDENGO-POLITECNICO**
 Disciplina: **Geotecnica**
 Oggetto: **GALLERIA ARTIFICIALE - GA4**
 Attività: **Verifica di stabilità e rottura del tampone di fondo a breve termine (NTC 2018)**
 Tratto: **da pk 12+744,839 a pk 12+640,974**

DATI DI INPUT		
h_w	Altezza di falda da fondo scavo	10,8 m
$H_{w,battente}$	Altezza di falda da base tampone	17,8 m
γ_w	Peso di volume acqua	9,81 kN/m ³
H_{tf}	Altezza tampone di fondo	7 m
L_{tf}	Larghezza tampone di fondo	10,2 m
γ_{tf}	Peso di volume tampone di fondo	20 kN/m ³
ϕ'_{tf}	Angolo di attrito tampone di fondo*	35 °
c'_{tf}	Coesione tampone di fondo**	150 kPa
$G_{red,tf}$	Coefficiente riduttivo su ϕ'_{tf}	1
$G_{red,tf}$	Coefficiente riduttivo su $\tan\phi'_g$	0,5
$G_{red,c}$	Coefficiente riduttivo su c'_{tf}	0,5
$\gamma_{M2,tf}$	Coefficiente parziale sicurezza su $\tan\phi'_g$ (M2)	1,25
$\gamma_{M2,c}$	Coefficiente parziale sicurezza su c'_{tf} (M2)	1,25
$\beta_{\tan\phi'_g}$		0,28008302
ϕ'_g	*Valore di calcolo	15,646657 °
ϕ'_g	*Valore di calcolo	0,27308568 rad
c'_g	**Valore di calcolo	60 kPa
G_w	Pressione idrostatica alla base tampone	174,618 kPa
K_0	Coefficiente di spinta a riposo	0,73029595
G_v	Tensione verticale media	70 kPa
G_n	Tensione normale alla paratia	51,1207164 kPa
τ	Tensione tangenziale sulla paratia	74,3180444
VERIFICA DI STABILITA'		
P_{tf}	Peso tampone di fondo	1428,00 kN
R	Forza di attrito	1040,45262 kN
S_w	Sottospinta idraulica	1781,1036 kN
$\gamma_{G1,sw}$	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	0,9
$\gamma_{G1,sw}$	Coefficienti amplificativi dei carichi (M2)	1
γ_{sw}	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	1,1
$S_{d,stab}$	Risultante delle forze stabilizzanti di calcolo	2325,65262 kN
$S_{d,instab}$	Risultante delle forze instabilizzanti di calcolo	1959,21396 kN
F_s	Fattore di sicurezza $S_{d,stab}/S_{d,instab}$	1,18703351
VERIFICA DI ROTTURA		
P_{tf}	Peso tampone di fondo	1820,700 kN
R	Forza di attrito	1453,7188 kN
S_w	Sottospinta idraulica	2270,90709 kN
$\gamma_{G1,sw}$	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	1
$\gamma_{G1,sw}$	Coefficienti amplificativi dei carichi (M2)	1
γ_{sw}	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	1,3
$S_{d,stab}$	Risultante delle forze stabilizzanti di calcolo	3274,419 kN
$S_{d,instab}$	Risultante delle forze instabilizzanti di calcolo	2952,17922 kN
F_s	Fattore di sicurezza $S_{d,stab}/S_{d,instab}$	1,10915312

INPUT
INTERMEDI
OUTPUT



CITTA' DI TORINO

**Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta:
Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale
1 Rebaudengo-Bologna**

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo


38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Progetto: **PROGETTO DEFINITIVO - METROPOLITANA AUTOMATICA DI TORINO - LINEA 2 - TRATTA REBAUDENGO-POLITECNICO**
 Disciplina: **Geotecnica**
 Oggetto: **GALLERIA ARTIFICIALE - GA4**
 Attività: **Verifica di stabilità e rottura del tampone di fondo a breve termine (NTC 2018)**
 Tratto: **da pk 12+640,974 a pk 12+556,285**

DATI DI INPUT		
H_{sp}	Altezza di falda da fondo scavo	13,4 m
$H_{w,tampone}$	Altezza di falda da base tampone	21,4 m
γ_w	Peso di volume acqua	9,81 kN/m3
H_{tf}	Altezza tampone di fondo	8 m
L_{tf}	Larghezza tampone di fondo	9 m
γ_{tf}	Peso di volume tampone di fondo	20 kN/m3
ϕ_{tf}^*	Angolo di attrito tampone di fondo*	35 °
c_{tf}^*	Coesione tampone di fondo**	150 kPa
$\alpha_{red,\phi}$	Coefficiente riduttivo su ϕ_{tf}^*	1
$\alpha_{red,tan}$	Coefficiente riduttivo su $\tan\phi_g^*$	0,5
$\alpha_{red,c}$	Coefficiente riduttivo su c_{tf}^*	0,5
$\gamma_{M2,\phi}$	Coefficiente parziale sicurezza su $\tan\phi_g^*$ (M2)	1,25
$\gamma_{M2,c}$	Coefficiente parziale sicurezza su c_{tf}^* (M2)	1,25
$\beta_{\tan\phi_g^*}$		0,28008302
ϕ_g^*	*Valore di calcolo	15,646657 °
ϕ_g^*	*Valore di calcolo	0,27308568 rad
c_g^*	**Valore di calcolo	60 kPa
G_w	Pressione idrostatica alla base tampone	209,934 kPa
K_0	Coefficiente di spinta a riposo	0,73029595
G_v	Tensione verticale media	80 kPa
G_n	Tensione normale alla paratia	58,4236758 kPa
T	Tensione tangenziale sulla paratia	76,3634793
VERIFICA DI STABILITA'		
P_{tf}	Peso tampone di fondo	1440,00 kN
R	Forza di attrito	1221,81567 kN
S_w	Sottospinta idraulica	1889,406 kN
$\gamma_{G,sev}$	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	0,9
$\gamma_{G,sw}$	Coefficienti amplificativi dei carichi (M2)	1
$\gamma_{G,vel}$	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	1,1
$S_{d,stab}$	Risultante delle forze stabilizzanti di calcolo	2517,81567 kN
$S_{d,instab}$	Risultante delle forze instabilizzanti di calcolo	2078,3466 kN
F_s	Fattore di sicurezza $S_{d,stab}/S_{d,instab}$	1,21145129
VERIFICA DI ROTTURA		
P_{tf}	Peso tampone di fondo	1620,000 kN
R	Forza di attrito	1898,73475 kN
S_w	Sottospinta idraulica	2125,58175 kN
$\gamma_{G,sev}$	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	1
$\gamma_{G,sw}$	Coefficienti amplificativi dei carichi (M2)	1
$\gamma_{G,vel}$	Coefficienti amplificativi dei carichi G1	1,3
$S_{d,stab}$	Risultante delle forze stabilizzanti di calcolo	3518,735 kN
$S_{d,instab}$	Risultante delle forze instabilizzanti di calcolo	2763,25628 kN
F_s	Fattore di sicurezza $S_{d,stab}/S_{d,instab}$	1,27340152

INPUT
INTERMEDI
OUTPUT

Figura 31.Verifica al sollevamento in condizioni di breve termine

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

8.11 Verifica al galleggiamento (Lungo termine)

Nel seguente paragrafo si riportano le verifiche al sollevamento della galleria artificiale nelle condizioni di lungo termine. In particolare, si effettua una verifica al galleggiamento globale della struttura e una verifica locale per individuare eventuali stati sollecitativi di trazione nei diaframmi a seguito dell'azione dell'acqua. Le quote riportate nel seguito sono tutte riferite al piano stradale (quota +0.00 m) e la falda di progetto a cui fare riferimento è quella di lungo termine posta a -6.00 m dal piano stradale.

La sotto spinta dell'acqua è data dalla somma dei seguenti contributi:

- Azione destabilizzante ai piedi dei diaframmi (-38.6 m):

$$p_{w,1} = (38.6 - 6.0) \cdot 9.81 \cdot 1.2 \cdot 2 = 767.5 \text{ kN/m}$$

- Azione destabilizzante ad estradosso della soletta di fondazione (-24.00 m):

$$p_{w,2} = (24.00 - 6.0) \cdot 9.81 \cdot 19.05 = 3363.8 \text{ kN/m}$$

Le azioni stabilizzanti sono date dalla somma dei seguenti contributi:

- Azione stabilizzante del terreno di riempimento (0.6 m di ricoprimento – cautelativamente il rinterro sarà considerato con 1 m di riduzione):

$$g_1 = 21.45 \cdot 18 \cdot 0.6 = 231.7 \text{ kN/m}$$

- Azione stabilizzante della soletta di copertura:

$$g_2 = 21.45 \cdot 25 \cdot 1.5 = 804.4 \text{ kN/m}$$

- Azione stabilizzante delle due solette intermedie:


$$g_3 = 19.05 \cdot 25 \cdot 1.0 \cdot 2 = 952.5 \text{ kN/m}$$

- Azione stabilizzante della soletta di fondazione:

$$g_4 = 19.05 \cdot 25 \cdot 1.5 = 714.4 \text{ kN/m}$$

- Azione stabilizzante delle contro-pareti:

$$g_5 = (4.17 + 6.42 + 6.65) \cdot 25 \cdot 0.5 \cdot 2 = 431.0 \text{ kN/m}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

- Azione stabilizzante dei diaframmi:

$$g_6 = 35.5 \cdot 25 \cdot 1.2 \cdot 2 = 2130.0 \text{ kN/m}$$

Il fattore di sicurezza al sollevamento globale della struttura (allo SLU) è pertanto:


$$FS = \frac{(g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5 + g_6) \cdot 0.9}{(p_{w,1} + p_{w,2}) \cdot 1.1} = \frac{5264.0 \cdot 0.9}{4131.3 \cdot 1.1} = 1.04$$

Infine, è necessario valutare l'eventualità che la sotto spinta dell'acqua agente ad estradosso del solettone di fondo non generi un sollevamento dei diaframmi; tale contributo, infatti, potrebbe generare degli stati sollecitativi di trazione nei diaframmi a seguito dell'incastro tra soletta di copertura e diaframmi stessi. Per effettuare tale valutazione bisogna semplicemente escludere dalla precedente verifica il contributo dato dal peso dei diaframmi e dalla spinta dell'acqua agente al piede degli stessi.

$$FS = \frac{(g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5) \cdot 0.9}{p_{w,2} \cdot 1.1} = \frac{3134.0 \cdot 0.9}{3363.8 \cdot 1.1} = 0.76$$

La verifica al galleggiamento globale risulta soddisfatta, mentre la verifica locale individua uno stato sollecitativo di trazione nel singolo diaframma pari a:

$$T_{\text{diaframma}} = \frac{3700.2 - 2820.6}{2} = 439.8 \text{ kN/m}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3


8.12 Verifica di capacità portante

Si riporta ne seguente paragrafo la verifica di capacità portante condotta in accordo alle normative vigenti (combinazione A1+M1+R3). Per la verifica si terrà in considerazione – a favore di sicurezza – la sola parte di diaframma infissa al di sotto della quota di fondo scavo e la quota della falda considerata in condizione di lungo termine.

Nella seguente tabella si riportano i valori di capacità portante al variare della profondità del singolo diaframma. In accordo alle NTC18, sono stati impiegati i coefficienti di sicurezza parziali γ_{R3} (1.15 per la resistenza laterale, 1.35 per la capacità portante di base e 1.3 per il peso proprio del diaframma) e il fattore di correlazione ξ per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali indagate (cautelativamente pari a 1.70 – valore corrispondente ad una sola verticale indagata).

Tabella 20.Valori di capacità portante al variare della profondità (AGI, 1984)

Combinazione SLU A1+M1+R3 (metodo AGI, 1984)						
$L_{infissa}$	$Q_{l,k}$	$Q_{b,k}$	$Q_{l,d}$	$Q_{b,d}$	ΔW	$Q_{t,d}$
m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m
1.0	271.8	5160.0	139.0	2248.4	39.0	2348.4
2.0	552.9	5160.0	282.8	2248.4	78.0	2453.2
3.0	843.2	5160.0	431.3	2248.4	117.0	2562.7
4.0	1142.7	5160.0	584.5	2248.4	156.0	2676.9
5.0	1451.5	5160.0	742.5	2248.4	195.0	2795.8
6.0	1769.6	5160.0	905.1	2248.4	234.0	2919.5
7.0	2096.8	5160.0	1072.6	2248.4	273.0	3047.9
8.0	2433.4	5160.0	1244.7	2248.4	312.0	3181.1
9.0	2779.1	5160.0	1421.5	2248.4	351.0	3318.9
10.0	3134.1	5160.0	1603.1	2248.4	390.0	3461.5
11.0	3498.4	5160.0	1789.5	2248.4	429.0	3608.8
12.0	3871.9	5160.0	1980.5	2248.4	468.0	3760.9
13.0	4254.6	5160.0	2176.3	2248.4	507.0	3917.6
14.0	4646.6	5160.0	2376.8	2248.4	546.0	4079.1

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Il valore di capacità portante allo SLU così determinato risulta – ad una profondità di infissione del diaframma pari a circa 14 m – pari a circa 4079.1 kN/m.

L'azione sollecitante risulterà pari al valore del taglio agente sulla soletta in corrispondenza dell'incastro con il diaframma stesso, a cui si sommerà il contributo di tutti i pesi agenti al di sopra della parte infissa.

Come rappresentato nella figura seguente, l'azione agente massima allo SLU risulta pari a 1224.60 kN/m.

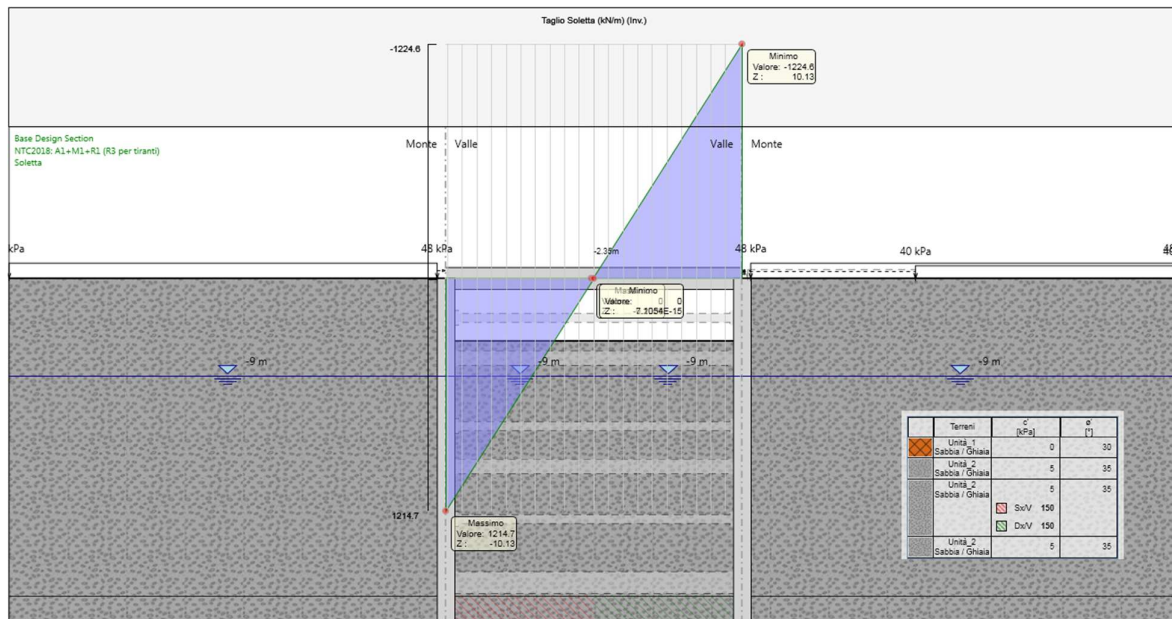


Figura 32. Taglio massimo agente sulla soletta di copertura (A1+M1+R3)


Per la valutazione dell'azione sollecitante bisogna prendere in considerazione i seguenti carichi:

- Azione delle due solette intermedie:

$$g_3 = (19.05 \cdot 25 \cdot 1.0 \cdot 2) / 2 = 476.3 \text{ kN/m}$$

- Azione della soletta di fondazione:

$$g_4 = (19.05 \cdot 25 \cdot 1.5) / 2 = 357.2 \text{ kN/m}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

- Azione delle contro-pareti:

$$g_5 = (4.17 + 6.42 + 6.65) \cdot 25 \cdot 0.5 = 215.5 \text{ kN/m}$$

- Azione del diaframma (fino alla quota di -24.00 m rispetto alla quota stradale):

$$g_6 = 20.9 \cdot 25 \cdot 1.2 = 627.0 \text{ kN/m}$$

- Azione dell'acqua ai piedi dei diaframmi (-38.6 m):

$$p_{w,1} = (38.6 - 6.0) \cdot 9.81 \cdot 1.2 = 383.8 \text{ kN/m}$$

- Azione dell'acqua ad estradosso della soletta di fondazione (-24.00 m):

$$p_{w,2} = [(24.00 - 6.0) \cdot 9.81 \cdot 19.05]/2 = 1681.9 \text{ kN/m}$$

La risultante dei carichi sarà dunque:

$$\begin{aligned}
P_t &= (g_3 + g_4 + g_5 + g_6) \cdot 1.3 - (p_{w,1} + p_{w,2}) \cdot 1.0 + P_{t,Paratie Plus} = \\
&= (476.3 + 357.2 + 215.5 + 627.0) \cdot 1.3 - (383.8 + 1681.9) \cdot 1.0 + 1224.6 = \\
&= 113.1 + 1224.6 = 895.5 \text{ kN/m}
\end{aligned}$$

Il peso del terreno di ricoprimento, della soletta e dei carichi accidentali in superficie sono stati esclusi in quanto già presenti nella valutazione del codice Paratie Plus.

La verifica di capacità portante risulta soddisfatta con un fattore di sicurezza allo SLU pari a:

$$FS = \frac{Q_t}{P_t} = \frac{4079.1}{1337.7} = 3.05$$



9. DIMENSIONAMENTO E VERIFICHE DELLE BERLINESI PROVISIONALI

Nel seguente capitolo saranno riportate le analisi numeriche e le rispettive verifiche di sicurezza eseguite per le berlinesi provvisionali in micropali da realizzarsi a sostegno degli scavi da eseguire lungo tutta la tratta per raggiungere la quota di imposta dei diaframmi al fine della loro stessa esecuzione.

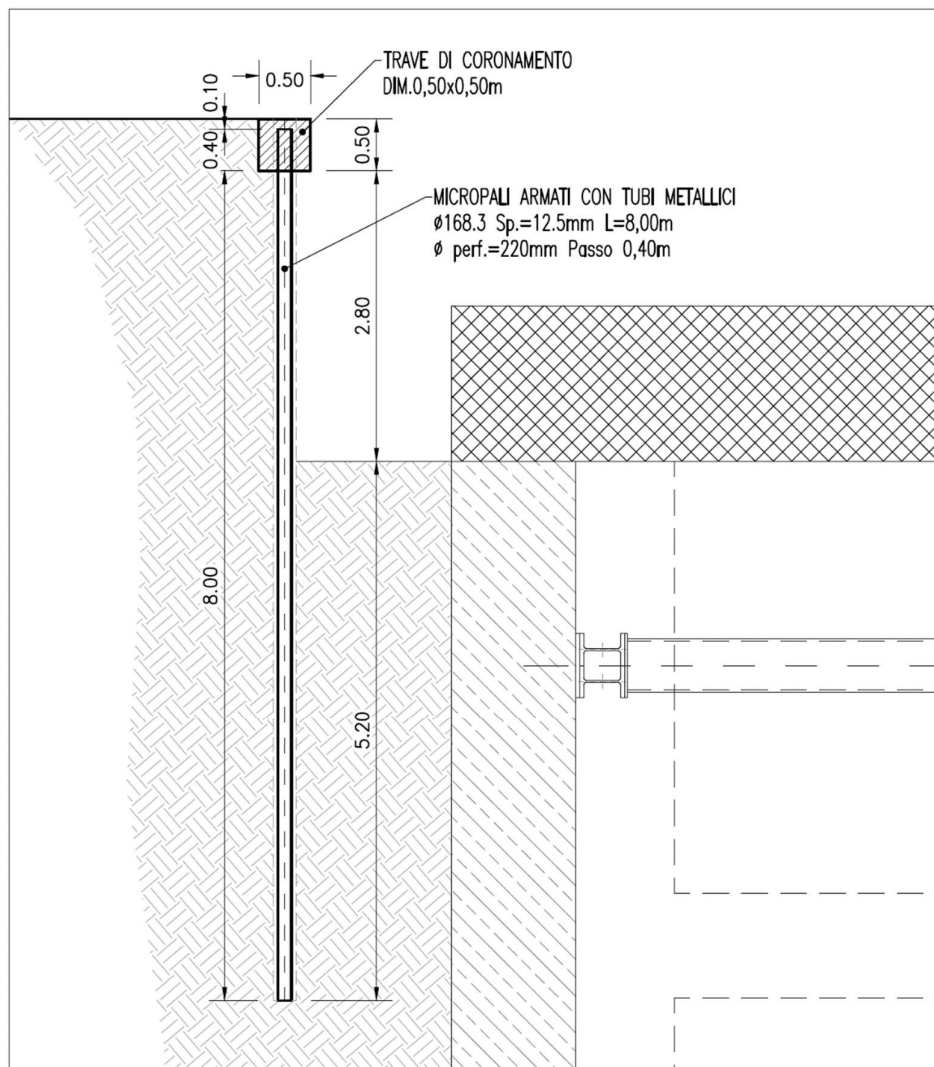



Figura 33. Rappresentazione grafica della berlinese oggetto di studio

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3


9.1 Fasi di calcolo

Le fasi di calcolo impiegati per l'analisi numerica sono di seguito sintetizzate:

- **Fase 1:** condizione geostatica (3.60 m di terreno superficiale sovrastante l'unità 2 principale e quota falda a -9.00 m da quota stradale – falda di progetto a breve termine);
- **Fase 2:** applicazione carico relativo alla preesistenza BOCI16 (carico permanente pari a 40 kPa; per l'ubicazione e le caratteristiche del fabbricato si veda la cartella 4.6 – Indagini sui fabbricati);
- **Fase 3:** realizzazione berlinese di micropali;
- **Fase 4:** esecuzione dello scavo fino alla quota di -1.0 m dal piano stradale;
- **Fase 5:** esecuzione dello scavo fino alla quota di -2.0 m dal piano stradale;
- **Fase 6:** esecuzione dello scavo fino alla quota di -3.0 m dal piano stradale;
- **Fase 7:** esecuzione dello scavo fino alla quota di -3.3 m dal piano stradale (fondo scavo di progetto);
- **Fase 8:** esecuzione dello scavo fino alla quota di -3.63 m dal piano stradale (scavo effettivo e 33 cm di extra scavo come imposto dalle NTC 2018 al §6.5.2.2).

Per la rappresentazione delle fasi di calcolo, riferirsi all'Allegato 2 al §18 della presente relazione tecnica e di calcolo.

L'analisi in condizioni sismiche per la sezione in esame è omessa in quanto trattasi di opera di tipo provvisoria con vita nominale inferiore ai 2 anni.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

9.2 Risultati di calcolo

Nella seguente tabella sono sintetizzati i principali risultati di calcolo relativi al dimensionamento della berlinese di sostegno provvisoria (si riportano a seguire i relativi plot grafici).

Tabella 21. Sintesi risultati di calcolo principali (berlinese provvisoria)

Combinazione	Momento	Taglio	Spostamenti	Spinta passiva mobilizzata
	[kNm/m]	[kN/m]	[mm]	[%]
SLE	-	-	52.0	17.4
A1+M1+R1	88.06	51.01	-	-
A2+M2+R1	96.85	48.67	-	27.9

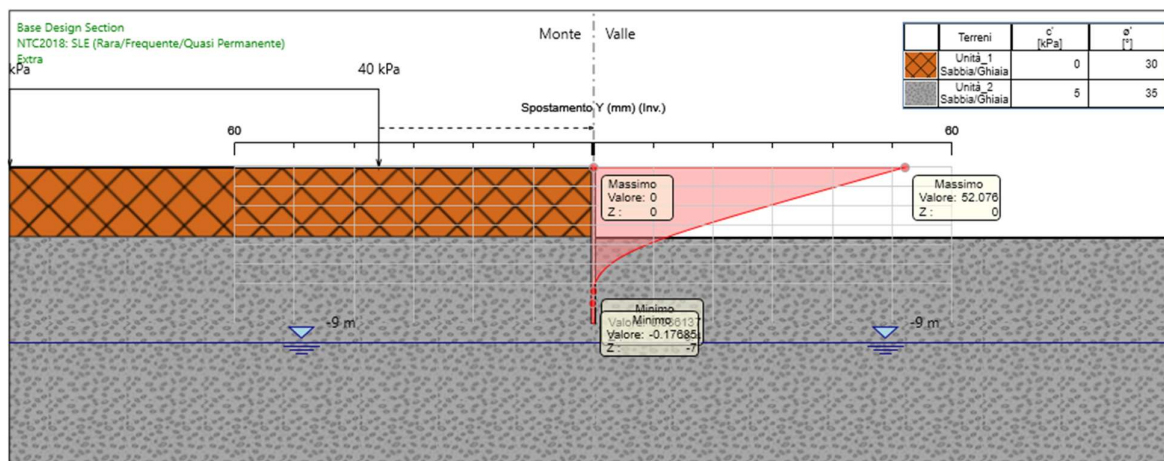


Figura 34. Involuppo degli spostamenti sulla berlinese provvisoria (SLE)



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

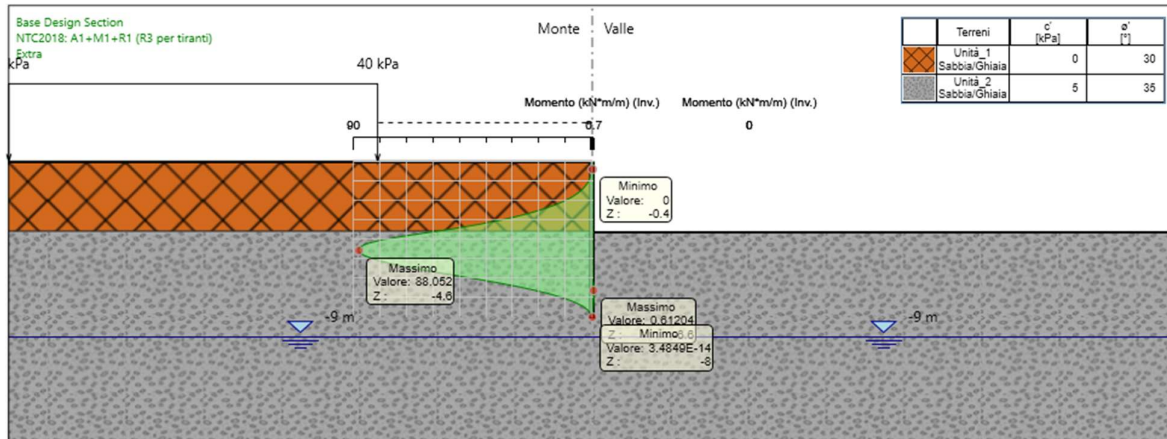


Figura 35. Involuppo dei momenti flettenti sulla berlinese provvisoriale (A1+M1+R1)

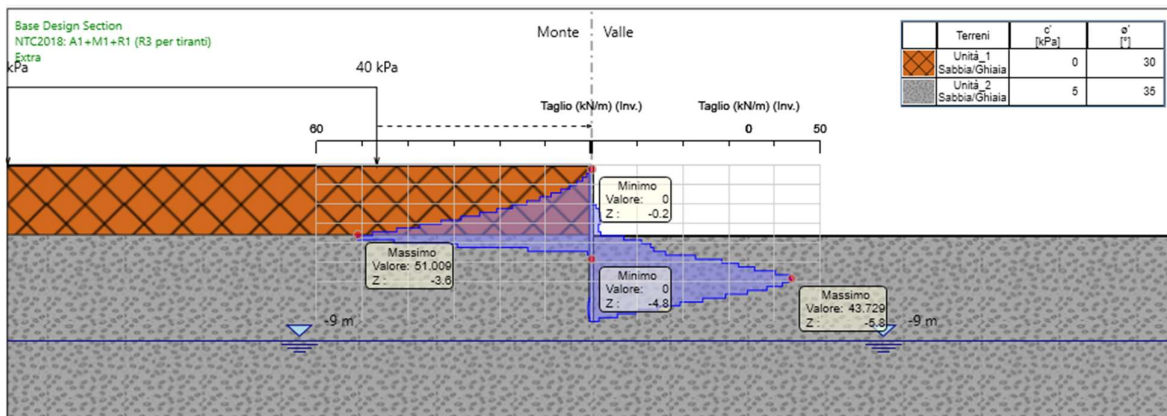


Figura 36. Involuppo del taglio sulla berlinese provvisoriale (A1+M1+R1)



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

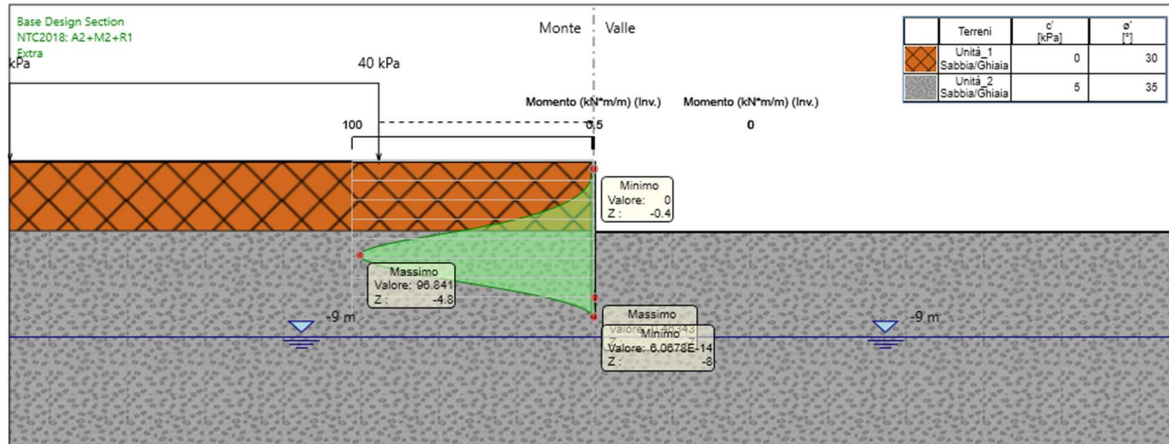


Figura 37. Involuppo dei momenti flettenti sulla berlinese provvisoriale (A2+M2+R1)

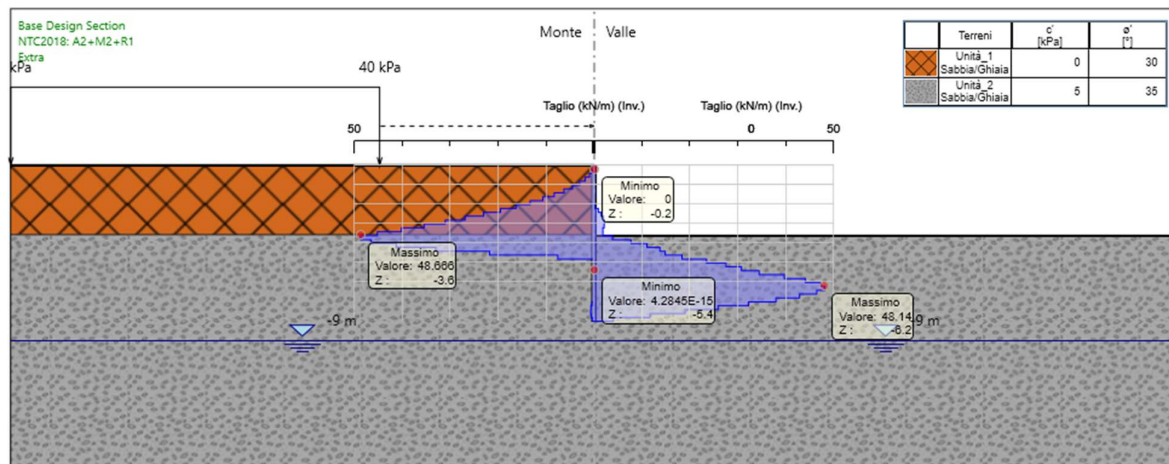



Figura 38. Involuppo del taglio sulla berlinese provvisoriale (A2+M2+R1)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

9.3 Verifica strutturale micropalo


La berlinese è realizzata mediante micropali aventi tubolari in acciaio di diametro pari a $\Phi 168.3$ spessore 12.5 mm, diametro di perforazione 0.22 m, interasse tra i micropali di 0.40 m e lunghezza pari a 8 m.

Di seguito si riporta la verifica strutturale relativa all'acciaio in quanto, a favore di sicurezza, si ipotizza che l'effetto del calcestruzzo non intervenga in termini di resistenza globale del sistema.

Sulla base delle sollecitazioni che insorgono lungo il fusto del micropalo (vedi i risultati riportati nel paragrafo precedente), si riportano di seguito le verifiche del tubolare in acciaio per le combinazioni di carico A1+M1+R1 e A2+M2+R1.

LINEA 2 METRO TORINO <u>MICROPALI DI SOSTEGNO PROVVISORIALI</u> <i>Calcolo della resistenza strutturale del tubolare</i>		<u>CLASSIFICAZIONE DELLA SEZIONE (Tab. 4.2.V - NTC 2018)</u>	
		tensione di snervamento no	ϵ 0.81 [-]
			ϵ^2 0.66 [-]
		rapporto diametro/spessore	d/t 13.5 [-]
		classe della sezione	CLASSE 1
		<u>SOLLECITAZIONI AGENTI:</u>	
		momento flettente di calcolo	M_{Ed} 88.06 [kNm/ml]
		taglio di calcolo	T_{Ed} 51.01 [kN/ml]
		sforzo normale di calcolo	N_{Ed} 0.00 [kN/ml]
		interasse tubolari	i 0.40 [m]
		momento flettente agente	M_{Ed} 35.22 [kNm]
		taglio agente	T_{Ed} 20.40 [kN]
		sforzo normale agente	N_{Ed} 0 [kN]
		<u>VERIFICA DELLA SEZIONE IN CAMPO ELASTICO:</u>	
		tensione normale	$\sigma_{x,Ed}$ 158.6 [MPa]
		tensione tangenziale	τ_{Ed} 6.6 [MPa]
		sigma ideale	σ_{id} 159.1 [MPa]
		fattore di sicurezza	FS 2.1 VERIFICATO
<u>DATI GEOMETRICI:</u>			
diametro esterno del tubolare	d	168.3 [mm]	
spessore del tubolare	t	12.5 [mm]	
diametro interno del tubolare	d_{int}	143.3 [mm]	
area della sezione del tubolare	A	6118.3 [mm ²]	
momento inerzia tubolare	I	1868.4 [cm ⁴]	
modulo resistenza elastico	W_{el}	222.0 [cm ³]	
momento statico di metà sezione	$S_{A/2}$	152.0 [cm ³]	
tipologia di acciaio	S	355 [MPa]	
coefficiente di sicurezza	γ_{MO}	1.05 [-]	
tensione di snervamento di progett	f_{yd}	338.1 [MPa]	

Figura 39.Verifica strutturale del tubolare in acciaio (A1+M1+R1)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

<p>LINEA 2 METRO TORINO</p> <p><u>MICROPALI DI SOSTEGNO PROVVISORIALI</u></p> <p><u>Calcolo della resistenza strutturale del tubolare</u></p>	<p>CLASSIFICAZIONE DELLA SEZIONE (Tab. 4.2.V - NTC 2018)</p> <table border="0"> <tr> <td>tensione di snervamento no</td> <td>ϵ</td> <td>0.81</td> <td>[-]</td> </tr> <tr> <td></td> <td>ϵ^2</td> <td>0.66</td> <td>[-]</td> </tr> <tr> <td>rapporto diametro/spessore</td> <td>d/t</td> <td>13.5</td> <td>[-]</td> </tr> <tr> <td>classe della sezione</td> <td>CLASSE</td> <td>1</td> <td></td> </tr> </table> <p>SOLLECITAZIONI AGENTI:</p> <table border="0"> <tr> <td>momento flettente di calcolo</td> <td>M_{Ed}</td> <td>96.85</td> <td>[kNm/ml]</td> </tr> <tr> <td>taglio di calcolo</td> <td>T_{Ed}</td> <td>48.67</td> <td>[kN/ml]</td> </tr> <tr> <td>sforzo normale di calcolo</td> <td>N_{Ed}</td> <td>0.00</td> <td>[kN/ml]</td> </tr> <tr> <td>interasse tubolari</td> <td>i</td> <td>0.40</td> <td>[m]</td> </tr> <tr> <td>momento flettente agente</td> <td>M_{Ed}</td> <td>38.74</td> <td>[kNm]</td> </tr> <tr> <td>taglio agente</td> <td>T_{Ed}</td> <td>19.47</td> <td>[kN]</td> </tr> <tr> <td>sforzo normale agente</td> <td>N_{Ed}</td> <td>0</td> <td>[kN]</td> </tr> </table> <p>VERIFICA DELLA SEZIONE IN CAMPO PLASTICO:</p> <table border="0"> <tr> <td>tensione normale</td> <td>$\sigma_{x,Ed}$</td> <td>127.4</td> <td>[MPa]</td> </tr> <tr> <td>tensione tangenziale</td> <td>τ_{Ed}</td> <td>6.3</td> <td>[MPa]</td> </tr> <tr> <td>sigma ideale</td> <td>σ_{id}</td> <td>127.9</td> <td>[MPa]</td> </tr> <tr> <td>fattore di sicurezza</td> <td>FS</td> <td>2.6</td> <td style="background-color: #e0ffe0;">VERIFICATO</td> </tr> </table>	tensione di snervamento no	ϵ	0.81	[-]		ϵ^2	0.66	[-]	rapporto diametro/spessore	d/t	13.5	[-]	classe della sezione	CLASSE	1		momento flettente di calcolo	M_{Ed}	96.85	[kNm/ml]	taglio di calcolo	T_{Ed}	48.67	[kN/ml]	sforzo normale di calcolo	N_{Ed}	0.00	[kN/ml]	interasse tubolari	i	0.40	[m]	momento flettente agente	M_{Ed}	38.74	[kNm]	taglio agente	T_{Ed}	19.47	[kN]	sforzo normale agente	N_{Ed}	0	[kN]	tensione normale	$\sigma_{x,Ed}$	127.4	[MPa]	tensione tangenziale	τ_{Ed}	6.3	[MPa]	sigma ideale	σ_{id}	127.9	[MPa]	fattore di sicurezza	FS	2.6	VERIFICATO
tensione di snervamento no	ϵ	0.81	[-]																																																										
	ϵ^2	0.66	[-]																																																										
rapporto diametro/spessore	d/t	13.5	[-]																																																										
classe della sezione	CLASSE	1																																																											
momento flettente di calcolo	M_{Ed}	96.85	[kNm/ml]																																																										
taglio di calcolo	T_{Ed}	48.67	[kN/ml]																																																										
sforzo normale di calcolo	N_{Ed}	0.00	[kN/ml]																																																										
interasse tubolari	i	0.40	[m]																																																										
momento flettente agente	M_{Ed}	38.74	[kNm]																																																										
taglio agente	T_{Ed}	19.47	[kN]																																																										
sforzo normale agente	N_{Ed}	0	[kN]																																																										
tensione normale	$\sigma_{x,Ed}$	127.4	[MPa]																																																										
tensione tangenziale	τ_{Ed}	6.3	[MPa]																																																										
sigma ideale	σ_{id}	127.9	[MPa]																																																										
fattore di sicurezza	FS	2.6	VERIFICATO																																																										
<p>DATI GEOMETRICI:</p> <table border="0"> <tr> <td>diametro esterno del tubolare</td> <td>d</td> <td>168.3</td> <td>[mm]</td> </tr> <tr> <td>spessore del tubolare</td> <td>t</td> <td>12.5</td> <td>[mm]</td> </tr> <tr> <td>diametro interno del tubolare</td> <td>d_{int}</td> <td>143.3</td> <td>[mm]</td> </tr> <tr> <td>area della sezione del tubolare</td> <td>A</td> <td>6118.3</td> <td>[mm²]</td> </tr> <tr> <td>momento inerzia tubolare</td> <td>I</td> <td>1868.4</td> <td>[cm⁴]</td> </tr> <tr> <td>modulo resistenza plastico</td> <td>W_{pl}</td> <td>304.0</td> <td>[cm³]</td> </tr> <tr> <td>momento statico di metà sezione</td> <td>$S_{A/2}$</td> <td>152.0</td> <td>[cm³]</td> </tr> </table> <table border="0"> <tr> <td>tipologia di acciaio</td> <td>S</td> <td>355</td> <td>[MPa]</td> </tr> <tr> <td>coefficiente di sicurezza</td> <td>γ_{MO}</td> <td>1.05</td> <td>[-]</td> </tr> <tr> <td>tensione di snervamento di progett</td> <td>f_{yd}</td> <td>338.1</td> <td>[MPa]</td> </tr> </table>	diametro esterno del tubolare	d	168.3	[mm]	spessore del tubolare	t	12.5	[mm]	diametro interno del tubolare	d_{int}	143.3	[mm]	area della sezione del tubolare	A	6118.3	[mm ²]	momento inerzia tubolare	I	1868.4	[cm ⁴]	modulo resistenza plastico	W_{pl}	304.0	[cm ³]	momento statico di metà sezione	$S_{A/2}$	152.0	[cm ³]	tipologia di acciaio	S	355	[MPa]	coefficiente di sicurezza	γ_{MO}	1.05	[-]	tensione di snervamento di progett	f_{yd}	338.1	[MPa]																					
diametro esterno del tubolare	d	168.3	[mm]																																																										
spessore del tubolare	t	12.5	[mm]																																																										
diametro interno del tubolare	d_{int}	143.3	[mm]																																																										
area della sezione del tubolare	A	6118.3	[mm ²]																																																										
momento inerzia tubolare	I	1868.4	[cm ⁴]																																																										
modulo resistenza plastico	W_{pl}	304.0	[cm ³]																																																										
momento statico di metà sezione	$S_{A/2}$	152.0	[cm ³]																																																										
tipologia di acciaio	S	355	[MPa]																																																										
coefficiente di sicurezza	γ_{MO}	1.05	[-]																																																										
tensione di snervamento di progett	f_{yd}	338.1	[MPa]																																																										

Figura 40.Verifica strutturale del tubolare in acciaio (A2+M2+R1)

9.4 Mobilitazione della spinta passiva

La verifica delle spinte a valle della berlinese è stata condotta in accordo all'approccio 1, Combinazione 2 (A2+M2+R1); per completezza sarà riportata la mobilitazione della resistenza passiva di valle anche in condizioni di esercizio.

Per soddisfare le verifiche deve risultare che la spinta mobilitata a valle (Spinta reale efficace), moltiplicata per il coefficiente $\gamma_F = 1.0$, sia inferiore alla resistenza del terreno (Massima spinta ammissibile) corrispondente alla spinta passiva divisa per il coefficiente di resistenza $\gamma_R = 1.0$.

Le verifiche risultano ampiamente soddisfatte.



Massimi rapporti di mobilitazione spinta passiva

D.A. <NTC2018: SLE (Rara/Frequente/Quasi Permanente)>

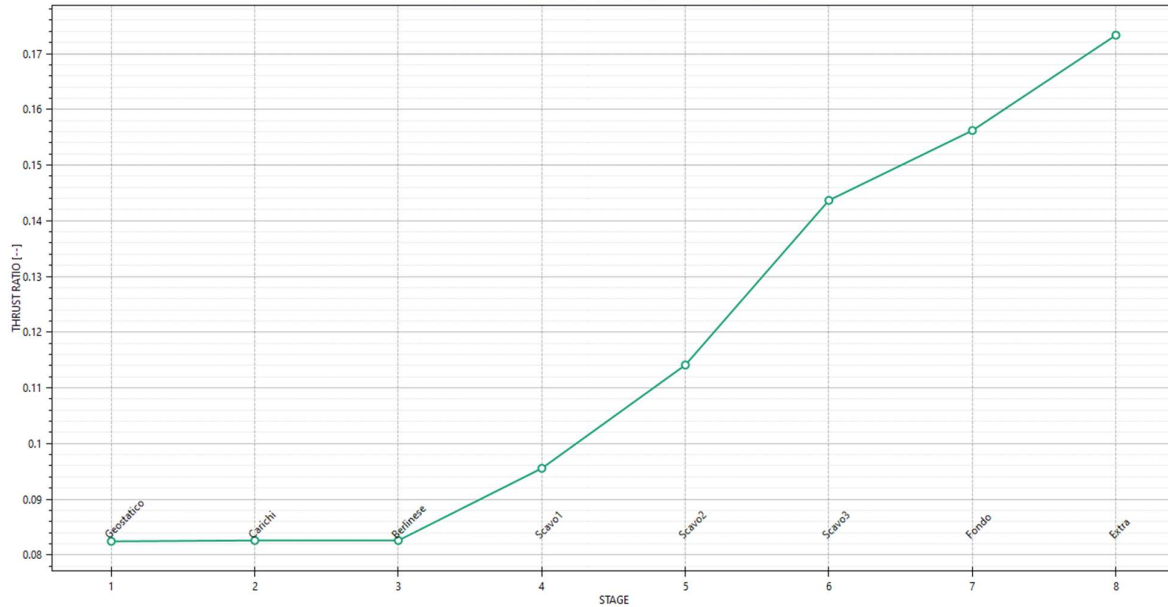


Figura 41. Resistenza passiva mobilitata in condizioni di esercizio (SLE)

Massimi rapporti di mobilitazione spinta passiva

D.A. <NTC2018: A2+M2+R1>

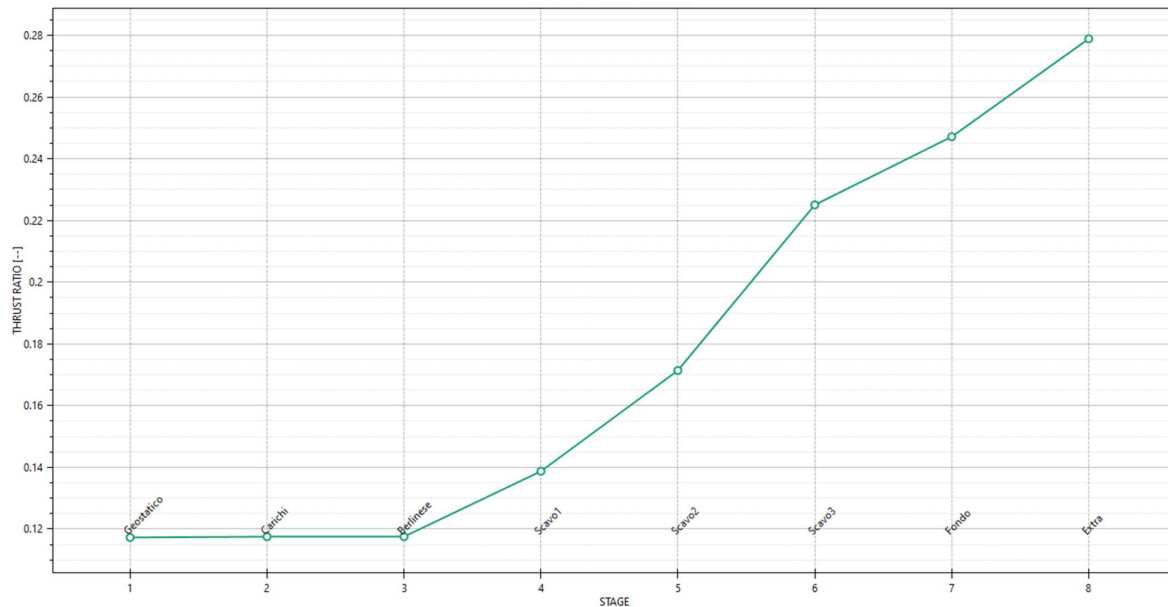



Figura 42. Resistenza passiva mobilitata in condizioni di stato limite ultimo (A2+M2+R1)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

9.5 Verifica di stabilità globale

In Tabella 22 si riportano i valori dei coefficienti di sicurezza minimi FS^{MIN} ottenuti a seguito delle analisi di stabilità in accordo a quanto riportato al §7.5 della presente relazione.

