

**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**

<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		 <b>INFRA.TO</b> <i>infrastrutture per la mobilità</i>										<b>INFRATRASPORTI.TO S.r.l.</b>		
DIRETTORE PROGETTAZIONE Responsabile integrazione discipline specialistiche	IL PROGETTISTA													
Ing. R. Crova Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 6038S	Ing. F. Rizzo Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 9337K	<b>STRUTTURE E METODI COSTRUTTIVI</b> <b>STAZIONI SPECIALI – STAZIONE CARLO ALBERTO</b> RELAZIONE DI CALCOLO OPERE DI SOSTEGNO STAZIONE												
		ELABORATO							REV.		SCALA	DATA		
											Int.	Est.		
BIM MANAGER Geom. L. D'Accardi		MT	L2	T1	A2	D	STR	SCA	R	001	0	1	-	25/11/2022

AGGIORNAMENTI

Fg. 1 di 1

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	VISTO
0	EMISSIONE	18/01/22	VFI	ECa	FRi	RCr
1	EMISSIONE FINALE A SEGUITO DI VERIFICA PREVENTIVA	25/11/22	VFI	ECa	FRi	RCr
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-

<table border="1"> <tr> <td>LOTTO 2</td> <td>CARTELLA</td> <td>9.3.3</td> <td>1</td> <td>MTL2T1A2D</td> <td>STRSCAR001</td> </tr> </table>	LOTTO 2	CARTELLA	9.3.3	1	MTL2T1A2D	STRSCAR001	<p align="center"><b>STAZIONE APPALTANTE</b></p> <p align="center">DIRETTORE DI DIVISIONE INFRASTRUTTURE E MOBILITÀ Ing. R. Bertasio</p> <p align="center">RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. A. Strozziro</p>
LOTTO 2	CARTELLA	9.3.3	1	MTL2T1A2D	STRSCAR001		

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico-Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna-Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## INDICE

<b>1.</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>5</b>
<b>1.1</b>	<b>SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE</b>	<b>6</b>
<b>1.2</b>	<b>DESCRIZIONE DELLE OPERE</b>	<b>7</b>
<b>2.</b>	<b>NORMATIVE DI RIFERIMENTO</b>	<b>8</b>
<b>3.</b>	<b>CARATTERISTICHE DEI MATERIALI</b>	<b>11</b>
<b>3.1</b>	<b>CALCESTRUZZI</b>	<b>11</b>
3.1.1	CALCESTRUZZO UTILIZZATO PER I SOLAI DI STAZIONE E STRUTTURE INTERNE	11
3.1.2	CALCESTRUZZO UTILIZZATO PER DIAFRAMMI	11
<b>3.2</b>	<b>ACCIAI PER ARMATURE IN C.A.</b>	<b>11</b>
<b>3.3</b>	<b>ACCIAIO PER CARPENTERIA METALLICA</b>	<b>12</b>
<b>3.4</b>	<b>GFRP</b>	<b>12</b>
<b>4.</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA</b>	<b>13</b>
<b>5.</b>	<b>PRINCIPALI ASSUNZIONI DELLA PROGETTAZIONE</b>	<b>16</b>
<b>5.1</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE SISMICA</b>	<b>16</b>
<b>5.2</b>	<b>COMBINAZIONI DI CARICO</b>	<b>17</b>
<b>5.3</b>	<b>CRITERI DELLA MODELLAZIONE NUMERICA</b>	<b>19</b>
5.3.1	GEOMETRIA DEL MODELLO NUMERICO	19
5.3.2	ELEMENTI STRUTTURALI	21
5.3.3	CARICHI	22
5.3.3.1	Carichi superficiali	22
5.3.3.2	Azione sismica	22
<b>6.</b>	<b>ANALISI NUMERICHE</b>	<b>26</b>
<b>6.1</b>	<b>FASI DI CALCOLO MODELLO GEOTECNICO</b>	<b>26</b>
<b>6.1</b>	<b>OUTPUT</b>	<b>38</b>
6.1.1	SOLLECITAZIONI PARATIA	38
6.1.2	SPOSTAMENTI PARATIA	40
6.1.3	SOLLECITAZIONI BARRETTE TEMPORANEE	41
6.1.4	SOLLECITAZIONE PARATIA DI PALI MEDI 800 MM – ACCESSO SPECIALE	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
<b>7.</b>	<b>VERIFICHE STRUTTURALI</b>	<b>43</b>

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

<b>7.1</b>	<b>DIAFRAMMI - VERIFICHE DELLE SOLLECITAZIONI FLETTENTI SLU</b>	<b>43</b>
<b>7.2</b>	<b>DIAFRAMMI - VERIFICA DELLE SOLLECITAZIONI TAGLIANTI SLU</b>	<b>47</b>
<b>7.1</b>	<b>BARRETTE TEMPORANEE - VERIFICHE SLU</b>	<b>51</b>
<b>7.2</b>	<b>VERIFICHE SLE</b>	<b>51</b>
<b>7.3</b>	<b>VERIFICA DI DEFORMABILITÀ A LUNGO TERMINE</b>	<b>54</b>
<b>8.</b>	<b>VERIFICHE GEOTECNICHE</b>	<b>55</b>
<b>8.1</b>	<b>VERIFICA TAMPONE DI FONDO</b>	<b>55</b>
<b>8.2</b>	<b>VERIFICA CAPACITÀ PORTANTE BARRETTE (KINGPOST)</b>	<b>59</b>
<b>8.3</b>	<b>VERIFICA CAPACITÀ PORTANTE PARATIA</b>	<b>62</b>
<b>8.4</b>	<b>VERIFICA CAPACITÀ PORTANTE DELLA SOLETTA DI FONDO</b>	<b>63</b>
<b>8.5</b>	<b>VERIFICA PUNTONI TEMPORANEI</b>	<b>64</b>
<b>8.6</b>	<b>VERIFICA TRAVE DI RIPARTIZIONE</b>	<b>68</b>
<b>8.7</b>	<b>STABILITÀ GLOBALE</b>	<b>70</b>
<b>8.8</b>	<b>VERIFICA A GALLEGGIAMENTO</b>	<b>76</b>
<b>9.</b>	<b>VALIDAZIONE DEI MODELLI ESEGUITI</b>	<b>78</b>
	<b>ALLEGATO N.1</b>	<b>81</b>
	<b>ALLEGATO N.2</b>	<b>99</b>
	<b>ALLEGATO N.3</b>	<b>107</b>
<b>1.</b>	<b>VERIFICA DELLA CONNESSIONE SOLETTA-DIAFRAMMA</b>	<b>108</b>
<b>1.1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>108</b>
<b>1.2</b>	<b>ANALISI PLAXIS AGGIUNTIVE PER TENER CONTO DELL'ECCELTICITÀ</b>	<b>109</b>
<b>1.3</b>	<b>VERIFICA A FLESSIONE E TAGLIO DELLA SEZIONE RIDOTTA</b>	<b>114</b>
<b>1.4</b>	<b>VERIFICA DELL'APPOGGIO SOLETTA-PARATIA</b>	<b>118</b>
<b>1.5</b>	<b>VERIFICA DELLE PRESSIONI DI CONTATTO SULLE IMPERMEABILIZZAZIONI</b>	<b>121</b>

## INDICE DELLE FIGURE

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

5

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Figura 2.	Modello 3D – Stazione Carlo Alberto	6
Figura 3.	Stralcio stratigrafia stazione Carlo Alberto	14
Figura 4.	Sezione di calcolo	20
Figura 5.	Schematizzazione metodo di Wood	23
Figura 6.	Stralcio planimetria stazione Carlo Alberto con indicazione della sezione di calcolo A-A	26
Figura 7.	Fasi di calcolo modello geotecnico	36
Figura 8.	Modello numerico Plaxis – Accesso speciale.	37
Figura 9.	Diaframma - SLE Momento flettente - Inviluppo	38
Figura 10.	Diaframma - SLE Diagramma taglio - Inviluppo	39
Figura 11.	Diaframma - SLE Diagramma degli spostamenti orizzontali fase 22	40
Figura 12.	Barrette - Momento flettente - Inviluppo	41
Figura 13.	Barrette – Diagramma taglio – Inviluppo	42
Tabella 15	Sollecitazioni barretta	42
Figura 14.	Paratia pali medi – Diagramma taglio e momento – Inviluppo	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figura 15.	Diaframmi - SLU Diagramma delle sollecitazioni flettenti	44
Figura 16.	Diaframma - SLU Diagramma delle sollecitazioni taglianti	48
Figura 17.	Spostamenti orizzontali a lungo termine	54
Figura 18.	Possibili meccanismi di collasso: a) sollevamento del tampone di fondo e dei diaframmi b) sollevamento del tampone di fondo c) rottura del tampone di fondo	55
Figura 19.	Zone di plasticizzazione	63
Figura 20.	Fattore di sicurezza nella fase costruttiva	70
Figura 21.	Rapporto tra tensione tangenziale massima e tensione tangenziale mobilitata – breve termine	71
Figura 22.	Fattore di sicurezza a lungo termine	72
Figura 23.	Rapporto tra tensione tangenziale massima e tensione tangenziale mobilitata – lungo termine	73
Figura 24.	Tensioni orizzontali efficaci paratia	74
Figura 25.	Confronto tensione limite attive e passive con tensioni orizzontali Plaxis	75
Figura 26.	Modello 3D-gabbia soft eye	100
Figura 27.	Modellazione dell'eccentricità tra soletta e diaframma – Stazioni S4G	109
Figura 28.	Valore di reazione vincolare di riferimento per il calcolo del momento flettente aggiuntivo – Stazioni S4G	110
Figura 29.	Valore di reazione vincolare di riferimento per il calcolo del momento flettente aggiuntivo – Stazione Carlo Alberto	110
Figura 30.	Distribuzione dei momenti flettenti in assenza di eccentricità (fase finale di scavo – assenza di fodere)	111
Figura 31.	Distribuzione dei momenti flettenti in presenza di eccentricità (fase finale di scavo – assenza di fodere)	112
Figura 32.	Distribuzione dei momenti flettenti in presenza di eccentricità (fase finale di scavo – assenza di fodere)	113

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Figura 33. Diaframmi – SLU Diagramma delle sollecitazioni flettenti – Sezione ridotta	114
Figura 34. Diaframmi – SLU Diagramma delle sollecitazioni taglianti – Sezione ridotta	116

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 Parametri geotecnici	15
Tabella 2 Parametri colonne Jet grouting	15
Tabella 3 Livelli di falda	15
Tabella 4 Probabilità di superamento PVR con SLV	16
Tabella 5 Parametri sismici del sito	17
Tabella 6 Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I)	18
Tabella 7 Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (Tab. 6.2.II)	18
Tabella 8 Coefficienti parziali per le verifiche agli stati limite ultimi STR e GEO di muri di sostegno (Tab. 6.5.I)	18
Tabella 9 Parametri input elementi strutturali	21
Tabella 10 Carichi superficiali	22
Tabella 11 Parametri input azione sismica	24
Tabella 12 Parametri input azione sismica	25
Tabella 13 Fasi di calcolo	27
Tabella 14 Sollecitazioni paratia	40
Tabella 15 Sollecitazioni barretta	42
Tabella 16 Armature longitudinali paratia	43
Tabella 17 Diaframmi - Verifica SLU flessione Sezione A – Seconda gabbia	45
Tabella 18 Diaframmi - Verifica SLU flessione Sezione B – Terza Gabbia	46
Tabella 19 Diaframma - Verifica SLU – Taglio – Sezione A	49
Tabella 20 Diaframma - Verifica SLU – Taglio – Sezione B	50
Tabella 23 Diaframmi - Verifica SLE –Sezione A -Seconda Gabbia	52
Tabella 24 Diaframmi - Verifica SLE –Sezione B -Terza Gabbia	52
Tabella 25 Verifica tampone di fondo	55
Tabella 26 Verifica capacità portante barrette	60
Tabella 27 Verifica capacità portante paratia	62
Tabella 28 Verifica trave di ripartizione	68
Tabella 29 Diaframmi – Verifica SLU flessione - Sezione ridotta -Piano Banchina	115
<b>Tabella 30 Diaframmi – Verifica SLU Sollecitazioni taglianti – Sezione ridotta</b>	<b>117</b>



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 1. PREMESSA

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, geotecniche e le verifiche relative alle opere di sostegno della Stazione Carlo Alberto.

