

**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 2: Bologna - Politecnico**

PROGETTO DEFINITIVO														INFRATRASPORTI S.r.l.	
DIRETTORE PROGETTAZIONE Responsabile integrazione discipline specialistiche	IL PROGETTISTA	PROGETTO STRUTTURALE GALLERIA A FORO CIECO SCAVO MECCANIZZATO													
Ing. R. Crova Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 60385	Ing. F. Rizzo Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 9337K	RELAZIONE TECNICA E DI CALCOLO ANELLO													
		ELABORATO									REV.		SCALA	DATA	
		MT	L2	T1	A2	D	STR	GTO	R	001	Int.	Est.	-	18/11/2022	
BIM MANAGER Geom. L. D'Accardi											0	1			

AGGIORNAMENTI

Fg. 1 di 1

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	VISTO
0	EMISSIONE	18/01/22	LFA	PDM	FRI	RCR
1	Emissione finale a seguito di verifica preventiva	11/07/22	GQU	PDM	F. Rizzo	R. Crova
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-

<table border="1"> <tr> <td>LOTTO 2</td> <td>CARTELLA</td> <td>9.5.3</td> <td>1</td> <td>MTL2T1A2D</td> <td>STRGT0R001</td> </tr> </table>						LOTTO 2	CARTELLA	9.5.3	1	MTL2T1A2D	STRGT0R001	<p align="center">STAZIONE APPALTANTE</p> <p align="center">DIRETTORE DI DIVISIONE INFRASTRUTTURE E MOBILITÀ Ing. R. Bertasio</p> <p align="center">RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. A. Strozzi</p>						
LOTTO 2	CARTELLA	9.5.3	1	MTL2T1A2D	STRGT0R001													

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

INDICE

1.	PREMESSA	7
1.1	SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE	7
2.	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	9
3.	RICHIAMO DELLE CONDIZIONI GEOLOGICO-TECNICHE	11
3.1	CARATTERISTICHE GEOTECNICHE	11
3.2	CONDIZIONI IDROGEOLOGICHE	14
3.3	CONDIZIONI SISMICHE	14
4.	RIVESTIMENTO IN CONCI PREFABBRICATI	16
4.1	CARATTERISTICHE DELL'ANELLO	16
4.2	GIUSTIFICAZIONE DELLA SCELTA DELLO SPESSORE	18
5.	GALLERIA ENERGETICA	19
6.	PROGETTAZIONE STRUTTURALE DEL RIVESTIMENTO	20
6.1	APPROCCIO	20
6.2	BASE PER IL CALCOLO	21
6.2.1	CODICE STRUTTURALE	21
6.2.2	MATERIALI E FATTORI DI CARICO	21
6.2.3	COMBINAZIONI DI CARICO	22
6.2.4	DEFINIZIONE DI CARICHI	23
6.2.5	MATERIALI	25
6.3	CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI	28
6.3.1	INFORMAZIONI SUL SOFTWARE	28
6.3.2	SEZIONI DELLA GALLERIA CONSIDERATE PER LE VERIFICHE	28
6.3.3	PARAMETRIZZAZIONE GEOTECNICA	30
6.3.4	RIVESTIMENTO DELLA GALLERIA	30
6.3.5	ANALISI FEM DETTAGLIATA	31
6.3.6	CARICO DI INIEZIONE SECONDARIA DI MALTA (COMBINAZIONE DI CARICO SLU2)	33
6.3.7	CARICO SISMICO (COMBINAZIONE DI CARICO SLU3)	34
6.3.8	VERIFICA AL FUOCO (COMBINAZIONE DI CARICO SLU4)	36

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

6.3.9	RESULTATI DEI MODELLI: SOLLECITAZIONI PER LE VERIFICHE STRUTTURALI DEL RIVESTIMENTO 38	
6.4	VERIFICA STRUTTURALE DELLA SEZIONE DEL CONCIO	41
6.4.1	CLASSE DI ESPOSIZIONE	41
6.4.2	COPRIFERRO	41
6.4.3	RINFORZO MINIMO	43
6.4.4	SOFTWARE DI CALCOLO STRUTTURALE	43
6.4.5	SLU: VERIFICA PER SFORZO NORMALE – MOMENTO FLETTENTE	44
6.4.6	SLU: VERIFICA DEL TAGLIO	48
6.4.7	SLS FESSURAZIONE	48
6.4.8	SLS STATO TENSIONALE	49
6.4.9	SLS DEFORMAZIONI DELL'ANELLO	49
6.5	VERIFICA STRUTTURALE DEL GIUNTO RADIALE	54
6.5.1	SCHIACCIAMENTO DEL CLS.	54
6.5.2	EFFETTO BURSTING	55
6.6	FORZE TEMPORANEE	57
6.6.1	MASSIMA CAPACITÀ DI FLESSIONE	59
6.6.2	MASSIMA CAPACITÀ DI TAGLIO	60
6.6.3	MOMENTO DI PRIMA FESSURAZIONE	61
6.7	VERIFICA STRUTTURALE DEI GIUNTI LONGITUDINALI	61
6.7.1	DIREZIONE RADIALE	62
6.7.2	DIREZIONE CIRCONFERENZIALE	65
7.	TENUTA DELLE GUARNIZIONI	66
7.1	VERIFICA DELLA TENUTA IDRAULICA	66
7.2	VERIFICA DELLE FORZE INDOTTE DALLA GUARNIZIONE	68
8.	VERIFICA DEI CONNETTORI	70
8.1	CONDIZIONE ACCIDENTALE IN FASE D'INSTALLAZIONE	70
8.2	TENSIONE NEL CONNETTORE DOVUTA ALLA FORZA DI REAZIONE DELLE GUARNIZIONI SUL GIUNTO CIRCONFERENZIALE	72
8.3	TENSIONE DEL CONNETTORE DOVUTA ALLA COMPRESSIONE DELLE GUARNIZIONI NEL GIUNTO RADIALE	73
9.	VERIFICA AL GALLEGGIAMENTO	74
9.1.1	FORZA VERSO L'ALTO DOVUTA ALLE ACQUE SOTTERRANEE (W)	75
9.1.2	PESO PROPRIO DELL'ANELLO (SW)	75
9.1.3	PESO DEL TERRENO SOPRA IL CONDOTTO (G)	76
9.2	VERIFICA AL GALLEGGIAMENTO	76

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

10. PIANO DI MONITORAGGIO 78

ALLEGATO N.1: RISULTATI DEL MODELLO PLAXIS 2D 80

10.1	FORZA ASSIALE, MOMENTO E FORZA DI TAGLIO (SEZIONE 1 – PK 10+487)	80
10.2	FORZA ASSIALE, MOMENTO E FORZA DI TAGLIO (SEZIONE 2 – PK 8+490)	92
10.3	FORZA ASSIALE, MOMENTO E FORZA DI TAGLIO (SEZIONE 3 – PK 9+965)	104

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.	Key-plan della linea 2 – tratta funzionale Politecnico-Rebaudengo	8
Figura 2.	Accelerazione sismica Staz. Corelli	15
Figura 3.	Accelerazione sismica Staz. Anselmetti	15
Figura 4.	Vista d’insieme dell’anello di rivestimento in conci prefabbricati proposto	17
Figura 5.	Configurazione per il sistema di scambio energetico terreno (a), aria (b) e terreno&aria (c) (Barla & Di Donna 20185)	20
Figura 6.	Diagramma di flusso per il progetto e verifica del rivestimento	21
Figura 7.	Figura del connettore proposto (EASY CLICK MEDIUM o simile)	26
Figura 8.	Guarnizione proposta tipo FAMA UG066B (o simile)	27
Figura 9.	Sezione 1, minima copertura (PK 10+487)	29
Figura 10.	Sezione 2, massima copertura (PK 8+490)	29
Figura 11.	Sezione 3, fiume e massima falda acqua (PK 9+965)	29
Figura 13.	Pressione della malta agente sull’anello	33
Figura 14.	Effetto di deformazione sulla struttura al passaggio di un’onda sismica	35
Figura 15.	Distribuzione del momento flettente M tra concio e giunto	39
Figura 16.	Ipotesi sezionali	43
Figura 17.	Progetto del rivestimento in conci	44
Figura 18.	Diagramma di interazione SLU1a per le tre sezioni di calcolo	45
Figura 19.	Diagramma di interazione SLU1b per le tre sezioni di calcolo	46
Figura 20.	Diagramma di interazione SLU2 per le tre sezioni di calcolo	46
Figura 21.	Diagramma di interazione SLU3 per le tre sezioni di calcolo	47
Figura 22.	Diagramma di interazione SLU4 per le tre sezioni di calcolo	47
Figura 23.	Sezione 1 - SLS1a Deformazione diametrale	50
Figura 24.	Sezione 1 - SLS1b Deformazione diametrale	51
Figura 25.	Sezione 2 - SLS1a Deformazione diametrale	51
Figura 26.	Sezione 2 - SLS1b Deformazione diametrale	52
Figura 27.	Sezione 3 - SLS1a Deformazione diametrale	52
Figura 28.	Sezione 3 - SLS1b Deformazione diametrale	53
Figura 29.	Distribuzione per le aree parzialmente caricate	54
Figura 30.	Area di contatto giunto longitudinale	55
Figura 31.	Effetto Bursting	55

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Figura 32. Tensioni orizzontali (N/mm ²) – caso a	56
Figura 33. Tensioni orizzontali (N/mm ²) – caso b	57
Figura 34. Modello strutturale considerato per stati di movimentazione, trasporto e accatastamento	58
Figura 35. Capacità a flessione dei segmenti	60
Figura 36. Giunti longitudinali	62
Figura 37. Tensioni orizzontali (N/mm ²) – eccentricità 0 mm	63
Figura 38. Tensioni orizzontali (N/mm ²) – eccentricità -30 mm	64
Figura 39. Tensioni orizzontali (N/mm ²) – eccentricità +30 mm	64
Figura 40. Spinta massima – Tensione orizzontale dovuta alla spinta dei martinetti (N/mm ²)	65
Figura 41. Grafico di tenuta della guarnizione proposta	67
Figura 42. Grafico di carico-apertura giunto della guarnizione proposta	68
Figura 43. Forze delle guarnizioni inducono tensioni trasversali	69
Figura 44. Forze di taglio delle guarnizioni	70
Figura 45. Condizione a mensola	71
Figura 46. Connettore – guarnizione “pull-out” equilibrio	72
Figura 47. Azione di taglio dovuta alla forza di guarnizione	73
Figura 48. Connettore – guarnizione “taglio” equilibrio	73
Figura 49. Forze che agiscono su un condotto per il controllo del galleggiamento	74
Figura 50. Forze assiali N – SLU1a	80
Figura 51. Forze assiali N – SLU2	81
Figura 52. Forze assiali N – SLU1b	82
Figura 53. Forze assiali N – SLU3	83
Figura 54. Momento flettente M – SLU1a	84
Figura 55. Momento flettente M – SLU2	85
Figura 56. Momento flettente M – SLU1b	86
Figura 57. Momento flettente M – SLU3	87
Figura 58. Forze di taglio – SLU1a	88
Figura 59. Forze di taglio – SLU2	89
Figura 60. Forze di taglio – SLU1b	90
Figura 61. Forze di taglio – SLU3	91
Figura 62. Forze assiali N – SLU1a	92
Figura 63. Forze assiali N – SLU2	93
Figura 64. Forze assiali N – SLU1b	94
Figura 65. Forze assiali N – SLU3	95
Figura 66. Momento flettente M – SLU1a	96
Figura 67. Momento flettente M – SLU2	97
Figura 68. Momento flettente M – SLU1b	98
Figura 69. Momento flettente M – SLU3	99
Figura 70. Forze di taglio – SLU1a	100
Figura 71. Forze di taglio – SLU2	101
Figura 72. Forze di taglio – SLU1b	102
Figura 73. Forze di taglio – SLU3	103
Figura 74. Forze assiali N – SLU1a	104

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Figura 75. Forze assiali N – SLU2	105
Figura 76. Forze assiali N – SLU1b	106
Figura 77. Forze assiali N – SLU3	107
Figura 78. Momento flettente M – SLU1a	108
Figura 79. Momento flettente M – SLU2	109
Figura 80. Momento flettente M – SLU1b	110
Figura 81. Momento flettente M – SLU3	111
Figura 82. Forze di taglio – SLU1a	112
Figura 83. Forze di taglio – SLU2	113
Figura 84. Forze di taglio – SLU1b	114
Figura 85. Forze di taglio – SLU3	115

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Parametri di resistenza e deformabilità per le unità geotecniche	13
Tabella 2. Esempi di anelli con dimensioni simili	18
Tabella 3. Fattori parziali per materiali in SLU secondo NTC 2018	22
Tabella 4. Fattori parziali per carichi secondo NTC 2018	22
Tabella 5. Combinazioni di carico per il rivestimento strutturale	22
Tabella 6. Curva di fuoco standard considerata per progettazione al fuoco	24
Tabella 7. Combinazioni di carichi per carichi temporanei applicati ai conci.	25
Tabella 8. Caratteristiche del calcestruzzo	25
Tabella 9. Caratteristiche dell'acciaio	26
Tabella 10. Sezioni della galleria considerate	28
Tabella 11. Parametri geotecnici HS per le unità geotecniche	30
Tabella 12. Valutazione della deflessione del rivestimento	36
Tabella 13. Sollecitazioni per le verifiche strutturali del rivestimento – Sezione 1	40
Tabella 14. Sollecitazioni per le verifiche strutturali del rivestimento – Sezione 2	40
Tabella 15. Sollecitazioni per le verifiche strutturali del rivestimento – Sezione 3	41
Tabella 16. Classe strutturale	42
Tabella 17. Distanza minima dall'asse per i muri esposti per un lato (EN 1992-1-2)	42
Tabella 18. Combinazioni di e fattori materiali	44
Tabella 19. Verifica del taglio	48
Tabella 20. Verifica fessurazione	49
Tabella 21. Risultati dei modelli – Deformazione dell'anello	53
Tabella 22. Massimo sforzo di compressione	55
Tabella 23. Forze temporanee	58
Tabella 24. Caratteristiche della spinta della TBM	62
Tabella 25. Massimo sforzo di spinta	63
Tabella 26. Risultati verifica galleggiabilità (falda + 1,5 m)	77
Tabella 27. Risultati verifica galleggiabilità (falda + 4,5 m)	77
Tabella 10-1 Frequenza letture di monitoraggio	79

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

1. PREMESSA

1.1 Scopo e campo di applicazione

La presente relazione si inserisce nell'ambito dell'affidamento dei servizi di ingegneria relativi alla Progettazione Definitiva della Tratta Politecnico-Rebaudengo della Linea 2 della Metropolitana, disciplinato dal Contratto tra la Città di Torino e la società Infratrasporti.TO s.r.l., ed ha per oggetto le fasi realizzative, le analisi strutturali e le verifiche relative alle opere di sostegno della galleria a foro cieco realizzata con TBM prevista tra le stazioni di Politecnico e Bologna.

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 9,7 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 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.

Il 1° lotto funzionale è costituito dalle seguenti opere:

- 13 stazioni sotterranee;
- 12 pozzi intertratti aventi funzione di ventilazione, uscita di emergenza ed accesso dei soccorsi;
- La galleria di linea costituita da:
 - o Un tratto in galleria naturale realizzato con scavo tradizionale per una lunghezza di 277m circa, che va dal manufatto di retrostazione Rebaudengo alla Stazione Rebaudengo e prosegue oltre fino a sottopassare via Toscanini per ulteriori 293m circa;
 - o Un tratto in galleria artificiale in Cut&Cover ad uno o due livelli, per una lunghezza complessiva di circa 3,0 km che, partendo da via Toscanini collega le stazioni, Giulio Cesare, San Giovanni Bosco, Corelli, Cimarosa/Tabacchi, Bologna fino al manufatto in retrostazione Bologna che include anche il pozzo Novara;

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

- o Un tratto in galleria naturale realizzato con scavo meccanizzato mediante una TBM (Tunnel Boring Machine) avente diametro di circa 10,00 m di scavo dal manufatto in retrostazione Bologna fino al tronchino in retrostazione Politecnico per una lunghezza complessiva di circa 5,6 km;
- Un pozzo terminale di fine tratta funzionale per l'estrazione della TBM, posto all'estremità del tronchino in retrostazione Politecnico;
- il manufatto in retrostazione Rebaudengo, avente la funzione di deposito-officina, per la manutenzione ordinaria programmata sui treni, oltre che il parcheggio di 7 treni in stalli predisposti e complessivamente di 10 treni a fine servizio;
- la predisposizione per la realizzazione del manufatto di bivio nella diramazione nord verso San Mauro Torinese.

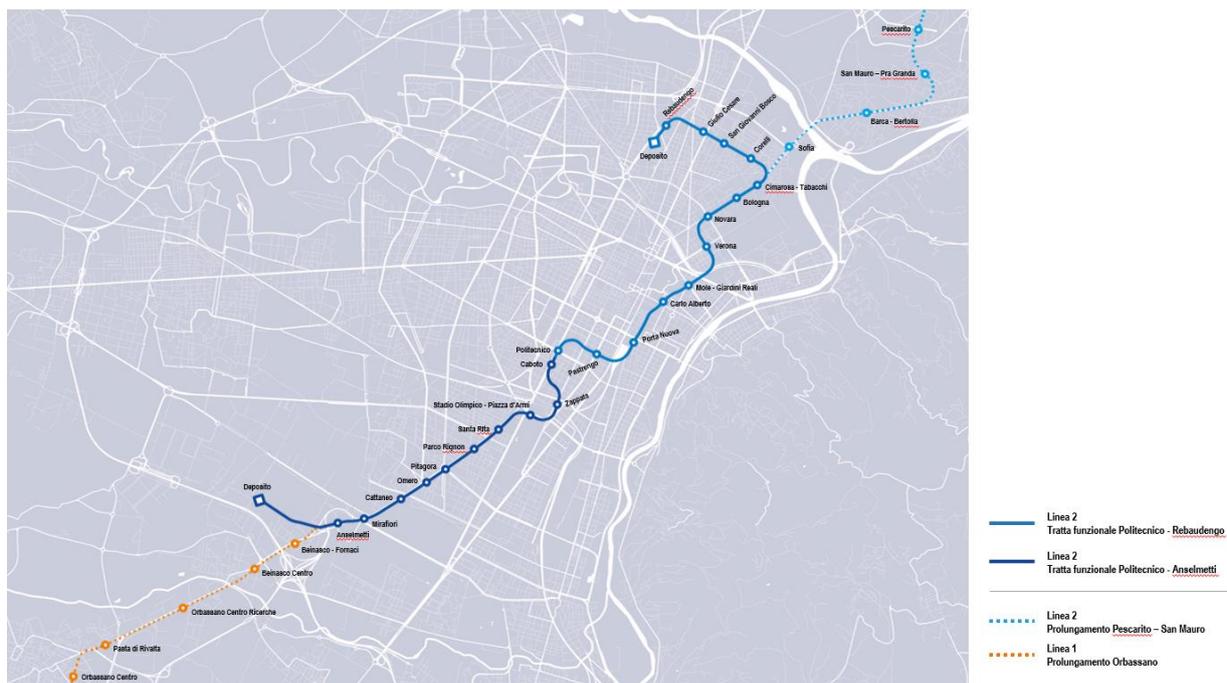


Figura 1. Key-plan della linea 2 – tratta funzionale Politecnico-Rebaudengo

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

La normativa applicata per il progetto dell'opera è di seguito elencata:

- [1] NTC 2018 Ministero delle infrastrutture e dei trasporti. Decreto 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni.
- [2] UNI EN 206:2016. Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità.
- [3] European Standard. EN 1991-1-1. Eurocode 1. Actions on structures - Part 1: General actions.
- [4] European Standard. EN 1991-1-2. Eurocode 1. Actions on structures - Part 2: General rules. Structural fire Design.
- [5] European Standard. EN 1992. Eurocode 2. Design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings.
- [6] European Standard. EN 1997. Eurocode 7. Geotechnical design - Part 1: General rules.

I documenti di riferimento provengono dal Progetto Preliminare in particolare dalla tratta di galleria scavata con metodo meccanizzato e alle informazioni geotecniche aggiornate:

- [7] TRCG00T001.1_13 Tracciato- Pianta (ricevuto 10/11/2021).
- [8] TRCG00T002.1_14 Tracciato Profilo (ricevuto 10/11/2021).
- [9] MTL2T1A0GEOGENT002_1-6_DRAFT_05112021_v1 Profilo Geomeccanico (ricevuto 10/11/2021).
- [10] 02.MTO2PFTCGEOCOMR006-00_B Relazione geotecnica-geomeccanica (PFTE).
- [11] 01.MTO2PFTCSTRGALR001-00_B Galleria scolmatrice tratta in meccanizzato – relazione tecnica e di calcolo (PFTE).
- [12] 01.MTO2PFLGENECOMR001-00_B Studio di fattibilità utilizzo ai fini geotermici delle opere strutturali - Relazione tecnica (PFTE).
- [13] 02.MTO2PFLGENECOMR002-00_B Studio di fattibilità utilizzo ai fini geotermici delle opere strutturali - Relazione generale (PFTE).

Inoltre, il presente documento si basa anche sui seguenti riferimenti:

- [14] AFTES "The Design, Sizing and Construction of Precast Concrete Segments Installed at the Rear of a Tunnel Boring Machine (TBM)", Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain, 1997.
- [15] AFTES "Guidelines for Earthquake Design and Protection of Underground Structures", Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain, 2001.
- [16] Bourbie, T, Coussy, O, and Zinszner, B. Acoustics of porous media. United States: N. p., 1987.
- [17] DAUB "Recommendations for the design, production and installation of segmental rings", 2013.
- [18] Guglielminetti, V.; Grasso, P; Mahtab, A. and Xu, S., 2008. Mechanized Tunnelling in Urban Areas: design methodology and construction control. Taylor & Francis Ed., London, UK.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

- [19] ITA "Guidelines for the design of shield tunnel lining", in the Journal "Tunneling and Underground Space Technology", Vol. 15, Nr. 3, pp. 303 - 331, 2000.
- [20] ITA "Guidelines for the Design of Segmental Tunnel Linings", International Tunnelling Association, 2019.
- [21] ITA "Seismic Design and Analysis of Underground Structures" Hashash Y, et al, ITA, 2001.
- [22] Maidl B. et al. (2012), "Mechanised Shield Tunnelling", 2nd edition. Ernst & Sohn.
- [23] Muir-Wood, A.M., 1975. The circular tunnel in elastic ground. Géotechnique, Vol.25, Iss.1, pp. 115-127.
- [24] Penzien, J., 2000. Seismically induced racking of tunnel linings

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta funzionale 1: Politecnico – Rebaudengo
Piano di gestione della Progettazione	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

3. RICHIAMO DELLE CONDIZIONI GEOLOGICO-TECNICHE

L'area lungo la quale si svilupperà il Progetto della Linea 2 si ubica 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 pliocenica superiore – olocenica formata dagli apporti successivi di due ampi conoidi fluvio-glaciali appartenenti al fiume Dora Riparia e torrente Stura di Lanzo. 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.

Nello specifico possiamo affermare che l'assetto geologico generale della zona d'interesse è costituito per i primi 150 m circa di profondità dal piano campagna in tre complessi litostratigrafici:

- depositi fluvioglaciali e fluviali: sabbie e ciottoli in matrice limosa;
- depositi lacustri e fluviolacustri: limi argillosi e livelli sabbioso ghiaiosi;
- depositi d'ambiente marino, limi argillosi, limi sabbiosi e sabbie grigio azzurre con fossili.

Nel complesso i terreni interessati dallo scavo delle gallerie sono costituiti prevalentemente da un deposito ghiaioso-sabbioso ben addensato, caratterizzato dalla presenza di livelli e/o lenti di materiale cementato. La cementazione si presenta per lo più con disomogenea distribuzione verticale e scarsa continuità orizzontale, in accordo alla genesi stessa del deposito naturale.

Soltanto in alcuni specifici tratti dove il tracciato scende in profondità, la galleria interseca i materiali sottostanti:

- intorno a Pk 8+500 la metà inferiore del fronte intercetta depositi limo-argilloso-sabbioso-ghiaioso (argille azzurre-FAA);
- dal Pk 9+300 AL Pk 10+400 il fronte è interamente nei depositi di argille limose molto compatte e localmente litificate (marne di Sant'Agata-SAF).

3.1 Caratteristiche geotecniche

La caratterizzazione geotecnica delle unità interessate dagli scavi si può descrivere come segue.

Unità geotecnica U1: terreno superficiale

Rappresenta l'orizzonte superiore del profilo stratigrafico e si presenta con potenza variabile. Granulometricamente risulta composta da limi sabbioso-argillosi, limi, e limi argillosi, sabbie con ghiaie, inglobanti materiali derivanti da demolizioni quali frammenti di laterizi e calcestruzzo.

Unità geotecnica U2-U3-U4: depositi fluvioglaciali Rissiani (ghiaie con sabbie da sciolte a cementazione media-elevata)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Le unità U2-U3-U4 sono riconducibili ai depositi fluvioglaciali, costituiti da ghiaie eterometriche da fini a grosse, con clasti poligenici (di dimensioni variabili da centimetrici a metrici) immersi in matrice sabbioso-limosa.

- U2 - Ghiaie eterometriche da fini a grosse con presenza di clasti poligenici centimetrici in matrice sabbiosolimosa ed intercalazioni di sabbie fini (a) e livelli a ciottoli (b). Grado di cementazione da nullo a medio. Depositi fluvioglaciali.
- U3 - Depositi fluvioglaciali con un grado di cementazione da debole a medio.
- U4 - Depositi fluvioglaciali con un grado di cementazione da media a elevata.

Unità geotecnica U5: Argille Azzurre

Questa unità è formata da limi argillosi e argille limose grigie e grigio-azzurre, molto compatte, plastiche, con livelli centimetrici sabbioso – limosi e ghiaioso – limosi con rari ciottoli. Depositi di ambiente marino con associazione a nannofossili calcarei riferibili alla biozona MNN16A.

Unità geotecnica U6: depositi Villafranchiani

I depositi del Villafranchiano intercettati dalle indagini eseguite per il progetto preliminare di L2 sono maggiormente costituiti da sabbie giallo - brune a grigie, da fini a grosse e ghiaie fini, addensate, generalmente alterate nella parte superiore.

Unità geotecnica U7: marne di Sant'Agata

Questa unità, costituita da argille limose di colore grigio molto compatte e localmente litificate, di ambiente deposizionale marino con associazione a nannofossili calcarei riferibili alla biozona MNN11A.

Nella Tabella 1 sono mostrati i parametri caratteristici che, in accordo alle NTC2018 data la tipologia di opera, corrispondono ai valori di progetto.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Tabella 1. Parametri di resistenza e deformabilità per le unità geotecniche

Unità geotecnica	γ_{nat}	Φ'	c'	E	ν
	[kN/m ³]	[°]	[kPa]	[MPa]	[-]
U1	19	29	0	15	0,3
U2-U3-U4	19	36	10	150	0,3
U5	20	23	40	65	0,3
U6	19	31	20	90	0,35
U7	20.4	28	25	150	0,35

dove:

- γ : peso di volume unitario
- E** : modulo di deformabilità
- ν : coefficiente di Poisson efficace
- ϕ' : angolo di attrito efficace
- c' : coesione efficace
- C_u : coesione non drenata

NOTA: Per la definizione del grado di cementazione delle Unità U2-U3-U4 si faccia far riferimento al documento progettuale 07_MTL2T1A0DGE0ENR002-0-1 "Relazione Geotecnica e Sismica". A favore di sicurezza le analisi di calcolo e dimensionamento sono state eseguite utilizzando i parametri geotecnici dell'Unità U2 che presenta i valori più cautelativi, rispetto alle Unità U3 e U4 che sono più cementate.

Consolidamenti

Eseguiti con iniezioni cementizie ad alta permeabilità e jet-grouting in base alle sezioni specifiche, per ottenere un miglioramento delle caratteristiche meccaniche del suolo tali da garantire valori:

- $C' \geq 150\text{kPa}$ (coesione non drenata)
- $\phi' > 36^\circ$
- $\gamma = 19\text{kN/m}^3$
- $E \geq 450\text{MPa}$ (modulo elastico)
- $\nu = 0.3$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

3.2 Condizioni idrogeologiche

Ai fini del calcolo ed in considerazione delle valutazioni in merito alla tendenza evolutiva della profondità della superficie libera della falda, si assume che per quanto concerne il tracciato della linea 2, essa possa essere collocata ad una profondità dal piano campagna variabile tra circa 29 m e 8 m. L'oscillazione del livello freatico a scala annuale può aggirarsi intorno ai 2 metri.

3.3 Condizioni sismiche

In base alla recente normativa ed alla caratterizzazione geotecnica operata, i parametri di input per la classificazione sismica dell'area di interesse per l'opera sono:

- Suolo di tipo B con riferimento alla Tab. 3.2.II di [1] (*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*).
- Caratteristiche della superficie topografica tipo T1 in base alla Tab. 3.2.III di [1] (*Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$*).

La galleria viene verificata con riferimento allo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) secondo cui, a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali, cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali.

Per la valutazione della vita nominale nel caso in oggetto, l'opera ricade all'interno del tipo di costruzione 3: "grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica" (paragrafo 2.4 delle "Nuove Norme tecniche per le costruzioni – D.M. 14 gennaio 2008"). La vita nominale risulta pertanto $VN > 100$ anni.

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso. Nel caso in oggetto si fa riferimento alla Classe III. Il coefficiente d'uso risulta quindi $CU = 1,5$.

Il periodo di riferimento VR si ricava moltiplicando la vita nominale VN per il coefficiente d'uso CU e nel caso specifico si ottiene:

$$VR = VN \cdot CU = 100 \text{ anni} \cdot 1,5 = 150 \text{ anni}$$

Le probabilità di superamento PVR nel periodo di riferimento VR, cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente, sono pari al 10% nel caso dello Stato Limite di salvaguardia della Vita. Le azioni di progetto si ricavano ai sensi delle NTC dalle accelerazioni ag e dalle relative forme spettrali.

Parametri ag, Fo, Tc*

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Per il caso in esame l'accelerazione massima orizzontale al sito per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) è stata valutata ai due estremi della linea 2, quindi presso la futura Stazione Anselmetti (fuori dal lotto funzionale 1) e presso Stazione Corelli.



Figura 2. Accelerazione sismica Staz. Corelli

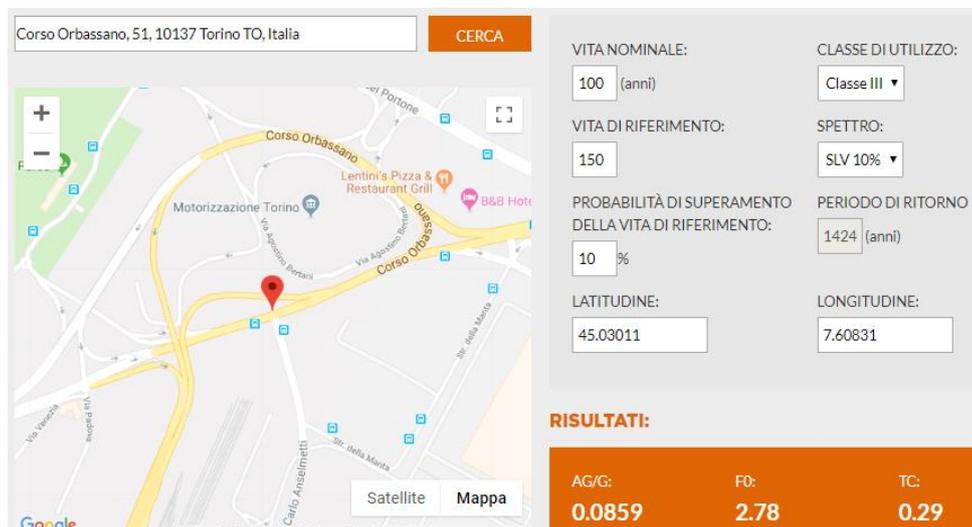


Figura 3. Accelerazione sismica Staz. Anselmetti

Cautelativamente si è considerata la massima accelerazione $ag/g = 0,086$, corrispondente a Stazione Anselmetti.

Gli effetti di amplificazione locale dovuti alla stratigrafia ed alla conformazione topografica vengono messi in conto mediante i parametri S_S ed S_T . La categoria di suolo più attinente è la B,

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

pertanto si ottiene $S_S = 1,2$. Per tener conto delle condizioni topografiche si utilizzano i valori del coefficiente topografico S_T . Per il caso in esame si assume $S_T = 1,0$.

Il valore dell'accelerazione massima orizzontale del sito è pari a:

$$a_{max} = a_g \cdot S_S \cdot S_T = 0,086 \cdot 1,20 \cdot 1,0 = 0,103 \text{ g}$$

4. RIVESTIMENTO IN CONCI PREFABBRICATI

4.1 Caratteristiche dell'anello

L'anello di rivestimento realizzato in conci prefabbricati in calcestruzzo armato che si propone di adottare è di tipo universale per garantire la possibilità di seguire il tracciato e la traiettoria della TBM durante le operazioni di scavo con le tolleranze richieste, che si indicano con lo scostamento dell'asse reale dall'asse teorico di 5 cm.

Tenuto conto del raggio interno dell'anello di 4,4 m e del raggio minimo del tracciato di 250 m (presente in diversi tratti) si definisce un "taper" di 36 mm che porta ad un raggio minimo di 200 m circa. Tale valore, inferiore al raggio minimo del tracciato, garantisce che anche in condizioni di scavo in tratti con raggio minimo l'anello potrà seguire la TBM lungo possibili correzioni di traiettoria con un margine sufficiente.

In definitiva le caratteristiche dimensionali dell'anello selezionato sono elencate nel seguito:

- Diametro interno = 8800 mm
- Diametro esterno = 9600 mm
- Spessore = 400 mm
- Lunghezza media anello = 1500 mm
- Delta lunghezza media su minima e massima = 36 mm
- Raggio minimo di curva = 200 m compatibile con la curva minima del tracciato di 250 m
- N. conci = 7+1 (chiave)
- N. connessioni longitudinali (anello-anello) = 22 (connettori a scomparsa) tipo EASY CLICK MEDIUM o similare
- Connessioni trasversali (concio-concio) = Assenti (giunto dotato di barra guida)



- Tenuta idraulica = Guarnizione in EPDM prossima all’estradosso tipo FAMA UG066B o similare
- Caratteristiche del calcestruzzo = Rck > 50 MPa (C40/50)
- Rinforzo = Acciaio tipo B450C
- Cuscini bituminosi = massimo spessore compresso 1,5 mm

La figura seguente mostra una vista d’insieme dell’anello.

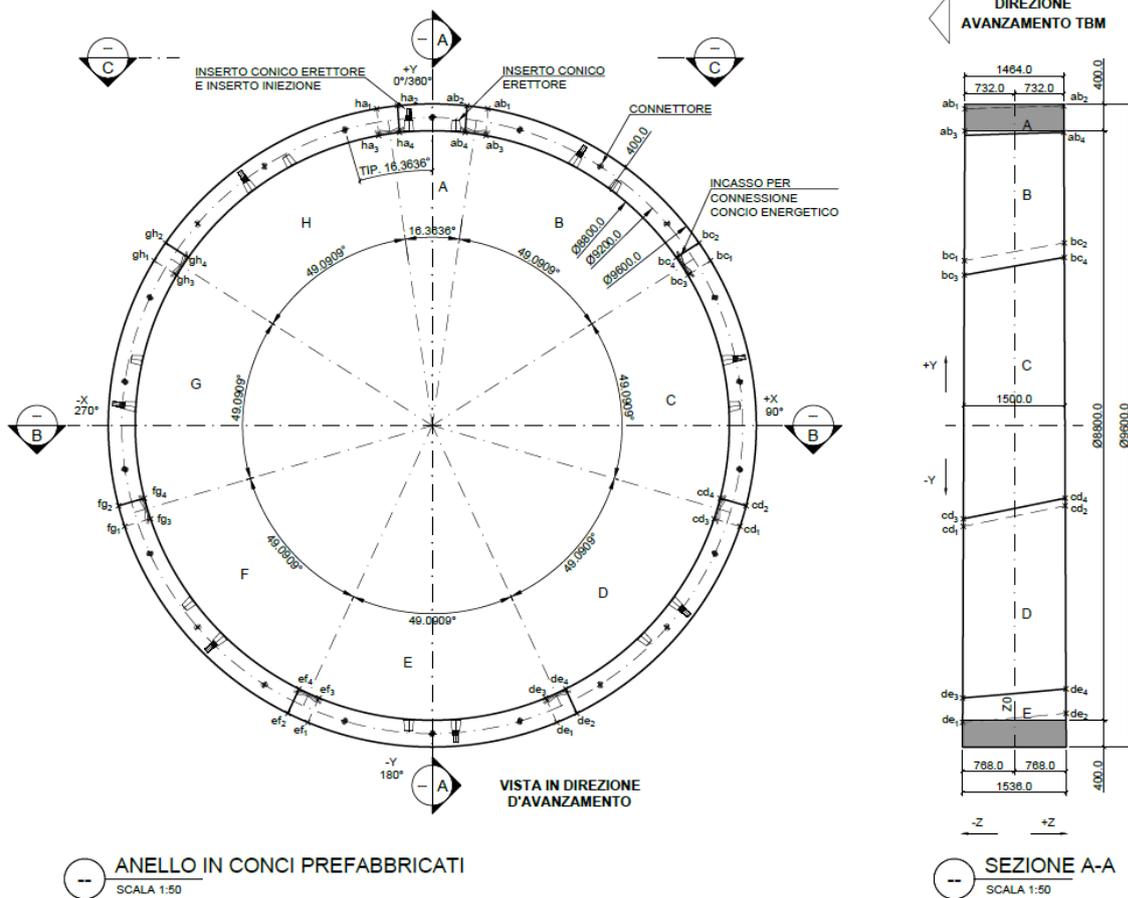


Figura 4. Vista d’insieme dell’anello di rivestimento in conchi prefabbricati proposto

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

4.2 Giustificazione della scelta dello spessore

Lo spessore del rivestimento deve essere tale da garantire tutte le verifiche strutturali e funzionali dalla fase di prefabbricazione dei singoli elementi fino alla fase di esercizio.

Esso dipende dal raggio interno ma anche dalla geologia che a sua volta incide sulla forza che la TBM dovrà scaricare sulla sequenza di anelli per avanzare, sui carichi agenti nella vita dell'opera e sulla dimensione della guarnizione capace di resistere alle pressioni idrauliche agenti.

Inoltre, in presenza di opere soggette al rischio incendio lo spessore dovrà tenere conto dello spessore residuo minimo necessario durante l'evento per garantire la stabilità e la salvaguardia degli utenti e soccorritori presenti in galleria.

Evidentemente, fino ad un certo limite, l'impiego di calcestruzzi di classe maggiore può ridurre lo spessore minimo richiesto.

Tenuto conto di tutto ciò, nella pratica lo spessore è predefinito in base a relazioni geometriche derivanti dalla raccolta di tutte le esperienze maturate nel mondo e quindi verificato nello specifico caso oggetto della progettazione.