Tabella 22. Risultati delle verifiche di stabilità globale

<i>Analisi</i>	<i>FS^{MIN} globale</i>
Condizioni statiche	1.972

Essendo soddisfatte la relazione:

$FS^{MIN} \geq R2 = 1.1$, in condizioni statiche;

le analisi di stabilità globali risultano verificate.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dall'analisi di stabilità che mostrano le cinque superfici più critiche, ed evidenziano la superficie critica a cui è associato il coefficiente di sicurezza più basso.



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

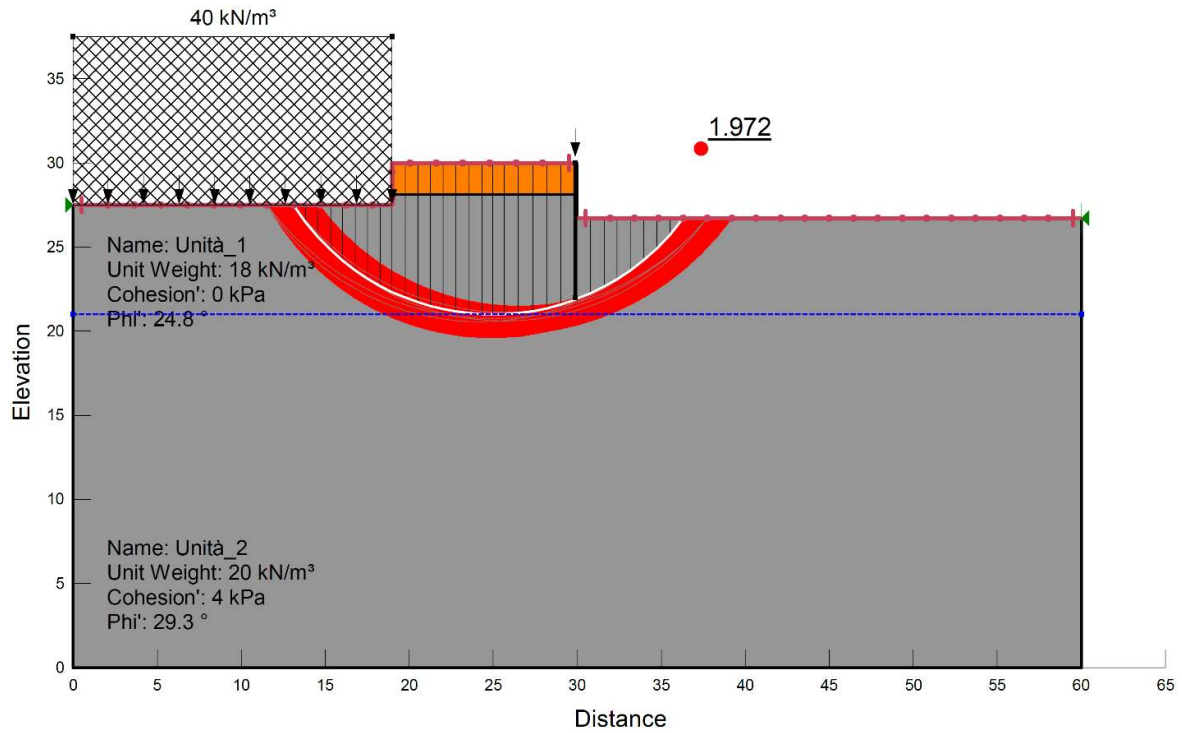



Figura 43. Verifica di stabilità globale della berlinese provvisoria in condizioni statiche

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3


10.VALIDAZIONE DEI MODELLI ESEGUITI

Il software Paratie Plus impiegato per il dimensionamento delle paratie di sostegno in oggetto è stato validato in occasione della progettazione della galleria artificiale realizzata in corrispondenza della ex trincea ferroviaria (GA01-GA02-GA03); pertanto, per ogni ulteriore approfondimento in merito si rimanda al paragrafo §10.1 della relazione tecnica e di calcolo "MTL2T1A1DSTRGA0R003-0-0".

Il modello della galleria artificiale in corrispondenza delle GA01, GA02 e GA03 è stato validato utilizzando il metodo di calcolo semplificato sviluppato da Terzaghi e Peck (1967) e da Peck (1969), che hanno proposto diagrammi empirici delle pressioni per il progetto di una paratia puntonata, dedotti dal monitoraggio di progetti reali. Le evidenze sperimentali hanno indotto a ritenere che il diagramma delle pressioni in un terreno competente abbia un andamento di tipo trapezoidale (metodo dell'Area Tributaria). Tale tipo di distribuzione è normalmente adottata per il progetto di paratie con più ordini di puntoni. Il metodo semplificato comporta una serie di limitazioni che riguardano i seguenti aspetti:

- altezza di scavo superiore a 6 m e sviluppo longitudinale relativamente grande;
- assenza di falda;
- terreno omogeneo e comportamento drenato per le sabbie e non drenato per le argille (verifica a breve termine);
- il diagramma delle pressioni si applica solo per l'altezza di scavo;
- non è possibile simulare la sequenza di scavo per fasi successive.

Pertanto, per ulteriori approfondimenti in merito alle considerazioni svolte per la validazione dei modelli di calcolo eseguiti con Paratie Plus si rimanda all'elaborato specialistico suggerito.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

11.DIMENSIONAMENTO E VERIFICHE DELLA SOLETTA DI COPERTURA E DELLE STRUTTURE INTERNE

11.1 Criteri di calcolo

In ottemperanza al D.M. del 14/01/2018 (Norme tecniche per le costruzioni), i calcoli sono condotti con il metodo semiprobabilistico agli stati limite.

11.1.1 Valore ammissibile di apertura delle fessure

Facendo riferimento alla Tabella 4.1.IV delle NTC2018 si considerano tali valori limite di apertura delle fessure per le verifiche allo stato limite di esercizio:

- $w_3 = 0.4$ mm (combinazione frequente);
- $w_2 = 0.3$ mm (combinazione quasi permanente);

11.1.2 Limiti tensionali per le verifiche allo SLE


Le limitazioni tensionali considerate ai fini delle verifiche SLE per le sezioni in c.a. sono le seguenti, coerentemente con quanto riportato nelle NTC2018 al paragrafo §4.1.2.2.5:

Calcestruzzo C30/37

- $\sigma_c < 0.60 \cdot f_{ck} = 18.0$ MPa (combinazione caratteristica, rara)
- $\sigma_c < 0.45 \cdot f_{ck} = 13.5$ MPa (combinazione quasi permanente)

Acciaio B450C

- $\sigma_s < 0.80 \cdot f_{yk} = 360$ MPa (combinazione caratteristica, rara)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

11.2 Geometria dell'opera

La galleria artificiale oggetto di studio nella presente relazione tecnica e di calcolo è posta nella tratta compresa tra la Stazione Cimarosa e la Stazione Corelli (GA04), ed è costituita dai diaframmi, dalle strutture interne (fodere, solette intermedie e di fondazione) e dalla soletta di copertura come mostrato in Figura 3 al capitolo §4 della presente relazione tecnica e di calcolo.


Si riportano di seguito le dimensioni geometriche inerenti alle strutture interne ed alla soletta di copertura della galleria oggetto di studio nella presente relazione tecnica e di calcolo:

Dimensioni geometriche:

- $l = 20.26$ m (luce della soletta di copertura rispetto all'asse dei diaframmi)
- $S_{\text{copertura}} = 1.50$ m
- $S_{\text{fondazione}} = 1.50$ m
- $S_{\text{muri esterni}} = 0.50$ m
- $H_r = 1.60$ m (da estradosso soletta a p.f.)

La quota della falda risulta essere a 2.9 m di profondità rispetto all'intradosso della copertura.

Per l'analisi della struttura si schematizza la soletta di copertura sia come una trave a semplice appoggio, sia come una trave incastro-incastro comparando le massime sollecitazioni ottenute da entrambi i casi. Per il dimensionamento di tutte le altre componenti strutturali si considera uno schema a telaio multipiano.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

12. DIMENSIONAMENTO DELLE STRUTTURE INTERNE

12.1 Analisi dei carichi delle strutture interne

Nel seguente paragrafo si descrivono i carichi elementari da assumere per le verifiche di resistenza in esercizio ed in presenza dell'evento sismico.

Vengono prese in considerazione le condizioni elementari di carico di seguito determinate. Tali Condizioni Elementari saranno opportunamente combinate secondo quanto previsto dalla normativa vigente.

12.1.1 Permanenti strutturali (G1)

Per i materiali si assumono i seguenti pesi specifici che sono automaticamente valutati dal modello:

- calcestruzzo armato: $\gamma_{c.a.} = 25 \text{ kN/m}^3$
- soletta copertura $S_{cop} \times \gamma_{c.a.} = 1.50 \times 25.00 = \mathbf{37.50 \text{ kN/m}^2}$
- soletta di fondo $S_{fondo} \times \gamma_{c.a.} = 1.50 \times 25.00 = \mathbf{37.50 \text{ kN/m}^2}$
- soletta intermedia $S_{interm} \times \gamma_{c.a.} = 1.00 \times 25.00 = \mathbf{25.00 \text{ kN/m}^2}$
- muri esterni $S_{mur\ est} \times \gamma_{c.a.} = 0.50 \times 25.00 = \mathbf{12.50 \text{ kN/m}^2}$


12.1.2 Permanenti portati (G2)

I carichi permanenti portati considerati ai fini dell'analisi sono dovuti alla presenza dell'armamento e dei tramezzi, tali carichi sono calcolati nel modo seguente:

G2-armamento:

Tale carico si ottiene considerando un peso specifico pari a 24 kN/m^3 moltiplicato per la distanza tra la base dell'armamento ed il piano del ferro compreso.

- peso armamento $H \times \gamma_{arm} = 1.1 \times 24.0 = \mathbf{26.4 \text{ kN/m}^2}$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

G2-Tramezzi distribuiti:

Per tenere in conto dell'eventuale presenza di tramezzi è stato considerato un carico permanente pari a 2 KPa. Tale carico viene sommato al carico permanente G2-armamento ed è applicato come un unico carico distribuito uniforme.

G2-Pavimentazione banchine:

Superiormente alle banchine si considera la relativa pavimentazione, il cui carico viene stimato pari a 2.4 KPa.

12.1.3 Carichi variabili (Q)

Sulla soletta intermedia e su quella di fondazione agisce il sovraccarico determinato dal passaggio della metropolitana, dalla presenza di locali tecnici non di sistema e dalla folla agente lungo le banchine. Tali carichi sono calcolati come segue:

Metro (q metro)

Si considera uno schema di carico longitudinale come mostrato nella figura seguente:

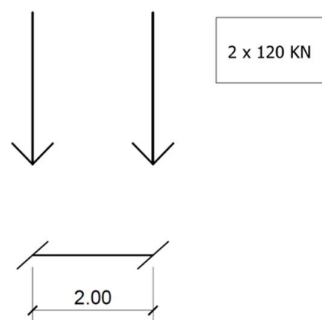



Figura 44.Schema di carico della metro

Per considerare possibili incrementi d'intensità futuri si amplifica il carico di treno per un fattore di 1.25. S'impiega un ulteriore fattore di amplificazione dinamica $\phi = 1.2$. Il carico da treno viene ripartito considerando un angolo di diffusione di 45° per lo strato di armamento e della soletta.

Carico Q_{vk} : due assi ad interasse di 2 m:240 KN

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Considerazioni geometriche

Il carico variabile da treno va considerato diffuso su una superficie dipendente dalle geometrie del rilevato e della struttura; l'area in questione è pari a:

$$A_{diff} = B_L \cdot B_T$$

Si indica con B_T la larghezza di diffusione del carico trasversale dalla rotaia alla quota del piano medio della soletta di copertura e con B_L la lunghezza di diffusione del carico longitudinale dalla rotaia alla quota del piano medio della soletta di copertura. Assumendo che la diffusione avvenga con un angolo di 45° nell'armamento e lungo le strutture in c.a., si ottiene, considerando la larghezza della traversina $L_{travers} = 2.30$ m:

$$B_T = L_{travers} + 2 \cdot [H_{armamento} \cdot \tan(45^\circ) + S_s/2]$$

$$B_T = 2.3 + 2 \cdot [0.7 \cdot \tan(45^\circ) + 1/2] = \mathbf{4.7 \text{ m}}$$

L'altezza dell'armamento $H_{armamento}$ è determinato sottraendo l'altezza della traversina alla distanza tra piano del ferro e l'estradosso della soletta:


$$H_{armamento} = H_{piano \text{ del ferro}} - H_{traversina} = 1.1 - 0.4 = 0.7 \text{ m}$$

Si considera, a favore di sicurezza, l'altezza della soletta meno spessa per il calcolo della diffusione del carico della metro da applicare al modello.

La lunghezza di ripartizione longitudinale (B_L) si calcola considerando un interasse di 2 m tra i carichi concentrati:

$$B_L = 2 + 2 \cdot [H_{armamento} \cdot \tan(45^\circ) + S_s/2]$$

$$B_L = 2 + 2 \cdot [0.7 \cdot \tan(45^\circ) + 1/2] = \mathbf{4.4 \text{ m}}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Azioni verticali causate dal treno

In base alle considerazioni geometriche formulate in precedenza, le forze concentrate Q_{VK} possono essere considerate come un carico q_{equi} distribuito lungo B_L :

$$q_{metro} = \frac{120 \cdot 2 \cdot 1.2 \cdot 1.25}{B_T \cdot B_L}$$

$$q_{metro} = \frac{360}{4.7 \cdot 4.4} = \mathbf{17.4 \text{ kN/m}^2}$$

Tale carico è distribuito lungo la larghezza trasversale B_T calcolata. Di seguito si mostra lo schema di diffusione di carico impiegata.

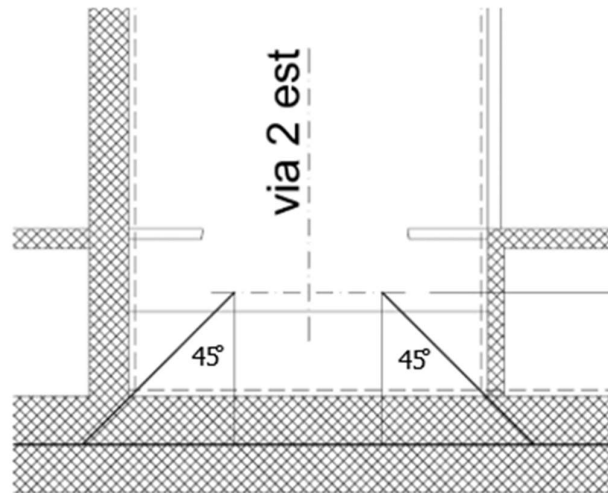



Figura 45. Distribuzione del carico sulla soletta

Locali tecnici (q locali tecnici)

Si considera un carico di 10 kPa distribuito sulla luce della soletta su cui non grava il carico della metro.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Carico da folla (q folla)

Si considera un carico di 5 kPa distribuito lungo le banchine.

12.1.4 Spinta della falda (G1 FALDA)

Considerando una quota di falda a lungo termine a 2.9m di profondità rispetto all'intradosso della soletta di copertura, si ottiene un battente idraulico pari ad:

$$H_w = 17.85 \text{ m}$$

Da tale valore si ottiene un carico triangolare agente sui muri esterni ed un carico distribuito uniforme di sottospinta agente sulla fondazione della struttura. Ponendo z la coordinata con origine al piano campagna si determina il carico idrostatico agente sulla struttura:

Tabella 23. Calcolo del carico idrostatico della falda

	z	$\sigma_{h,WATER}$
posizione	[m]	[kN/m ²]
piano di falda	6	0
piano di fondazione	17.85	178.5


12.1.5 Ritiro (ΔT)

Si considera l'effetto del ritiro agente nelle solette della struttura in esame. La deformazione da ritiro viene valutata come previsto nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14/01/08) al paragrafo 11.2.10.6.

L'azione viene applicata come variazione termica negativa equivalente.

La deformazione totale da ritiro è pari a:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

dove:

$\epsilon_{cd} = k_h \cdot \epsilon_{c0}$ è la deformazione per ritiro da essiccamento


$\epsilon_{ca} = -2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$ con f_{ck} in N/mm² è la deformazione per ritiro autogeno

Soletta di copertura

Il ritiro agente in soletta viene calcolato nel modo seguente:

Tabella 24. Valutazione dell'azione dovuto al ritiro del calcestruzzo della soletta di copertura

Concrete class C30/37	f _{ck} (Mpa)	30,71	N
Concrete elastic modulus	E _{cm} (Gpa)	=	33,019
element thickness	s (mm)	=	1500
exposed surfaces	n°	=	1
member's notional size $\alpha=2Ac/u h_0$	α (mm)	=	3000
relative humidity	UR%	=	75
age of concrete in days	t (gg)		54630
age of concrete at loading in days/t0	t _s (gg)	=	1
coefficient which depends on the type of cement	α_{ds1}	=	4
coefficient which depends on the type of cement	α_{ds2}	=	0,12
reference mean compressive strength	f _{cm0} (Mpa)	=	10
characteristic compressive strength	f _{ck} (Mpa)	=	30,71
mean compressive strength	f _{cm} (Mpa)	=	38,71
coefficient for UR%	β_{RH}	=	0,90
basic drying shrinkage strain	ϵ_{cd0}	=	0,00032
drying shrinkage strain - time effect	$\beta_{ds}(t, t_s)$	=	0,89
coefficient depending on the notional size	k _h	=	0,7
drying shrinkage strain x1000	$\epsilon_{cd}(t)$	=	0,20
autogenous shrinkage strain-time effect	$\beta_{as}(t)$	=	1,0000
autogenous shrinkage strain - infinity	$\epsilon_{ca}(\infty)$	=	5,18E-05
autogenous shrinkage strain x1000	$\epsilon_{ca}(t)$	=	0,0518
total shrinkage strain x1000	$\epsilon_{cs}(t, t_s)$	=	0,2492
Equivalent thermal effect	ΔT °C	=	24,9

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Si considera, coerentemente con quanto indicato al paragrafo §8.1 Fase 23 SLE, un coefficiente di viscosità pari a:

$$\varphi(\infty, t_0) = 2.75$$


Per ottenere la variazione termica conseguente al ritiro si calcola:

$$\Delta T \text{ applicata} = \Delta T \frac{1}{1 + \varphi(\infty, t_0)} = 24.9 \frac{1}{1 + 2.75} = -6.64$$

Solette intermedie

Tabella 25. Valutazione dell'azione dovuto al ritiro del calcestruzzo della soletta intermedia

Concrete class C30/37	f _{ck} (Mpa)	30,71	N
Concrete elastic modulus	E _{cm} (Gpa)	=	33,019
element thickness	s (mm)	=	1000
exposed surfaces	n°	=	1
member's notional size $\alpha=2Ac/u h_0$	α (mm)	=	2000
relative humidity	UR%	=	75
age of concrete in days	t (gg)		54630
age of concrete at loading in days/t0	t _s (gg)	=	1
coefficient which depends on the type of cement	α_{ds1}	=	4
coefficient which depends on the type of cement	α_{ds2}	=	0,12
reference mean compressive strength	f _{cm0} (Mpa)	=	10
characteristic compressive strength	f _{ck} (Mpa)	=	30,71
mean compressive strength	f _{cm} (Mpa)	=	38,71
coefficient for UR%	β_{RH}	=	0,90
basic drying shrinkage strain	ϵ_{cd0}	=	0,00032
drying shrinkage strain - time effect	$\beta_{ds}(t, t_s)$	=	0,94
coefficient depending on the notional size	k _h	=	0,7
drying shrinkage strain x1000	$\epsilon_{cd}(t)$	=	0,21
autogenous shrinkage strain-time effect	$\beta_{as}(t)$	=	1,0000
autogenous shrinkage strain - infinity	$\epsilon_{ca}(\infty)$	=	5,18E-05
autogenous shrinkage strain x1000	$\epsilon_{ca}(t)$	=	0,0518
total shrinkage strain x1000	$\epsilon_{es}(t, t_s)$	=	0,2593
Equivalent thermal effect	ΔT °C	=	25,9

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3


Per ottenere la variazione termica conseguente al ritiro da applicare si calcola:

$$\Delta T_{applicata} = \Delta T \frac{1}{1 + \varphi(\infty, t_0)} = 25.9 \frac{1}{1 + 2.75} = -6.91 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Soletta di fondo

Tabella 26. Valutazione dell'azione dovuto al ritiro del calcestruzzo della soletta di fondazione

Concrete class C30/37	f _{ck} (Mpa)	=	30,71	N
Concrete elastic modulus	E _{cm} (Gpa)	=		33,019
element thickness	s (mm)	=		1500
exposed surfaces	n°	=		1
member's notional size α=2Ac/u h0	α (mm)	=		3000
relative humidity	UR%	=		75
age of concrete in days	t (gg)	=		54630
age of concrete at loading in days/t0	t _s (gg)	=		1
coefficient which depends on the type of cement	α _{ds1}	=		4
coefficient which depends on the type of cement	α _{ds2}	=		0,12
reference mean compressive strength	f _{cm0} (Mpa)	=		10
characteristic compressive strength	f _{ck} (Mpa)	=		30,71
mean compressive strength	f _{cm} (Mpa)	=		38,71
coefficient for UR%	β _{RH}	=		0,90
basic drying shrinkage strain	ε _{cd0}	=		0,00032
drying shrinkage strain - time effect	β _{ds} (t, t _s)	=		0,89
coefficient depending on the notional size	k _h	=		0,7
drying shrinkage strain x1000	ε _{cd} (t)	=		0,20
autogenous shrinkage strain-time effect	β _{as} (t)	=		1,0000
autogenous shrinkage strain - infinity	ε _{ca} (∞)	=		5,18E-05
autogenous shrinkage strain x1000	ε _{ca} (t)	=		0,0518
total shrinkage strain x1000	ε_{cs} (t, t_s)	=		0,2492
Equivalent thermal effect	ΔT °C	=		24,9

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d’opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Per ottenere la variazione termica conseguente al ritiro da applicare si calcola:

$$\Delta T_{applicata} = \Delta T \frac{1}{1 + \varphi(\infty, t_0)} = 24.9 \frac{1}{1 + 2.75} = -6.64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

12.1.6 Azioni trasmesse dai diaframmi

La galleria in analisi è realizzata attraverso la tecnologia esecutiva di tipo top-down caratterizzata da uno scavo sostenuto dai diaframmi e dal solaio di copertura. Gli elementi interni della struttura sono collegati ai diaframmi e questo ne implica la trasmissione di forze. Ai fini dell’analisi dei carichi si considerano le forze trasmesse dai diaframmi ed agenti sulla struttura interna indicate di seguito:

Tabella 27. Azioni trasmesse dai diaframmi alla struttura interna

	N SLV [kN/m]	N SLU [kN/m]	N SLE [kN/m]
SOLETTONE	-316,50	-519,6	-385,14
SOLETTA INT. 1	-677,40	-338,76	-263,10
SOLETTA INT. 2	-1338,92	-1381,21	-1351,75
FONDAZIONE	-794,80	-660,6	-747,65

Le azioni sopra riportate sono state calcolate mediante il software di calcolo Paratie Plus e generano, se di segno negativo, una compressione nei solai; queste ultime si riferiscono alle azioni fornite dal solo terreno in corrispondenza dei vari livelli di contrasto presente lungo l’altezza del diaframma. Risulta necessario sottrarre a tali azioni il contributo fornito dalla spinta idrostatica della falda, la quale viene considerata separatamente mediante il carico G1 FALDA espresso al paragrafo §12.1.4. Per determinare tale contributo si definisce un modello mediante il Software SAP2000 di un telaio multipiano soggetto esclusivamente all’azione della falda e vincolato alla traslazione orizzontale mediante un carrello posto in mezzeria alla fondazione, come evidenziato nell’immagine seguente:

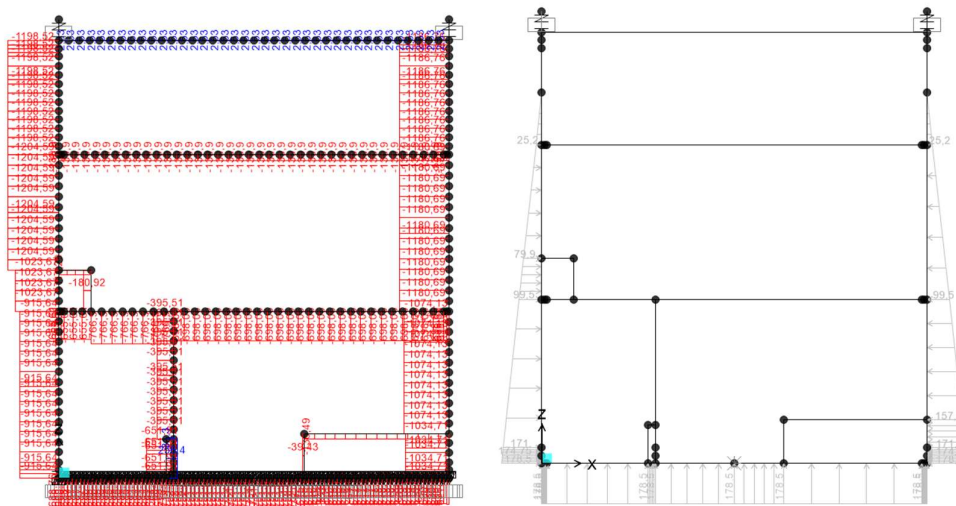


Figura 46. Modello delle strutture interne soggette a spinta idrostatica della falda e conseguenti sollecitazioni assiali


Da tale modello si ottengono le seguenti azioni assiali che agiscono in corrispondenza dei solai e sono determinate dalla spinta idrostatica:

- N idro SLE (solettone) = +2.53 KN
- N idro SLE (soletta int. 1) = -139.90 KN
- N idro SLE (soletta int. 2) = -698.10 KN
- N idro SLE (fondazione) = -686.50 KN


Tali azioni vengono sottratte alle azioni trasmesse dai diaframmi ai solai interni fornite dal software di calcolo Paratie Plus. Si precisa che, in combinazione di stato limite ultimo, le azioni N idro SLE sono moltiplicate per il coefficiente di combinazione 1.3.

Tabella 28. Azioni trasmesse dai diaframmi alla struttura interna deputare dal contributo della spinta idrostatica

	N SLV [kN/m]	N SLU [kN/m]	N SLE [kN/m]
SOLETTONE	-319,03	-522,89	-194,875
SOLETTA INT. 1	-537,50	-156,89	-214,2
SOLETTA INT. 2	-640,82	-473,68	-634,85
FONDAZIONE	-108,30	+231,85	+8,1

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Alle azioni risultanti positive è stato imposto un valore nullo poiché prive di significato fisico. Le azioni indicate in tabella sono applicate in prossimità delle solette della struttura e non tengono conto della spinta idrostatica dell'acqua che, pertanto, sarà considerata in analisi mediante il carico "spinta della falda" precedentemente calcolato al paragrafo §12.1.4.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

12.1.7 Carichi sismici (s1, s2, s3)

Il sottosuolo su cui insiste l'opera può essere inserito nella categoria "B", la categoria topografica è "T1". Essendo lo scatolare una struttura che non ammette spostamenti relativi rispetto al terreno, il coefficiente β_m , assume valore unitario. L'azione sismica viene valutata come:

- incremento di spinta laterale agente asimmetricamente (N SLV trasmessa dai diaframmi)
- spinta sismica del terreno ripartita in funzione delle rigidezze (s1)
- inerzia dei carichi permanenti portati (s2)
- inerzia della struttura (s3)

In tutti i casi viene considerata trascurabile la componente verticale del sisma. I parametri sismici considerati sono (si precisa che S, prodotto tra S_s e S_T , è pari a):

$$S = S_s \times S_T = 1.200 \times 1.0 = 1.200$$

componente orizzontale

accelerazione massima del sito: $a_{max} = S \times a_g = 1.200 \times 0.067 \text{ g} = 0.0804 \text{ g}$

coefficiente di riduzione $b_m = 1.0$

coefficiente sismico orizzontale $k_h = 0.0804$


Si valuta l'azione sismica agente sulle fodere interne mediante la formula di Wood. Considerando i parametri sismici appena descritti si ottiene:

$$S_{wood} = \gamma \cdot H^2 \cdot K_h = 20 \cdot 23.85^2 \cdot 0.0801 = 911.25 \text{ kN/m}$$

Per il calcolo della spinta di Wood si considera l'altezza sismicamente attiva H come la differenza di quota tra il piano campagna e l'intradosso della soletta di fondazione.

Tale azione viene ripartita per l'altezza della controparete ottenendo il valore del carico sismico distribuito:

$$\frac{S_{wood}}{h} = \frac{1070.35}{22.40} = 40.83 \text{ kN/m}^2$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Poiché la parete interna è affiancata dalla paratia si ripartisce l'azione sismica in funzione delle rigidezze flessionali delle sezioni degli elementi. Il coefficiente di ripartizione viene così calcolato:

- Coefficiente di ripartizione: $r = \frac{I_{parete}}{I_{diaframma} + I_{parete}}$

Tabella 29. Coefficiente di ripartizione del carico r

	Diaframma	Parete interna
Spessore [m]	1,2	0,5
I [m ⁴]	0,144	0,0104
r	0,067	-

Valutato il coefficiente di ripartizione si ottiene la quota parte di spinta sismica che grava sulla parete interna:

$$s_1 = \frac{S_{wood}}{h} \cdot r = 2.75 \text{ kN/m}^2$$

Tale azione si applica come carico distribuito costante sulla parete della struttura come N SLV.


Inerzia carichi permanenti (s2)

Si considerano i pesi dei permanenti portati agenti sulla via ovest ed est precedentemente calcolati (armamento, banchina e tramezzi) e si ripartiscono rispetto alla larghezza dello scatolare interessato:

- G_{arm}: peso dell'armamento + 2 KPa (peso tramezzi distribuiti);
- G2 armamento: G_{arm} + 2 Kpa = 26.4 + 2 = **28.4 kN/m²**
- G2 pavimentazione banchine: **2.4 kN/m²**

Tali carichi vengono moltiplicati per $S \times a_g / g = 0.0804$ ed applicati come carico distribuito orizzontali sulle solette della struttura.

- f armamento: $28.4 \cdot 0.0804 = \mathbf{2.28 \text{ kN/m}^2}$
- f pavimentazione banchine: $2.4 \cdot 0.0804 = \mathbf{0.19 \text{ kN/m}^2}$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

inerzia struttura (s3)

Per considerare l'inerzia della struttura in combinazione sismica si applica al modello in esame un "gravity load" in direzione x pari all'accelerazione massima:

$$S \times a_g / g = 0.0804$$

12.1.8 Azione delle terre (N sle terre, Nslu terre)

Si valuta la quota parte di carico agente sulle pareti della struttura dovuta al terreno. Data la presenza dei diaframmi, la spinta del terreno sarà ripartita in funzione delle rigidzze flessionali degli elementi. Per valutare gli sforzi a lungo termine si determina la differenza tra sforzo in spinta a riposo e sforzo in spinta attiva in corrispondenza dei vari livelli dei solai.

Cautelativamente si considera un angolo di attrito del terreno pari a $\phi' = 30^\circ$ facendo riferimento ai parametri geotecnici descritti al paragrafo §5. Dopo aver valutato lo sforzo del terreno a lungo termine come:

$$\Delta\sigma = \sigma_{h,o} - \sigma_{h,a}$$


Si applicano in parete esterna gli sforzi ripartiti per il coefficiente r valutato al paragrafo §12.1.7.

In tabella si mostrano i valori degli sforzi [kN/m^2] ottenuti in funzione della quota z inerente alla profondità dei vari solai del sistema:

Tabella 30. Calcolo azioni del terreno agenti sulle fodere della struttura interna ripartite in funzione della rigidzza flessionale

LIVELLI	Z [m]	σ_v	$\sigma_{h,o}$	$\sigma_{h,a}$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma,r$
1	2,35	47	23,5	15,67	7,83	0,53
2	7,77	155,4	77,7	51,80	25,90	1,75
3	15,2	304	152	101,33	50,67	3,42
4	23,1	462	231	154,00	77,00	5,19

Tali carichi sono distribuiti sulle pareti della struttura e sono applicati al modello come N SLE ed N SLU, quest'ultimo è valutato moltiplicando gli sforzi ottenuti per il coefficiente parziale di sicurezza 1.3.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

12.2 Combinazioni di carico

Le combinazioni di carico, considerate ai fini delle verifiche, sono stabilite in modo da garantire la sicurezza in conformità a quanto prescritto al cap. 2 delle N.T.C.

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.1)$$

- Combinazione caratteristica (rara), generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili, da utilizzarsi nelle verifiche alle tensioni ammissibili di cui al § 2.7:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.2)$$

- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.3)$$

- Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.4)$$

- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E (v. § 3.2):

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.5)$$

- Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali di progetto A_d (v. § 3.6):

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.6)$$

Figura 47. Combinazioni di carico previste dalle NTC2018

Per i coefficienti parziali di sicurezza si è fatto riferimento alla Normativa Italiana 2018 Cap. 6.2.4 Tab. 6.2.I, mentre per i coefficienti di combinazione ψ si è considerata la Tab. 2.5.I assumendo che la soletta in analisi ricada in categoria G (rimesse, parcheggi ed aree per il traffico dei veicoli).



 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Tabella 31. Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I – NTC2018) – ⁽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}

	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_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

Tabella 32. Valori dei coefficienti di combinazione (Tab. 2.5.I – NTC2018)


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

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d’opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Di seguito si espone la tabella raffigurante le combinazioni impiegate ai fini dell’analisi.

Tabella 33. Combinazioni di carico impiegate per le analisi in oggetto

	g1	g1 (w) falda	g2	N SLE	N SLU	N SLV	s3	Ritiro	q metro	q locali tecnici	s2 (inerzia permanenti)
A1-M1_1	1,3	1	1,5								
A1-M1_2	1	1,3	0,8		1						
A1-M1_3	1,3	1,3	1,5		1			1,3	1,5	1,05	
A1-M1_4	1,3	1,3	1,5		1			1,3	1,05	1,5	
SLV_1	1	1	1			1	1	1			1
SLV_2	1	1	1			1	1	1	0,2	0,2	1
RARA_1	1	1	1								
RARA_2	1	1	1	1	1						
RARA_3	1	1	1	1	1			1	1	0,7	
RARA_4	1	1	1	1	1			1	0,7	1	
FREQUENTE_1	1	1	1	1	1			1	0,5	0,3	
FREQUENTE_2	1	1	1	1	1			1	0,3	0,5	
Q PERMAN_1	1	1	1	1	1			1	0,3	0,3	

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d’opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

12.3 Modello di calcolo

L’analisi della struttura scatolare è stata condotta con un programma agli elementi finiti (SAP2000) schematizzando i vari setti con elementi “beam” mutuamente incastrati e facendo riferimento ad una larghezza unitaria di struttura che viene pertanto risolta come struttura piana.

I risultati ottenuti sono stati considerati attendibili dagli scriventi a fronte di verifiche condotte con metodi semplificati nonché, in prima battuta, dal confronto critico con i risultati presentati dai documenti di progettazione definitiva. Per la verifica circa l’attendibilità dei risultati si espone il confronto di valori riscontrati per un caso semplificato al paragrafo §14.9.

Si riporta la licenza del programma utilizzato.

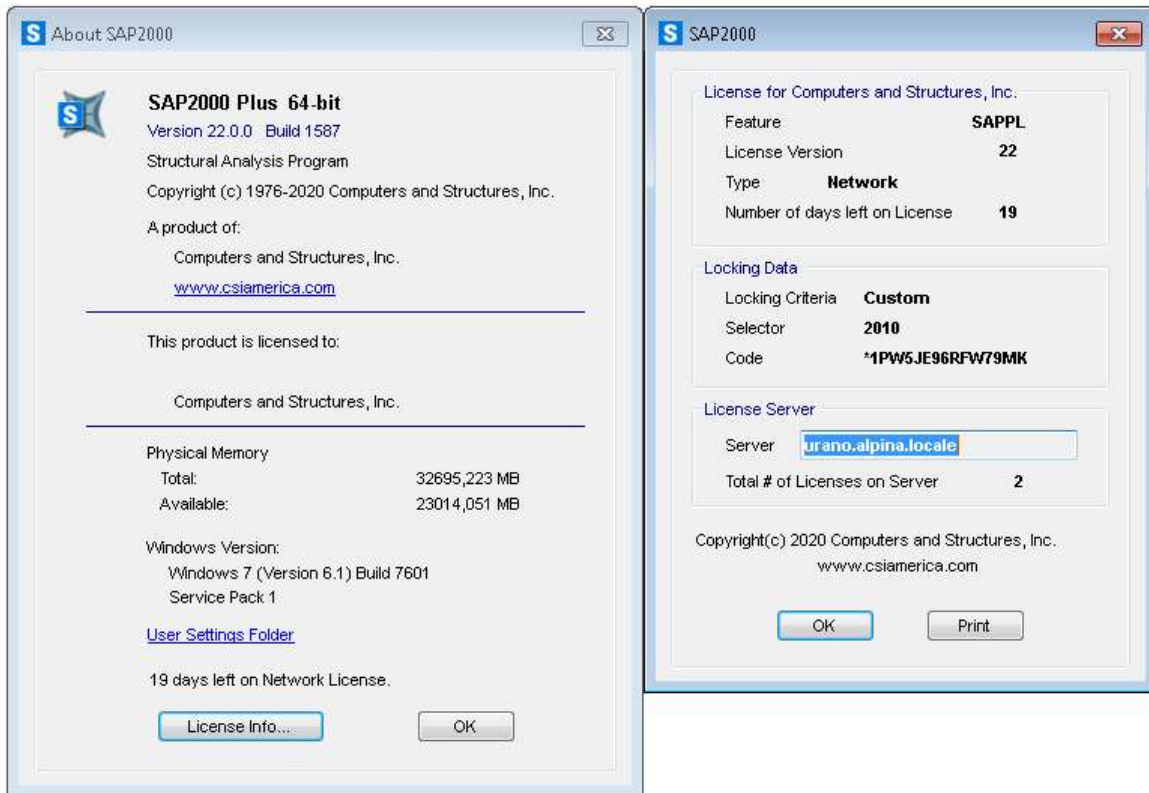



Figura 48. Licenza del Software Sap2000 impiegato ai fini dell’analisi

La struttura viene schematizzata attraverso un modello analitico agli elementi finiti, assumendo uno schema statico di telaio chiuso multipiano. Per il modello dello scatolare in oggetto la soletta di copertura viene modellata come un elemento frame privo di peso e massa poiché tale

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

componente scarica sui diaframmi a cui essa è vincolata. L'analisi della soletta di copertura viene effettuata mediante un differente modello di trave vincolata agli estremi.

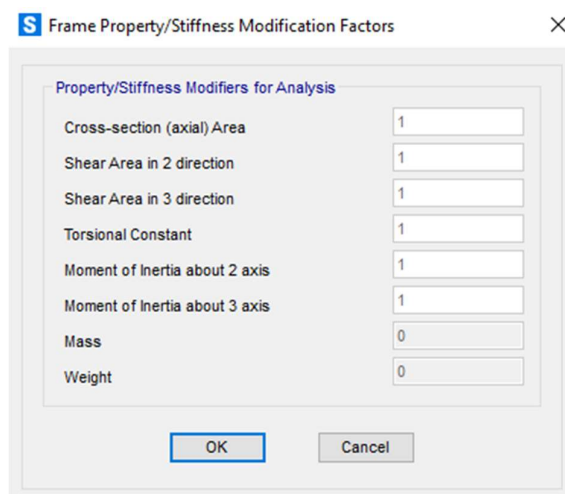


Figura 49. Proprietà meccaniche della sezione della copertura del modello

L'analisi strutturale viene condotta con il metodo degli spostamenti per la valutazione dello stato tenso-deformativo indotto da carichi statici.

Il suolo viene modellato facendo ricorso all'usuale artificio delle molle elastiche alla Winkler.

La caratteristica elastica della generica molla viene calcolata attraverso la formulazione di Vogt:

$$K_s = \frac{1.33 \cdot E}{\sqrt[3]{B_t^2 \cdot B_l}}$$

Si è ipotizzato un valore di $E = 30000 \text{ kN/m}^2$ e si calcola cautelativamente la rigidezza delle molle idealmente su di una dimensione longitudinale di 1 m.


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Tabella 34. Calcolo della costante di sottofondo mediante la formula di Vogt

Terreno di fondazione	
Modulo di Young	E 30000 kN/m ²
Dimensione trasversale dell'opera	B _t 19.05 m
Dimensione longitudinale dell'opera	B _l 1 m
Costante di sottofondo	K _s 5594 kN/m ³

Dal momento che si considera una larghezza unitaria per la struttura, la rigidità delle molle distribuite sotto la fondazione sarà pari a 5594 kN/m².

Per le caratteristiche geometriche delle varie aste si è quindi assunto:

- una sezione rettangolare $b \times h = 150 \times S_s$ cm per la soletta di copertura
- una sezione rettangolare $b \times h = 150 \times S_f$ cm per la soletta di fondazione
- una sezione rettangolare $b \times h = 100 \times S_f$ cm per le solette intermedie
- una sezione rettangolare $b \times h = 50 \times S_p$ cm per i muri esterni

Per quanto riguarda la rigidità delle aste del reticolo si è assunto:

- $E_c = 33019$ N/mm² (per cls Rck 37);



Lo schema statico della struttura e la relativa numerazione dei nodi e delle aste sono riportati nelle seguenti figure.

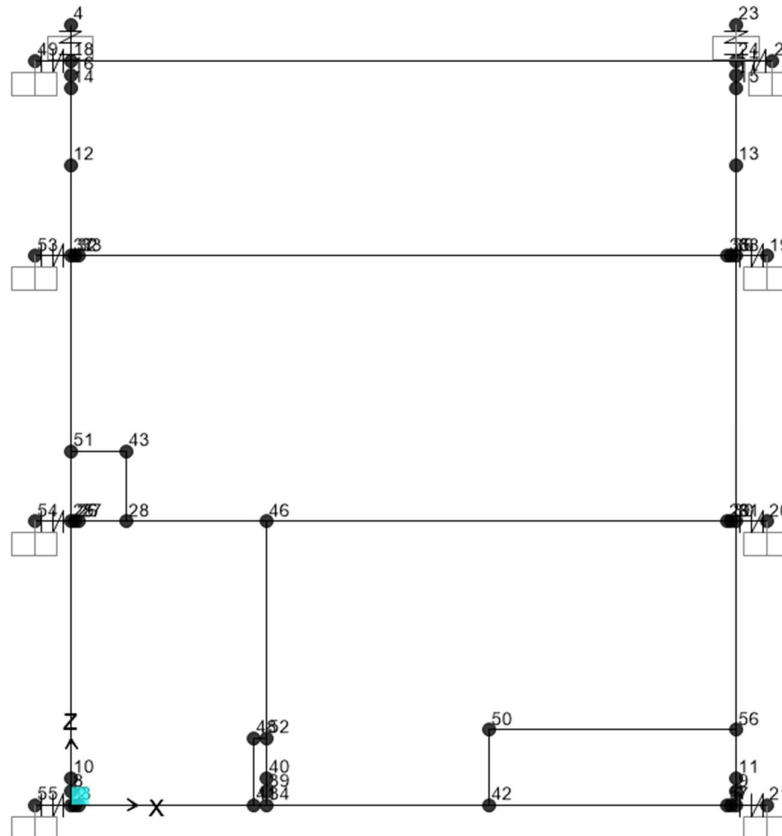


Figura 50. Numerazione dei nodi

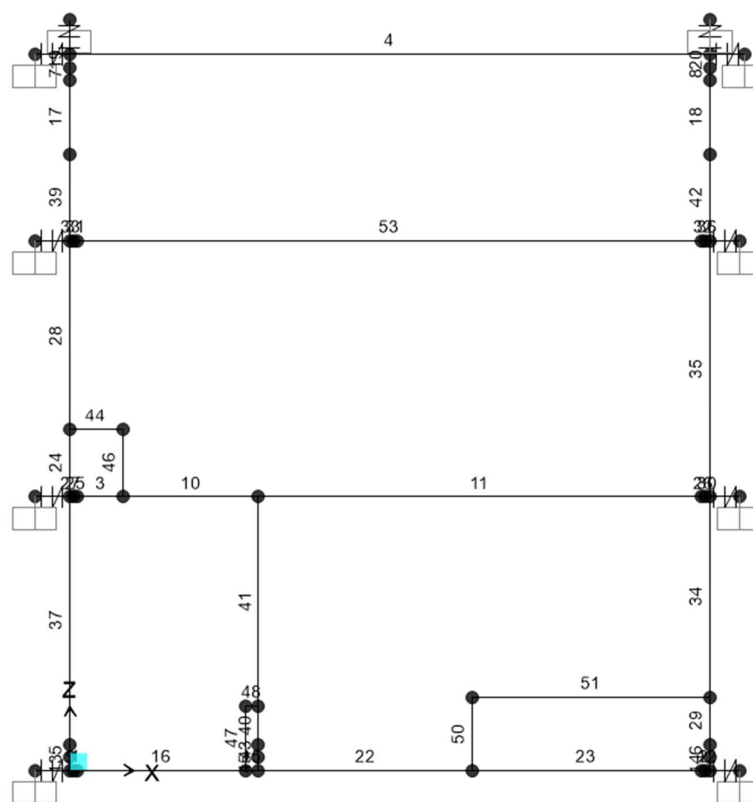



Figura 51. Numerazione delle aste

12.3.1 Condizioni di vincolo

Per l'analisi della struttura in esame sono stati considerati i seguenti vincoli:

- Letto di molle alla Winkler alla base della fondazione che lavora solo a compressione avente rigidezza pari a 5594 kN/m^2 per modellare l'interazione del terreno vergine con la struttura;
- Molle orizzontali lineari distribuite alla base della fondazione aventi rigidezza di 10000 kN/m^2 per modellare l'interazione dei diaframmi e del terreno con la fondazione della struttura rispetto alla direzione parallela all'asse della fondazione stessa;
- Molle verticali che lavorano solo a compressione applicate in corrispondenza della sommità dei muri laterali per rappresentare la rigidezza assiale dei diaframmi a cui sono vincolati. Tali molle sono calibrate in funzione della rigidezza assiale del diaframma calcolata nel modo seguente:

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

$$K_{assiale-diafram} = \frac{E \cdot A}{L} = 885835.5 \text{ kN/m}$$

con:

- E = 31447160 kN/m²
- A = b · h = 1 · 1.2 = 1.2 m²
- L = 35.50 m

- Molle traslazionali che lavorano solo a compressione calibrate in funzione della rigidezza a taglio del diaframma e del terreno in condizione di spinta passiva. Tali molle sono state calibrate sulla base degli spostamenti del diaframma ottenuti in corrispondenza di ogni solaio. Mediante il software Paratie Plus ver. 21.0.2 viene calcolato lo spostamento orizzontale assoluto del diaframma a diverse profondità ed in funzione di differenti valori di carico:

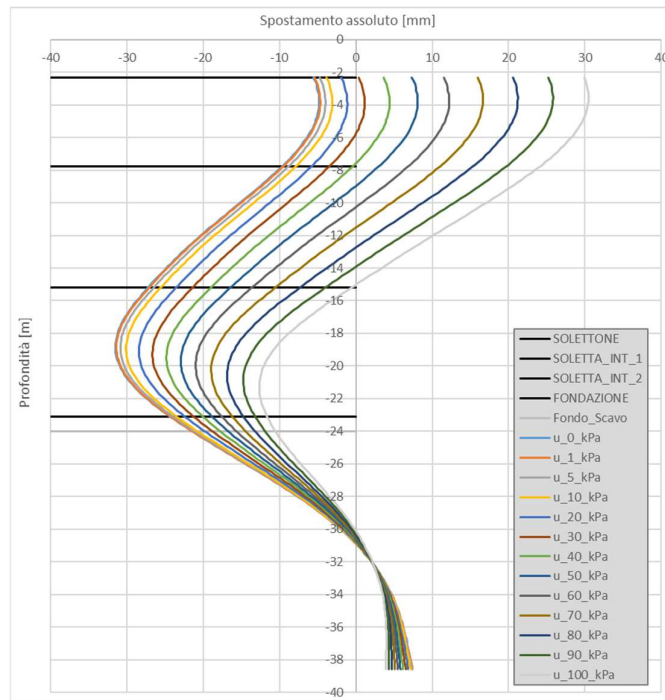



Figura 52. Grafico spostamento assoluto-profondità paratie

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

In funzione dell'entità del carico e dello spostamento assoluto misurato si ottiene l'andamento delle rigidezze delle molle in corrispondenza delle profondità dei solai della struttura in esame. Dall'immagine seguente è possibile osservare che, a partire da un determinato valore di carico, l'andamento delle rigidezze risulta essere costante.