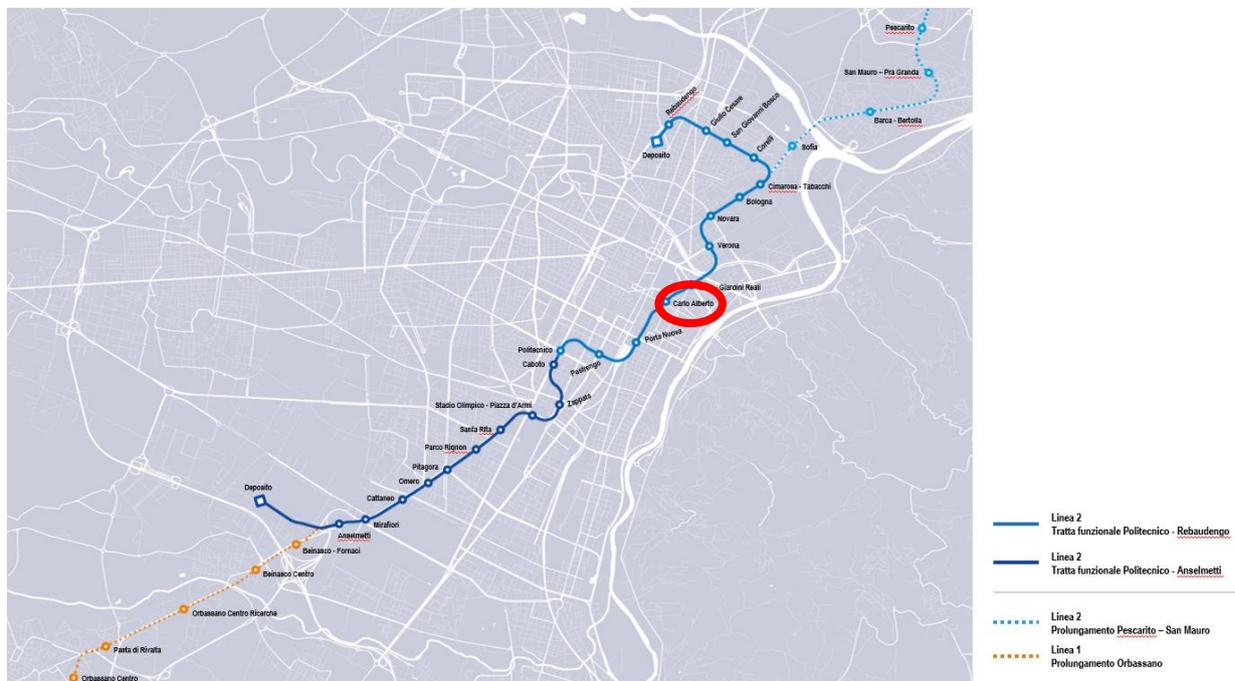


Figura 1. Key-plan della linea 2 – tratta funzionale Politecnico-Rebaudengo

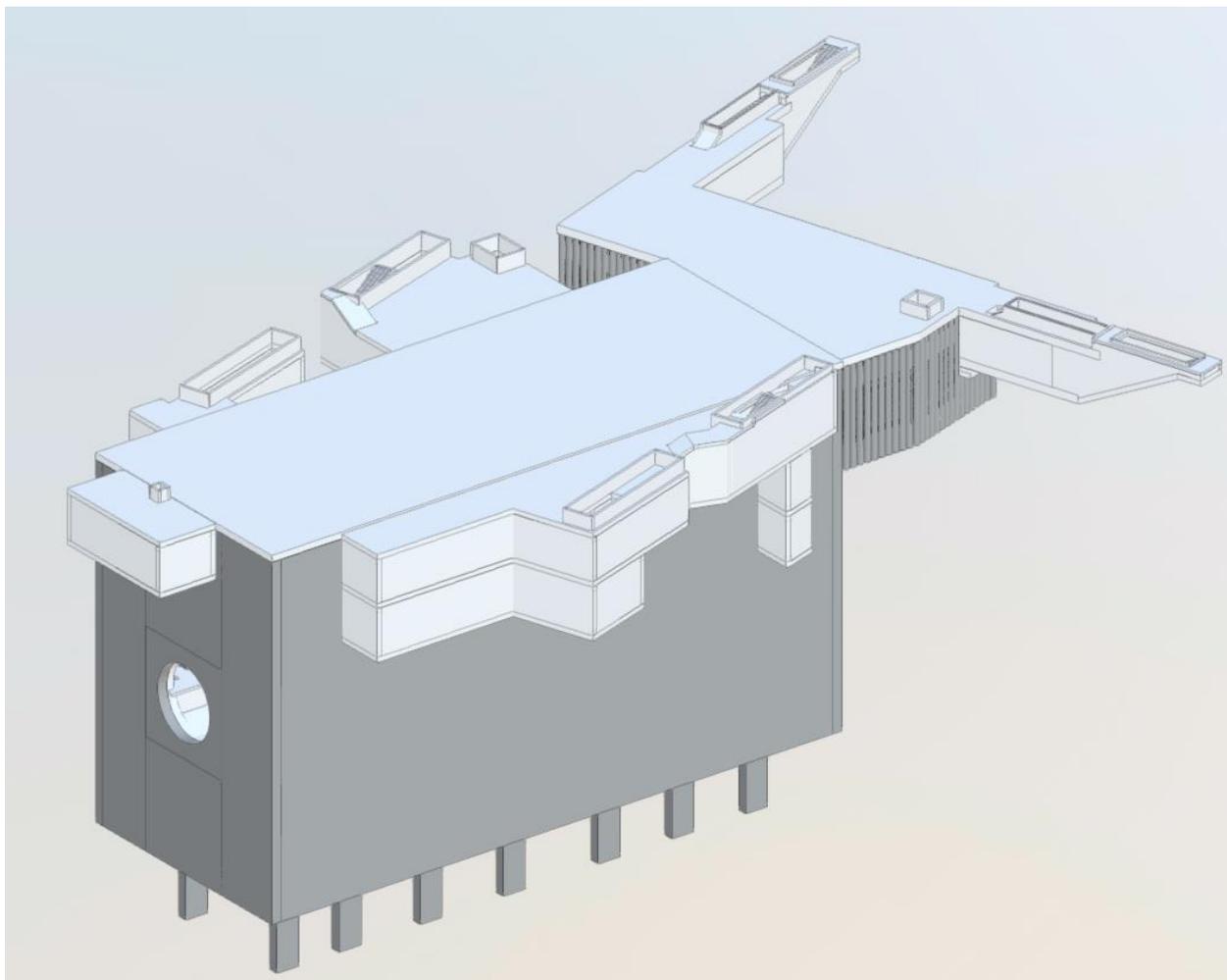


Figura 2. Modello 3D – Stazione Carlo Alberto

### 1.1 Scopo e campo di applicazione

In questa relazione vengono dimensionati soltanto i diaframmi e le strutture di sostegno temporanee; infatti, sebbene inserite nei modelli di calcolo, le verifiche relative alle solette di copertura, intermedia vengono riportate nella relazione relativa alle strutture interne (MTL2T1A2DSTRSCAR002) in quanto i carichi dimensionanti per tali strutture sono quelli a lungo termine. Nella presente relazione vengono altresì riportate le verifiche strutturali della paratia di pali su cui sarà appoggiato il solaio di copertura dell'accesso speciale (atrio di stazione). Tale struttura ha funzioni statiche di breve (scavo sotto soletta top down) e di lungo termine.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 1.2 Descrizione delle opere

La stazione Carlo Alberto è un manufatto interrato a quattro livelli, con fondo scavo posto alla profondità di circa 32 m rispetto al piano campagna. Al suo interno troviamo un solettone di fondo di spessore variabile e sagomato per consentire il passaggio a vuoto della TBM, un livello quota banchina, tre solai intermedi ed uno di copertura il cui estradosso è posto ad una quota pari a -1.80 m rispetto al piano campagna.

La stazione verrà realizzata tramite la tecnologia esecutiva di tipo *top-down* caratterizzata da uno scavo sostenuto da diaframmi contrastati da solai permanenti e puntoni temporanei. I diaframmi presentano spessore di 1.20 m e sono immorsati al di sotto del fondo scavo di circa 12.0 m. La stabilità del fondo scavo è garantita da un tampone di fondo realizzato mediante colonne in Jet Grouting.

Data la luce della stazione verranno realizzati in concomitanza alla realizzazione dei diaframmi dei setti temporanei che fungeranno da sostegno alle solette di copertura ed intermedie. Durante le fasi costruttive, al di sotto della seconda soletta intermedia, lo scavo sarà sostenuto da tre livelli di puntoni temporanei. La rimozione degli ultimi due livelli di puntoni temporanei si rende necessaria al fine di garantire gli spazi necessari per il passaggio a vuoto della TBM. Il primo livello di puntoni sarà mantenuto fino alla realizzazione della terza soletta intermedia che avverrà nella fase successiva al passaggio della macchina di scavo.

Il sistema di costruzione dei diaframmi in calcestruzzo armato consiste nel realizzare inizialmente i primari e poi i secondari con una sovrapposizione compresa tra i 10 e i 30cm. In relazione a tale tecnica esecutiva, anche le gabbie di armatura saranno calibrate per prevedere la sovrapposizione dei diaframmi secondari sui primari. L'esecuzione delle paratie è preceduta dalla costruzione di coree guida che seguono il tracciato.

Il collegamento tra il solaio e le paratie è realizzato per mezzo di tasche d'appoggio rettangolari, realizzate grazie all'inserimento di scatole metalliche, già inserita nelle gabbie d'armatura dei diaframmi.

L'accesso speciale verrà scavato contestualmente al corpo stazione e dopo aver realizzato una paratia di medio pali di 400 mm a protezione degli edifici posti lungo Via Cesare Battisti. Il solaio di copertura sarà appoggiato lungo tutto il perimetro dell'accesso speciale su una paratia di pali trivellati di diametro 800 mm e interasse 900 mm.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

La progettazione è stata realizzata facendo riferimento alle Normative Nazionali sottoelencate:

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

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

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

Quando necessario, saranno altresì assunti a riferimento i Codici Normativi Europei elencati di seguito:

#### Eurocode 0 – Basis of structural design

- EN 1990 Basis of structural design.

#### Eurocode 1 – Actions on structures

- EN 1991-1-1 Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings
- EN 1991-1-2 Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire.
- EN 1991-1-3 Part 1-3: General actions – Snow loads.
- EN 1991-1-4 Part 1-4: General actions – Wind actions.
- EN 1991-1-5 Part 1-5: General actions – Thermal actions.
- EN 1991-1-6 Part 1-6: General actions – Actions during execution.
- EN 1991-1-7 Part 1-7: General actions – Accidental Actions.
- EN 1991-2 Part 2: Traffic loads on bridges.
- EN 1991-3 Part 3: Actions induced by cranes and Machinery.
- EN 1991-4 Part 4: Silos and tanks.

#### Eurocode 2 – Design of concrete structures

- EN 1992-1-1 Part 1-1: General rules and rules for Buildings.
- EN 1992-1-2 Part 1-2: General rules – Structural fire Design.
- EN 1992-3 Part 3: Liquid retaining and containment Structures.

#### Eurocode 3 – Design of steel structures

- EN 1993-1-1 Part 1-1: General rules and rules for Buildings
- EN 1993-1-2 Part 1-2: General rules Structural fire design
- EN 1993-1-3 Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting
- EN 1993-1-4 Part 1-4: General rules – Supplementary rules for stainless steels
- EN 1993-1-5 Part 1-5: Plated structural elements
- EN 1993-1-6 Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures
- EN 1993-1-7 Part 1-7: Plated structures subject to out of plane loading
- EN 1993-1-8 Part 1-8: Design of joints
- EN 1993-1-9 Part 1-9: Fatigue

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

- EN 1993-1-10 Part 1-10: Material Toughness and through-thickness properties
- EN 1993-1-11 Part 1-11: Design of structures with tension components
- EN 1993-1-12 Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S 700
- EN 1993-2 Part 2: Steel Bridges
- EN 1993-3-1 Part 3-1: Towers, masts, and chimneys -Towers and masts
- EN 1993-3-2 Part 3-2: Towers, masts, and chimneys – Chimneys
- EN 1993-4-1 Part 4-1: Silos
- EN 1993-4-2 Part 4-2: Tanks
- EN 1993-4-3 Part 4-3: Pipelines
- EN 1993-5 Part 5: Piling
- EN 1993-6 Part 6: Crane supporting structures

#### Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures

- EN 1994-1-1 Part 1-1: General rules and rules for Buildings
- EN 1994-1-2 Part 1-2: General rules – Structural Fire Design
- EN 1994-2 Part 2: General rules and rules for bridges

#### Eurocode 7 – Geotechnical design

- EN 1997-1 Part 1: General rules
- EN 1997-2 Part 2: Ground investigation and testing
- EN 1997-3 Part 3: Design assisted by field testing

#### Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance

- EN 1998-1 Part 1: General rules, seismic actions, and rules for buildings
- EN 1998-2 Part 2: Bridges
- EN 1998-3 Part 3: Assessment of retrofitting of buildings
- EN 1998-4 Part 4: Silos, tanks, and pipelines
- EN 1998-5 Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects
- EN 1998-6 Part 6: Towers, masts, and chimneys

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

### 3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

#### 3.1 Calcestruzzi

##### 3.1.1 Calcestruzzo utilizzato per i solai di stazione e strutture interne

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

##### 3.1.2 Calcestruzzo utilizzato per diaframmi

Tipo:	C25/30
Modulo di deformazione:	$E_c=30000$ Mpa
Resistenza caratteristica cubica:	$R_{ck}=30$ Mpa
Resistenza caratteristica cilindrica:	$f_{ck}=25$ Mpa
Peso per unità di volume:	$Y=25$ KN/m <sup>3</sup>
Classe di Esposizione	<i>XC2 (Superfici di calcestruzzo a contatto con acqua per lungo tempo / Molte fondazioni)</i>

#### 3.2 Acciai per armature in c.a.

Tipo B450C saldabile (ex FeB44K saldabile), per diametri compresi tra 6 e 40 mm:

$$f_{ynom}=450 \text{ Mpa}$$

$$f_{tnom} = 540 \text{ Mpa}$$

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

$$f_{yk} \geq f_{ynom} \text{ frattile } 5\%$$

$$f_{tk} \geq f_{tnom} \text{ frattile } 5\%$$

$$1.15 \leq (f_t/f_y) k \leq 1.35 \text{ frattile } 10\%$$

$$(f_y/f_{ynom}) k \leq 1.25 \text{ frattile } 10\%$$

$$\text{Allungamento } (A_{gt})k \geq 7.5\% \text{ frattile } 10\%$$

Reti e tralici elettrosaldati:

$$f_{yk} \geq 450 \text{ Mpa}$$

$$f_{tk} \geq 540 \text{ Mpa}$$

$$(f_{tk}/f_{yk}) \geq 1.10$$

### 3.3 Acciaio per carpenteria metallica

Tipo:	S355 J0	
	$t \leq 40\text{mm}$	$40\text{mm} < t \leq 80\text{mm}$
Modulo di deformazione:	$E_c = 210 \text{ Gpa}$	$E_c = 210\text{Gpa}$
Resistenza a snervamento caratteristica:	$f_{yk} = 355 \text{ Mpa}$	$f_{yk} = 335 \text{ Mpa}$
Resistenza a snervamento di progetto:	$f_{yd} = 338 \text{ Mpa}$	$f_{yd} = 319 \text{ Mpa}$
Resistenza a rottura caratteristica:	$f_{yk} = 510 \text{ Mpa}$	$f_{yk} = 470 \text{ Mpa}$
Peso per unità di volume:	$\gamma = 78 \text{ KN/m}^3$	$\gamma = 78 \text{ KN/m}^3$

### 3.4 GFRP

Resistenza a flessione di progetto:	$f_{yd} = 900 \text{ MPa}$
Resistenza a taglio di progetto:	$f_{yd} = 150 \text{ MPa}$
Modulo di deformazione:	$E_c = 46000 \text{ MPa}$

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Lo scavo della stazione denominata Carlo Alberto è interessato da una coltre superiore di circa 5,50 m di terreno superficiale denominato Unità 1, mentre a livelli più profondi fino ad una estensione di interesse per le opere di scavo è presente un materiale ghiaioso sabbioso denominato Unità 2 e potenzialmente le unità U5/U7, che non vengono considerate nella presente fase di progettazione, in via cautelativa, a causa del permanere di incertezze in merito alla profondità e continuità degli strati in questione.