In accordo con le raccomandazioni ITA [20], il rapporto tra diametro interno e spessore è compreso in un range tra 18 e 25 per gallerie con diametri interni maggiori di 5,5 m. La tabella che segue riporta alcuni esempi di galleria con diametri nell'intervallo d'interesse.

Tabella 2. Esempi di anelli con dimensioni simili

Progetto	Nazione	Diametro interno (m)	Spessore (mm)	ID/s	s/ID
Sofia Metro	Bulgaria	8,43	320	26	3,8%
Metro Linea 4	Brasil	8,43	350	24	4,2%
Galleria Serravalle	Italy	8,60	400	22	4,7%
Galeria Polcevera	Italy	8,65	400	22	4,6%
Epovije (Praga Metro)	Czech republic	8,70	400	22	4,6%
Kargi tunnel	Turkey	8,70	400	22	4,6%
Follo line Railway	Norway	8,75	400	22	4,6%
Galleria Cefalu	Italy	8,80	400	22	4,5%
Aked tunnel	Israel	9,00	500	18	5,6%
Catania Metro	Italy	9,60	320	30	3,3%
BCN Airport Railway	Spain	9,60	320	30	3,3%

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Metro Linea 6	Brazil	9,80	400	25	4,1%
AVE Serrano - Madrid	Spain	10,70	400	27	3,7%
Oenzberg tunnel	Switzerland	10,80	300	36	2,8%
BCN L9 Metro	Spain	10,90	350	31	3,2%
Shinjuku Route Tunnel	Japan	10,90	450	24	4,1%

Nel caso in esame il rapporto vale 22 ($ID/s = 8800/400$) e pertanto si ritiene lo spessore di 400 mm adeguato all'opera.

5. GALLERIA ENERGETICA

La parte della Linea 2 della Metropolitana di Torino costruita con TBM e quindi rivestita in anelli di conci prefabbricati, sarà attiva energeticamente. In accordo con la relazione tecnica di fattibilità utilizzata ai fini geotermici delle opere strutturali, il rivestimento in anelli di conci lavorerà come scambiatore di calore con il terreno per mezzo di tubi integrati nel calcestruzzo per fornire energia geotermica alle stazioni e/o agli edifici circostanti.

Il sistema energetico proposto si basa sulla sperimentazione in campo della galleria di prolungamento Sud della Linea 1 della Metropolitana di Torino (Barla et al. 2019), sviluppato nel 2013 dal Politecnico di Torino, che ha anche depositato un brevetto per un cono energetico denominato Enertun (Numero patente: 102016000020821, Barla e Di Donna 2016b). Attualmente sul mercato esistono altre possibilità commerciali, pertanto il sistema Enertun è preso a titolo esemplificativo non vincolante e in nessun modo esso costituisce la scelta per questo progetto, per il quale si possono proporre soluzioni alternative, garantendo il medesimo livello prestazionale.

Il sistema energetico che si intende implementare è un sistema di scambio energetico terreno dal momento che il rivestimento è dotato di un solo circuito disposto lato estradosso del rivestimento (lato terreno) per consentire lo scambio termico prevalentemente con il terreno.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

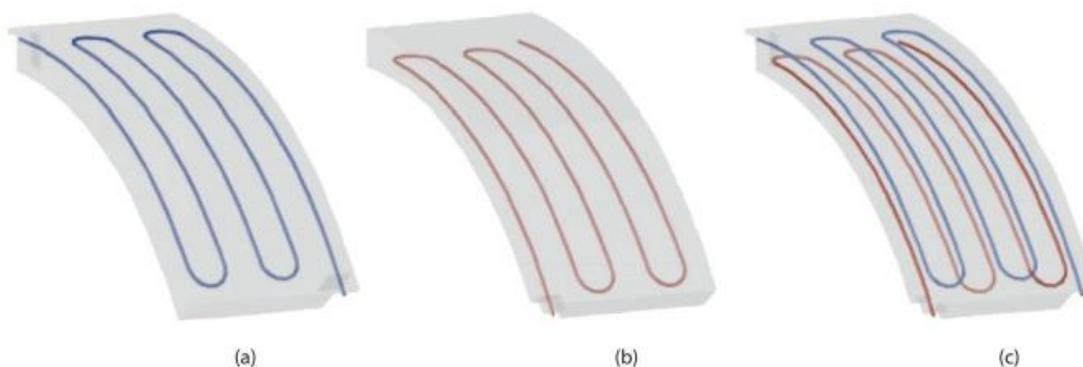


Figura 5. Configurazione per il sistema di scambio energetico terreno (a), aria (b) e terreno& aria (c) (Barla & Di Donna 20185)

Quindi, il rivestimento in conci per la ML2 presenterà tubi di polietilene incorporati per lo scambio termico. Le tubazioni presentano un diametro di 20 mm e spessore 2 mm e percorrono ciascun concio in senso circonferenziale, quindi con direzione principale perpendicolare all'asse della galleria, lungo 5 spire equispaziate di approssimativamente 30 cm e distanti 15 cm dal bordo del concio. I tubi saranno sostenuti dall'armatura secondaria (longitudinale) e separati dall'armatura principale per una distanza di almeno 30 mm in modo da garantire a pieno il comportamento acciaio-calcestruzzo.

Considerando che l'area dei tubi rappresenta solamente il 0,5% dell'area totale della sezione trasversale del concio di calcestruzzo, la totalità della sezione è stata considerata per il calcolo della capacità portante nelle verifiche strutturali.

Vedere l'elaborato grafico MTL2T1A2DSTRGT0T016 ("GEOMETRIA GENERALE DELL'ANELLO - SISTEMA TIPO CONCIO ENERGETICO") per ulteriori dettagli del sistema di recupero energetico proposto, incorporato nel rivestimento in anelli di conci.

6. PROGETTAZIONE STRUTTURALE DEL RIVESTIMENTO

6.1 Approccio

La progettazione del rivestimento viene eseguita secondo il diagramma di flusso della figura che segue, al fine di dimostrare che il rinforzo proposto soddisfi tutti i requisiti dell'applicazione della galleria.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1



Figura 6. Diagramma di flusso per il progetto e verifica del rivestimento

Il progetto e le verifiche delle armature riguardano:

- Armatura trasversale (direzione circonferenziale);
- Armatura longitudinale (direzione della galleria);
- Giunto radiale (tra i conci dello stesso anello);
- Giunto circonferenziale (tra gli anelli) in direzione radiale e circonferenziale.

6.2 Base per il calcolo

6.2.1 Codice strutturale

Le verifiche del rivestimento rispetto ai carichi applicati, vengono condotte utilizzando le NTC 2018 [1] e EC2 [3] secondo il metodo degli Stati Limite. Questa procedura verifica che la resistenza strutturale sia maggiore delle sollecitazioni indotte dal carico. Diversi fattori di carico si applicano a seconda delle condizioni dello stato limite finale e dei materiali utilizzati.

6.2.2 Materiali e fattori di carico

Nel metodo degli Stati Limite Ultimi i carichi applicati vengono moltiplicati per un fattore di carico e la resistenza dei materiali viene divisa per altri fattori che riducono le prestazioni in sezione. I

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

fattori considerati sono mostrati nelle prossime tabelle. I parametri a lungo termine α_{cc} sono considerati 0,85, come raccomandato nell'NTC 2018 [1].

Tabella 3. Fattori parziali per materiali in SLU secondo NTC 2018

Situazione	Normale	Accidentale/Sismico
Calcestruzzo	1,5	1,20
Acciaio	1,15	1,00

Tabella 4. Fattori parziali per carichi secondo NTC 2018

Carichi	Stati Limite Ultimi (SLU)				Stati Limite di Servizio (SLS)	
	Persistente e transitorio		Accidentale e Sismo		Fav.	Sfa.
	Favorevole	Sfavorevole	Fav.	Sfa.		
Permanente	1,0	1,30	1,0	1,0	1,0	1,0
Variabile	0	1,5	0	1,0	0	1,0
Accidentale/Sismico	-	-	0	1,0	-	-

6.2.3 Combinazioni di carico

In base a quanto disposto dalle NTC 2018 [1] è possibile utilizzare l'Approccio 1 secondo la combinazione A1+M1+R1 e pertanto verranno impiegate le seguenti combinazioni di carico per la progettazione strutturale del rivestimento.

Tabella 5. Combinazioni di carico per il rivestimento strutturale

Combinazione	Stato Limite considerato	Livello falda idrostatica	Combinazione di carico
SLU 1a	Stato limite ultimo persistente	Costruzione	1.30 x SW + 1.30 x GL + 1.30 x GWL + 1.3 EL
SLU 1b	Stato limite ultimo persistente	Lungo termine	1.30 x SW + 1.30 x GL + 1.30 x GWL + 1.3 EL
SLU 2 (malta secondaria)	Stato limite ultimo accidentale	Costruzione	1.00 x SW + 1.00 x GL + 1.00 x GWL + 1.0 EL x 1.00 xSGr

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

SLU 3 (terremoto)	Stato limite ultimo accidentale	Lungo termine	1.00 x SW + 1.00 x GL + 1.00 x GWL + 1.0 EL x 1.00 x SeisL
SLU 4 (fuoco)	Stato limite ultimo accidentale	Lungo termine	1.00 x SW + 1.00 x GL + 1.00 x GWL + 1.0 EL (sezione ridotta)
SLS 1a	Stato limite di servizio	Costruzione	1.00 x SW + 1.00 x GL + 1.00 x GWL + 1.0 EL
SLS 1b	Stato limite di servizio	Lungo termine	1.00 x SW + 1.00 x GL + 1.00 x GWL + 1.0 EL

Dove:

- SW: rivestimento peso proprio
- GL: carico dal suolo
- GWL: Pressione idrostatica dovuta alla falda
- EL: carico di edifici
- SeisL: carico sismico
- SGr: malta secondaria

6.2.4 Definizione di carichi

Rivestimento peso proprio (SW)

Il peso proprio del rivestimento sarà calcolato tenendo conto del peso unitario del calcestruzzo armato come 25 kN/m³.

Carico terreno (GL)

Il carico del terreno è considerato attraverso i parametri del terreno e il sovraccarico di ogni sezione critica. Il coefficiente di pressione laterale a riposo (K0) è stato considerato per ogni formazione in accordo con i parametri geotecnici.

Carico da pressione idrostatica (GWL)

La pressione idrostatica esterna causata dal livello della falda sotterranea agente sul rivestimento del tunnel è calcolata utilizzando la quota di profondità del tunnel fornita nei disegni GBR 2018 maggiorata di 1,5 m (livello a breve termine). Un livello a lungo termine corrispondente al livello di falda di riferimento aumentato di 4,5 m è inoltre considerato.

Carico degli edifici (EL)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

In corrispondenza di edifici interferenti con lo scavo della galleria, si prevede un sovraccarico dove q_{solai} è ipotizzato a 10 kPa per ogni solaio. L'incremento associato al traffico è assunto pari a 20 kPa. Per ulteriori dettagli si veda il paragrafo 6.3.2.

Carico malta secondaria (SGr)

Il carico della malta relativa al riempimento del vuoto anulare (iniezione secondaria di malta) è considerato un carico variabile agente sulla sezione superiore del rivestimento, come raccomandato da ITA [G3]. La pressione della iniezione è assunta pari ad 1 bar sopra la pressione esterna dell'acqua considerata a breve termine per ogni sezione critica.

Carico sismico (SeisL)

Il carico sismico considerato è stato derivato secondo il "Metodo di deformazione", raccomandato nella linea guida ITA "Seismic Design and Analysis of Underground Structures" (2001) [21]. L'analisi sismica è sviluppata nel capitolo 0 partendo dalle condizioni sismiche locali del sito specifico.

Fuoco

L'effetto sopra il rivestimento in anelli di conci di un incendio nel tunnel è considerato nell'analisi strutturale per verificare la sicurezza strutturale e la capacità portante del rivestimento a seguito dell'avvenuto incendio.

L'incremento di temperatura che si registra durante l'evoluzione dell'incendio viene descritto adottando la curva standard temperatura/tempo.

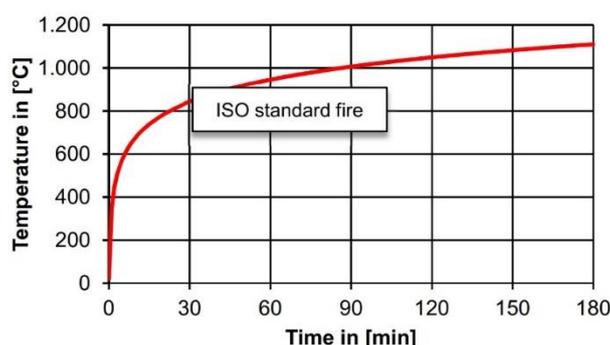


Tabella 6. Curva di fuoco standard considerata per progettazione al fuoco

Carichi temporanei applicati ai conci e all'anello

Lo scasso, la movimentazione, il trasporto, lo stoccaggio e l'installazione di conci inducono carichi temporanei i cui effetti devono essere verificati anche considerando i diversi livelli di maturazione del calcestruzzo.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Per le condizioni di spinta della TBM si assume un carico massimo fornito dai 22 gruppi di martinetti pari a circa 82000 kN, con dimensione circonferenziale delle scarpe di 750 mm ed eccentricità rispetto all'asse dell'anello di 30 mm.

Tabella 7. Combinazioni di carichi per carichi temporanei applicati ai conci.

Situazione	Fattori di carico in SLU	Fattori di carico in SLS
Scasseratura/ assemblaggio dell'anello	1,30 x 1,50 (fattore dinamico)	1,00
Movimentazione	1,30 x 1,50 (fattore dinamico)	1,00
Trasporto	1,30 x 1,50 (fattore dinamico)	1,00
Stoccaggio	1,30	1,00
Spinta TBM	1,00	1,00

6.2.5 Materiali

Calcestruzzo

Il calcestruzzo è modellato con legge non lineare secondo le NTC2018. La classe impiegata è la C40/50, le cui caratteristiche sono riportate nella tabella che segue. Il coefficiente parziale di sicurezza sui materiali è stato assunto pari a $\gamma_c = 1,5$. Vengono analizzate due situazioni per la verifica strutturale del conchio. Il primo corrisponde alla fase iniziale di maturazione del calcestruzzo per lo scasso ed il primo stoccaggio, quando la resistenza del calcestruzzo ha raggiunto il valore massimo che si assume pari a $R_{ck} = 15$ MPa. La seconda fase tiene conto della situazione definitiva quando il calcestruzzo ha raggiunto la resistenza finale di progetto ($R_{ck} = 50$ MPa).

Tabella 8. Caratteristiche del calcestruzzo

Parametri di calcolo	C40/50
f_{ck} (N/mm ²)	40,00
f_{cd} (N/mm ²)	26,67 breve termine - 22,67 lungo termine
f_{cm} (N/mm ²)	48,00
f_{ctm} (N/mm ²)	3,50
$f_{ctk\ 0,05}$ (N/mm ²)	2,45
E_{cm} (GPa)	35,22
ϵ_{c2} (‰)	2,00
ϵ_{cu2} (‰)	3,50
ν	0,2



Acciaio per armatura

L'acciaio appartiene alla classe B450C le cui caratteristiche sono espresse nella tabella che segue.

Tabella 9. Caratteristiche dell'acciaio

Parametri di calcolo	B450C
f_{yk} (N/mm ²)	450
f_{yd} (N/mm ²)	391
E_s (GPa)	210

Fibre in polipropilene

Per quanto attiene la capacità di resistere al fuoco dei conci, si prescrive l'aggiunta di specifiche fibre in polipropilene che possano sciogliersi già a temperature relativamente basse quindi lasciando dei vuoti capillari nel calcestruzzo dove possa espandersi il vapore generato dall'acqua imprigionata nel calcestruzzo, limitando il ben noto effetto di spalling. Tali fibre avranno le caratteristiche seguenti:

- dosaggio 1,5 kg/m³
- fibre monofilo
- Massimo diametro delle fibre 32 μ m
- Lunghezza compresa tra 6 e 12 mm
- Massima temperatura di fusione 160°C

Connettori

I connettori longitudinali che uniscono gli anelli saranno installati in numero di 3 per i 7 conci normali ed 1 per il conccio di chiave, in modo che assumano la medesima distribuzione angolare dei martinetti. Il connettore scelto è il tipo EASY CLICK MEDIUM (o simile), con una resistenza di:

- Forza di estrazione massima > 200 kN
- Resistenza al taglio massima > 250 kN

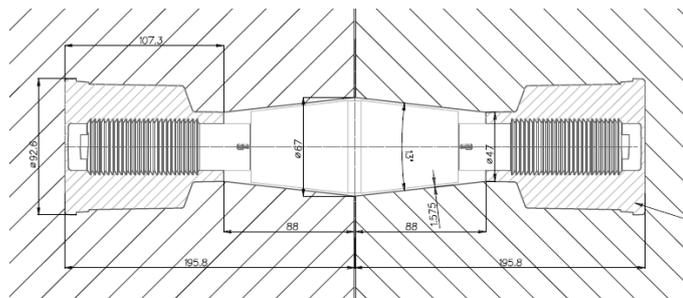


Figura 7. Figura del connettore proposto (EASY CLICK MEDIUM o simile)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Gaskets per impermeabilizzazione

La guarnizione scelta è di tipo ancorato FAMA UG066B (o simile), da 26 mm e verrà installata nei giunti circolari e longitudinali all'estradosso.

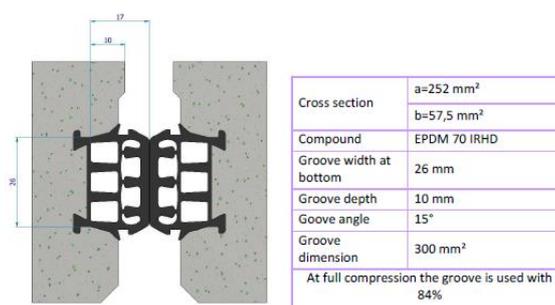


Figura 8. Guarnizione proposta tipo FAMA UG066B (o simile)

Barra guida

Una barra guida con connessione meccanica sarà posizionata in ogni giunto longitudinale. I requisiti minimi sono:

- Barra in PVC di diametro 50 mm e 800 mm di lunghezza.
- Resistenza al taglio > 30 kN.

Porta d'iniezione

Ogni concio sarà dotato di una porta d'iniezione in corrispondenza di uno dei fori del vaccum dell'erettore; tale porta sarà usata per l'iniezione della boiaccia di completamento, laddove necessario.

Cuscini bituminosi

I cuscini bituminosi prevedono uno spessore massimo di 1.5 mm tra i giunti di circonferenza sulla faccia posteriore degli anelli.

Tubi

Dei tubi di polietilene con diametro di 20 mm e spessore di 2 mm saranno integrati nel calcestruzzo durante la fase di prefabbricazione dei conci. Due circuiti indipendenti saranno installati, uno vicino all'intradosso (aria) e uno vicino all'estradosso dei conci (terreno).

Vita utile dell'opera

L'opera ha una vita utile di 100 anni e quindi tutti i materiali dovranno essere conformi a tale requisito.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

6.3 Calcolo delle sollecitazioni

6.3.1 Informazioni sul software

Il calcolo delle forze di progetto dei componenti per la progettazione strutturale del rivestimento è stato realizzato con Plaxis Tunnel 2D CE V20, un software per geotecnica 2D basato sul metodo agli elementi finiti e orientato alla risoluzione di problemi di tunnel in ipotesi di deformazioni piane. La discretizzazione agli elementi finiti è realizzata con due differenti tipi di elementi: gli elementi di trave, usati per modellare il rivestimento della galleria, e gli elementi di terreno, usati per modellare le diverse unità geotecniche. Nelle differenti fasi computazionali, gli elementi di terreno possono essere disattivati in modo da simulare lo scavo del tunnel mentre gli elementi di trave possono essere attivati in modo da simulare la costruzione del rivestimento. Dal momento che Plaxis consente di definire le proprietà di entrambe le unità di terreno e di rivestimento, è possibile valutare la risposta del terreno al tunnel e calcolare le forze dei componenti considerando l'interazione terreno-rivestimento.

6.3.2 Sezioni della galleria considerate per le verifiche

Le sollecitazioni sulle strutture secondo le combinazioni di carico sono calcolate per le sezioni critiche individuate lungo il tracciato; esse sono le seguenti. Queste sezioni sono basate sugli ultimi profili geometrici e geologici [8][9].

Tabella 10. Sezioni della galleria considerate

Sezione	PK	Situazione del disegno	OB (m)	Carico d'acqua a chiave (m)	Strati al livello del tunnel
S1	10+487	Minima copertura Condizioni asimmetriche	13,0	3,1	Unità U2-U3-U4- U7
S2	8+490/ 8+387	Massima copertura Edificio più alto (15+2)	28,4	14,2	Unità U2-U3-U4- U5
S3	9+965	Sottoattraversamento Fiume Dora Riparia Massima falda acqua	19,8	18,8	Unità U7

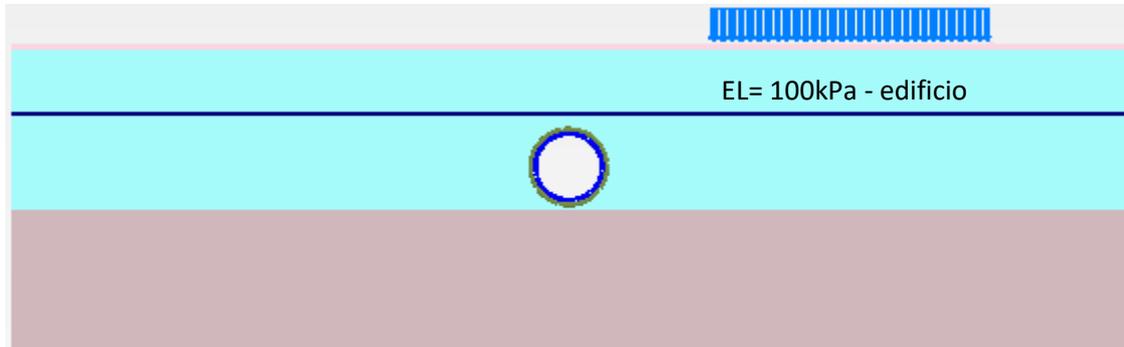


Figura 9. Sezione 1, minima copertura (PK 10+487)

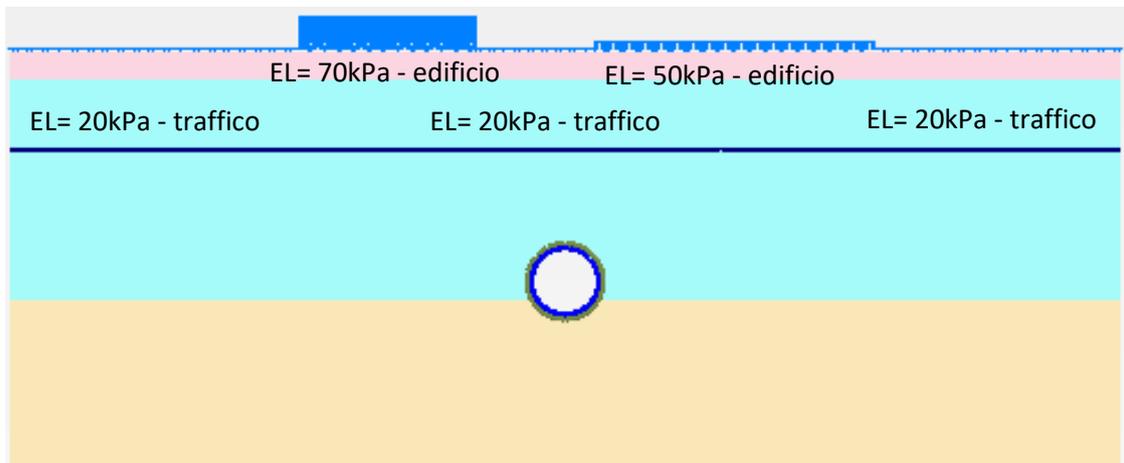


Figura 10. Sezione 2, massima copertura (PK 8+490)

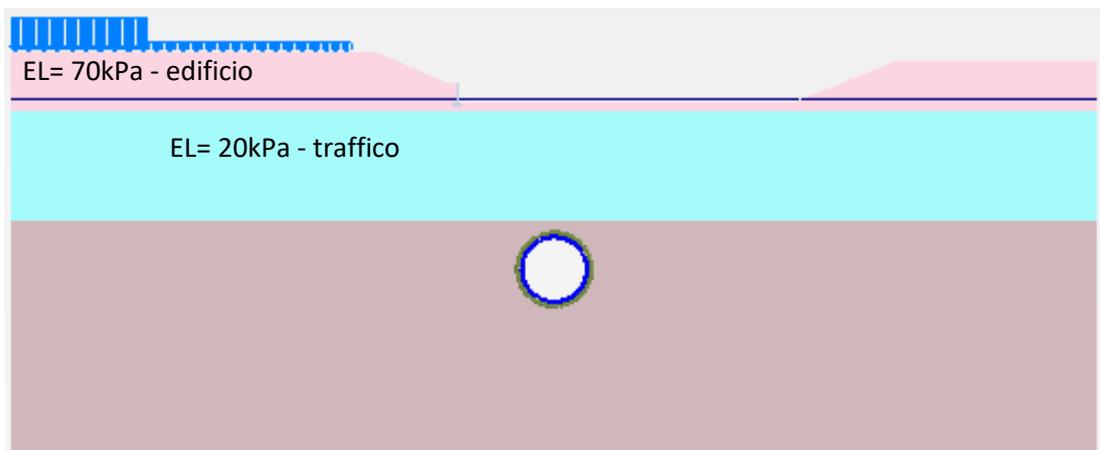


Figura 11. Sezione 3, fiume e massima falda acqua (PK 9+965)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

6.3.3 Parametrizzazione geotecnica

Il criterio utilizzato per la modellazione dei materiali geotecnici è stato il criterio Hardening Soil (HS), che permette di simulare i terreni in maniera più realistica rispetto al criterio di Mohr-Coulomb. Partendo dai parametri geotecnici indicati in Tabella 1, si effettua una conversione dal modulo di elasticità E al modulo E_{50}^{ref} richiesto dai criteri numerici utilizzati, come indicato nel manuale Plaxis.

La tabella seguente mostra i parametri HS utilizzati nelle sezioni Plaxis.

Tabella 11. Parametri geotecnici HS per le unità geotecniche

Unità geotecnica	γ_{nat} [kN/m ³]	Φ' [°]	c' [kPa]	E_{50}^{ref} [MPa]	E_{ur}^{ref} [MPa]	ν_{ur} [-]	m [-]	k_0 [-]
U1	19	29	0	15	45	0,2	0,50	0,52
U2-U3-U4	19	36	10	85	255	0,2	0,50	0.41
U5	20	23	40	25	75	0,2	0,90	0,61
U6	19	31	20	40	120	0,2	0,60	0,49
U7	20,4	28	25	50	150	0,2	0,65	0,53

6.3.4 Rivestimento della galleria

L'anello è modellato come una struttura continua ma con modulo di Young del calcestruzzo ridotto secondo le formulazioni di Muir-Wood per tenere conto della presenza dei giunti in posizione angolare differente tra anelli consecutivi, contando quindi su un effetto di redistribuzione dei momenti flettenti tra conci e giunti.

In sostanza il modello simula un anello continuo ma con inerzia flessionale ridotta per tenere conto della presenza dei giunti tra conci che quindi rendono il comportamento globale del medesimo maggiormente deformabile.

La formulazione di Muir-Wood riduce l'inerzia flessionale in funzione della geometria e numero di giunti secondo la formulazione che segue:

$$I_r = I_j + (4/n)^2 I = 0,003456 \text{ m}^4$$

Dove:

- s_{joint} = spessore di giunti = 0,274 m (porzione in cui le due facce di calcestruzzo sono a contatto)
- $s_{segment}$ = spessore del concio = 0,40 m
- I_r = inerzia equivalente

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

- I_j = inerzia del giunto ($s_{joint}^3 / 12$)
- N = numero di conci (chiave esclusa), 7 nel caso specifico
- I = Inerzia del concio ($s_{segment}^3 / 12$)

Quindi, dal momento che si ottiene $I_r/I = 0,65$, l'inerzia flessionale dell'anello è ridotta, riducendo dello stesso rapporto il modulo elastico del calcestruzzo.

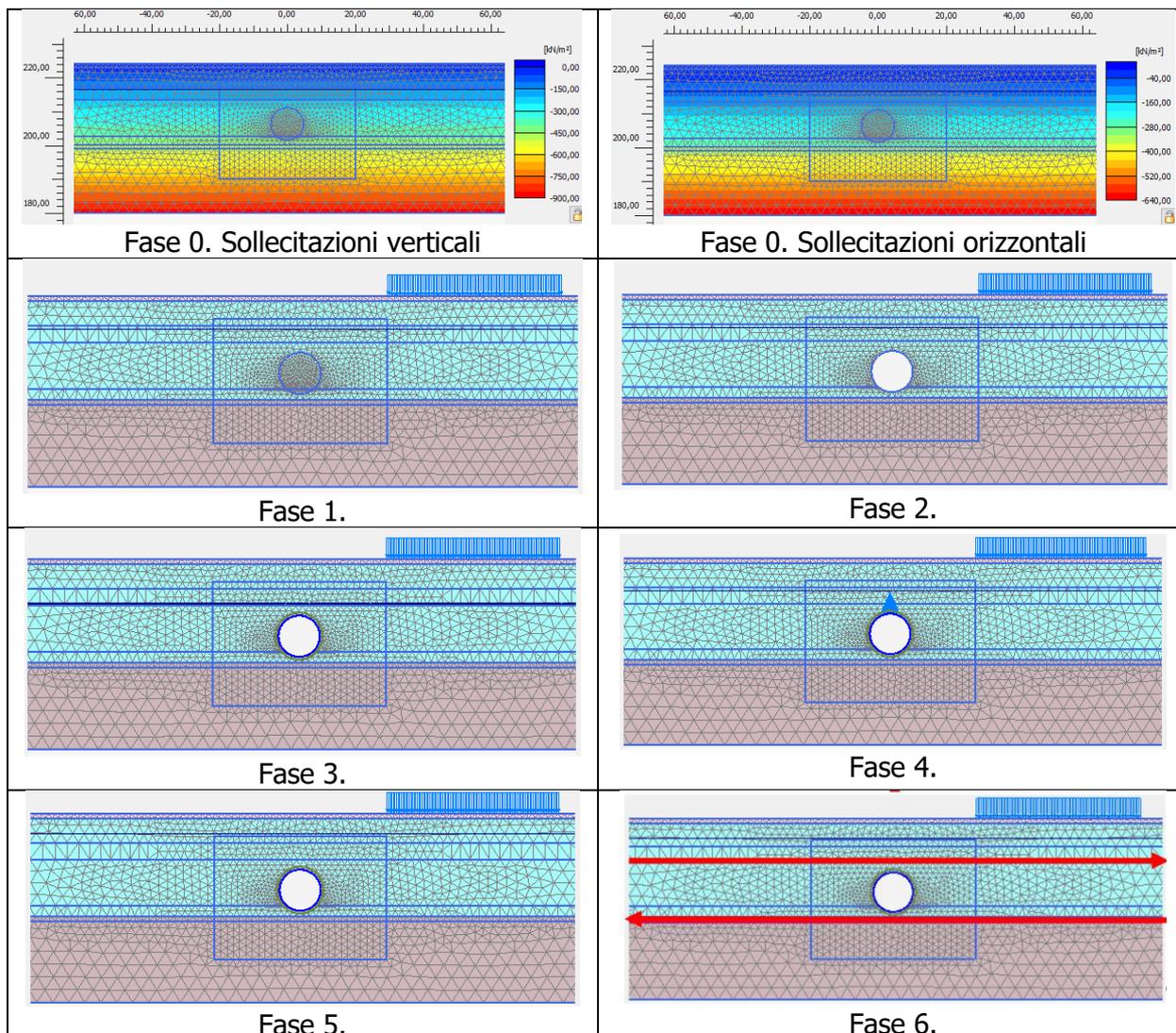
Tale fattore di riduzione è denominato "η" e sarà poi impiegato per ridistribuire i momenti derivati dal modello di calcolo tra i conci e i giunti.

6.3.5 Analisi FEM dettagliata

Sotto è mostrato l'elenco dettagliato delle fasi per l'analisi numerica bidimensionale con le informazioni relative alle caratteristiche del modello. Sono inoltre evidenziate le fasi da cui derivano le forze dell'asta per le verifiche strutturali.

Fasi del modello:

0. Lo stato tensionale iniziale (sollecitazione "in situ" P_0) è calcolato considerando i parametri geotecnici di ciascuna posizione, tenendo conto per ogni diverso strato di terreno del peso unitario e del coefficiente di spinta laterale del terreno k_0 a partire dalla formula $k_0 = (1 - \sin \phi)$. La falda è 1,5 m sopra il livello registrato nel 2018.
1. Vengono attivati gli scarichi degli edifici esistenti (10 kPa per ogni piano) e i carichi di traffico (20 kPa) in superficie utilizzando i carichi uniformemente distribuiti.
2. Ripristino degli spostamenti in questa fase. Lo scavo della galleria viene simulato disattivando gli elementi interni al tunnel e azzerando la pressione dell'acqua interna (considerando confini impermeabili della galleria). Si raggiunge un rapporto di deconfinamento equivalente ad una perdita di volume dello 0,5%, valore conservativo nell'ottica dell'individuazione delle sollecitazioni dimensionamenti per gli elementi in calcestruzzo del rivestimento.
3. Attivazione del rivestimento in conci tramite elementi di travee. L'inerzia ridotta del calcestruzzo è considerata secondo le formulazioni di Muir-Wood. Verifica SLU 1a.
4. Simulazione dell'iniziazione secondaria in calotta con malta cementizia tra il terreno e l'anello, mediante l'applicazione di un carico triangolare sulla corona della galleria con una pressione massima di 1 bar. Verifica SLU 2.
5. Dalla fase 3, innalzamento della falda di 3 m (+4,5 m rispetto al livello registrato nel 2018). Verifica SLU 1b.
6. Dalla fase 5, simulazione dell'effetto sismico tramite spostamenti stimati secondo la procedura suggerita dall'ITA [21] in accordo con i parametri sismici della NTC 2018 [1]. Verifica SLU 3.



Circa le condizioni di bordo del modello si specifica che il modello è provvisto di vincoli fissi alla base, di carrelli ai lati verticali mentre è privo di vincoli sul lato superiore (che simula il piano campagna).

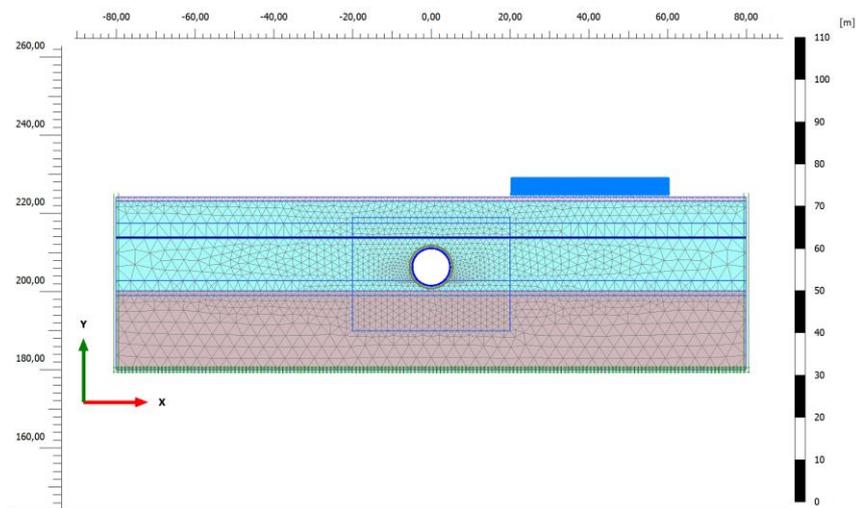


Figura 12. Condizioni di vincolo dei modelli numerici

6.3.6 Carico di iniezione secondaria di malta (combinazione di carico SLU2)

Il carico della malta relativo alla iniezione di riempimento secondaria dei vuoti anulari è considerato come carico accidentale. La pressione di iniezione della malta di riempimento dovrebbe essere considerata come uniforme sull'anello di rivestimento, durante l'uscita del rivestimento dalla coda della TBM. Ciò nonostante, in accordo con le "Norme per la progettazione di scudi di rivestimento per tunnel", esiste un caso accidentale dove questa sovrappressione è considerata solamente agente sopra la corona superiore del rivestimento, essendo questa configurazione la più sfavorevole e critica.

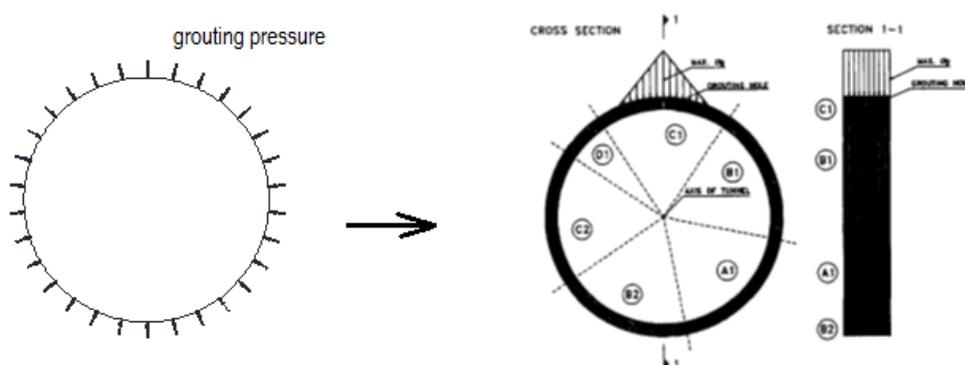


Figura 13. Pressione della malta agente sull'anello

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

La distribuzione dei carichi di progetto della malta considera un sistema di forze agente su un arco di 60° sopra la corona del tunnel. Un valore della pressione della malta di 100 kPa nella corona del tunnel è stato considerato per tutte le sezioni. Questo valore garantisce un riempimento dei vuoti perfetto.

6.3.7 Carico sismico (combinazione di carico SLU3)

Per quanto riguarda le azioni sismiche, è opportuno sottolineare innanzitutto che, come è ben noto, gli effetti prodotti sulle gallerie sono di gran lunga inferiori rispetto a quelli provocati sulle strutture in elevazione poste sulla superficie terrestre.

Per la verifica nelle condizioni di ovaling si segue quanto proposto da Youssef M.A. Hashash, Jeffrey J. Hooka, Birger Schmidt, John I-Chiang Yoo nell'articolo "Seismic design and analysis of underground structures", 2001 [21]. L'approccio usato fa riferimento ad una condizione di campo-libero (secondo quanto descritto da Wang, 1993) che rappresenta anche una condizione conservativa (poiché ignora la presenza della struttura nel limitare le deformazioni del terreno).