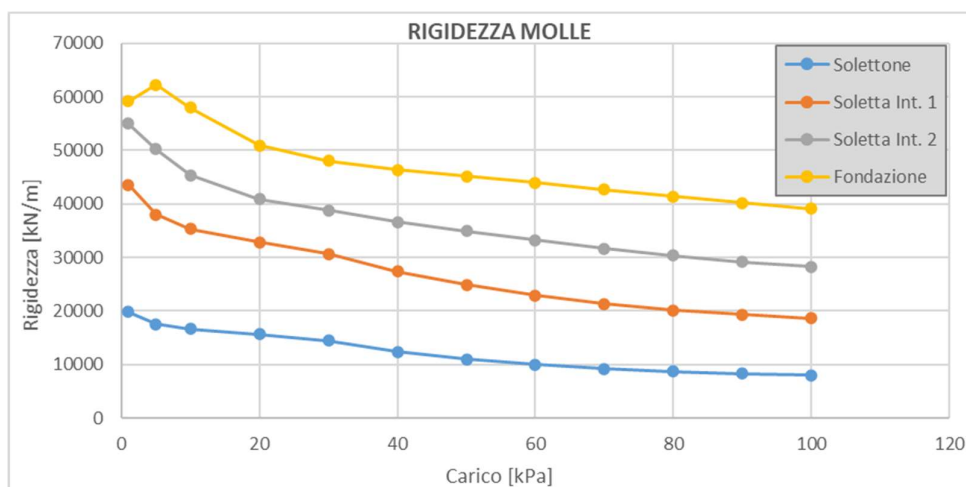


Figura 53. Andamento delle rigidezze

Le rigidezze impiegate per caratterizzare le molle orizzontali poste in corrispondenza di ogni solaio sono le seguenti:

- $K_{\text{solettone}} = 10000 \text{ kN/m}$
- $K_{\text{soletta int.1}} = 25000 \text{ kN/m}$
- $K_{\text{soletta int.2}} = 35000 \text{ kN/m}$
- $K_{\text{fondazione}} = 45000 \text{ kN/m}$

L'immagine seguente evidenzia le molle descritte ed applicate in corrispondenza di ogni solaio e vincolate esternamente con incastri.

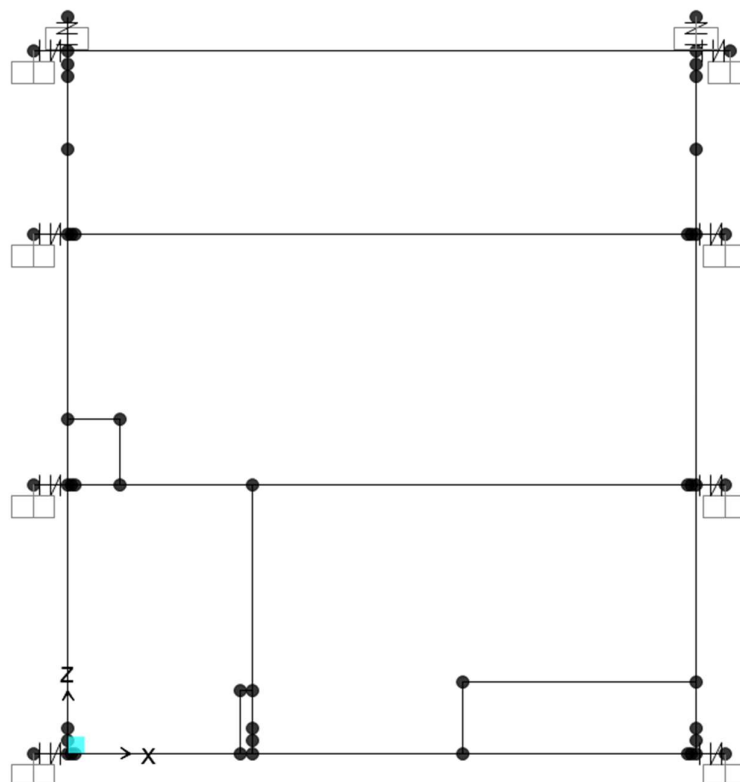


Figura 54.Vincoli del modello



12.4 Figure dei carichi

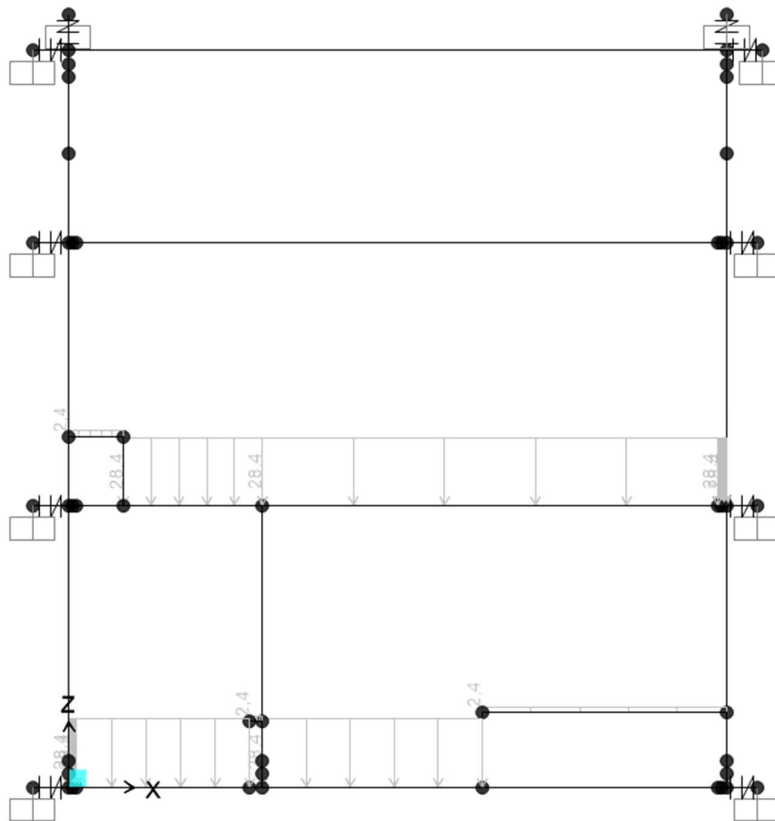


Figura 55.G2 carichi permanenti portati



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

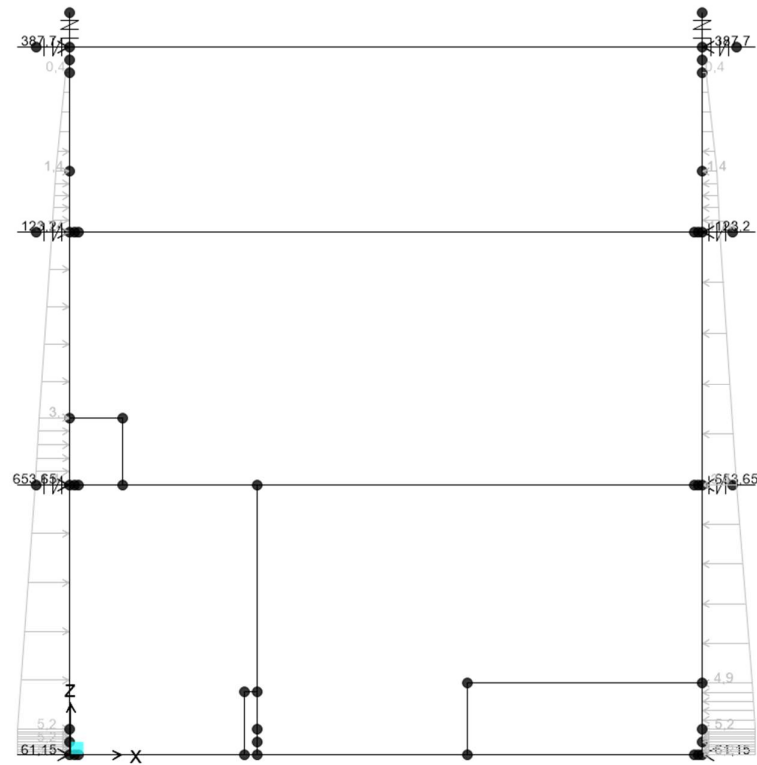


Figura 56.N sle (terre)

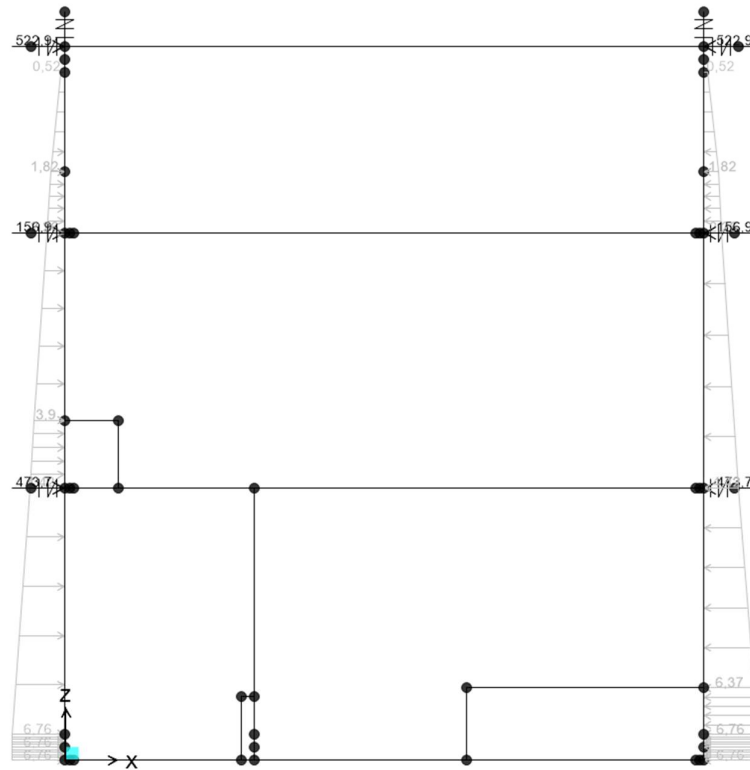


Figura 57.N SLU (terre)

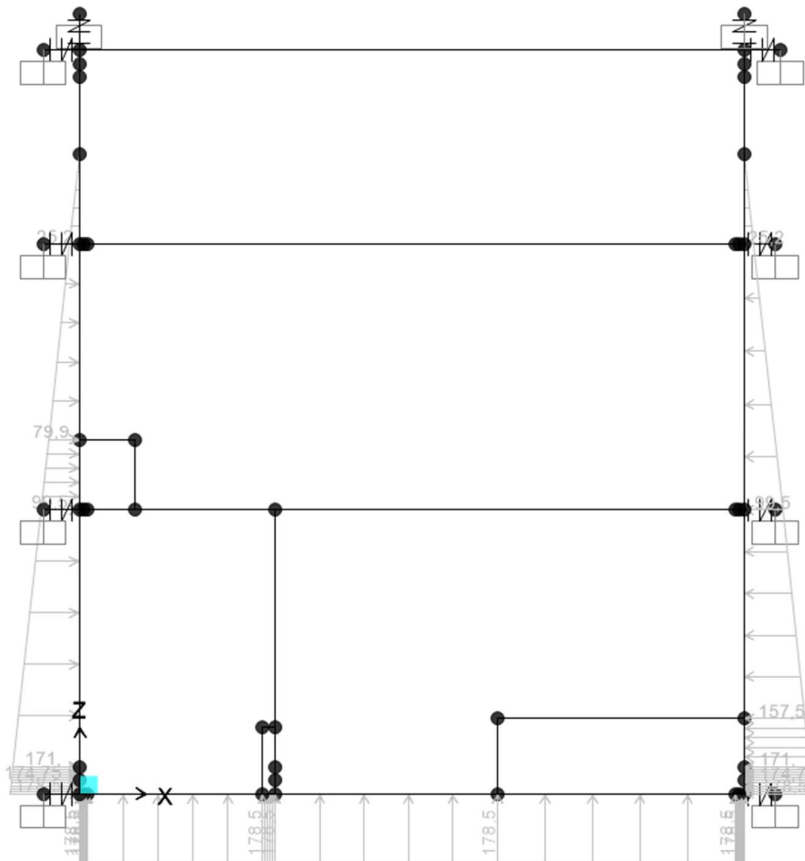


Figura 58.Falda



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

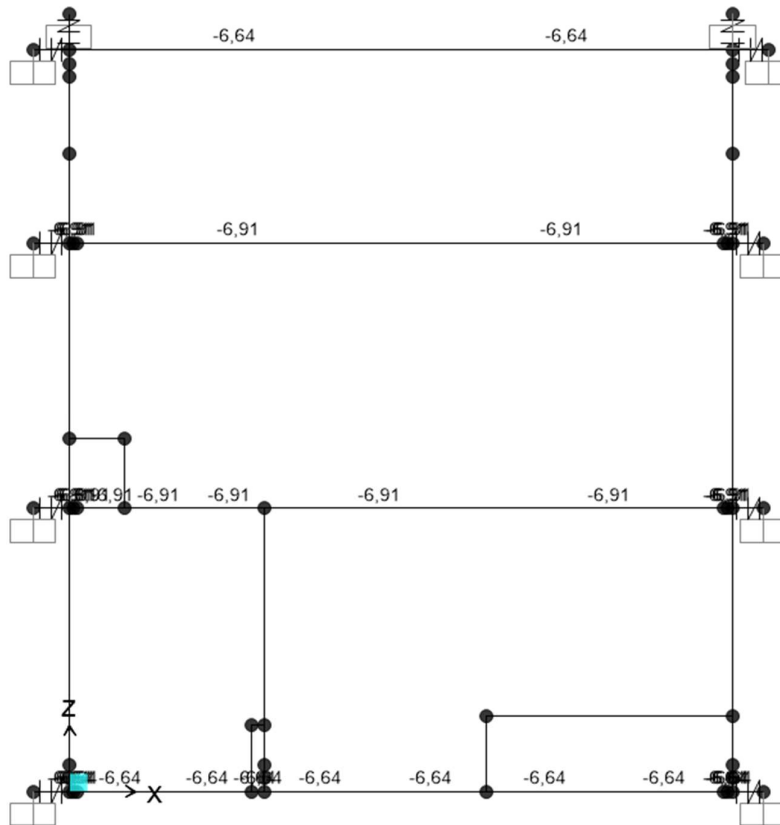


Figura 59.Ritiro

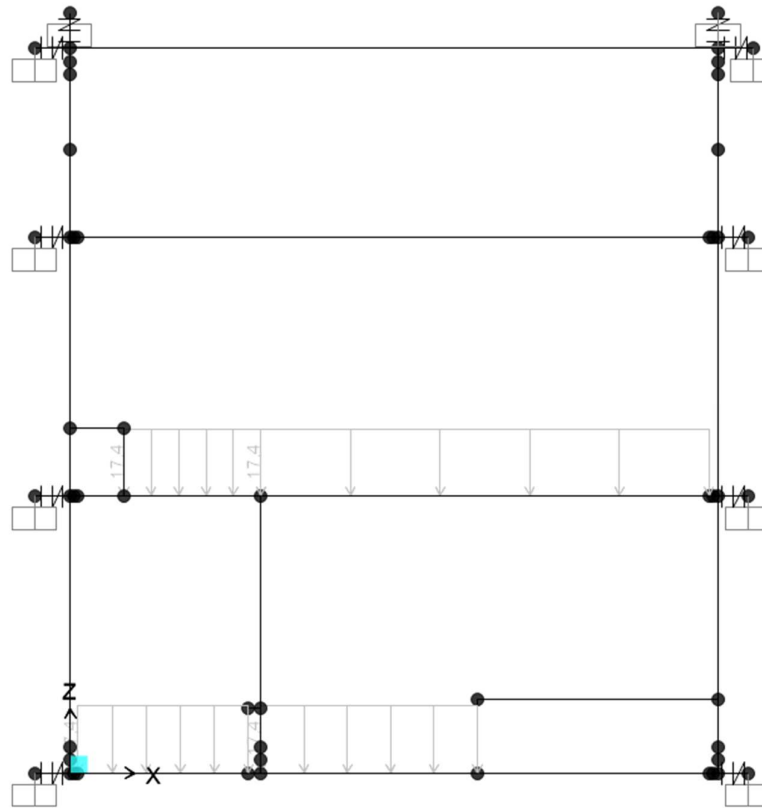


Figura 60.Q metro



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

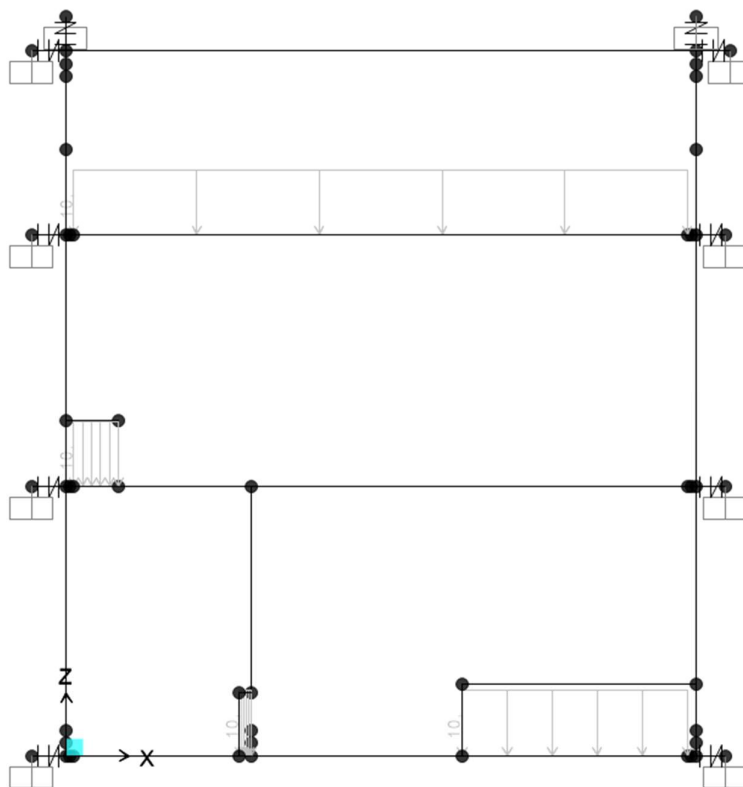


Figura 61.Q locali tecnici

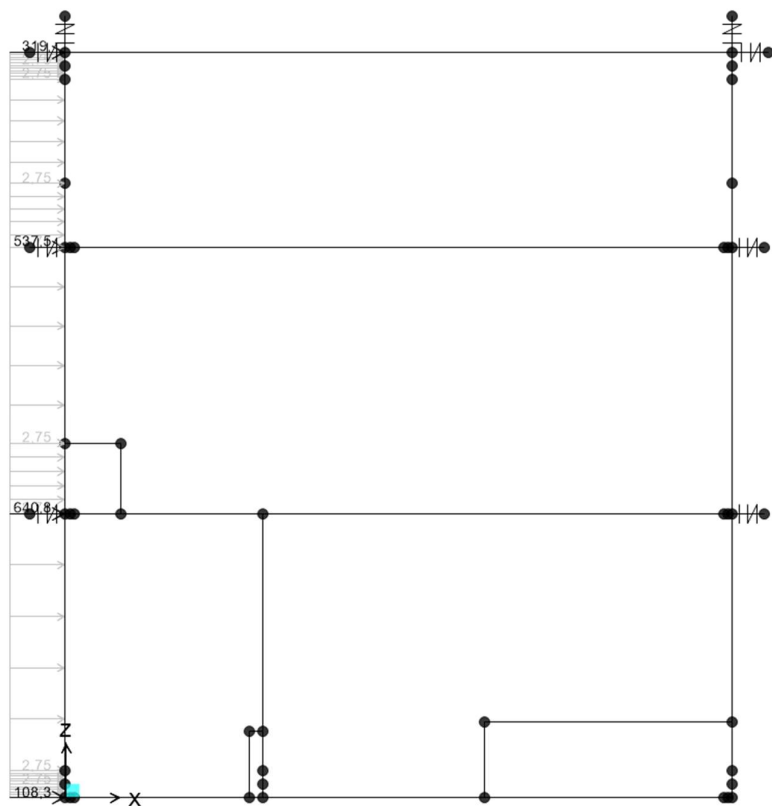


Figura 62.S1 azione sismica

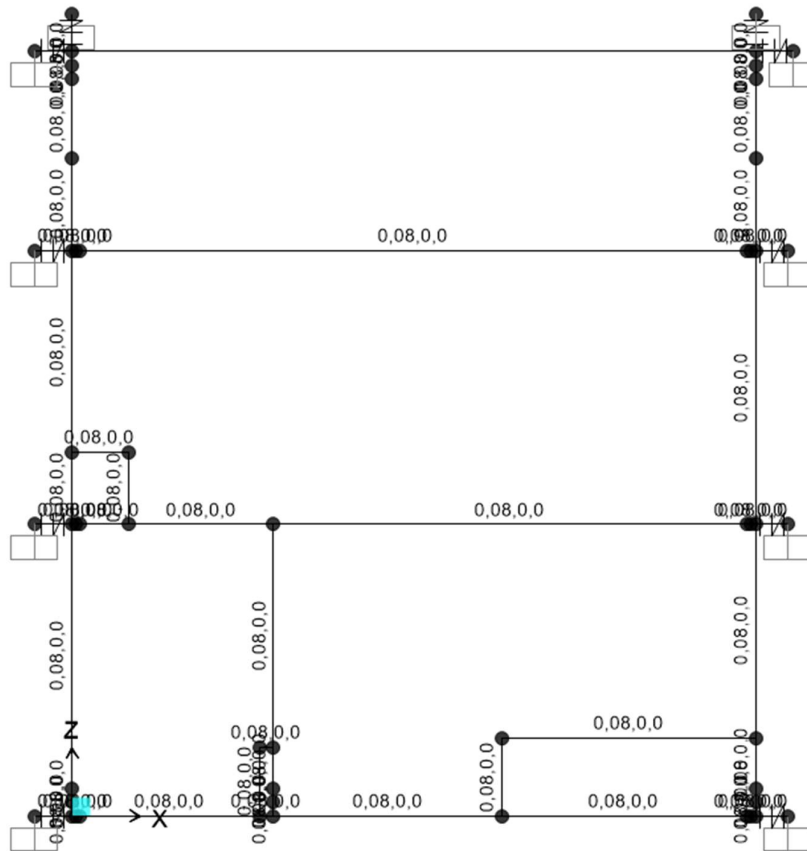


Figura 63.S3 inerzia sismica della struttura

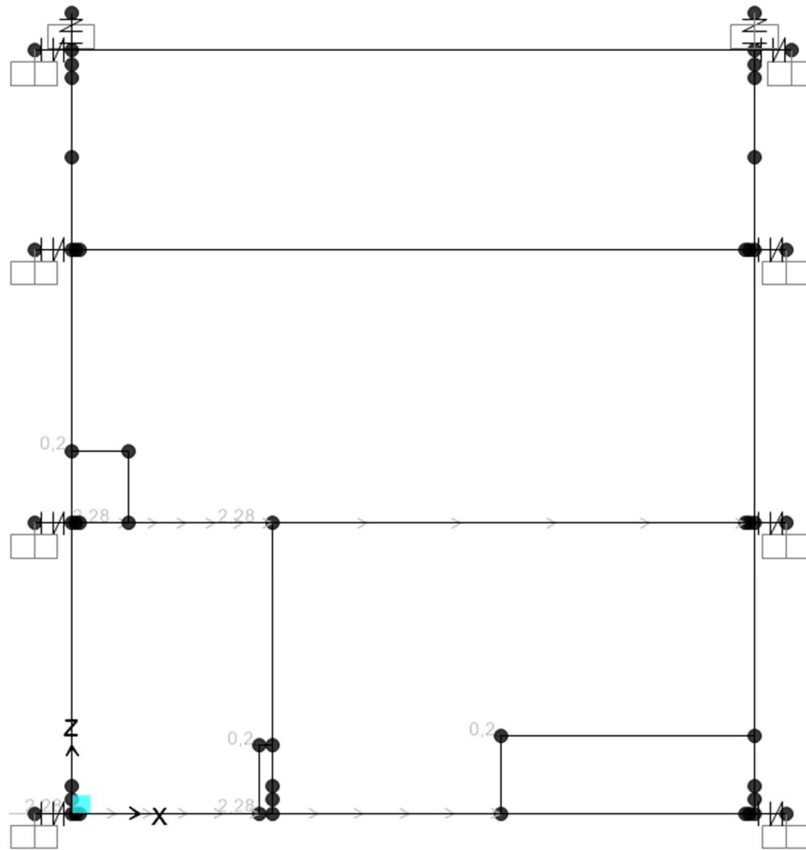


Figura 64.S2 inerzia sismica dei permanenti portati



12.5 Sollecitazioni

Di seguito si espongono le sollecitazioni ottenute dagli involuipi (ENV) dei vari stati limite considerati.

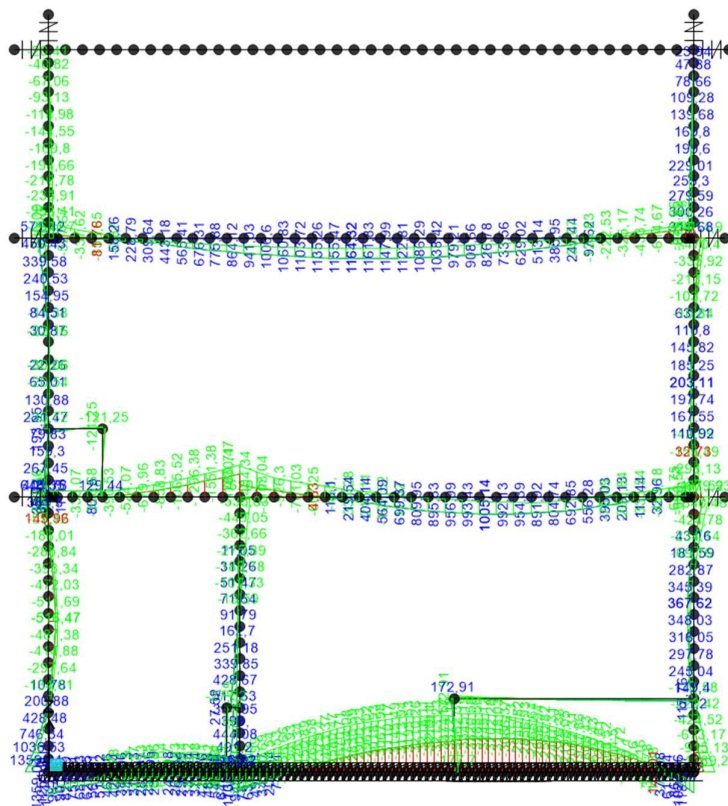


Figura 65.ENV M SLU/SLV

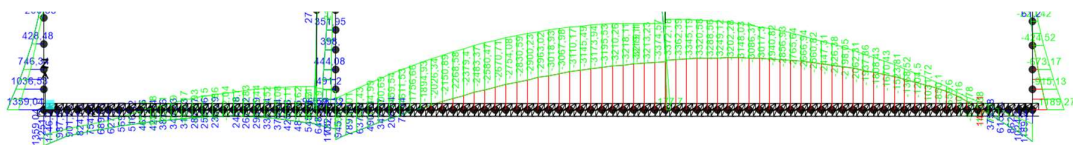


Figura 66.ENV M SLU/SLV fondazione

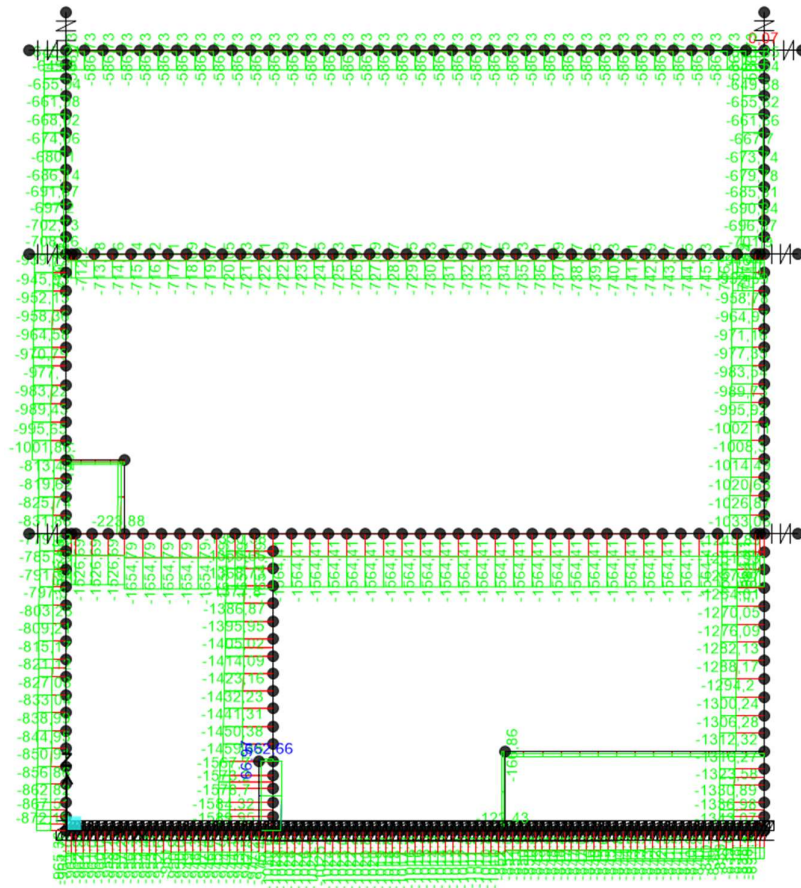


Figura 67.ENV N SLU/SLV

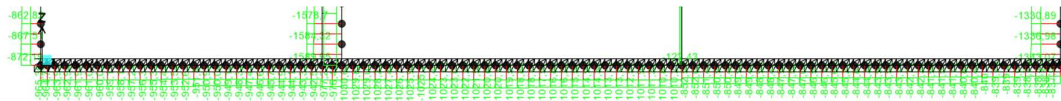


Figura 68.ENV N SLU/SLV fondazione

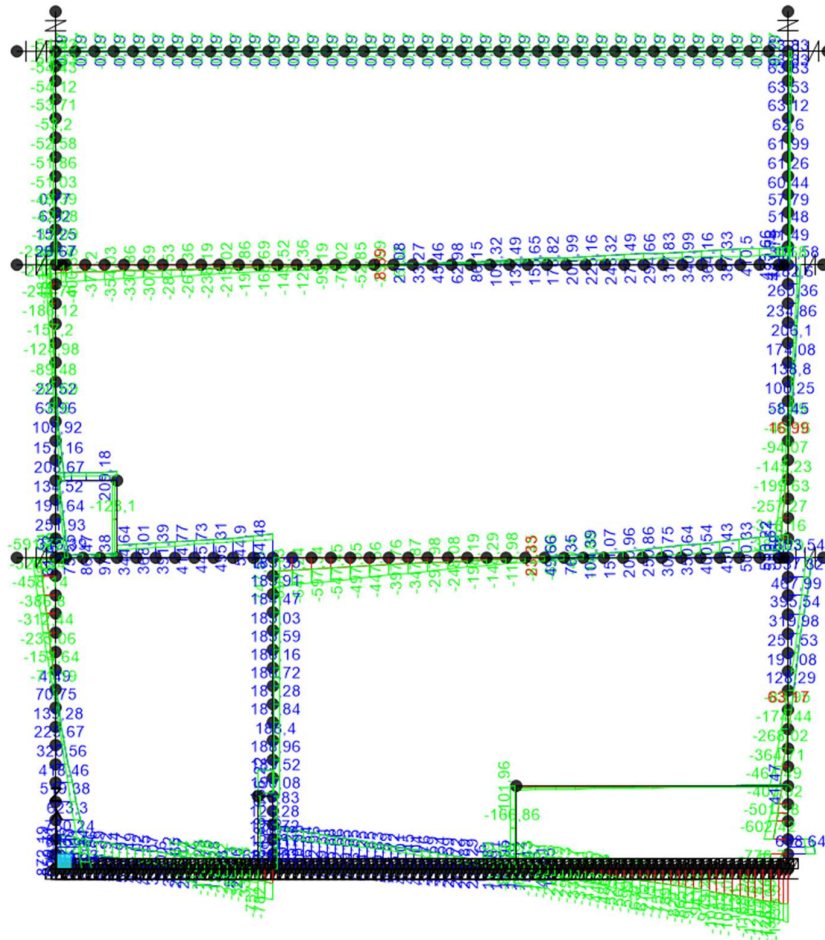


Figura 69.ENV V SLU/SLV

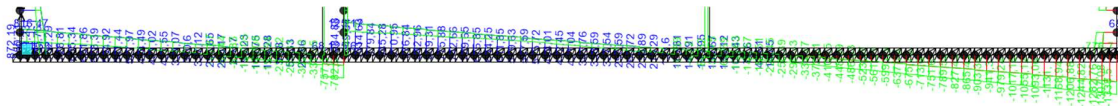


Figura 70.ENV V SLU/SLV fondazione

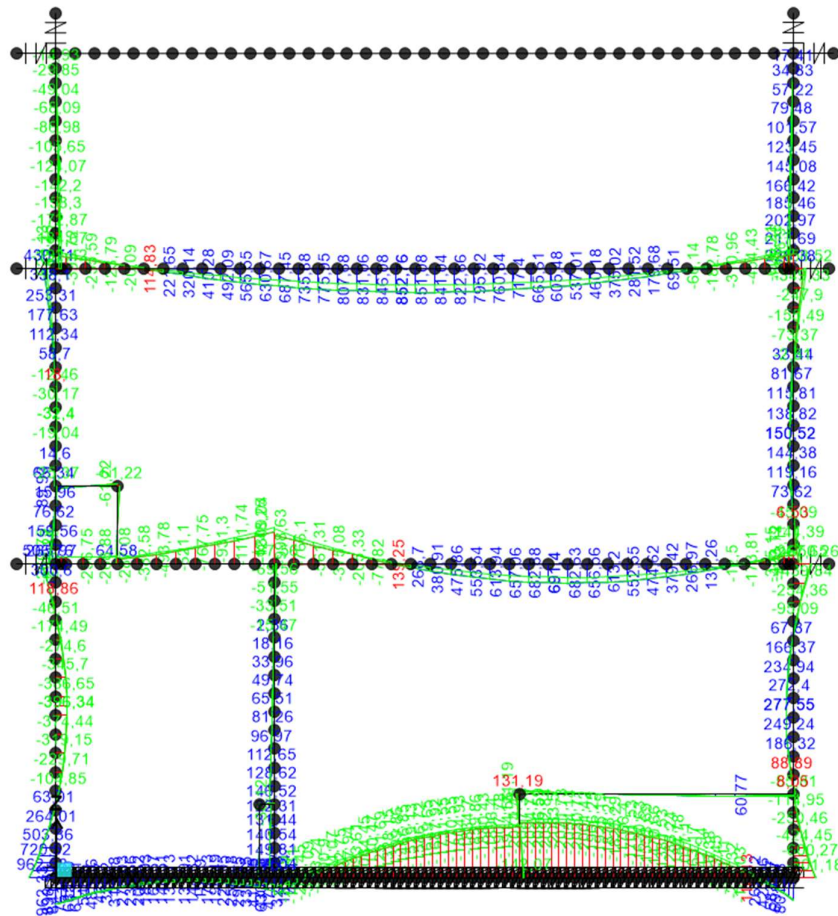


Figura 71.ENV M RARA

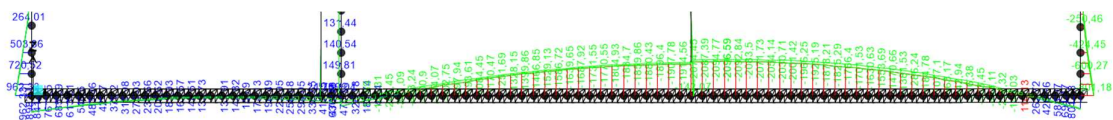


Figura 72.ENV M RARA fondazione

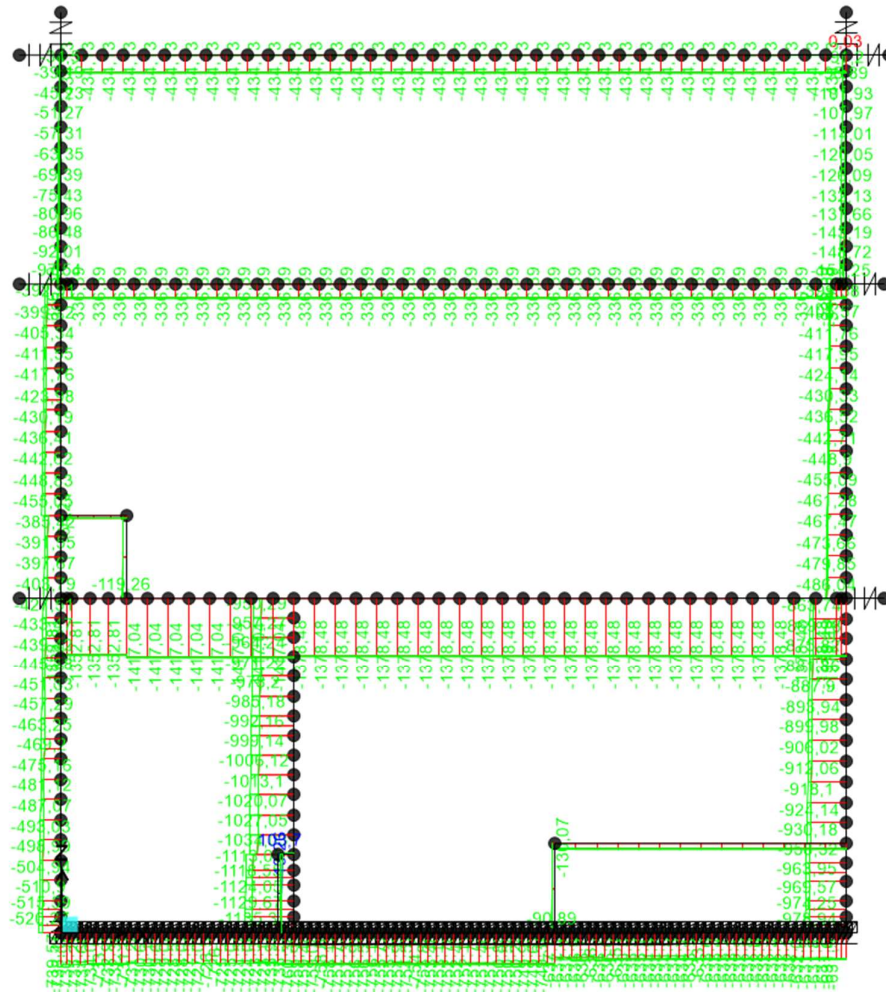


Figura 73.ENV N RARA

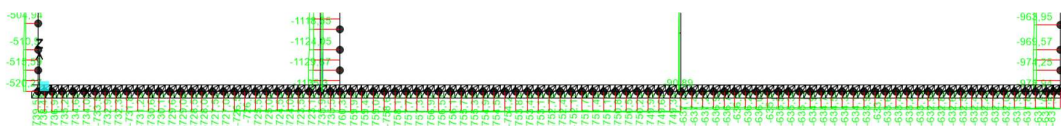


Figura 74.ENV N RARA fondazione

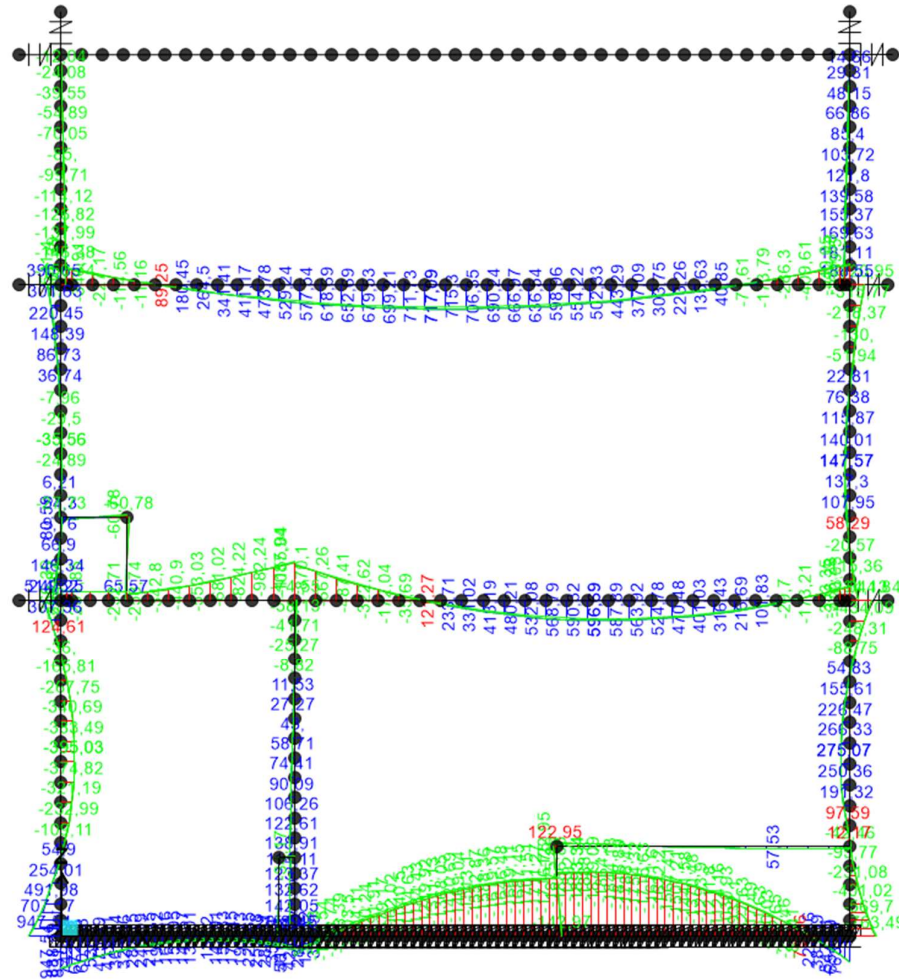


Figura 75.ENV M FREQUENTE

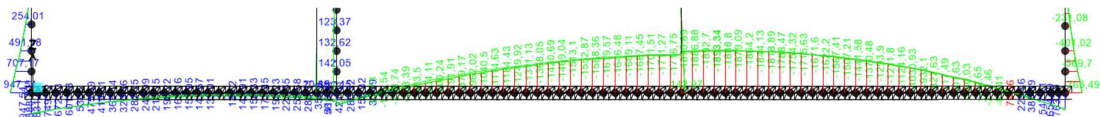


Figura 76.ENV M FREQUENTE fondazione

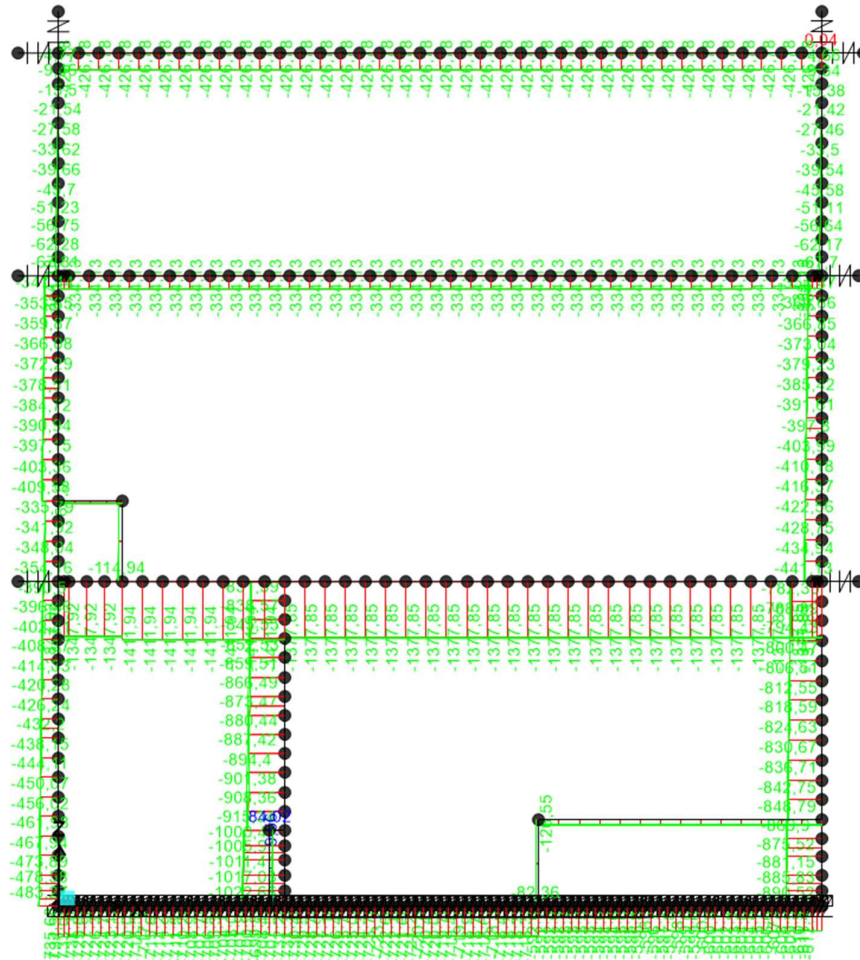


Figura 77.ENV N FREQUENTE

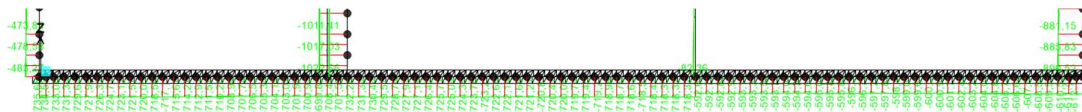


Figura 78.ENV N FREQUENTE fondazione

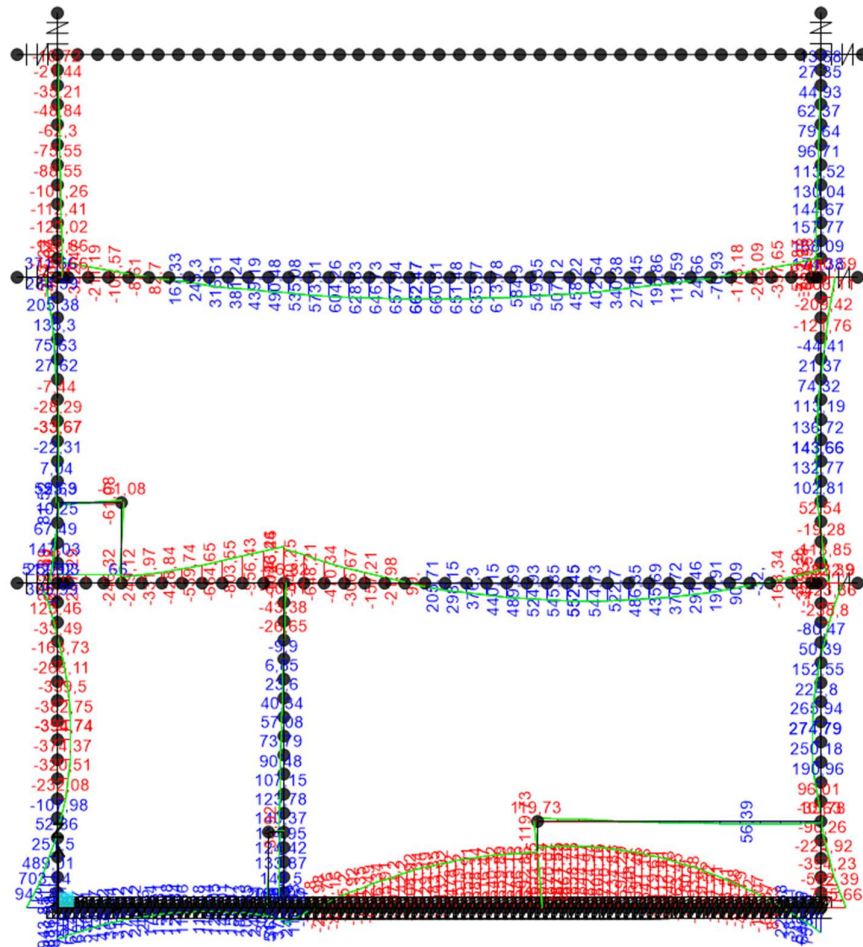


Figura 79.ENV M QUASI PERMANENTE

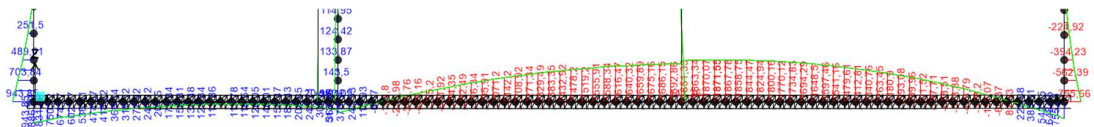


Figura 80.ENV M QUASI PERMANENTE fondazione

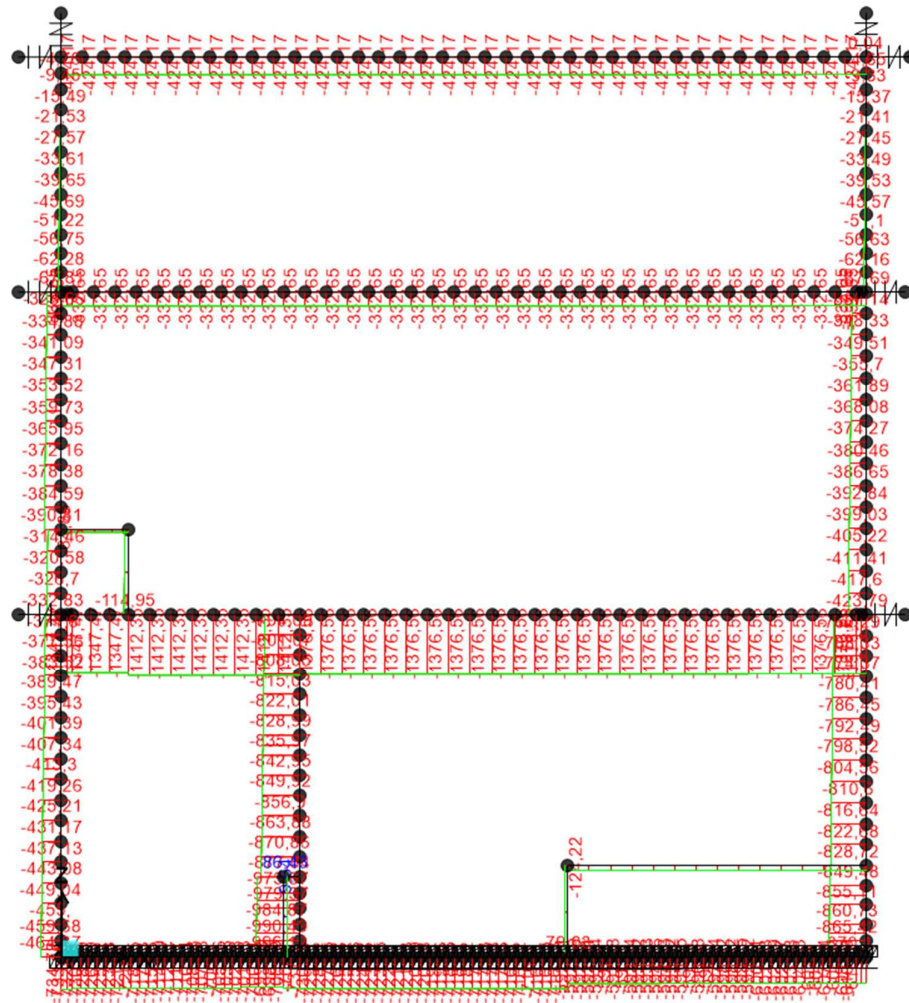


Figura 81.ENV N QUASI PERMANENTE

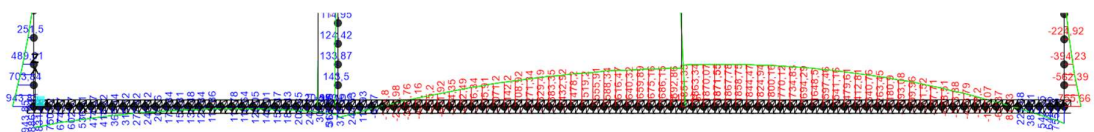



Figura 82.ENV N QUASI PERMANENTE fondazione

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

12.6 Deformate

Di seguito si espongono le deformate ottenute dagli involuipi (ENV) dei vari stati limite considerati.