La definizione della quota superiore dell'unità U5 nel profilo si basa su alcuni sondaggi di maggiore profondità distanti dall'area in oggetto (oltre 100m). Gli altri sondaggi eseguiti durante le diverse campagne indagini risultano meno profondi e non intercettano le unità U5/U7.

Inoltre, il limite geologico è pertanto indicato negli elaborati MTL2T1A0DGEOSCAT001 e MTL2T1A0DGEOGENTO003.5 come "limite presunto" e permane incertezza in merito alla profondità e continuità dello strato in questione.

Il criterio alla base delle assunzioni è garantire la fattibilità della soluzione considerato l'attuale livello di progettazione e la limitatezza delle informazioni. Pertanto, il progetto della stazione è basato sui profili geotecnici e le interpretazioni precedenti la campagna indagini 2021. Nella successiva fase di progettazione si potranno rivedere le soluzioni a valle di una specifica campagna indagini volta alla conferma del limite geologico della U5, con conseguente possibilità di ottimizzazioni del tampone di fondo.

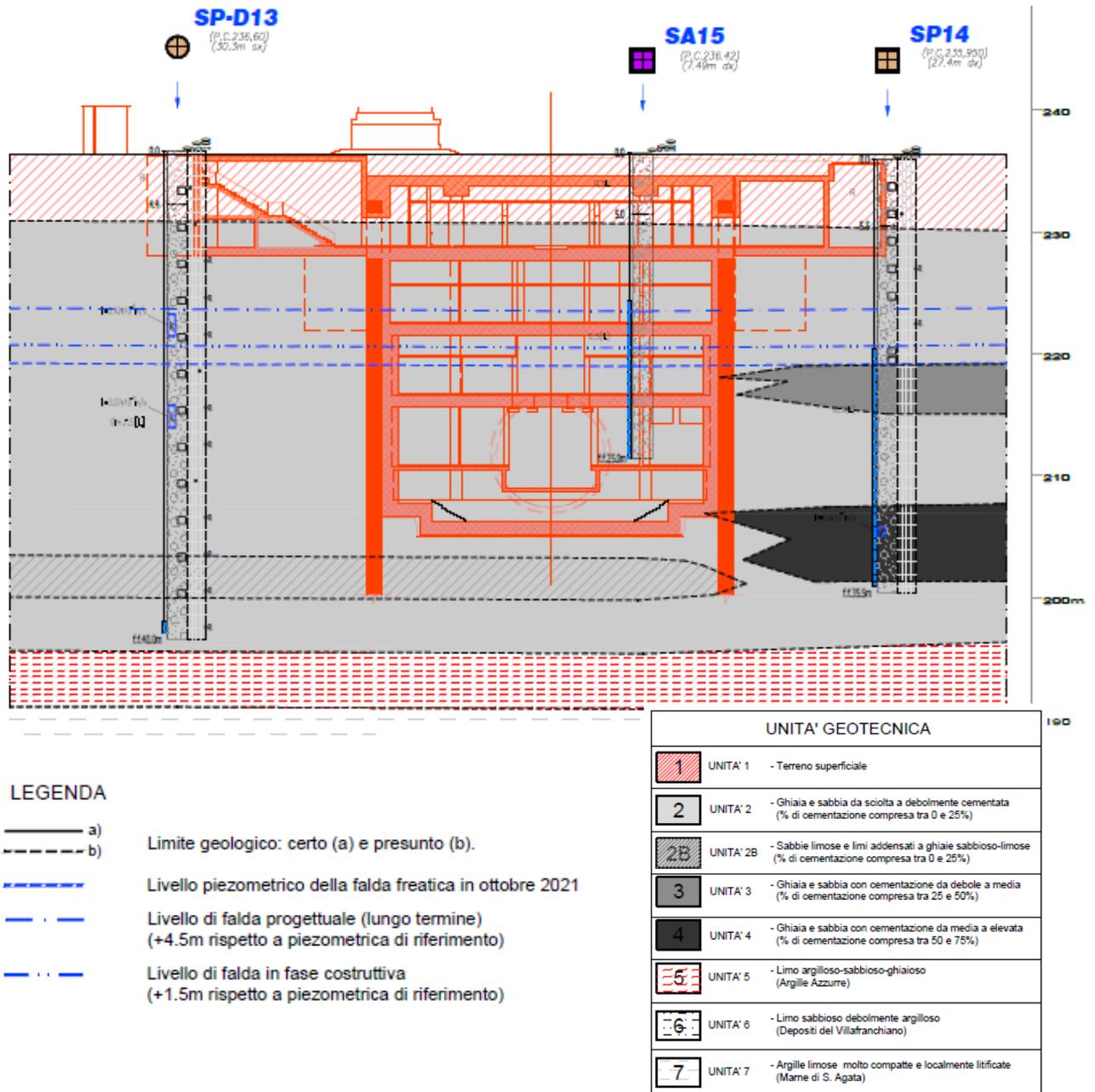


Figura 3. Stralcio stratigrafia stazione Carlo Alberto

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

I parametri geotecnici utilizzati per il presente progetto sono riportati nella seguente tabella:

**Tabella 1 Parametri geotecnici**

<b>Stratigrafia e Parametri geotecnici</b>						
<b>Unità geotecnica</b>	<b>Z da p.c</b>	<b><math>\gamma</math></b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>c</b>	<b>Ev</b>	<b>v</b>
	[m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[kPa]	[Mpa]	[-]
<b>U1</b> (Terreno superficiale)	0 a -5,5	19	29	0	15	0,3
<b>U2</b> (Ghiaie e sabbie)	-5,5 a -36	19	36	10	150	0,3
<b>U5</b> (Argille azzurre)	>-36	20	23	40	65	0,3

I parametri utilizzati per la modellazione delle colonne di Jet grouting costituenti il tampone di fondo sono riassunti nella seguente tabella:

**Tabella 2 Parametri colonne Jet grouting**

<b>Parametri JG</b>					
<b><math>\gamma</math></b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>c</b>	<b>UCS</b>	<b>E</b>	<b>v</b>
[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[-]
22	36	150	590	450	0,3

Il livello della falda considerato è distinto per condizioni di breve periodo e lungo periodo considerando il livello di piano campagna è pari a:

**Tabella 3 Livelli di falda**

	m da p.c.	m.s.l.m
Livello piezometrico 2021 (MTL2T1A0DGEOSCAT001)	-17.0	+218.95
Livello piezometrico 2018	-16.5	+219.45
B T (+1.5 da livello piezometrico di riferimento) - Fase costruttiva	-15.0	+220.95
L T (+3 da breve termine) - Ultimo stage	-12.0	+223.95

Il livello di falda utilizzato per le analisi corrisponde ai dati del 2018, che rispetto alle letture estratte nel 2021, presentano condizioni più sfavorevoli.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 5. PRINCIPALI ASSUNZIONI DELLA PROGETTAZIONE

### 5.1 Caratterizzazione sismica

Secondo quanto prescritto dal D.M. 17 gennaio 2018, ai fini delle verifiche di sicurezza delle strutture devono essere definiti i seguenti parametri:

- Vita nominale dell'opera: intesa come il numero di anni nei quali la struttura deve poter essere utilizzata per lo scopo al quale è stata destinata senza necessita di manutenzioni. Per l'opera oggetto di questo elaborato si considera una vita nominale  $V_N=100$  anni;
- Classe d'uso: in presenza di azioni sismiche, in relazione alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi  $z < d'uso$ . Nel caso in esame si fa riferimento alla classe d'uso III (coefficiente pari a 1.5);
- Periodo di riferimento per l'azione sismica: viene definito come il prodotto tra la vita nominale ed il coefficiente d'uso. Per il caso in esame il periodo di riferimento è di 150 anni.

A partire dalla posizione sul territorio nazionale dell'opera, e in dipendenza dei parametri su descritti, vengono definiti i parametri sismici necessari per le verifiche:

- *Vita nominale dell'opera ( $V_N$ ):* nel caso delle stazioni è di **100 anni**;
- *Classe d'uso ( $C_u$ ):* In caso di costruzioni che prevedono affollamenti significativi **la classe è III**, a cui è associato un coefficiente di 1.5;
- *Periodo di riferimento ( $V_R$ ):* prodotto tra la vita nominale e la classe d'uso ed è pari a **150 anni**.
- *Periodo di ritorno ( $T_R$ ):*  $T_R = -V_R / \ln(1-P_{VR})$ , considerando  $P_{VR}$  la probabilità di superamento nel periodo di riferimento e considerando la condizione SLV, ovvero lo stato limite di salvaguardia della vita.

**Tabella 4 Probabilità di superamento PVR con SLV**

<b>VN</b>	<b>Cu</b>	<b>VR</b>	<b>PVR</b>	<b>TR</b>
<b>[anni]</b>	-	<b>[anni]</b>	-	<b>[anni]</b>
100	1.5	150	10%	1424

In relazione al tempo di ritorno e alla probabilità di superamento dello stato limite considerato è possibile dedurre i parametri di accelerazione massima ( $a_g$ ) e i parametri spettrali ( $F_0, T^*c$ ).

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

**Tabella 5 Parametri sismici del sito**

<b>Stazione</b>	<b>ag</b>	<b>F0</b>	<b>T*c</b>
	<b>[g]</b>	-	<b>[sec]</b>
CARLO ALBERTO	0.067	2.890	0.292

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

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

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

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

## 5.2 Combinazioni di carico

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

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

A seconda della verifica che si intende effettuare, verranno utilizzati coefficienti che riducono i parametri meccanici di resistenza del terreno o coefficienti che amplificano gli effetti delle azioni.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

In particolare, sono stati considerati i seguenti coefficienti per le verifiche:

**Tabella 6 Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I)**

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

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

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

**Tabella 7 Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (Tab. 6.2.II)**

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

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

**Tabella 8 Coefficienti parziali per le verifiche agli stati limite ultimi STR e GEO di muri di sostegno (Tab. 6.5.I)**

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

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

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

### 5.3 Criteri della modellazione numerica

La modellazione numerica viene effettuata con il software bidimensionale agli elementi finiti Plaxis 2D, che permette la simulazione dell'interazione terreno-struttura, delle fasi costruttive e del comportamento non lineare del terreno durante le sequenze di scavo.

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

Tutte le strutture sono state modellate mediante elementi già implementati nella libreria del software. Si è utilizzato:

- per i diaframmi: elementi "plate"
- per le solette: elementi "plate" (vincolate con cerniera ai diaframmi)
- per le barrette: elementi "plate";
- per puntoni temporanei: elementi "Fixed End Anchor"

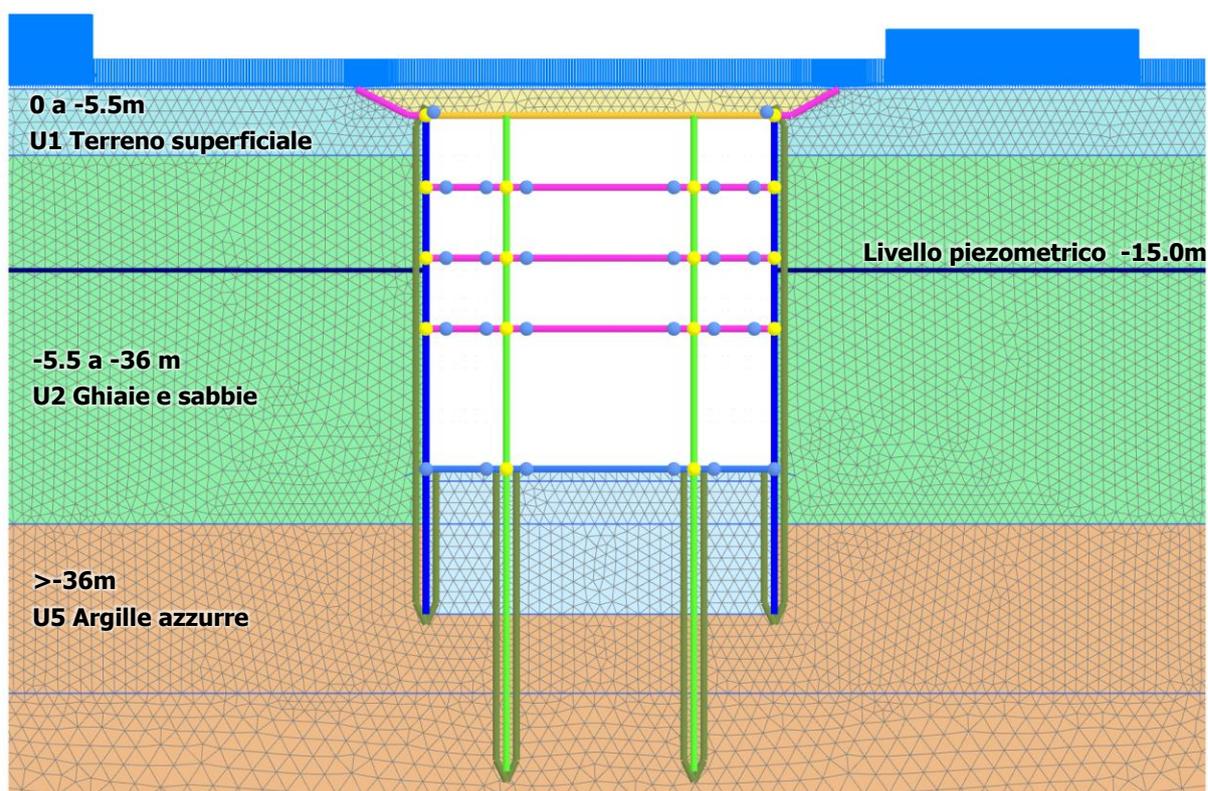
Attraverso l'analisi numerica si intende simulare il percorso delle tensioni e delle deformazioni nel terreno conseguente allo scavo. La condizione geostatica è stata inizializzata ipotizzando un coefficiente di spinta a riposo  $K_0$  ottenuto attraverso la relazione di Jaky:

$$k_0 = 1 - \text{sen}\varphi'$$

Per il terreno è stato considerato il modello costitutivo elasto-plastico tipo "Mohr Coulomb".

#### 5.3.1 Geometria del modello numerico

Il modello geometrico è mostrato nella figura seguente e deriva definizione della geometria della sezione considerata in termini di configurazione delle strutture della stazione e delle condizioni geologiche considerate.