Con campo-libero ci si riferisce alle deformazioni che il terreno subirebbe in assenza della struttura. Ipotizzando che la struttura, durante un evento sismico, si muova insieme con il terreno circostante, sarà quindi soggetta alle stesse deformazioni a cui è soggetto il terreno. Tali deformazioni vengono imposte alla struttura al fine di ricavare le tensioni e per integrazione le sollecitazioni M, N, V.

La metodologia da seguire per calcolare gli effetti di ovaling è la seguente. La velocità massima delle particelle al suolo è calcolata come (paragrafo 3.2.3.3 di [1]):

$$PGV = 0,16 * a_g * S_s * S_T * T_c = 0,16 * 0,086g * 1 * 1,2 * 1,4 = 0,227 \text{ m/s}$$

In base quindi ai dati di velocità di picco e velocità delle onde S è possibile individuare la distorsione a cui sarà soggetta la galleria al passaggio dell'evento sismico. Cs è invece la velocità reale di propagazione delle onde di taglio.

$$\gamma_{max} = PGV / C_s$$

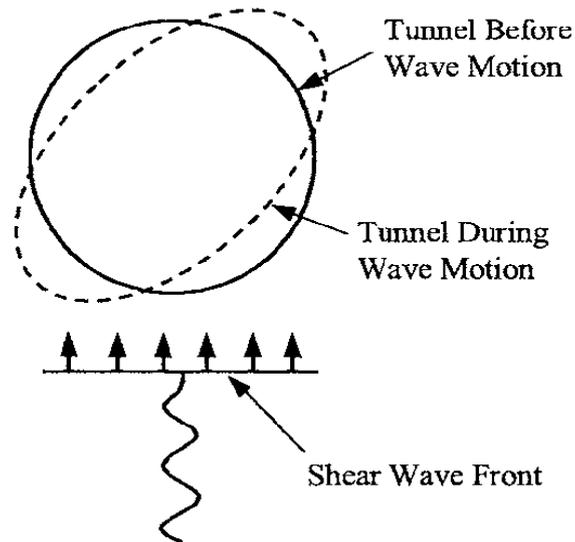


Figura 14. Effetto di deformazione sulla struttura al passaggio di un'onda sismica

Pertanto, possiamo ottenere una deviazione diametrale del campo-libero:

$$\Delta D_{\text{campo-libero}} = \gamma_{\text{max}} * D/2$$

Dove, D = diametro medio dell'anello di rivestimento

L'esperienza ha dimostrato che generalmente il rivestimento devia più della deflessione del campo-libero; pertanto è stato introdotto un rapporto di racking R per tenere conto della capacità del rivestimento di resistere alla distorsione del terreno.

Come definito nelle Linee guida ITA [21], la deflessione del rivestimento finale è data da:

$$\Delta D_{\text{lining}} = R \cdot \Delta D_{\text{campo-libero}}$$

Il rapporto di racking R può essere calcolato come:

$$R = \frac{4(1 - \nu_m)}{\alpha + 1}$$

In cui ν_m (coefficiente di Poisson del terreno). Penzien (2000) ha fornito espressioni per il coefficiente *alpha*, basato su diverse ipotesi riguardanti l'interfaccia tra terra e rivestimento:

condizione di spostamento libero tra rivestimento e suolo:

$$\alpha_{\text{full-slip}} = \frac{12E_t I (5 - 6\nu_m)}{D^3 G_m (1 - \nu_c^2)}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

condizione di aderenza totale tra rivestimento e suolo:

$$\alpha_{no-slip} = \frac{24 E_l I (3 - 4\nu_m)}{D^3 G_m (1 - \nu_c^2)}$$

Dove:

El = modulo di deformazione del calcestruzzo

νc = Coefficiente di Poisson del calcestruzzo

D = diametro medio dell'anello di rivestimento

ρm = densità del suolo

Gm = modulo di taglio al suolo (derivato dalla densità del suolo e dalla velocità delle onde di taglio assunta pari a 360m/s – stiff soil)

I = momento d'inerzia del rivestimento della galleria

La tabella mostra la deflessione del rivestimento:

Tabella 12. Valutazione della deflessione del rivestimento

Parametro	Valore
γ _{max}	0,000631
ΔD _{free-field}	2,90 mm
R	2,73
ΔD _{lining}	7,93 mm

6.3.8 Verifica al fuoco (combinazione di carico SLU4)

Il rivestimento in anelli di conci sarà verificato in modo da mantenere una resistenza strutturale sufficiente in caso di incendio garantendo che la struttura non collasserà per causa del fuoco di progetto. La resistenza strutturale al fuoco è verificata rispetto ad una curva tempo –temperatura, la quale stabilisce le temperature della superficie del calcestruzzo durante la durata dell'incendio.

La resistenza strutturale del rivestimento del tunnel è verificata in accordo con il Metodo Isotermo 500°C, basato sui principi di progettazione strutturale a fuoco di EN 1992-1-2 [4], Allegato B.1, che indica: "questo metodo è applicabile a un'esposizione standard al fuoco e a qualsiasi altro regime di tempo di calore che provoca dei campi di temperatura simili nell'elemento esposto al fuoco".



Il Metodo Isoterma a 500°C permette di definire l'estensione della zona danneggiata e quindi di indicare uno spessore ridotto della sezione trasversale, ignorando il contributo strutturale delle zone danneggiate riscaldate al fronte del calcestruzzo. Si considera che la zona danneggiata si estenda fino alla profondità riferita alla isoterma a 500°C, mentre la parte restante mantiene inalterati i valori di resistenza e delle proprietà elastiche (come in EN 1992-1-2, Allegato B.1).

Sulla base della curva di fuoco parametrica di progetto prescritta, il rivestimento in anelli di conci deve resistere fino a una temperatura massima di 1100°C, che, come indicato di seguito, corrisponde a una classe di fuoco EC2 - R180, come richiesto dalla curva standard. Considerando la curva di progetto a fuoco, il profilo di temperatura incluso nella norma EN 1992-1-2, allegato A, e l'approccio isoterma a 500°C (EN 1992-1-2, Allegato B.1), la profondità massima di danneggiamento del calcestruzzo in caso di incendio R180 si trova a 50 mm di distanza dalla superficie esposta:

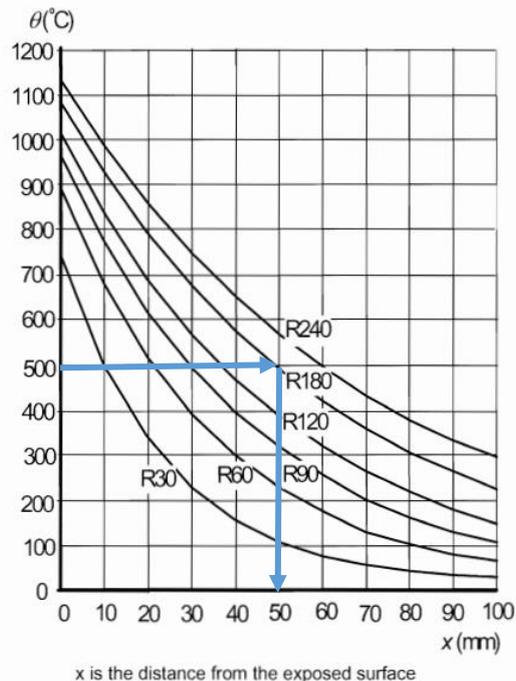


Figura 6 1 Curva di progetto del fuoco (da specifiche tecniche) e profili di temperatura for slabs (EN 1992-1-2)

Per motivi di sicurezza strutturale, si considera che un'ulteriore perdita accidentale di sezione di 20 mm tenga conto del verificarsi di scheggiature esplosive. Pertanto, si tiene conto di una profondità totale non cooperante di 70 mm (50 mm+20 mm).

La perdita di resistenza dell'armatura è valutata dal grafico sotto mostrato (da EN 1992 1-2 [4]) Per l'isoterma 500°C, il coefficiente di riduzione di resistenza dell'acciaio è 0,58.

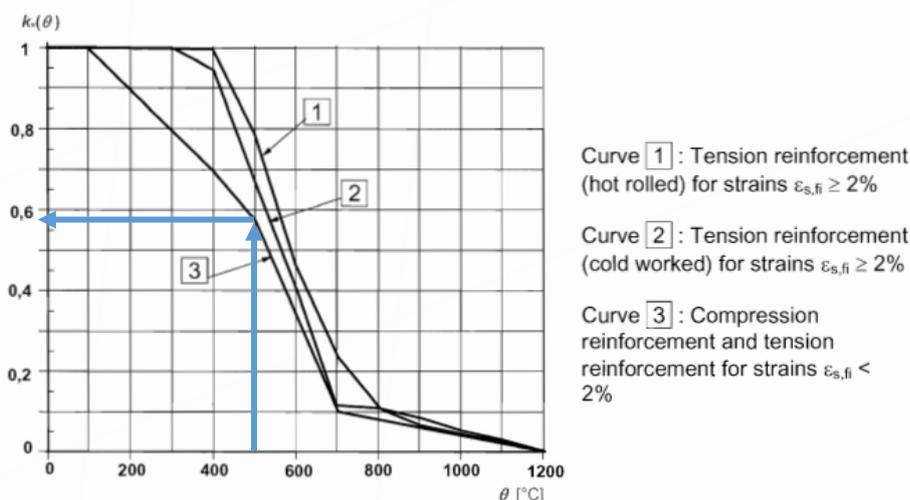


Figura 6 2 Coefficiente che tiene conto della diminuzione della resistenza caratteristica dell'armatura a tensione e compressione (EN 1992-1-2)

I calcoli presuppongono un caso di carico accidentale con un fattore di carico di 1,0 e un fattore di materiale del calcestruzzo di 1,2, secondo la norma EN 1990 e la norma EN 1992-1-1.

Pertanto, per la verifica del carico di fuoco, le forze di sezione calcolate saranno verificate con una capacità di sezione ridotta, utilizzando un diagramma di interazione calcolato tenendo conto delle seguenti caratteristiche:

Spessore della sezione = 330 mm (70 mm di perdita dello spessore della sezione)

Resistenza del calcestruzzo = $f_{ck}=40$ MPa

$\gamma_c= 1,2$

Resistenza dell'acciaio = $f_{yk} = 0,58 \times 450 = 261$ MPa

$\gamma_s = 1,0$

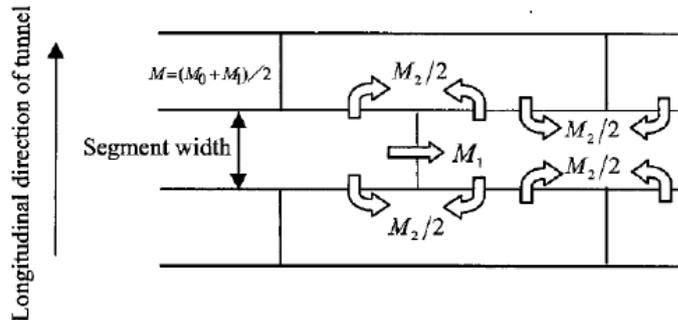
6.3.9 Risultati dei modelli: sollecitazioni per le verifiche strutturali del rivestimento

I risultati completi degli output di calcolo sono riportati in Appendice A.

In accordo al metodo di calcolo utilizzato, i risultati forniscono i valori N, M, V (sforzo normale, momento flettente ed azione di taglio) in ogni punto dell'anello con rigidezza flessionale ridotta in accordo con quanto descritto al punto 6.3.4.



Mentre per le sollecitazioni N e V non è necessario operare alcuna distinzione tra il concio e i giunti, la sollecitazione M deve essere calcolata per i due elementi strutturali distinti secondo il procedimento illustrato di seguito.



- M : Bending moment calculated in ring with uniform flexural rigidity, $\eta \cdot EI$
- M₀ : Design bending moment for main section
 $M_0 = M + M_2 = (1 + \xi)M$
- M₁ : Design bending moment for segment joints
 $M_1 = M - M_2 = (1 - \xi)M$
- M₂ : Bending moment transferred to adjacent rings due to staggered arrangement

Figura 15. Distribuzione del momento flettente M tra concio e giunto

I giunti longitudinali tendono a ruotare maggiormente e quindi a caricarsi di meno a svantaggio dei conci degli anelli precedenti e successivi che assorbono quanto il giunto non trattiene.

Posto "η", il rapporto secondo cui è stata ridotta la rigidezza flessionale dell'anello $I_r/I = 0,65$,

ξ è il rapporto di trasferimento di momento tra giunti e conci $\xi = 1 - \eta = 0,35$.

Da cui:

Il momento flettente sui giunti è pari a: $M_1 = (1 - \xi) M = 0,65 M$

Il momento flettente sui conci è pari a: $M_0 = (1 + \xi) M = 1,35 M$

Con:

M = momento di calcolo derivato dalle analisi Plaxis

$M_2 = \xi M = 0,35 M$ quota di momento che viene trasferito.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Secondo le simulazioni su Plaxis, i valori massimo e minimo sono ripresi nella tabella seguente. Vengono considerati i fattori di carico e le forze di progetto per la lunghezza dell'anello di 1,5m.

Nelle tabelle che seguono le colonne riportano i seguenti dati:

$N_{d,max}$ = sforzo assiale di calcolo massimo

$M_{ds,conc}$ = momento flettente di calcolo concomitante

$Q_{d,max}$ = sforzo di taglio di calcolo massimo

$N_{d,conc}$ = sforzo assiale di calcolo concomitante

$M_{ds,max}$ = momento flettente massimo di calcolo sul concio (positivo e negativo)

$M_{dj,max}$ = momento flettente massimo di calcolo sul giunto

Tabella 13. Sollecitazioni per le verifiche strutturali del rivestimento – Sezione 1

Sezione	LC	$N_{d,max}$ (kN)	$M_{ds,conc}$ (kNm)	$M_{dj,conc}$ (kNm)	$Q_{d,max}$ (kN)	$N_{d,conc}$ (kN)	$M_{ds,max}$ (kNm)	$M_{dj,max}$ (kNm)	$N_{d,conc}$ (kN)
S1 min OB	SLU1a	-1095,5	80,0	38,5	48,0	-1619,8	92,0	44,3	-1480,6
		-1767,8	-106,9	-51,4	-55,9	-1661,6	-107,0	-51,5	-1767,7
	SLU2	-1003,3	136,0	65,5	43,4	-1080,2	136,0	65,5	-1003,3
		-1461,9	-70,3	-33,9	-51,5	-1114,3	-77,3	-37,2	-1333,4
	SLU1b	-1317,3	7,8	3,7	26,1	-1808,4	48,7	23,5	-1800,5
		-1886,1	-67,3	-32,4	-34,5	-1872,2	-76,2	-36,7	-1880,8
	SLU3	-1465,6	176,1	84,8	55,6	-1538,8	194,5	93,6	-1487,0
		-2180,1	-178,6	-86,0	-67,4	-1892,4	-198,0	-95,4	-2161,3
	SLU4	-811,5	59,3	28,5	35,6	-1199,9	68,1	32,8	-1096,7
		-1309,5	-79,1	-38,1	-41,4	-1230,8	-79,3	-38,2	-1309,4
	SLS1a	-842,7	61,6	29,6	37,0	-1246,0	70,8	34,1	-1138,9
		-1359,8	-82,2	-39,6	-43,0	-1278,1	-82,3	-39,6	-1359,8
	SLS1b	-1013,3	6,0	2,9	20,1	-1391,1	37,5	18,0	-1385,0
		-1450,9	-51,8	-24,9	-26,6	-1440,2	-58,6	-28,2	-1446,7

Tabella 14. Sollecitazioni per le verifiche strutturali del rivestimento – Sezione 2

Sezione	LC	$N_{d,max}$ (kN)	$M_{ds,conc}$ (kNm)	$M_{dj,conc}$ (kNm)	$Q_{d,max}$ (kN)	$N_{d,conc}$ (kN)	$M_{ds,max}$ (kNm)	$M_{dj,max}$ (kNm)	$N_{d,conc}$ (kN)
S2 max OB	SLU1a	-3254,0	198,2	95,4	142,8	-4664,4	253,6	122,1	-4112,7
		-4956,4	-303,3	-146,0	-177,3	-4623,9	-313,8	-151,1	-4932,7
	SLU2	-2569,4	247,5	119,2	119,5	-3633,7	251,4	121,1	-2584,4
		-3891,3	-239,7	-115,4	-145,4	-3604,9	-256,4	-123,5	-3854,8
	SLU1b	-3367,5	174,9	84,2	129,4	-4733,6	219,0	105,5	-3552,5



		-4956,5	-280,8	-135,2	-174,5	-4651,1	-288,9	-139,1	-4938,7
	SLU3	-3482,7	262,3	126,3	133,1	-4348,4	402,5	193,8	-4341,6
		-5214,9	-387,6	-186,6	-227,9	-4614,9	-390,9	-188,2	-5210,9
	SLU4	-2410,4	146,8	70,7	105,8	-3455,1	187,8	90,4	-3046,4
		-3671,4	-224,7	-108,2	-131,3	-3425,1	-232,5	-111,9	-3653,8
	SLS1a	-2503,1	152,5	73,4	109,9	-3588,0	195,0	93,9	-3163,6
		-3812,6	-233,3	-112,3	-136,3	-3556,9	-241,4	-116,2	-3794,4
	SLS1b	-2590,4	134,5	64,8	99,5	-3641,2	168,5	81,1	-2732,7
		-3812,7	-216,0	-104,0	-134,2	-3577,8	-222,2	-107,0	-3799,0

Tabella 15. Sollecitazioni per le verifiche strutturali del rivestimento – Sezione 3

Sezione	LC	$N_{d,max}$ (kN)	$M_{ds,conc}$ (kNm)	$M_{dj,conc}$ (kNm)	$Q_{d,max}$ (kN)	$N_{d,conc}$ (kN)	$M_{ds,max}$ (kNm)	$M_{dj,max}$ (kNm)	$N_{d,conc}$ (kN)
S3 fiume	SLU1a	-2546,8	37,8	18,2	39,3	-3079,1	63,5	30,6	-3045,3
		-3095,7	-78,5	-37,8	-29,6	-2997,7	-103,5	-49,8	-3079,7
	SLU2	-2061,3	152,0	73,2	72,8	-2113,4	153,0	73,7	-2062,7
		-2455,4	-72,1	-34,7	-58,0	-2091,8	-82,0	-39,5	-2445,7
	SLU1b	-2786,2	30,8	14,8	35,9	-3300,5	59,1	28,5	-3287,1
		-3311,5	-66,6	-32,1	-31,0	-3248,1	-91,9	-44,3	-3284,0
	SLU3	-2913,2	176,9	85,2	57,7	-3061,3	202,8	97,6	-2952,8
		-3679,9	-182,1	-87,7	-76,0	-3337,1	-220,1	-106,0	-3652,2
	SLU4	-1886,5	28,0	13,5	29,1	-2280,8	47,0	22,6	-2255,8
		-2293,1	-58,1	-28,0	-21,9	-2220,5	-76,6	-36,9	-2281,3
	SLS1a	-1959,1	29,1	14,0	30,2	-2368,5	48,8	23,5	-2342,5
		-2381,3	-60,4	-29,1	-22,7	-2305,9	-79,6	-38,3	-2369,0
	SLS1b	-2143,3	23,7	11,4	27,6	-2538,8	45,5	21,9	-2528,6
		-2547,3	-51,2	-24,7	-23,9	-2498,5	-70,7	-34,0	-2526,2

6.4 Verifica strutturale della sezione del concio

6.4.1 Classe di esposizione

Le condizioni ambientali ai fini della valutazione della durabilità delle strutture in calcestruzzo si considerano condizioni XC2. La massima apertura delle fessure per le verifiche SLE sarà limitata a 0,3 mm.

6.4.2 Copriferro

Il copriferro è individuato in base a [5] tenuto conto della classe di esposizione.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Tabella 16. Classe strutturale

Classe di partenza	S4
Vita utile 100 anni	+2
Classe di resistenza = C40/50	-1
Controlli di qualità speciali	0
Elemento con armature non influenzate dal processo costruttivo	-1
Classe finale	S3

Pertanto, in accordo con il prospetto 4.4N dell'EC2 [5] il minimo copriferro sarà di 20 mm nominali, che viene aumentato 10 mm per considerare le possibili deviazioni in fase di posa dell'armatura nella cassaforma. Il risultante copriferro minimo è di 30 mm.

Tuttavia, il copriferro è rivisto anche ai fini della resistenza a fuoco, il che comporta una distanza minima dell'asse dell'armatura principale dal bordo del calcestruzzo di 50 mm, secondo la norma EN 1992-1-2 [4] per le pareti portanti.

Considerando il diametro dell'armatura principale come $\Phi 12$ e il rinforzo secondario come $\Phi 10$, il copriferro minimo per la resistenza a fuoco è di 34 mm ma viene adottato un copriferro di 40mm.

Tabella 17. Distanza minima dall'asse per i muri esposti per un lato (EN 1992-1-2)

Standard fire resistance	Minimum dimensions (mm)			
	Wall thickness/axis distance for			
	$\mu_{fi} = 0,35$		$\mu_{fi} = 0,7$	
	wall exposed on one side	wall exposed on two sides	wall exposed on one side	wall exposed on two sides
1	2	3	4	5
REI 30	100/10*	120/10*	120/10*	120/10*
REI 60	110/10*	120/10*	130/10*	140/10*
REI 90	120/20*	140/10*	140/25	170/25
REI 120	150/25	160/25	160/35	220/35
REI 180	180/40	200/45	210/50	270/55
REI 240	230/55	250/55	270/60	350/60

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

6.4.3 Rinforzo minimo

L'area dell'armatura longitudinale in zona tesa non deve essere inferiore a:

$$A_{s, min} = 0.26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t d$$

e comunque non minore di 0,0013 bt d. Dove:

b_t = larghezza media della zona tesa (1500 mm)

d = altezza utile della sezione (344 mm)

f_{ctm} = valore medio della resistenza a trazione assiale (3,50MPa per C40)

f_{yk} = valore caratteristico della resistenza a trazione dell'armatura (450 MPa)

$A_{s, min} = 1043 \text{ mm}^2$ (con 10Ø12 mm, equivalenti a 1130 mm²)

Nelle piastre a portanza unidirezionale si raccomanda di prevedere un'armatura trasversale secondaria in quantità non minore del 20% dell'armatura principale.

$A_{st, min} = 150 \text{ mm}^2 / \text{m}$ (ottenuta con Ø10/180 mm, equivalenti a 436 mm²)

6.4.4 Software di calcolo strutturale

I diagrammi di flessione composta e la distribuzione della sollecitazione della sezione, utilizzati nella verifica strutturale della sezione, sono calcolati utilizzando il software proprietario SECTIONS_FRC sviluppato da Tunnelconsult Engineering SL.

Il comportamento in sezione è simulato con un modello fatto di strati discreti di elementi in calcestruzzo e acciaio come mostrato nella figura. Per il calcolo del momento flettente e della forza assiale vengono formulate diverse ipotesi:

- Le sezioni trasversali sono piane prima della deformazione e rimangono piane dopo la curvatura.
- Si presume che l'attrito tra fibre con sforzi diversi sia zero.
- Il calcestruzzo in compressione ha un diagramma deformazione-sollecitazione di tipo parabolico.



Figura 16. Ipotesi sezionali



6.4.5 SLU: Verifica per sforzo normale – momento flettente

La verifica SLU del rivestimento a sforzo normale - flessione viene eseguita in questo paragrafo confrontando mediante un diagramma di interazione SLU le forze calcolate nel paragrafo 6.3.9 e appartenenti alle combinazioni di carico SLU con l'area che descrive la resistenza sezionale dell'anello di rivestimento.

La resistenza della sezione del rivestimento è determinata considerando una sezione di cemento armato di 400 mm x 1500 mm con classe C40/50. Il rinforzo principale dell'elemento è costituito da barre di 10Ø12 mm per ogni faccia (intradosso ed estradosso).

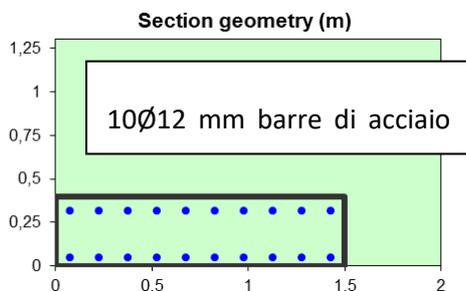


Figura 17. Progetto del rivestimento in conci

I seguenti fattori materiali sono considerati per ogni combinazione:

Tabella 18. Combinazioni di e fattori materiali

Combinazione	Stato Limite considerato	Livello falda idrostatica	Fattore cls.	Fattore acciaio	Fattore lungo termine
SLU 1a	Stato limite ultimo persistente	Costruzione	1.5	1.15	1.0
SLU 1b	Stato limite ultimo persistente	Lungo termine	1.5	1.15	0.85
SLU 2 (malta secondaria)	Stato limite ultimo accidentale	Costruzione	1.2	1.0	1.0
SLU 3 (terremoto)	Stato limite ultimo accidentale	Lungo termine	1.2	1.0	0.85



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

SLU 4* (fuoco)	Stato limite ultimo accidentale	Lungo termine	1.2	1.0	0.85
-------------------	---------------------------------------	---------------	-----	-----	------

*Sezione ridotta e resistenza dell'acciaio ridotta.

Di seguito sono mostrati i diagrammi di interazione risultanti per le sollecitazioni di progetto delle combinazioni di carico. Gli schemi mostrati si riferiscono ad un elemento di lunghezza 1,5 m.

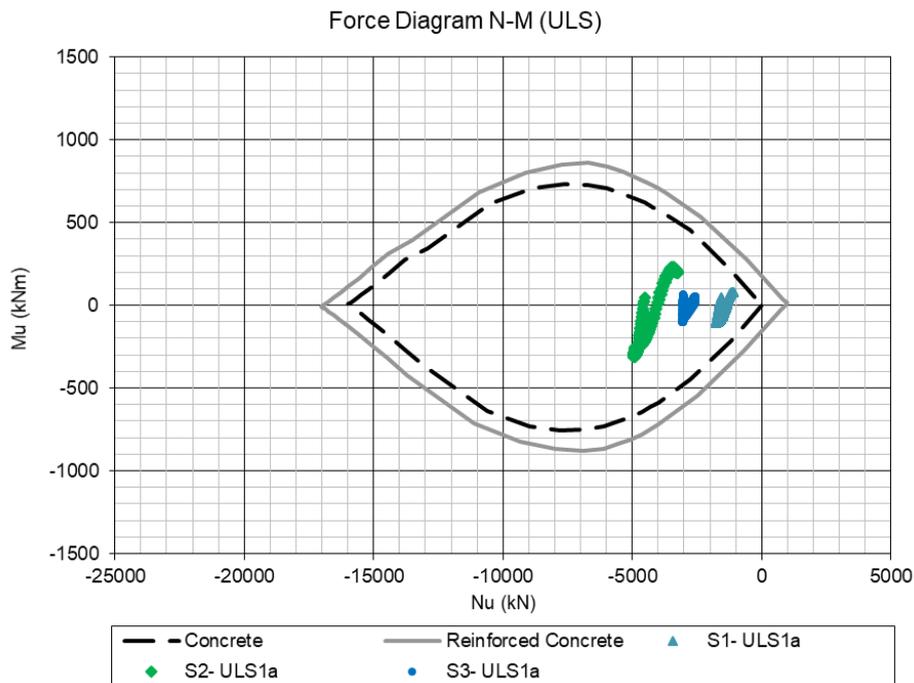


Figura 18. Diagramma di interazione SLU1a per le tre sezioni di calcolo

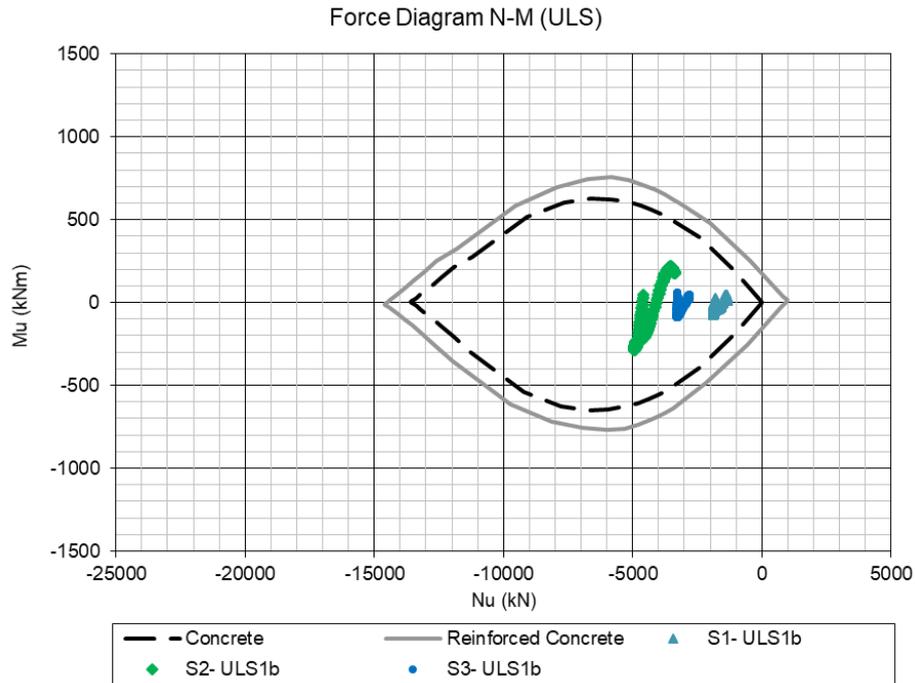


Figura 19. Diagramma di interazione SLU1b per le tre sezioni di calcolo

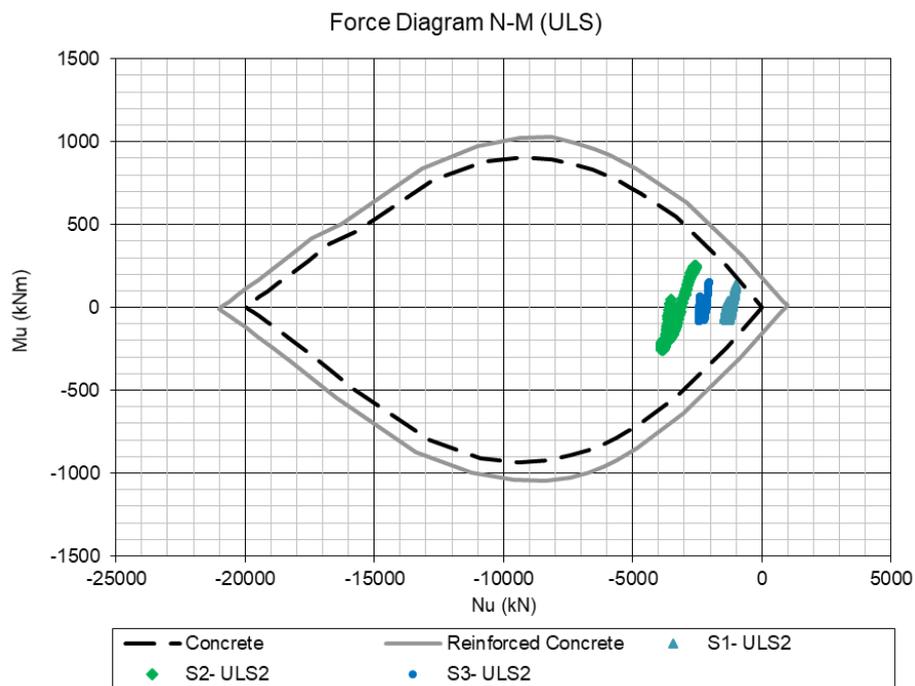


Figura 20. Diagramma di interazione SLU2 per le tre sezioni di calcolo

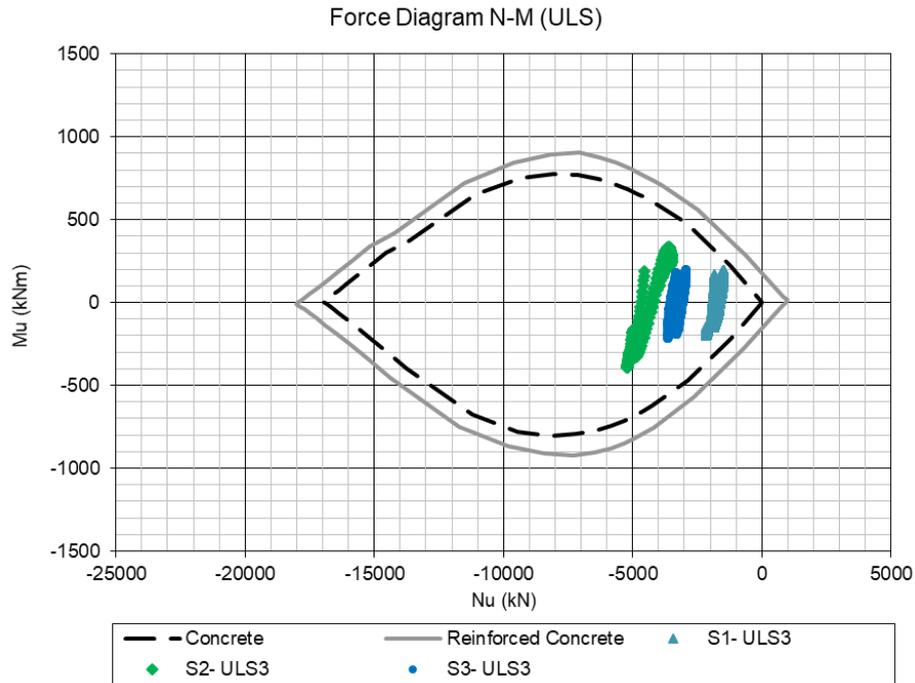


Figura 21. Diagramma di interazione SLU3 per le tre sezioni di calcolo

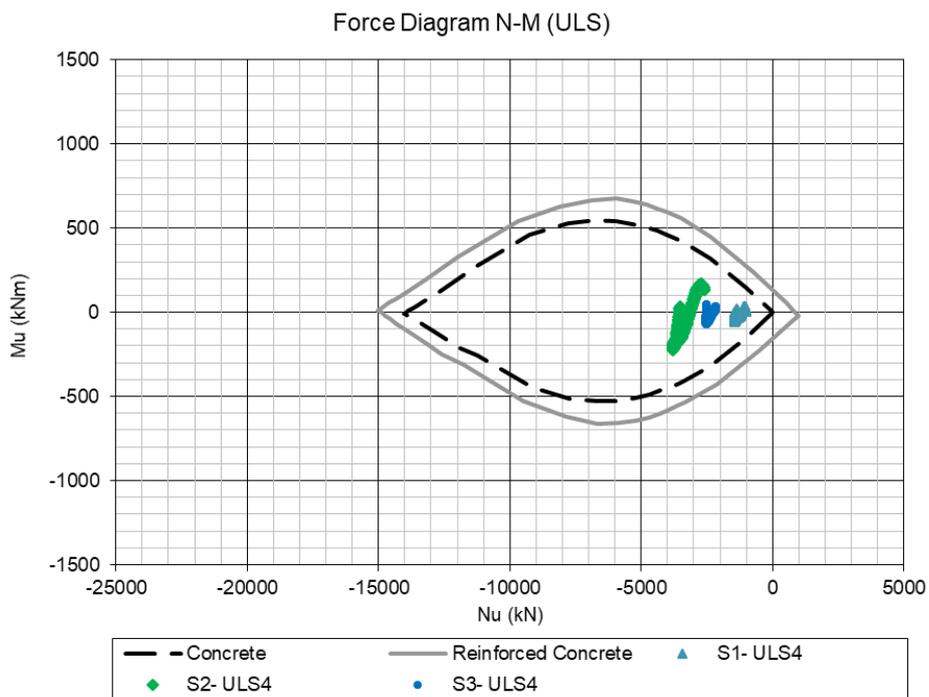


Figura 22. Diagramma di interazione SLU4 per le tre sezioni di calcolo

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Il rivestimento proposto viene quindi verificato a SLU per la condizione di flesso-compressione.

6.4.6 SLU: Verifica del taglio

La sezione dell'elemento deve resistere alla seguente forza di taglio massima di progetto in concomitanza con una forza assiale. Per gli elementi assimilabili ad una lastra (dove è possibile la redistribuzione trasversale dei carichi) e secondo EC2 6.2.1 [3], non è necessario disporre di un rinforzo trasversale minimo. L'armatura a taglio verrà eliminata se non viene verificata la seguente condizione:

$$V_u = \left(\frac{0.18}{\gamma_c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + 0.15 \sigma_{cp} \right) b_w d > V_d$$

Tabella 19. Verifica del taglio

	SLU1a	SLU1b	SLU2	SLU3	SLU4	
γ_c = coefficiente di sicurezza parziale per il calcestruzzo	1,5	1,5	1,2	1,2	1,2	-
k = fattore che considera gli effetti scala = $1+(200/d)^{0,5}$	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	-
d = altezza utile della sezione	344	344	344	344	274	mm
ρ_l = rapporto di armatura per quella longitudinale = A_{st}/A_c	0,0022	0,0022	0,0022	0,0022	0,0027	-
A_{st} = Area dell'armatura longitudinale	1130	1130	1130	1130	1130	mm
f_{ck} = resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo	40	40	40	40	40	MPa
b_w = larghezza minima della sezione in zona tesa	1500	1500	1500	1500	1500	mm
σ_{cp} = tensione media agente sulla sezione	-8,96	-9,01	-6,99	-8,94	-8,46	MPa
V_d (Condizione sfavorevole)	177	174	145	228	134	kN
N_d	-4623	-4651	-3605	-4615	-3478	kN
V_u	917	921	820	971	774	kN

Il rivestimento proposto viene quindi verificato a taglio allo SLU.

6.4.7 SLS Fessurazione

La verifica di fessurazione viene eseguita tenendo conto della condizione di momento flettente equivalente massimo, calcolata per la combinazione di carico SLS.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Anello standard C40/50, armatura principale = 10Φ12

Tabella 20. Verifica fessurazione

	SLS1a	SLS1b	
Nk	-3794	-3799	kN
Mk	241	222	kNm
σ	-0.30	-0.78	MPa

Considerando che la sezione sia compressa nella sua totalità, la sezione stessa e il rivestimento proposto sono verificati a fessurazione SLS.

6.4.8 SLS Stato tensionale

Si considereranno i limiti imposti dalle NTC 2018 [1] sulle tensioni di compressione nel calcestruzzo per combinazione di carico quasi permanente:

$$\sigma_c < 0.45f_{ck} \text{ (calcestruzzo armato)}$$

$$5215/1500/400 = 8,7 \text{ MPa} < 0,45 \times 40 = 18 \text{ MPa}$$

Per l'acciaio invece vale la limitazione sotto riportata.

$$\sigma_s < 0,80f_{yk} \text{ (acciaio di armatura)}$$

$$242 \text{ MPa} < 0,80 \times 450 = 360 \text{ MPa (dalla verifica dei giunti radiali, vedi capitolo 6.5)}$$

6.4.9 SLS Deformazioni dell'anello

Le deformazioni dell'anello sotto carico sono sintetizzate nel seguito; essendo tutti abbondantemente sotto lo 0,5% si ritengono accettabili.