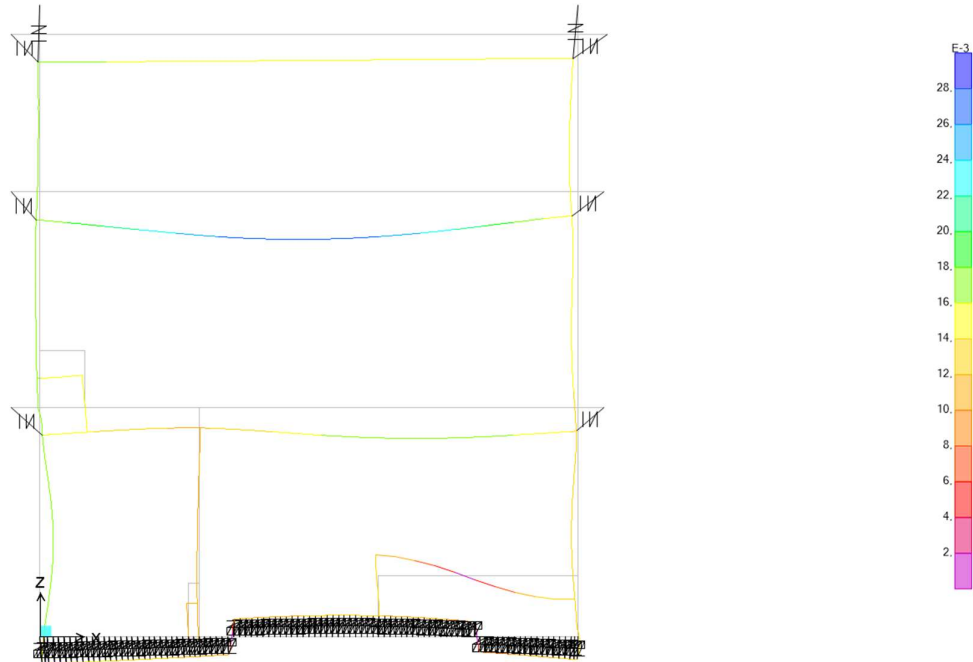


Figura 83.DEFORMATA SLU



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

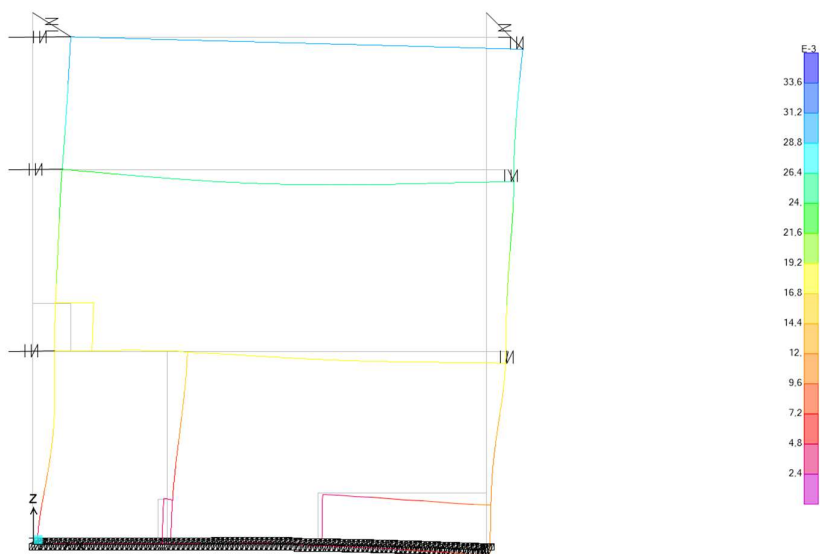


Figura 84.DEFORMATA SLV

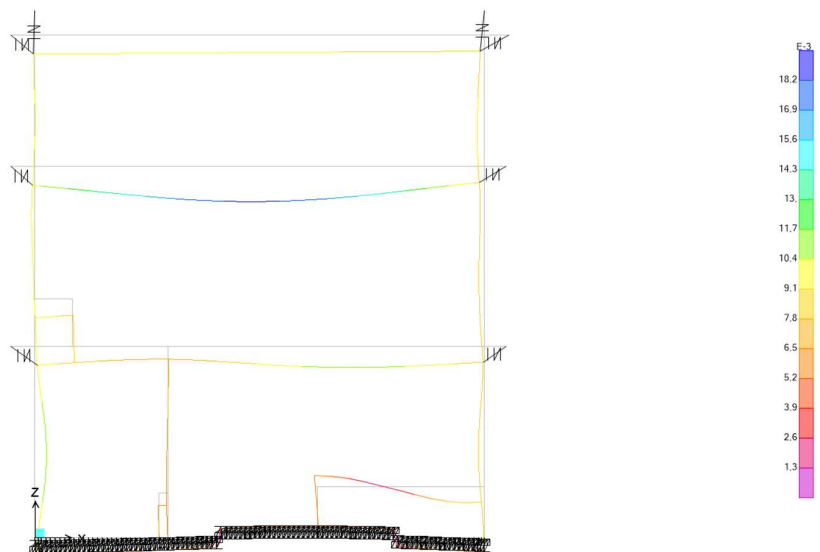


Figura 85.DEFORMATA SLE RARA



13.VERIFICHE STRUTTURE INTERNE

Si riportano di seguito le verifiche effettuate sul sistema considerando le sollecitazioni massime e minime agenti. Le verifiche allo stato limite di esercizio prendono come riferimento i valori limite da Normativa indicati nei paragrafi §11.1.1 e §11.1.2.

Le verifiche sono state effettuate mediante un foglio di calcolo, che utilizza la seguente simbologia e parametri:

Tabella 35.Parametri operativi per la verifica del CLS armato

materiali			
calcestruzzo		acciaio	
Rck	37 [MPa]	f _{yk}	450 [Mpa]
f _{ck}	30,7 [Mpa]	γ _s	1,15
γ _c	1,5	f _{yd}	391,3 [Mpa]
α _{cc}	0,85	E _s	210000 [Mpa]
f _{cd}	17,4 [Mpa]	ε _{uk}	75 [‰]
v	0,526		
ε _{c2}	2,0 [‰]		
ε _{cu2}	3,5 [‰]		
α _e	15,0		
k _t	0,4		
k ₁	0,8		
k ₃	3,4		
k ₄	0,425		

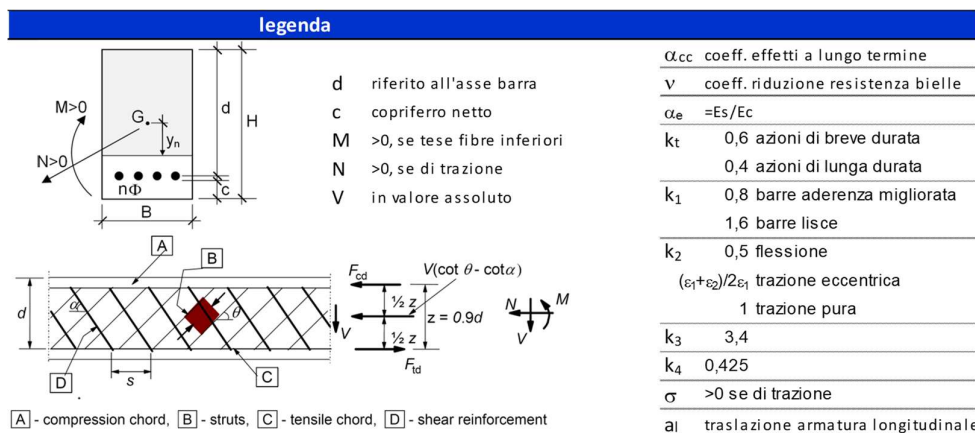



Figura 86. Convenzioni adottate per la verifica sezione in c.a.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Si definisce la seguente nomenclatura delle sezioni della struttura in esame:

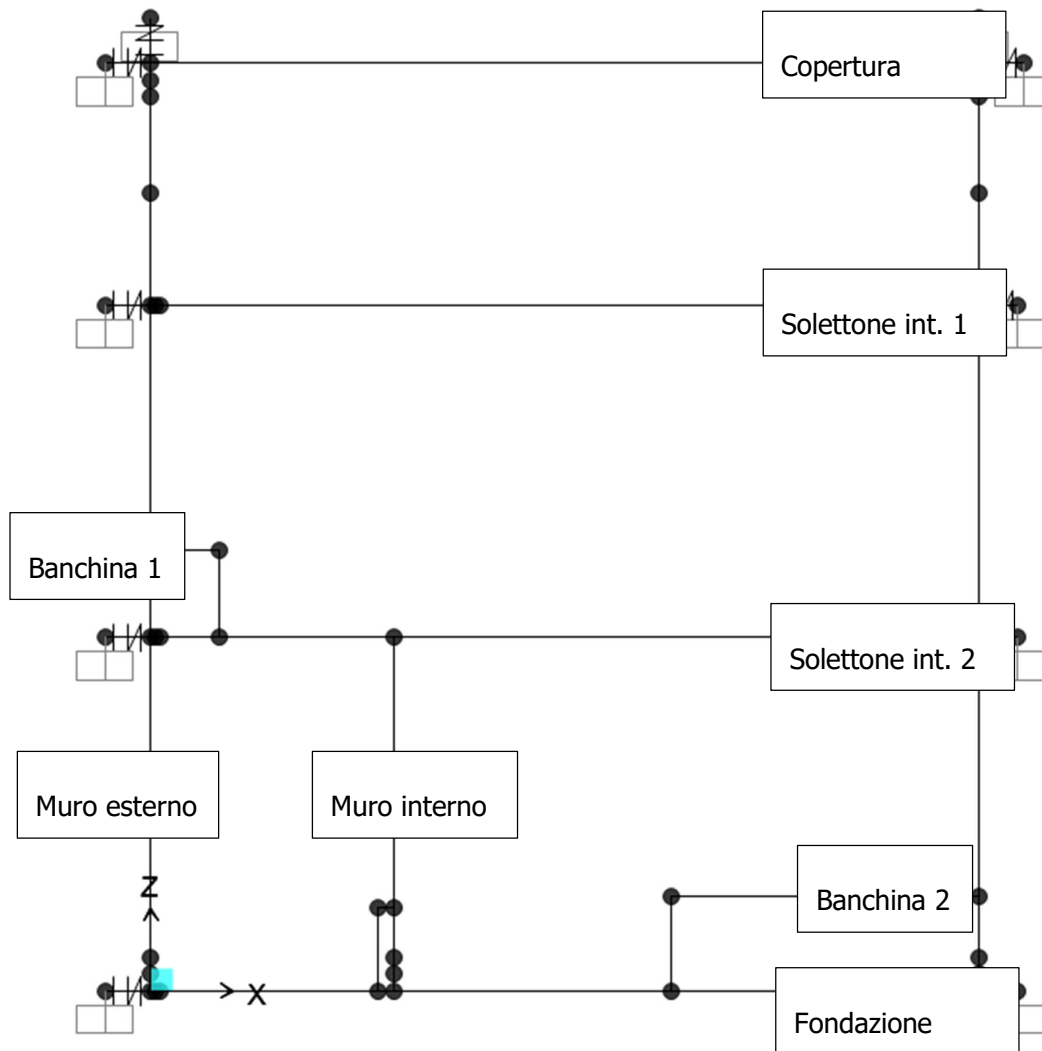



Figura 87. Legenda delle componenti strutturali

Sulla base di tali definizioni si mostrano le verifiche effettuate.


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

13.1 Fondazione estremi

La soletta (C30/37) ha uno spessore di 150 cm ed agli estremi è armata con 5 ϕ 24 superiore e 5 ϕ 24 inferiori, in longitudinale si dispongono ϕ 16/20. A taglio si dispongono degli spilli ϕ 12/20x20. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale (ϕ 16) ed il diametro delle staffe (ϕ 12).

geometria					sollecitazioni e risultati					
sezione trasversale					SLE RARA	SLU				
B	H	c	d	z	M _{Ek}	841,00	[kNm]	M _{Ed}	1251,00	[kNm]
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	N _{Ek}	0,00	[kN]	N _{Ed}	0,00	[kN]
100	150	2,8	146,0	131,4	tensioni e fessure			V _{Ed}	829,00	[kN]
armatura longitudinale					M _{dec}	0,0	[kNm]			
n _{barre}	ϕ	d	A _{sl}		M _{cr}	1018,0	[kNm]	M _{Rd}	1275,5	[kNm]
	[mm]	[cm]	[cm ²]					FS	1,02	
5	24	9,0	22,62		γ_n	-48,65	[cm]	taglio		
5	24	146,0	22,62		$\sigma_{c,min}$	-4,0	[MPa]	V _{Rdc}	454,1	[kN]
					$\sigma_{s,min}$	-39,3	[MPa]	predisporre armatura a taglio		
					$\sigma_{s,max}$	271,0	[MPa]			
armatura a taglio					k ₂	0,5		V _{Rds}	2518,0	[kN]
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}	$\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm}$	-	[%]	V _{Rdmax}	5211,1	[kN]
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]	S _{r,max}	-	[cm]	θ	30,0	[°]
5	12	20	90	5,65	W _k	-	[mm]	sezione	duttile	
								al	113,8	[cm]


Figura 88.Verifica sezione soletta fondazione in c.a. allo SLU e SLE Rara (Estremi)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q.PERM	
M_{Ek}	808,90 [kNm]	M_{Ek}	808,00 [kNm]
N_{Ek}	0,00 [kN]	N_{Ek}	0,00 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M_{dec}	0,0 [kNm]	M_{dec}	0,0 [kNm]
M_{cr}	1009,6 [kNm]	M_{cr}	1009,6 [kNm]
y_n	-49,17 [cm]	y_n	-49,17 [cm]
$\sigma_{c,min}$	-4,0 [MPa]	$\sigma_{c,min}$	-4,0 [MPa]
$\sigma_{s,min}$	-39,5 [MPa]	$\sigma_{s,min}$	-39,5 [MPa]
$\sigma_{s,max}$	270,2 [MPa]	$\sigma_{s,max}$	269,9 [MPa]
k_2	0,5	k_2	0,5
$\varepsilon_{sm-\varepsilon_{cm}}$	- [‰]	$\varepsilon_{sm-\varepsilon_{cm}}$	- [‰]
$S_{r,max}$	- [cm]	$S_{r,max}$	- [cm]
w_k	- [mm]	w_k	- [mm]

Figura 89. Verifica sezione soletta di fondazione in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Estremi)

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4$ mm e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

13.2 Fondazione mezzeria

La soletta (C30/37) ha uno spessore di 150 cm ed in mezzeria è armata inferiormente con $\phi 22/20$ e superiormente con doppio strato $\phi 22/20$ e $\phi 26/10$, in longitudinale si dispongono $\phi 16/20$. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale ($\phi 16$) ed il diametro delle staffe ($\phi 12$).

geometria					sollecitazioni e risultati			
sezione trasversale					SLE RARA	SLU		
B	H	c	d	z	M _{Ek}	N _{Ek}	M _{Ed}	N _{Ed}
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
100	150	7,8	139,6	125,6	2065,80	0,00	3385,11	0,00
armatura longitudinale					tensioni e fessure			
nbarre	ϕ	d	A _{sl}		M _{dec}		V _{Ed}	
	[mm]	[cm]	[cm ²]		[kNm]		[kN]	
5	22	8,9	19,01		0,0		0,00	
5,0	22	135,9	19,01		1134,9		3732,3	
10	26	140,9	53,09				1,10	
armatura a taglio					taglio			
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}	y _n	$\sigma_{c,min}$	V _{Rdc}	
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]	[cm]	[MPa]	[kN]	
0	12	20	90	0,00	-31,60	-6,9	438,2	
						-81,8	non serve armatura a taglio	
						231,1		
					k ₂		V _{Rds}	
					0,5		0,0	
					$\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$	0,79	V _{Rdmax}	4982,1
					[%]			[kN]
					S _{r,max}	44,3	θ	30,0
					[cm]		sezione	duttile
					W _k	0,350	al	139,6
					[mm]			[cm]


Figura 90.Verifica sezione soletta di fondazione in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q. PERM	
M _{Ek}	1870,20 [kNm]	M _{Ek}	1844,80 [kNm]
N _{Ek}	0,00 [kN]	N _{Ek}	0,00 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M _{dec}	0,0 [kNm]	M _{dec}	0,0 [kNm]
M _{cr}	1134,9 [kNm]	M _{cr}	1134,9 [kNm]
y_n		y_n	
y _n	-31,60 [cm]	y _n	-31,60 [cm]
σ _{c,min}	-6,2 [MPa]	σ _{c,min}	-6,1 [MPa]
σ _{s,min}	-74,0 [MPa]	σ _{s,min}	-73,0 [MPa]
σ _{s,max}	209,2 [MPa]	σ _{s,max}	206,4 [MPa]
k₂		k₂	
k ₂	0,5	k ₂	0,5
ε _{sm} -ε _{cm}	0,69 [%]	ε _{sm} -ε _{cm}	0,67 [%]
s _{r,max}	44,3 [cm]	s _{r,max}	44,3 [cm]
w _k	0,304 [mm]	w _k	0,298 [mm]

Figura 91. Verifica sezione soletta di fondazione in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Mezzeria)

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4$ mm e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

13.3 Muri laterali estremità tra fondazione e solettone intermedio 2

Il muro laterale (C30/37) ha uno spessore di 50 cm ed all'estremità è armato esternamente con doppio strato $10\phi 26 + 5\phi 26$ ed internamente con $\phi 26/20$, in longitudinale si dispongono $\phi 16/20$. A taglio si dispongono degli spilli $\phi 14/20 \times 20$. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale ($\phi 16$) ed il diametro delle staffe ($\phi 12$).

geometria					sollecitazioni e risultati			
sezione trasversale					SLE RARA	SLU		
B	H	c	d	z	M _{Ek}	N _{Ek}	M _{Ed}	N _{Ed}
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
100	50	8,0	39,0	35,1	504,00	-462,00	1036,50	-652,00
armatura longitudinale					tensioni e fessure			
nbarre	ϕ	d	A _{sl}		M _{dec}		V _{Ed}	
	[mm]	[cm]	[cm ²]		[kNm]		[kN]	
5	26	9,3	26,55		M _{cr}	173,9	MR _d	1054,6
5	26	35,5	26,55				FS	1,02
10	26	40,7	53,09		y _n	-3,47	taglio	
armatura a taglio					predispone armatura a taglio			
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}	$\sigma_{c,min}$	-13,8	V _{Rdc}	246,2
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]	$\sigma_{s,min}$	-117,4	VR _d s	
5	14	20	90	7,70	$\sigma_{s,max}$	184,0	914,7	VR _{dmax}
					k ₂	0,5	1390,8	θ
					$\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$	0,73	30,0	sezione
					S _{r,max}	32,5	ductile	ai
					w _k	0,235	30,4	[cm]


Figura 92. Verifica sezione muri laterali tra fondazione e solettone intermedio 2 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Estremi)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q. PERM	
M_{Ek}	492,00 [kNm]	M_{Ek}	489,00 [kNm]
N_{Ek}	-462,00 [kN]	N_{Ek}	-462,00 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M_{dec}	33,8 [kNm]	M_{dec}	33,8 [kNm]
M_{cr}	173,9 [kNm]	M_{cr}	173,9 [kNm]
y_n	-3,42 [cm]	y_n	-3,41 [cm]
$\sigma_{c,min}$	-13,5 [MPa]	$\sigma_{c,min}$	-13,4 [MPa]
$\sigma_{s,min}$	-114,9 [MPa]	$\sigma_{s,min}$	-114,3 [MPa]
$\sigma_{s,max}$	178,9 [MPa]	$\sigma_{s,max}$	177,6 [MPa]
k_2	0,5	k_2	0,5
$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	0,70 [‰]	$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	0,70 [‰]
$s_{r,max}$	32,5 [cm]	$s_{r,max}$	32,5 [cm]
w_k	0,228 [mm]	w_k	0,226 [mm]

Figura 93. Verifica sezione muri laterali tra fondazione e solettone intermedio 2 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Estremi)

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4$ mm e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

13.4 Muri laterali mezzeria tra fondazione e solettone intermedio 2

Il muro laterale (C30/37) ha uno spessore di 50 cm ed in mezzeria è armato esternamente con $\phi 26/10$ ed internamente con $\phi 24/10$, in longitudinale si dispongono $\phi 16/20$. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale ($\phi 16$) ed il diametro delle staffe ($\phi 12$).

geometria					sollecitazioni e risultati			
sezione trasversale					SLE RARA		SLU	
B	H	c	d	z	M _{Ek}	N _{Ek}	M _{Ed}	N _{Ed}
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
100	50	7,8	41,0	36,9	396,00	-409,00	516,00	-472,00
armatura longitudinale					tensioni e fessure			
nbarre	ϕ	d	A _{sl}		M _{ddec}	M _{cr}	V _{Ed}	MR _d
	[mm]	[cm]	[cm ²]		[kNm]	[kNm]	[kN]	[kNm]
10	26	9,1	53,09		36,4	171,4	0,00	706,9
10,0	24	41,0	45,24		FS			
					y _n	-7,26	1,37	
					taglio			
					σ _{c,min}		V _{Rdc}	234,1
					σ _{s,min}		non serve armatura a taglio	
					σ _{s,max}		VR _d s	
					k ₂		0,0	
					ε _{sm-ε_{cm}}		VR _{dmax}	
					s _{r,max}		1463,4	
					w _k		θ	
							sezione duttile	
							ai	
							41,0	


Figura 94. Verifica sezione muri laterali tra fondazione e solettone intermedio 2 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q. PERM	
M_{Ek}	395,00 [kNm]	M_{Ek}	394,70 [kNm]
N_{Ek}	-409,00 [kN]	N_{Ek}	-409,00 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M_{dec}	36,4 [kNm]	M_{dec}	36,4 [kNm]
M_{cr}	171,4 [kNm]	M_{cr}	171,4 [kNm]
y_n	-7,25 [cm]	y_n	-7,25 [cm]
$\sigma_{c,min}$	-10,6 [MPa]	$\sigma_{c,min}$	-10,6 [MPa]
$\sigma_{s,min}$	-77,3 [MPa]	$\sigma_{s,min}$	-77,3 [MPa]
$\sigma_{s,max}$	207,7 [MPa]	$\sigma_{s,max}$	207,7 [MPa]
k_2	0,5	k_2	0,5
$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	0,77 [‰]	$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	0,77 [‰]
$s_{r,max}$	36,2 [cm]	$s_{r,max}$	36,2 [cm]
w_k	0,280 [mm]	w_k	0,280 [mm]

Figura 95. Verifica sezione muri laterali tra fondazione e solettone intermedio 2 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Mezzeria)

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4$ mm e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

13.5 Muri laterali estremità tra solettone intermedio 2 e solettone intermedio 1

Il muro laterale (C30/37) ha uno spessore di 50 cm ed all'estremità è armato esternamente con 10 ϕ 26 ed internamente 5 ϕ 16, in longitudinale si dispongono ϕ 16/20. A taglio si dispongono degli spilli ϕ 12/20x20. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale (ϕ 16) ed il diametro delle staffe (ϕ 12).

geometria					sollecitazioni e risultati					
sezione trasversale					SLE RARA		SLU			
B	H	c	d	z	M _{Ek}	433,45	[kNm]	M _{Ed}	756,00	[kNm]
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	N _{Ek}	-373,00	[kN]	N _{Ed}	-404,00	[kN]
100	50	7,8	40,9	36,8	tensioni e fessure		V _{Ed}	535,00	[kN]	
armatura longitudinale					M _{dec}	27,9	[kNm]			
nbarre	ϕ	d	A _{sI}		M _{cr}	159,2	[kNm]	MRd	782,2	[kNm]
	[mm]	[cm]	[cm ²]					FS	1,03	
5	16	8,6	10,05		y _n	-4,78	[cm]	taglio		
10,0	26	40,9	53,09		$\sigma_{c,min}$	-13,2	[MPa]	V _{Rdc}	225,3	[kN]
					$\sigma_{s,min}$	-113,8	[MPa]	predisporre armatura a taglio		
					$\sigma_{s,max}$	202,6	[MPa]			
armatura a taglio					k ₂	0,5		V _{Rds}	705,4	[kN]
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}	$\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$	0,78	[%]	V _{Rdmax}	1459,8	[kN]
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]	S _{r,max}	34,8	[cm]	θ	30,0	[°]
5	12	20	90	5,65	w _k	0,270	[mm]	sezione duttile		
								al	31,9	[cm]


Figura 96. Verifica sezione muri laterali tra solettone intermedio 2 e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Estremi)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q. PERM	
M_{Ek}	428,00 [kNm]	M_{Ek}	417,00 [kNm]
N_{Ek}	-373,00 [kN]	N_{Ek}	-373,00 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M_{dec}	27,9 [kNm]	M_{dec}	27,9 [kNm]
M_{cr}	159,2 [kNm]	M_{cr}	159,2 [kNm]
y_n	-4,76 [cm]	y_n	-4,70 [cm]
$\sigma_{c,min}$	-13,0 [MPa]	$\sigma_{c,min}$	-12,7 [MPa]
$\sigma_{s,min}$	-112,5 [MPa]	$\sigma_{s,min}$	-109,9 [MPa]
$\sigma_{s,max}$	199,6 [MPa]	$\sigma_{s,max}$	193,7 [MPa]
k_2	0,5	k_2	0,5
$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	0,76 [‰]	$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	0,73 [‰]
$S_{r,max}$	34,8 [cm]	$S_{r,max}$	34,8 [cm]
w_k	0,265 [mm]	w_k	0,255 [mm]

Figura 97. Verifica sezione muri laterali tra solettone intermedio 2 e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Estremi)

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4$ mm e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

13.6 Muri laterali mezzeria tra solettone intermedio 2 ed intermedio 1

Il muro laterale (C30/37) ha uno spessore di 50 cm ed in mezzeria è armato esternamente con $\phi 20/20$ ed internamente con $\phi 16/20$, in longitudinale si dispongono $\phi 16/20$. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale ($\phi 16$) ed il diametro delle staffe ($\phi 12$).

geometria					sollecitazioni e risultati			
sezione trasversale					SLE RARA		SLU	
B	H	c	d	z	M _{Ek}	N _{Ek}	M _{Ed}	N _{Ed}
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
100	50	7,8	41,4	37,3	144,20	-387,00	195,60	-384,70
armatura longitudinale					tensioni e fessure			
nbarre	ϕ	d	A _{sl}		M _{dec}		V _{Ed}	
	[mm]	[cm]	[cm ²]		[kNm]		[kN]	
5	20	8,8	15,71		33,4		0,00	
5,0	16	41,4	10,05		M _{cr}	143,9	MR _d	248,2
armatura a taglio					taglio			
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}	y _n	$\sigma_{c,min}$	$\sigma_{s,min}$	$\sigma_{s,max}$
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0	12	20	90	0,00	-10,27	-6,9	-41,9	188,1
					$\sigma_{c,max}$			
					k ₂	0,5		
					$\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$	0,54		
					S _{r,max}	58,3		
					W _k	0,314		
							V _{Rdc}	225,0
							non serve armatura a taglio	
							V _{Rds}	0,0
							V _{Rdmax}	1477,7
							θ	30,0
							sezione duttile	
							al	41,4


Figura 98. Verifica sezione muri laterali tra solettone intermedio 2 e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q. PERM	
M_{Ek}	139,00 [kNm]	M_{Ek}	135,30 [kNm]
N_{Ek}	-387,00 [kN]	N_{Ek}	-387,00 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M_{dec}	33,4 [kNm]	M_{dec}	33,4 [kNm]
M_{cr}	143,9 [kNm]	M_{cr}	143,9 [kNm]
y_n	-9,99 [cm]	y_n	-9,77 [cm]
$\sigma_{c,min}$	-6,6 [MPa]	$\sigma_{c,min}$	-6,4 [MPa]
$\sigma_{s,min}$	-41,2 [MPa]	$\sigma_{s,min}$	-40,7 [MPa]
$\sigma_{s,max}$	175,1 [MPa]	$\sigma_{s,max}$	165,9 [MPa]
k_2	0,5	k_2	0,5
$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	- [‰]	$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	- [‰]
$S_{r,max}$	- [cm]	$S_{r,max}$	- [cm]
w_k	- [mm]	w_k	- [mm]

Figura 99. Verifica sezione muri laterali tra solettone intermedio 2 e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Mezzeria)

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4 \text{ mm}$ e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

13.7 Muri laterali estremità tra copertura e solettone intermedio 1

Il muro laterale (C30/37) ha uno spessore di 50 cm ed all'estremità è armato esternamente con doppio strato $7.5\phi 20$ esterno e $5\phi 20$ interno. Mentre internamente si ha $5\phi 16$, in longitudinale si dispongono $\phi 16/20$. A taglio si dispongono spilli $\phi 12/20 \times 40$. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale ($\phi 16$) ed il diametro degli spilli ($\phi 12$).

geometria					sollecitazioni e risultati			
sezione trasversale					SLE RARA		SLU	
B	H	c	d	z	M _{Ek}	N _{Ek}	M _{Ed}	N _{Ed}
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
100	50	7,8	39,6	35,6	342,40	-337,00	532,60	-400,00
armatura longitudinale					tensioni e fessure			
nbarre	ϕ	d	A _{sl}		M _{dec}		M _{Rd}	FS
	[mm]	[cm]	[cm ²]		[kNm]		[kNm]	
5	16	8,6	10,05		26,1		602,1	1,13
5,0	20	37,2	15,71		taglio			
7,5	20	41,2	23,56		predispone armatura a taglio			
armatura a taglio								
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}	y _n	$\sigma_{c,min}$	$\sigma_{s,min}$	$\sigma_{s,max}$
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
5	12	40	90	5,65	-6,91	-11,9	-93,5	227,7
					k ₂	$\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$	S _{r,max}	w _k
						[%]	[cm]	[mm]
					0,5	0,85	35,7	0,303
					sezione duttile			
					ai			
					V _{Rdc}	219,4 [kN]		
					V _{Rds}	341,5 [kN]		
					V _{Rdmax}	1413,4 [kN]		
					θ	30,0 [°]		
					ai	30,9 [cm]		


Figura 100. Verifica sezione muri laterali tra copertura e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Estremi)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q. PERM	
M_{Ek}	309,00 [kNm]	M_{Ek}	299,20 [kNm]
N_{Ek}	-337,00 [kN]	N_{Ek}	-337,00 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M_{dec}	26,1 [kNm]	M_{dec}	26,1 [kNm]
M_{cr}	148,0 [kNm]	M_{cr}	148,0 [kNm]
y_n	-6,67 [cm]	y_n	-6,59 [cm]
$\sigma_{c,min}$	-10,8 [MPa]	$\sigma_{c,min}$	-10,4 [MPa]
$\sigma_{s,min}$	-85,7 [MPa]	$\sigma_{s,min}$	-83,3 [MPa]
$\sigma_{s,max}$	201,3 [MPa]	$\sigma_{s,max}$	193,5 [MPa]
k_2	0,5	k_2	0,5
$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	0,72 [‰]	$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	0,69 [‰]
$S_{r,max}$	35,7 [cm]	$S_{r,max}$	35,6 [cm]
w_k	0,258 [mm]	w_k	0,245 [mm]

Figura 101. Verifica sezione muri laterali tra copertura e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Estremi)

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4$ mm e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

13.8 Muri laterali mezzeria tra copertura e solettone intermedio 1

Il muro laterale (C30/37) ha uno spessore di 50 cm ed in mezzeria è armato internamente con $7.5\phi 20$ ed esternamente con $\phi 16/20$, in longitudinale si dispongono $\phi 16/20$. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale ($\phi 16$) ed il diametro delle staffe ($\phi 12$).

geometria					sollecitazioni e risultati			
sezione trasversale					SLE RARA	SLU		
B	H	c	d	z	M _{Ek}	N _{Ek}	M _{Ed}	N _{Ed}
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
100	50	7,8	41,2	37,1	221,90	-61,00	316,00	-80,00
armatura longitudinale					tensioni e fessure			
n _{barre}	ϕ	d	A _{sl}		M _{dec}		V _{Ed}	
	[mm]	[cm]	[cm ²]		[kNm]		[kN]	
5	16	8,6	10,05		5,0		0,00	
7,5	20	41,2	23,56		121,8			
armatura a taglio					taglio			
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}	y _n	$\sigma_{c,min}$	V _{Rdc}	
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]	[cm]	[MPa]	[kN]	
0	12	20	90	0,00	-10,99	-8,4	186,5	
						-48,8	non serve armatura a taglio	
						245,6		
					k ₂		V _{Rds}	0,0 [kN]
					0,5		V _{Rdmax}	1470,5 [kN]
					$\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$	0,80 [%]	θ	30,0 [°]
					s _{r,max}	43,8 [cm]	sezione	duttile
					w _k	0,351 [mm]	al	41,2 [cm]


Figura 102.Verifica sezione muri laterali tra copertura e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q. PERM	
M_{Ek}	185,70 [kNm]	M_{Ek}	172,80 [kNm]
N_{Ek}	-61,00 [kN]	N_{Ek}	-61,00 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M_{dec}	5,0 [kNm]	M_{dec}	5,0 [kNm]
M_{cr}	121,8 [kNm]	M_{cr}	121,8 [kNm]
y_n	-10,89 [cm]	y_n	-10,84 [cm]
$\sigma_{c,min}$	-7,1 [MPa]	$\sigma_{c,min}$	-6,6 [MPa]
$\sigma_{s,min}$	-41,4 [MPa]	$\sigma_{s,min}$	-38,8 [MPa]
$\sigma_{s,max}$	203,4 [MPa]	$\sigma_{s,max}$	188,4 [MPa]
k_2	0,5	k_2	0,5
$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	0,60 [‰]	$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	0,54 [‰]
$S_{r,max}$	43,8 [cm]	$S_{r,max}$	43,8 [cm]
w_k	0,263 [mm]	w_k	0,236 [mm]

Figura 103. Verifica sezione muri laterali tra copertura e solettone intermedio 1 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Mezzeria)

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4$ mm e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

13.9 Muro interno

Il muro laterale (C30/37) ha uno spessore di 60 cm ed è armato esternamente con $\phi 20/20$ ed internamente con $\phi 20/20$, in longitudinale si dispongono $\phi 16/20$. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale ($\phi 16$).

geometria					sollecitazioni e risultati				
sezione trasversale					SLE RARA	SLU			
B	H	c	d	z	M _{Ek}	N _{Ek}	M _{Ed}	N _{Ed}	V _{Ed}
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]	[kN]
100	60	6,1	52,9	47,6	141,00	-760,00	488,60	-797,60	158,00
armatura longitudinale					tensioni e fessure				
nbarre	ϕ	d	A _{sl}		M _{dec}	M _{cr}	M _{Rd}	FS	
	[mm]	[cm]	[cm ²]		[kNm]	[kNm]	[kNm]		
5	20	7,1	15,71		79,9	245,8	503,8	1,03	
5,0	20	52,9	15,71		taglio				
armatura a taglio					$\sigma_{c,min}$	$\sigma_{s,min}$	$\sigma_{s,max}$	V _{Rdc}	<i>non serve armatura a taglio</i>
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kN]	
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]					
5	0	20	90	0,00	10,20	-3,6	-44,1	316,0	
					$\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$	Sr,max	Wk	V _{Rds}	V _{Rdmax}
					[%]	[cm]	[mm]	[kN]	[kN]
					-	-	-	0,0	1888,1
									θ
									30,0 [°]
									sezione duttile
									ai
									52,9 [cm]


Figura 104. Verifica sezione muro interno in c.a. allo SLU e SLE Rara

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q. PERM	
M_{Ek}	137,00 [kNm]	M_{Ek}	137,00 [kNm]
N_{Ek}	-760,00 [kN]	N_{Ek}	-760,00 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M_{dec}	79,9 [kNm]	M_{dec}	79,9 [kNm]
M_{cr}	245,8 [kNm]	M_{cr}	245,8 [kNm]
y_n	11,26 [cm]	y_n	11,26 [cm]
$\sigma_{c,min}$	-3,5 [MPa]	$\sigma_{c,min}$	-3,5 [MPa]
$\sigma_{s,min}$	-43,1 [MPa]	$\sigma_{s,min}$	-43,1 [MPa]
$\sigma_{s,max}$	14,7 [MPa]	$\sigma_{s,max}$	14,7 [MPa]
k_2	0,5	k_2	0,5
$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	- [‰]	$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	- [‰]
$S_{r,max}$	- [cm]	$S_{r,max}$	- [cm]
w_k	- [mm]	w_k	- [mm]

Figura 105. Verifica sezione muro interno in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4$ mm e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

13.10 Solettone intermedio 1, estemità

La soletta (C30/37) ha uno spessore di 100 cm ed agli estremi è armata con 7.5 ϕ 24 superiore e 5 ϕ 24 inferiori, in longitudinale si dispongono ϕ 16/20. A taglio si dispongono degli spilli ϕ 10/20x40. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 4.5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale (ϕ 16) ed il diametro degli spilli (ϕ 10).

geometria					sollecitazioni e risultati			
sezione trasversale					SLE RARA	SLU		
B	H	c	d	z	M _{Ek}	N _{Ek}	M _{Ed}	N _{Ed}
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
100	100	7,1	91,7	82,5	601,34	0,00	870,00	0,00
armatura longitudinale					tensioni e fessure			
nbarre	ϕ	d	A _{sl}		M _{dec}		V _{Ed}	
	[mm]	[cm]	[cm ²]		[kNm]		[kN]	
5	24	8,3	22,62		0,0		433,81	
7,5	24	91,7	33,93		M _{cr}	481,8		
armatura a taglio					taglio			
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}	y _n	$\sigma_{c,min}$	$\sigma_{s,min}$	$\sigma_{s,max}$
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
5	10	40	90	3,93	-25,90	-5,0	-49,5	211,9
					k ₂	0,5		
					$\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$	0,61		
					S _{r,max}	49,1		
					W _k	0,297		
							V _{Rdc}	316,0
							predisporre armatura a taglio	
							V _{Rds}	549,1
							V _{Rdmax}	3273,0
							θ	30,0
							sezione duttile	
							a _l	71,5


Figura 106. Verifica sezione solettone intermedio 1 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Estremi)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q. PERM			
M_{Ek}	535,20	[kNm]	M_{Ek}	515,00	[kNm]
N_{Ek}	0,00	[kN]	N_{Ek}	0,00	[kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure			
M_{dec}	0,0	[kNm]	M_{dec}	0,0	[kNm]
M_{cr}	481,8	[kNm]	M_{cr}	481,8	[kNm]
y_n	-25,90	[cm]	y_n	-25,90	[cm]
$\sigma_{c,min}$	-4,5	[MPa]	$\sigma_{c,min}$	-4,3	[MPa]
$\sigma_{s,min}$	-44,1	[MPa]	$\sigma_{s,min}$	-42,4	[MPa]
$\sigma_{s,max}$	188,6	[MPa]	$\sigma_{s,max}$	181,5	[MPa]
k_2	0,5		k_2	0,5	
$\varepsilon_{sm-\varepsilon_{cm}}$	0,54	[‰]	$\varepsilon_{sm-\varepsilon_{cm}}$	0,52	[‰]
$S_{r,max}$	49,1	[cm]	$S_{r,max}$	49,1	[cm]
w_k	0,265	[mm]	w_k	0,255	[mm]

Figura 107. Verifica sezione solettone intermedio 1 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Estremi)

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4 \text{ mm}$ e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

13.11 Solettone intermedio 1, mezzeria

La soletta (C30/37) ha uno spessore di 100 cm ed agli estremi è armata con 5 ϕ 20 superiore e 5 ϕ 20 inferiori, in longitudinale si dispongono ϕ 16/20. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 4.5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale (ϕ 16).

geometria					sollecitazioni e risultati					
sezione trasversale					SLE RARA	SLU				
B	H	c	d	z	M _{Ek}	859,10	[kNm]	M _{Ed}	1173,00	[kNm]
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	N _{Ek}	0,00	[kN]	N _{Ed}	0,00	[kN]
100	100	7,1	91,6	82,4	tensioni e fessure			V _{Ed}	0,00	[kN]
armatura longitudinale					M _{dec}	0,0	[kNm]	taglio		
nbarre	ϕ	d	A _{sl}		M _{cr}	491,5	[kNm]	M _{Rd}	1352,6	[kNm]
	[mm]	[cm]	[cm ²]		y _n	-24,18	[cm]	FS	1,15	
5	24	8,3	22,62		$\sigma_{c,min}$	-6,8	[MPa]	V _{Rdc}	315,8	[kN]
7,5	26	91,6	39,82		$\sigma_{s,min}$	-69,2	[MPa]	non serve armatura a taglio		
armatura a taglio					$\sigma_{s,max}$	259,8	[MPa]	taglio		
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}	k ₂	0,5		V _{Rds}	0,0	[kN]
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]	$\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$	0,86	[%]	V _{Rdmax}	3269,5	[kN]
0	10	40	90	0,00	S _{r,max}	47,5	[cm]	θ	30,0	[°]
					w _k	0,407	[mm]	sezione	ductile	
							a _l		91,6	[cm]


Figura 108. Verifica sezione solettone intermedio 1 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q. PERM	
M_{Ek}	723,40 [kNm]	M_{Ek}	668,80 [kNm]
N_{Ek}	0,00 [kN]	N_{Ek}	0,00 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M_{dec}	0,0 [kNm]	M_{dec}	0,0 [kNm]
M_{cr}	491,5 [kNm]	M_{cr}	491,5 [kNm]
y_n	-24,18 [cm]	y_n	-24,18 [cm]
$\sigma_{c,min}$	-5,7 [MPa]	$\sigma_{c,min}$	-5,3 [MPa]
$\sigma_{s,min}$	-58,3 [MPa]	$\sigma_{s,min}$	-53,9 [MPa]
$\sigma_{s,max}$	218,8 [MPa]	$\sigma_{s,max}$	202,3 [MPa]
k_2	0,5	k_2	0,5
$\varepsilon_{sm-\varepsilon_{cm}}$	0,66 [‰]	$\varepsilon_{sm-\varepsilon_{cm}}$	0,58 [‰]
$S_{r,max}$	47,5 [cm]	$S_{r,max}$	47,5 [cm]
w_k	0,314 [mm]	w_k	0,277 [mm]