**Figura 4. Sezione di calcolo**

La geometria delle sezioni considerate è generata a partire dalle distanze asse-asse ed è la seguente:

Elemento	Z [m]
Quota piano campagna	0,00
Soletta di copertura	-1.8
Soletta intermedia 1	-7.77
Soletta intermedia 2	-14
Soletta intermedia 3	-19.85
Soletta di base	-31.55
Piede paratia	-43.55
Piede king post	-56.45

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

### 5.3.2 Elementi strutturali

La modellazione degli elementi strutturali è stata effettuata tramite l'utilizzo di elementi plate la cui rigidità è stata valutata per metro lineare. Per gli elementi quali le barrette temporanee e i micropali, caratterizzati da una spaziatura nel piano ortogonale alla sezione di analisi, la rigidità assiale e flessionale equivalente al metro lineare è stata valutata in accordo con le seguenti relazioni:

$$EA_{Eq.} = \frac{EA}{i}$$

$$EI_{Eq.} = \frac{EI}{i}$$

I parametri utilizzati nel modello FEM per gli elementi strutturali sono riportati nelle tabelle di seguito.

**Tabella 9 Parametri input elementi strutturali**

<b>Paratia H=120 cm</b>		
EA	37,20E+6	kN/m
EI	4,46E+6	kNm <sup>2</sup> /m

<b>King post 280 x 120 cm</b>		
EA	7,760E+6	kN/m
EI	932,0E+3	kNm <sup>2</sup> /m

<b>Soletta di copertura H=80 cm</b>		
EA	25,60E+6	kN/m
EI	1,36E+6	kNm <sup>2</sup> /m

<b>Soletta intermedia H=100 cm</b>		
EA	32,00E+6	kN/m
EI	2,670E+6	kNm <sup>2</sup> /m

<b>Soletta di base H<sub>media</sub>=210 cm</b>		
EA	69,00E+6	kN/m
EI	25,40E+6	kNm <sup>2</sup> /m

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

### 5.3.3 Carichi

#### 5.3.3.1 Carichi superficiali

La definizione dei carichi distribuiti e puntuali inseriti nel modello è avvenuta in considerazione delle particolari condizioni di carico peculiari della sezione considerata, come la presenza di edifici in adiacenza al manufatto di stazione.

**Tabella 10 Carichi superficiali**

<b><i>Posizione nel modello</i></b>	<b><i>Entità del carico</i></b>	<b><i>Estensione</i></b>
Destra	40 kPa	20,5m
Sinistra	50 kPa	33 m
Destra/Sinistra (ad esclusione della zona maggiorata)	20 kPa	Tutta la superficie
Soletta superficiale	20 kPa	Zona soletta

A tale riguardo non essendo nota la quota di imposta del piano di fondazione di tali strutture, a favore di sicurezza si è ritenuto di trascurare la presenza dei piani interrati essendo il peso di volume del terreno maggiore del carico relativo al solaio interrato.

Riguardo l'entità del riempimento della soletta di copertura si è tenuto in conto lo spessore del ricoprimento di progetto incrementato di ulteriori 0,50 m.

#### 5.3.3.2 Azione sismica

L'azione sismica valutata secondo il metodo di Wood (1973), che fornisce la sovrappinta sismica del terreno su una parete interrata.

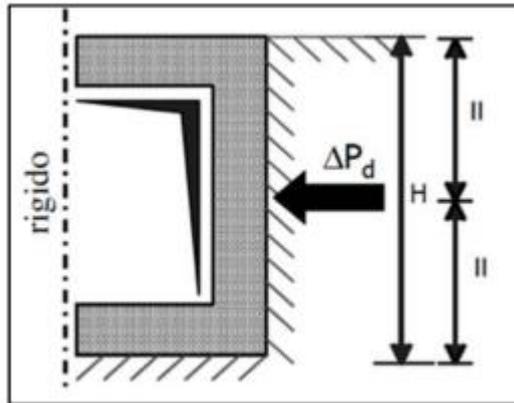


Figura 5. Schematizzazione metodo di Wood

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

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

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

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

L'impatto dell'azione sismica viene valutata per una condizione di carico di lungo periodo in cui sono presenti le fodere interne della struttura alle quali è affidata la spinta idrostatica della falda. Pertanto, la paratia è scaricata della spinta dell'acqua e l'azione sismica è ripartita tra la paratia e le fodere interne secondo la relazione:

$$p_{paratia} = P_{Tot} \frac{I_{paratia}}{I_{paratia} + I_{fodera}}$$

$$p_{Fodera} = P_{Tot} \frac{I_{Fodera}}{I_{paratia} + I_{fodera}}$$

L'entità dell'azione sismica applicata al modello numerico è riportata nel seguito.

**Tabella 11 Parametri input azione sismica**

Calcolo spinta sismica da applicare al modello numerico			
$\gamma_t$	=	19,5	kN/mc
H	=	31,45	m
$a_g$	=	0,067	
$S_s$	=	1,2	
$S_T$	=	1	
$a_{max}$	=	0,0804	
$\alpha$	=	1,0	
$\beta$	=	1,0	
$k_h$	=	0,0804	
$P_{ground}$	=	49,31	kPa
$P_{ground\ su\ paratia}$	=	38,04	kPa
<b>Paratia</b>			
Profondità sopra fondo scavo	=	31,45	m
B	=	1000	mm
H	=	1200	mm
$I_1$	=	1, E+11	mm <sup>4</sup>
<b>Fodera</b>			
B	=	1000	mm
H	=	800	mm
$I_2$	=	4, E+10	mm <sup>4</sup>
$I_{tot}$	=	2, E+11	mm <sup>4</sup>
W paratia	=	943,5	kN
P paratia	=	2,412	kPa
<b>P tot</b>	=	<b>40,45</b>	<b>kPa</b>

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Nella tabella seguente vengono riassunti i carichi applicati al modello.

**Tabella 12 Parametri input azione sismica**

<b>Tipologia carico</b>	<b>Valore</b>	
Peso strutture in calcestruzzo	25	kN/m <sup>3</sup>
Sovraccarico superficiale	20	kPa
Carico edifici	10	kPa/piano
Spinta sismica sulla paratia	40.45	kPa



## 6. ANALISI NUMERICHE

Le analisi numeriche sono condotte seguendo le assunzioni indicate nel capitolo precedente. La sezione ritenuta rappresentativa delle condizioni geotecniche e strutturali del corpo stazione è indicata nella figura di seguito.

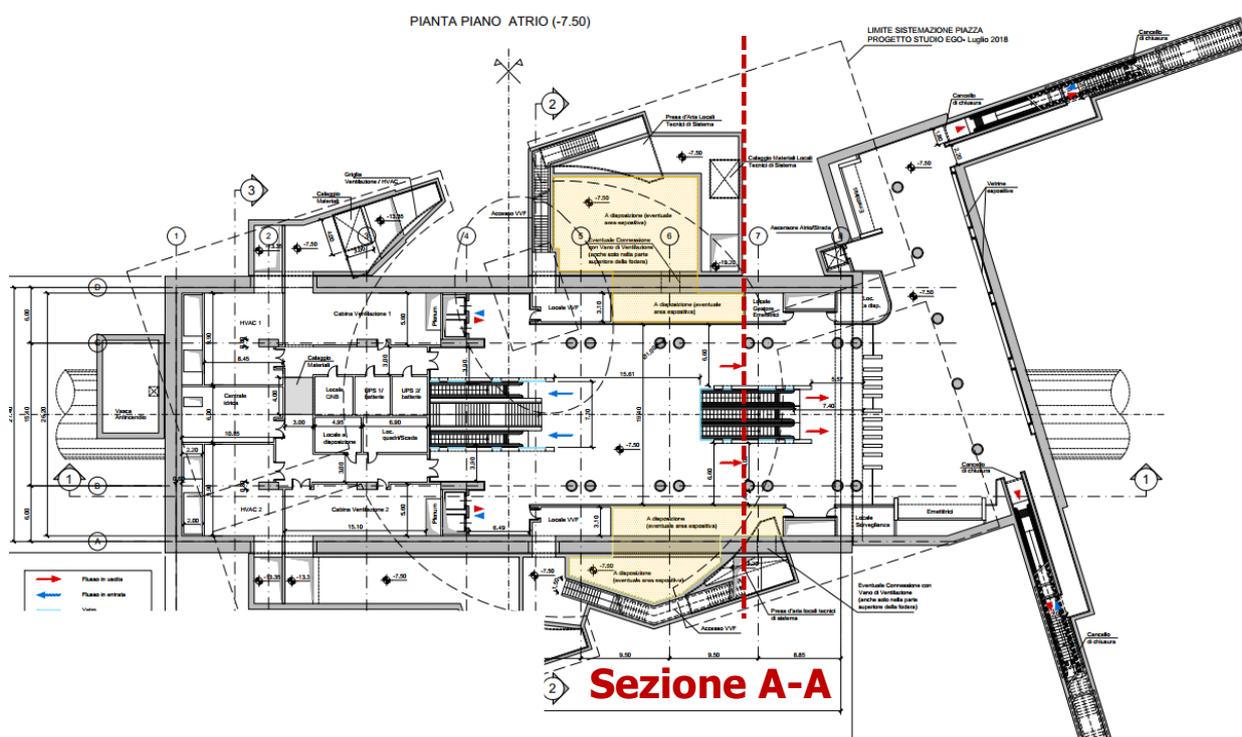


Figura 6. Stralcio planimetria stazione Carlo Alberto con indicazione della sezione di calcolo A-A

### 6.1 Fasi di calcolo modello geotecnico

La modellazione numerica dello scavo con paratie puntonate viene effettuata seguendo differenti fasi di calcolo, ciascuna rappresentativa delle fasi costruttive dell'opera. Tale procedimento si rende necessario in quanto in un'analisi FEM in cui il comportamento del terreno è assunto essere di tipo elastoplastico, la risposta del mezzo in termini tensionali e deformativi è influenzata dalla storia tensionale che subisce e pertanto è importante tenere in considerazione le configurazioni precedenti. Le fasi di calcolo considerate sono riportate nella seguente tabella e nelle successive figure.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

**Tabella 13 Fasi di calcolo**

Fase di calcolo	Descrizione
Fase 1	Definizione delle condizioni geostatiche ed idrostatiche
Fase 2	Definizione dei carichi superficiali accidentali e permanenti
Fase 3	Scavo fino a quota intradosso solaio di copertura
Fase 4	Realizzazione tampone di fondo ed installazione diaframmi e king post
Fase 5	Realizzazione del solaio di copertura
Fase 6	Prima fase di scavo
Fase 7	Ripristino delle condizioni al di sopra della soletta di copertura
Fase 8	Scavo fino a quota della prima soletta intermedia ed abbassamento del livello piezometrico all'interno dello scavo
Fase 9	Installazione prima soletta intermedia
Fase 10	Scavo fino a quota della seconda soletta intermedia ed abbassamento del livello piezometrico all'interno dello scavo
Fase 11	Installazione seconda soletta intermedia
Fase 12	Scavo fino a quota primo livello puntoni
Fase 13	Installazione primo livello puntoni
Fase 14	Scavo fino a quota secondo livello puntoni
Fase 15	Installazione secondo livello puntoni
Fase 16	Scavo fino a quota terzo livello puntoni
Fase 17	Installazione terzo livello puntoni
Fase 18	Scavo fino a quota scavo finale
Fase 19	Installazione soletta di base



CITTA' DI TORINO

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

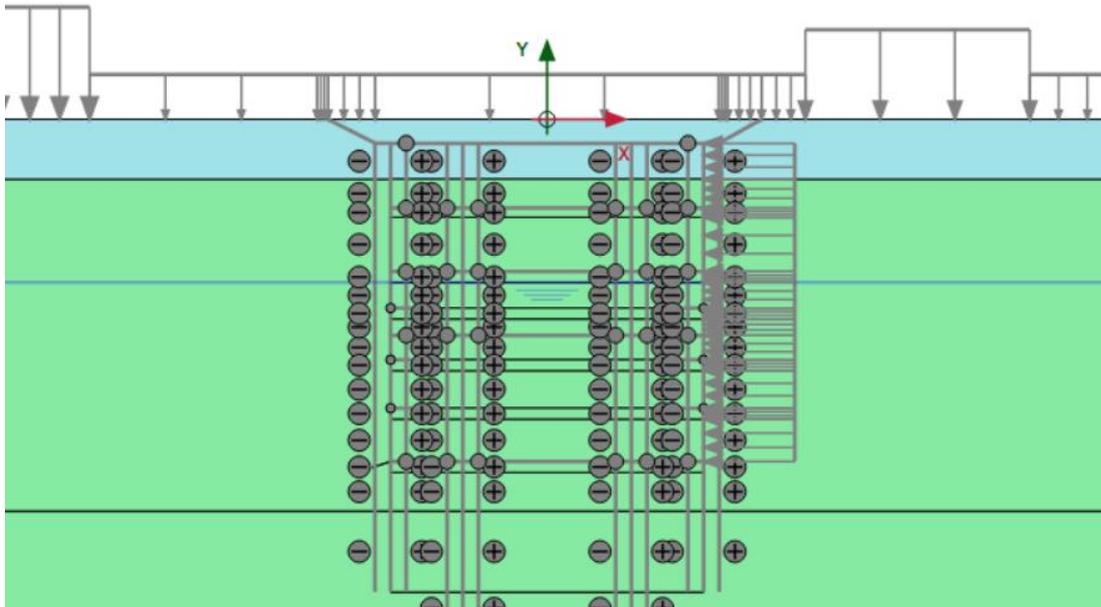
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