Va sottolineato però che tale comportamento sarà raggiungibile solo nella misura in cui il riempimento del vuoto anulare sarà eseguito in maniera tempestiva ed efficace.

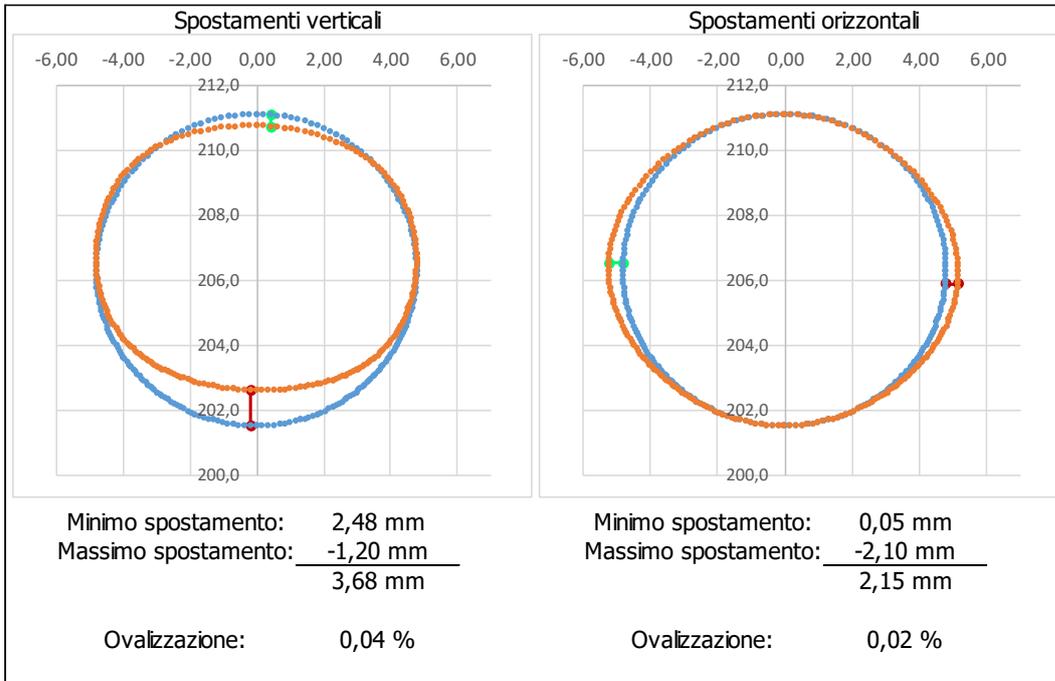


Figura 23. Sezione 1 - SLS1a Deformazione diametrale

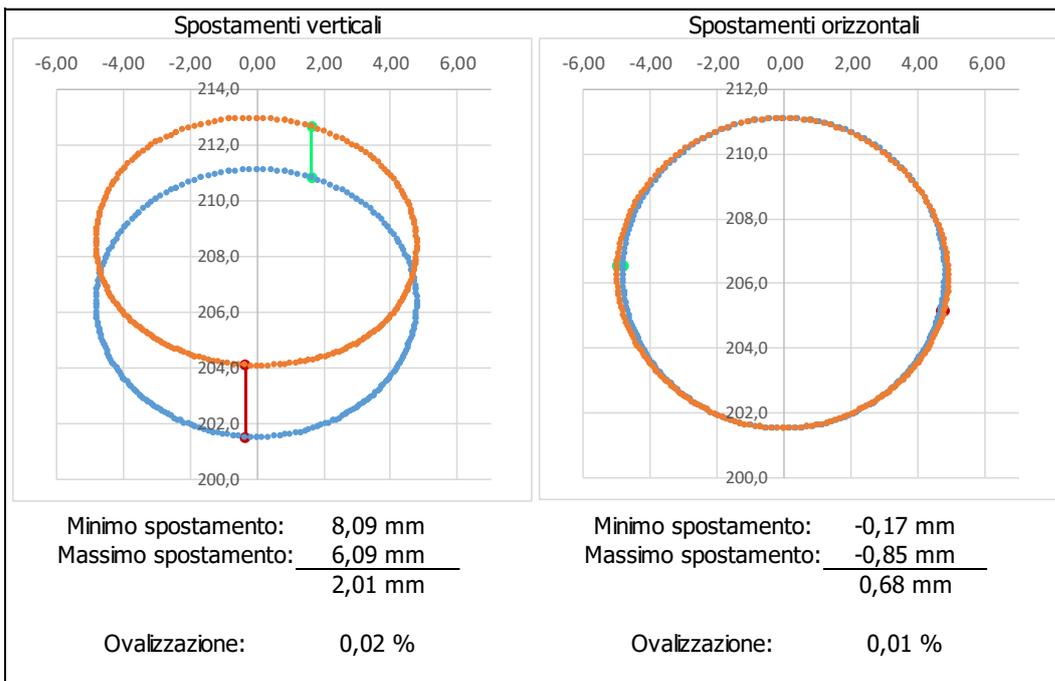




Figura 24. Sezione 1 - SLS1b Deformazione diametrale

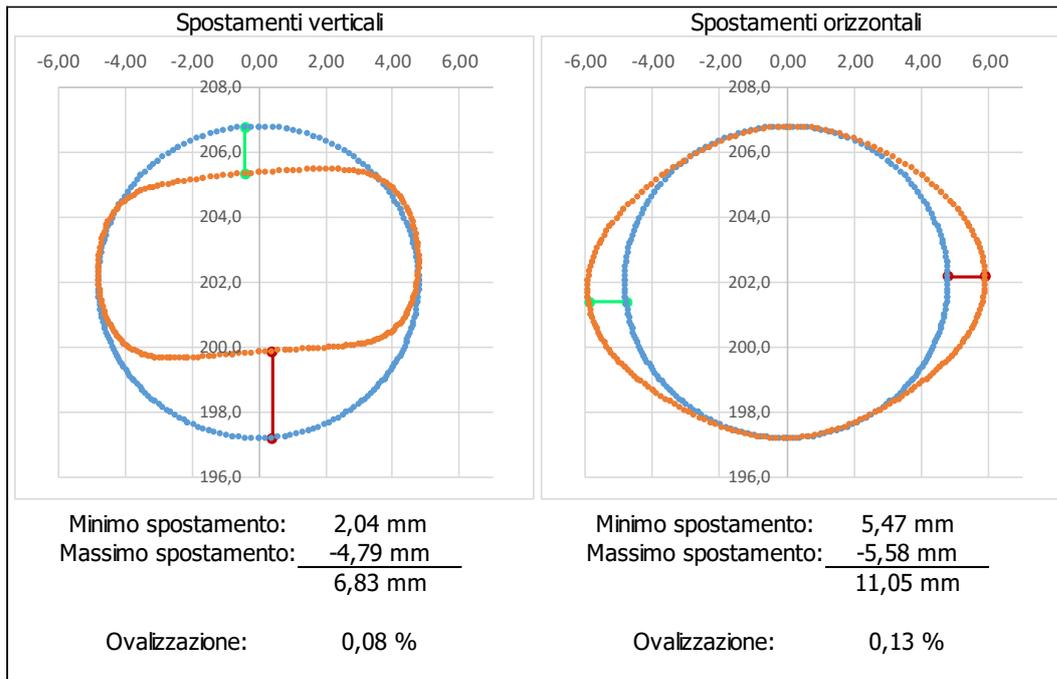


Figura 25. Sezione 2 - SLS1a Deformazione diametrale

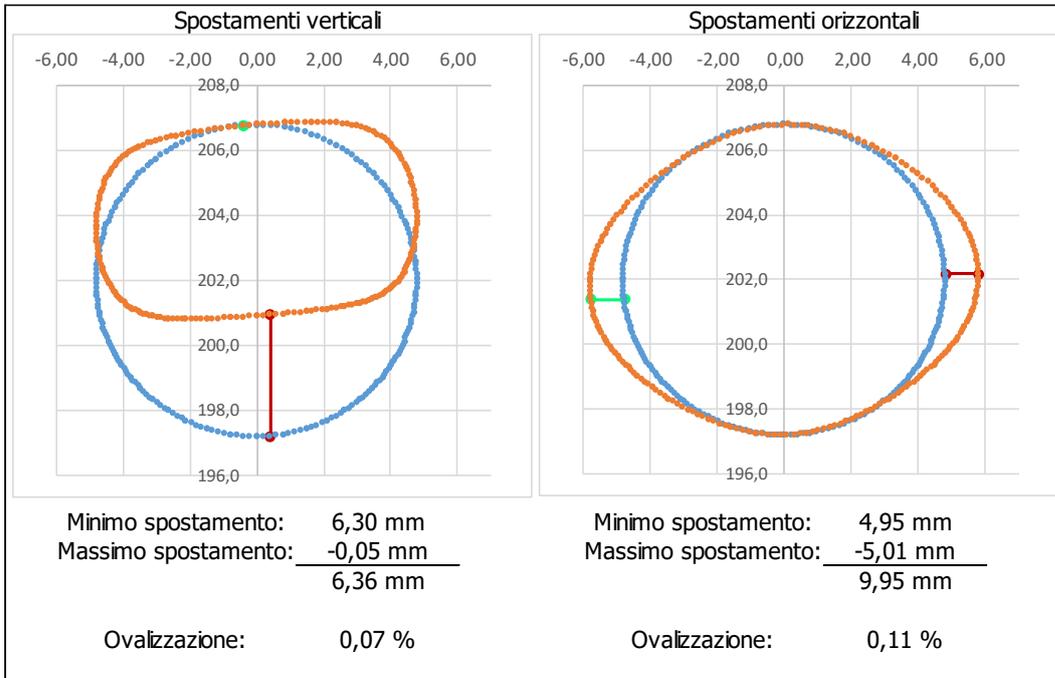


Figura 26. Sezione 2 - SLS1b Deformazione diametrale

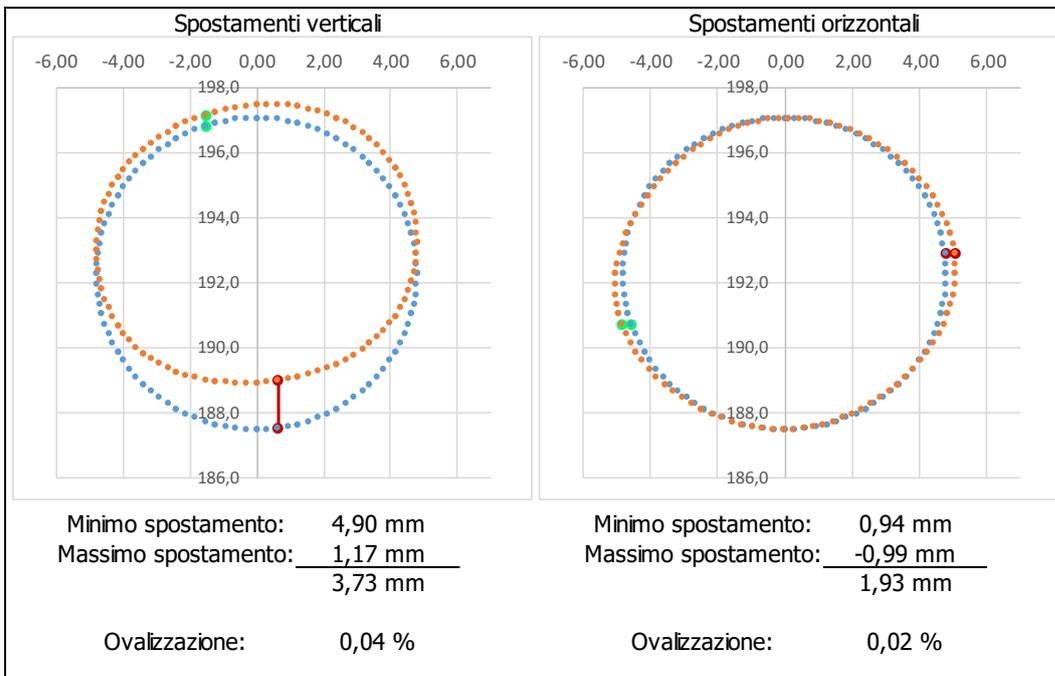


Figura 27. Sezione 3 - SLS1a Deformazione diametrale

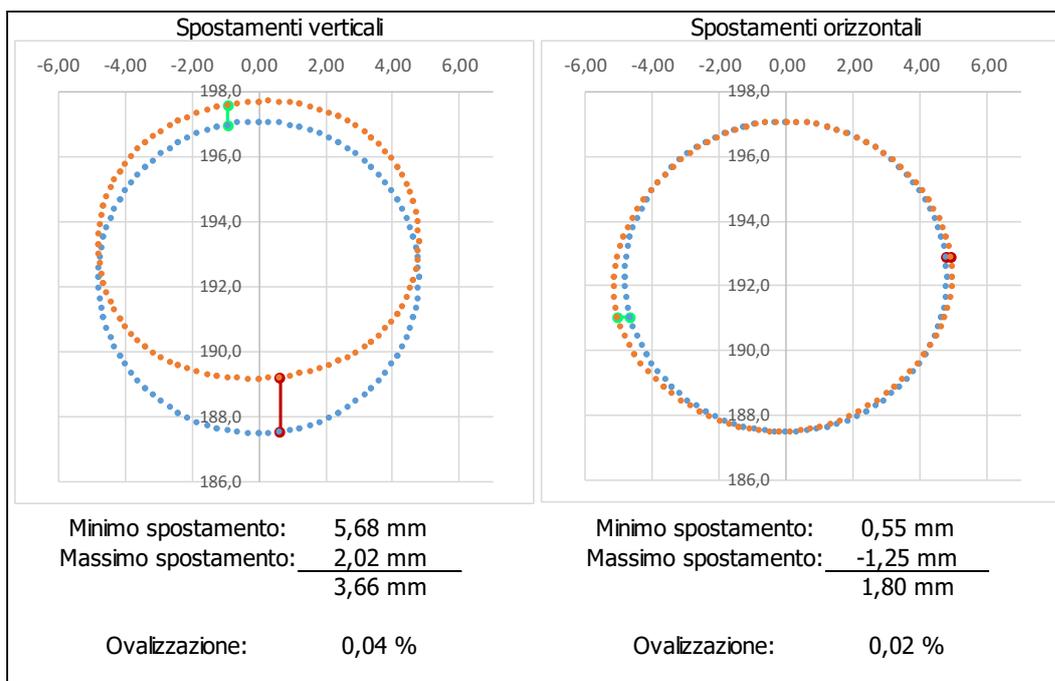


Figura 28. Sezione 3 - SLS1b Deformazione diametrale

Tabella 21. Risultati dei modelli – Deformazione dell'anello

Sez.	Deformazione diametrale (mm)		Ovalizzazione (%)	
	SLS1a	SLS1b	SLS1a	SLS1b
1 - verticali	3,68 mm	2,01 mm	0,04%	0,02%
1- orizzontali	2,15 mm	0,68 mm	0,02%	0,01%
2 - verticali	6,83 mm	6,36 mm	0,08%	0,07%
2- orizzontali	11,05 mm	9,95 mm	0,13%	0,11%
3 - verticali	3,73 mm	3,66 mm	0,04%	0,04%
3- orizzontali	1,93 mm	1,80 mm	0,02%	0,02%

Deformazione diametrale = massima riduzione/aumento di diametro

Ovalizzazione = deformazione diametrale / diametro interno nominale (%)



6.5 Verifica strutturale del giunto radiale

I giunti radiali rappresentano il contatto tra i conci adiacenti appartenenti allo stesso anello ed hanno la funzione di trasferire gli sforzi tra le parti adiacenti del rivestimento.

Le verifiche in oggetto riguardano due possibili tipi di SLU:

- SLU di schiacciamento del cls;
- SLU effetto "bursting".

Le forze più critiche corrispondono al massimo sforzo normale e momento flettente; come in 6.3.9:

- Sforza normale massimo e momento negativo massimo: $N_{d,max} = 5215 \text{ kN}$, $M_{dj,max} = 187 \text{ kNm}$, eccentricità = 36 mm
- Momento positivo massimo: $N_{d,conc} = 4342 \text{ kN}$, $M_{dj,max} = 194 \text{ kNm}$, eccentricity = 45 mm

6.5.1 Schiacciamento del cls.

Il massimo sforzo di compressione è calcolato secondo la seguente formula (Eurocodice 2 [5]):

$$F_{Rdu} = A_{c0} f_{cd} \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 0.3 A_{c0} f_{cd}$$

Dove: f_{cd} resistenza di progetto del calcestruzzo

A_{c0} è l'area di contatto

A_{c1} è l'area proiettata baricentrica con A_{c0} delimitata dal bordo della sezione

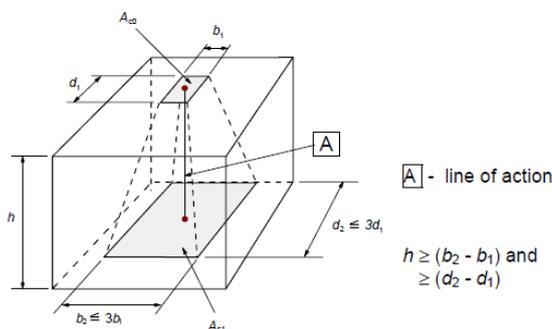


Figura 29. Distribuzione per le aree parzialmente caricate

L'area di contatto e l'area di progetto della sezione sono mostrate in dettaglio nella figura seguente:

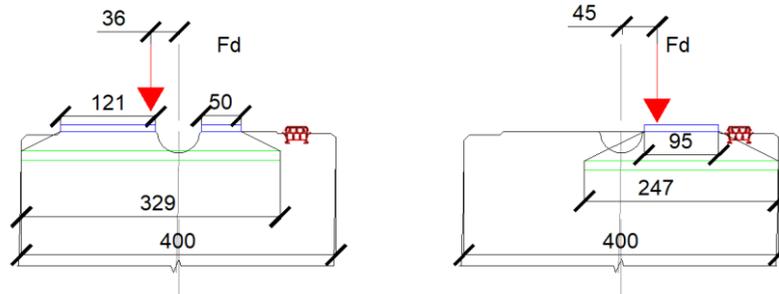


Figura 30. Area di contatto giunto longitudinale

Tabella 22. Massimo sforzo di compressione

Caso	N_d (kN)	b_0	L_0	A_{c0} (mm ²)	b_1	L_1	A_{c1} (mm ²)	f_{cd} (MPa)	Fattore materiale	F_{Rdu} (kN)	F_{max} (kN)
N_{max} M_{max-}	5215	171	1400	239400	329	1500	493500	40	1,76	7791	19152
M_{max+}	4342	95	1400	133000	247	1500	370500	40	1,76	5032	10640

Il massimo sforzo di compressione è verificato: $F_{Rdu} > N_d$. L'eccentricità "e" è data dal rapporto fra M_d e N_d per una data coppia di sollecitazioni agenti.

6.5.2 Effetto Bursting

L'effetto bursting riguarda la formazione di tensioni di trazione a seguito dei forti sforzi assiali applicati su aree ridotte di elementi in calcestruzzo. Normalmente le trazioni massime si riscontrano ad una distanza dalla superficie del giunto pari alla metà dello spessore del conchio.

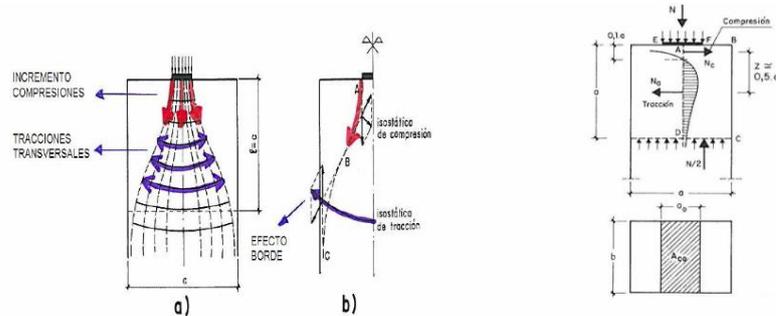


Figura 31. Effetto Bursting



Il calcolo della massima tensione lungo il giunto radiale dovuto all'effetto bursting è eseguito modellando il giunto del concio con il software SAP2000 attraverso un'analisi agli elementi finiti bidimensionale. Per la simulazione del giunto è stata utilizzato un elemento "shell", con una mesh $10 \times 10 \text{ mm}^2$. Le forze di progetto sono state applicate al modello come forze verticali lungo l'area di contatto del giunto radiale, per simulare gli sforzi trasmessi dai conci adiacenti. I risultati dell'analisi sono mostrati nella seguente figura dove sono riportate le tensioni orizzontali.

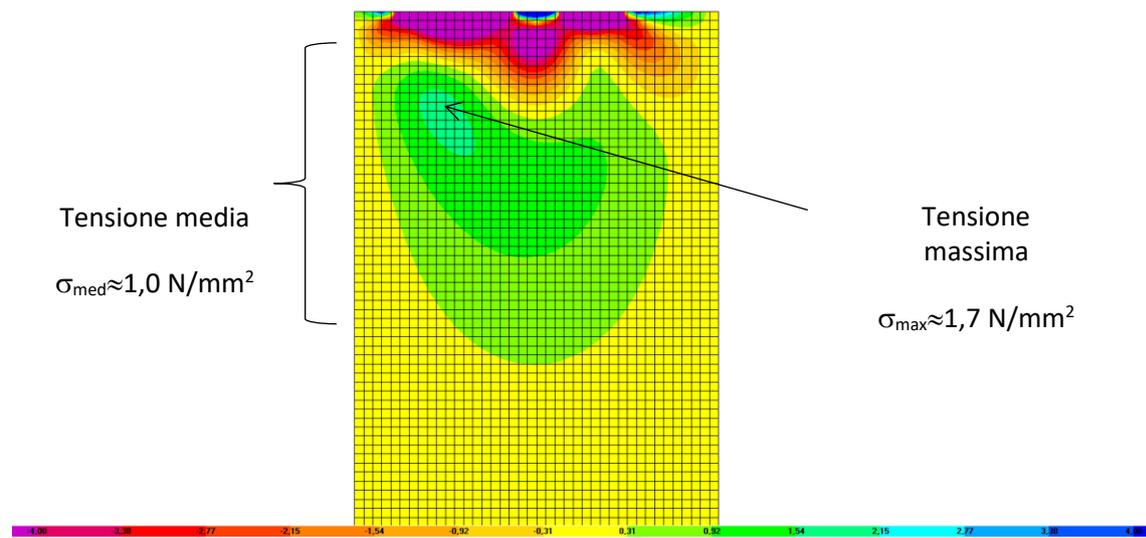


Figura 32. Tensioni orizzontali (N/mm²) – caso a

$$\sigma_{med} = 1,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{profondità} = 280 \text{ mm}$$

$$T_d = 1,0 \cdot 280 \cdot 1400 = 392 \text{ kN}$$

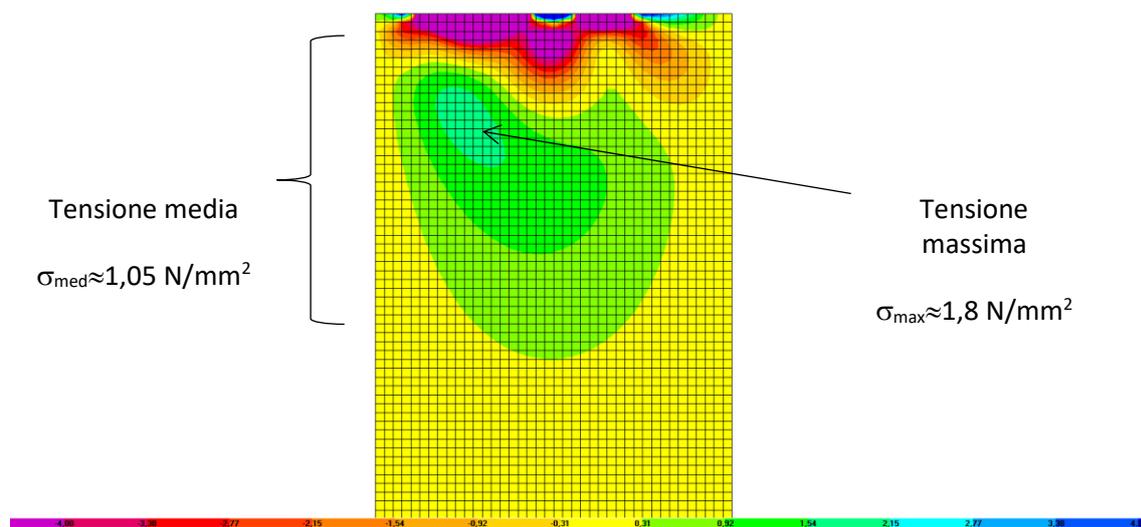


Figura 33. Tensioni orizzontali (N/mm²) – caso b

$$\sigma_{ave} = 1,05 \text{ N/mm}^2$$

profondità = 280 mm

$$T_d = 1,05 \cdot 280 \cdot 1400 = 411 \text{ kN}$$

Considerando che la massimo forza di trazione è pari a $T_d = 411 \text{ kN}$, il minimo rinforzo necessario è:

$$A_{burst,min} = T_d / f_{yd} = 1052 \text{ mm}^2$$

Quindi, nell'anello, i giunti radiali sono rinforzati con 10 staffe $\Phi 10$ (equivalenti a 1570 mm^2 considerando entrambi i bracci).

6.6 Forze temporanee

Per le verifiche dettagliate, vengono prese in considerazione le forze temporanee durante le fasi di scasseratura/ montaggio, movimentazione, trasporto e stoccaggio.

I supporti per le fasi di movimentazione, trasporto e stoccaggio saranno distribuiti ad una distanza ottimale tra loro di 2,24 m, e si tiene conto anche di un'eccentricità accidentale dei conci impilati sopra il primo pari a $e = 0,20 \text{ m}$ per considerare il possibile disallineamento dei supporti.

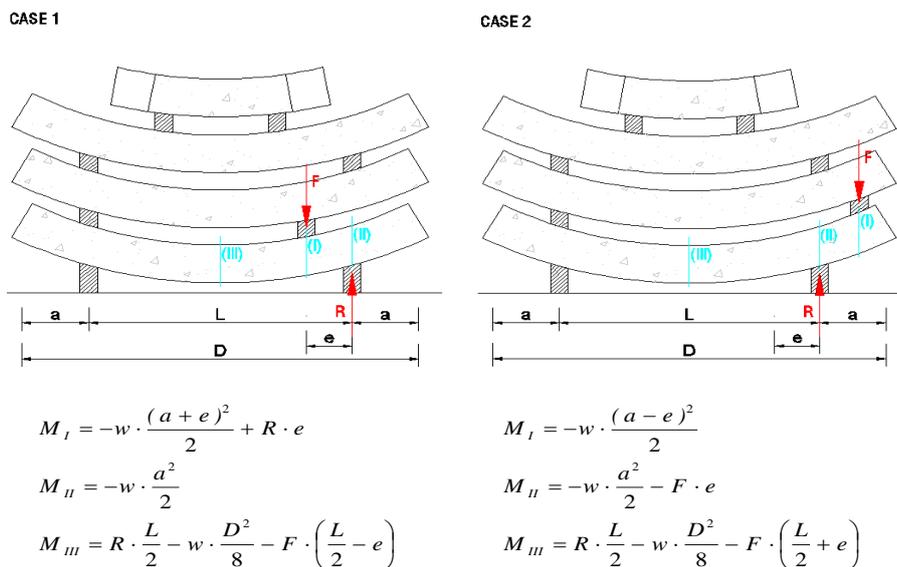


Figura 34. Modello strutturale considerato per stati di movimentazione, trasporto e accatastamento

Nella tabella che segue le condizioni temporanee sono descritte unitamente al calcolo dei momenti flettenti equivalenti e delle forze di taglio:

Tabella 23. Forze temporanee

Calcestruzzo	Fasi	Geometria	Schema	Mk (kNm)	Md (kNm)	Vd (kN)
Calcestruzzo fresco (15 MPa)	Scasseratura (γL=1,3, γD=1,5)	a= 1,0 m L = 1,82 m		11,6	15,08	30,2
Calcestruzzo fresco (15 MPa)	Movimentazione (γL=1,3, γD=1,5)	L = 1,7 m		13,1	17,0	32,0



Calcestruzzo fresco (15 MPa)	Primo stoccaggio ($\gamma_L=1,3$, $\gamma_D=1,5$)	$L = 2,24$ m $e = 0,2$ m		10,8	14,0	61,0
Calcestruzzo (25 MPa)	Movimentazione ($\gamma_L=1,3$, $\gamma_D=1,5$)	$L = 1,8$ m $e = 0,42$ m		30,5	39,6	88,13
Calcestruzzo (25 MPa)	Stoccaggio ($\gamma_L=1,3$)	$L = 2,24$ m $e = 0,2$ m		42,3	55,0	265,9
Calcestruzzo (25 MPa)	Trasporto ($\gamma_L=1,3$, $\gamma_D=1,5$)	$L = 2,3$ m $e = 0,23$ m		39,2	51,0	207,6

Le fasi di scasso e movimentazione sono verificate considerando il calcestruzzo fresco, con una resistenza caratteristica di almeno 15 MPa. Le fasi di movimentazione, stoccaggio e trasporto vengono verificate considerando una resistenza caratteristica di 25 MPa.

6.6.1 Massima capacità di flessione

La capacità di resistenza a flessione dei conci è:

$$M_u (15 \text{ MPa}) = 169 \text{ kNm}$$

$$M_u (25 \text{ MPa}) = 175 \text{ kNm}$$



Pertanto, essendo tutti i valori M_d riportati nella tabella precedente inferiori a M_u la verifica è soddisfatta.

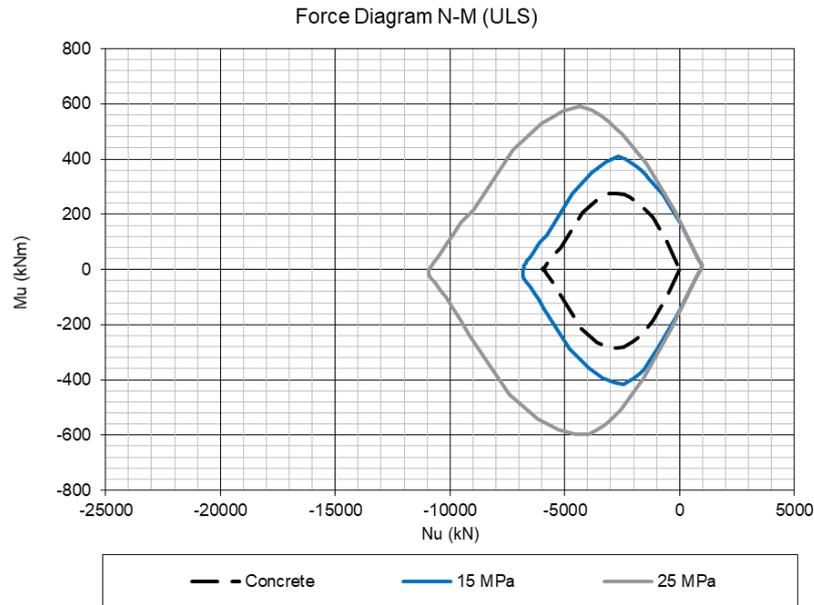


Figura 35. Capacità a flessione dei segmenti

6.6.2 Massima capacità di taglio

La resistenza al taglio per le fasi temporanee è calcolata secondo [1] al punto 4.1.2.3.5.1 e secondo il capitolo 6.2.2 of EN 1992-1-1. I simboli impiegati sono gli stessi già illustrati al punto 6.4.6.

$$V_u = \left(\frac{0.18}{\gamma_c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} \frac{2d}{a_v} + 0.15 \sigma_{cp} \right) b_w d$$

$$\gamma_c = 1,5$$

$$k = 1 + (200/d)^{0,5}$$

$$d = 344 \text{ mm}$$

$$\rho_l = A_{st}/A_c$$

$$B_w = 1500 \text{ mm}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

$$\sigma_{cp} = N_{d,conc}/A_c = 0 \text{ MPa}$$

$$av = \text{eccentricità del carico} = 200 \text{ mm}$$

$$V_u (15 \text{ MPa}) = 556 \text{ kN}$$

$$V_u (25 \text{ MPa}) = 658 \text{ kN}$$

Pertanto, tutti i valori V_d ottenuti nei capitoli precedenti sono inferiori a V_u .

6.6.3 Momento di prima fessurazione

Il momento di prima fessurazione per le fasi temporanee può essere calcolato come segue:

$$M_{cr} = f_{ctk} \cdot \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$f_{ctk} (15 \text{ MPa}) = 1,27 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk} (25 \text{ MPa}) = 1,80 \text{ MPa}$$

$$b = 1,50 \text{ m}$$

$$h = 0,40 \text{ m}$$

$$M_{cr} (15 \text{ MPa}) = 50,8 \text{ kNm}$$

$$M_{cr} (25 \text{ MPa}) = 72,0 \text{ kNm}$$

Pertanto, tutti i valori M_k ottenuti nei capitoli precedenti sono inferiori a M_{cr} .

Con il rinforzo proposto e la classe di calcestruzzo, la sezione dei conci viene verificata in tutti i casi di carico temporaneo, poiché tutte le forze temporanee mostrate in Tabella 22 sono inferiori alla capacità massima di flessione, taglio e rottura, ed inoltre non si contempla alcuna apertura di fessure.

6.7 Verifica strutturale dei giunti longitudinali

I giunti longitudinali (giunti tra due anelli adiacenti) sono soggetti in fase costruttiva alla spinta dei martinetti idraulici per consentire l'avanzamento della macchina e quindi si generano in questo modo sollecitazioni che possono essere molto onerose per i conci.

Nella tabella che segue vengono indicate le caratteristiche della macchina.



Tabella 24. Caratteristiche della spinta della TBM

Caratteristica	Valore
Spinta massima TBM	82000 kN (stima)
Numero di martinetti	22
Eccentricità in caso di spinta in esercizio	+/- 30 mm
Lunghezza della piastra	750 mm

6.7.1 Direzione radiale

Concettualmente le verifiche sono le medesime sviluppate per il giunto radiale, quindi è necessario eseguire la verifica a compressione massima e la verifica di resistenza all'effetto bursting.

Massimo sforzo di compressione

Il massimo sforzo di compressione è calcolato utilizzando la seguente formula dell'EC2 [5]:

$$F_{Rdu} = A_{c0} f_{cd} \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 0.3 A_{c0} f_{cd}$$

Dove: f_{cd} è la resistenza di progetto del calcestruzzo

A_{c0} è l'area di contatto

A_{c1} è l'area di progetto della sezione

L'area di contatto e l'area di progetto della sezione sono mostrate in dettaglio nella figura seguente:

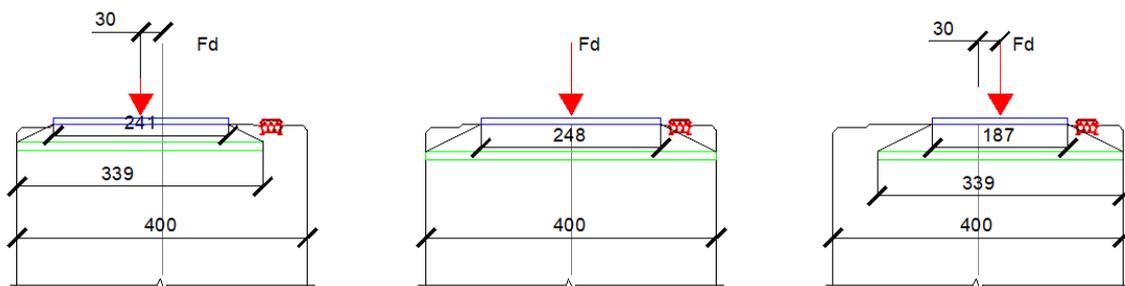


Figura 36. Giunti longitudinali



Tabella 25. Massimo sforzo di spinta

F_{max} (kN)	e(mm)	b_0	L_0	A_{c0} (mm ²)	b_1	L_1	A_{c1} (mm ²)	f_{cd} (MPa)	Fattore materiale	F_{rdU} (kN)	F_{max} (kN)
3727	30	241	750	180750	339	848	287472	40	1,5	6079	14460
3727	0	248	750	186000	400	902	360800	40	1,5	6908	14880
3727	-30	187	750	140250	339	902	305778	40	1,5	5522	11220

Il massimo sforzo di compressione è verificato $F_{Rdu} > F_{max}$; la verifica è ampiamente soddisfatta.

Effetto Bursting

Il calcolo della massima tensione lungo il giunto circonferenziale, dovuto all'effetto bursting, è eseguito modellando il giunto del concio con il software SAP2000 attraverso un'analisi agli elementi finiti. Per la simulazione del giunto è stata utilizzata un elemento "shell" lungo 0,75 m, con una mesh 10x10 mm². Le forze di progetto ($F_{max} = 3727$ kN) sono state applicate al modello come forze verticali lungo l'area di contatto del giunto circonferenziale per simulare la spinta di avanzamento. È stata considerata poi anche un'eccentricità accidentale di 30 mm nelle due direzioni per contemplare il caso del concio in calotta ed in arco rovescio.