Figura 109. Verifica sezione solettone intermedio 1 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Mezzeria)

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4$ mm e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

13.12 Solettone intermedio 2, estremità

La soletta (C30/37) ha uno spessore di 100 cm ed agli estremi è armata con 5 ϕ 26 superiore e 5 ϕ 26 inferiori, in longitudinale si dispongono ϕ 16/20. A taglio si dispongono degli spilli ϕ 12/20x40. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 4.5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale (ϕ 16) ed il diametro degli spilli (ϕ 12).

geometria					sollecitazioni e risultati					
sezione trasversale					SLE RARA	SLU				
B	H	c	d	z	M _{Ek}	355,16	[kNm]	M _{Ed}	686,00	[kNm]
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	N _{Ek}	0,00	[kN]	N _{Ed}	0,00	[kN]
100	100	7,3	91,4	82,3	tensioni e fessure					
armatura longitudinale					M _{dec}	0,0	[kNm]	V _{Ed}	550,00	[kN]
n _{barre}	ϕ	d	A _{sl}		M _{cr}	471,1	[kNm]	M _{Rd}	917,1	[kNm]
	[mm]	[cm]	[cm ²]		y _n	-28,64	[cm]	FS	1,34	
5	26	8,6	26,55		$\sigma_{c,min}$	-3,2	[MPa]	taglio		
5,0	26	91,4	26,55		$\sigma_{s,min}$	-29,0	[MPa]	V _{Rdc}	315,2	[kN]
armatura a taglio					$\sigma_{s,max}$	159,3	[MPa]	predisporre armatura a taglio		
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}	k ₂	0,5		V _{Rds}	788,2	[kN]
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]	$\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm}$	-	[%]	V _{Rdmax}	3262,3	[kN]
5	12	40	90	5,65	S _{r,max}	-	[cm]	θ	30,0	[°]
					W _k	-	[mm]	sezione duttile		
								a _l	71,2	[cm]


Figura 110. Verifica sezione solettone intermedio 2 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Estremi)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q. PERM	
M _{EK}	326,00 [kNm]	M _{EK}	311,30 [kNm]
N _{EK}	0,00 [kN]	N _{EK}	0,00 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M _{dec}	0,0 [kNm]	M _{dec}	0,0 [kNm]
M _{cr}	473,5 [kNm]	M _{cr}	473,5 [kNm]
y _n	-28,47 [cm]	y _n	-28,47 [cm]
σ _{c,min}	-2,9 [MPa]	σ _{c,min}	-2,8 [MPa]
σ _{s,min}	-26,2 [MPa]	σ _{s,min}	-25,0 [MPa]
σ _{s,max}	144,0 [MPa]	σ _{s,max}	137,5 [MPa]
k ₂	0,5	k ₂	0,5
ε _{sm-ε_{cm}}	- [%]	ε _{sm-ε_{cm}}	- [%]
s _{r,max}	- [cm]	s _{r,max}	- [cm]
w _k	- [mm]	w _k	- [mm]

Figura 111. Verifica sezione solettone intermedio 2 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Estremi)

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4$ mm e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

13.13 Solettone intermedio 2, mezzeria

La soletta (C30/37) ha uno spessore di 100 cm ed in mezzeria è armata con $\phi 20/20 + \phi 20/10$ superiore e $\phi 20/20 + \phi 20/40$ inferiori, in longitudinale si dispongono $\phi 16/20$. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 4.5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale ($\phi 16$).

geometria					sollecitazioni e risultati					
sezione trasversale					SLE RARA	SLU				
B	H	c	d	z	M_{Ek}	1309,00	[kNm]	M_{Ed}	1830,00	[kNm]
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	N_{Ek}	0,00	[kN]	N_{Ed}	0,00	[kN]
100	100	7,8	89,2	80,3	tensioni e fessure			V_{Ed}	595,00	[kN]
armatura longitudinale					M_{dec}	0,0	[kNm]	M_{Rd}	2548,1	[kNm]
nbarre	ϕ	d	A_{s1}		M_{cr}	556,6	[kNm]	FS	1,39	
	[mm]	[cm]	[cm ²]		y_n	-17,32	[cm]	taglio		
7,5	26	9,1	39,82		$\sigma_{c,min}$	-8,0	[MPa]	V_{Rdc}	309,4	[kN]
5,0	26	85,7	26,55		$\sigma_{s,min}$	-87,1	[MPa]	predisporre armatura a taglio		
10	26	90,9	53,09		$\sigma_{s,max}$	215,1	[MPa]	V_{Rds}	768,9	[kN]
armatura a taglio					k_2	0,5		V_{Rdmax}	3182,6	[kN]
nbracci	ϕ	s	α	A_{sw}	$\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$	0,78	[%]	θ	30,0	[°]
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]	$s_{r,max}$	39,0	[cm]	sezione	duttile	
5	12	40	90	5,65	W_k	0,305	[mm]	a_i	69,5	[cm]


Figura 112. Verifica sezione solettone intermedio 2 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q PERM	
M _{Ek}	1142,00 [kNm]	M _{Ek}	1014,00 [kNm]
N _{Ek}	0,00 [kN]	N _{Ek}	0,00 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M _{dec}	0,0 [kNm]	M _{dec}	0,0 [kNm]
M _{cr}	556,6 [kNm]	M _{cr}	556,6 [kNm]
y _n	-17,32 [cm]	y _n	-17,32 [cm]
σ _{c,min}	-7,0 [MPa]	σ _{c,min}	-6,2 [MPa]
σ _{s,min}	-76,0 [MPa]	σ _{s,min}	-67,5 [MPa]
σ _{s,max}	187,7 [MPa]	σ _{s,max}	166,6 [MPa]
k ₂	0,5	k ₂	0,5
ε _{sm} -ε _{cm}	0,65 [‰]	ε _{sm} -ε _{cm}	0,55 [‰]
S _{r,max}	39,0 [cm]	S _{r,max}	39,0 [cm]
w _k	0,254 [mm]	w _k	0,215 [mm]

Figura 113. Verifica sezione solettone intermedio 2 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Mezzeria)

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4 \text{ mm}$ e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3


13.14 Banchina 1

La soletta (C30/37) ha uno spessore di 30 cm ed in mezzeria è armata con $\phi 22/20$ superiore e $\phi 22/20$ inferiori, in longitudinale si dispongono $\phi 12/20$. A taglio si dispongono spilli $\phi 10/20 \times 20$. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 4.5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale ($\phi 12$) ed il diametro degli spilli ($\phi 10$).

geometria				
sezione trasversale				
B	H	c	d	z
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
100	30	6,7	22,2	20,0
armatura longitudinale				
nbarre	ϕ	d	A _{sl}	
	[mm]	[cm]	[cm ²]	
5	22	7,8	19,01	
5,0	22	22,2	19,01	
armatura a taglio				
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]
5	10	20	90	3,93

sollecitazioni e risultati			
SLE RARA	SLU		
M _{Ek}	43,00 [kNm]	M _{Ed}	160,00 [kNm]
N _{Ek}	-63,00 [kN]	N _{Ed}	-126,00 [kN]
tensioni e fessure		V _{Ed}	197,00 [kN]
M _{dec}	3,0 [kNm]	MR _d	
M _{cr}	44,3 [kNm]	164,7 [kNm]	
y _n		FS	
-5,62 [cm]		1,03	
$\sigma_{c,min}$	-4,9 [MPa]	taglio	
$\sigma_{s,min}$	-12,5 [MPa]	V _{Rdc}	131,2 [kN]
$\sigma_{s,max}$	101,0 [MPa]	predisporre armatura a taglio	
k ₂		V _{Rds}	265,9 [kN]
0,5		V _{Rdmax}	792,4 [kN]
$\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$	- [%]	θ	30,0 [°]
S _{r,max}	- [cm]	sezione duttile	
W _k	- [mm]	ai	17,3 [cm]


Figura 114. Verifica sezione banchina 1 in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q. PERM	
M_{Ek}	27,30 [kNm]	M_{Ek}	27,30 [kNm]
N_{Ek}	0,00 [kN]	N_{Ek}	0,00 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M_{dec}	0,0 [kNm]	M_{dec}	0,0 [kNm]
M_{cr}	40,6 [kNm]	M_{cr}	40,6 [kNm]
y_n	-6,44 [cm]	y_n	-6,44 [cm]
$\sigma_{c,min}$	-3,3 [MPa]	$\sigma_{c,min}$	-3,3 [MPa]
$\sigma_{s,min}$	-3,3 [MPa]	$\sigma_{s,min}$	-3,3 [MPa]
$\sigma_{s,max}$	76,4 [MPa]	$\sigma_{s,max}$	76,4 [MPa]
k_2	0,5	k_2	0,5
$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	- [‰]	$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	- [‰]
$S_{r,max}$	- [cm]	$S_{r,max}$	- [cm]
w_k	- [mm]	w_k	- [mm]

Figura 115. Verifica sezione banchina 1 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4$ mm e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

13.15 Banchina 2

La soletta (C30/37) ha uno spessore di 30 cm ed è armata con $\phi 22/20$ inferiore e $\phi 22/20$ superiori, in longitudinale si dispongono $\phi 12/20$. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 4.5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale ($\phi 12$).

geometria					sollecitazioni e risultati				
sezione trasversale					SLE RARA		SLU		
B	H	c	d	z	M _{Ek}	N _{Ek}	M _{Ed}	N _{Ed}	V _{Ed}
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]	[kN]
100	30	5,7	23,2	20,9	107,80	-120,00	156,00	-102,00	95,00
armatura longitudinale					tensioni e fessure				
nbarre	ϕ	d	A _{sl}		M _{dec}		M _{Rd}		FS
	[mm]	[cm]	[cm ²]		[kNm]		[kNm]		
5	22	6,8	19,01		5,9		167,3		1,07
5,0	22	23,2	19,01		M _{cr}	48,5			
armatura a taglio					taglio				
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}	y _n	$\sigma_{c,min}$	$\sigma_{s,min}$	$\sigma_{s,max}$	V _{Rdc}
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kN]
5	0	20	90	0,00	-5,75	-11,2	-44,3	252,7	132,3
									non serve armatura a taglio
					k ₂	0,5			V _{Rds}
					$\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$	0,92			0,0
					S _{r,max}	33,0			828,1
					w _k	0,302			θ
									30,0
									sezione duttile
									a _l
									23,2


Figura 116. Verifica sezione banchina 2 in c.a. allo SLU e SLE Rara

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q PERM	
M _{Ek}	99,70 [kNm]	M _{Ek}	99,70 [kNm]
N _{Ek}	-120,00 [kN]	N _{Ek}	-120,00 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M _{dec}	5,9 [kNm]	M _{dec}	5,9 [kNm]
M _{cr}	48,5 [kNm]	M _{cr}	48,5 [kNm]
y _n	-5,70 [cm]	y _n	-5,70 [cm]
σ _{c,min}	-10,3 [MPa]	σ _{c,min}	-10,3 [MPa]
σ _{s,min}	-41,7 [MPa]	σ _{s,min}	-41,7 [MPa]
σ _{s,max}	231,3 [MPa]	σ _{s,max}	231,3 [MPa]
k ₂	0,5	k ₂	0,5
ε _{sm-ε_{cm}}	0,81 [%]	ε _{sm-ε_{cm}}	0,81 [%]
S _{r,max}	33,0 [cm]	S _{r,max}	33,0 [cm]
w _k	0,268 [mm]	w _k	0,268 [mm]

Figura 117. Verifica sezione banchina 2 in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4 \text{ mm}$ e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3


13.16 Valori limite inflessione

Si effettua la verifica delle deformate dei solai coerentemente con quanto indicato nell'Eurocodice 2 al paragrafo 7.4.1 (4). L'aspetto e la funzionalità della struttura possono essere pregiudicati se l'inflessione di una trave o piastra soggetti ai carichi quasi-permanenti è maggiore di 1/250 della luce dell'elemento. Cautelativamente si effettua la verifica considerando le frecce ottenute per la combinazione RARA, di seguito si riportano i valori ottenuti:

Tabella 36. Verifica di deformabilità dei solai allo stato limite di esercizio RARA

	Inflessione elementi in mezzeria [mm]	Valori limite [mm]	VERIFICA
Fondazione	7,8	74,2	OK
Soletta int. 2	11,07	74,2	OK
Soletta int. 1	18,2	74,2	OK
Copertura	10,4	74,2	OK

La verifica risulta essere soddisfatta.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

14. DIMENSIONAMENTO E VERIFICHE DELLA SOLETTA DI COPERTURA

Nel seguente paragrafo si descrivono i carichi elementari da assumere per le verifiche di resistenza in esercizio ed in presenza dell'evento sismico.

Vengono prese in considerazione le condizioni elementari di carico di seguito determinate. Tali Condizioni Elementari saranno opportunamente combinate secondo quanto previsto dalla normativa vigente.

14.1 Analisi dei carichi della soletta

14.1.1 Permanenti strutturali (G1)

Per i materiali si assumono i seguenti pesi specifici:

- calcestruzzo armato: $\gamma_{c.a.} = 25 \text{ kN/m}^3$
- soletta $S_s \times \gamma_{c.a.} = 1.50 \times 25.00 = \mathbf{37.50 \text{ kN/m}^2}$

14.1.2 Permanenti portati (G2)

Sulla soletta di copertura vanno considerati i carichi permanenti rappresentati dal terreno e dalla sovrastruttura tranviaria.

g2-1 (carico portato del rilevato):


Si considera l'altezza del rilevato gravante in soletta come la differenza tra il ricoprimento totale (1.6 m) e la sovrastruttura tranviaria (0.7 m).

- peso rilevato $(H_r) \cdot \gamma_{ric} = 1.6 - 0.7 = 0.90 \cdot 18.0 = \mathbf{16.20 \text{ kN/m}^2}$

g2-2 (peso proprio dell'armamento del tram):

Il peso dell'armamento tramviario è il medesimo calcolato al paragrafo §8.2.

- peso armamento $H_{armamento} \cdot \gamma_{arm} = \mathbf{18.25 \text{ kN/m}^2}$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

14.1.3 Carichi variabili da traffico (Q)

Sulla soletta agisce il carico variabile tranviario che è determinato secondo i parametri di un carico variabile ferroviario LM71.

Per tale carico valgono le considerazioni effettuate in occasione del calcolo delle opere di sostegno definitive, pertanto, per ogni ulteriore approfondimento in merito si rimanda al paragrafo §8.2 della presente relazione tecnica e di calcolo. Si riassumono brevemente nel seguito i carichi variabili tenuti in conto nelle analisi in oggetto:

- Carico variabile tranviario $q_{tram} = 36.8 \text{ kN/m}^2$

14.1.4 Ritiro

Si considera l'effetto del ritiro agente in copertura. La deformazione da ritiro viene valutata come previsto nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14/01/08) al paragrafo 11.2.10.6.

L'azione viene applicata come variazione termica negativa equivalente.

La deformazione totale da ritiro è pari a:


$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

dove:

$\varepsilon_{cd} = k_h \cdot \varepsilon_{c0}$ è la deformazione per ritiro da essiccamento

$\varepsilon_{ca} = -2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$ con f_{ck} in N/mm^2 è la deformazione per ritiro autogeno

Il calcolo del ritiro agente in soletta viene riportato integralmente nella seguente tabella.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3


Il ritiro agente in soletta viene calcolato nel modo seguente:

Tabella 37.Valutazione dell'azione dovuto al ritiro del calcestruzzo

Concrete class C30/37	f _{ck} (Mpa)	30,71	N
Concrete elastic modulus	E _{cm} (Gpa)	=	33,019
element thickness	s (mm)	=	1500
exposed surfaces	n°	=	1
member's notional size $\alpha=2Ac/u h_0$	α (mm)	=	3000
relative humidity	UR%	=	75
age of concrete in days	t (gg)		54630
age of concrete at loading in days/t ₀	t _s (gg)	=	1
coefficient which depends on the type of cement	α_{ds1}	=	4
coefficient which depends on the type of cement	α_{ds2}	=	0,12
reference mean compressive strength	f _{cm0} (Mpa)	=	10
characteristic compressive strength	f _{ck} (Mpa)	=	30,71
mean compressive strength	f _{cm} (Mpa)	=	38,71
coefficient for UR%	β_{RH}	=	0,90
basic drying shrinkage strain	ϵ_{cd0}	=	0,00032
drying shrinkage strain - time effect	$\beta_{ds}(t, t_s)$	=	0,89
coefficient depending on the notional size	k _h	=	0,7
drying shrinkage strain x1000	$\epsilon_{cd}(t)$	=	0,20
autogenous shrinkage strain-time effect	$\beta_{as}(t)$	=	1,0000
autogenous shrinkage strain - infinity	$\epsilon_{ca}(\infty)$	=	5,18E-05
autogenous shrinkage strain x1000	$\epsilon_{ca}(t)$	=	0,0518
total shrinkage strain x1000	$\epsilon_{cs}(t, t_s)$	=	0,2492
Equivalent thermal effect	ΔT °C	=	24,9

Si considera, coerentemente con quanto indicato al paragrafo §8.1 Fase 15 SLE, un coefficiente di viscosità pari a:

$$\varphi(\infty, t_0) = 2.75$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d’opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Per ottenere la variazione termica conseguente al ritiro si calcola:

$$\Delta T \text{ applicata} = \Delta T \frac{1}{1 + \varphi(\infty, t_0)} = 24.9 \frac{1}{1 + 2.75} = -6.64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Per ottenere la trazione agente in soletta causata dal ritiro si modella un portale composto da un traverso, avente le caratteristiche della soletta, e da colonne incastrate alla base, aventi le caratteristiche geometriche e meccaniche dei diaframmi della galleria in oggetto. Essendo il punto d’incastro di difficile valutazione, cautelativamente si considera quest’ultimo in corrispondenza del primo vincolo che determina una lunghezza inferiore del piedritto. Il modello viene implementato sul Software Sap2000 ver. 23.1.0 schematizzando colonne e traverso come elementi “beam”. Le caratteristiche degli elementi sono:


- $b \text{ diaf} = 1 \text{ m}$ (dimensione geometrica in direzione longitudinale del diaframma)
- $b \text{ sol} = 1 \text{ m}$ (dimensione geometrica in direzione longitudinale della soletta)
- $s \text{ diaf} = 1.2 \text{ m}$ (spessore del diaframma)
- $s \text{ sol} = 1.5 \text{ m}$ (spessore soletta)
- $h \text{ diaframma} = 2.70 \text{ m}$ (lunghezza diaframmi rispetto al punto d’incastro)
- $L \text{ soletta} = 20.25 \text{ m}$
- $\Delta T = -6.64 \text{ } ^\circ\text{C}$

Si precisa che il punto d’incastro del diaframma – cautelativamente – è stato considerato come il punto in corrispondenza del quale si dispone il primo ordine di puntelli metallici in fase di costruzione, prossimo alla soletta di copertura.

Il modello del portale con la sollecitazione ottenuta viene esposto di seguito:



Figura 118. Modello portale soggetto a ritiro

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

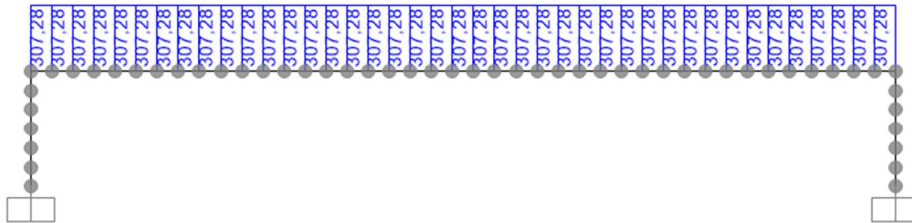



Figura 119. Trazione agente in soletta conseguente al ritiro

La trazione agente in soletta conseguente al ritiro risulta essere:

$$N_{ritiro} = 307.28 \text{ kN}$$

Tale azione sarà opportunamente moltiplicata per il rispettivo coefficiente di combinazione.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d’opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

14.1.5 Azioni trasmesse dai diaframmi

La galleria artificiale in analisi è realizzata attraverso la tecnologia esecutiva di tipo top-down caratterizzata da uno scavo sostenuto dai diaframmi e dal solaio di copertura. Tali elementi sono collegati tra di loro e questo implica la trasmissione di forze dai diaframmi alla soletta di copertura. Ai fini dell’analisi dei carichi del solaio si considerano le forze trasmesse ed agenti sulla soletta come indicate di seguito:

SLU

$$M_{diaf\ SLU} = 1603.1\ kNm/m$$

$$N_{diaf\ SLU} = -519.6\ kN/m$$

SLV

$$M_{diaf\ SLV} = 1237.5\ kNm/m$$

$$N_{diaf\ SLV} = -316.5\ kN/m$$

SLE

$$M_{diaf\ SLE} = 1225.6\ kNm/m$$


$$N_{diaf\ SLE} = -385.14\ kN/m$$

Tali azioni vengono sommate ai momenti sollecitanti i modelli in base alle rispettive combinazioni. Si precisa che le azioni di compressione in soletta hanno segno negativo. I momenti sono sommati a quelli conseguenti ai carichi agenti per lo schema trave incastro-incastro:

Momento flettente “M” agente in soletta:

- $M_{SLU\ tot} = M_{diaf\ SLU} + M_{SLU}$
- $M_{SLE\ tot} = M_{diaf\ SLE} + M_{SLE}$

Per i coefficienti di combinazione impiegati si rimanda al paragrafo §14.2 della presente relazione tecnica e di calcolo (Combinazioni di carico).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

14.2 Combinazioni di carico

Le combinazioni di carico, considerate ai fini delle verifiche, sono stabilite in modo da garantire la sicurezza in conformità a quanto prescritto al capitolo 2 delle NTC2018. Si riporta nella seguente figura l'estratto della normativa.

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.1)$$

- Combinazione caratteristica (rara), generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili, da utilizzarsi nelle verifiche alle tensioni ammissibili di cui al § 2.7:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.2)$$

- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.3)$$

- Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.4)$$

- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E (v. § 3.2):

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.5)$$

- Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali di progetto A_d (v. § 3.6):

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.6)$$

Figura 120. Combinazioni di carico previste dalle NTC2018

Per i coefficienti parziali di sicurezza si è fatto riferimento alla Normativa Italiana 2018 Cap. 6.2.4 Tab. 6.2.I, mentre per i coefficienti di combinazione ψ si è considerata la Tab. 2.5.I assumendo che la soletta in analisi ricada in categoria G (rimesse, parcheggi ed aree per il traffico dei veicoli).



 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Tabella 38. Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I – NTC2018) –
⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}

	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_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

Tabella 39. Valori dei coefficienti di combinazione (Tab. 2.5.I – NTC2018)


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

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Di seguito si espone la tabella raffigurante le combinazioni impiegate ai fini dell'analisi.

Tabella 40. Combinazioni di carico impiegate per le analisi in oggetto

	$\delta 1$	$\delta 2$	q	Ritiro	Mslu	Mslc	Mslv
A1-M1_1	1,3				1		
A1-M1_2	1,3	1,5	1,5	1,3	1		
A1-M1_3	1,3	1,5	1,05	1,3	1		
SLV_1	1	1					1
SLV_2	1	1	0,2	1			1
RARA_1	1	1				1	
RARA_2	1	1	1	1		1	
RARA_3	1	1	0,7	1		1	
FREQ_1	1	1	0,5	1		1	
Q. PERMA_1	1	1	0,3	1		1	

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

14.3 Modello di calcolo

La struttura viene schematizzata attraverso un modello analitico agli elementi finiti, assumendo uno schema statico di asta appoggio-appoggio per massimizzare il momento in mezzeria ed uno schema asta incastro-incastro per massimizzare i momenti agli estremi.

L'analisi strutturale viene condotta con il metodo degli spostamenti per la valutazione dello stato tenso-deformativo indotto dai carichi statici.

Per le caratteristiche geometriche dell'asta si è quindi assunto:

- una sezione rettangolare $b \times h = 100 \times 150$ cm per la soletta di copertura

Per quanto riguarda la rigidità dell'asta si è assunto:

- $E_{cm} = 33019$ N/mm² (per CLS R_{ck} 37);

Si riportano nelle seguenti figure il modello di calcolo impiegato per l'analisi strutturale della soletta e l'applicazione sullo stesso dei carichi permanenti e variabili.



Figura 121. Modelli del solaio di copertura



Figura 122. G2 carichi permanenti portati


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3



Figura 123.Q carichi variabili

14.4 Sollecitazioni

Ai fini del dimensionamento della soletta si considerano due differenti sezioni di riferimento: sezione in mezzeria e sezione all'estremità dell'elemento. Poiché la condizione di vincolo tra gli estremi della soletta ed i diaframmi non rappresenta un incastro perfetto e poiché dalla simulazione del sistema, mediante il software Paratie Plus ver. 21.0.2 – CaAS 2021, i momenti sollecitanti in mezzeria e all'estremità della copertura risultano essere pari a $\frac{p \cdot l^2}{16}$, si adoperano i seguenti valori per il dimensionamento:

- Sezione in mezzeria: si considera un momento pari a $\frac{p \cdot l^2}{12}$ corrispondente ad un valore intermedio tra $\frac{p \cdot l^2}{8}$ (momento in mezzeria per schema di trave appoggio-appoggio) e $\frac{p \cdot l^2}{16}$ (momento in mezzeria ottenuto dalla media della simulazione del sistema mediante il software Paratie Plus ver. 21.0.2 – CaAS 2021);
- Sezione all'estremo: si considera un momento pari alla somma di $\frac{p \cdot l^2}{16}$ ed il momento trasmesso dai diaframmi alla soletta descritto al paragrafo §14.1.5 della presente relazione tecnica e di calcolo;

Di seguito si espongono le sollecitazioni ottenute.



Stato limite ultime (SLU)

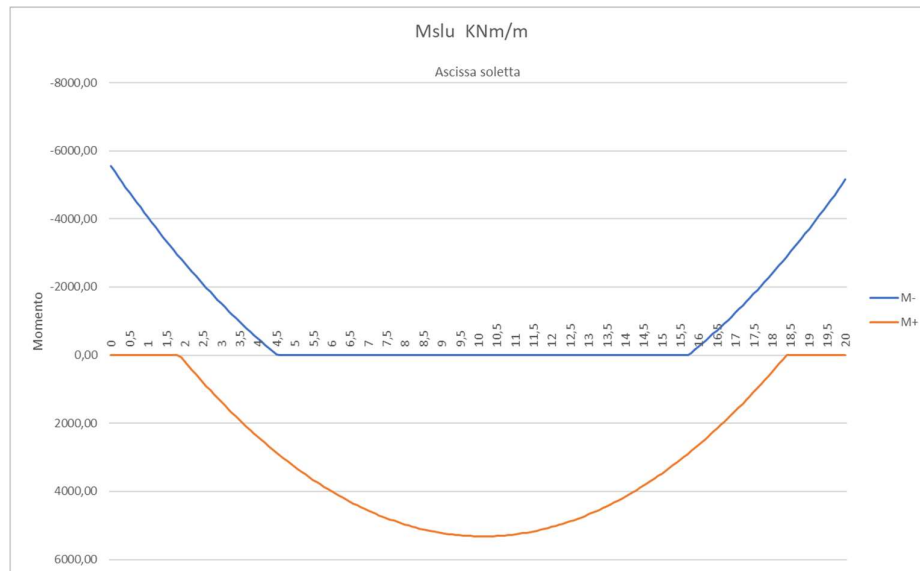


Figura 124.Momento flettente (SLU)

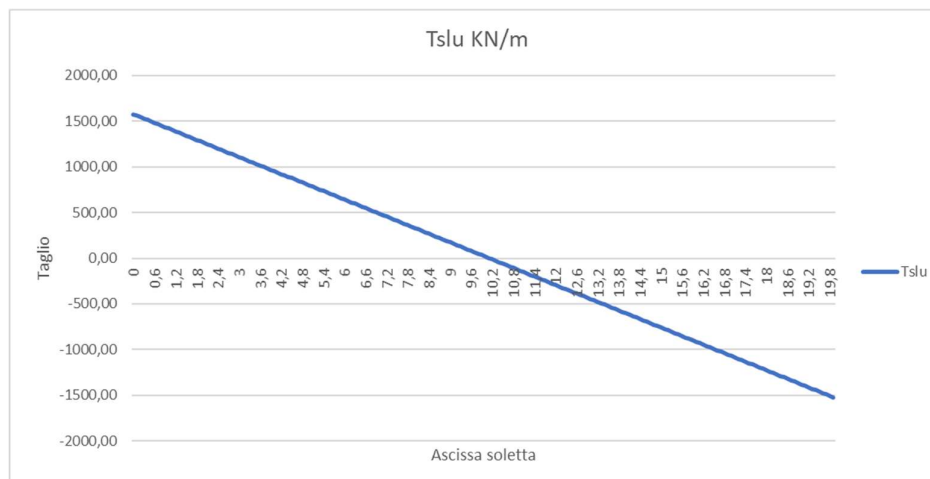


Figura 125.Taglio schema (SLU)



Stato Limite di Esercizio (SLE Combinazione Rara)

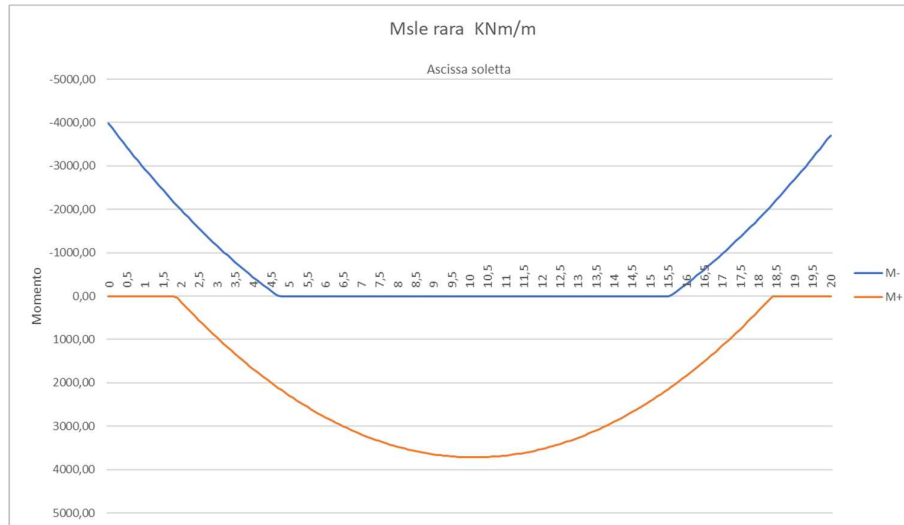


Figura 126.Momento flettente (SLE Rara)

Stato Limite di Esercizio (SLE Combinazione Frequente)



Figura 127.Momento flettente (SLE Frequente)



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Stato Limite di Esercizio (SLE Combinazione Quasi Permanente)

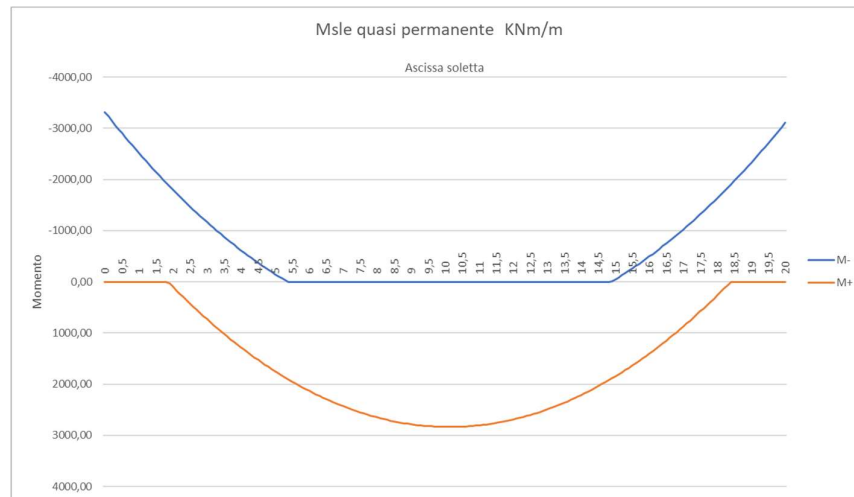


Figura 128.Momento flettente (SLE Quasi Permanente)

Azione assiale

Tabella 41.Azione assiale sulla soletta (SLE / SLU)

$N_{SLU} = 1.3 N_{ritiro}$	399.46 kN
$N_{SLE} = N_{ritiro}$	307.28 kN



14.5 Verifiche soletta di copertura

Si riportano di seguito le verifiche effettuate sulla soletta considerando le sollecitazioni massime e minime agenti sui differenti modelli e considerando l'azione di trazione determinata dal ritiro. Le verifiche allo stato limite di esercizio prendono come riferimento i valori limite da Normativa indicati nei paragrafi §11.1.1 e §11.1.2 della presente relazione tecnica e di calcolo.

Le verifiche sono state effettuate mediante un foglio di calcolo, che utilizza la seguente simbologia e parametri:

Tabella 42. Parametri operativi per la verifica del CLS armato

materiali			
calcestruzzo		acciaio	
R _{ck}	37 [MPa]	f _{yk}	450 [MPa]
f _{ck}	30,7 [MPa]	γ _s	1,15
γ _c	1,5	f _{yd}	391,3 [MPa]
α _{cc}	0,85	E _s	210000 [MPa]
f _{cd}	17,4 [MPa]	ε _{uk}	75 [%]
v	0,526		
ε _{c2}	2,0 [‰]		
ε _{cu2}	3,5 [‰]		
α _e	15,0		
k _t	0,4		
k ₁	0,8		
k ₃	3,4		
k ₄	0,425		

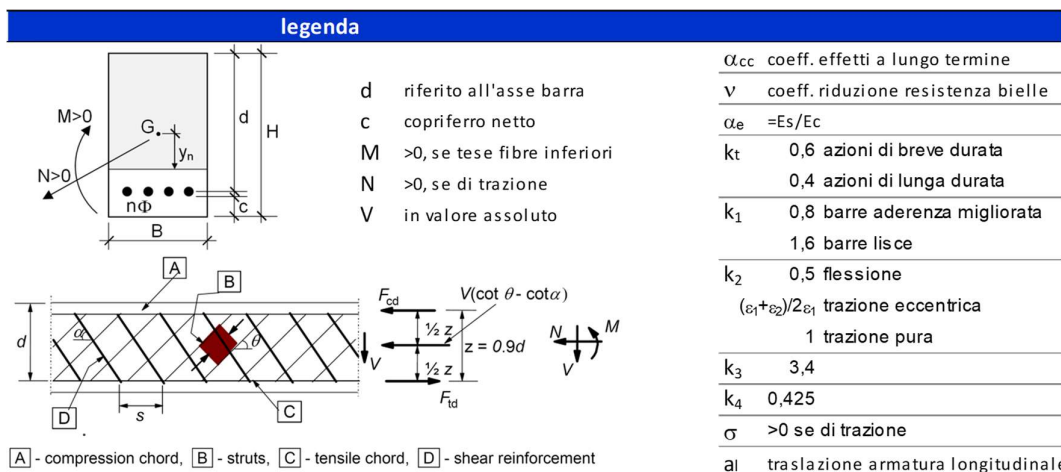



Figura 129. Convenzioni adottate per la verifica sezione in c.a.


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

14.5.1 Estremi

La soletta (C30/37) ha uno spessore di 150 cm e agli estremi è armata superiormente con doppio strato $\phi 30/10$ esterno e $7.5\phi 30$ interno. Inferiormente si arma con $7.5\phi 30$, in longitudinale si dispongono $\phi 16/20$. A taglio si dispongono spilli $\phi 12/20 \times 20$. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale ($\phi 16$) ed il diametro degli spilli ($\phi 12$).

geometria					sollecitazioni e risultati				
sezione trasversale					SLE RARA		SLU		
B	H	c	d	z	M _{Ek}	N _{Ek}	M _{Ed}	N _{Ed}	V _{Ed}
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]	[kN]
100	150	7,8	138,1	124,3	3688,21	307,28	5127,25	399,46	1482,90
armatura longitudinale					tensioni e fessure				
nbarre	ϕ	d	A _{sI}		M _{ddec}	M _{cr}	M _{Rd}	FS	
	[mm]	[cm]	[cm ²]		[kNm]	[kNm]	[kNm]		
7,5	30	9,3	53,01		-	1220,7	6007,6	1,17	
7,5	30	134,7	53,01		y _n				taglio
10	30	140,7	70,69		-26,33				V _{Rdc}
armatura a taglio					predispone armatura a taglio				
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}	$\sigma_{c,min}$	$\sigma_{s,min}$	$\sigma_{s,max}$		
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		
5	12	20	90	5,65					V _{Rds}
					k ₂				2382,3
					$\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$				4930,2
					s _{r,max}				θ
					w _k				30,0
									sezione duttile
									a _l
									107,7


Figura 130. Verifica sezione soletta di copertura in c.a. allo SLU e SLE Rara (Estremi)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q. PERM	
M_{Ek}	3008,95 [kNm]	M_{Ek}	2863,60 [kNm]
N_{Ek}	307,28 [kN]	N_{Ek}	307,28 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M_{dec}	- [kNm]	M_{dec}	- [kNm]
M_{cr}	1220,7 [kNm]	M_{cr}	1220,7 [kNm]
y_n	-26,81 [cm]	y_n	-26,94 [cm]
$\sigma_{c,min}$	-7,5 [MPa]	$\sigma_{c,min}$	-7,1 [MPa]
$\sigma_{s,min}$	-90,4 [MPa]	$\sigma_{s,min}$	-85,8 [MPa]
$\sigma_{s,max}$	214,9 [MPa]	$\sigma_{s,max}$	205,1 [MPa]
k_2	0,5	k_2	0,5
$\varepsilon_{sm-\varepsilon_{cm}}$	0,80 [‰]	$\varepsilon_{sm-\varepsilon_{cm}}$	0,75 [‰]
$s_{r,max}$	39,2 [cm]	$s_{r,max}$	39,2 [cm]
w_k	0,314 [mm]	w_k	0,295 [mm]

Figura 131. Verifica sezione soletta di copertura in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Estremi)

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$); è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4$ mm e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

14.5.2 Mezzeria

La soletta (C30/37) ha uno spessore di 150 cm e agli estremi è armata inferiormente con doppio strato $\phi 30/10$ esterno e $7.5\phi 30$ interno. Superiormente si arma con $7.5\phi 30$, in longitudinale si dispongono $\phi 16/20$. A taglio si dispongono spilli $\phi 12/20 \times 20$. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale ($\phi 16$) ed il diametro degli spilli ($\phi 12$).

geometria					sollecitazioni e risultati			
sezione trasversale					SLE RARA	SLU		
B	H	c	d	z	M _{Ek}	N _{Ed}	M _{Ed}	N _{Ed}
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
100	150	7,8	138,1	124,3	3716,70	307,28	5318,80	399,46
armatura longitudinale					tensioni e fessure			
n _{barre}	ϕ	d	A _{sI}		M _{ddec}		M _{Rd}	V _{Ed}
	[mm]	[cm]	[cm ²]		[kNm]		[kNm]	[kN]
7,5	30	9,3	53,01		-		6007,6	1482,90
7,5	30	134,7	53,01		M _{Cr}	1220,7	FS	1,13
10	30	140,7	70,69		taglio			
armatura a taglio					γ_n	$\sigma_{c,min}$	$\sigma_{s,min}$	$\sigma_{s,max}$
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]				
5	12	20	90	5,65	-26,32	-9,3	-112,5	262,9
					k ₂	$\epsilon_{sm-\epsilon_{cm}}$	s _{r,max}	w _k
						[%]	[cm]	[mm]
					0,5	1,03	39,2	0,403
					predispone armatura a taglio			
					V _{Rdc}	V _{Rds}	V _{Rdmax}	θ
					[kN]	[kN]	[kN]	[°]
					379,4	2382,3	4930,2	30,0
					sezione duttile			
					al			
					107,7			


Figura 132. Verifica sezione soletta di copertura in c.a. allo SLU e SLE Rara (Mezzeria)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

SLE FREQUENTE		SLE Q. PERM	
M_{Ek}	3087,40 [kNm]	M_{Ek}	2835,70 [kNm]
N_{Ek}	307,28 [kN]	N_{Ek}	307,28 [kN]
tensioni e fessure		tensioni e fessure	
M_{dec}	- [kNm]	M_{dec}	- [kNm]
M_{cr}	1234,9 [kNm]	M_{cr}	1234,9 [kNm]
y_n	-28,16 [cm]	y_n	-28,39 [cm]
$\sigma_{c,min}$	-7,3 [MPa]	$\sigma_{c,min}$	-6,7 [MPa]
$\sigma_{s,min}$	-87,4 [MPa]	$\sigma_{s,min}$	-80,0 [MPa]
$\sigma_{s,max}$	219,9 [MPa]	$\sigma_{s,max}$	202,9 [MPa]
k_2	0,5	k_2	0,5
$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	0,82 [‰]	$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	0,74 [‰]
$S_{r,max}$	41,0 [cm]	$S_{r,max}$	41,0 [cm]
w_k	0,34 [mm]	w_k	0,30 [mm]

Figura 133.Verifica sezione soletta di copertura in c.a. allo SLE Frequente e SLE Quasi Permanente (Mezzeria)

Le verifiche sono soddisfatte: per lo SLE le sollecitazioni verificano la tensione di compressione nel calcestruzzo sia in combinazione rara, sia in combinazione quasi permanente ($0.45 f_{ck}$), è inoltre verificata l'apertura delle fessure per le combinazioni frequente e quasi permanente ($w_k < 0.4 \text{ mm}$ e 0.3 mm). Inoltre, in combinazione rara, le sollecitazioni verificano la tensione limite nell'acciaio ($0.80 f_{yk}$).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3


14.6 Valori limite inflessione

Si effettua la verifica della deformata della soletta di copertura coerentemente con quanto indicato nell'Eurocodice 2 al paragrafo 7.4.1 (4). L'aspetto e la funzionalità della struttura possono essere pregiudicati se l'inflessione di una trave o piastra soggetti ai carichi quasi-permanenti è maggiore di 1/250 della luce dell'elemento. Cautelativamente si effettua la verifica considerando le frecce ottenute per la combinazione RARA, di seguito si riportano i valori ottenuti:

Tabella 43. Verifica di deformabilità della copertura allo stato limite di esercizio RARA

	Inflessione elementi in mezzeria [mm]	Valori limite [mm]	VERIFICA
Copertura	25,52	74,2	OK

La verifica risulta essere soddisfatta.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

14.7 Resistenza al fuoco

Ai fini della verifica di resistenza al fuoco si fa riferimento al metodo dei dati tabellari da EN 1992-1-2 (Paragrafo §5.7). Tali dati sono ottenuti da prove interpretate per via numerica e prevedono la prescrizione di dimensioni e valori di copriferro lordo minimi soggetti ad incendi standard.

L'ipotesi di base delle tabelle riportate in EC2 sono:

- Incendio ISO834 di durata limitata ($t \leq 240$ min);
- Densità compresa tra 2000 e 2600 Kg/m³;
- Calcestruzzo ad aggregato siliceo.

Si precisa che l'utilizzo di tali tabelle consente di considerare implicitamente soddisfatte sia le verifiche di resistenza al fuoco, sia quelle per lo spalling.

Con riferimento alla Tabella 5.8 del EN1992-1-2 (Cap. 5.7.2) – di seguito riportata – inerente alle solette semplicemente appoggiate risulta necessario considerare minimo sul lembo inferiore un copriferro lordo pari a 4 cm ed uno spessore minimo di 120 mm per la classe di resistenza al fuoco REI120 ipotizzata per il caso in analisi:

Standard fire resistance	Minimum dimensions (mm)			
	slab thickness h_s (mm)	axis-distance a		
		one way	two way:	
1	2	3	$l_y/l_x \leq 1,5$	$1,5 < l_y/l_x \leq 2$
REI 30	60	10*	10*	10*
REI 60	80	20	10*	15*
REI 90	100	30	15*	20
REI 120	120	40	20	25
REI 180	150	55	30	40
REI 240	175	65	40	50


l_x and l_y are the spans of a two-way slab (two directions at right angles) where l_y is the longer span.

For prestressed slabs the increase of axis distance according to 5.2(5) should be noted.

The axis distance a in Column 4 and 5 for two way slabs relate to slabs supported at all four edges. Otherwise, they should be treated as one-way spanning slab.

* Normally the cover required by EN 1992-1-1 will control.

Figura 134. Dimensioni minime spessore soletta e copriferro in caso di incendio (UNI EN 1992-1-2:2005 – Tabella 5.8)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

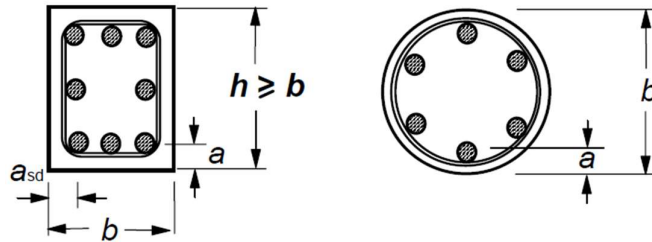



Figura 135. Sezioni degli elementi strutturali e distanza dall'asse a (UNI EN 1992-1-2:2005)

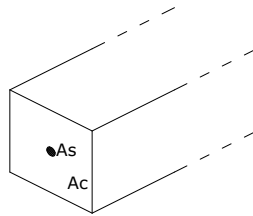
La soletta di copertura in analisi, così come le solette intermedie e di fondazione che sono presenti nelle gallerie, hanno un copriferro netto di 5 cm e di 4.5 cm e un'altezza della sezione superiore a 120 mm. Pertanto, tali dimensioni risultano essere superiori agli spessori minimi prescritti da Eurocodice e la verifica di resistenza del fuoco risulta essere soddisfatta.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

14.8 Verifica effetti longitudinali da ritiro

Vengono discussi brevemente gli effetti dovuti al ritiro nel calcestruzzo che provocano stati interni di coazione con l'armatura. Scopo della trattazione è quello di verificare l'armatura minima longitudinale nella soletta superiore dello scatolare.

Coazioni interne longitudinali dovute ai fenomeni di ritiro



Per il calcolo delle coazioni interne dovute ai fenomeni di ritiro si consideri una sezione di area unitaria A_c con un'unica barra di armatura di area A_s come rappresentato nell'immagine sottostante:

Si assumono le seguenti ipotesi:

- perfetta aderenza tra calcestruzzo ed acciaio;
- deformata piana della sezione in calcestruzzo;
- comportamento del calcestruzzo e dell'acciaio elastico e lineare,


Le equazioni di equilibrio, congruenza e legame dell'insieme calcestruzzo più acciaio che governano il fenomeno sono:

$$N_c + N_s = 0 \text{ (equazione di equilibrio)}$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_s - \varepsilon_c \text{ (equazione di congruenza)}$$

$$N_c = A_c \sigma_c = A_c E_c \varepsilon_c \text{ (equazione legame costitutivo del calcestruzzo)}$$

$$N_s = A_s \sigma_s = A_s E_s \varepsilon_s \text{ (equazione legame costitutivo dell'acciaio)}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Sostituendo le equazioni di legame in quella di equilibrio ed esprimendo la deformazione del calcestruzzo in funzione di quella dell'acciaio si ha:

$$N_s = - N_c = A_s E_s A_c E_c \varepsilon_r / (A_s E_s + A_c E_c)$$

Il comportamento viscoso del calcestruzzo viene considerato attraverso l'abbattimento del modulo elastico; pertanto, è necessario sostituire il valore di E_c con E_c^* . Le tensioni sull'acciaio e sul calcestruzzo risultano quindi pari a:

$$\sigma_s = A_c E_c^* E_s \varepsilon_r / (A_s E_s + A_c E_c^*)$$

$$\sigma_c = -A_s E_c^* E_s \varepsilon_r / (A_s E_s + A_c E_c^*)$$

Calcolo delle sollecitazioni longitudinali dovute ai fenomeni di ritiro

L'analisi delle sollecitazioni viene svolta per una striscia di larghezza unitaria, assumendo la dimensione convenzionale h_0 pari a $2 \times A/u > 500$ mm, ed un calcestruzzo C30/37.