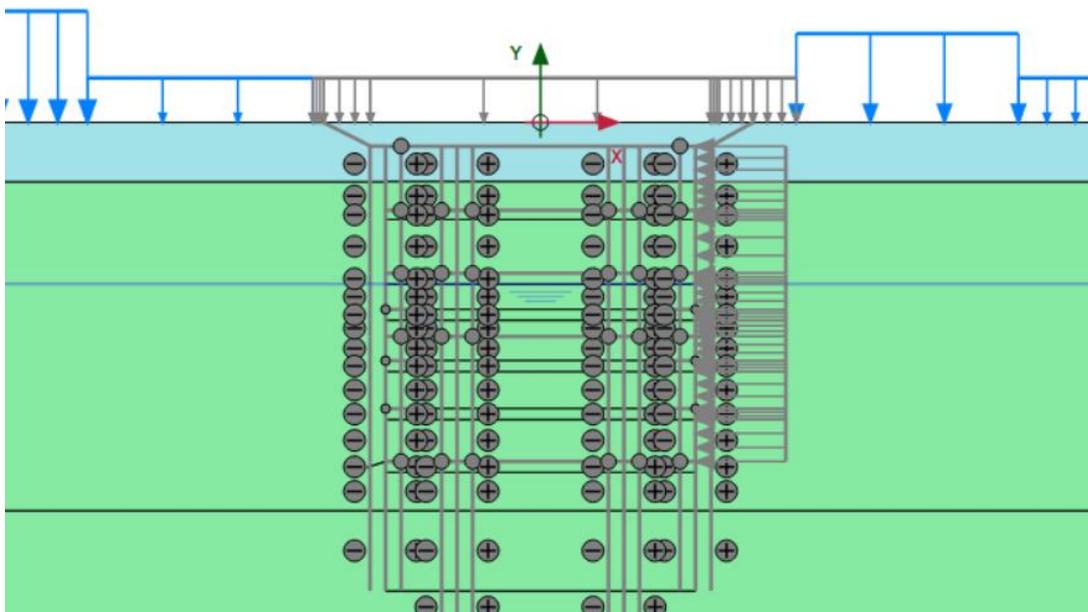
Fase 20	Ripristino delle condizioni idrauliche
Fase 21	Rimozione livello puntoni due e tre
Fase 22	Installazione terza soletta intermedia
Fase 23	Rimozione primo livello di puntoni
Fase 24	Condizioni di carico di lungo termine – riduzione delle pressioni idrostatiche agenti sulla paratia, e rimozione proprietà meccaniche tampone di fondo e ripristino condizioni iniziali
Fase 25	Applicazione dell'azione sismica
Fase 26	Ricerca del fattore di sicurezza di lungo periodo
Fase 27	Valutazione della deformabilità a lungo termine a SLE