I risultati dell'analisi sono mostrati nelle seguenti figure dove sono riportate le tensioni orizzontali:

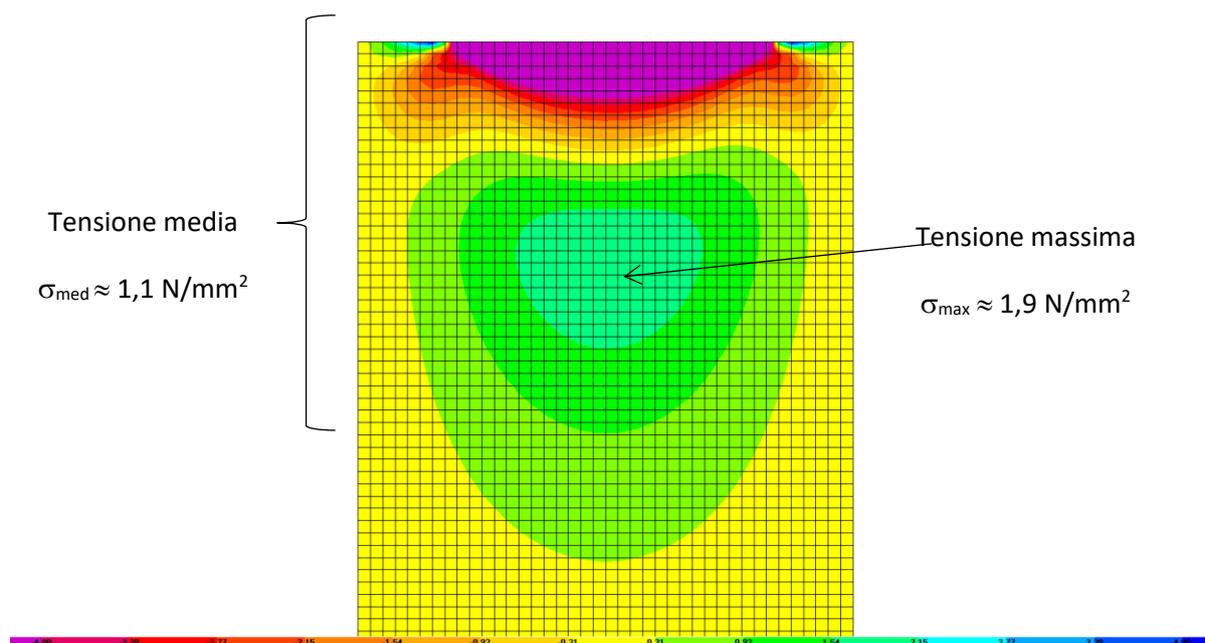


Figura 37. Tensioni orizzontali (N/mm²) – eccentricità 0 mm

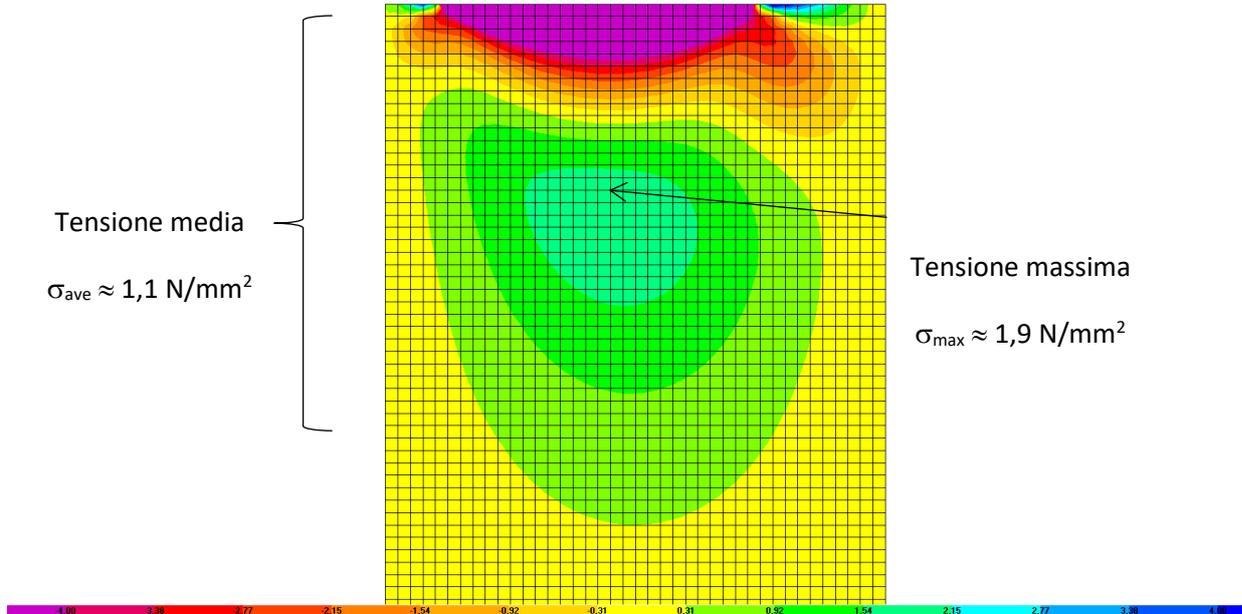


Figura 38. Tensioni orizzontali (N/mm²) – eccentricità -30 mm

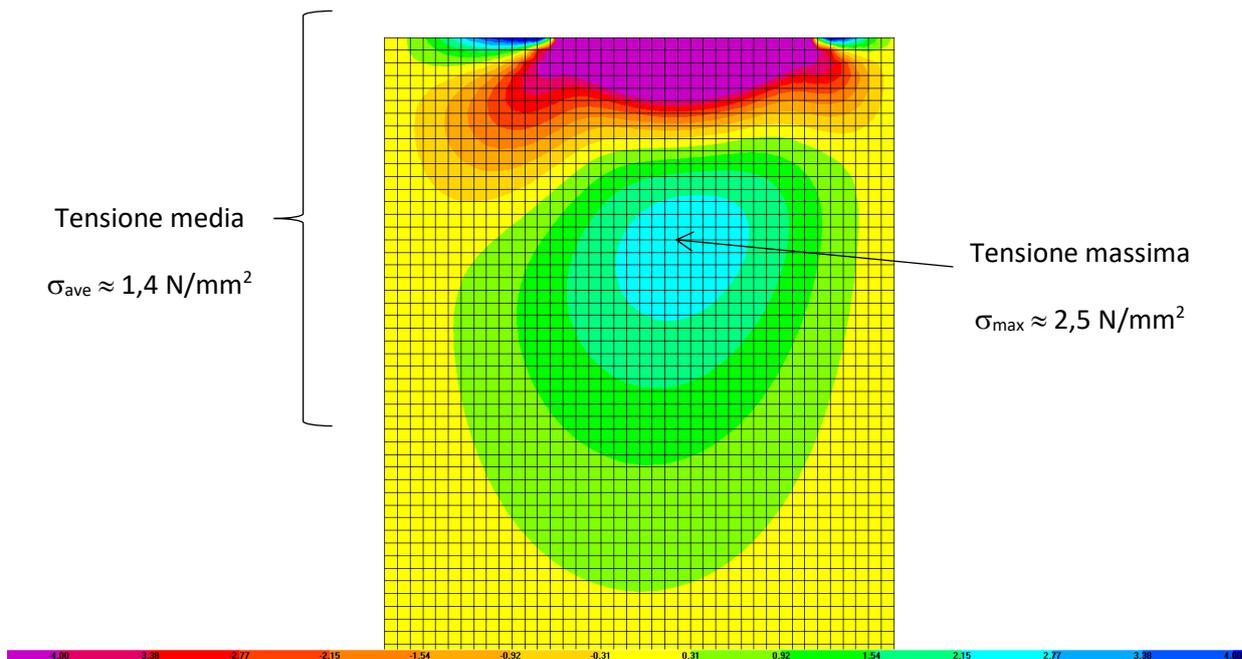


Figura 39. Tensioni orizzontali (N/mm²) – eccentricità +30 mm

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Lo sforzo di trazione, che nasce a causa della spinta di avanzamento del martinetto, per il caso più sfavorevole, è calcolato come segue:

$$T_d = 320 \cdot 750 \cdot 1,4 = 336 \text{ kN}$$

Zona in trazione = 340 mm

Tensione di trazione media = 1,4 N/mm²

Larghezza del martinetto = 750 mm

Considerando che la massima forza di trazione è pari a $T_d = 336 \text{ kN}$, la minima armatura resistente è:

$$A_{s,min} = T_d / f_{yd} = 882 \text{ mm}^2$$

$$f_{yd} = 391 \text{ N/mm}^2$$

L'area di rinforzo necessario è pari a 859 mm², distribuita sotto ogni scarpa dei martinetti; valore raggiunto con $\varnothing 12/180 \text{ mm}$ (942 mm²) lungo il giunto circonferenziale.

6.7.2 Direzione circonferenziale

Il comportamento circonferenziale durante la fase di avanzamento è modellato con il software SAP2000 attraverso un'analisi 2D agli elementi finiti. Le tensioni di trazioni nascono tra le impronte di contatto delle scarpe dei martinetti e al disotto dell'area di compressione dell'impronta di contatto martinetto-concio.

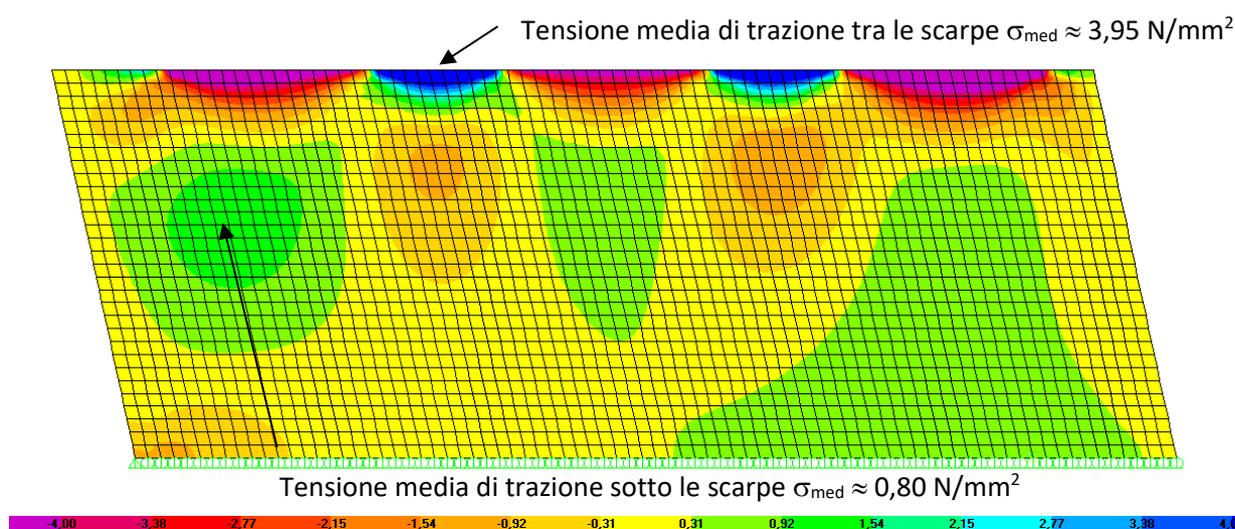


Figura 40. Spinta massima – Tensione orizzontale dovuta alla spinta dei martinetti (N/mm²)

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Lo sforzo di trazione tra le scarpe, che nasce a causa della spinta di avanzamento del martinetto, è calcolato come segue:

$$T_d = 150 \cdot 400 \cdot 3,95 = 237 \text{ kN}$$

Zona in trazione = 150 mm

Tensione di trazione media = 3,95 N/mm²

Spessore concio = 400 mm

$$A_{s,min} = T_d / f_{yd} = 606 \text{ mm}^2$$

$$f_{yd} = 391 \text{ N/mm}^2$$

Le armature di 4 ø 12 + 2 ø 12 ($A_s = 678 \text{ mm}^2$) devono essere inserite lungo 150 cm di altezza.

Lo sforzo di trazione sotto le scarpe, che nasce a causa della spinta di avanzamento del martinetto, è calcolato come segue:

$$T_d = 750 \cdot 400 \cdot 0,80 = 240 \text{ kN}$$

Zona in trazione = 750 mm

Tensione di trazione media = 0,80 N/mm²

Spessore concio = 400 mm

$$A_{s,min} = T_d / f_{yd} = 613 \text{ mm}^2$$

$$f_{yd} = 391 \text{ N/mm}^2$$

Almeno 6 ø 12 ($A_s = 678 \text{ mm}^2$) devono essere inseriti lungo i 750 cm di altezza (questa quantità di rinforzo è quella già contemplata per soddisfare le verifiche strutturali dei conci che sono sotto l'effetto dei carichi geotecnici non concomitanti con la spinta dei martinetti).

7. TENUTA DELLE GUARNIZIONI

7.1 Verifica della tenuta idraulica

Per quanto attiene la verifica della guarnizione, si assumono 2,3 bar (1,9 bar + 0,45 bar per lungo termine) in calotta pari a 3,2 bar in arco rovescio.

L'impermeabilità della galleria è assicurata dalla presenza di una coppia di guarnizioni affacciate su ogni giunto tra conci in prossimità dell'estradosso.



Al fine di garantire la tenuta idraulica richiesta, indentificata a lungo termine in 3,2 bar, si propone l'impiego di una guarnizione ancorata in EPDM tipo FAMA modello UG066B o equivalente, avente larghezza di 26 mm.

La verifica dell'adeguatezza della guarnizione viene condotta controllando che ad un tempo pari alla vita utile dell'opera (100 anni) la tenuta sia garantita al netto delle tolleranze d'installazione ammesse.

Nella fattispecie, si assume un gap (apertura del giunto) di 5 mm ed un off-set (disassamento guarnizioni) di 10 mm.

Assumendo una vita utile della struttura di 100 anni è necessario considerare il rilassamento delle guarnizioni in tale periodo con un coefficiente di rilassamento pari al 50%. Nel caso in esame, la pressione idraulica massima prevista 3,2 bar viene ricondotta a lungo termine ad una pressione pari a 6,4 bar, proprio in virtù del fenomeno del rilassamento.

Nella figura che segue è riportato il diagramma tenuta idraulica - apertura giunto per la guarnizione proposta.

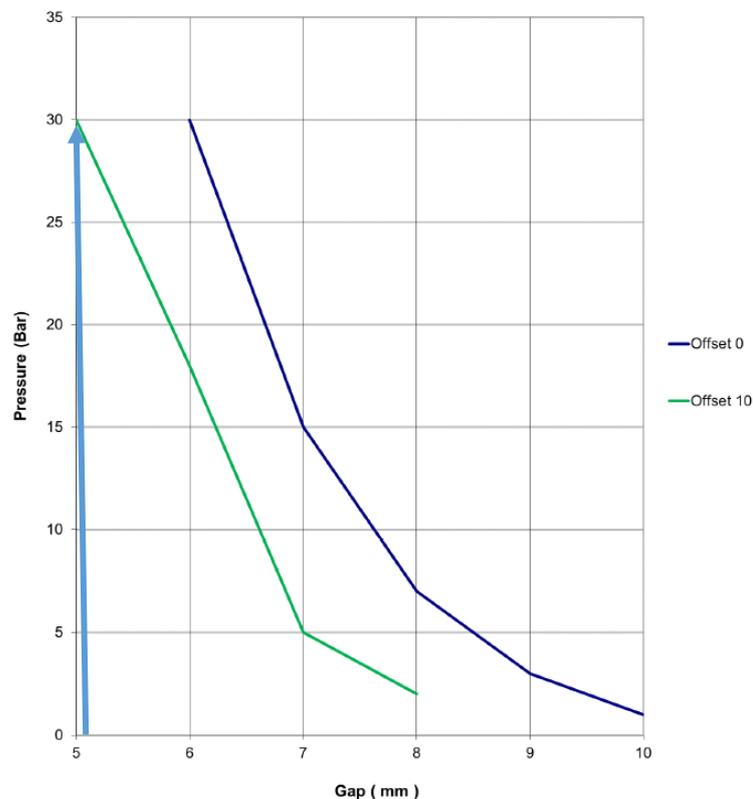


Figura 41. Grafico di tenuta della guarnizione proposta



Si può osservare come la tenuta idraulica risulti essere garantita anche per un offset di 10 mm ed un gap di 5 mm (30 bar) e pertanto si conferma che tale dispositivo garantisce una tenuta idraulica compatibile con i carichi idrostatici di progetto.

A completamento delle caratteristiche tecniche della guarnizione vi è anche il grafico carico-apertura giunto per la guarnizione prescelta utile per la verifica della forza di serraggio necessaria trasmessa ai connettori.

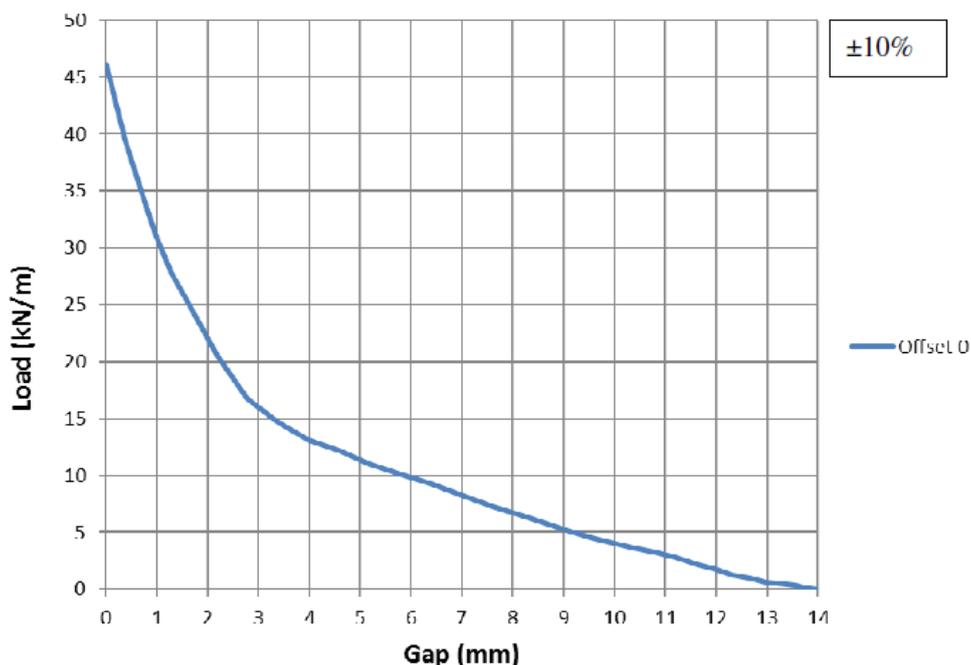


Figura 42. Grafico di carico-apertura giunto della guarnizione proposta

7.2 Verifica delle forze indotte dalla guarnizione

La guarnizione quando compressa esercita una forza sul calcestruzzo sottostante per cui è necessario condurre specifiche verifiche.

A causa della ridistribuzione di queste tensioni nei conci si manifesta trasversalmente una tensione di trazione.

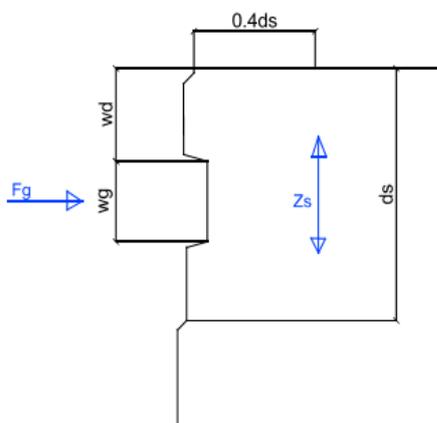


Figura 43. Forze delle guarnizioni inducono tensioni trasversali

Le forze di esercizio delle guarnizioni inducono tensioni trasversali nelle guarnizioni stesse. La verifica relativa, è condotta come segue:

$$Z_s = 0,25 F_g (1 - w_g/d_s) = 9,36 \text{ kN/m}$$

Dove:

$$F_g = 50,6 \text{ kN/m (valore massimo di carico per la guarnizione con +10\%)}$$

$$w_g = 26 \text{ mm}$$

$$d_s = 100 \text{ mm}$$

La verifica viene eseguita a livello tensionale assumendo la tensione massima agente ad una distanza pari a $0,4d_s$ (assunzione conservativa), come indicato nel seguito:

$$\sigma_{ct,d} = Z_s / (0,4d_s) = 0,23 \text{ MPa (tensione trasversale agente)}$$

$$f_{ctd} = f_{ctm} / \gamma_c = 3,68 \text{ MPa (con } \gamma_c = 1,5)$$

La verifica è soddisfatta risultando $\sigma_{ct,d} < f_{ctd}$.

Inoltre, è necessario che venga comprovato che la forza di taglio del calcestruzzo non armato dei conci non superi i valori ammissibili.

La massima forza di compressione è pari a $F_g = 50,6 \text{ kN/m}$.

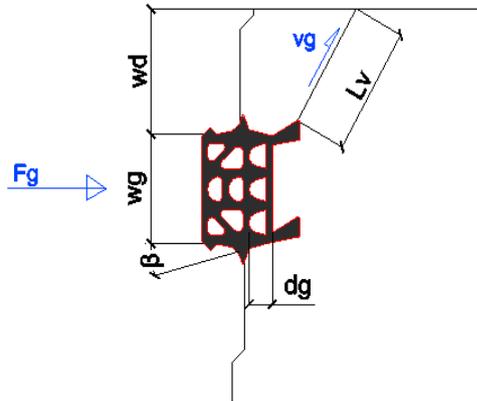


Figura 44. Forze di taglio delle guarnizioni

Nel nostro caso, il conchio è caratterizzato da una classe di resistenza del calcestruzzo C40/50 per il quale la tensione di rottura a taglio è pari a:

$$v_g = F_h / L_v = 0,340 \text{ MPa}$$

Dove:

$$F_h = 12,58 \text{ kN/m (taglio agente sulla faccia inclinata della sede della guarnizione)}$$

$$L_v = 36,2 \text{ mm (lunghezza della superficie di taglio)}$$

La resistenza a taglio del calcestruzzo vale $v_n = 0,035 \cdot 21,5 \cdot f_{ck0,5} / \gamma_c = 0,382 \text{ MPa}$ (con $\gamma_c=1,5$).

La verifica è soddisfatta risultando $v_g < v_n$.

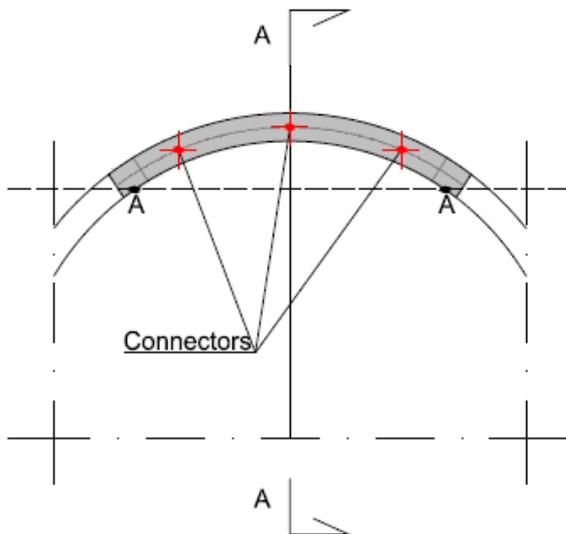
8. VERIFICA DEI CONNETTORI

8.1 Condizione Accidentale in fase d'installazione

La condizione analizzata è un caso di carico accidentale che corrisponde ad una configurazione rara perché rappresenta un'improbabile retrazione dei cilindri di spinta della TBM che, in linea di principio, non è consentita dal software di controllo del montaggio dell'anello. In questo caso i connettori devono garantire di essere in grado di resistere ad una configurazione a mensola in cui il conchio è soggetto al peso proprio.



Frontal view



Section A-A

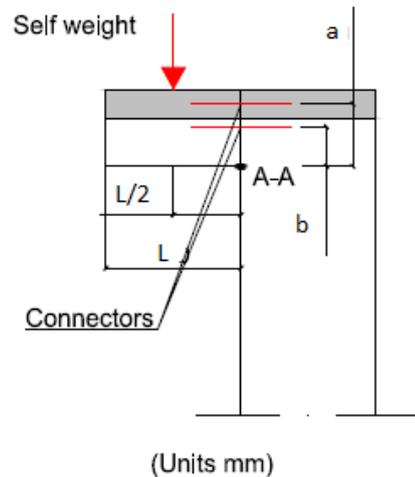


Figura 45. Condizione a mensola

Peso del concio (SW) = 30,84 kN

Fattore dinamico assunto pari a 1,5

Essendo il carico eccezionale il fattore moltiplicativo dei carichi è mantenuto pari a 1,0

La forza di progetto è dunque pari a $V_d = 46,27$ kN

Il concio è mantenuto da 3 connettori, quindi il taglio per ogni connettore è pari a $F_v = 15,42$ kN

La forza massima orizzontale di estrazione a cui deve resistere il connettore è calcolata considerando l'equilibrio rotazionale. Essendo:

$$L = 1,5 \text{ m}$$

$$a = 0,628$$

$$b = 0,394$$

La forza di estrazione risultante vale per i connettori nelle due posizioni A e B:

$$A = 30,92 \text{ kN (centrale)}$$

$$B = 19,4 \text{ kN (laterale)}$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

La verifica dei connettori proposti è soddisfatta, perchè imponendo un fattore di sicurezza di 1,25 sui dati di targa del medesimo si ottiene:

Verifica a estrazione: $RPO = 200 / 1,25 = 160 \text{ kN} > A$

Verifica al taglio: $RS = 250 / 1,25 = 200 \text{ kN} > F_v$

8.2 Tensione nel connettore dovuta alla forza di reazione delle guarnizioni sul giunto circonferenziale

Quando le guarnizioni sono completamente compresse e breve termine, senza off-set la loro massima forza di reazione è pari a 46 kN/m.

Ogni connettore deve reggere al carico derivato dalla forza al metro per la lunghezza di sua competenza (1/22 della circonferenza nella posizione della guarnizione) che è pari a 33,5 kN. Ci sarà una minima apertura del giunto dovuta alla forza elastica della coppia di guarnizione che a sua volta farà calare la forza fino ad un punto di equilibrio. Lo spostamento all'equilibrio è di circa 1 mm, il quale è considerato accettabile essendo inferiore al massimo gap consentito di 5 mm.

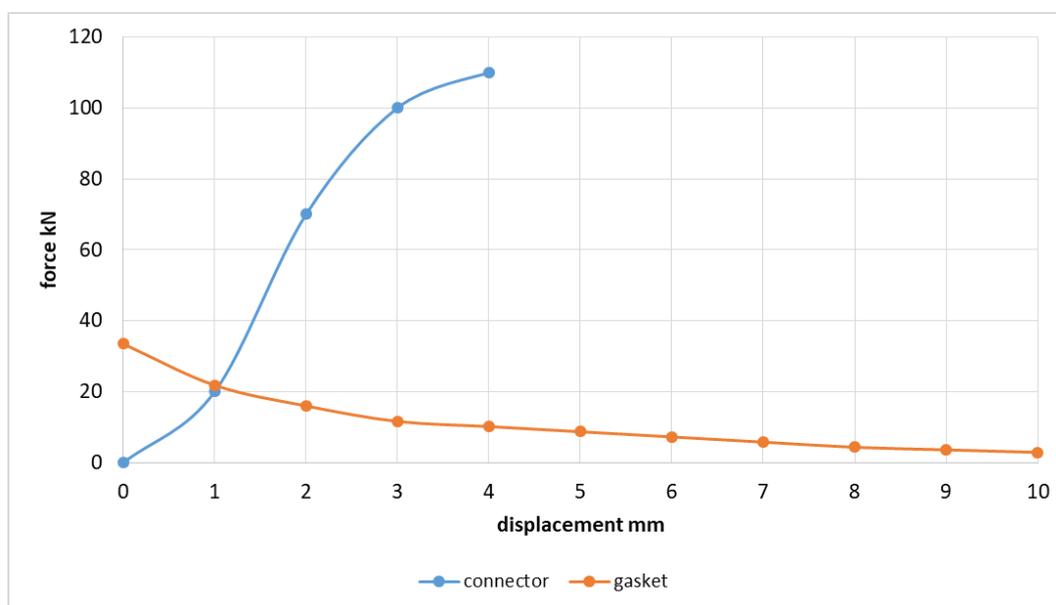


Figura 46. Connettore – guarnizione “pull-out” equilibrio



8.3 Tensione del connettore dovuta alla compressione delle guarnizioni nel giunto radiale

I connettori si verificano anche al taglio dovuto alla forza di compressione della guarnizione sul giunto longitudinale come da schema della figura che segue.

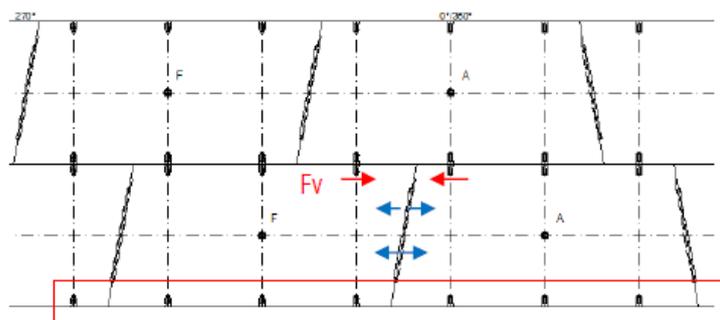


Figura 47. Azione di taglio dovuta alla forza di guarnizione

La guarnizione esercita una forza dovuta alla sua massima reazione per la lunghezza del giunto che complessivamente è pari a 35,27 kN.

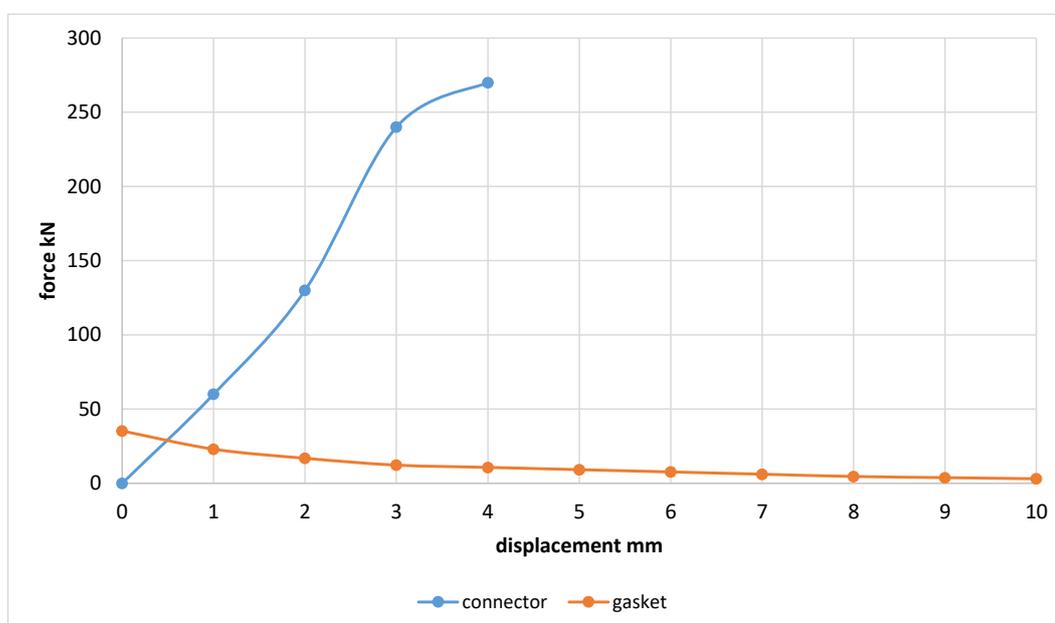


Figura 48. Connettore – guarnizione "taglio" equilibrio

Lo spostamento all'equilibrio è di circa 0,5 mm, il quale è considerato accettabile essendo inferiore a 5 mm.



9. VERIFICA AL GALLEGGIAMENTO

Un condotto, come qualsiasi altra struttura interrata, è soggetto ad una forza di sollevamento secondo il principio di Archimede, il cui effetto potrebbe essere tale da far muovere il condotto verso l'alto, specialmente in presenza di basso sovraccarico o terreno particolarmente debole.

I condotti sotto il livello delle acque sotterranee sono oggetti strutturali soggetti quindi al fenomeno del galleggiamento. Può essere determinato se un condotto galleggerà o affonderà utilizzando i principi di base della fisica. Essenzialmente un oggetto non galleggia se la somma delle forze verticali verso il basso (gravitazionali e di attrito) è maggiore della forza verticale verso l'alto (galleggiamento). Applicando questo principio ad una condotta al di sotto della falda si può dire che, se la spinta idrostatica è maggiore della somma delle forze agenti verso il basso (la massa della struttura e di tutti gli elementi in essa contenuti, la massa del terreno sopra la condotta e le forze di attrito che si sviluppano nella colonna di terra sopra il condotto) allora il condotto galleggerà, sollevando il terreno sopra di esso.

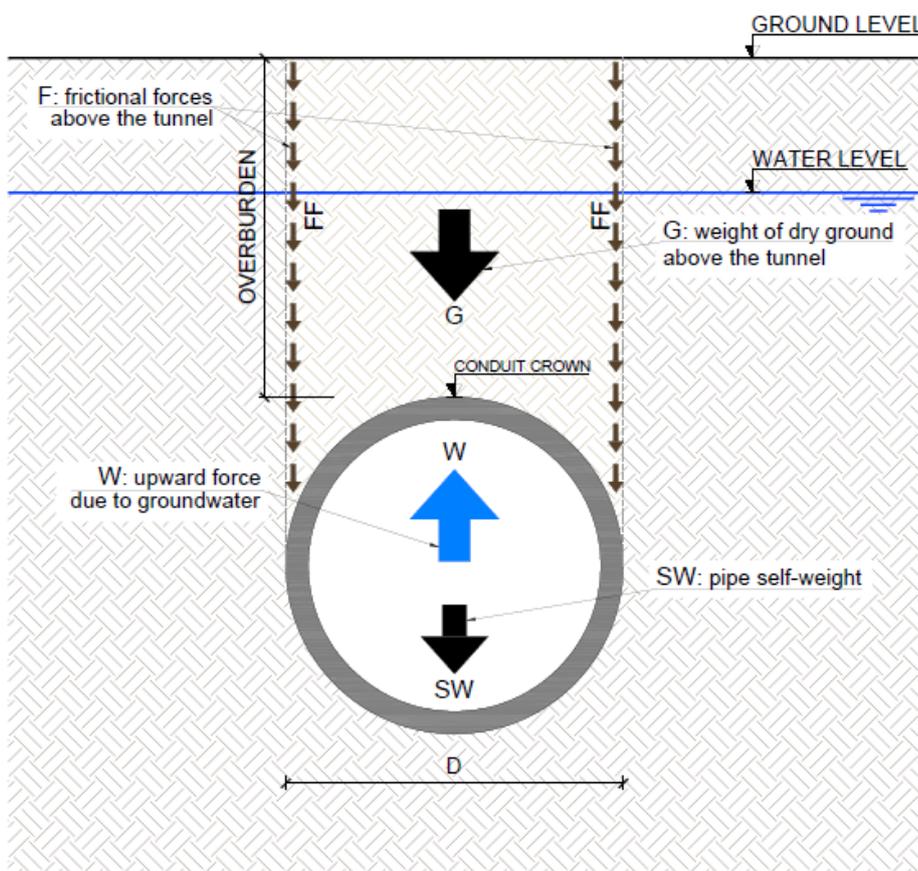


Figura 49. Forze che agiscono su un condotto per il controllo del galleggiamento

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

La figura soprastante mostra tutte le forze che agiscono sul condotto per verificare il suo galleggiamento.

Queste forze sono:

- Forze sfavorevoli: Forza verso l'alto dovuta alle acque sotterranee (W).
- Forze favorevoli: Forze verso il basso sul condotto: Peso proprio anello (SW); peso della colonna di terra agente sopra il condotto (G); forze di attrito sopra il condotto (FF). Il peso delle strutture interne non è stato considerato in questa verifica.

Secondo l'Eurocodice 7, le forze favorevoli sono ridotte del fattore parziale 0,9.

Il fattore parziale per le forze sfavorevoli è 1,0. Tuttavia, come misura di sicurezza aggiuntiva è comune considerare il valore 1,2.

L'equilibrio tra queste forze può essere espresso adottando la seguente formulazione considerando un fattore di sicurezza contro l'assetto:

$$FS = \frac{\text{Forze favorevoli} \cdot 0,9}{\text{Forze sfavorevoli} \cdot 1,2} = \frac{(SW + G + FF) \cdot 0,9}{W \cdot 1,2}$$

Come assunzione ulteriormente conservativa spesso impiegata, si trascura l'azione favorevole delle forze di attrito sopra il condotto (FF = 0).

La verifica al galleggiamento della galleria è condotta nei tratti critici di minima copertura (PK 10+487), massima copertura (PK 8+940) e sotto il passaggio del fiume Dopa Riparia (PK 9+965).

9.1.1 Forza verso l'alto dovuta alle acque sotterranee (W)

Per ottenere la spinta idrostatica sulla galleria si calcola il volume del tubo per metro, ovvero l'area della sezione e si moltiplica per la densità del fluido in cui è immersa la galleria, ovvero l'acqua:

$$W = \gamma_w \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

Dove:

- W: forza verso l'alto dovuta alle acque sotterranee (kN/m);
- γ_w : densità acqua (kN/m³);
- D: diametro esterno della galleria (m).

Questa forza sfavorevole viene moltiplicata per il fattore di sicurezza di 1,2.

9.1.2 Peso proprio dell'anello (SW)

Per il calcolo del peso proprio del tubo si adotta la densità del calcestruzzo armato (25 kN/m³).

$$SW = \gamma_c \cdot \pi \cdot D_{axis} \cdot sp$$

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Dove:

- SW: peso proprio dell'anello (kN/m);
- γ_c : densità calcestruzzo (kN/m³);
- D_{axis} : diametro all'asse dell'anello;
- sp: spessore dell'anello (m).

Questa forza favorevole viene moltiplicata per il fattore di sicurezza di 0,9.

9.1.3 Peso del terreno sopra il condotto (G)

Questa forza è calcolata come il volume per metro lineare della colonna di terreno sopra il condotto, moltiplicato per la densità effettiva del terreno. Il peso del terreno sopra il livello della falda acquifera è ottenuto dalla densità totale del terreno.

$$G = [(\gamma - \gamma_w) \cdot h_1 + \gamma \cdot h_2] \cdot D$$

Dove:

- G: peso del terreno sopra il condotto (kN/m);
- γ : densità terreno (kN/m³);
- γ_w : densità acqua (kN/m³);
- h_1 : copertura satura (m);
- h_2 : copertura insatura (m);
- D: diametro esterno del condotto (m).

Questa forza favorevole viene moltiplicata per il fattore di sicurezza di 0,9.

9.2 Verifica al galleggiamento

Le 3 sezioni critiche sono state analizzate rispetto al galleggiamento, tenendo conto dei seguenti casi:

- Falda 1,5 m sopra il livello trovato nello studio del 2018;
- Falda 4,5 m sopra il livello trovato nello studio del 2018 (caso eccezionale).

Rispetto alla densità del terreno e secondo i materiali trovati sopra la galleria (vedere Figura 9, Figura 10 e Figura 11), si può considerare una densità di 19 kN/m³ che corrisponde ai materiali U1, U2, U3 e U4 per il calcolo della forza favorevole G.

Nella tabella seguente sono riportati i parametri considerati, le forze ottenute e la verifica del coefficiente di sicurezza FS (maggiore di 1,2).

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Tabella 26. Risultati verifica galleggiabilità (falda + 1,5 m)

PK	Piano campagna	Falda	Quota arco rovescio	Quota corona estradosso	Diametro interno galleria	Densità suolo	k_0	W (sfav.)	SW (fav.)	G (fav.)	FS (>1,2)
(m)	(m slm)	(m slm)	(m slm)	(m slm)	(m)	(kN/m ³)		(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	
10+487	224,23	216,50	201,90	211,10	8,80	19,00	0,41	868,59	260,12	1688,86	2,24
8+490	235,17	221,10	197,58	206,78	8,80	19,00	0,41	868,59	260,12	3423,25	4,24
9+965	216,90	217,50	187,86	197,06	8,80	19,00	0,53	868,59	260,12	1542,76	2,08

Tabella 27. Risultati verifica galleggiabilità (falda + 4,5 m)

PK	Piano campagna	Falda	Quota arco rovescio	Quota corona estradosso	Diametro interno galleria	Densità suolo	k_0	W (sfav.)	SW (fav.)	G (fav.)	FS (>1,2)
(m)	(m slm)	(m slm)	(m slm)	(m slm)	(m)	(kN/m ³)		(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	
10+487	224,23	219,50	201,90	211,10	8,80	19,00	0,41	868,59	260,12	1429,66	1,95
8+490	235,17	224,10	197,58	206,78	8,80	19,00	0,41	868,59	260,12	3164,05	3,94
9+965	216,90	220,50	187,86	197,06	8,80	19,00	0,53	868,59	260,12	1542,76	2,08

I casi più critici corrispondono alla sezione 1 (copertura minima, PK 10+487) e alla sezione 3 (passaggio sotto il fiume, PK 9+965). Si osserva inoltre che maggiore è la quota della falda minore è ovviamente il fattore di sicurezza (questo non è apprezzato nella sezione 3 perché la falda freatica è sempre al di sopra del piano di campagna e non influisce sulla densità effettiva del terreno).