Caratteristiche della sezione:

- B = 100 cm
- H = 150 cm
- $A_{s,long} = 1+1\phi 16/20 = 2009.6 \text{ mm}^2$
- $E_s = 210\,000 \text{ N/mm}^2$
- $E_c = 33020 \text{ N/mm}^2$

Deformazione da ritiro:

- U.R. = 75%
- $\varepsilon_{ca}(t = \infty) = 2.5 \times (f_{ck} - 10) \times 10^{-6} = 2.5 \times (0.83 \times 37 - 10) \times 10^{-6} = 0.0518 \text{ ‰}$
- $\varepsilon_{cd}(t = \infty) = k_h \times \varepsilon_{cd,0} = 0.7 \times 0.32 \text{ ‰} = 0.20 \text{ ‰}$ (per $h_0 > 500$ mm, calcestruzzo C30/37, U.R.=75%)
- $\varepsilon_r = \varepsilon_{ca} + \varepsilon_{cd} = 0.25 \text{ ‰}$

A favore di sicurezza, si assume comunque una deformazione $\varepsilon_r = 0.400 \text{ ‰}$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Effetto viscosità:

Il modulo viscoso a tempo infinito, coerentemente con quanto indicato nel paragrafo §8.1, viene assunto pari a $\phi (t=\infty) = 2.75$. Il modulo elastico ridotto del calcestruzzo risulta quindi pari a:


$$E^*_c = E_c / (1 + \phi) = 12700 \text{ N/mm}^2$$

Tensioni nei materiali:

$$\sigma_s = 82.17 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = -0.11 \text{ N/mm}^2$$

La sollecitazione sul calcestruzzo risulta molto inferiore rispetto alla rispettiva resistenza a trazione e quindi non porta a fessurazione; la sollecitazione sull'acciaio risulta modesta ed accettabile per le normali condizioni di esercizio della struttura.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

14.9 Giudizio di accettabilità dei risultati


In accordo con le indicazioni contenute nel capitolo 10 delle NTC 2018, a commento delle verifiche riportate nei precedenti capitoli si precisa quanto segue:

- le verifiche degli elementi strutturali, laddove eseguite con programmi di calcolo automatico, sono state effettuate mediante l'utilizzo di codici di riconosciuta affidabilità ed impiego in ambito nazionale: tali codici contengono adeguata documentazione, nonché numerosi test di verifica e validazione circa l'affidabilità dei risultati ottenuti;
- i file di input e output dei programmi, riportati nella presente relazione e nell'apposito allegato, sono stati sottoposti a verifica mediante:
 - o controllo dei dati inseriti in merito a caratteristiche dei materiali, carichi e parametri di resistenza e deformabilità dei terreni, condizioni di vincolo imposte e coerenza con gli schemi statici rappresentati negli elaborati di progetto, nonché della successione delle fasi costruttive imposte nel progetto stesso;
 - o valutazione delle reazioni ai vincoli e verifica equilibrio globale della struttura analizzata;
 - o analisi speditiva dei risultati per confronto con schemi di calcolo semplificati, oppure con i risultati ed i dimensionamenti già svolti in sede di Progetto Definitivo: questi ultimi, in particolare, hanno costituito un primario riferimento per il dimensionamento delle opere e la valutazione dei risultati, nonché per la comprensione/ elaborazione del giudizio di accettabilità in presenza di eventuali scostamenti, qualora osservati a motivo delle diverse ipotesi di carico/vincolo e sequenze operative imposte.

L'analisi della struttura è stata condotta con un programma agli elementi finiti (SAP2000), per validarne l'attendibilità sono stati confrontati i risultati ottenuti dal calcolo analitico della soletta di copertura con il rispettivo modello sul software. Considerando lo schema statico di trave in appoggio agli estremi si valuta il momento in mezzera conseguente ai carichi così definiti:

- *Peso proprio* = $G1 = 37 \text{ kN/m}^2$;
- *Permanenti portati* = $G2 = 34 \text{ kN/m}^2$;
- *Carico variabile* = $Q = 36 \text{ kN/m}^2$;
- *Luce* = 20 m;

Il valore dei carichi non è reale ma è stato ipotizzato esclusivamente per la validazione dei risultati ottenuti dal Software.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Si calcola analiticamente il momento in mezzeria della soletta:

$$M_{mezzeria} = \frac{L^2 \cdot (1.3 \cdot G1 + 1.5 \cdot G2 + 1.5 \cdot Q)}{8} = 7655 \text{ kNm/m}$$

Si valuta il momento in mezzeria della soletta definendo un modello sul software SAP2000 schematizzando la soletta di copertura con un elemento "beam" appoggiato agli estremi e facendo riferimento ad una larghezza unitaria di struttura che viene risolta come struttura piana. Mentre il peso proprio è automaticamente considerato dal Software, i carichi permanenti portati e variabili vengono applicati al modello:




Figura 136. Carico permanente portato su trave appoggiata – validazione risultati



Figura 137. Carico variabile su trave appoggiata – validazione risultati

Considerando i medesimi coefficienti parziali di sicurezza impiegati per il calcolo analitico, si mostra di seguito il momento in mezzeria ottenuto per la soletta mediante il Software SAP2000.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

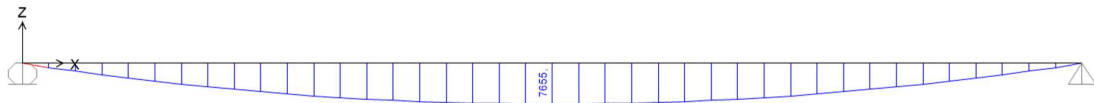



Figura 138. Momenti in mezzeria ottenuto mediante SAP2000 – validazione risultati

Il momento in mezzeria ottenuto dal Software risulta essere pari a 7655 kNm/m e quindi coincidente con il calcolo analitico.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

15. DIMENSIONAMENTO E VERIFICHE DELLA SOLETTA DI COPERTURA SEZIONE 19 IN FASE TEMPORANEA

Nel seguente paragrafo si descrivono i carichi elementari da assumere per le verifiche di resistenza della soletta di copertura che, in un tratto della GA04 in fase temporanea previa costruzione del setto centrale, è caratterizzata da una luce maggiore rispetto alla sezione tipologica descritta nella presente relazione.

Vengono prese in considerazione le condizioni elementari di carico di seguito determinate. Tali Condizioni Elementari saranno opportunamente combinate secondo quanto previsto dalla normativa vigente.

15.1 Analisi dei carichi della soletta

15.1.1 Permanenti strutturali (G1)

Per i materiali si assumono i seguenti pesi specifici:

- calcestruzzo armato: $\gamma_{c.a.} = 25 \text{ kN/m}^3$
- soletta $S_s \times \gamma_{c.a.} = 1.50 \times 25.00 = \mathbf{37.50 \text{ kN/m}^2}$

15.1.2 Permanenti portati (G2)

Sulla soletta di copertura vanno considerati i carichi permanenti rappresentati dal terreno.

g2-1 (carico portato del rilevato):


Si considera l'altezza del rilevato gravante in soletta.

- peso rilevato $(H_r) \cdot \gamma_{ric} = 1.60 \cdot 18.0 = \mathbf{28.8 \text{ kN/m}^2}$

15.1.3 Carichi variabili (Q)

Sulla soletta si considera un carico uniformemente distribuito pari a 20 kPa.

- Carico variabile $q = \mathbf{20 \text{ kN/m}^2}$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

15.1.4 Ritiro

Si considera l'effetto del ritiro agente in copertura. La deformazione da ritiro viene valutata come previsto nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14/01/08) al paragrafo 11.2.10.6.

L'azione viene applicata come variazione termica negativa equivalente.

La deformazione totale da ritiro è pari a:

$$\varepsilon_{CS} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

dove:

$\varepsilon_{cd} = k_h \cdot \varepsilon_{cd0}$ è la deformazione per ritiro da essiccamento


$\varepsilon_{ca} = -2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$ con f_{ck} in N/mm² è la deformazione per ritiro autogeno

Il calcolo del ritiro agente in soletta viene riportato integralmente nella seguente tabella.

Il ritiro agente in soletta viene calcolato nel modo seguente:

Tabella 44. Valutazione dell'azione dovuto al ritiro del calcestruzzo

Concrete class C30/37	f _{ck} (Mpa)	30,71	N
Concrete elastic modulus	E _{cm} (Gpa)	=	33,019
element thickness	s (mm)	=	1500
exposed surfaces	n°	=	1
member's notional size $\alpha=2Ac/u h_0$	α (mm)	=	3000
relative humidity	UR%	=	75
age of concrete in days	t (gg)		54630
age of concrete at loading in days/t0	t _s (gg)	=	1
coefficient which depends on the type of cement	α_{ds1}	=	4
coefficient which depends on the type of cement	α_{ds2}	=	0,12
reference mean compressive strength	f _{cm0} (Mpa)	=	10
characteristic compressive strength	f _{ck} (Mpa)	=	30,71
mean compressive strength	f _{cm} (Mpa)	=	38,71
coefficient for UR%	β_{RH}	=	0,90
basic drying shrinkage strain	ε_{cd0}	=	0,00032

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

drying shrinkage strain - time effect	$\beta_{ds}(t, t_s)$	=	0,89
coefficient depending on the notional size	k_h	=	0,7
drying shrinkage strain x1000	$\epsilon_{cd}(t)$	=	0,20
autogenous shrinkage strain-time effect	$\beta_{as}(t)$	=	1,0000
autogenous shrinkage strain - infinity	$\epsilon_{ca}(\infty)$	=	5,18E-05
autogenous shrinkage strain x1000	$\epsilon_{ca}(t)$	=	0,0518
total shrinkage strain x1000	$\epsilon_{cs}(t, t_s)$	=	0,2492
Equivalent thermal effect	ΔT °C	=	24,9

Si considera, coerentemente con quanto indicato al paragrafo §8.1 Fase 15 SLE, un coefficiente di viscosità pari a:


$$\varphi(\infty, t_0) = 2.75$$

Per ottenere la variazione termica conseguente al ritiro si calcola:

$$\Delta T \text{ applicata} = \Delta T \frac{1}{1 + \varphi(\infty, t_0)} = 24.9 \frac{1}{1 + 2.75} = -6.64 \text{ °C}$$

Per ottenere la trazione agente in soletta causata dal ritiro si modella un portale composto da un traverso, avente le caratteristiche della soletta, e da colonne incastrate alla base, aventi le caratteristiche geometriche e meccaniche dei diaframmi della galleria in oggetto. Essendo il punto d'incastro di difficile valutazione, cautelativamente si considera quest'ultimo in corrispondenza del primo vincolo che determina una lunghezza inferiore del piedritto. Il modello viene implementato sul Software Sap2000 ver. 23.1.0 schematizzando colonne e traverso come elementi "beam". Le caratteristiche degli elementi sono:

- $b \text{ diaf} = 1 \text{ m}$ (dimensione geometrica in direzione longitudinale del diaframma)
- $b \text{ sol} = 1 \text{ m}$ (dimensione geometrica in direzione longitudinale della soletta)
- $s \text{ diaf} = 1.2 \text{ m}$ (spessore del diaframma)
- $s \text{ sol} = 1.5 \text{ m}$ (spessore soletta)
- $h \text{ diaframma} = 2.70 \text{ m}$ (lunghezza diaframmi rispetto al punto d'incastro)
- $L \text{ soletta} = 22.22 \text{ m}$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

- $\Delta T = -6.64 \text{ } ^\circ\text{C}$

Si precisa che il punto d'incastro del diaframma – cautelativamente – è stato considerato come il punto in corrispondenza del quale si dispone il primo ordine di puntelli metallici in fase di costruzione, prossimo alla soletta di copertura.

Il modello del portale con la sollecitazione ottenuta viene esposto di seguito:



Figura 139. Modello portale soggetto a ritiro

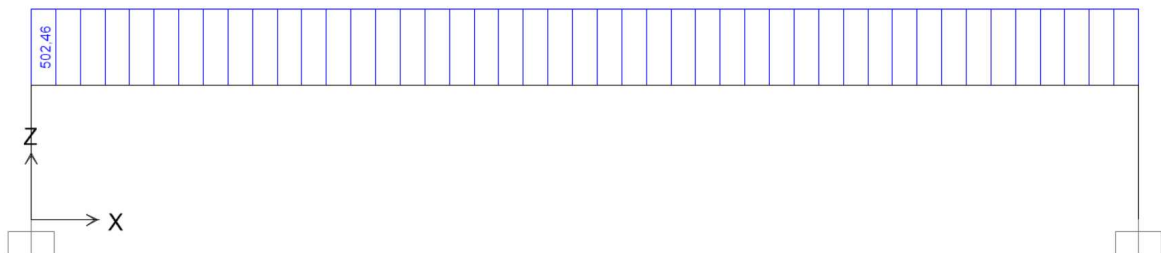



Figura 140. Trazione agente in soletta conseguente al ritiro

La trazione agente in soletta conseguente al ritiro risulta essere:

$$N_{ritiro} = 502.50 \text{ kN}$$

Tale azione sarà opportunamente moltiplicata per il rispettivo coefficiente di combinazione.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

15.1.5 Azioni trasmesse dai diaframmi

La galleria artificiale in analisi è realizzata attraverso la tecnologia esecutiva di tipo top-down caratterizzata da uno scavo sostenuto dai diaframmi e dal solaio di copertura. Tali elementi sono collegati tra di loro e questo implica la trasmissione di forze dai diaframmi alla soletta di copertura. Ai fini dell'analisi dei carichi del solaio si considerano le forze trasmesse ed agenti sulla soletta come indicate di seguito:

SLU

$$M_{diaf\ SLU} = 1603.1\ kNm/m$$

$$N_{diaf\ SLU} = -519.6\ kN/m$$

SLV

$$M_{diaf\ SLV} = 1237.5\ kNm/m$$

$$N_{diaf\ SLV} = -316.5\ kN/m$$

SLE

$$M_{diaf\ SLE} = 1225.6\ kNm/m$$


$$N_{diaf\ SLE} = -385.14\ kN/m$$

Tali azioni vengono sommate ai momenti sollecitanti i modelli in base alle rispettive combinazioni. Si precisa che le azioni di compressione in soletta hanno segno negativo. I momenti sono sommati a quelli conseguenti ai carichi agenti per lo schema trave incastro-incastro:

Momento flettente "M" agente in soletta:

- $M_{SLU\ tot} = M_{diaf\ SLU} + M_{SLU}$
- $M_{SLE\ tot} = M_{diaf\ SLE} + M_{SLE}$

Per i coefficienti di combinazione impiegati si rimanda al paragrafo §14.2 della presente relazione tecnica e di calcolo (Combinazioni di carico).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

15.2 Combinazioni di carico

Le combinazioni di carico, considerate ai fini delle verifiche, sono stabilite in modo da garantire la sicurezza in conformità a quanto prescritto al capitolo 2 delle NTC2018. Si riporta nella seguente figura l'estratto della normativa.

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.1)$$

- Combinazione caratteristica (rara), generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili, da utilizzarsi nelle verifiche alle tensioni ammissibili di cui al § 2.7:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.2)$$

- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.3)$$

- Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.4)$$

- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E (v. § 3.2):

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.5)$$

- Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali di progetto A_d (v. § 3.6):

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.6)$$

Figura 141. Combinazioni di carico previste dalle NTC2018

Per i coefficienti parziali di sicurezza si è fatto riferimento alla Normativa Italiana 2018 Cap. 6.2.4 Tab. 6.2.I, mentre per i coefficienti di combinazione ψ si è considerata la Tab. 2.5.I assumendo che la soletta in analisi ricada in categoria G (rimesse, parcheggi ed aree per il traffico dei veicoli).



 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Tabella 45. Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I – NTC2018) –
⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}

	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_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

Tabella 46. Valori dei coefficienti di combinazione (Tab. 2.5.I – NTC2018)


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

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d’opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Di seguito si espone la tabella raffigurante le combinazioni impiegate ai fini dell’analisi.

Tabella 47. Combinazioni di carico impiegate per le analisi in oggetto

	$\delta 1$	$\delta 2$	q	Ritiro	Mslu	Mslc	Mslv
A1-M1_1	1,3	1,5	1,5	1,3	1		
SLV_1	1	1					1

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

15.3 Modello di calcolo

La struttura viene schematizzata attraverso un modello analitico agli elementi finiti, assumendo uno schema statico di asta appoggio-appoggio per massimizzare il momento in mezzzeria ed uno schema asta incastro-incastro per massimizzare i momenti agli estremi.


L'analisi strutturale viene condotta con il metodo degli spostamenti per la valutazione dello stato tenso-deformativo indotto dai carichi statici.

Per le caratteristiche geometriche dell'asta si è quindi assunto:

- una sezione rettangolare $b \times h = 100 \times 150$ cm per la soletta di copertura

Per quanto riguarda la rigidezza dell'asta si è assunto:

- $E_{cm} = 33019$ N/mm² (per CLS R_{ck} 37);

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d’opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

15.4 Sollecitazioni

Ai fini del dimensionamento della soletta si considerano due differenti sezioni di riferimento: sezione in mezzeria e sezione all'estremità dell'elemento. Poiché la condizione di vincolo tra gli estremi della soletta ed i diaframmi non rappresenta un incastro perfetto e poiché dalla simulazione del sistema, mediante il software Paratie Plus ver. 21.0.2 – CaAS 2021, i momenti sollecitanti in mezzeria e all'estremità della copertura risultano essere pari a $\frac{p \cdot l^2}{16}$, si adoperano i seguenti valori per il dimensionamento:

- Sezione in mezzeria: si considera un momento pari a $\frac{p \cdot l^2}{12}$ corrispondente ad un valore intermedio tra $\frac{p \cdot l^2}{8}$ (momento in mezzeria per schema di trave appoggio-appoggio) e $\frac{p \cdot l^2}{16}$ (momento in mezzeria ottenuto dalla media della simulazione del sistema mediante il software Paratie Plus ver. 21.0.2 – CaAS 2021);
- Sezione all'estremo: si considera un momento pari alla somma di $\frac{p \cdot l^2}{16}$ ed il momento trasmesso dai diaframmi alla soletta descritto al paragrafo §14.1.5 della presente relazione tecnica e di calcolo;

Di seguito si espongono le sollecitazioni ottenute.

Stato limite ultime (SLU)

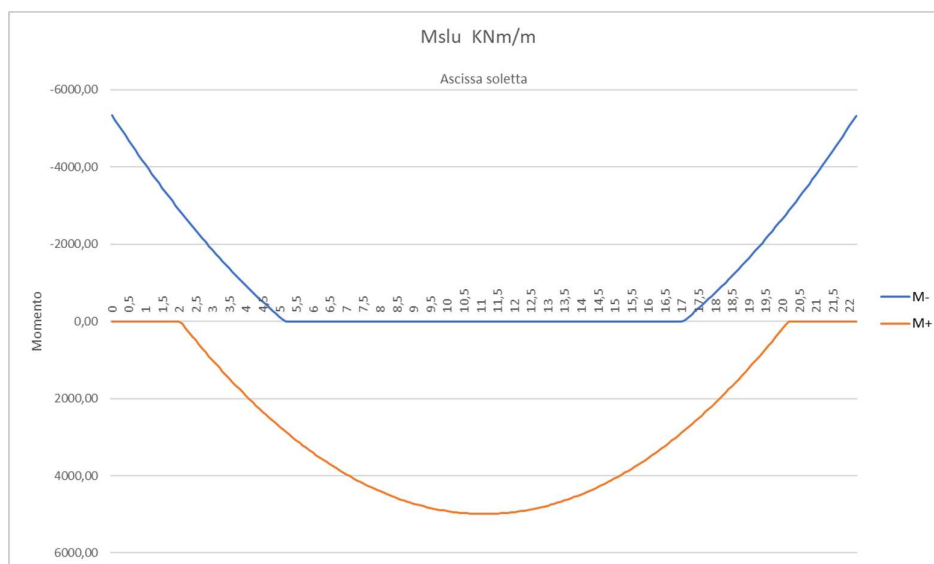


Figura 142.Momento flettente (SLU)

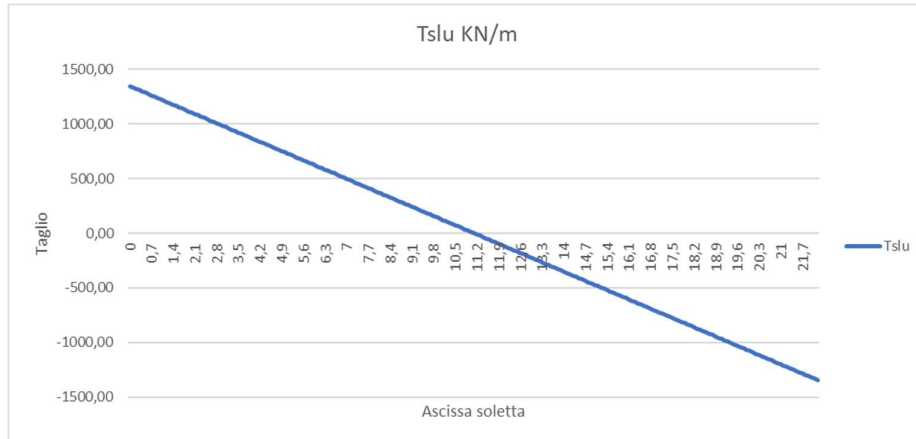


Figura 143.Taglio schema (SLU)

Azione assiale

Tabella 48.Azione assiale sulla soletta (SLE / SLU)

$N_{SLU} = 1.3 N_{ritiro}$	653.25 kN
$N_{SLE} = N_{ritiro}$	502.50 kN



15.5 Verifiche soletta di copertura

Si riportano di seguito le verifiche effettuate sulla soletta considerando le sollecitazioni massime e minime agenti sui differenti modelli e considerando l'azione di trazione determinata dal ritiro. Le verifiche allo stato limite di esercizio prendono come riferimento i valori limite da Normativa indicati nei paragrafi §11.1.1 e §11.1.2 della presente relazione tecnica e di calcolo.

Le verifiche sono state effettuate mediante un foglio di calcolo, che utilizza la seguente simbologia e parametri:

Tabella 49. Parametri operativi per la verifica del CLS armato

materiali			
calcestruzzo		acciaio	
R _{ck}	37 [MPa]	f _{yk}	450 [MPa]
f _{ck}	30,7 [MPa]	γ _s	1,15
γ _c	1,5	f _{yd}	391,3 [MPa]
α _{cc}	0,85	E _s	210000 [MPa]
f _{cd}	17,4 [MPa]	ε _{uk}	75 [%]
v	0,526		
ε _{c2}	2,0 [‰]		
ε _{cu2}	3,5 [‰]		
α _e	15,0		
k _t	0,4		
k ₁	0,8		
k ₃	3,4		
k ₄	0,425		

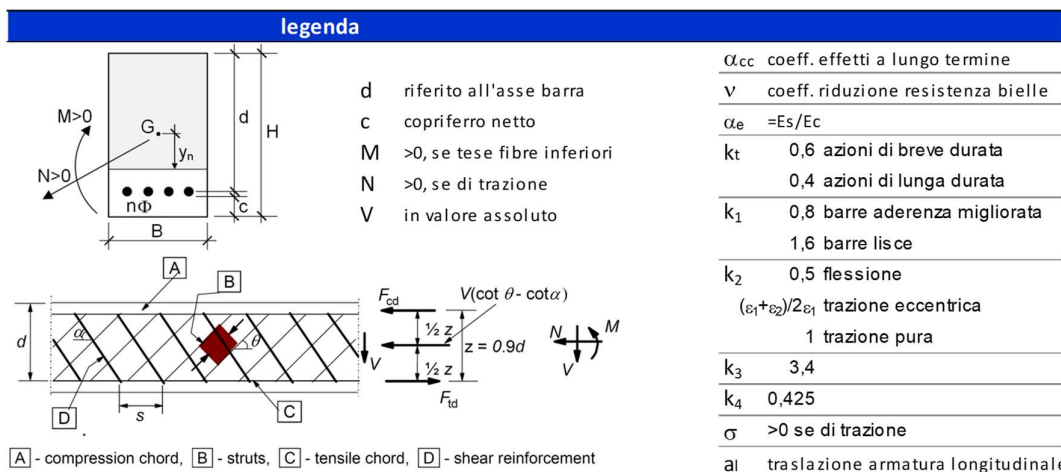



Figura 144. Convenzioni adottate per la verifica sezione in c.a.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3


15.5.1 Estremi

La soletta (C30/37) ha uno spessore di 150 cm e agli estremi è armata superiormente con doppio strato $\phi 30/10$ esterno e $7.5\phi 30$ interno. Inferiormente si arma con $7.5\phi 30$, in longitudinale si dispongono $\phi 16/20$. A taglio si dispongono spilli $\phi 12/20 \times 20$. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale ($\phi 16$) ed il diametro degli spilli ($\phi 12$).

geometria					sollecitazioni e risultati			
sezione trasversale					SLE RARA		SLU	
B	H	c	d	z	M _{EK}	N _{EK}	M _{Ed}	N _{Ed}
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
100	150	7,8	140,1	126,0	0,00	0,00	4947,00	653,25
armatura longitudinale					tensioni e fessure			
nbarre	ϕ	d	A _{sl}		M _{dec}	M _{cr}		
	[mm]	[cm]	[cm ²]		[kNm]	[kNm]		
5	30	9,3	35,34		0,0	-1145,5	5905,6	1,19
7,5	30	139,2	53,01				FS	
10	30	140,7	70,69					
armatura a taglio					taglio			
nbracci	ϕ	s	α	A _{sw}	y _n	$\sigma_{c,min}$	$\sigma_{s,min}$	$\sigma_{s,max}$
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
5	12	20	90	5,65	49,56	0,0	0,0	0,0
					k ₂			
					0,5			
					$\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm}$	-		
					[‰]			
					S _{r,max}	-		
					[cm]			
					W _k	-		
					[mm]			
							V _{Rdc}	347,9 [kN]
								predisporre armatura a taglio
							V _{Rds}	2415,5 [kN]
							V _{Rdmax}	4999,0 [kN]
							θ	30,0 [°]
							sezione	duttile
							a _l	109,2 [cm]

Figura 145. Verifica sezione soletta di copertura in c.a. sezione 19 in fase temporanea allo SLU (Estremi)

La verifica della soletta in fase temporanea risulta essere soddisfatta.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3


15.5.2 Mezzeria

La soletta (C30/37) ha uno spessore di 150 cm e agli estremi è armata inferiormente con doppio strato $\phi 30/10$ esterno e $7.5\phi 30$ interno. Superiormente si arma con $7.5\phi 30$, in longitudinale si dispongono $\phi 16/20$. A taglio si dispongono spilli $\phi 12/20 \times 20$. La distanza tra la generatrice della barra di armatura ed il lembo esterno della sezione è stata calcolata come segue: al copriferro netto di 5 cm sono stati sommati il diametro della barra di armatura esterna che si sviluppa in senso longitudinale ($\phi 16$) ed il diametro degli spilli ($\phi 12$).

geometria					sollecitazioni e risultati			
sezione trasversale					SLE RARA		SLU	
B	H	c	d	z	M_{Ek}	0,00 [kNm]	M_{Ed}	4991,00 [kNm]
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	N_{Ek}	0,00 [kN]	N_{Ed}	653,25 [kN]
100	150	7,8	138,1	124,3	tensioni e fessure		V_{Ed}	0,00 [kN]
armatura longitudinale					M_{dec}	0,0 [kNm]		
nbarre	ϕ	d	A_{sl}		M_{cr}	-1188,4 [kNm]		
	[mm]	[cm]	[cm ²]				M_{Rd}	5858,3 [kNm]
7,5	30	9,3	53,01		y_n	43,36 [cm]	FS	1,17
7,5	30	134,7	53,01		$\sigma_{c,min}$	0,0 [MPa]	V_{Rdc}	344,3 [kN]
10	30	140,7	70,69		$\sigma_{s,min}$	0,0 [MPa]	non serve armatura a taglio	
					$\sigma_{s,max}$	0,0 [MPa]		
armatura a taglio							V_{Rds}	0,0 [kN]
nbracci	ϕ	s	α	A_{sw}	k_2	0,5	V_{Rdmax}	4930,2 [kN]
	[mm]	[cm]	[°]	[cm ²]	$\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm}$	- [%]	θ	30,0 [°]
0	12	20	90	0,00	$s_{r,max}$	- [cm]	sezione	duttile
					W_k	- [mm]	a_l	138,1 [cm]

Figura 146. Verifica sezione soletta di copertura in c.a. sezione 19 in fase temporanea allo SLU (Mezzeria)

La verifica della soletta in fase temporanea risulta essere soddisfatta.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

16. DIMENSIONAMENTO E VERIFICHE DELLA SOLETTA DI COPERTURA SEZIONE 19 A LUNGO TERMINE

Nel seguente paragrafo si descrivono i carichi elementari da assumere per le verifiche di resistenza della soletta di copertura sezione 19 a lungo termine.

Vengono prese in considerazione le condizioni elementari di carico di seguito determinate. Tali Condizioni Elementari saranno opportunamente combinate secondo quanto previsto dalla normativa vigente.

16.1 Analisi dei carichi della soletta

16.1.1 Permanenti strutturali (G1)

Per i materiali si assumono i seguenti pesi specifici:

- calcestruzzo armato: $\gamma_{c.a.} = 25 \text{ kN/m}^3$
- soletta $S_s \times \gamma_{c.a.} = 1.50 \times 25.00 = \mathbf{37.50 \text{ kN/m}^2}$

16.1.2 Permanenti portati (G2)

Sulla soletta di copertura vanno considerati il carico permanente rappresentato dal terreno.

g2-1 (carico portato del rilevato):


Si considera l'altezza del rilevato gravante in soletta come la differenza tra il ricoprimento totale (1.6 m) e la sovrastruttura tranviaria (0.7 m).

- peso rilevato $(H_r) \cdot \gamma_{ric} = 1.6 - 0.7 = 0.90 \cdot 18.0 = \mathbf{16.20 \text{ kN/m}^2}$

g2-2 (peso proprio dell'armamento del tram):

Il peso dell'armamento tramviario è il medesimo calcolato al paragrafo §8.2.

- peso armamento $H_{armamento} \cdot \gamma_{arm} = \mathbf{18.25 \text{ kN/m}^2}$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

16.1.3 Carichi variabile (Q)

Sulla soletta agisce il carico variabile tranviario che è determinato secondo i parametri di un carico variabile ferroviario LM71.

Per tale carico valgono le considerazioni effettuate in occasione del calcolo delle opere di sostegno definitive, pertanto, per ogni ulteriore approfondimento in merito si rimanda al paragrafo §8.2 della presente relazione tecnica e di calcolo. Si riassumono brevemente nel seguito i carichi variabili tenuti in conto nelle analisi in oggetto:

- Carico variabile tranviario $q_{tram} = 36.8 \text{ kN/m}^2$

16.1.4 Ritiro

Si considera l'effetto del ritiro agente in copertura. La deformazione da ritiro viene valutata come previsto nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14/01/08) al paragrafo 11.2.10.6.

L'azione viene applicata come variazione termica negativa equivalente.

La deformazione totale da ritiro è pari a:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

dove:

$\varepsilon_{cd} = k_h \cdot \varepsilon_{c0}$ è la deformazione per ritiro da essiccamento


$\varepsilon_{ca} = -2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$ con f_{ck} in N/mm^2 è la deformazione per ritiro autogeno

Il calcolo del ritiro agente in soletta viene riportato integralmente nella seguente tabella.

Il ritiro agente in soletta viene calcolato nel modo seguente:

Tabella 1. Valutazione dell'azione dovuto al ritiro del calcestruzzo

Concrete class C30/37	f_{ck} (Mpa)	30,71	N
Concrete elastic modulus	E_{cm} (Gpa)	=	33,019
element thickness	s (mm)	=	1500
exposed surfaces	n°	=	1
member's notional size $\alpha=2A_c/u h_0$	α (mm)	=	3000

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

relative humidity	UR%	=	75
age of concrete in days	t (gg)		54630
age of concrete at loading in days/t0	t _s (gg)	=	1
coefficient which depends on the type of cement	α _{ds1}	=	4
coefficient which depends on the type of cement	α _{ds2}	=	0,12
reference mean compressive strength	f _{cm0} (Mpa)	=	10
characteristic compressive strength	f _{ck} (Mpa)	=	30,71
mean compressive strength	f _{cm} (Mpa)	=	38,71
coefficient for UR%	β _{RH}	=	0,90
basic drying shrinkage strain	ε _{cd0}	=	0,00032
drying shrinkage strain - time effect	β _{ds} (t, t _s)	=	0,89
coefficient depending on the notional size	k _h	=	0,7
drying shrinkage strain x1000	ε _{cd} (t)	=	0,20
autogenous shrinkage strain-time effect	β _{as} (t)	=	1,0000
autogenous shrinkage strain - infinity	ε _{ca} (∞)	=	5,18E-05
autogenous shrinkage strain x1000	ε _{ca} (t)	=	0,0518
total shrinkage strain x1000	ε_{es} (t, t_s)	=	0,2492
Equivalent thermal effect	ΔT °C	=	24,9


Si considera, coerentemente con quanto indicato nella relazione di calcolo della GA 3_MTL2T1A1DSTRGA0R003-0-0, un coefficiente di viscosità pari a:

$$\varphi(\infty, t_0) = 2.75$$

Per ottenere la variazione termica conseguente al ritiro si calcola:

$$\Delta T_{applicata} = \Delta T \frac{1}{1 + \varphi(\infty, t_0)} = 24.9 \frac{1}{1 + 2.75} = -6.64 \text{ °C}$$

Per ottenere la trazione agente in soletta causata dal ritiro si modella un portale composto da un traverso, avente le caratteristiche della soletta, e da colonne incastrate alla base, aventi le caratteristiche geometriche e meccaniche dei diaframmi della galleria in oggetto. Essendo il punto d'incastro di difficile valutazione, cautelativamente si considera quest'ultimo in corrispondenza del

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

primo vincolo che determina una lunghezza inferiore del piedritto. Il modello viene implementato sul Software Sap2000 ver. 23.1.0 schematizzando colonne e traverso come elementi "beam". Le caratteristiche degli elementi sono:

- $b_{diaf} = 1 \text{ m}$ (dimensione geometrica in direzione longitudinale del diaframma)
- $b_{sol} = 1 \text{ m}$ (dimensione geometrica in direzione longitudinale della soletta)
- $s_{diaf} = 1.2 \text{ m}$ (spessore del diaframma)
- $s_{sol} = 1.5 \text{ m}$ (spessore soletta)
- $h_{diaframma} = 2.70 \text{ m}$ (lunghezza diaframmi rispetto al punto d'incastro)
- $L_{soletta} = 22.22 \text{ m}$
- $\Delta T = -6.64 \text{ }^\circ\text{C}$

Si precisa che il punto d'incastro del diaframma – cautelativamente – è stato considerato come il punto in corrispondenza del quale si dispone il primo ordine di puntelli metallici in fase di costruzione, prossimo alla soletta di copertura.

Il modello del portale con la sollecitazione ottenuta viene esposto di seguito:

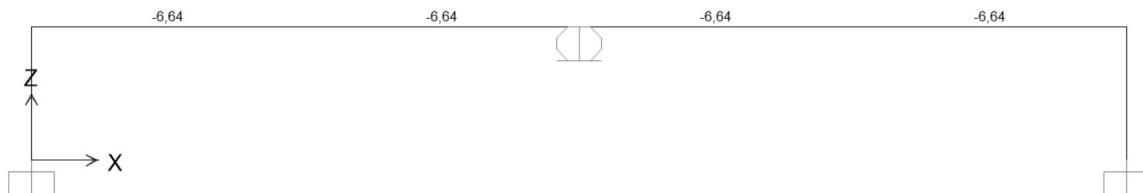


Figura 147. Modello portale soggetto a ritiro

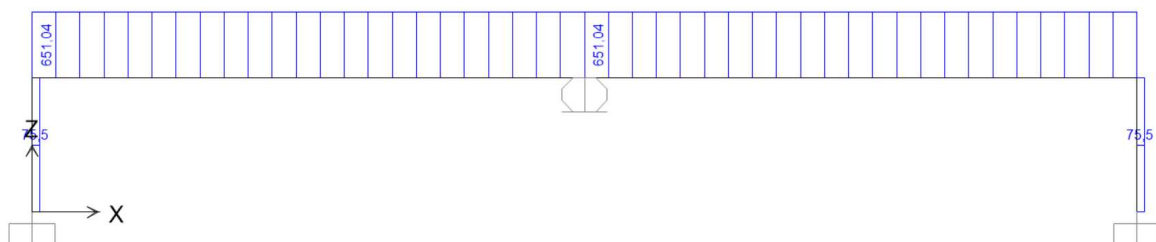




Figura 148. Trazione agente in soletta conseguente al ritiro

La trazione agente in soletta conseguente al ritiro risulta essere:

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

$$N_{ritiro} = 651 \text{ kN}$$

Tale azione sarà opportunamente moltiplicata per il rispettivo coefficiente di combinazione.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d’opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

16.1.5 Azioni trasmesse dai diaframmi

La galleria artificiale in analisi è realizzata attraverso la tecnologia esecutiva di tipo top-down caratterizzata da uno scavo sostenuto dai diaframmi e dal solaio di copertura. Tali elementi sono collegati tra di loro e questo implica la trasmissione di forze dai diaframmi alla soletta di copertura. Ai fini dell’analisi dei carichi del solaio si considerano le forze trasmesse ed agenti sulla soletta come indicate di seguito:

SLU

$$M_{diaf\ SLU} = 1603.1\ kNm/m$$

$$N_{diaf\ SLU} = -519.6\ kN/m$$

SLV

$$M_{diaf\ SLV} = 1237.5\ kNm/m$$

$$N_{diaf\ SLV} = -316.5\ kN/m$$

SLE

$$M_{diaf\ SLE} = 1225.6\ kNm/m$$


$$N_{diaf\ SLE} = -385.14\ kN/m$$

Tali azioni vengono sommate ai momenti sollecitanti i modelli in base alle rispettive combinazioni. Si precisa che le azioni di compressione in soletta hanno segno negativo. I momenti sono sommati a quelli conseguenti ai carichi agenti per lo schema trave incastro-incastro:

Momento flettente “M” agente in soletta:

- $M_{SLU\ tot} = M_{diaf\ SLU} + M_{SLU}$
- $M_{SLE\ tot} = M_{diaf\ SLE} + M_{SLE}$

Per i coefficienti di combinazione impiegati si rimanda al paragrafo §14.2 della presente relazione tecnica e di calcolo (Combinazioni di carico).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

16.2 Combinazioni di carico

Le combinazioni di carico, considerate ai fini delle verifiche, sono stabilite in modo da garantire la sicurezza in conformità a quanto prescritto al capitolo 2 delle NTC2018. Si riporta nella seguente figura l'estratto della normativa.

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.1)$$

- Combinazione caratteristica (rara), generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili, da utilizzarsi nelle verifiche alle tensioni ammissibili di cui al § 2.7:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.2)$$

- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.3)$$

- Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.4)$$

- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E (v. § 3.2):

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.5)$$


- Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali di progetto A_d (v. § 3.6):

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.6)$$

Figura 1. Combinazioni di carico previste dalle NTC2018

Per i coefficienti parziali di sicurezza si è fatto riferimento alla Normativa Italiana 2018 Cap. 6.2.4 Tab. 6.2.I, mentre per i coefficienti di combinazione ψ si è considerata la Tab. 2.5.I assumendo che la soletta in analisi ricada in categoria G (rimesse, parcheggi ed aree per il traffico dei veicoli).

Tabella 2. Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I – NTC2018) –
⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

	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_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

Tabella 3.Valori dei coefficienti di combinazione (Tab. 2.5.I – NTC2018)

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

Di seguito si espone la tabella raffigurante le combinazioni impiegate ai fini dell'analisi.

Tabella 4.Combinazioni di carico impiegate per le analisi in oggetto




CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

	g1	g2	q	Ritiro	Mslu	Mslc	Mslv
A1-M1_1	1,3	1,5	1,5	1,3	1		
RARA_1	1	1	1	1		1	
FREQ_1	1	1	0,5	1		1	
Q. PERMA_1	1	1	0,3	1		1	

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

16.3 Modello di calcolo

La struttura viene schematizzata attraverso un modello agli elementi finiti, assumendo uno schema statico di trave continua su tre appoggi per massimizzare il momento in mezzeria delle campate ed un modello con gli incastri agli estremi per tener conto del momento determinato dal vincolo dei diaframmi.

L'analisi strutturale viene condotta con il metodo degli spostamenti per la valutazione dello stato tenso-deformativo indotto dai carichi statici.

Per le caratteristiche geometriche dell'asta si è quindi assunto:

- una sezione rettangolare $b \times h = 100 \times 100$ cm per la soletta di copertura

Per quanto riguarda la rigidità dell'asta si è assunto:

- $E_{cm} = 33019$ N/mm² (per CLS R_{ck} 37);


Si riportano nelle seguenti figure il modello di calcolo impiegato per l'analisi strutturale della soletta e l'applicazione sullo stesso dei carichi permanenti e variabili.



Figura 2. Modelli del solaio di copertura



Figura 3. Modelli del solaio di copertura con incastri agli estremi

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

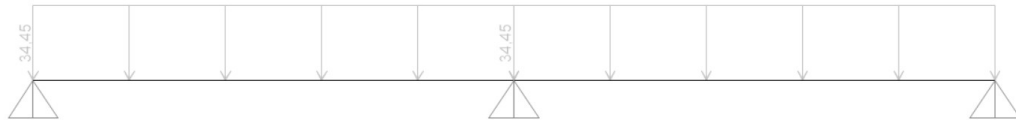


Figura 4.G2 carichi permanenti portati

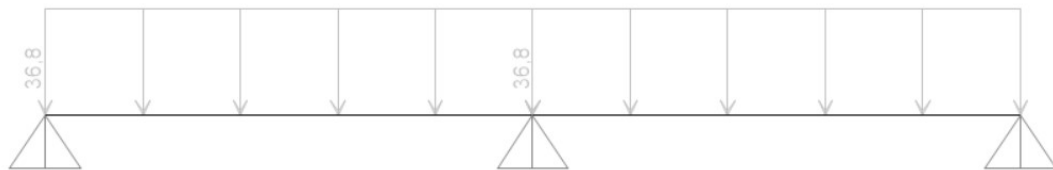


Figura 5.Q carichi variabili

16.4 Sollecitazioni e deformata

Di seguito si espongono le sollecitazioni ottenute.

Stato limite ultime (SLU)

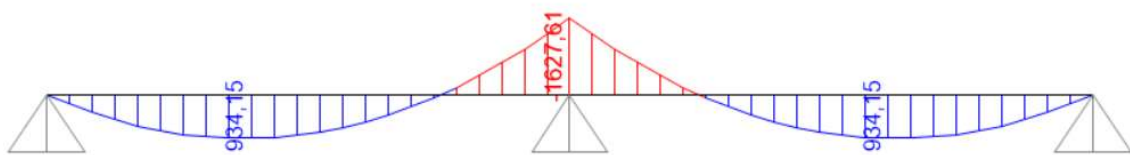



Figura 6.Momento flettente appoggi (SLU)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

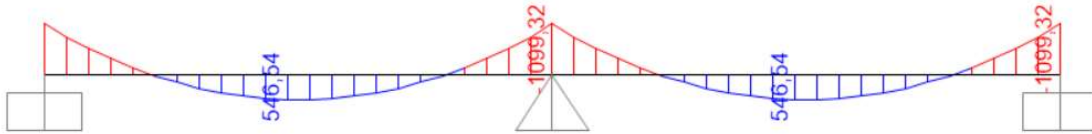


Figura 7.Momento flettente incastro agli estremi (SLU)

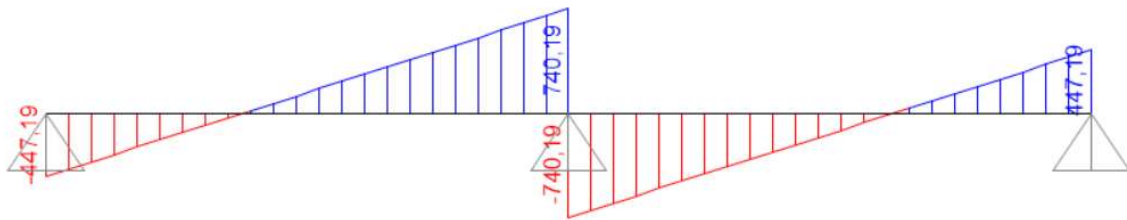


Figura 8.Taglio schema (SLU)

Stato Limite di Esercizio (SLE Combinazione Rara)

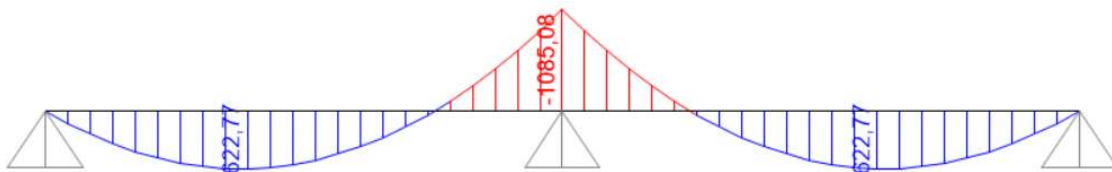


Figura 9.Momento flettente (SLE Rara)


 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3



Figura 10. Momento flettente incastro agli estremi (SLE Rara)

Azione assiale

Tabella 5. Azione assiale sulla soletta (SLE / SLU)

$N_{SLU} = 1.3 N_{ritiro}$	846.3 kN
$N_{SLE} = N_{ritiro}$	651 kN

Si mostra di seguito la deformata della soletta di copertura lato pozzo espressa rispetto allo Stato Limite di Esercizio:

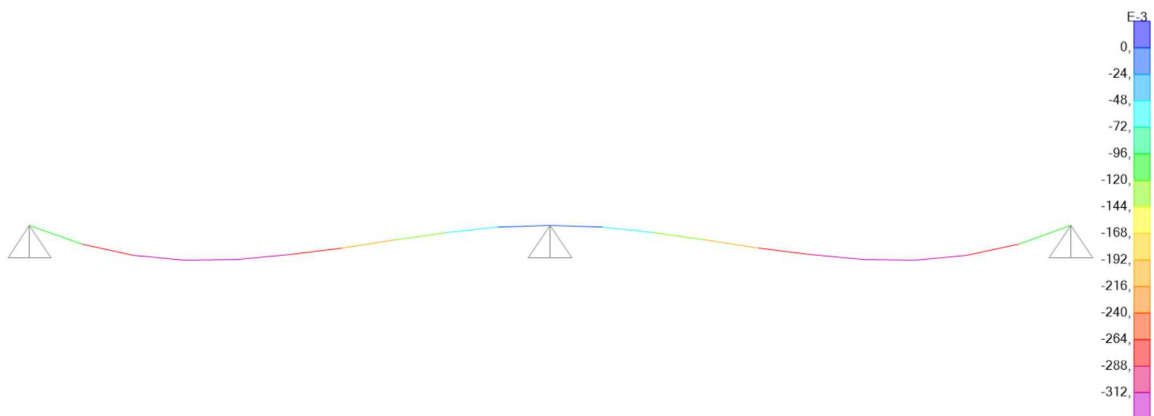



Figura 11. Deformata della soletta di copertura (SLE Rara)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

Si effettua la verifica delle deformate dei solai coerentemente con quanto indicato nell'Eurocodice 2 al paragrafo 7.4.1 (4). L'aspetto e la funzionalità della struttura possono essere pregiudicati se l'inflessione di una trave o piastra soggetti ai carichi quasi-permanenti è maggiore di 1/250 della luce dell'elemento. Cautelativamente si effettua la verifica considerando le frecce ottenute per la combinazione RARA, di seguito si riportano i valori ottenuti:

	Inflessione elementi [mm]	Valori limite [mm]	VERIFICA
Copertura	0.312	44.44	OK

La verifica risulta essere soddisfatta.