Fase 1 – Condizioni iniziali

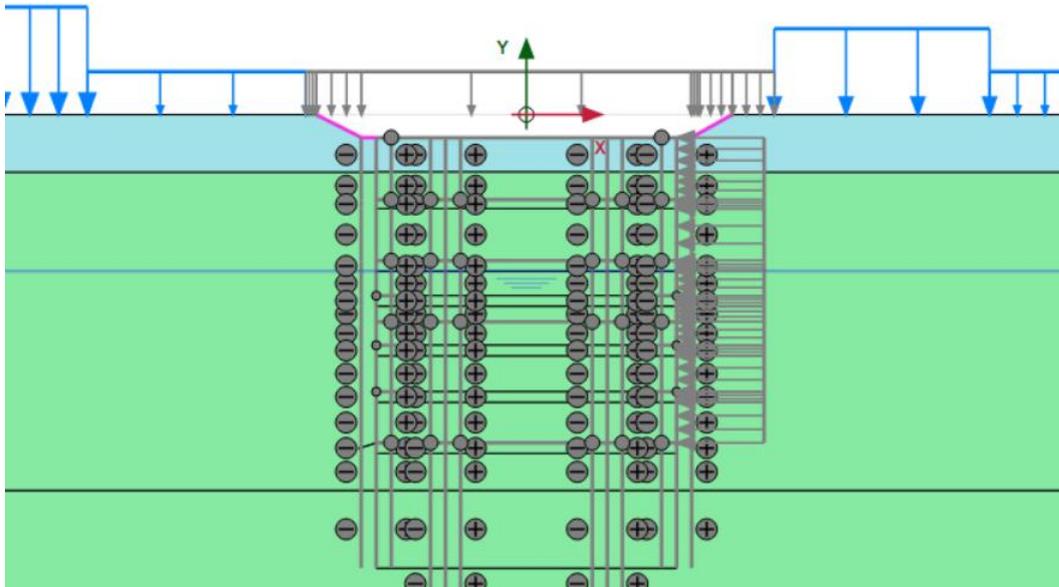


Fase 2 – Applicazione dei carichi superficiali

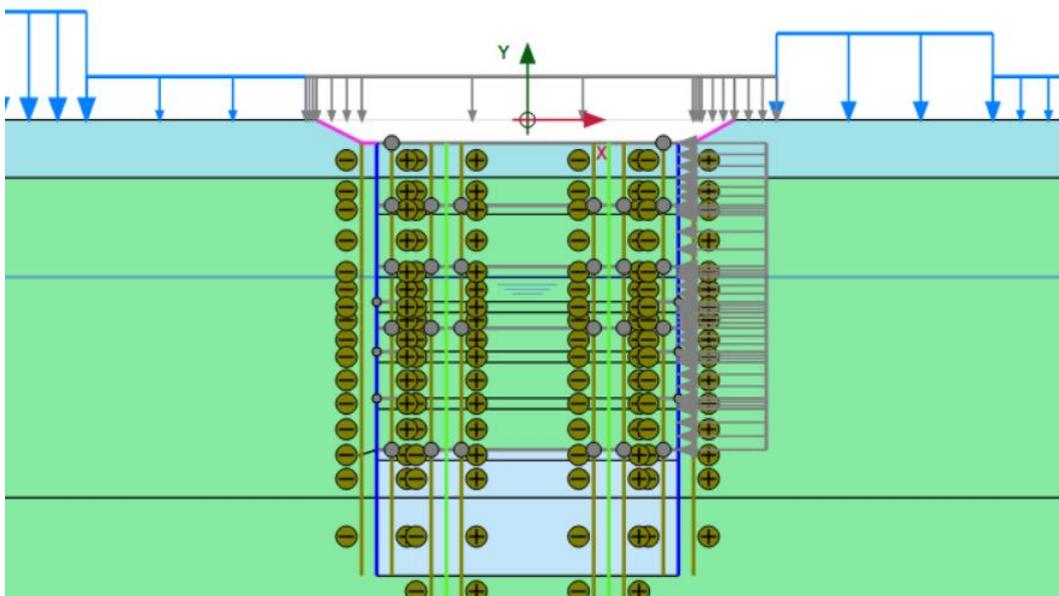




Fase 3 – Scavo fino a quota intradosso copertura

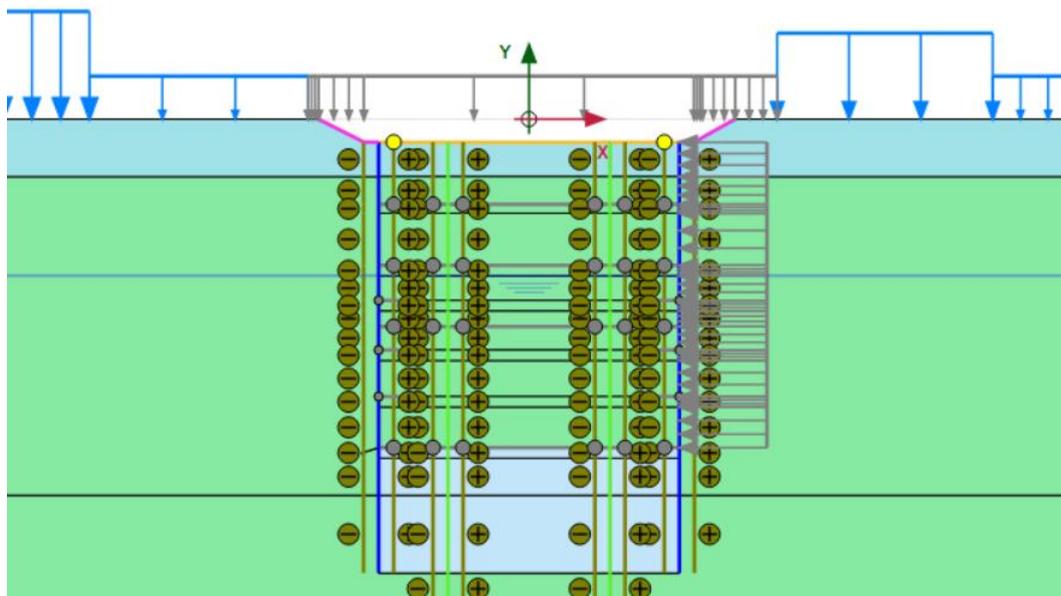


Fase 4 – Installazione diaframmi, king post e tamponi di fondo

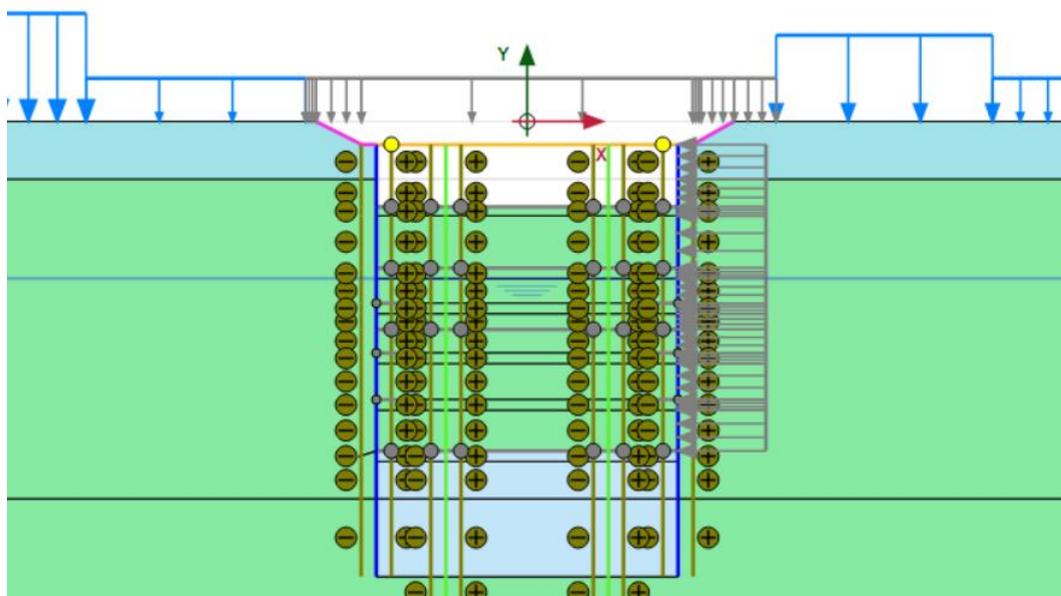




Fase 5 – Installazione soletta di copertura

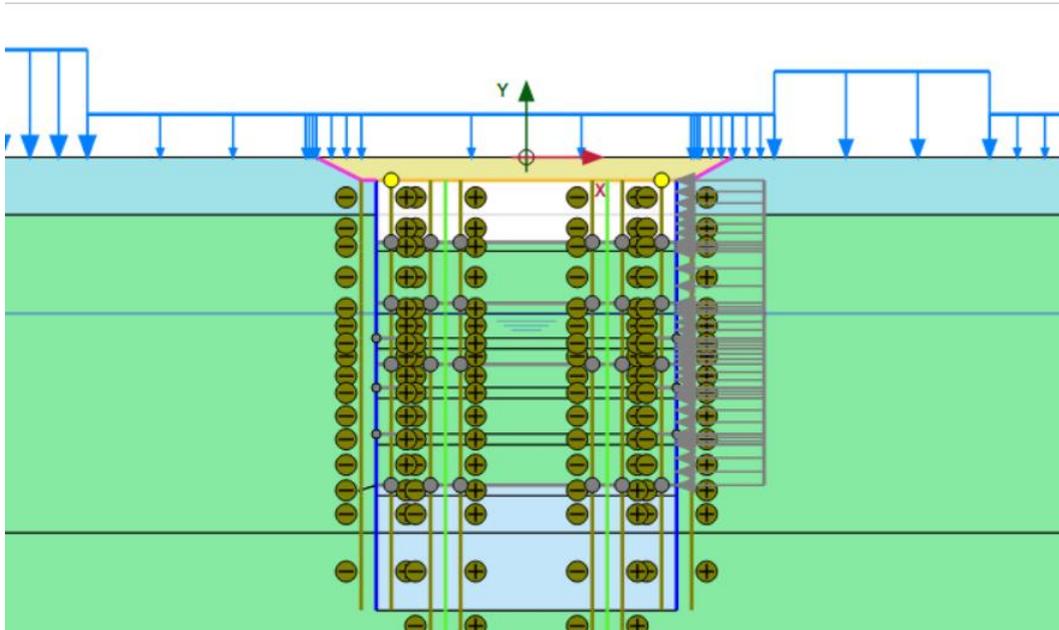


Fase 6 – Prima fase di scavo e installazione soletta di copertura

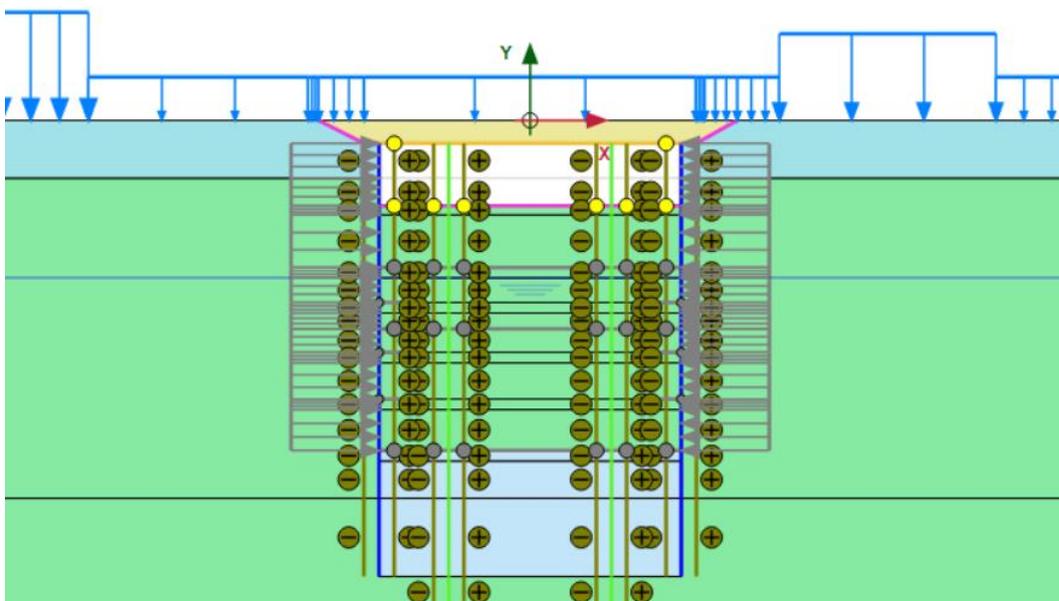




Fase 7 – Ripristino delle condizioni in superficie

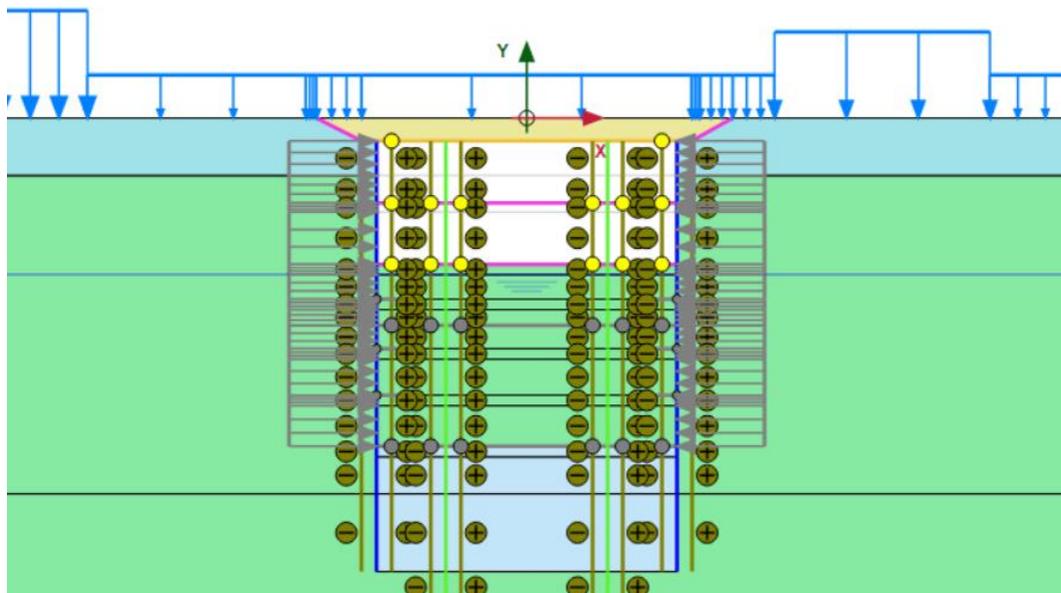


Fase 8-9 – Installazione prima soletta intermedia

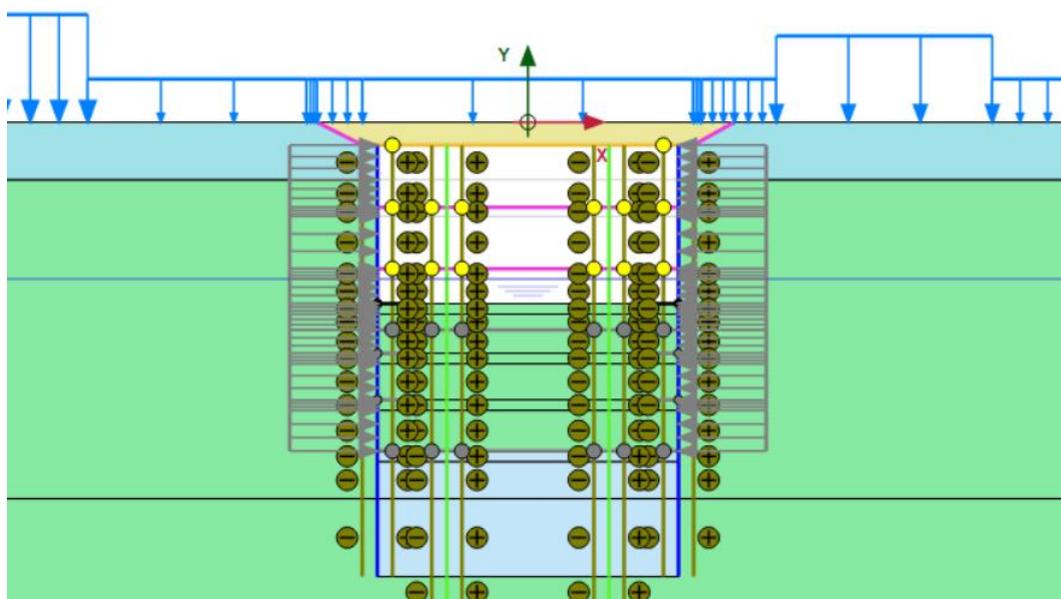




Fase 10-11 – Seconda fase di scavo ed installazione seconda soletta intermedia

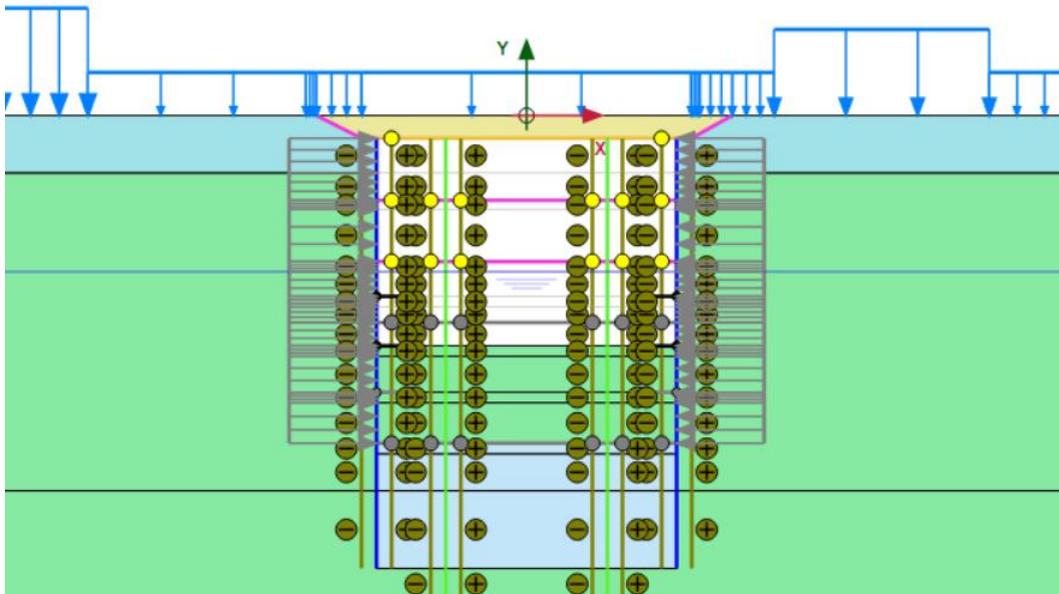


Fase 12-13 – Terza fase di scavo ed installazione primo livello di puntoni

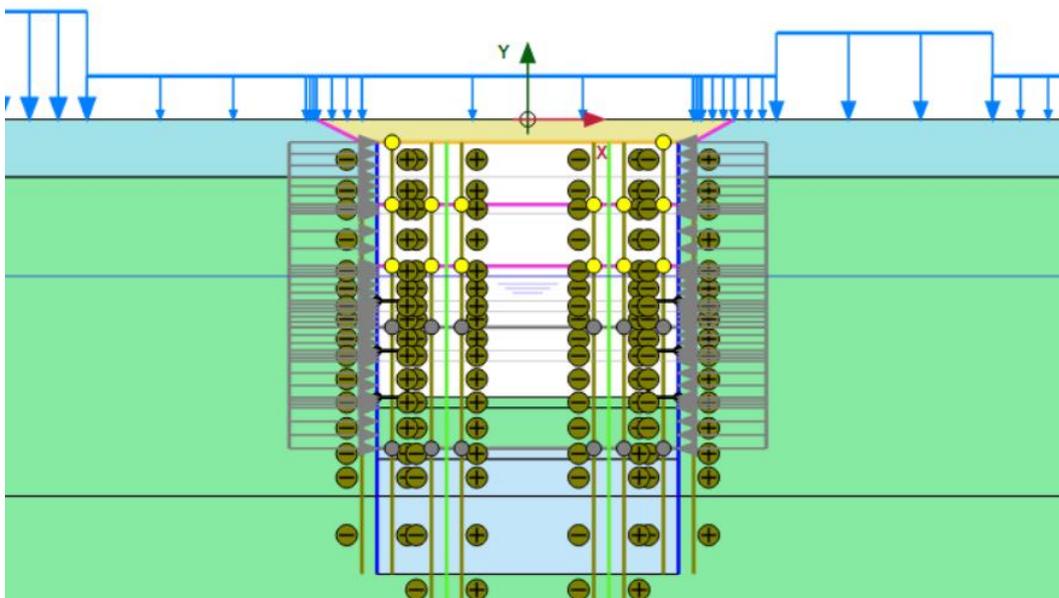




Fase 14-15 – Quarta fase di scavo ed installazione secondo livello di puntoni

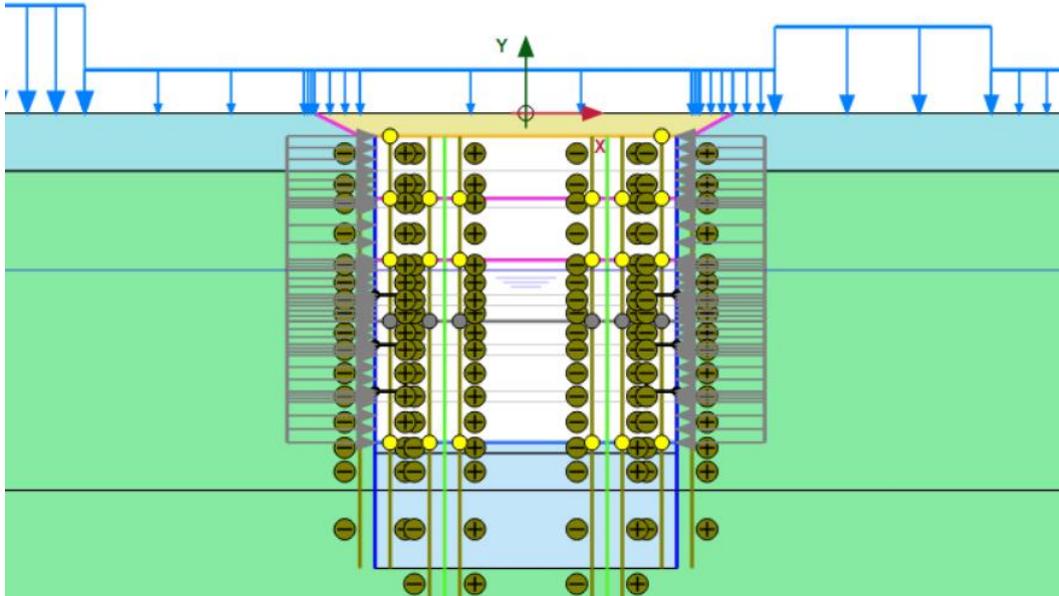


Fase 16-17 – Quarta fase di scavo ed installazione terzo livello di puntoni

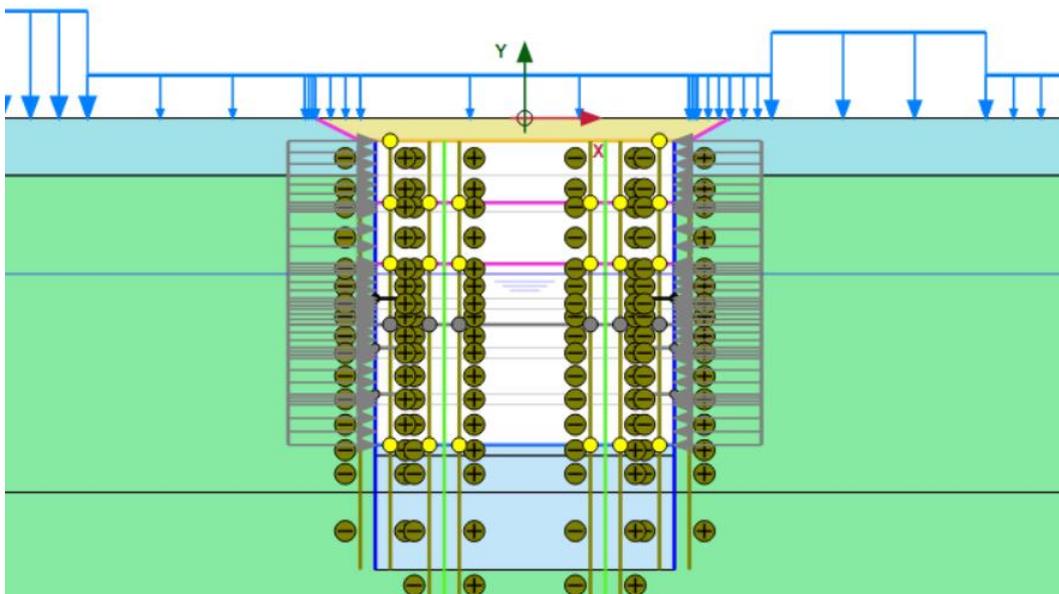




Fase 18-19 – Fase finale di scavo di scavo ed installazione soletta di fondo

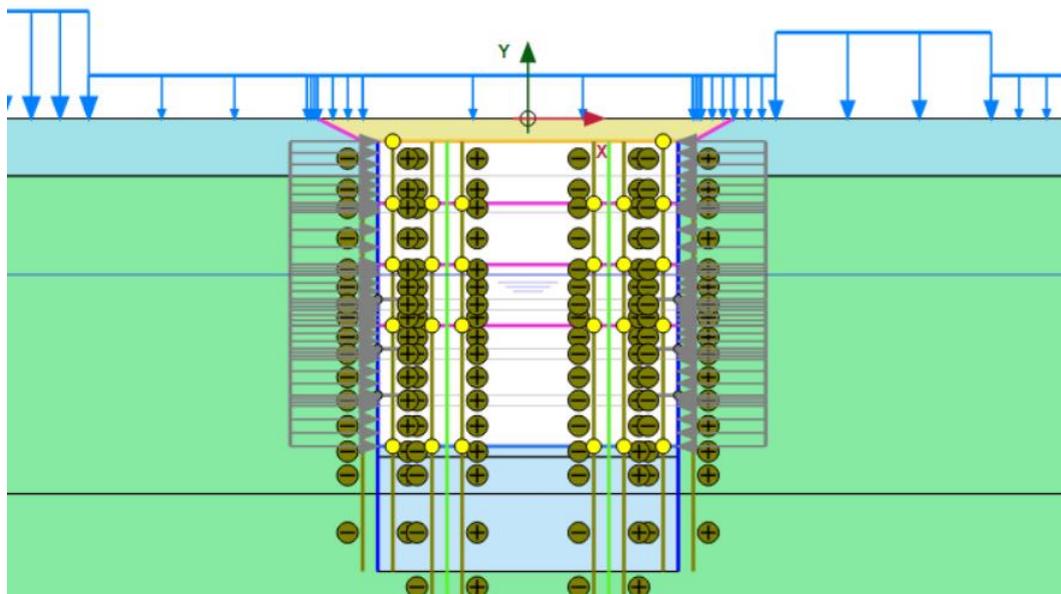


Fase 21 – Rimozione secondo e terzo livello puntoni





Fase 22 – Installazione terza soletta intermedia e rimozione primo livello puntoni