In tutti i casi analizzati, il fattore di sicurezza è maggiore di 1,2. Pertanto, la verifica al galleggiamento è soddisfatta.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

10. PIANO DI MONITORAGGIO

Nel tratto oggetto della presente relazione esistono numerose pre-esistenze che interferiscono con la nuova linea 2 perciò il monitoraggio sia della galleria sia degli edifici/ infrastrutture è di vitale importanza.

Si distinguono i monitoraggi relativi alla galleria e quelli relativi agli edifici e strutture in genere.

Per quanto attiene la galleria si individuano tre tipologie di sezioni:

- Sezione Corrente (SC) che ha lo scopo di monitorare gli spostamenti dell’anello di rivestimento in conci;
- Sezione Principale Tipo A (SP_A) costituita dalla SC integrata con misure di deformazione nel terreno e misure del livello piezometrico,
- Sezione Principale Tipo B (SP_B) costituita dalla SP_A integrata con misure di carico e misure tensio-deformative sul rivestimento in conci prefabbricati.

Le sezioni SC hanno una cadenza regolare di circa 25m, mentre le sezioni SP sono localizzate laddove ritenuto più utile al controllo delle interferenze indotte, specie a ridosso delle strutture presenti in zona e in prossimità delle stazioni.

Per quanto attiene gli edifici, essi sono tipicamente a più piani e questi vengono monitorati con misure di spostamento (anche con livellazioni di precisione), vibrometri e fessurimetri.

Lungo la tratta esistono diverse opere infrastrutturali come i binari della stazione Porta Nuova e la galleria della Linea 1 per cui si prevede il controllo degli spostamenti e delle vibrazioni, così come di eventuali fessure.

In merito ai fessurimetri, essi saranno individuati in numero e posizione appena prima dell’avvio della costruzione a seguito di sopralluoghi mirati.

Gli schemi proposti e la localizzazione degli strumenti sono indicati negli elaborati grafici MTL2T1A2DPRCG00T003, MTL2T1A2DPRCG00T004 e MTL2T1A2DPRCG00T005 a cui si rimanda.

Come buona prassi il monitoraggio dovrà essere gestito in un’ottica di analisi e gestione del rischio e pertanto in sede di Progettazione Esecutiva dovranno essere definite le soglie di attenzione ed allarme in base ai risultati dei calcoli sviluppati nell’ultima fase di Progetto. Indicativamente si ritiene opportuno utilizzare percentuali del 70% e 100% dei valori nominali di calcolo rispettivamente per la soglia di attenzione ed allarme.

Nel caso in cui venga raggiunta la prima soglia le letture di monitoraggio verranno intensificate mentre, al raggiungimento della seconda, verranno attivate le contromisure che il Progetto Esecutivo dovrà definire.

La frequenza delle letture dovrà avere almeno la cadenza indicata nella tabella che segue.

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

Tabella 10-1 Frequenza letture di monitoraggio

Stato della costruzione		Frequenza
Durante la realizzazione dei consolidamenti		1 lettura/giorno
Dopo il termine dei consolidamenti e prima dell'avvio degli scavi		1 lettura/settimana
Durante lo scavo della galleria in funzione della posizione del fronte di avanzamento		
Anti il fronte (m)	Dietro il fronte (m)	
d>50	-	2 letture iniziali
10<d<50	-	1 lettura/giorno
d<10	-	2 letture/giorno
-	d<10	2 letture/giorno
-	10<d<50	1 lettura/2 giorni
-	d>50	1 lettura/settimana fino a stabilizzazione



ALLEGATO N.1: RISULTATI DEL MODELLO PLAXIS 2D

10.1 Forza assiale, momento e forza di taglio (Sezione 1 – PK 10+487)

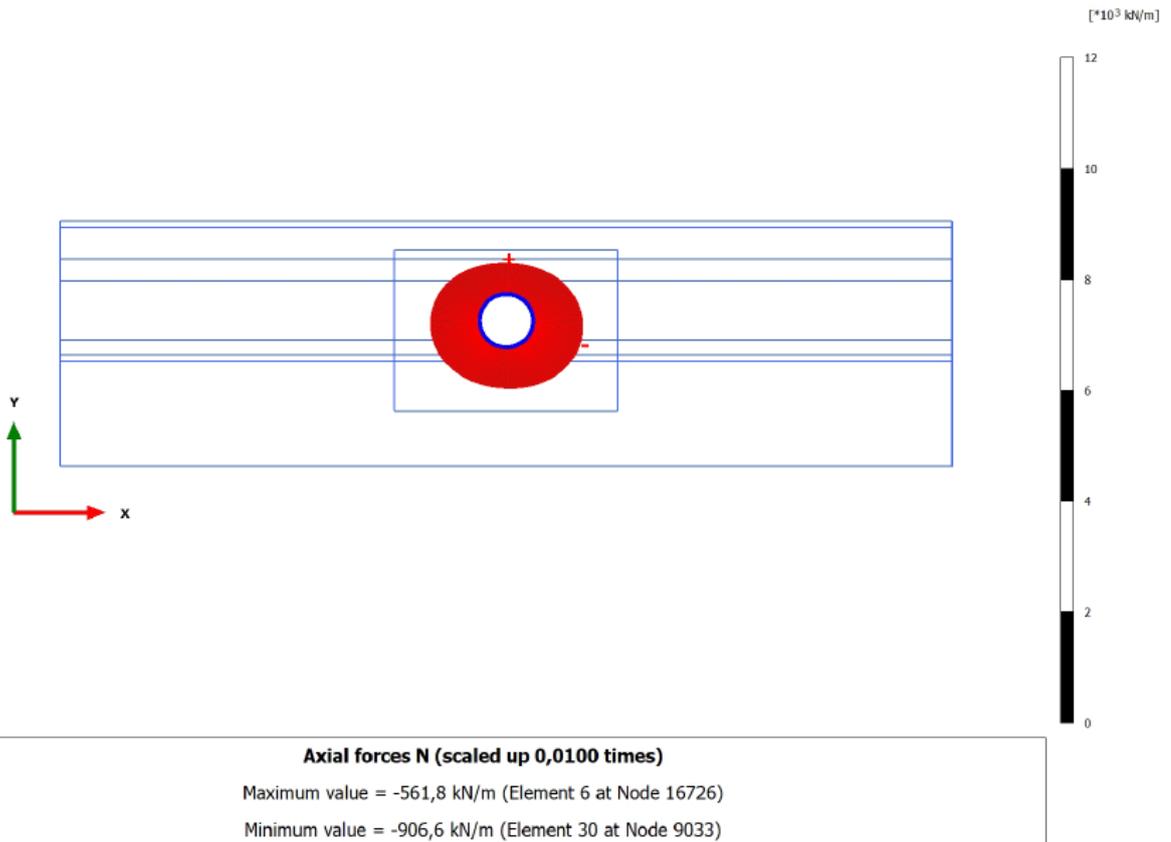


Figura 50. Forze assiali N – SLU1a

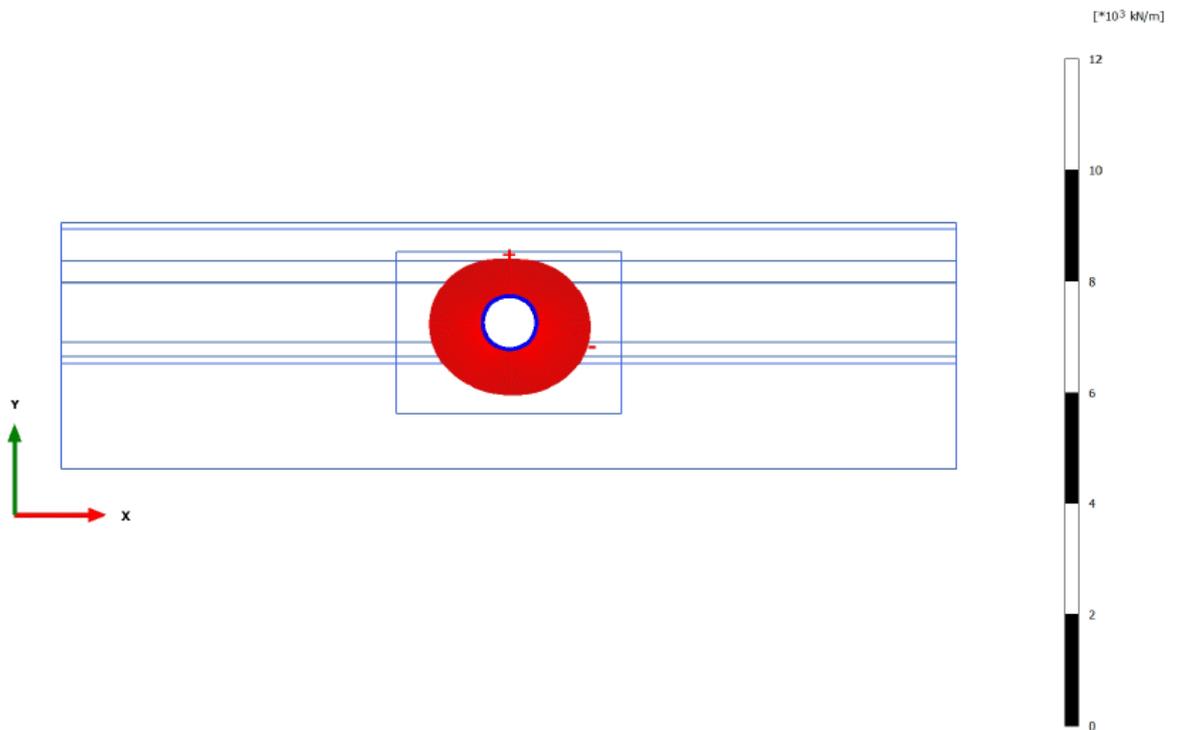


CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1



Axial forces N (scaled up 0,0100 times)

Maximum value = -668,9 kN/m (Element 1 at Node 16878)

Minimum value = -974,6 kN/m (Element 30 at Node 9034)

Figura 51. Forze assiali N – SLU2



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

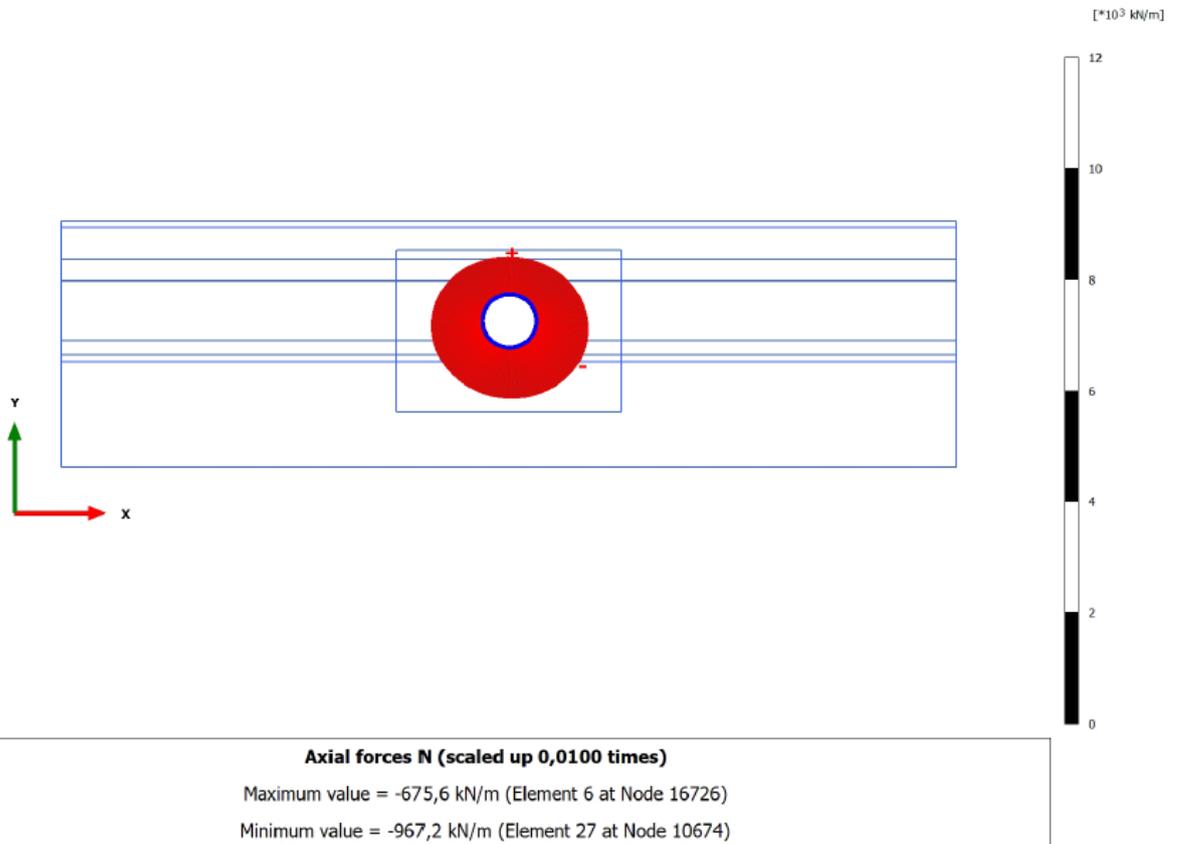


Figura 52. Forze assiali N – SLU1b



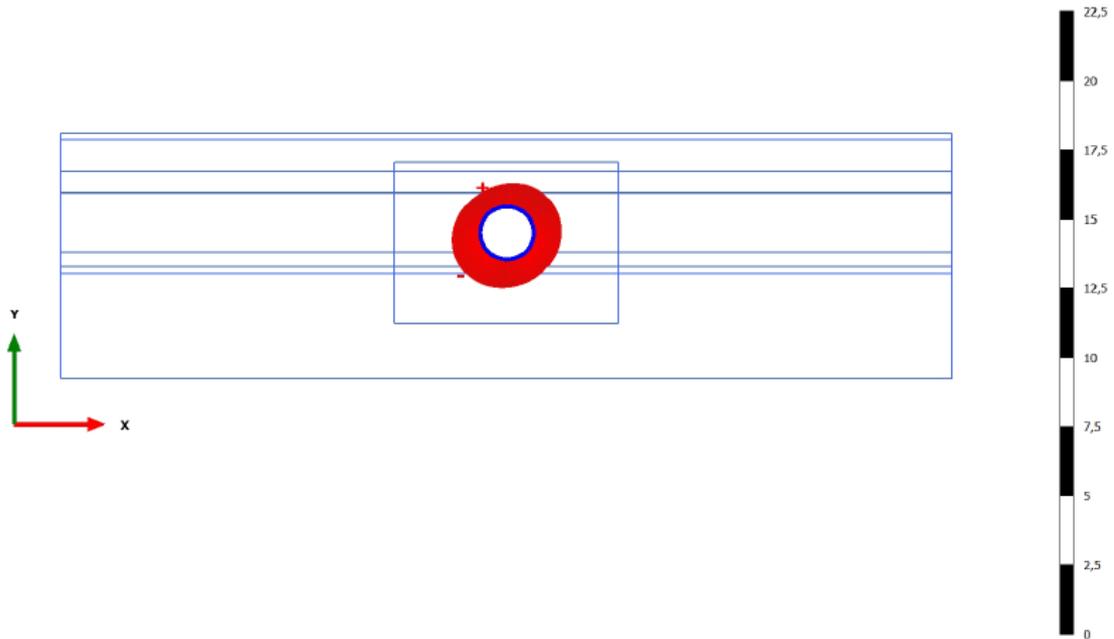
CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

[*10³ kN/m]



Axial forces N (scaled up 5,00*10⁻³ times)

Maximum value = -751,6 kN/m (Element 3 at Node 16915)

Minimum value = -1118 kN/m (Element 22 at Node 16120)

Figura 53. Forze assiali N – SLU3

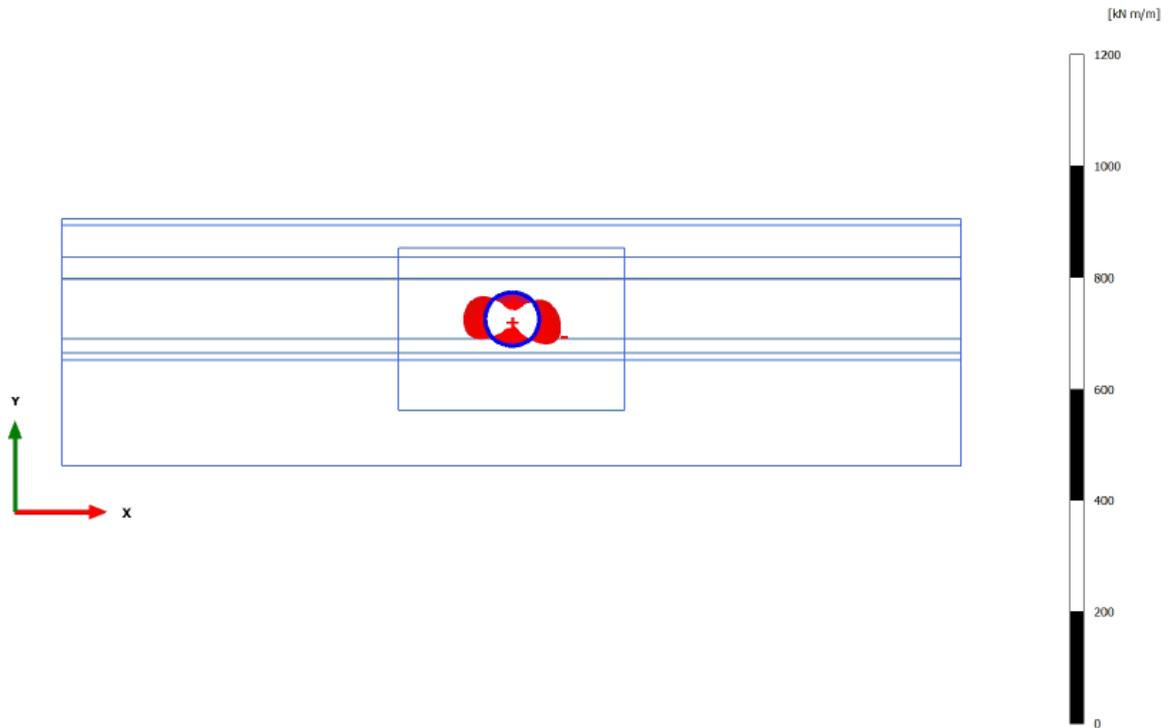


CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1



Bending moments M (scaled up 0,100 times)

Maximum value = 34,94 kN m/m (Element 49 at Node 17082)

Minimum value = -40,65 kN m/m (Element 29 at Node 9164)

Figura 54. Momento flettente M – SLU1a



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

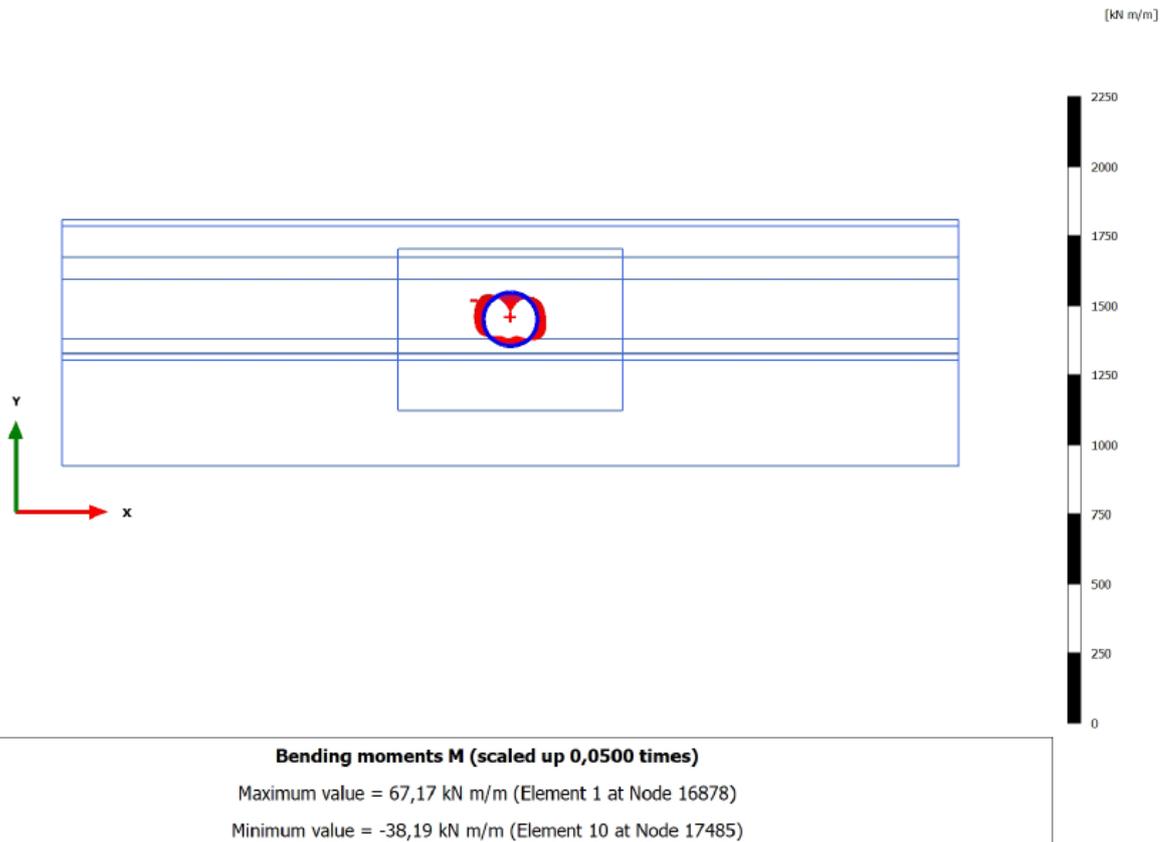


Figura 55. Momento flettente M – SLU2

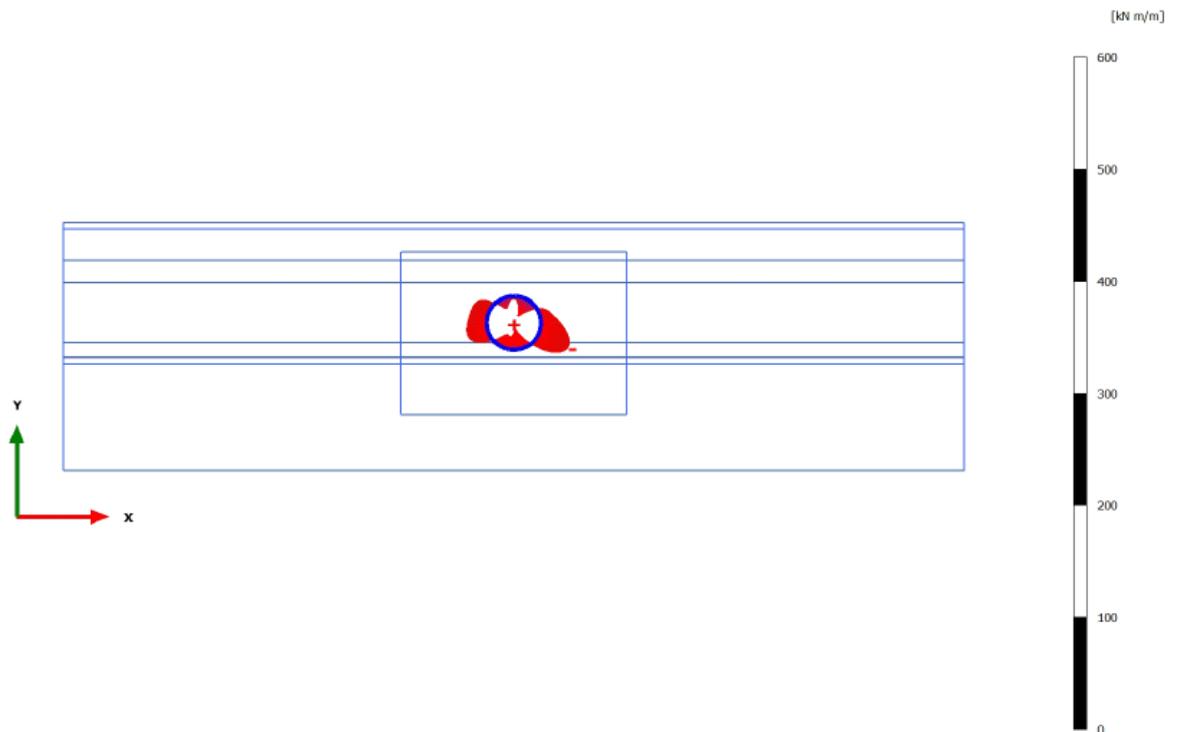


CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1



Bending moments M (scaled up 0,200 times)

Maximum value = 18,50 kN m/m (Element 49 at Node 17082)

Minimum value = -28,95 kN m/m (Element 29 at Node 10166)

Figura 56. Momento flettente M – SLU1b

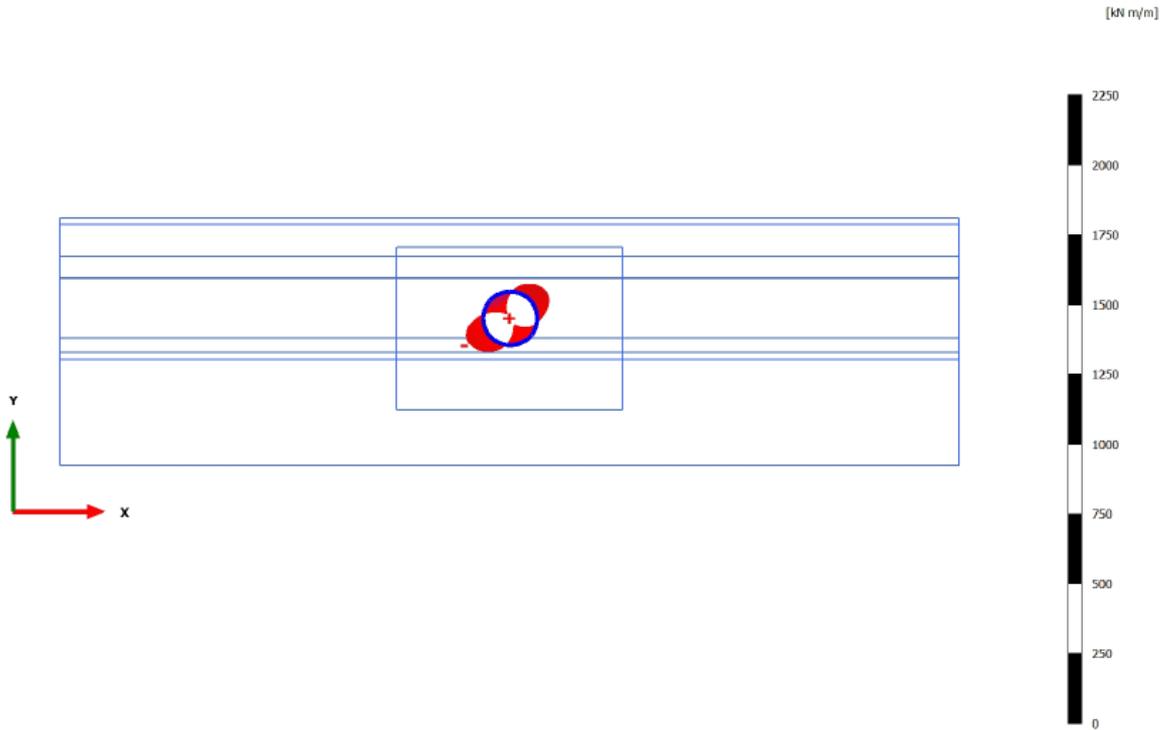


CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1



Bending moments M (scaled up 0,0500 times)

Maximum value = 73,87 kN m/m (Element 8 at Node 17458)

Minimum value = -75,23 kN m/m (Element 20 at Node 16037)

Figura 57. Momento flettente M – SLU3



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

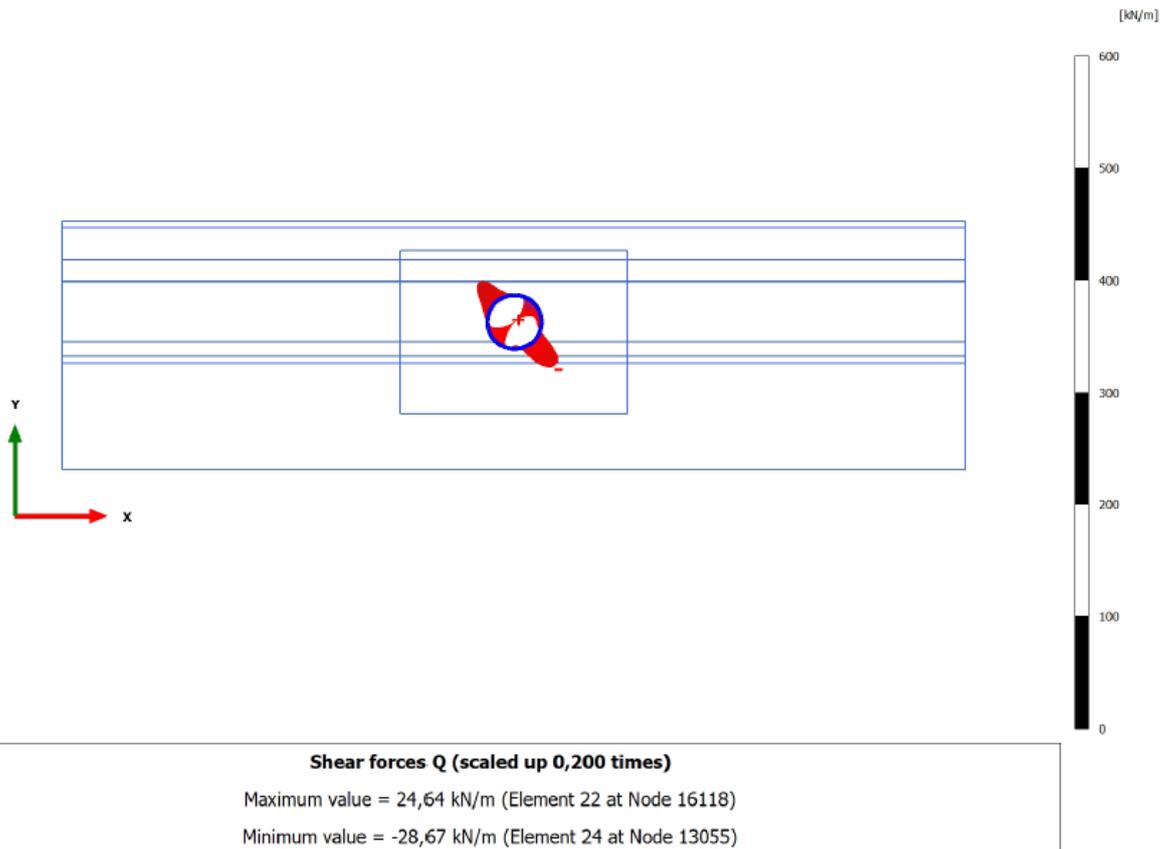


Figura 58. Forze di taglio – SLU1a

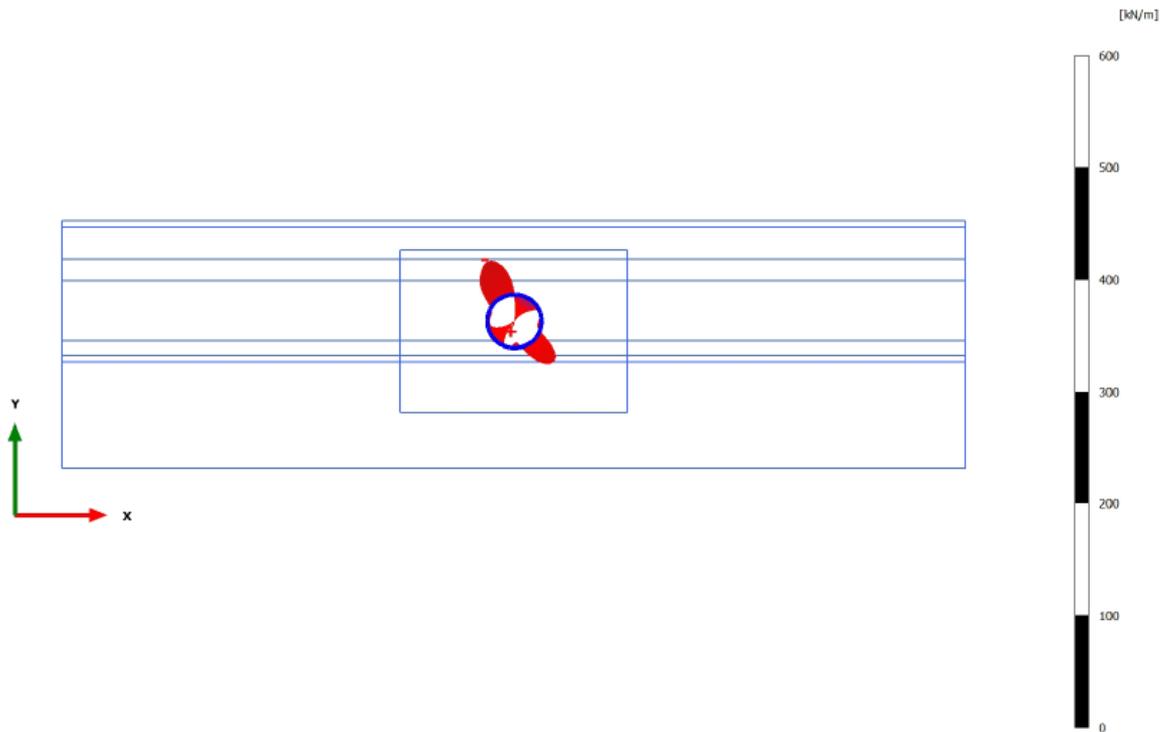


CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1



Shear forces Q (scaled up 0,200 times)

Maximum value = 28,96 kN/m (Element 4 at Node 15346)

Minimum value = -34,31 kN/m (Element 3 at Node 16914)