16.5 Verifiche soletta di copertura

Si riportano di seguito le verifiche effettuate sulla soletta considerando le sollecitazioni massime e minime agenti sui differenti modelli e considerando l'azione di trazione determinata dal ritiro. Le verifiche allo stato limite di esercizio prendono come riferimento i valori limite da Normativa indicati nei paragrafi §11.1.1 e §11.1.2 della presente relazione tecnica e di calcolo. Le verifiche sono state effettuate mediante un foglio di calcolo, che utilizza la seguente simbologia e parametri:

Tabella 6. Parametri operativi per la verifica del CLS armato

materiali			
calcestruzzo		acciaio	
Rck	37 [MPa]	f _{yk}	450 [MPa]
f _{ck}	30,7 [MPa]	γ _s	1,15
γ _c	1,5	f _{yd}	391,3 [MPa]
α _{cc}	0,85	E _s	210000 [MPa]
f _{cd}	17,4 [MPa]	ε _{uk}	75 [%]
v	0,526		
ε _{c2}	2,0 [‰]		
ε _{cu2}	3,5 [‰]		
α _e	15,0		
k _t	0,4		
k ₁	0,8		
k ₃	3,4		
k ₄	0,425		

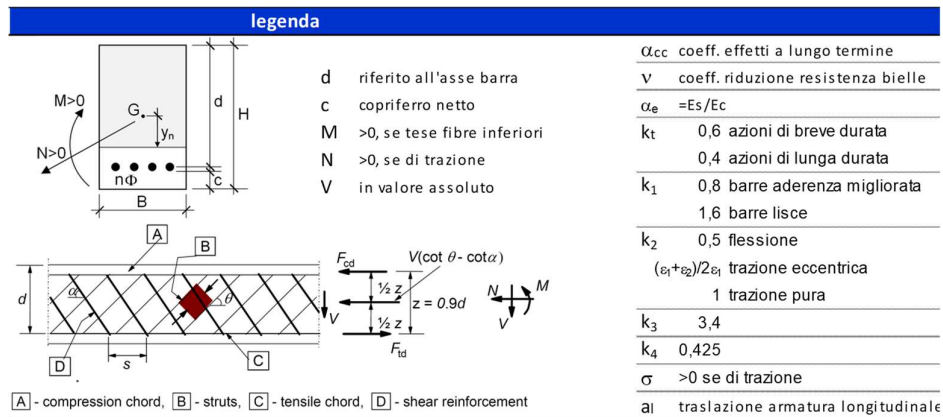



Figura 12. Convenzioni adottate per la verifica sezione in c.a.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

17.ALLEGATO 1: FASI DI CALCOLO DIAFRAMMI DEFINITIVI

Si riassumono brevemente le fasi di calcolo impiegate per le analisi numeriche:

- **Fase 1:** condizione geostatica (1.90 m di terreno superficiale sovrastante l'unità 2 principale e quota falda a -9.00 m da quota stradale – falda di progetto a breve termine);
- **Fase 2:** applicazione dei carichi delle strutture esistenti (BOCI16 pari a 40 kPa) e ribasso fino alla quota di realizzazione dei diaframmi (-2.35 m rispetto al piano stradale);
- **Fase 3:** realizzazione dei diaframmi (lunghezza diaframmi pari a 35.5 m e spessore 1.20 m);
- **Fase 4:** realizzazione del tampone di fondo (13 m di jet grouting);
- **Fase 5:** esecuzione scavo fino alla quota di -6.60 m da piano stradale (tale da garantire una luce netta interna di 3.5 m dopo l'esecuzione della soletta – per ragioni legate alla sicurezza);
- **Fase 6:** realizzazione della soletta di copertura (spessore pari a 1.50 m);
- **Fase 7:** ritombamento e applicazione del carico accidentale in superficie (carico stradale o tranviario – per il carico fare riferimento all'analisi dei carichi riportato al §8.2 della presente relazione);
- **Fase 8:** installazione del primo ordine di puntelli metallici provvisionali;
- **Fase 9:** scavo di ribasso fino alla quota di -13.70 m da piano stradale (e conseguente ribasso della falda);
- **Fase 10:** installazione del secondo ordine di puntelli metallici provvisionali;
- **Fase 11:** scavo di ribasso fino alla quota di -20.00 m da piano stradale (e conseguente ribasso della falda);
- **Fase 12:** installazione del terzo ordine di puntelli metallici provvisionali;
- **Fase 13:** scavo di ribasso fino alla quota di -24.00 m (e conseguente ribasso della falda - fondo scavo);
- **Fase 14:** simulazione extra-scavo di 50 cm come imposto dalle NTC 2018 al §6.5.2.2;
- **Fase 15:** realizzazione del solettone di fondo (spessore pari a 1.50 m);
- **Fase 16:** ritombamento fino alla quota di fondo scavo;
- **Fase 17:** rimozione del terzo ordine di puntelli metallici provvisionali;
- **Fase 18:** realizzazione primo ordine di soletta in c.a. (spessore pari a 1.00 m);
- **Fase 19:** rimozione del secondo ordine di puntelli metallici provvisionali;
- **Fase 20:** realizzazione secondo ordine di soletta in c.a. (spessore pari a 1.00 m);
- **Fase 21:** rimozione del primo ordine di puntelli metallici provvisionali;
- **Fase 22:** innalzamento quota della falda a -6.00 m da piano stradale e rimozione del tampone di fondo (condizione di lungo termine);
 - **Fase 23 (SLE):** simulazione dell'effetto del fluage dei diaframmi; per simulare tale effetto si applica al modulo elastico del CLS un coefficiente di viscosità pari a $\varphi = 2.75$;
 - **Fase 23 (SLU/SLV):** applicazione di un'azione sismica pseudostatica secondo il noto metodo di Wood.



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

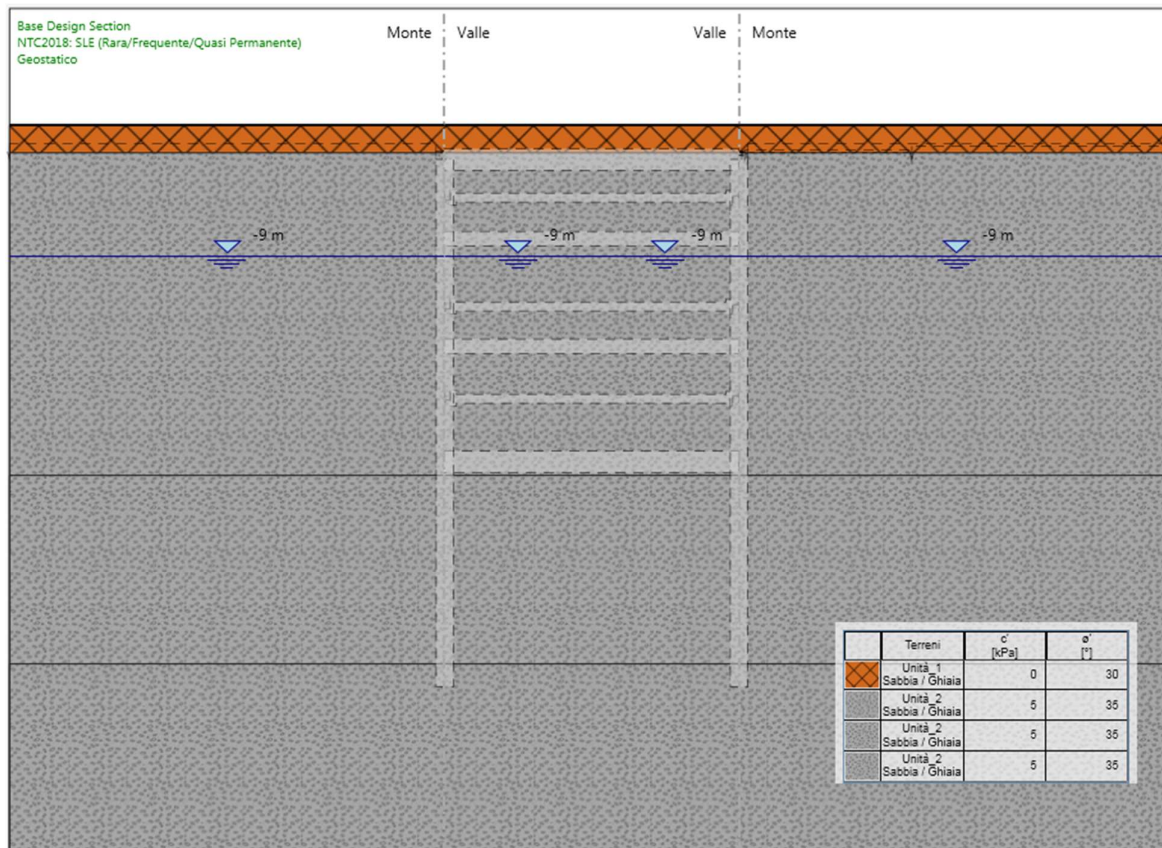


Figura 16.Fase 1: condizione geostatica



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

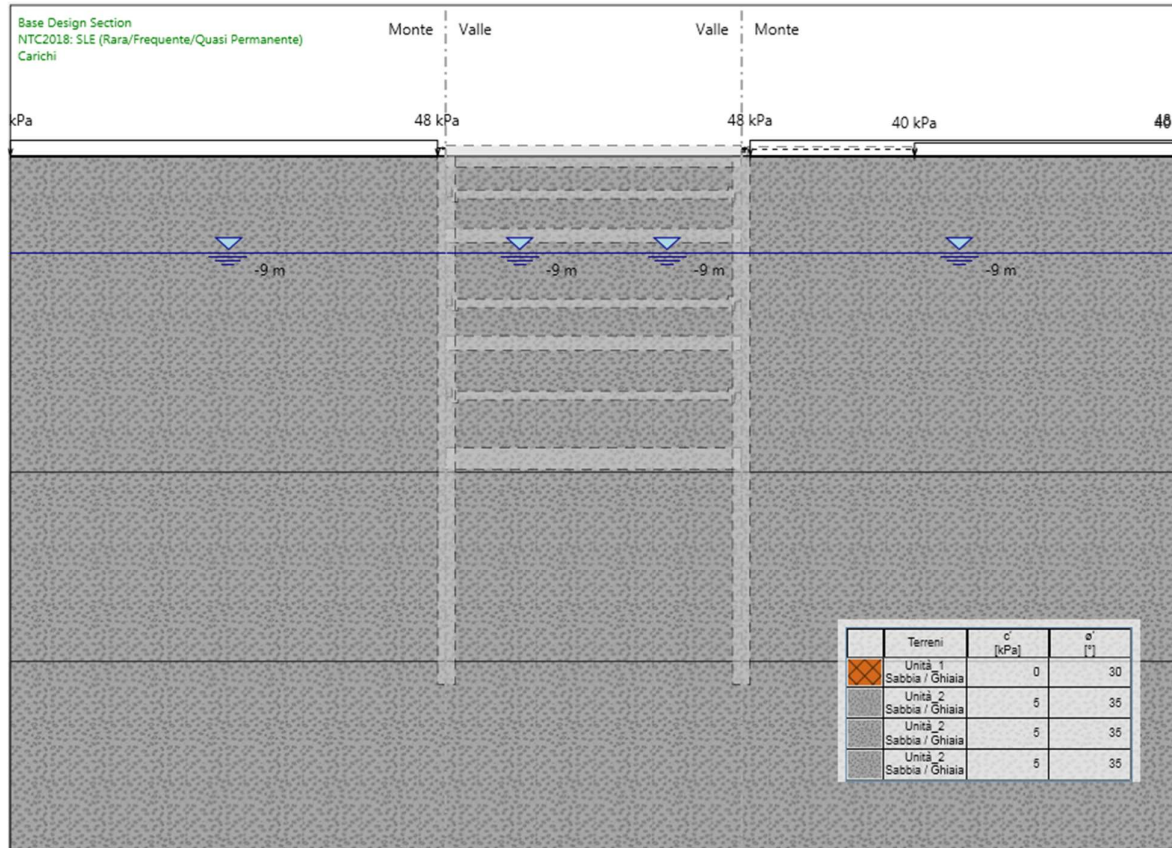


Figura 17.Fase 2: applicazione carichi preesistenze e scavo a quota realizzazione diaframmi