Fase 25 – Ripristino condizioni di lungo termine ed applicazione dell'azione sismica

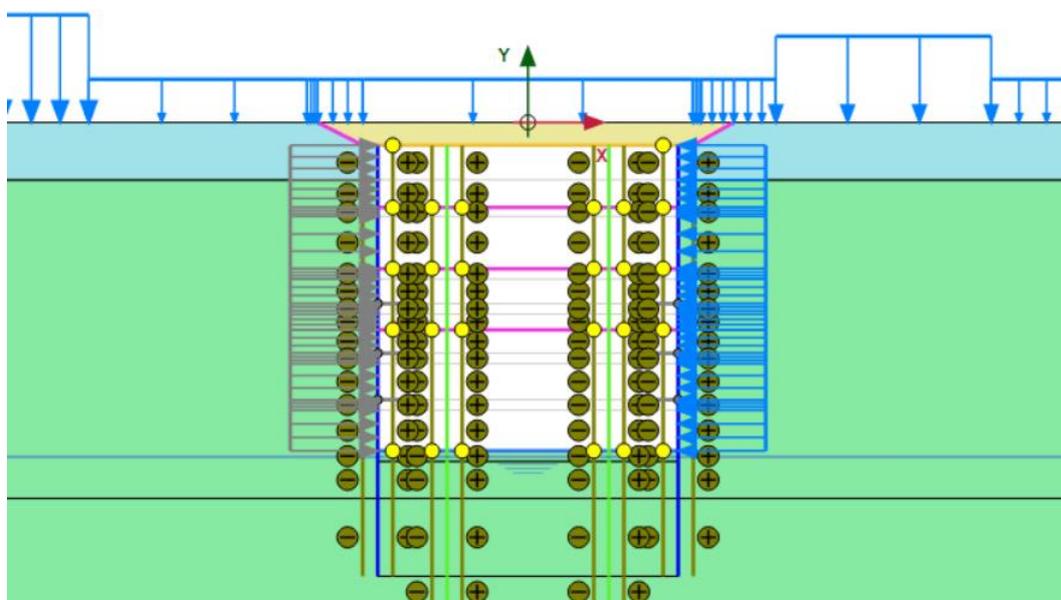
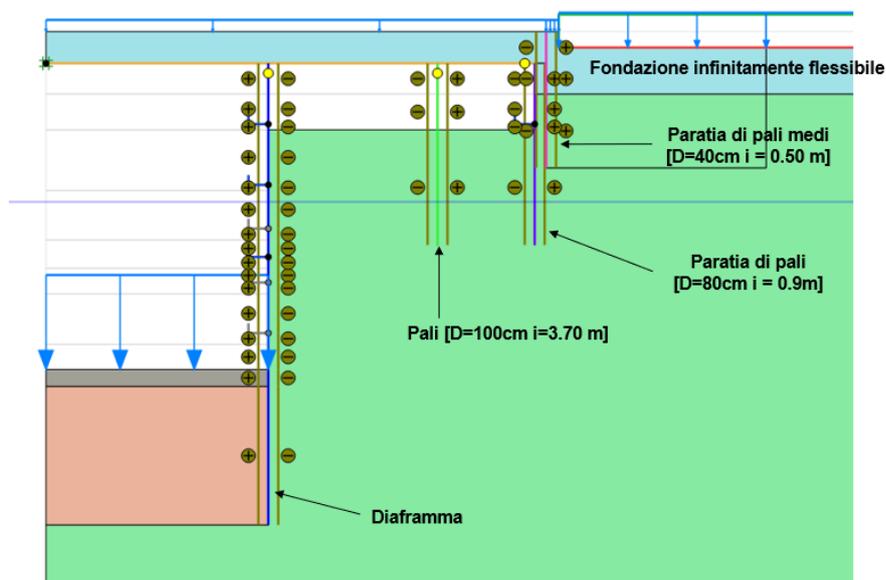


Figura 7. Fasi di calcolo modello geotecnico



Di seguito viene riportata la geometria del modello numerico dell'accesso speciale che verrà realizzato contestualmente al corpo stazione.



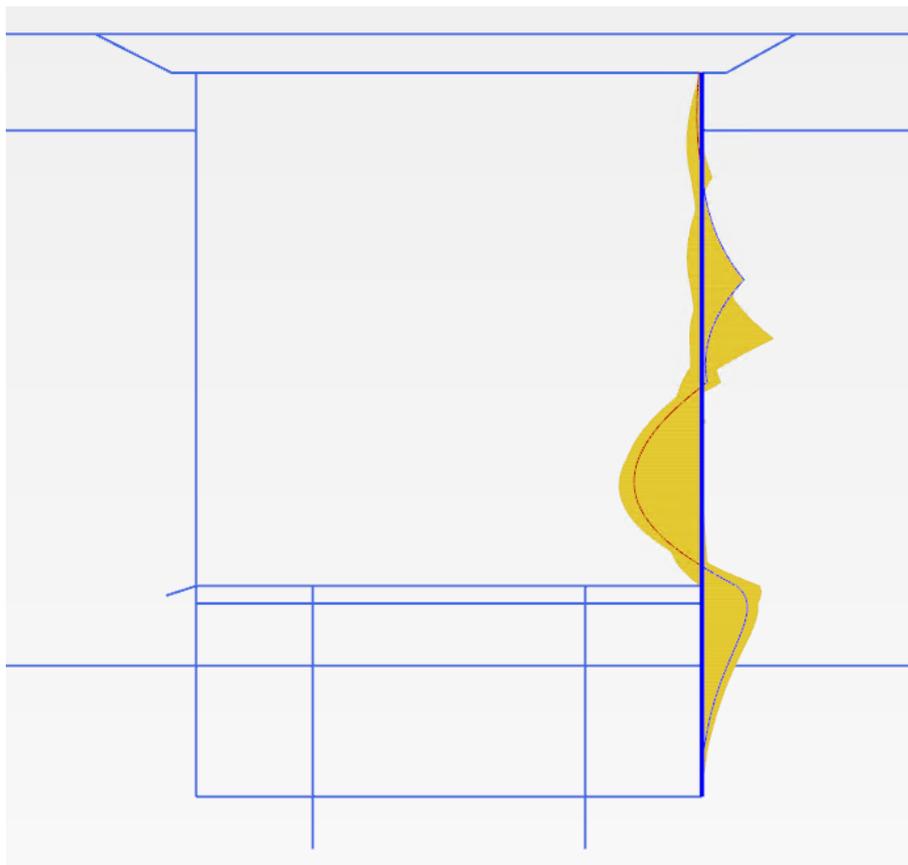
**Figura 8. Modello numerico Plaxis – Accesso speciale.**

Per maggiori dettagli relativi al modello numerico dell'accesso speciale si rimanda a MTL2T1A2DPRCSCAR001 e in MTL2T1A2DSTRSCAR003.



## 6.1 Output

### 6.1.1 Sollecitazioni paratia

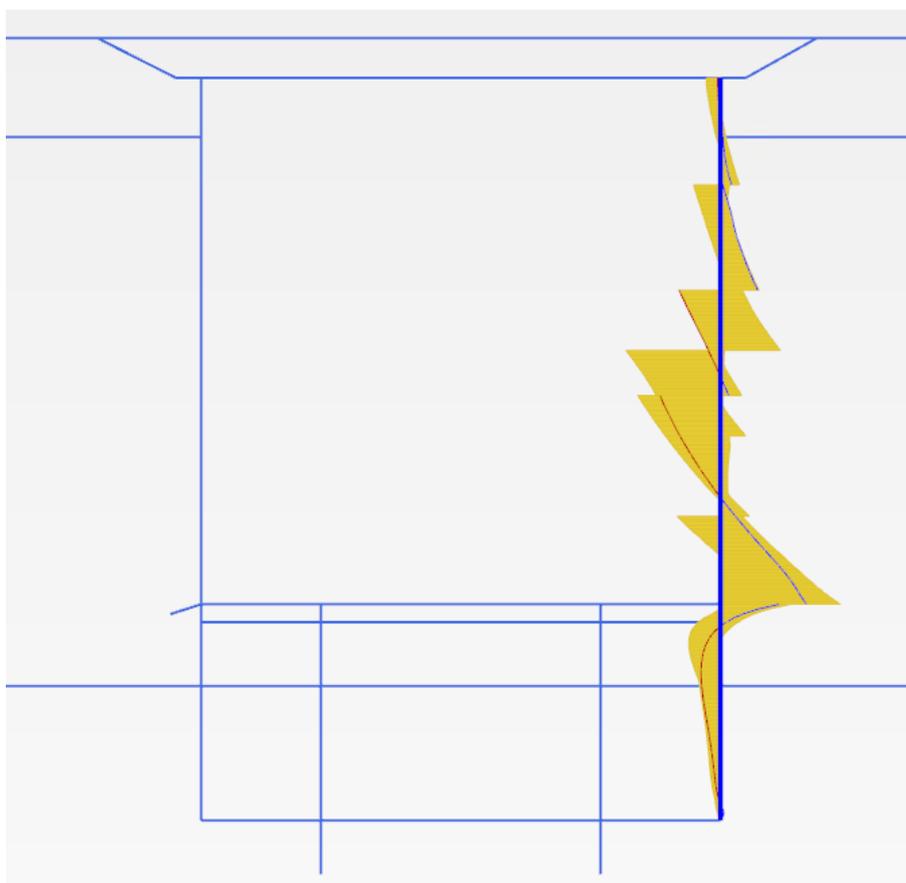


**Envelope of Bending moments M (scaled up  $2,00 \cdot 10^{-3}$  times)**

Maximum value = 2010 kN m/m (Element 189 at Node 50135)

Minimum value = -2337 kN m/m

**Figura 9. Diaframma - SLE Momento flettente - Involuppo**



**Envelope of Shear forces Q (scaled up  $5,00 \cdot 10^{-3}$  times)**

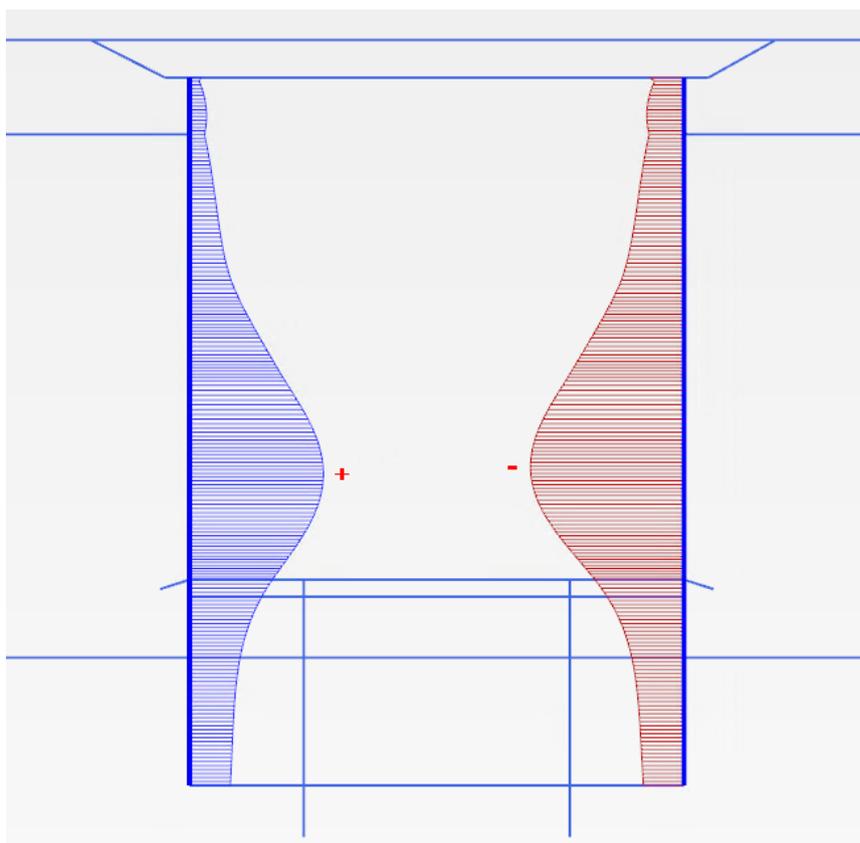
Maximum value = 1323 kN/m (Element 278 at Node 52701)

Minimum value = -1041 kN/m

**Figura 10. Diaframma - SLE Diagramma taglio - Involuppo**



### 6.1.2 Spostamenti paratia



**Total displacements  $u_x$  (scaled up 500 times)**

Maximum value = 0,01549 m (Element 243 at Node 29485)

Minimum value = -0,01776 m (Element 254 at Node 52155)