Figura 59. Forze di taglio – SLU2



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

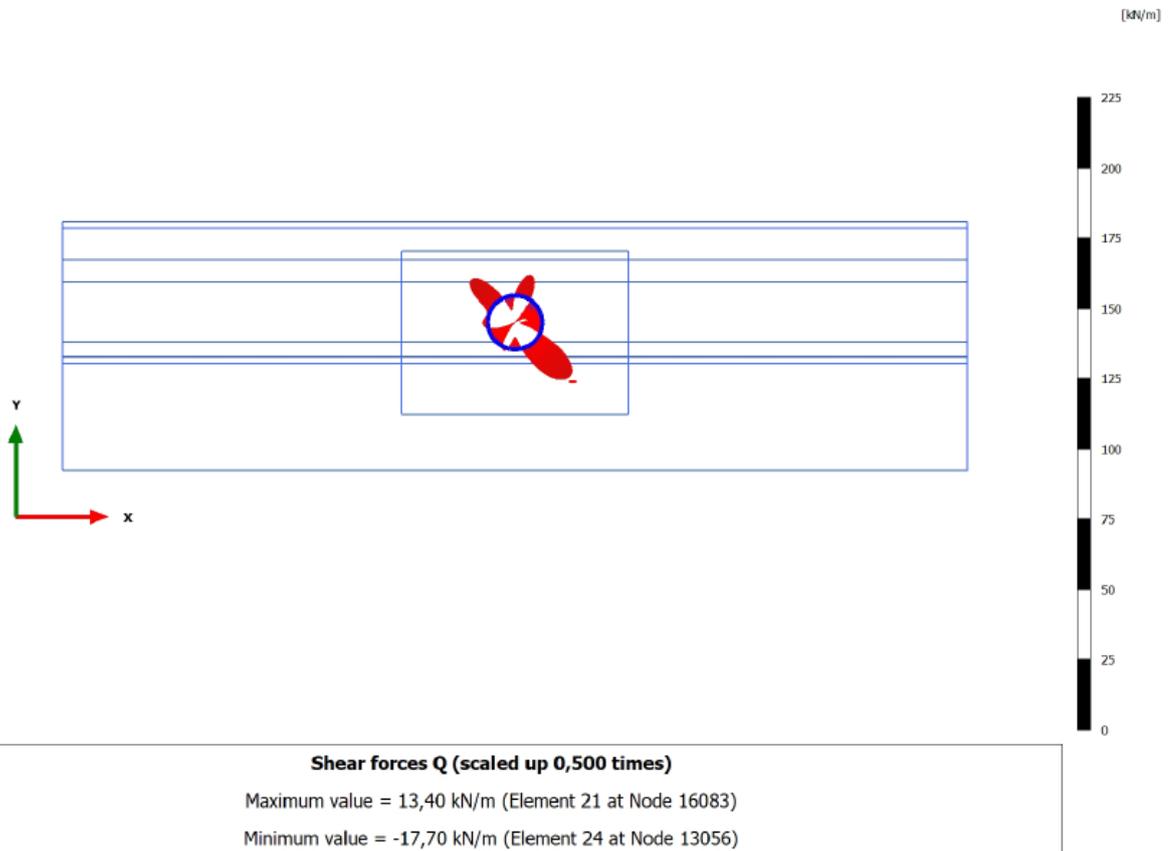


Figura 60. Forze di taglio – SLU1b



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

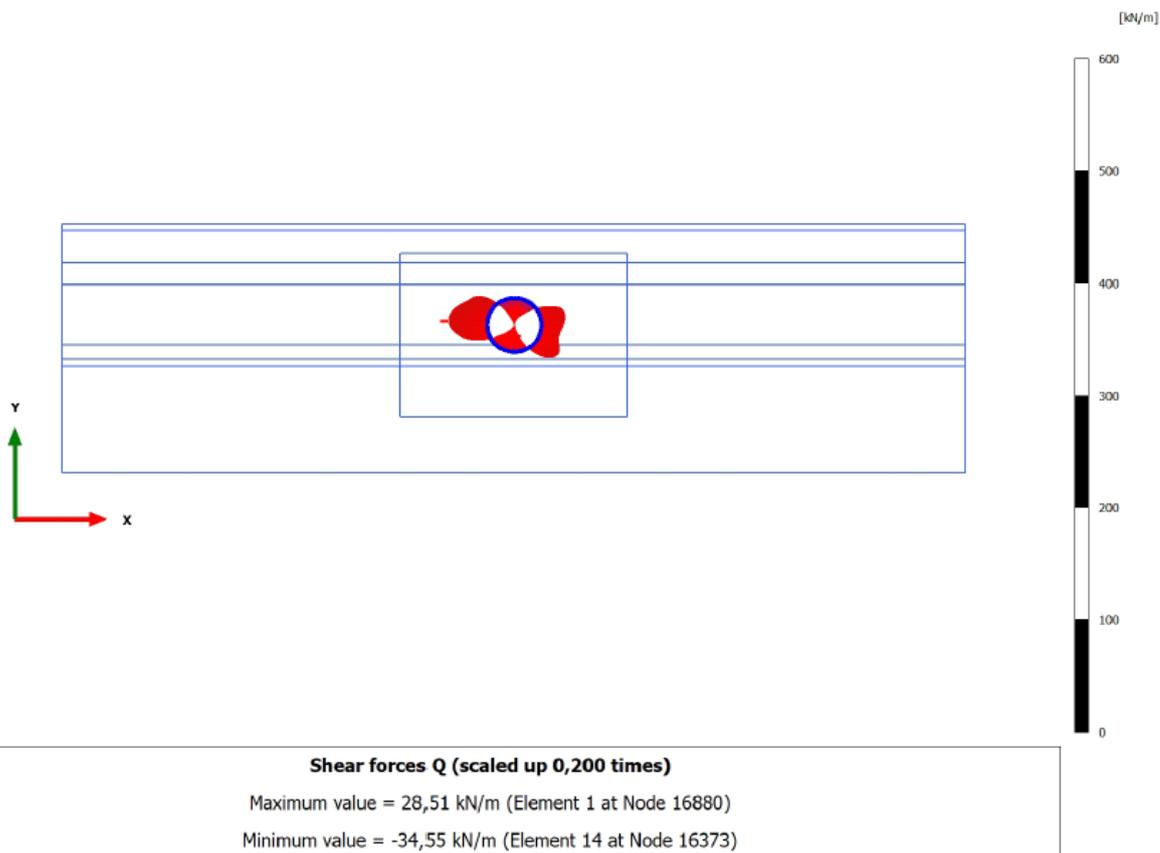


Figura 61. Forze di taglio – SLU3



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

10.2 Forza assiale, momento e forza di taglio (Sezione 2 – PK 8+490)

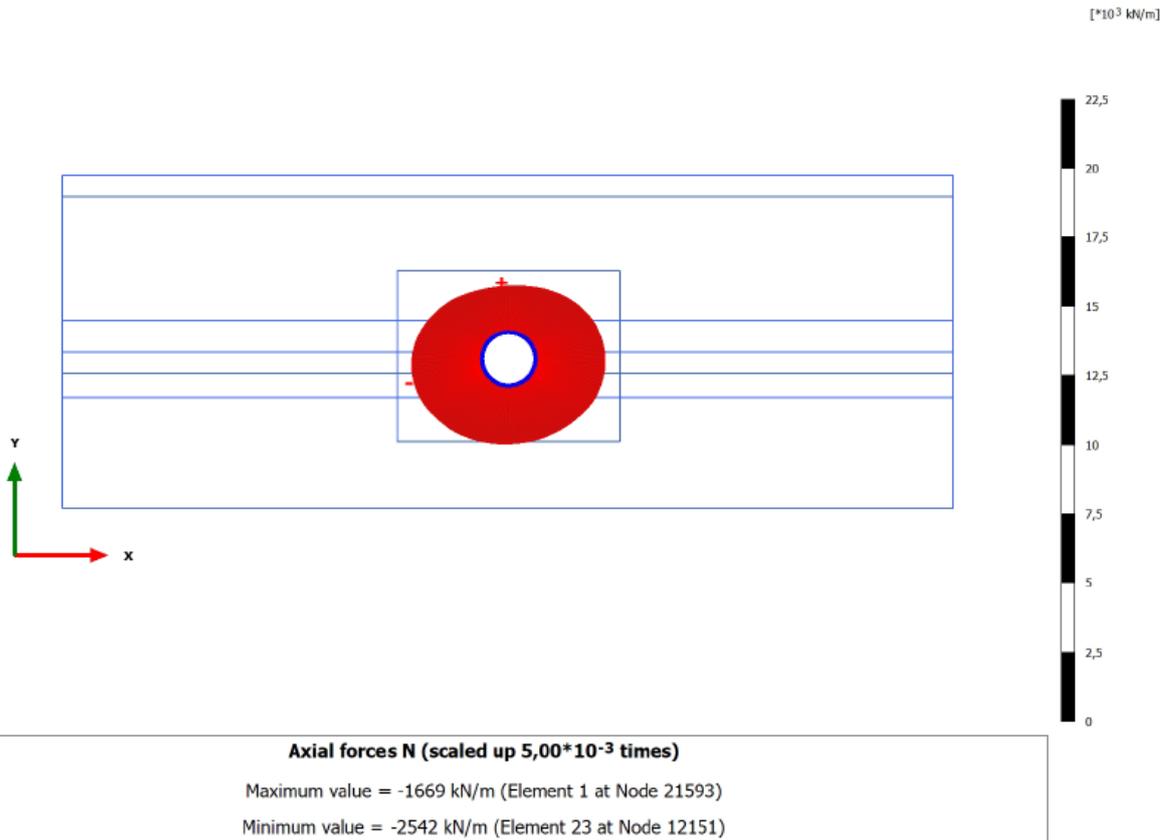


Figura 62. Forze assiali N – SLU1a

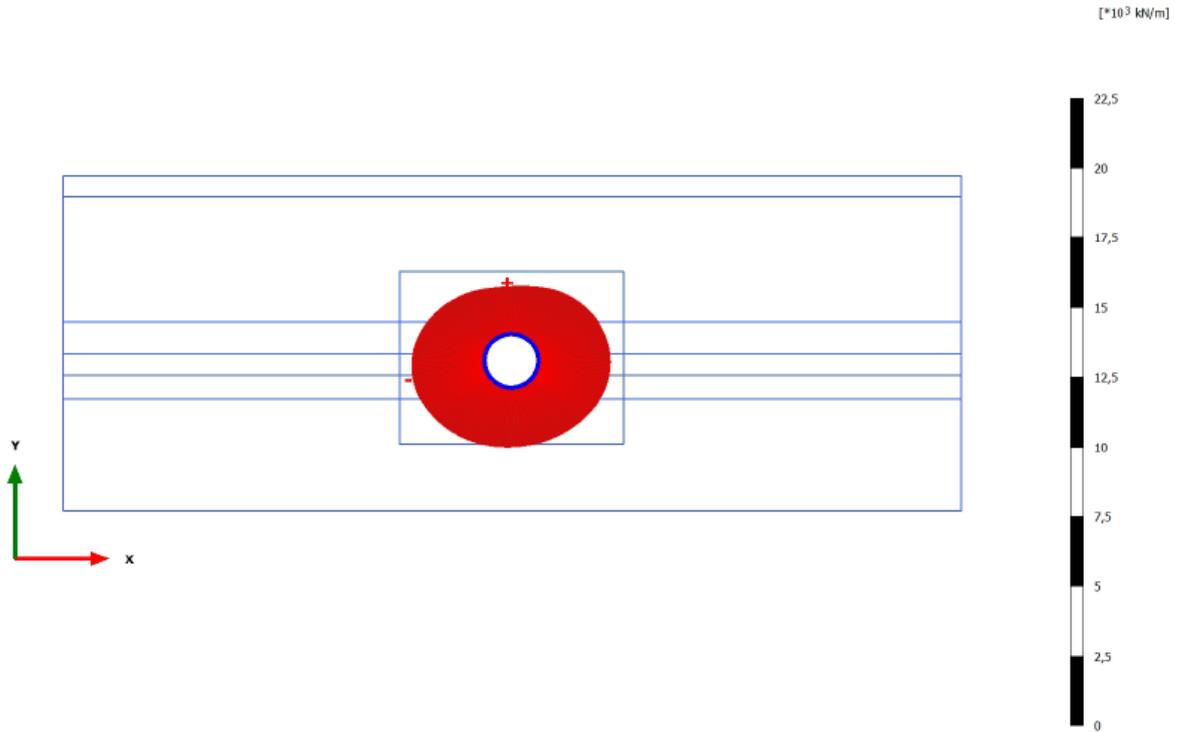


CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1



Axial forces N (scaled up $5,00 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = -1713 kN/m (Element 1 at Node 21592)

Minimum value = -2594 kN/m (Element 22 at Node 11987)

Figura 63. Forze assiali N – SLU2



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

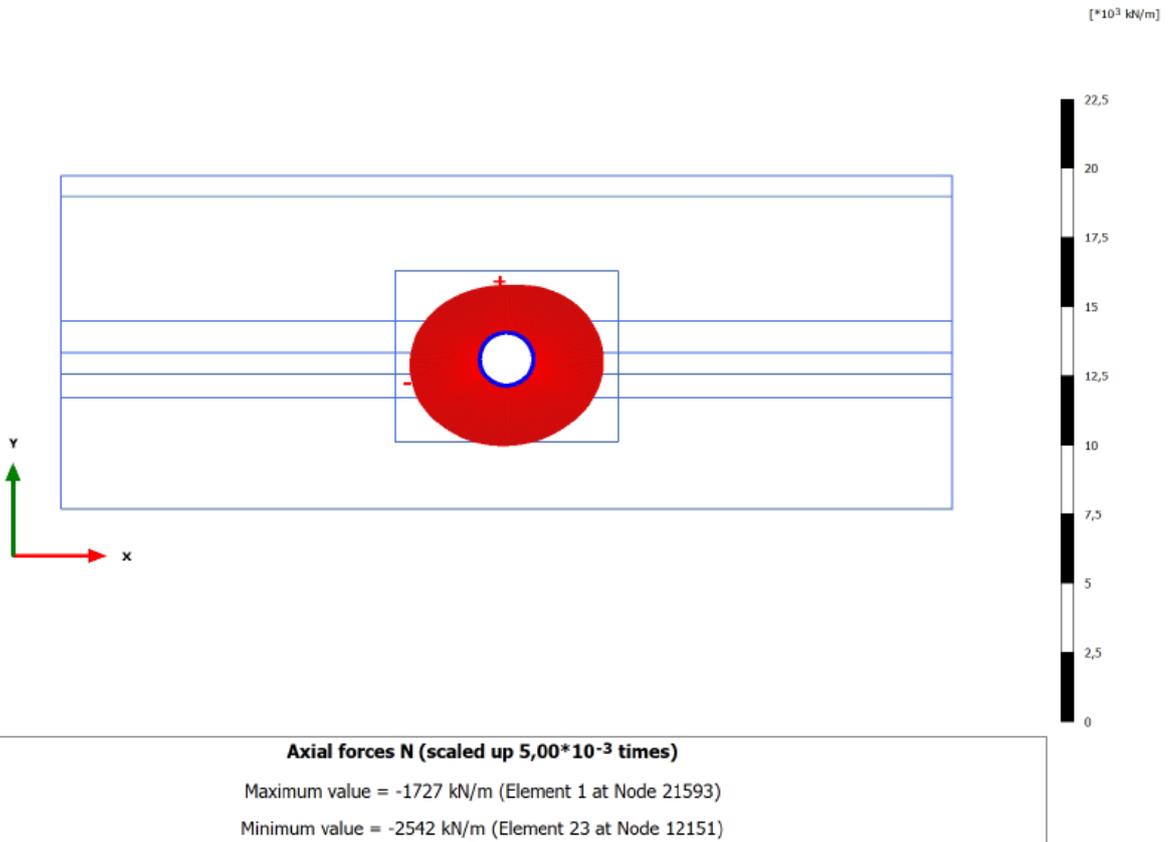


Figura 64. Forze assiali N – SLU1b



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

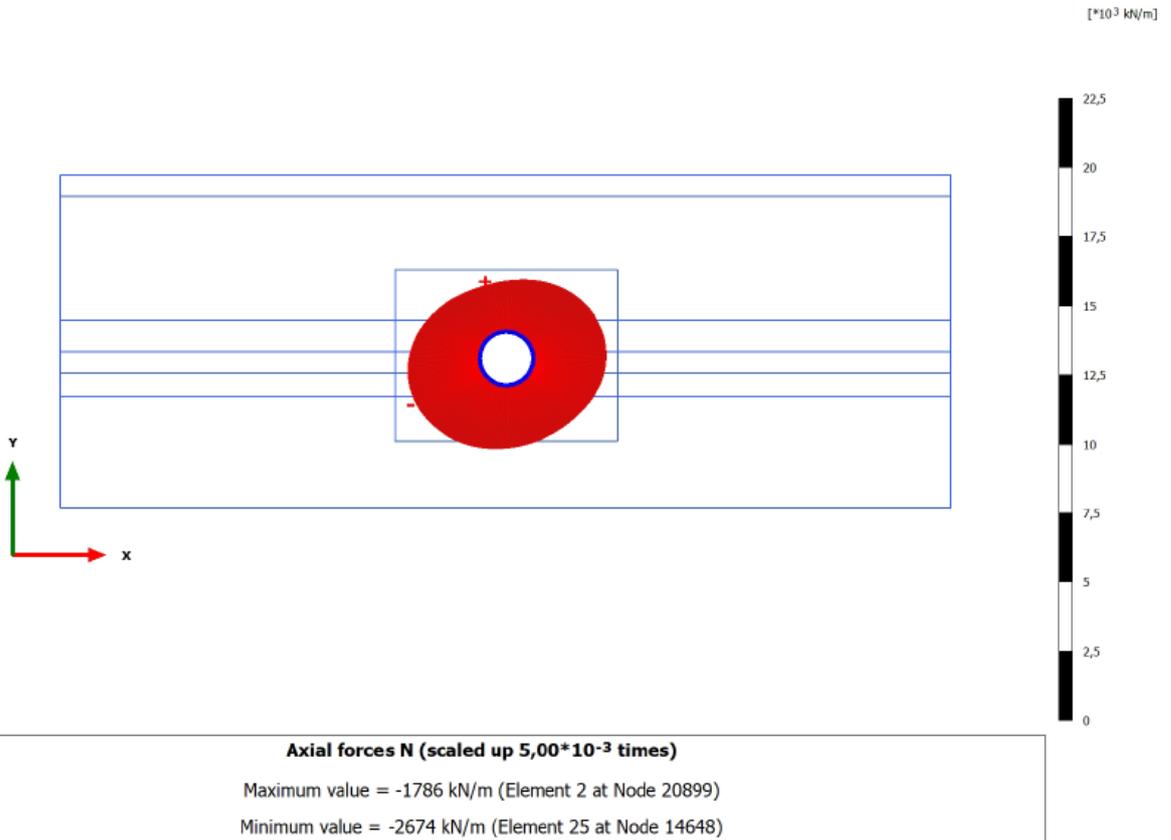


Figura 65. Forze assiali N – SLU3

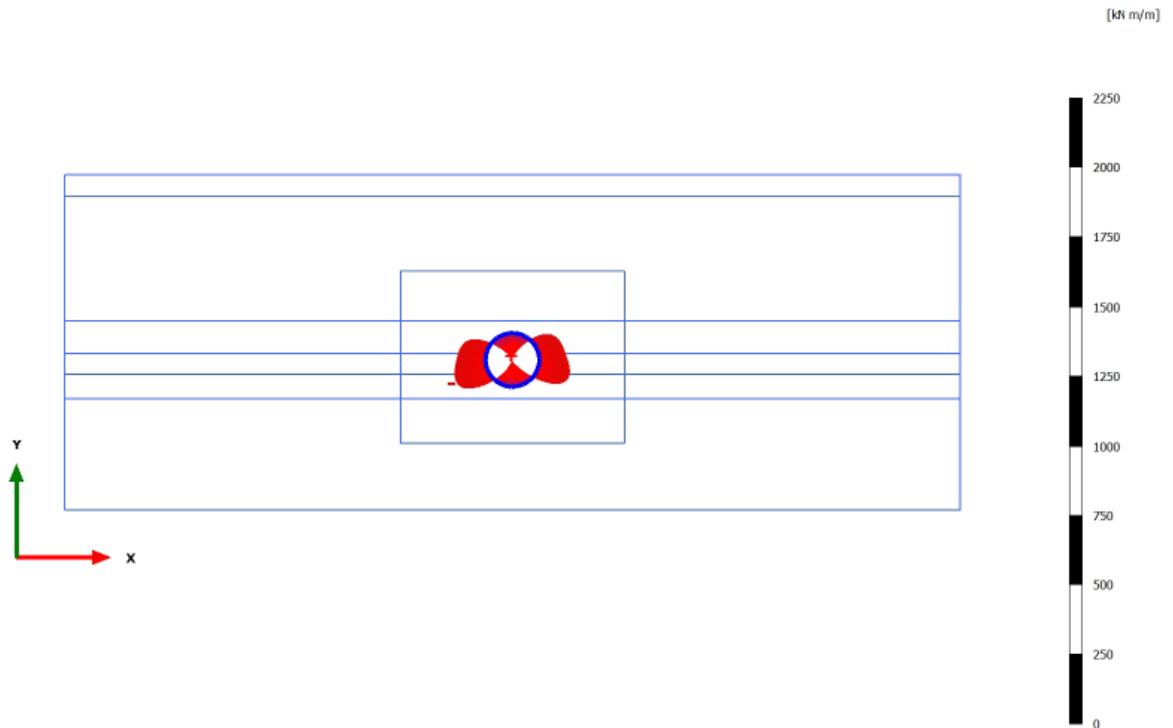


CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1



Bending moments M (scaled up 0,0500 times)

Maximum value = 96,32 kN m/m (Element 43 at Node 22076)

Minimum value = -119,2 kN m/m (Element 24 at Node 13578)

Figura 66. Momento flettente M – SLU1a



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

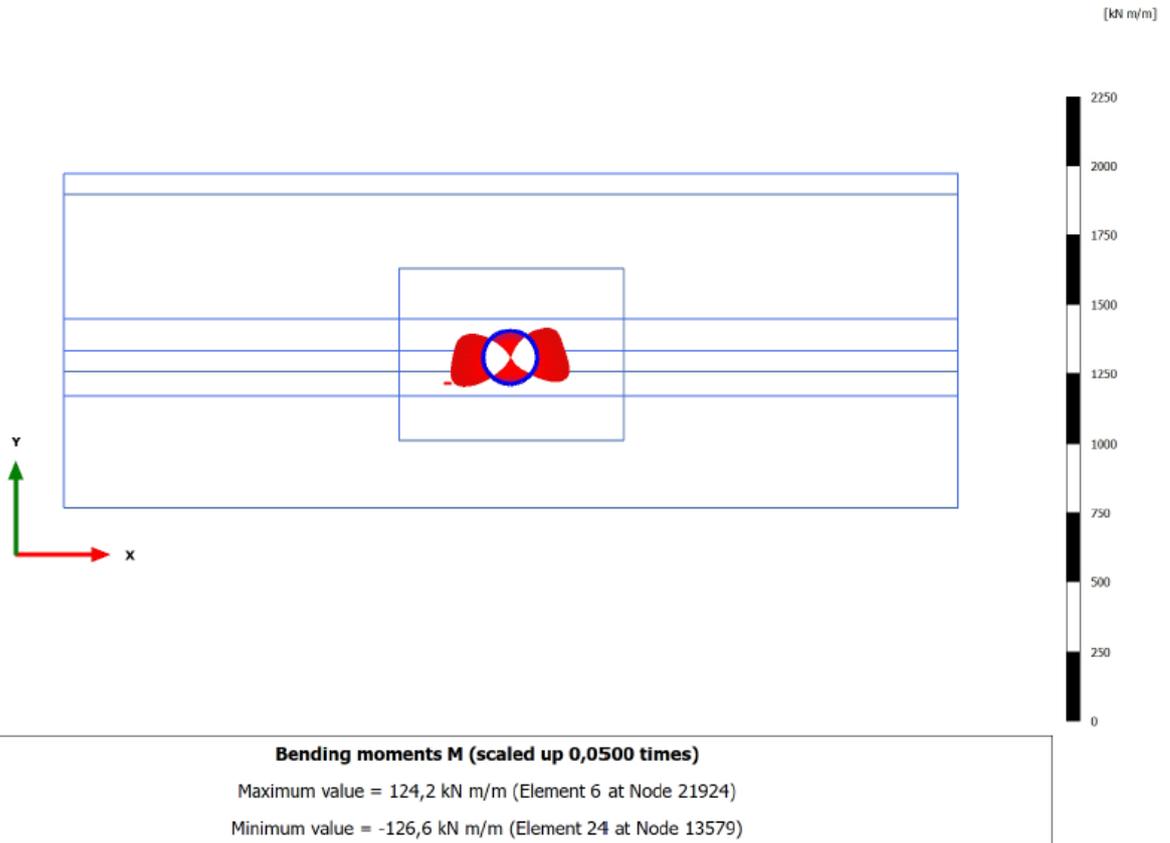


Figura 67. Momento flettente M – SLU2



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

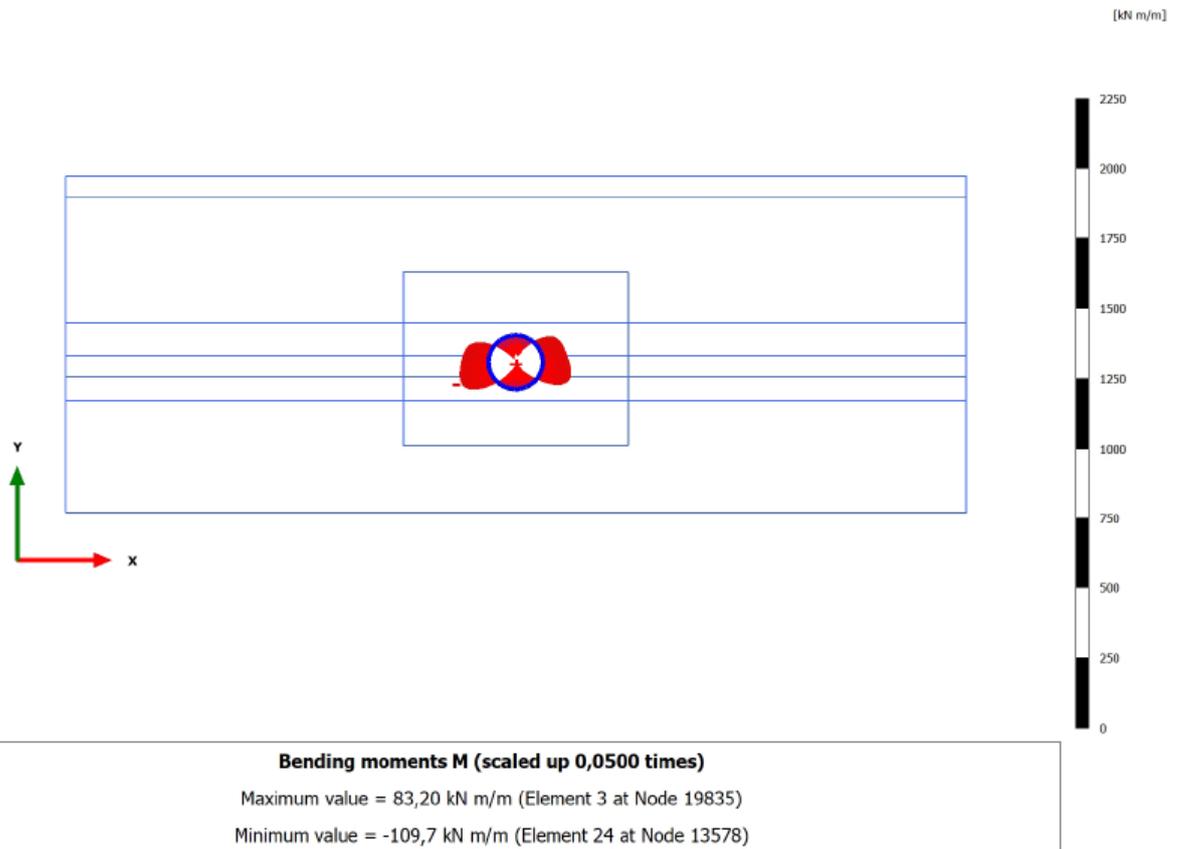


Figura 68. Momento flettente M – SLU1b



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

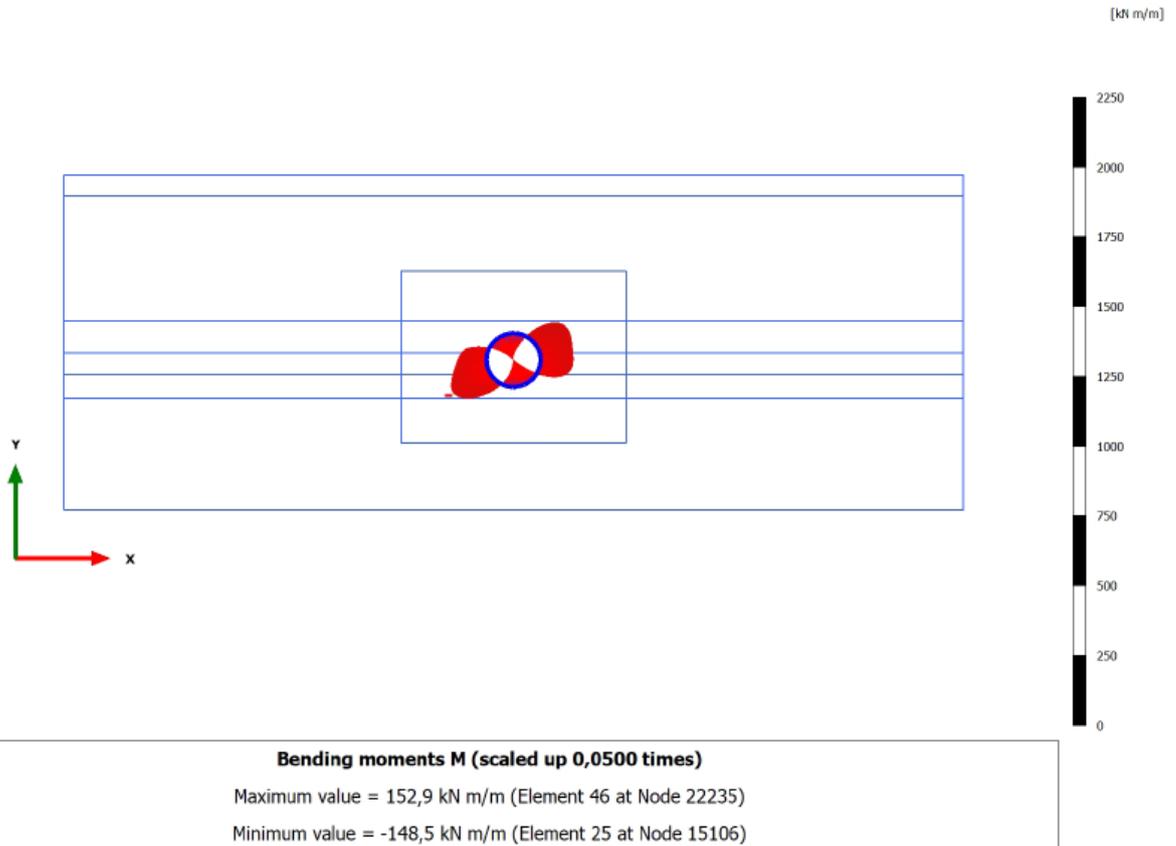


Figura 69. Momento flettente M – SLU3



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

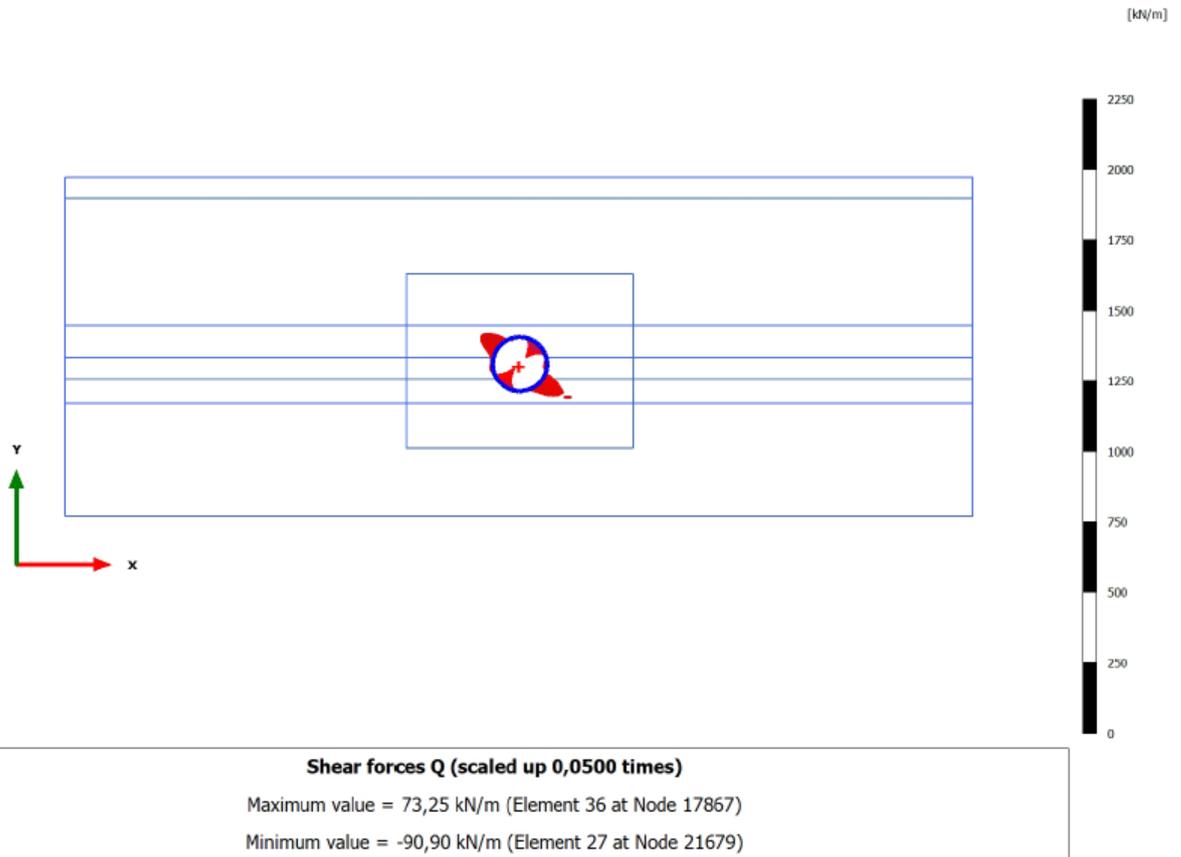


Figura 70. Forze di taglio – SLU1a

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

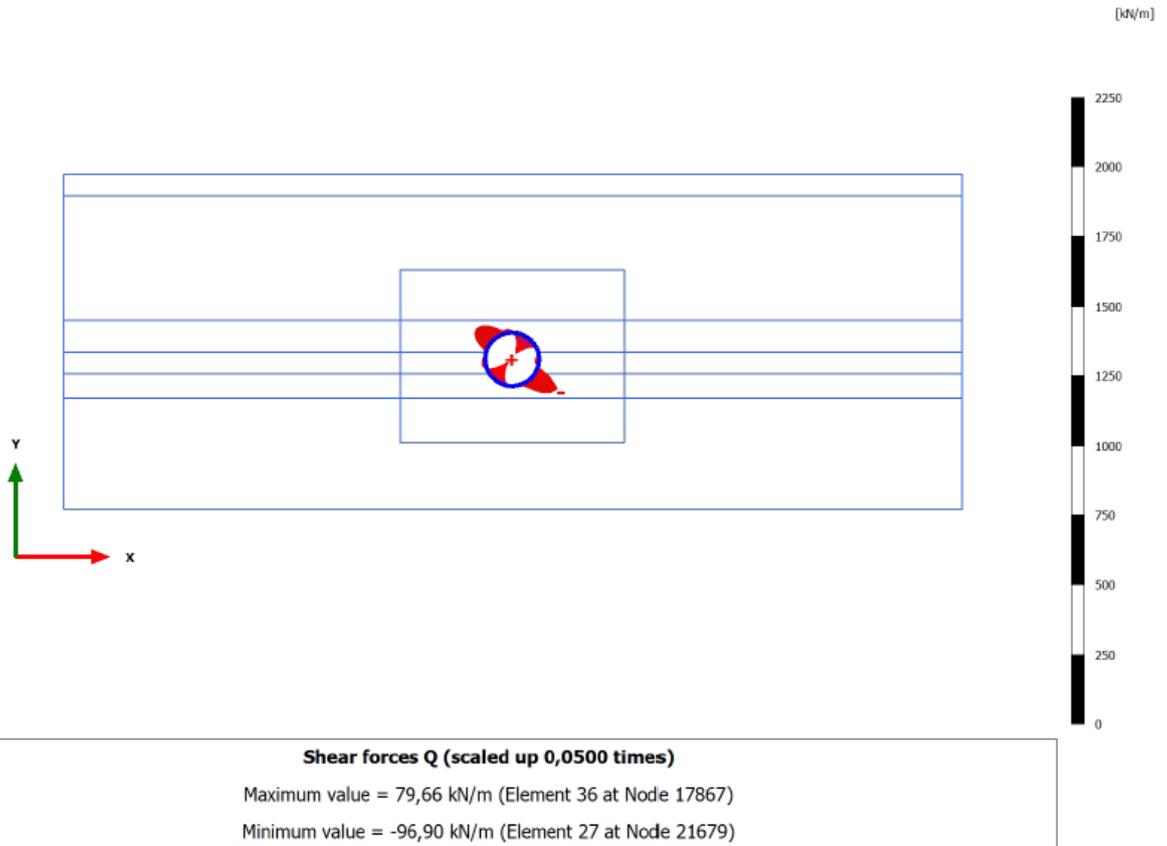


Figura 71. Forze di taglio – SLU2



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

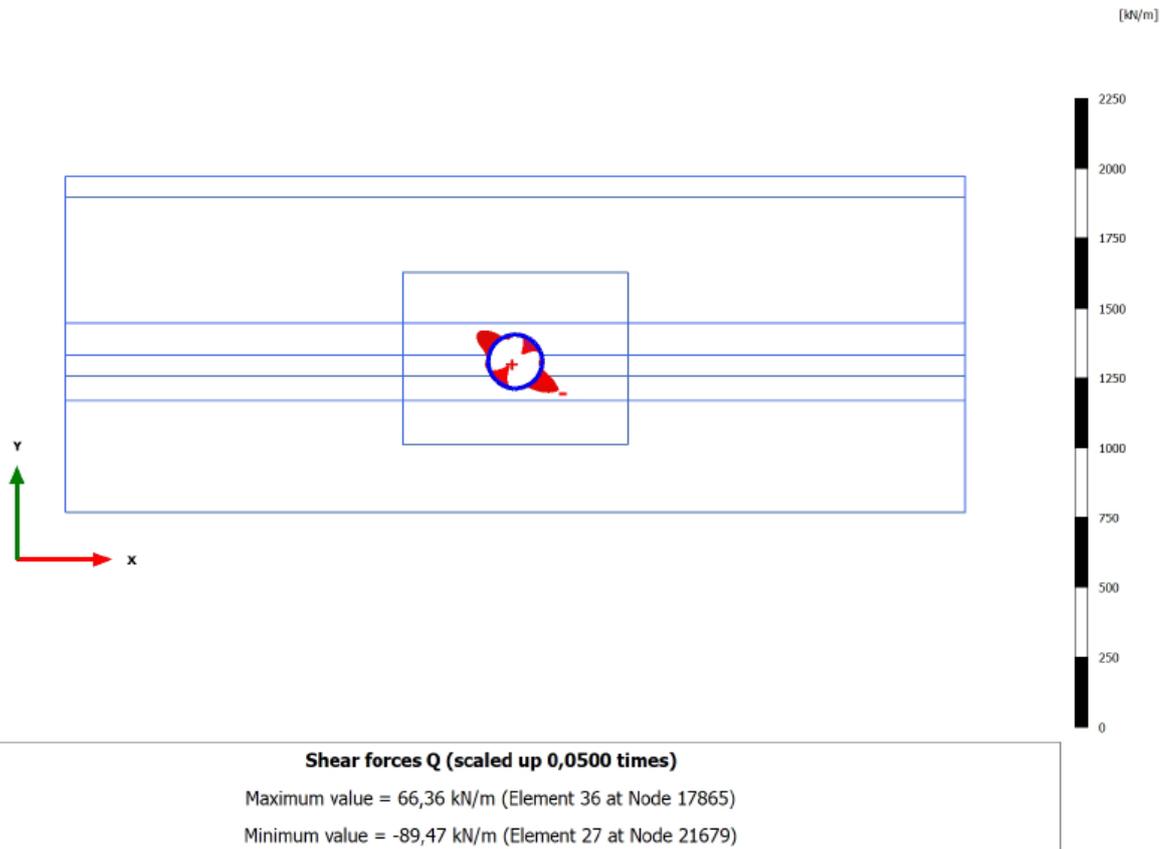


Figura 72. Forze di taglio – SLU1b

 CITTA' DI TORINO	Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo – Lotto Costruttivo 2 Bologna-Politecnico
Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato – Relazione Tecnica e di calcolo anello	01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