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

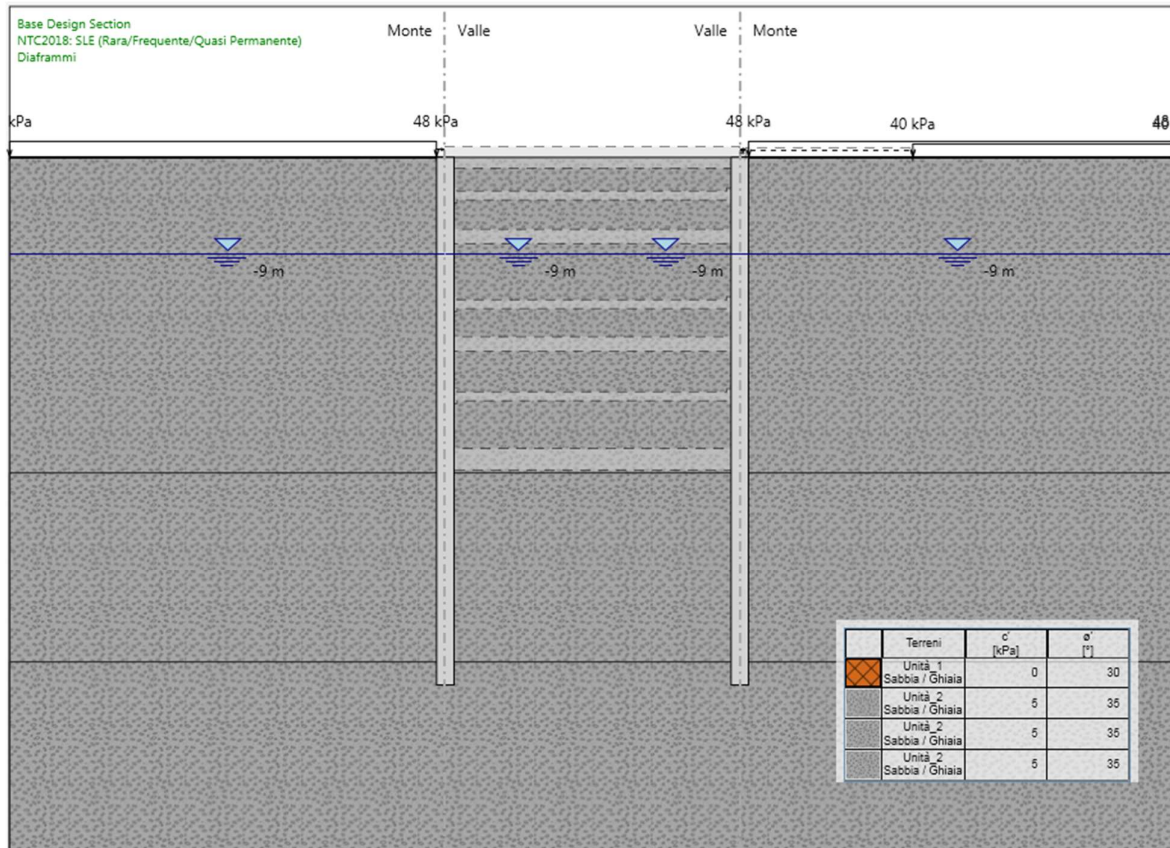


Figura 18.Fase 3: realizzazione diaframmi



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

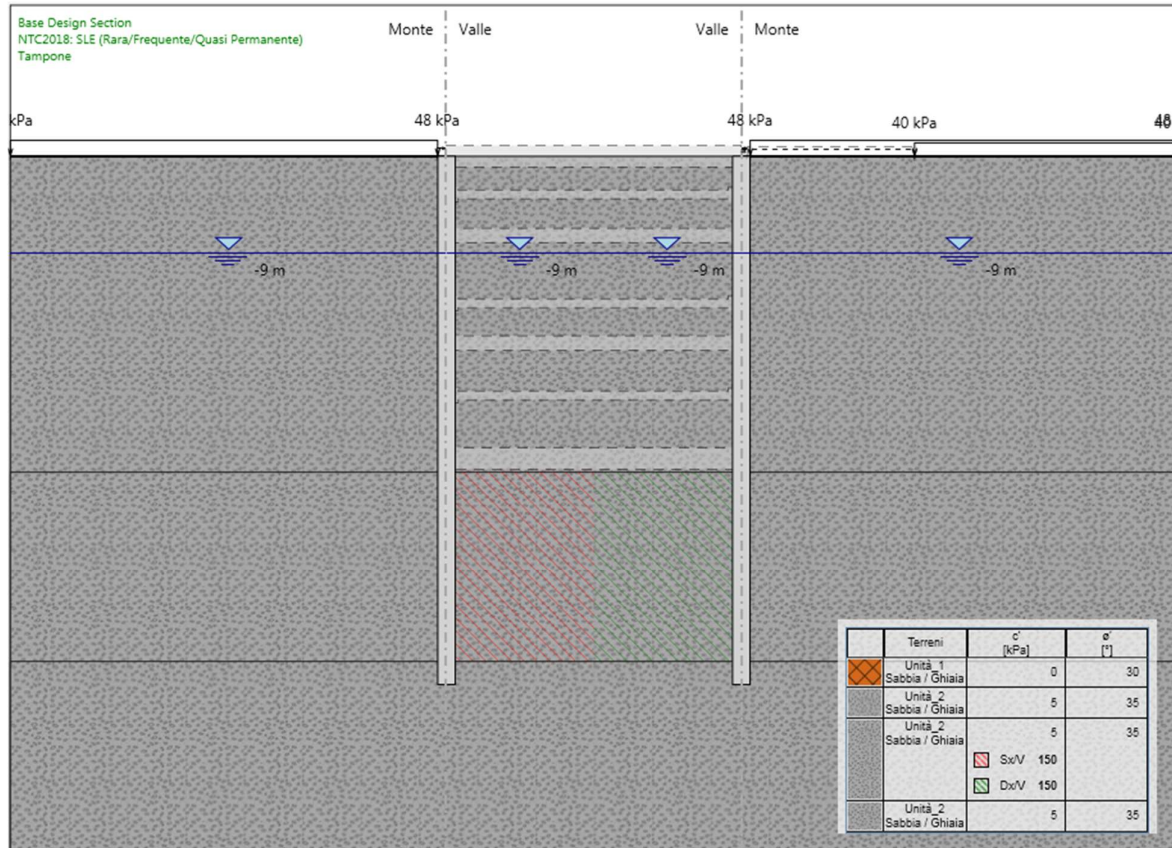


Figura 19.Fase 4: realizzazione tamponi di fondo



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

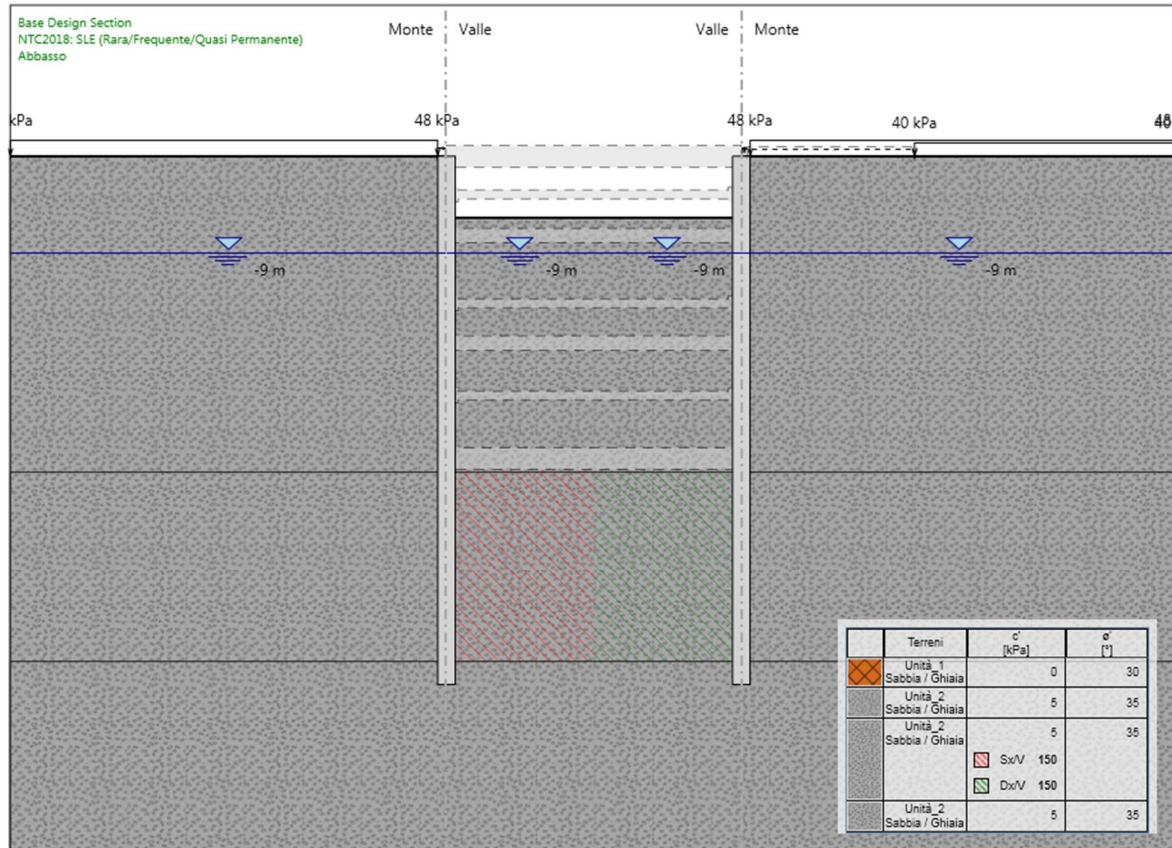


Figura 20.Fase 5: ribasso fino a quota realizzazione soletta di copertura



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

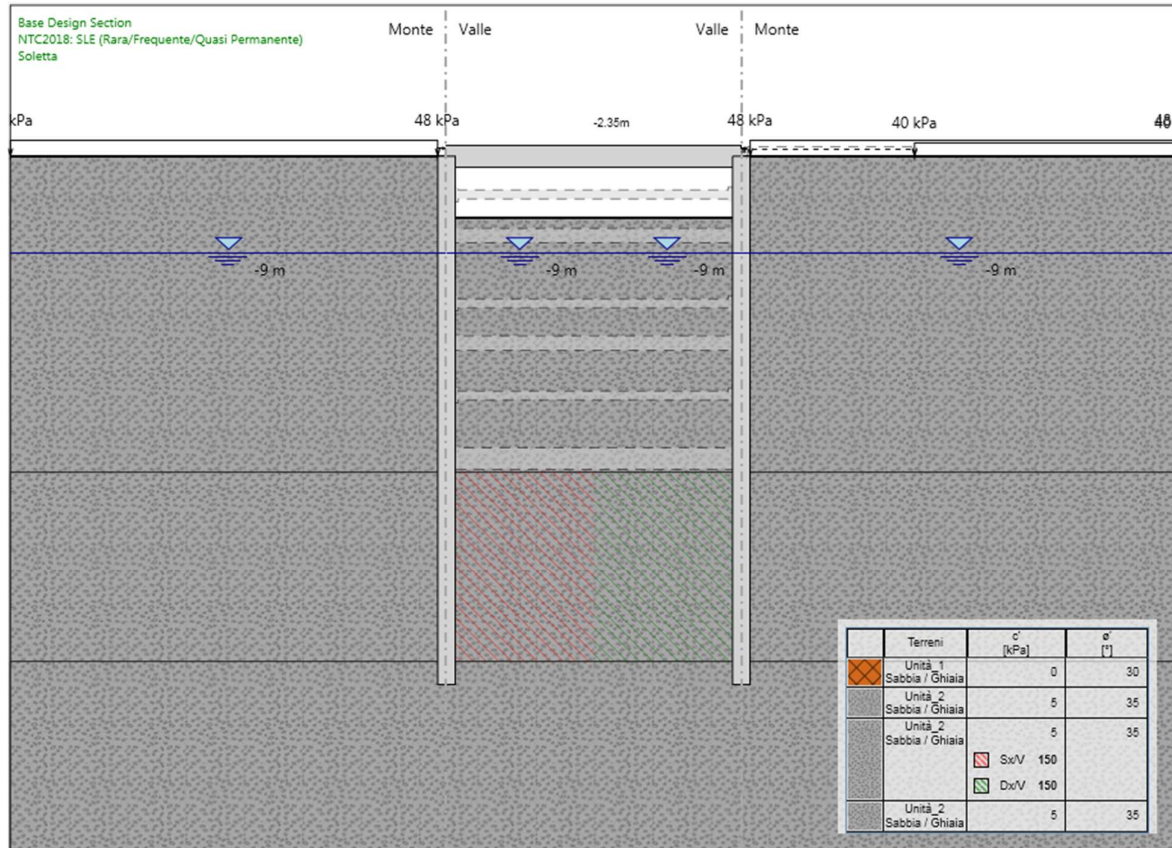


Figura 21.Fase 6: realizzazione soletta di copertura



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

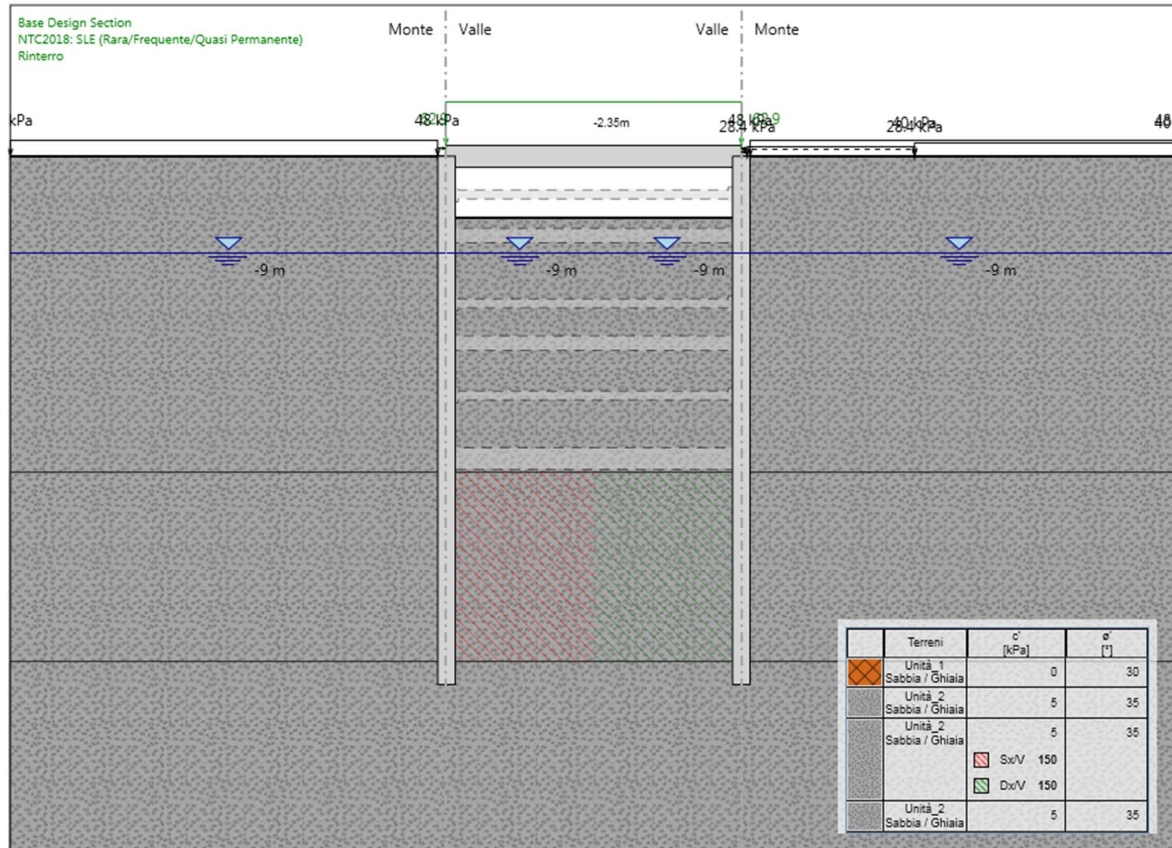


Figura 22.Fase 7: ritombamento e finiture superficiali



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

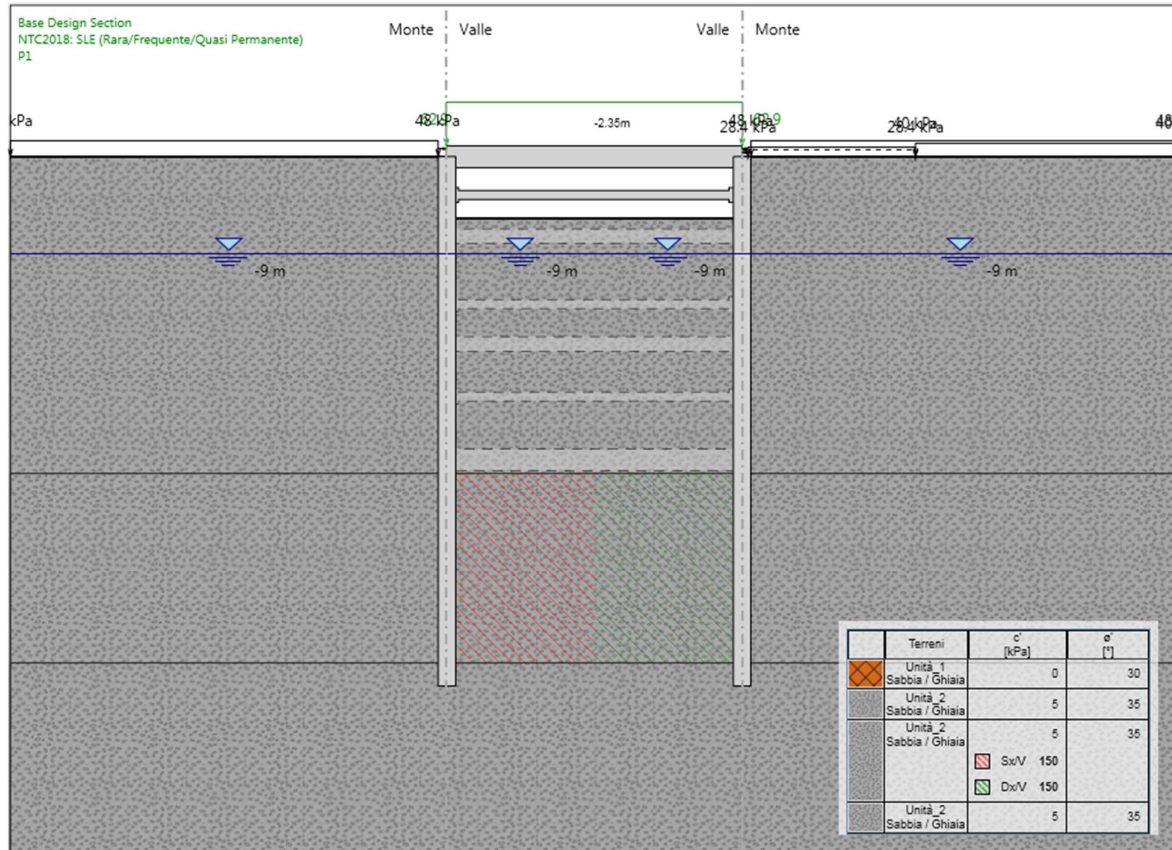


Figura 23.Fase 8: installazione primo ordine di puntelli metallici



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

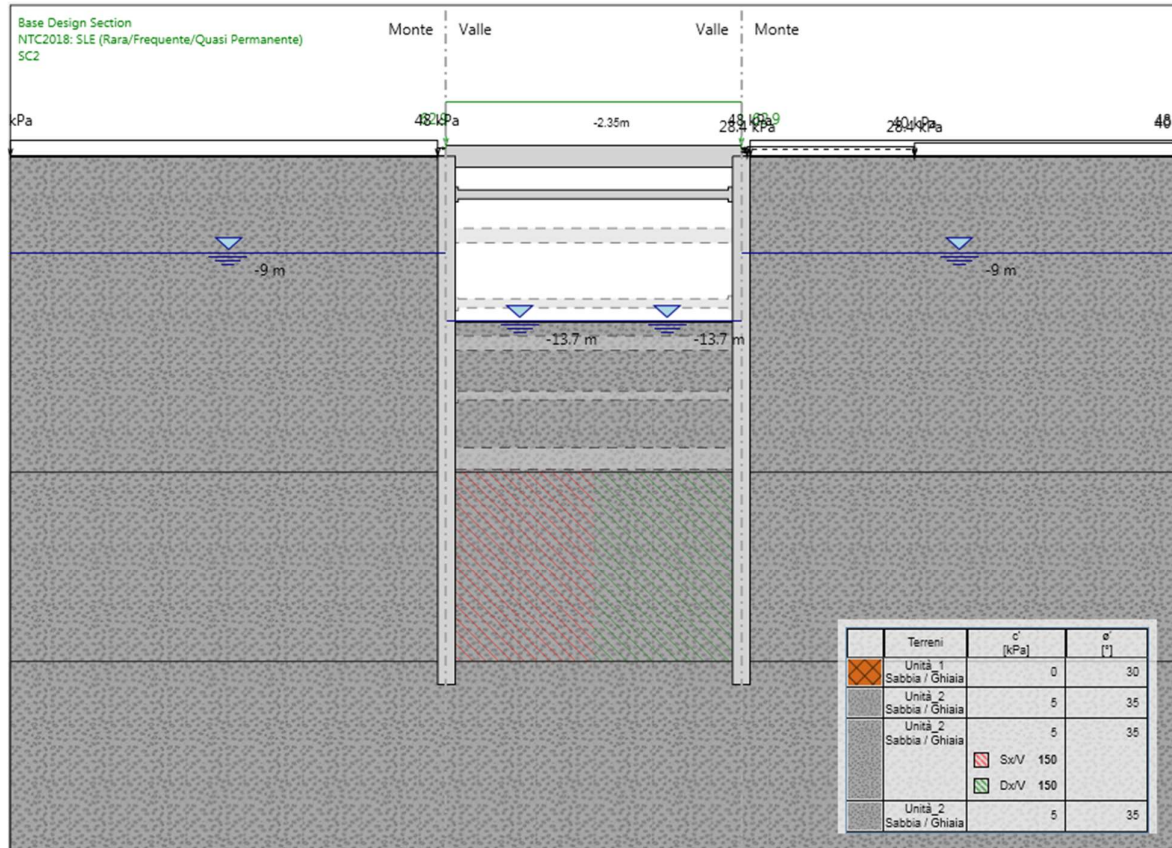


Figura 24.Fase 9: secondo scavo di ribasso



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

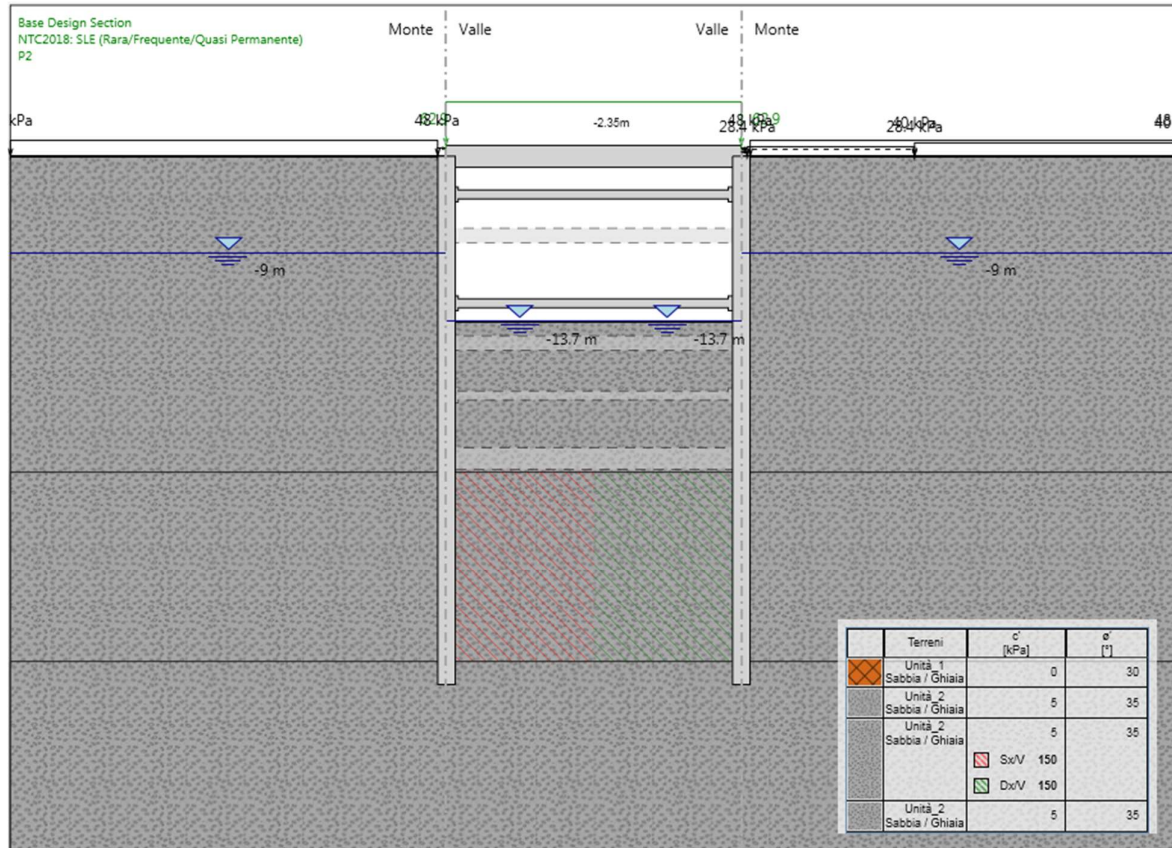


Figura 25.Fase 10: installazione secondo ordine di puntelli metallici



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

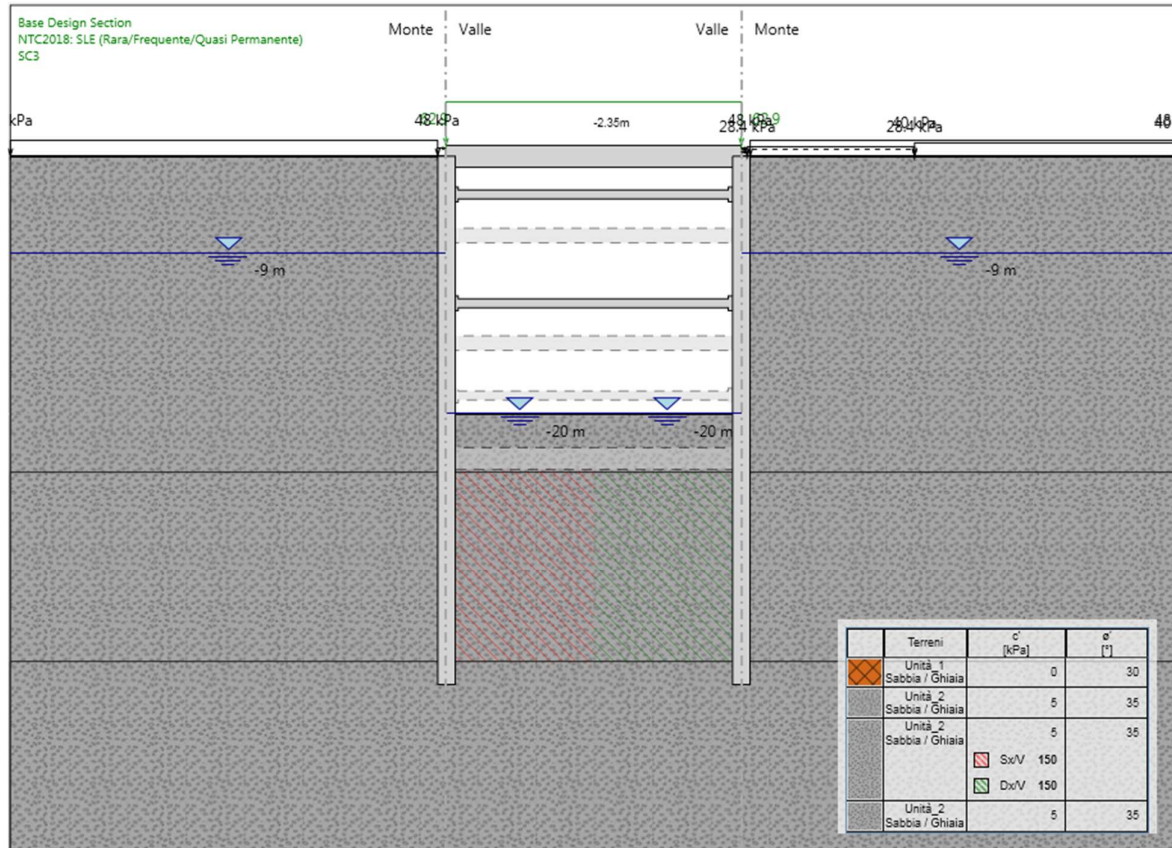


Figura 26.Fase 11: terzo scavo di ribasso



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

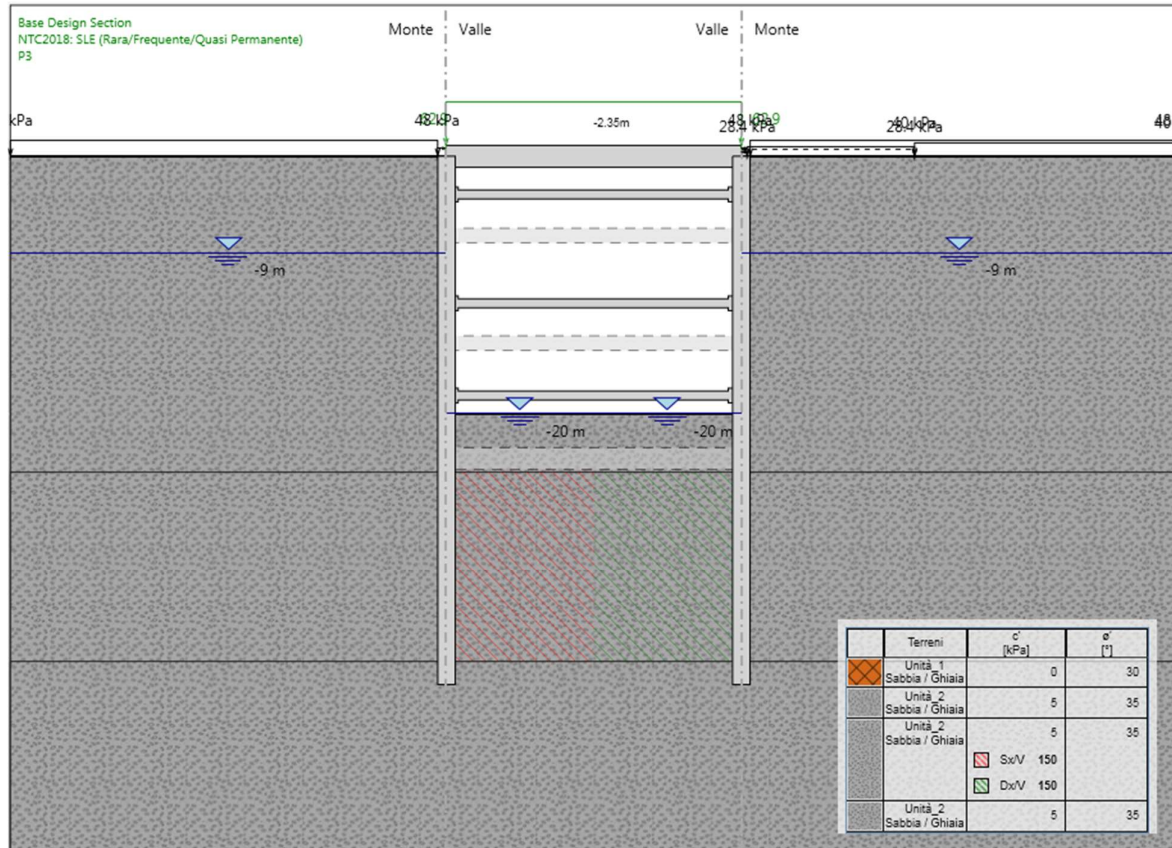


Figura 27.Fase 12: installazione terzo ordine di puntelli metallici



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

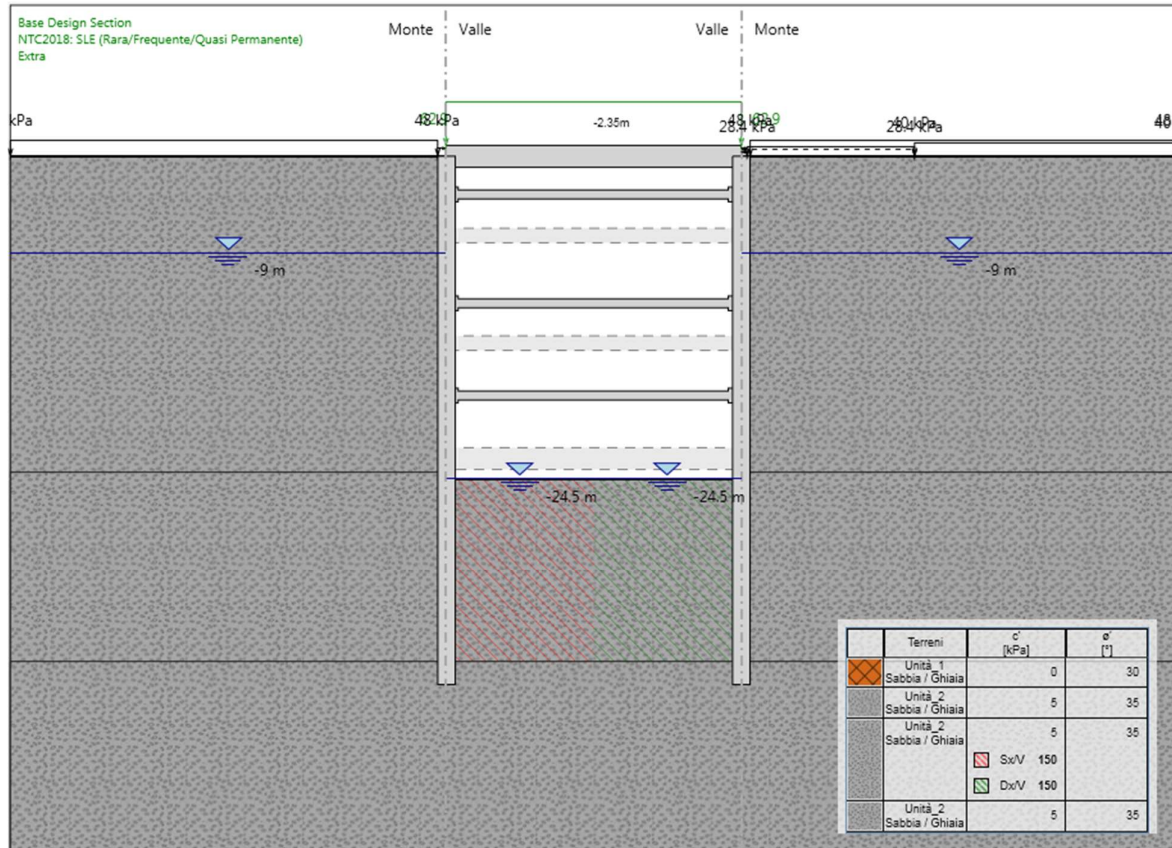


Figura 29.Fase 14: extra-scavo secondo NTC2018



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

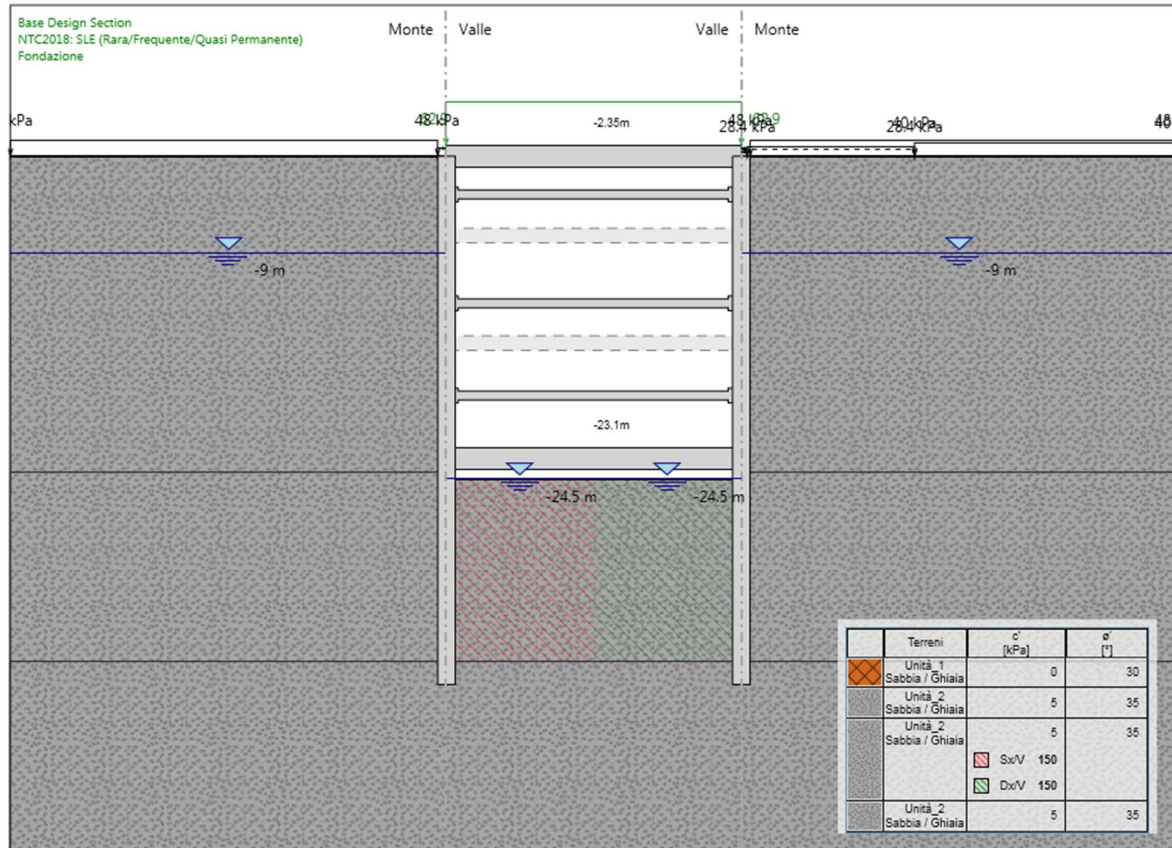


Figura 30.Fase 15: realizzazione soletta di fondazione



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

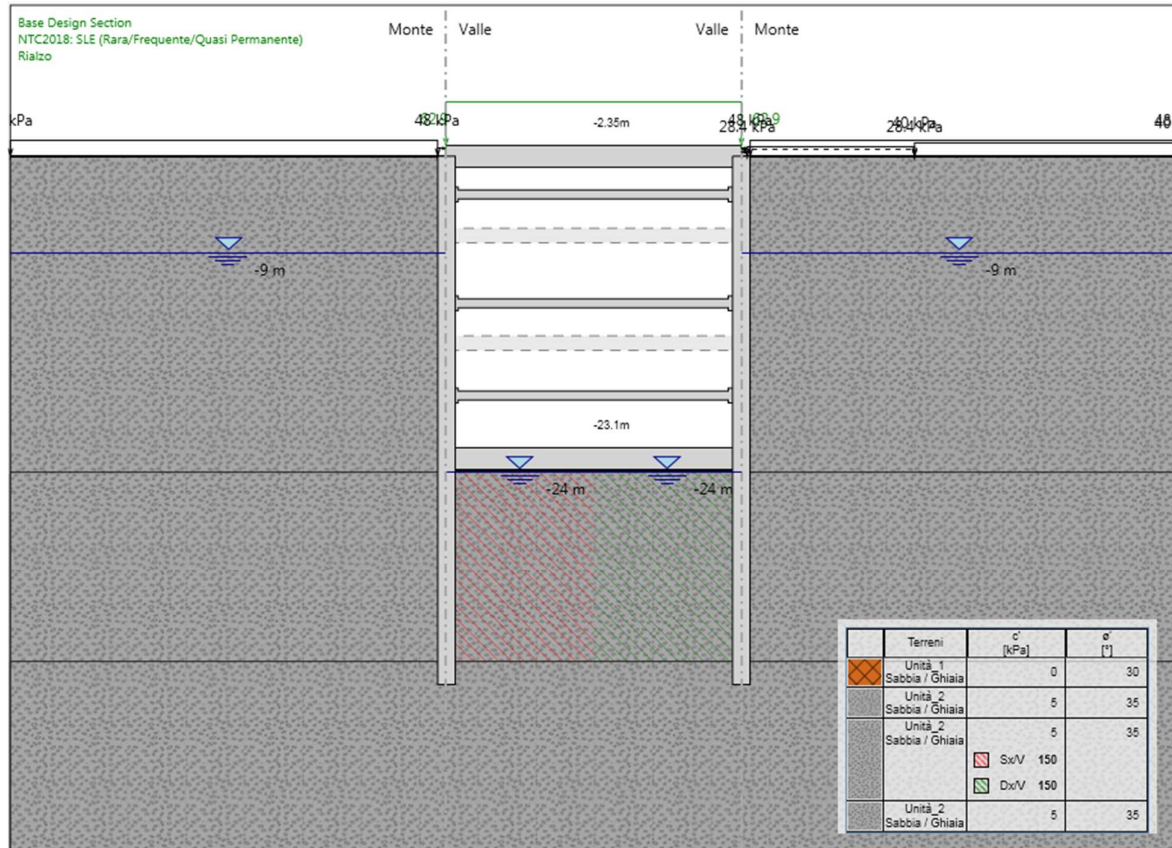


Figura 31.Fase 16: rialzo a quota di fondo scavo



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

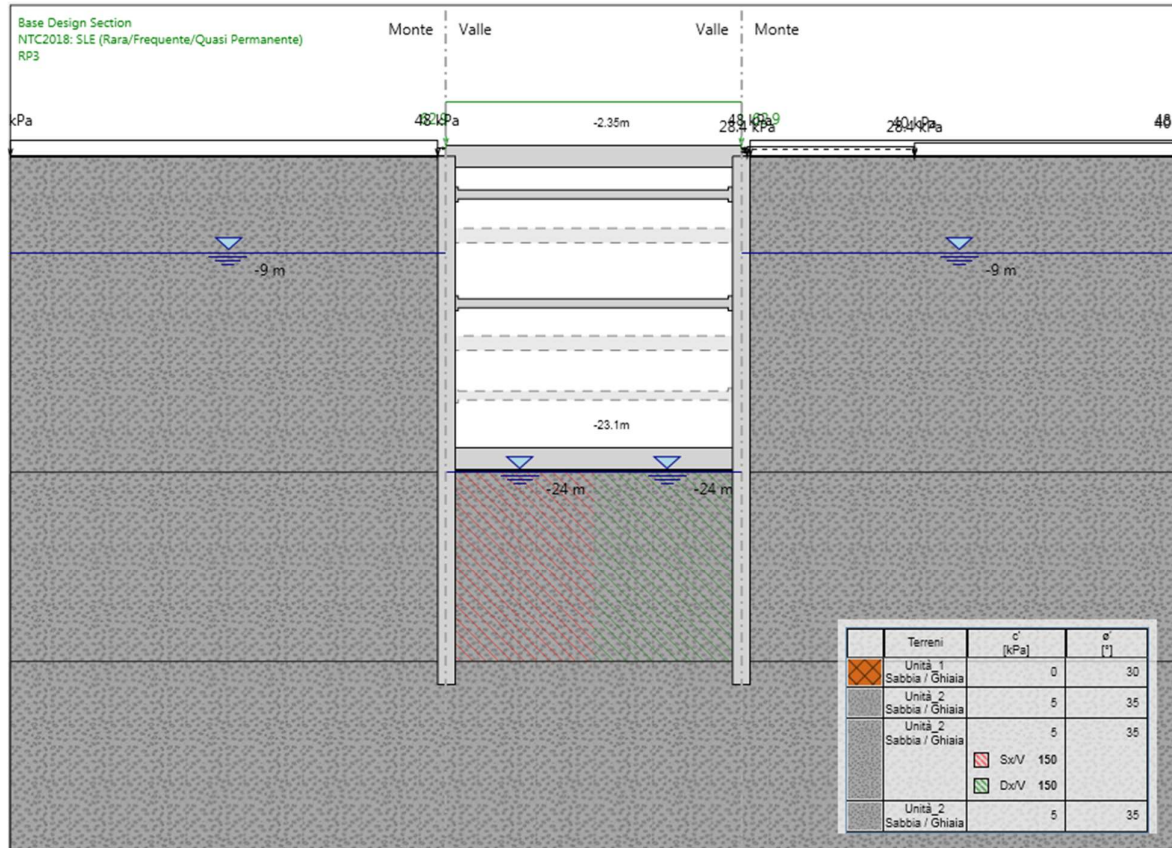


Figura 32.Fase 17: rimozione terzo ordine di puntelli metallici



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

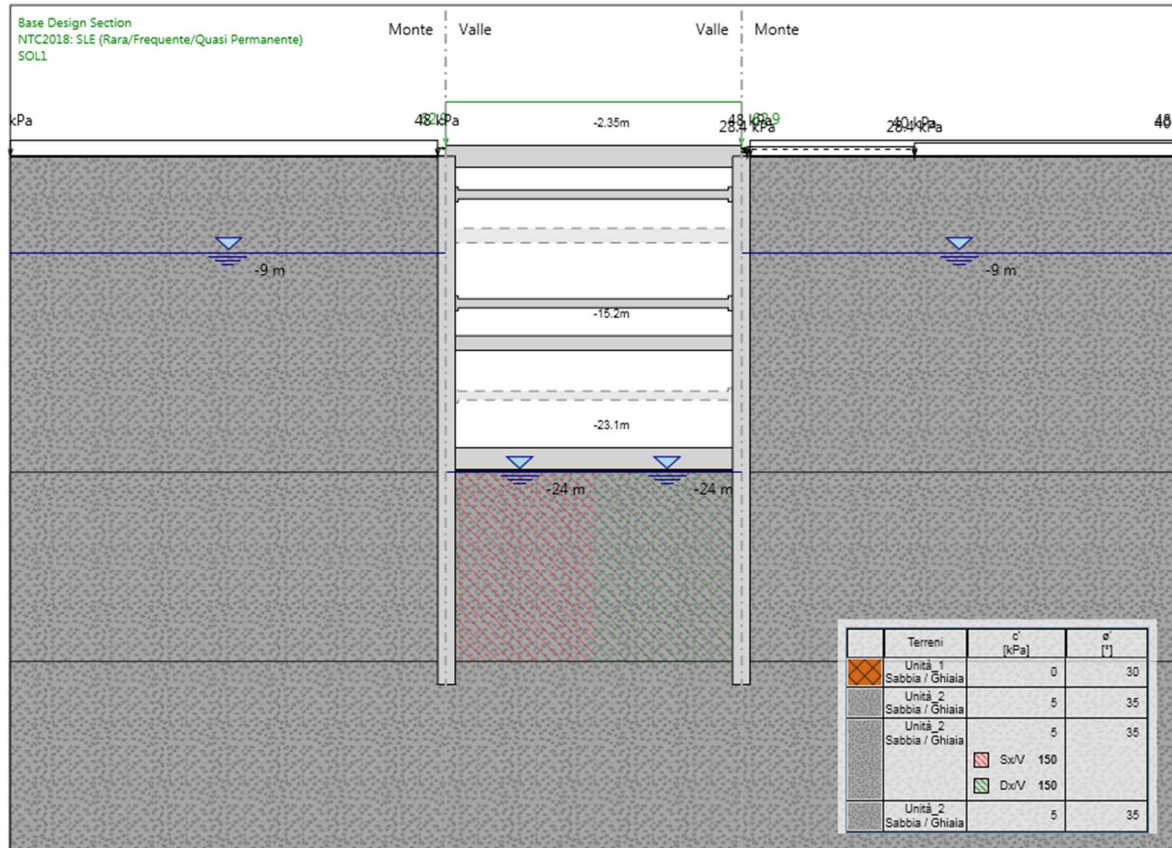


Figura 33.Fase 18: realizzazione primo ordine di soletta in c.a.



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

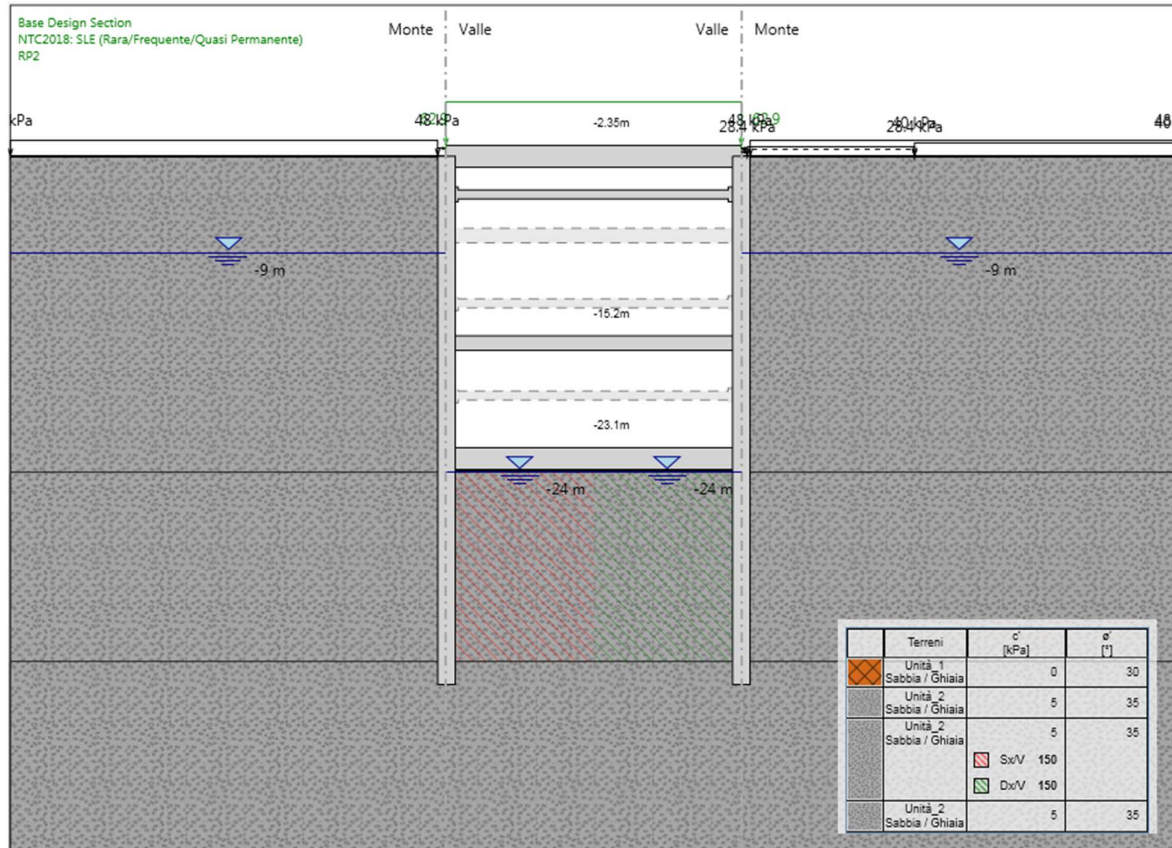


Figura 34.Fase 19: rimozione secondo ordine di puntelli metallici



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

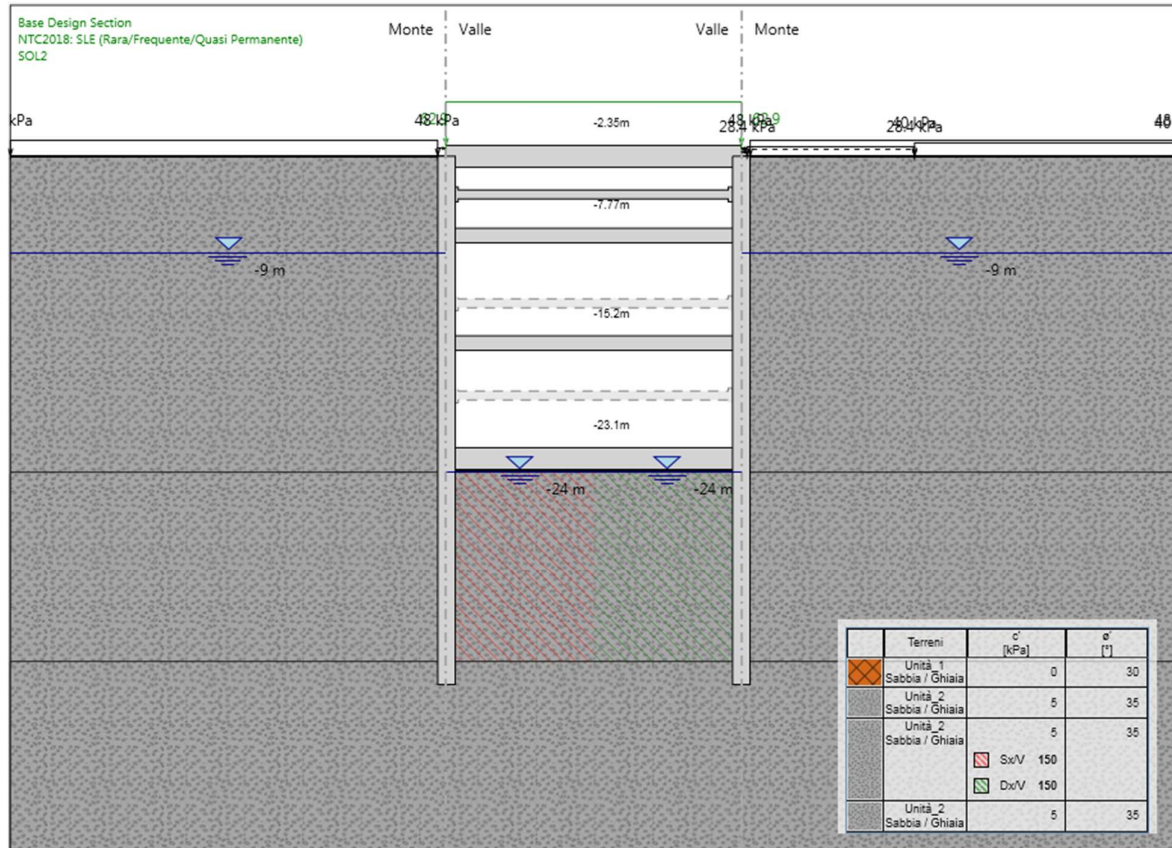


Figura 35.Fase 20: realizzazione secondo ordine di soletta in c.a.



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

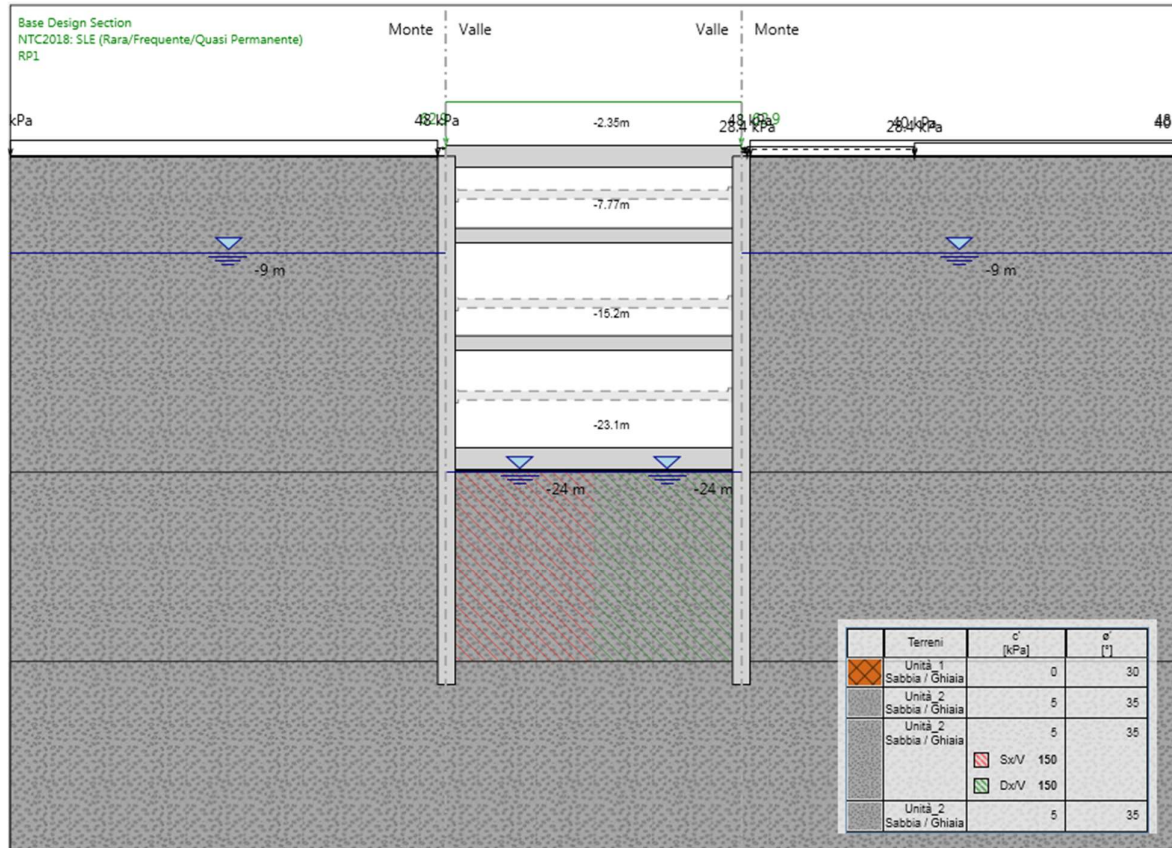


Figura 36.Fase 21: rimozione terzo ordine di puntelli metallici



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

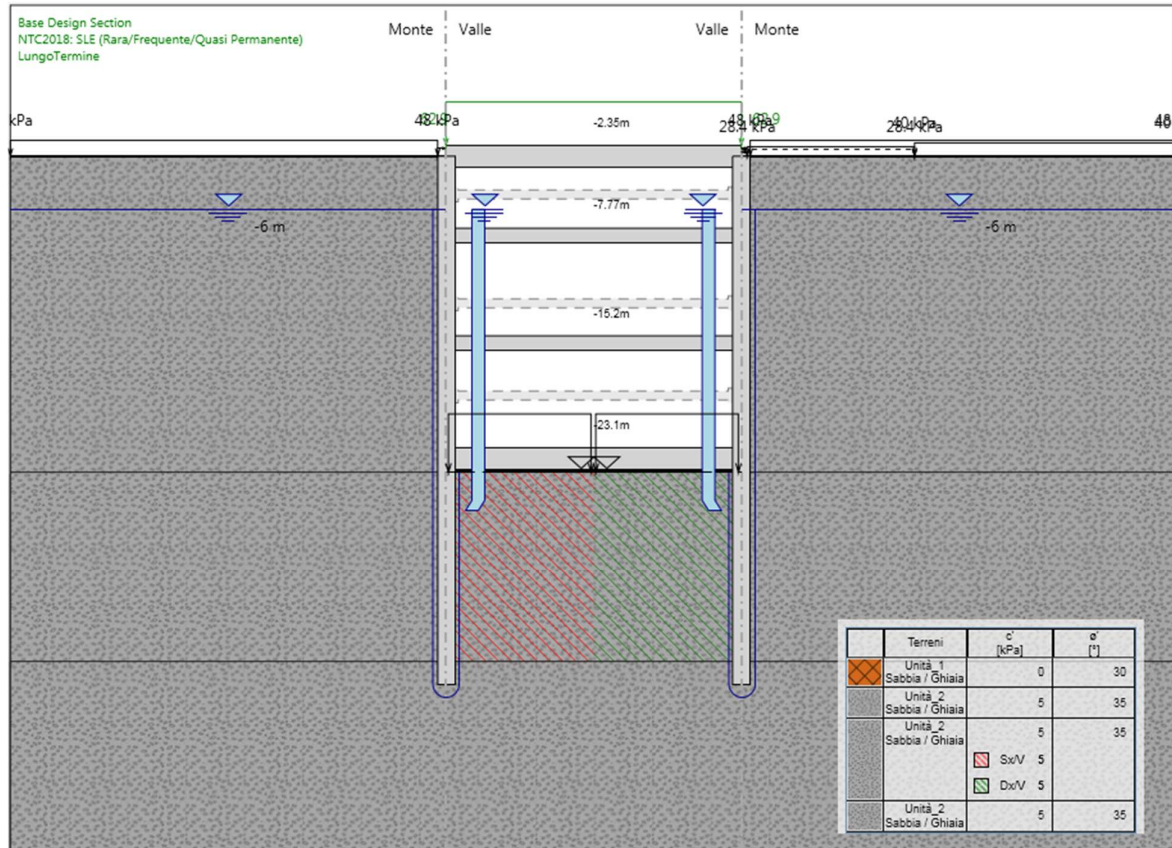


Figura 37.Fase 22: condizione di lungo termine



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

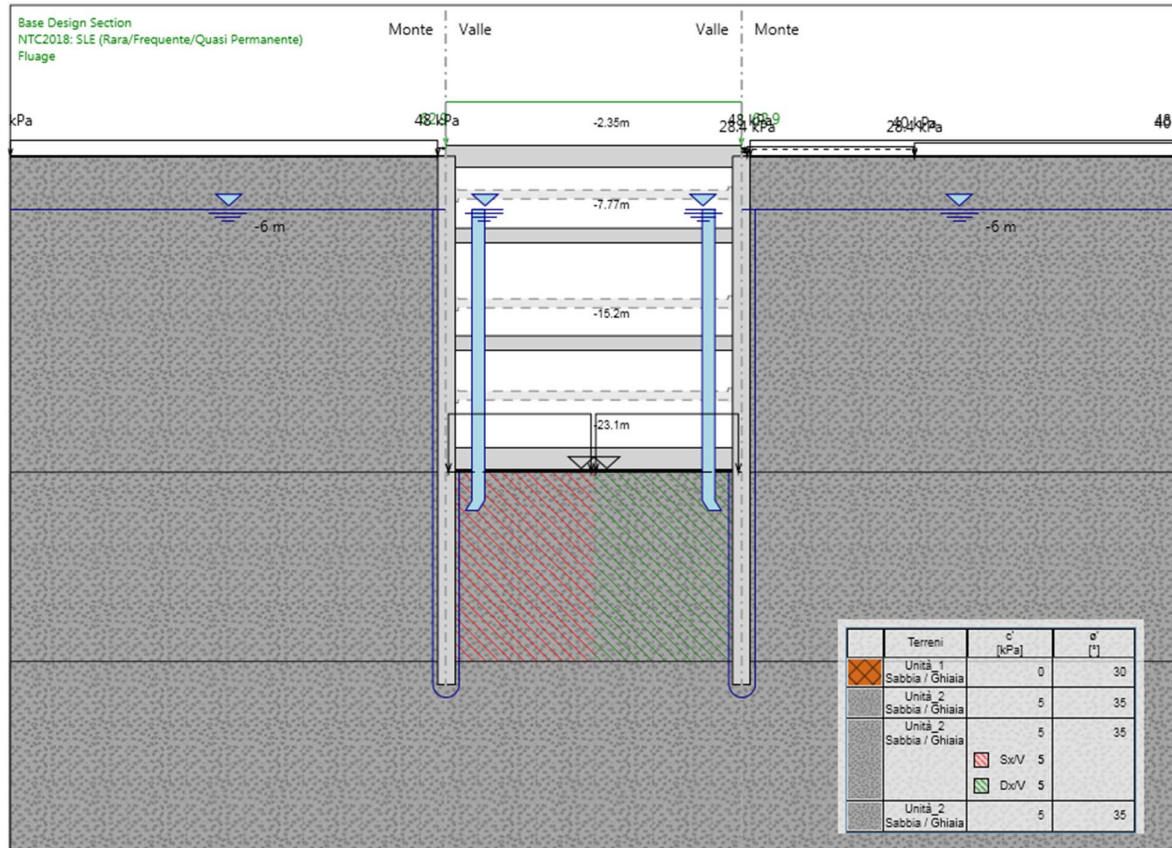


Figura 38.Fase 23 SLE: simulazione effetto fluage



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

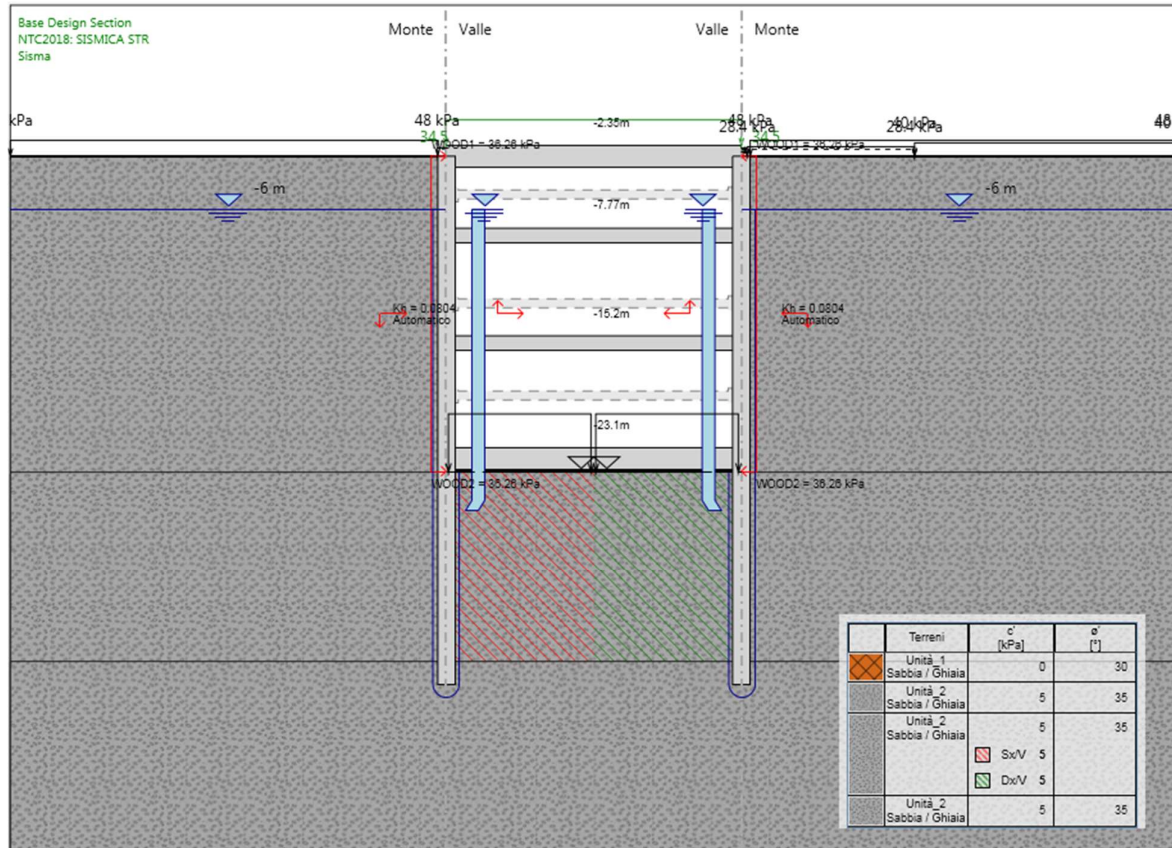



Figura 39.Fase 23 SLU/SLV: simulazione condizione sismica

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

18. ALLEGATO 2: FASI DI CALCOLO BERLINESE PROVISIONALE

Si riassumono brevemente le fasi di calcolo impiegate per le analisi numeriche:

- **Fase 1:** condizione geostatica (3.60 m di terreno superficiale sovrastante l'unità 2 principale e quota falda a -9.00 m da quota stradale – falda di progetto a breve termine);
- **Fase 2:** applicazione carico relativo alla preesistenza BOCI16 (carico permanente pari a 40 kPa);
- **Fase 3:** realizzazione berlinese di micropali;
- **Fase 4:** esecuzione dello scavo fino alla quota di -1.0 m dal piano stradale;
- **Fase 5:** esecuzione dello scavo fino alla quota di -2.0 m dal piano stradale;
- **Fase 6:** esecuzione dello scavo fino alla quota di -3.0 m dal piano stradale;
- **Fase 7:** esecuzione dello scavo fino alla quota di -3.3 m dal piano stradale (fondo scavo di progetto);
- **Fase 8:** esecuzione dello scavo fino alla quota di -3.63 m dal piano stradale (scavo effettivo e 33 cm di extra scavo come imposto dalle NTC 2018 al §6.5.2.2).

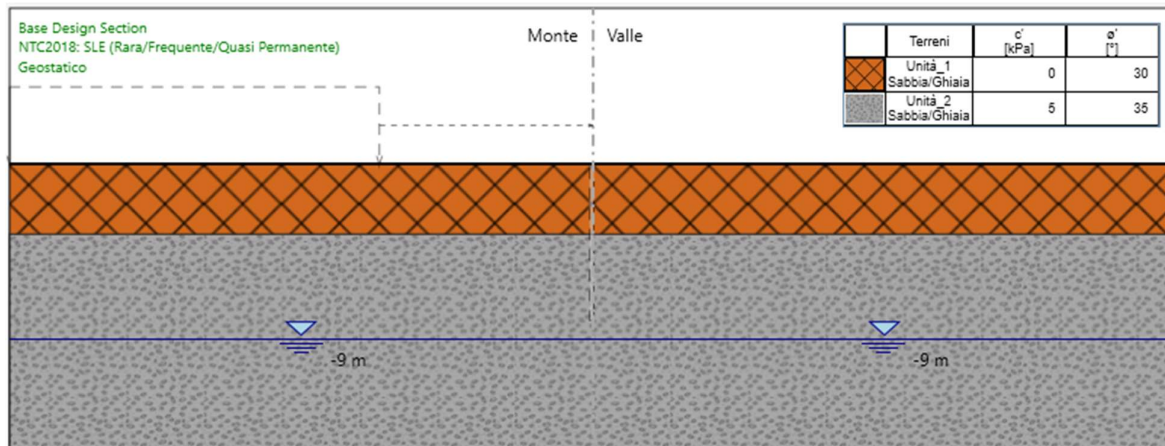



Figura 40.Fase 1: condizione geostatica

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

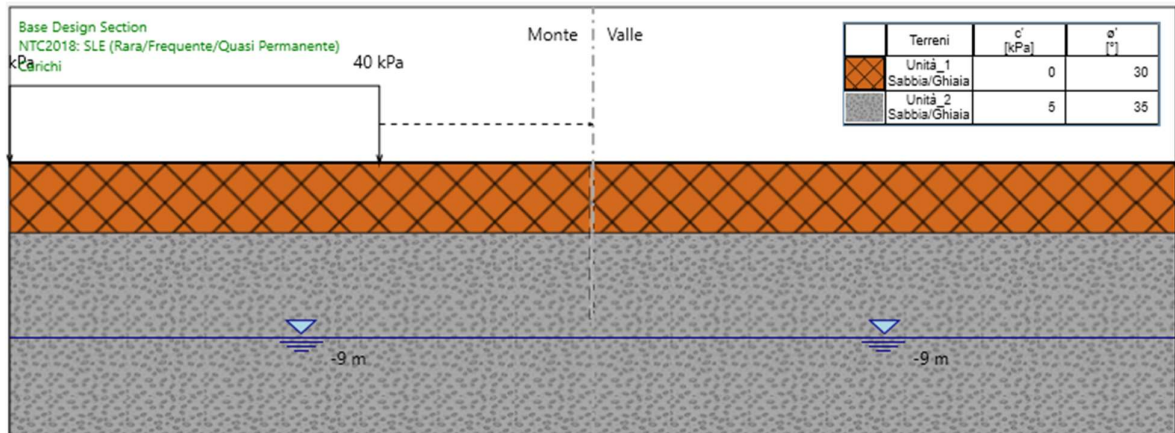


Figura 41.Fase 2: applicazione carico preesistenze

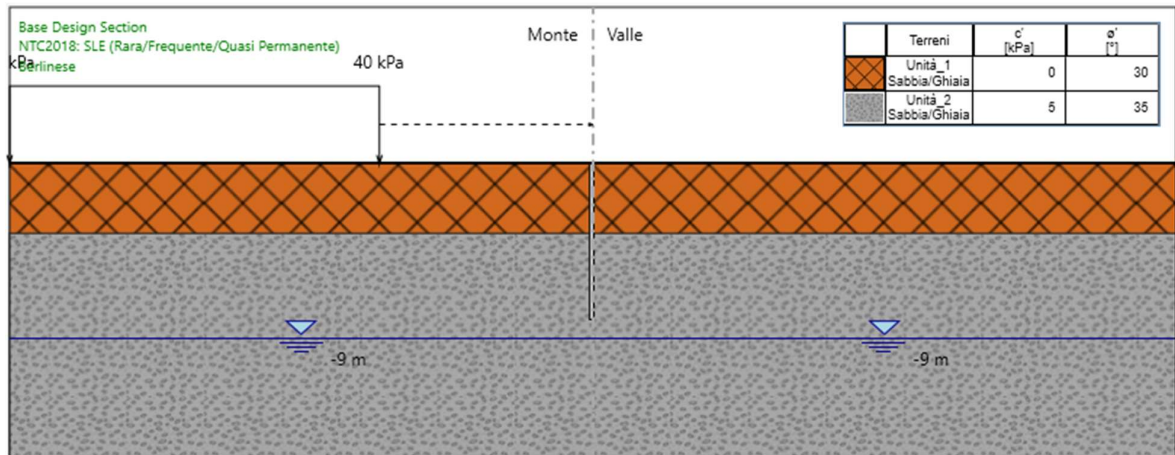


Figura 42.Fase 3: realizzazione berlinese di micropali



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

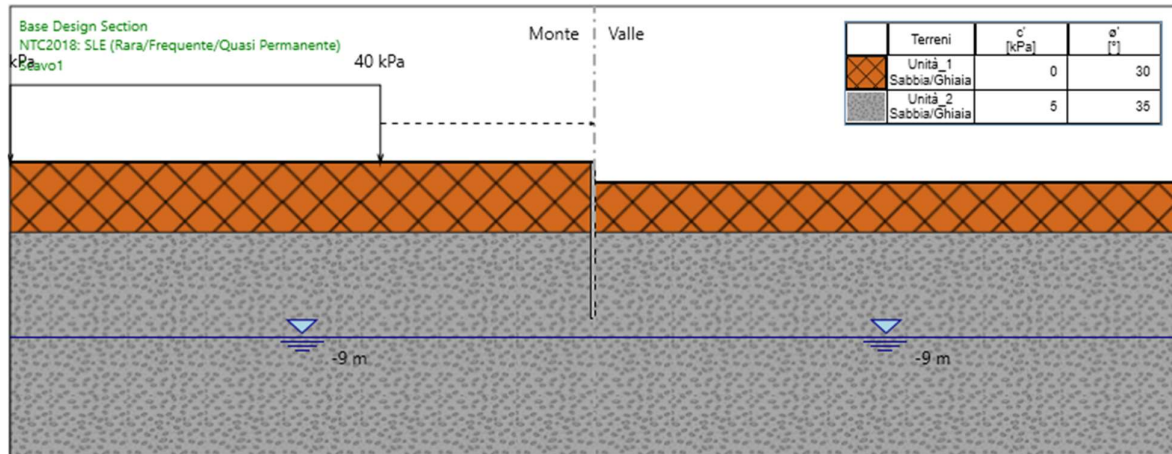


Figura 43.Fase 4: scavo a -1.0 m

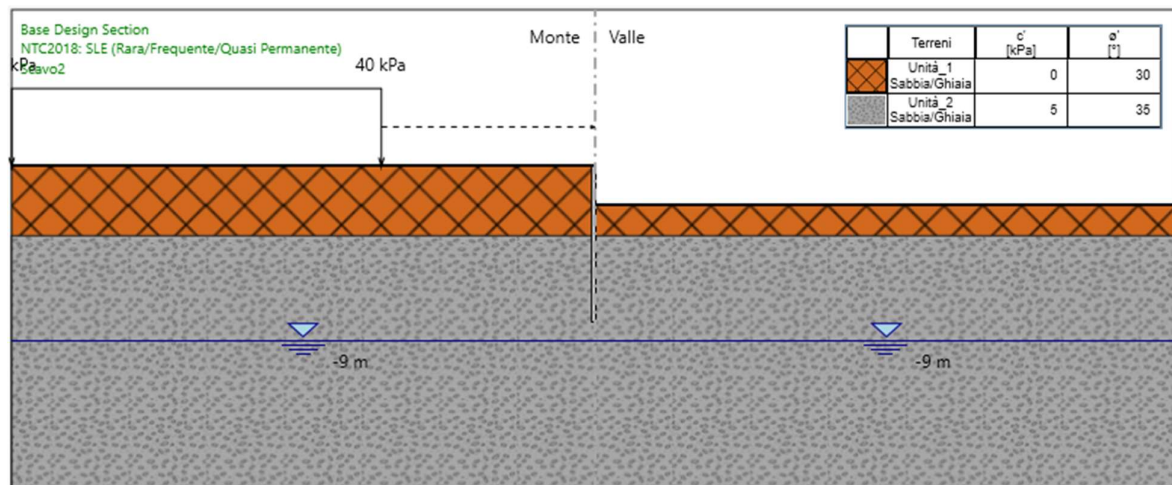


Figura 44.Fase 5: scavo a -2.0 m



CITTA' DI TORINO

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

Galleria artificiale
Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo

38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

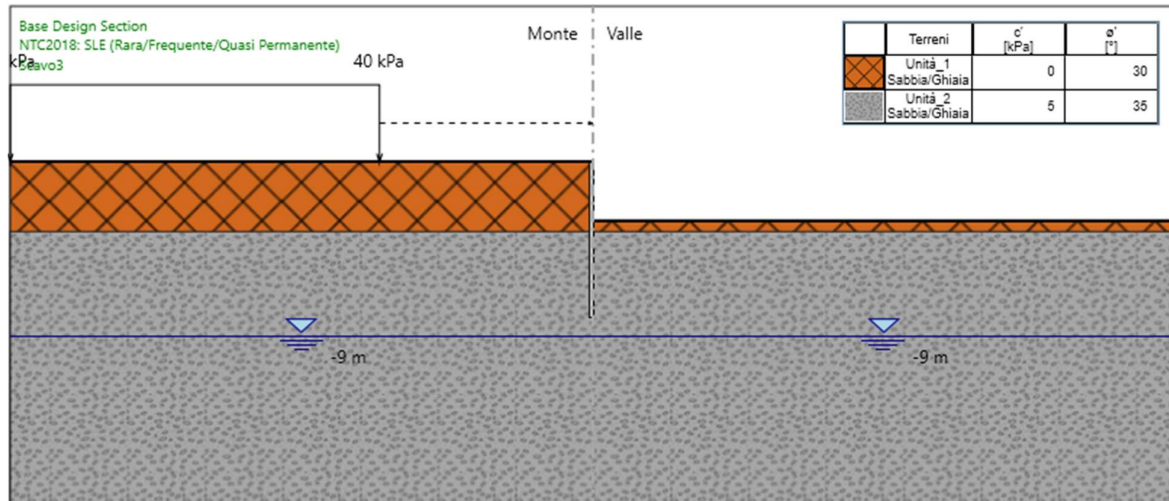


Figura 45.Fase 6: scavo a -3.0 m

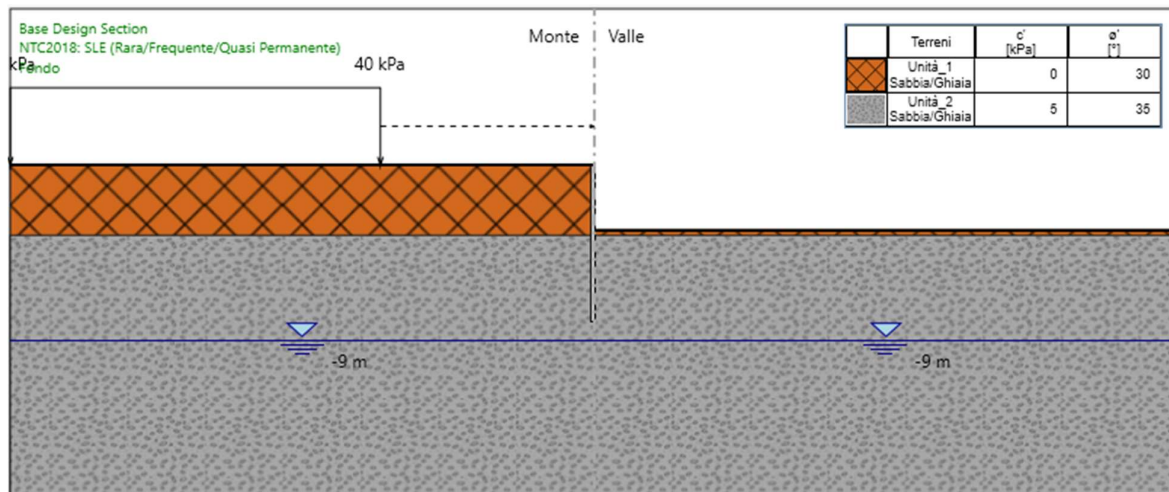



Figura 46.Fase 7: scavo a -3.3 m (fondo scavo)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo - Lotto funzionale 1 Rebaudengo-Bologna
Galleria artificiale Tratte d'opera GA04 – Relazione di calcolo	38_MTL2T1A1DSTRGA4R001-0-3

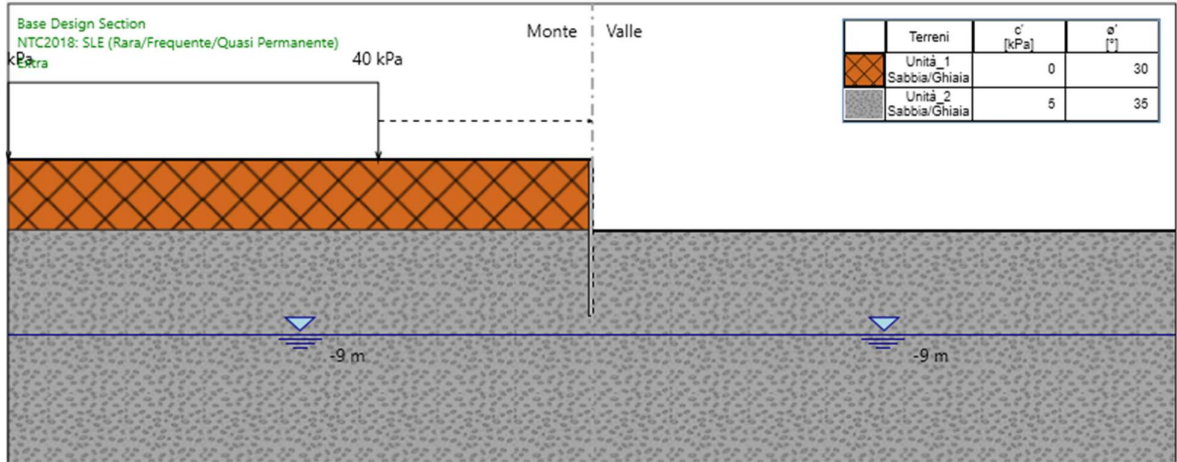


Figura 47.Fase 8: extra scavo da NTC 2018