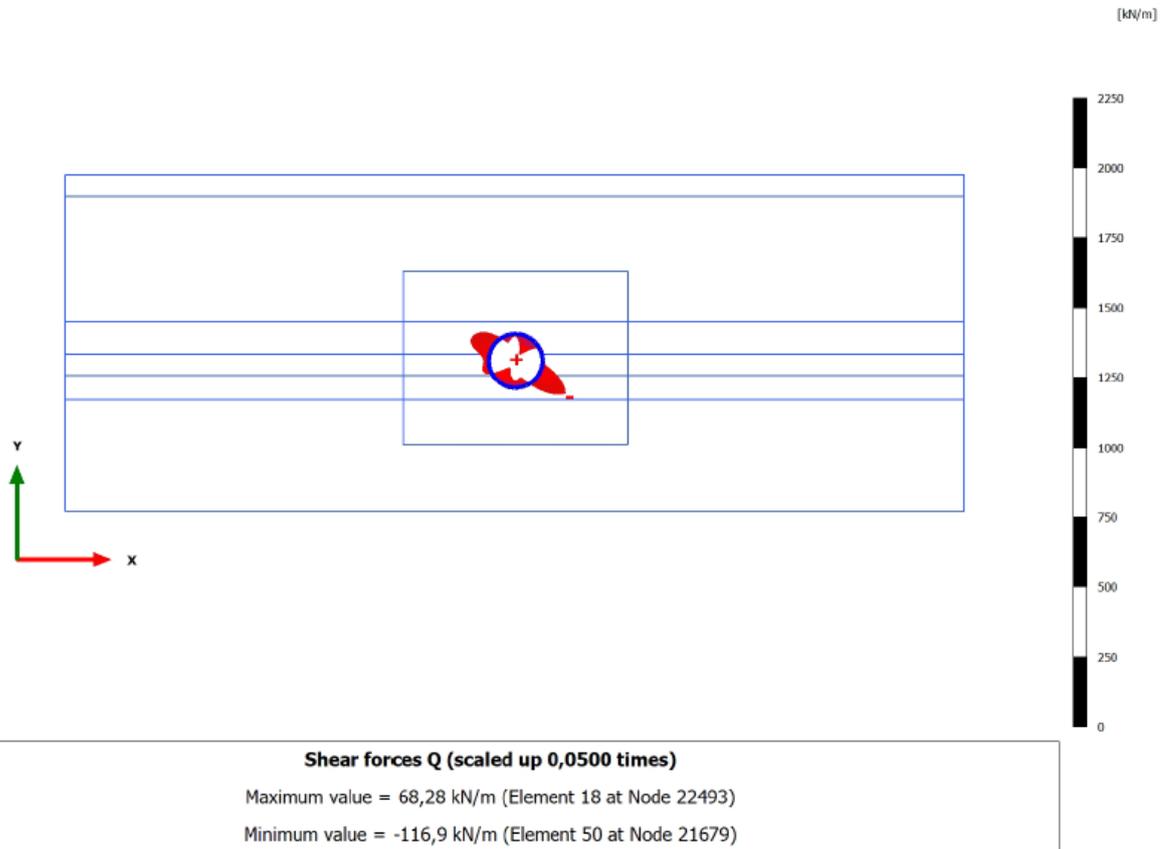


Figura 73. Forze di taglio – SLU3



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

10.3 Forza assiale, momento e forza di taglio (Sezione 3 – PK 9+965)

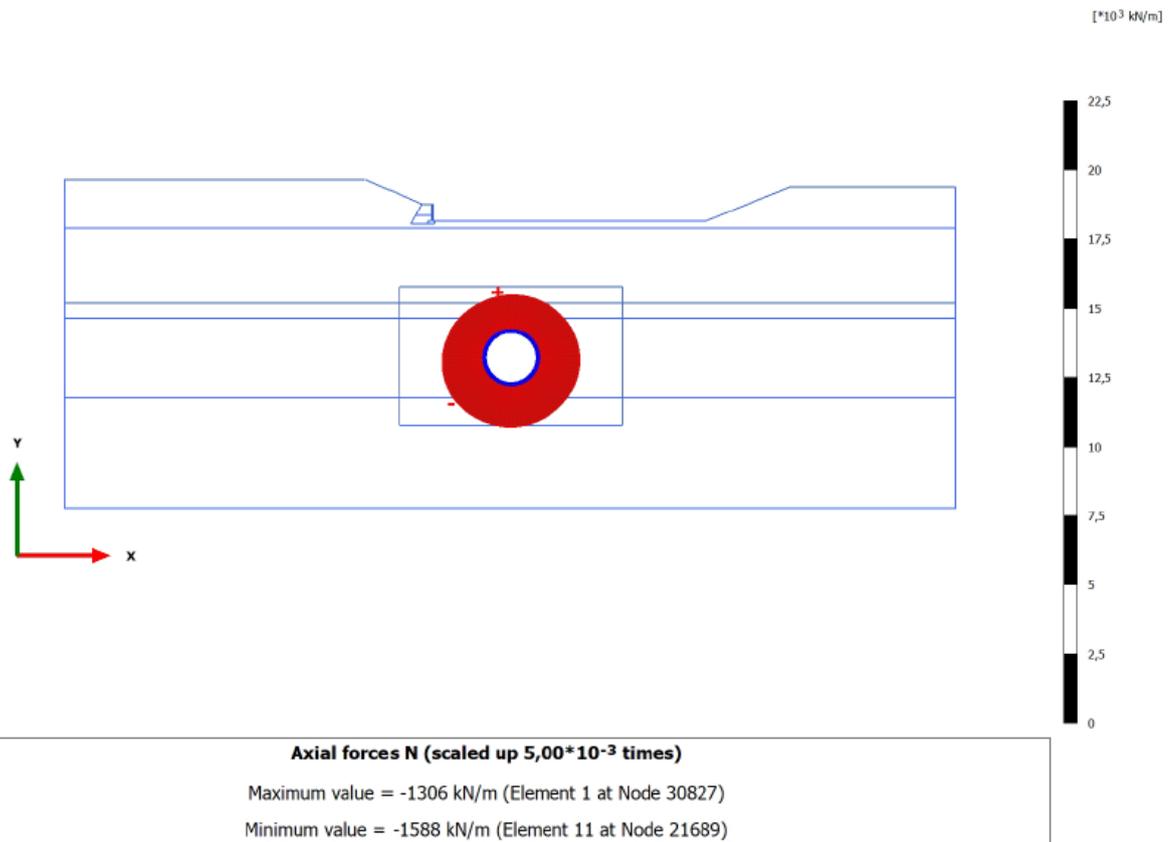


Figura 74. Forze assiali N – SLU1a



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

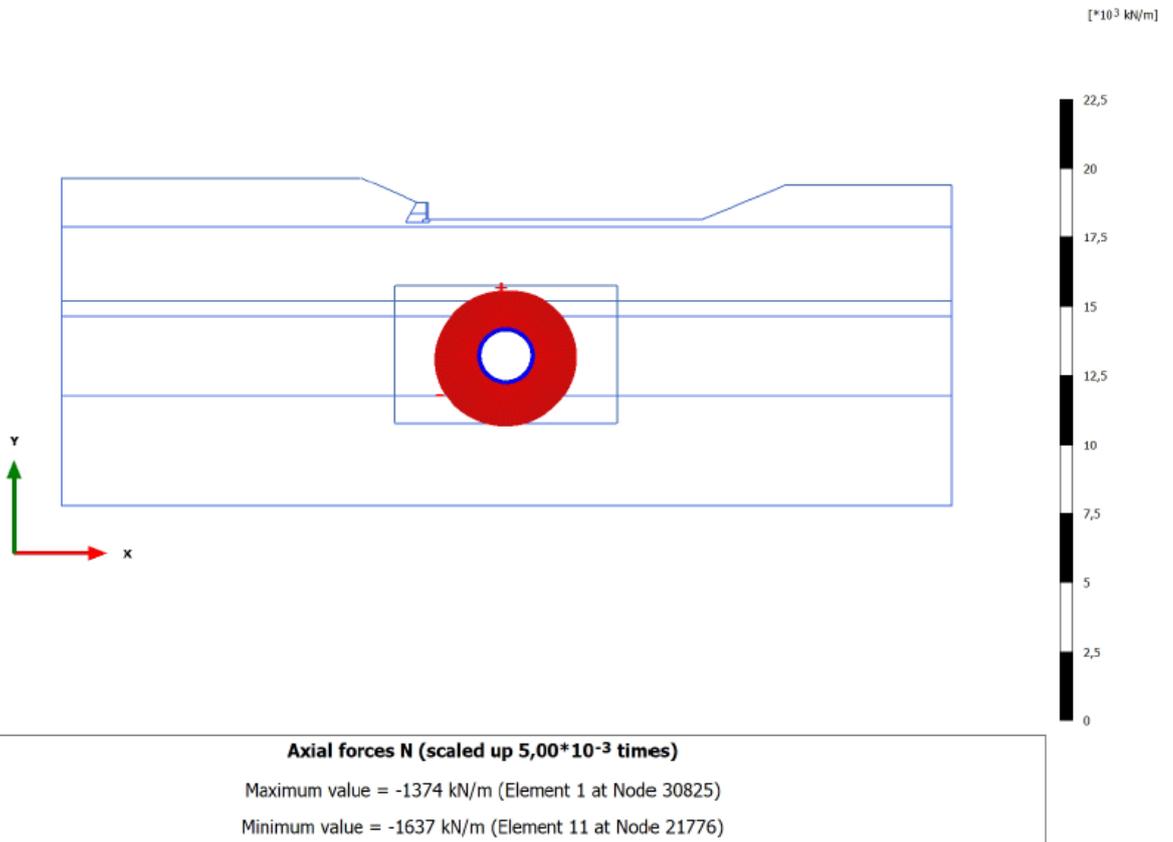


Figura 75. Forze assiali N – SLU2

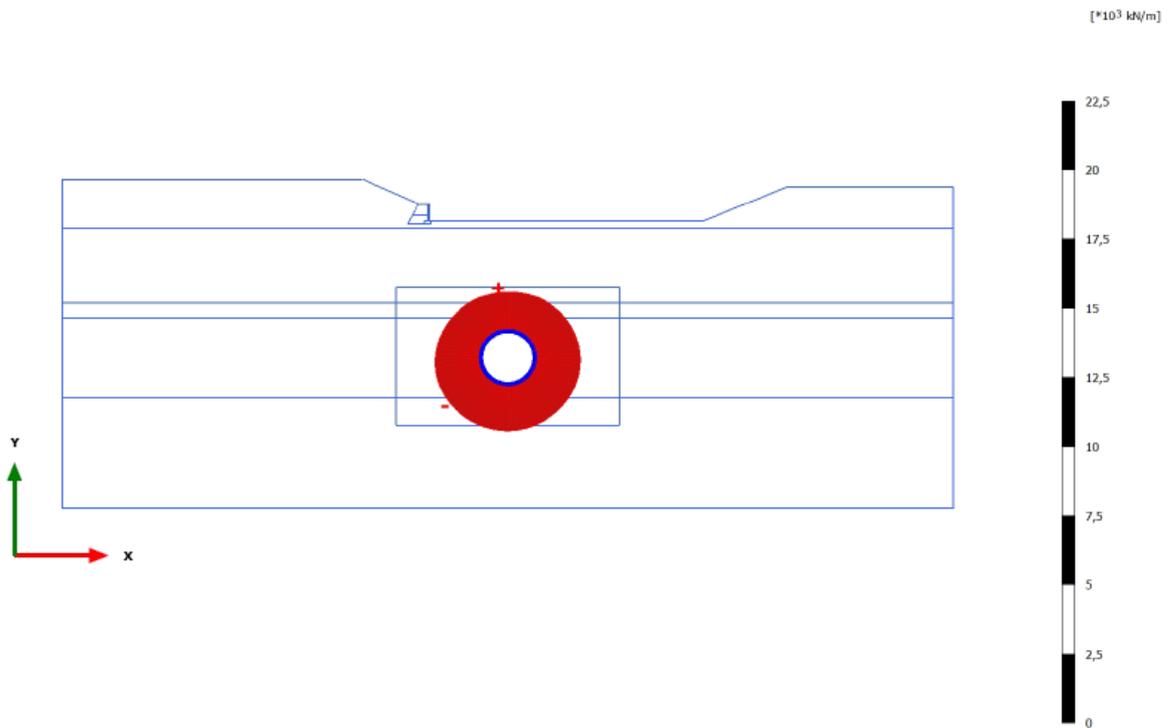


CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1



Axial forces N (scaled up $5,00 \cdot 10^{-3}$ times)

Maximum value = -1429 kN/m (Element 1 at Node 30826)

Minimum value = -1698 kN/m (Element 11 at Node 21689)

Figura 76. Forze assiali N – SLU1b



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

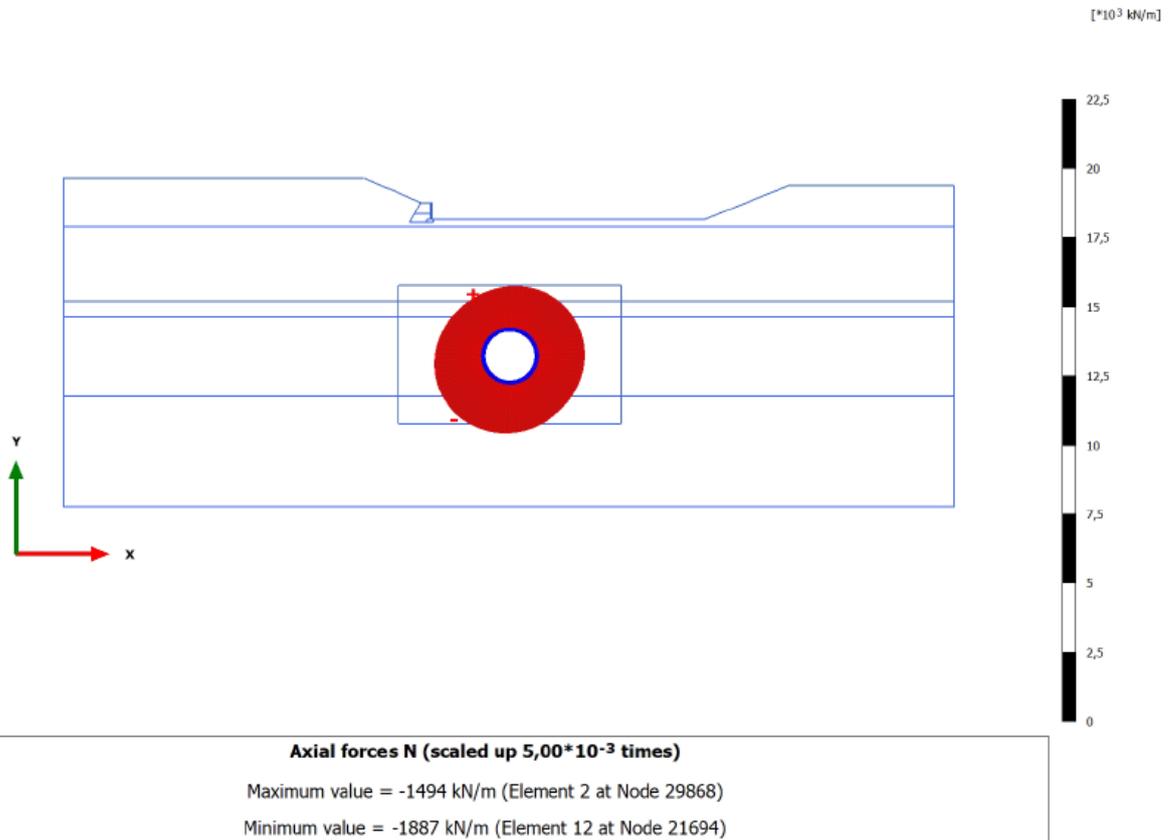


Figura 77. Forze assiali N – SLU3



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

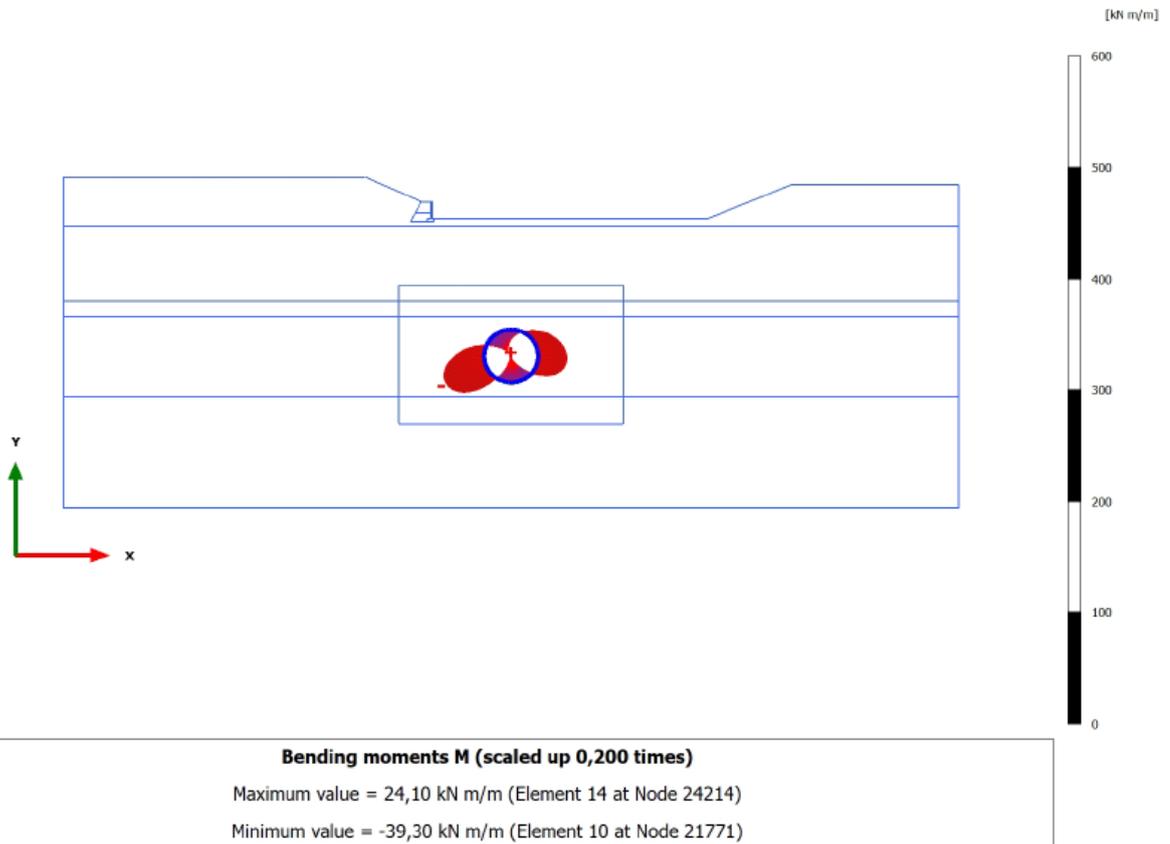


Figura 78. Momento flettente M – SLU1a



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

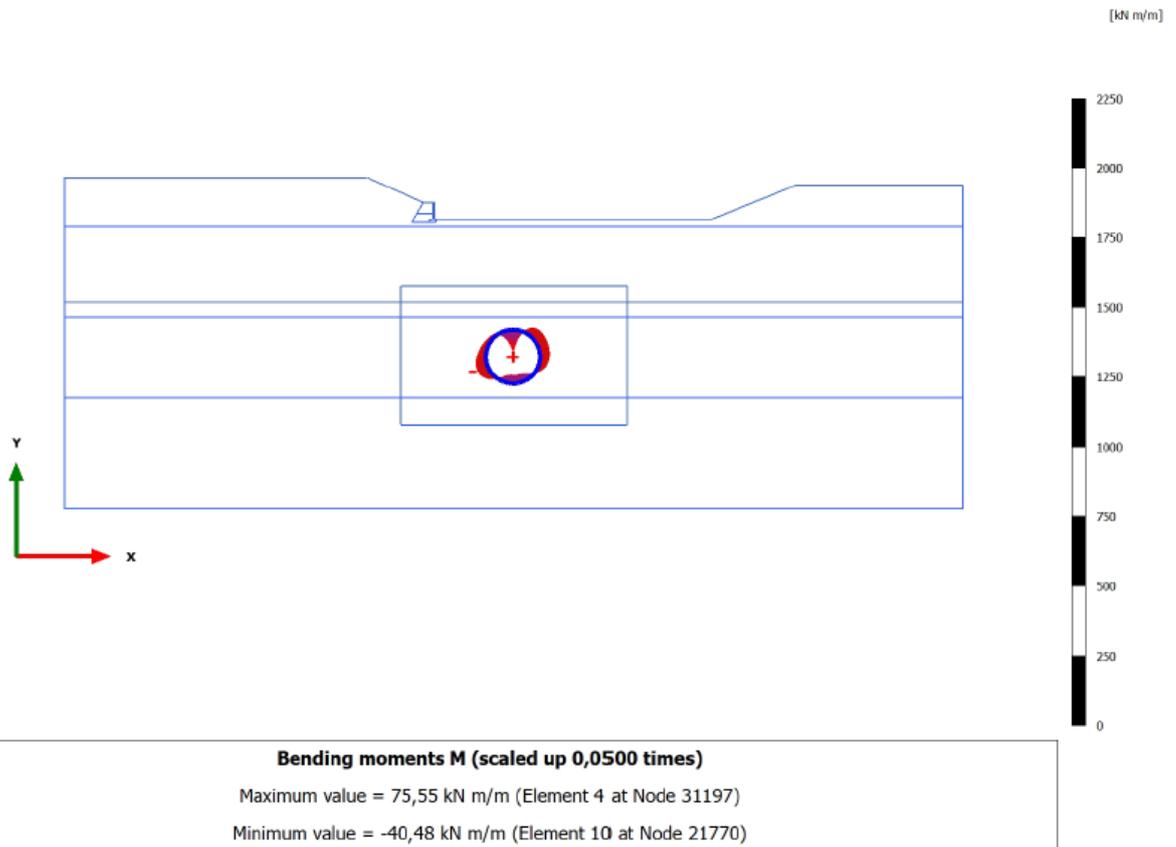


Figura 79. Momento flettente M – SLU2

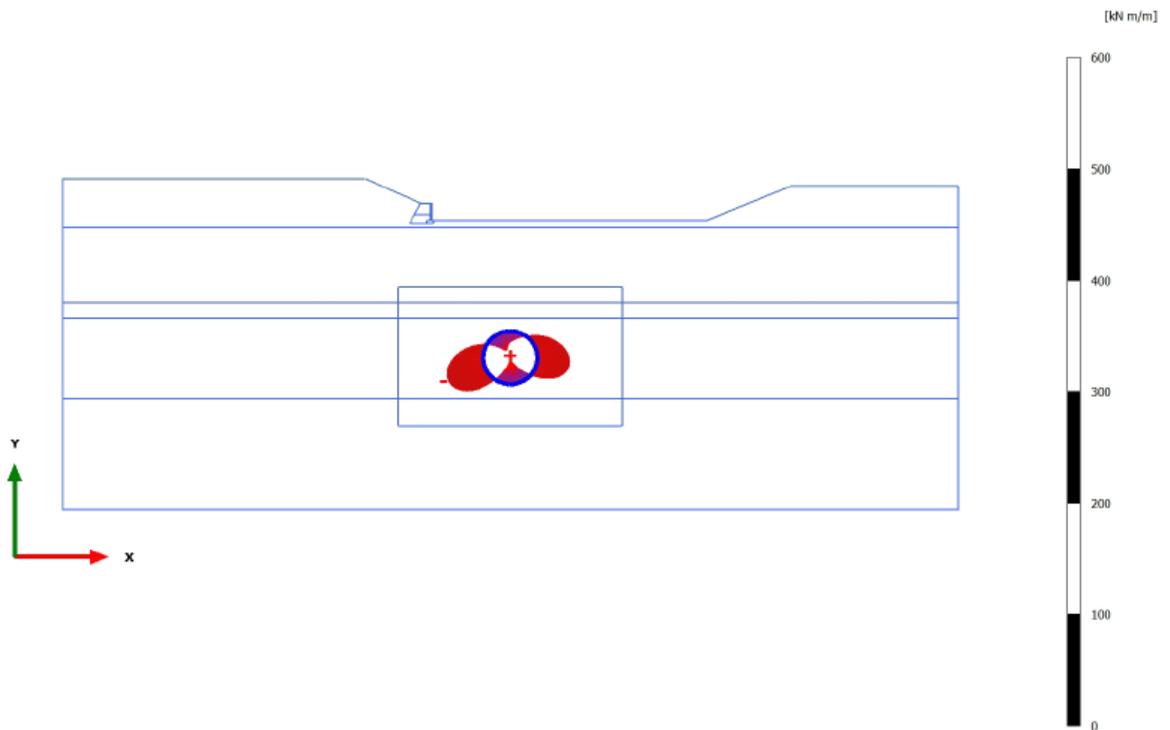


CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1



Bending moments M (scaled up 0,200 times)

Maximum value = 22,45 kN m/m (Element 14 at Node 24214)

Minimum value = -34,92 kN m/m (Element 10 at Node 21770)

Figura 80. Momento flettente M – SLU1b



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

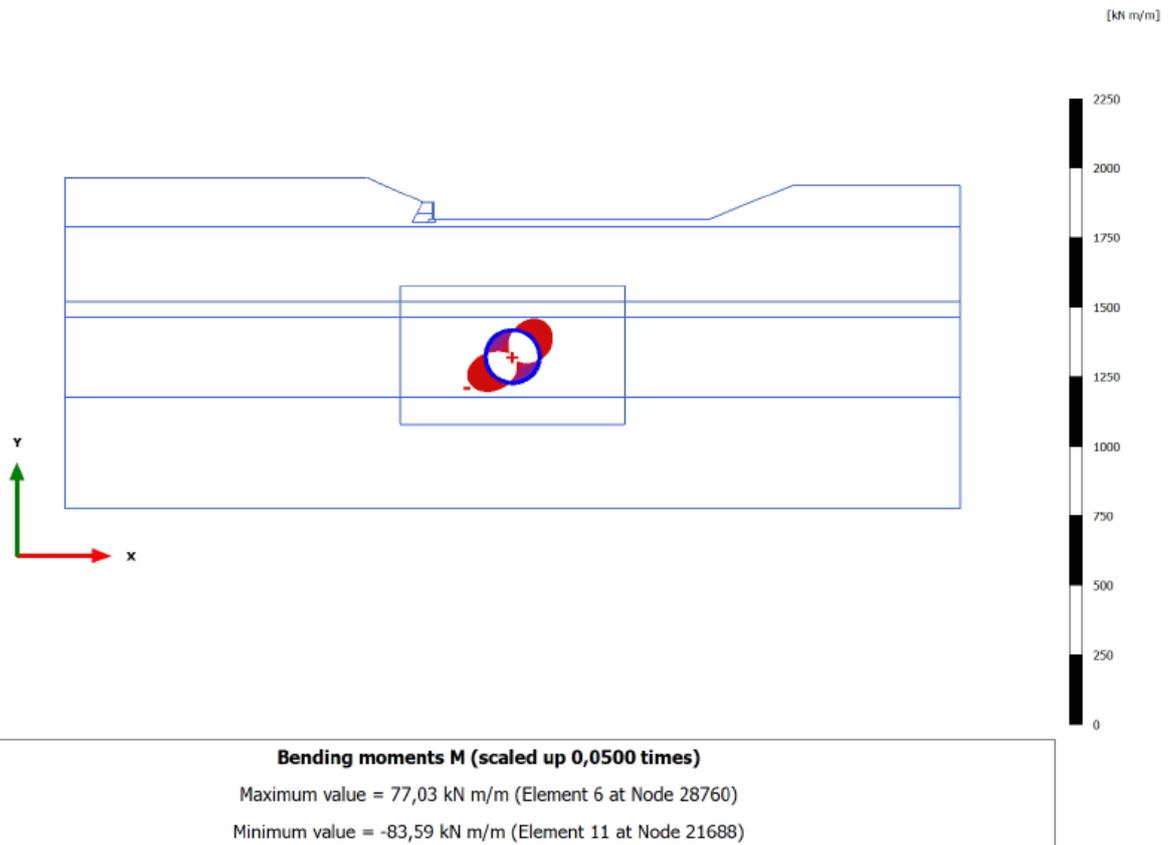


Figura 81. Momento flettente M – SLU3

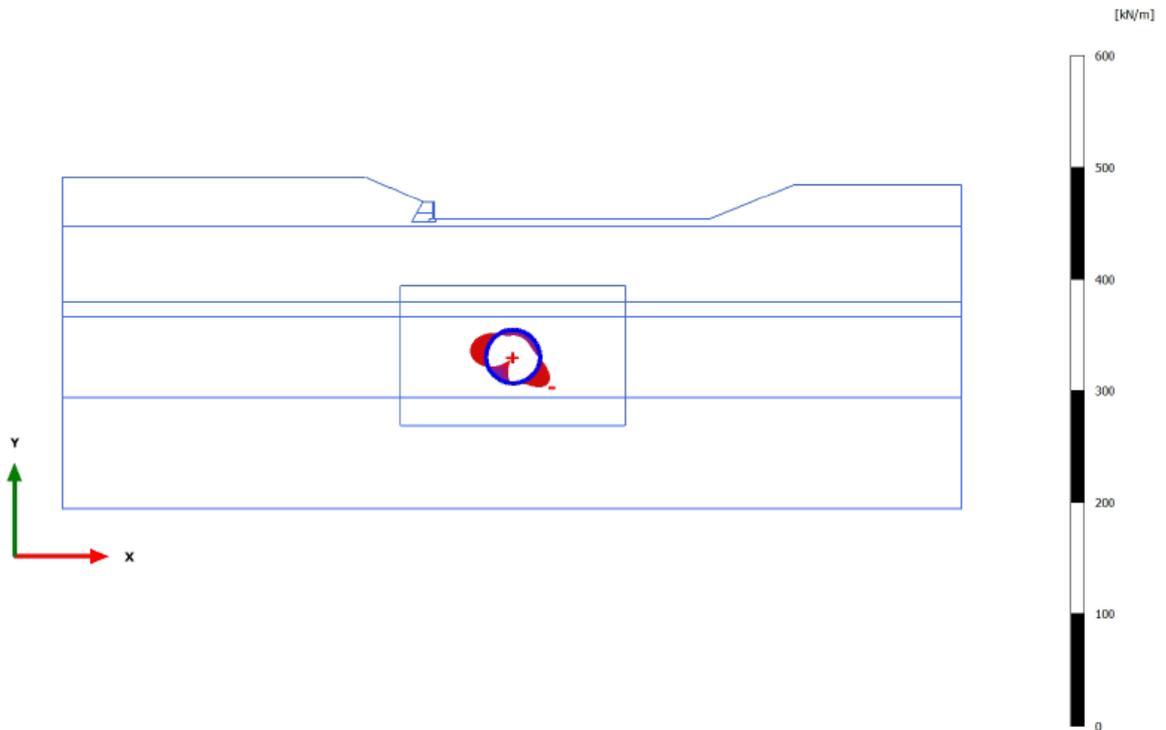


CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1



Shear forces Q (scaled up 0,200 times)

Maximum value = 20,14 kN/m (Element 12 at Node 21695)

Minimum value = -15,16 kN/m (Element 18 at Node 29906)

Figura 82. Forze di taglio – SLU1a



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

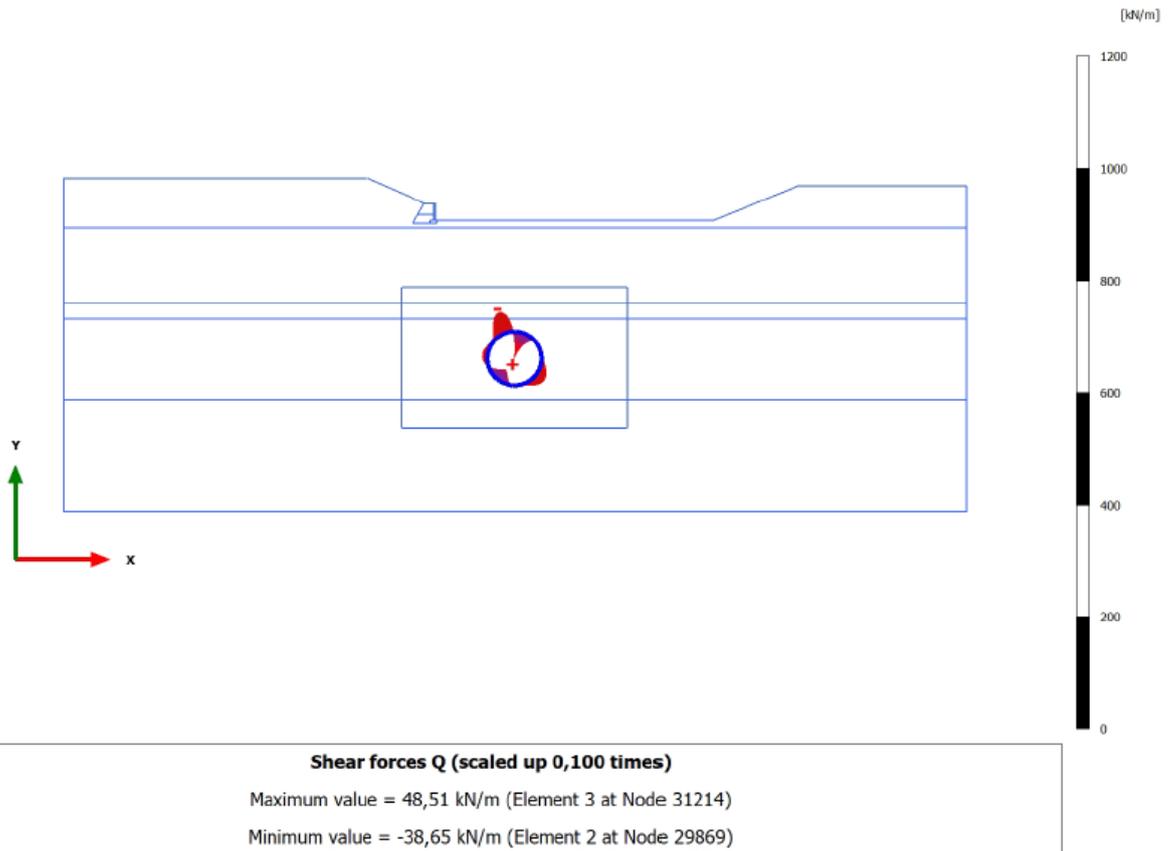


Figura 83. Forze di taglio – SLU2



CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1

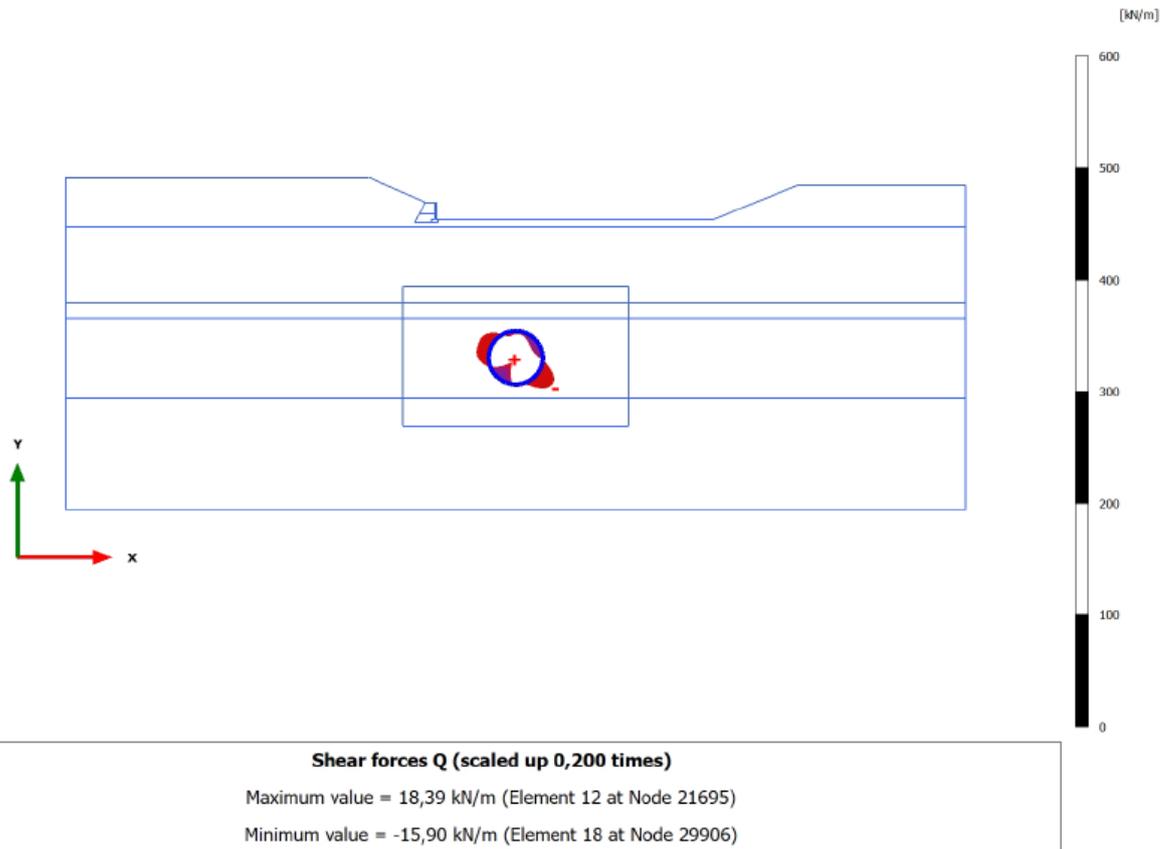


Figura 84. Forze di taglio – SLU1b

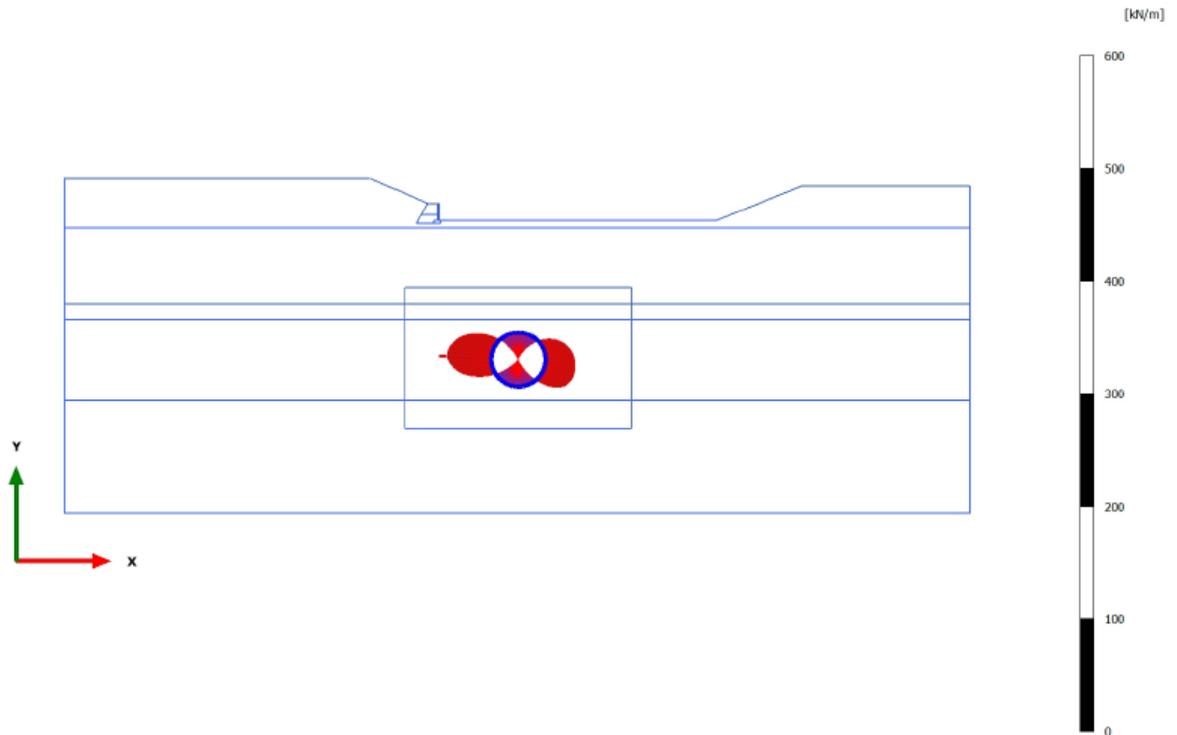


CITTA' DI TORINO

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

Galleria a foro cieco – Scavo Meccanizzato –
Relazione Tecnica e di calcolo anello

01_MTL2T1A2DSTRGT0R001-0-1



Shear forces Q (scaled up 0,200 times)

Maximum value = 29,61 kN/m (Element 4 at Node 31195)

Minimum value = -38,98 kN/m (Element 8 at Node 24744)

Figura 85. Forze di taglio – SLU3