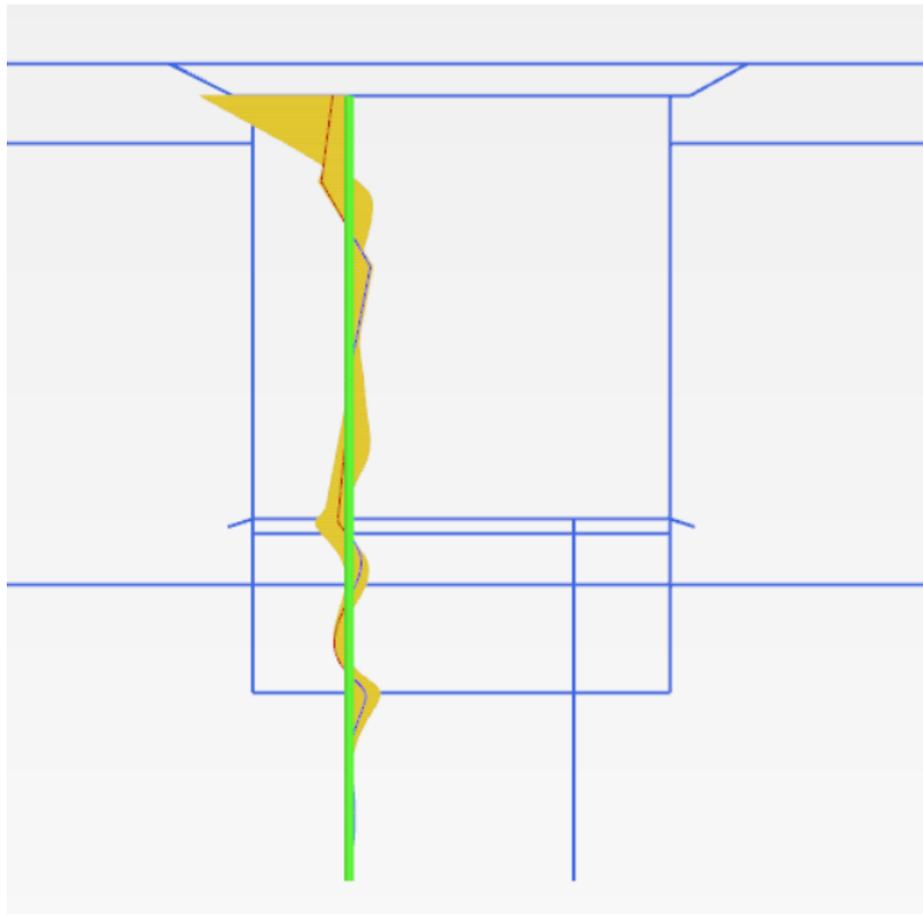
Figura 11. Diaframma - SLE Diagramma degli spostamenti orizzontali fase 22

Tabella 14 Sollecitazioni paratia

	Paratia SLE	Paratia SLU
$M_{max}$ [kNm/m]	2010	2814
$M_{min}$ [kNm/m]	-2337	-3272
$T_{max}$ [kN/m]	1323	1852
$T_{min}$ [kN/m]	-1041	-1457
Spostamento max [mm]	17,76	-



### 6.1.3 Sollecitazioni barrette temporanee

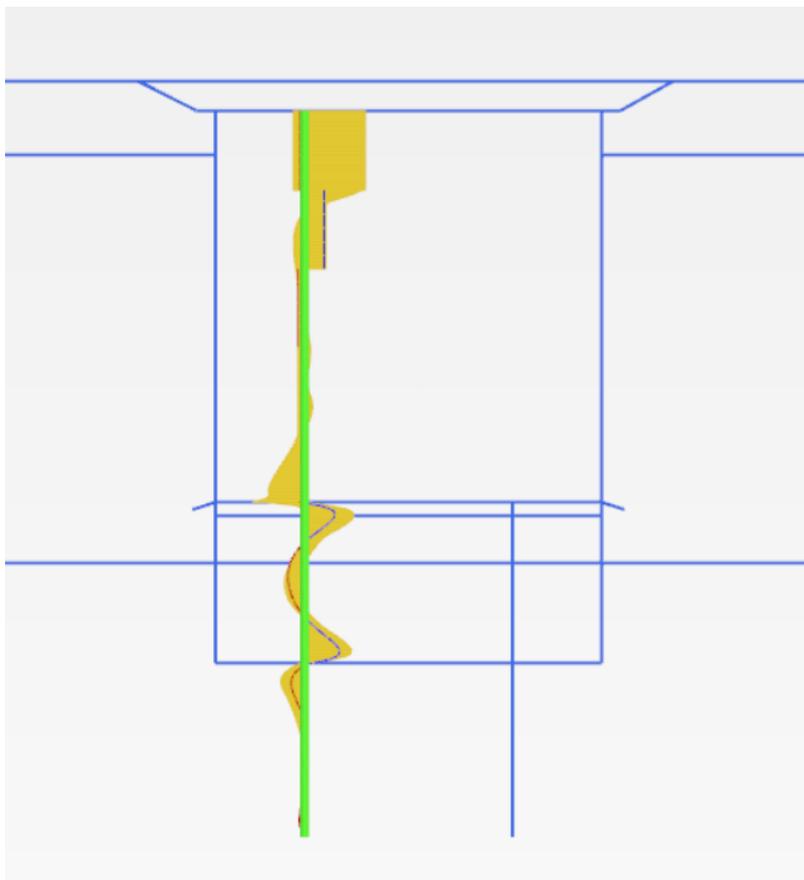


**Envelope of Bending moments M (scaled up 0,0200 times)**

Maximum value = 104,9 kN m/m (Element 347 at Node 60032)

Minimum value = -510,7 kN m/m

**Figura 12. Barrette - Momento flettente - Involuppo**



**Envelope of Shear forces Q (scaled up 0,0500 times)**

Maximum value = 90,09 kN/m (Element 61 at Node 5634)

Minimum value = -77,01 kN/m

**Figura 13. Barrette – Digramma taglio – Inviluppo**

**Tabella 15 Sollecitazioni barretta**

	<b>Barretta</b>
$M_{max}$ [kNm/m]	105
$M_{min}$ [kNm/m]	-511
$T_{max}$ [kN/m]	90
$T_{min}$ [kN/m]	-77

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 7. VERIFICHE STRUTTURALI

Le fasi costruttive prevederanno la realizzazione di diaframmi primari e secondari. Le cui rispettive dimensioni, ipotizzate per le seguenti verifiche, sono: 260 cm per il primario e 280 cm per il secondario.

Le verifiche di seguito riportate sono riferite al diaframma secondario.

### 7.1 Diaframmi - Verifiche delle sollecitazioni flettenti SLU

La verifica agli SLU è stata realizzata attraverso il calcolo dei domini di interazione N-M, ovvero il luogo dei punti rappresentativi di sollecitazioni che portano in crisi la sezione di verifica secondo i criteri di resistenza da normativa.

Nel calcolo dei domini sono state mantenute le consuete ipotesi, tra cui:

- conservazione delle sezioni piane;
- legame costitutivo del calcestruzzo parabola-rettangolo non reagente a trazione, con plateau ad una deformazione pari a 0.002 e a rottura pari a 0.0035 ( $\sigma_{\max} = 0.85 \times 0.83 \times R_{ck}/1.5$ );
- legame costitutivo dell'armatura d'acciaio elastico-perfettamente plastico ( $f_{yd} = f_{yk}/1.15$ )

Di seguito sono riportati il diagramma di involuppo dei momenti flettenti e momenti resistenti della sezione e la tabella di determinazione della massima capacità della sezione a SLU.

In riferimento alla paratia considerata verranno adottate 4 gabbie di armatura al fine di coprire i momenti sollecitanti aventi le seguenti caratteristiche:

**Tabella 16 Armature longitudinali paratia**

	Lunghezza [m]	Lato interno SCAVO	Lato esterno TERRENO
Gabbia 1	12	Φ 24/125	2 Φ 24/125
Gabbia 2	12	3 Φ 26/125	2 Φ 26/125+1 Φ 26/250
Gabbia 3	12	3 Φ 26/125	2 Φ 26/125+1 Φ 26/250
Gabbia 4	10	2 Φ 24/125	Φ 20/125

Le lunghezze indicate includono la lunghezza di sovrapposizione.

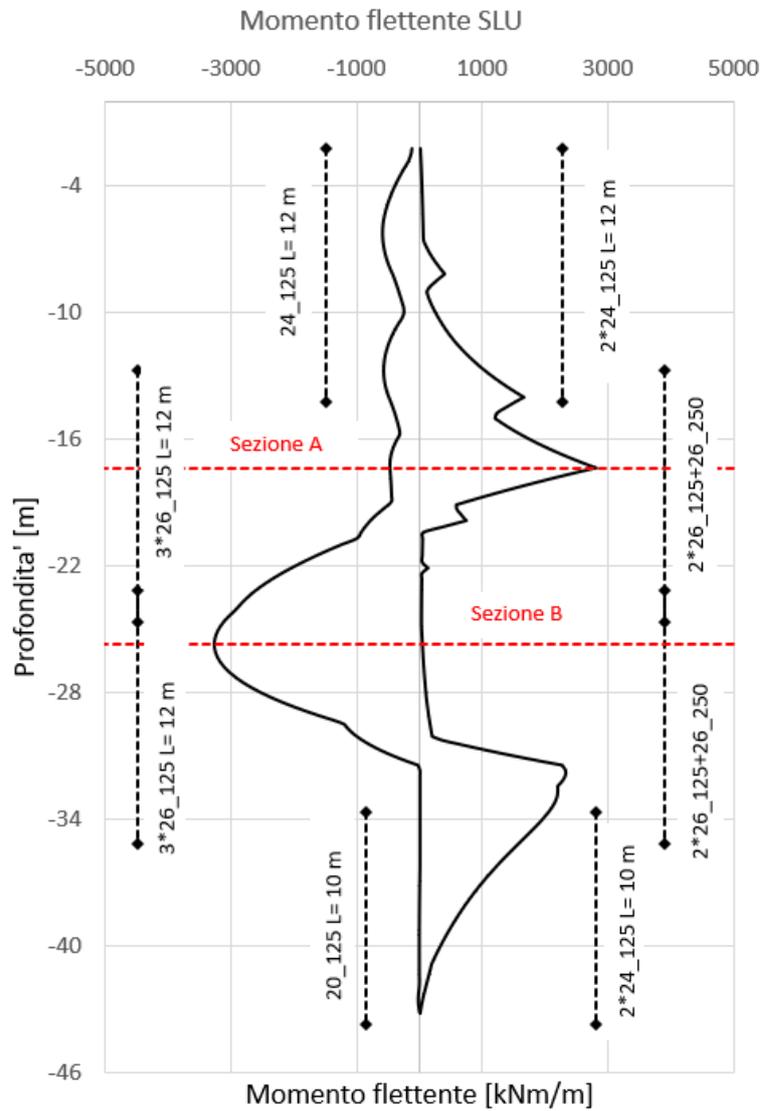


Figura 14. Diaframmi - SLU Diagramma delle sollecitazioni flettenti



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

**Tabella 17 Diaframmi - Verifica SLU flessione Sezione A – Seconda gabbia**

<b>Sezione di verifica SLU: Sezione A</b>		
<b>Geometria sezione:</b>		
Altezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1200	[mm]
Larghezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1000	[mm]
Copriferro	75	[mm]
<b>Armature</b>		
<b>Armatura tesa</b>		
Diametro dei ferri correnti	26	[mm]
Numero dei ferri correnti	8	[-]
Diametro dei ferri correnti secondo strato	26	[mm]
Numero dei ferri correnti secondo strato	8	[-]
Diametro dei ferri correnti terzo strato	26	[-]
Numero dei ferri correnti terzo strato	4	[-]
Area dell'armatura tesa	10619	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura compressa</b>		
Diametro dei ferri correnti	26	[mm]
Numero dei ferri correnti	8	[-]
Diametro dei ferri correnti secondo strato	26	[mm]
Numero dei ferri correnti secondo strato	8	[-]
Diametro dei ferri correnti terzo strato	26	[-]
Numero dei ferri correnti terzo strato	8	[-]
Area dell'armatura compressa	12742	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Materiali</b>		
<b>Calcestruzzo</b>		
Resistenza caratteristica cubica	30	[MPa]
Coefficiente di sicurezza parziale per il calcestruzzo	1,5	[-]
Coefficiente che tiene conto degli effetti di lungo termine	0,85	[-]
Resistenza di progetto a compressione del calcestruzzo	14,17	[MPa]
Resistenza di progetto a trazione del calcestruzzo	1,20	[MPa]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione caratteristica	15,00	[MPa]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione quasi permanente	11,25	[MPa]
<b>Acciaio</b>		
Resistenza a snervamento dell'acciaio	450	[MPa]
Coefficiente di sicurezza parziale per l'acciaio	1,15	[-]
Resistenza di progetto a trazione dell'acciaio	391	[MPa]
Tensione ammissibile nell'acciaio per le combinazioni a SLS	360	[MPa]
<b>Momento resistente della sezione</b>		
	<b>4193,89</b>	<b>[kNm]</b>
<b>Momento sollecitante a SLU assunto in valore assoluto</b>		
	<b>2814,00</b>	<b>[kNm]</b>
		Verificato

**Tabella 18 Diaframmi - Verifica SLU flessione Sezione B – Terza Gabbia**

<b>Sezione di verifica SLU: Sezione B</b>		
<b>Geometria sezione:</b>		
Altezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1200	[mm]
Larghezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1000	[mm]
Copriferro	75	[mm]
<b>Armature</b>		
<b>Armatura tesa</b>		
Diametro dei ferri correnti	26	[mm]
Numero dei ferri correnti	8	[-]
Diametro dei ferri correnti secondo strato	26	[mm]
Numero dei ferri correnti secondo strato	8	[-]
Diametro dei ferri correnti terzo strato	26	[-]
Numero dei ferri correnti terzo strato	8	[-]
Area dell'armatura tesa	12742	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura compressa</b>		
Diametro dei ferri correnti	26	[mm]
Numero dei ferri correnti	8	[-]
Diametro dei ferri correnti secondo strato	26	[mm]
Numero dei ferri correnti secondo strato	8	[-]
Diametro dei ferri correnti terzo strato	26	[-]
Numero dei ferri correnti terzo strato	4	[-]
Area dell'armatura compressa	10619	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Materiali</b>		
<b>Calcestruzzo</b>		
Resistenza caratteristica cubica	30	[MPa]
Coefficiente di sicurezza parziale per il calcestruzzo	1,5	[-]
Coefficiente che tiene conto degli effetti di lungo termine	0,85	[-]
Resistenza di progetto a compressione del calcestruzzo	14,17	[MPa]
Resistenza di progetto a trazione del calcestruzzo	1,20	[MPa]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione caratteristica	15,00	[MPa]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione quasi permanente	11,25	[MPa]
<b>Acciaio</b>		
Resistenza a snervamento dell'acciaio	450	[MPa]
Coefficiente di sicurezza parziale per l'acciaio	1,15	[-]
Resistenza di progetto a trazione dell'acciaio	391	[MPa]
Tensione ammissibile nell'acciaio per le combinazioni a SLS	360	[MPa]
<b>Momento resistente della sezione</b>		
	<b>5018,36</b>	<b>[kNm]</b>
<b>Momento sollecitante a SLU assunto in valore assoluto</b>		
	<b>3272,00</b>	<b>[kNm]</b>
Verificato		

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 7.2 Diaframmi - Verifica delle sollecitazioni taglianti SLU

La resistenza a taglio  $V_{Rd}$  di elementi strutturali dotati di specifica armatura a taglio deve essere valutata sulla base di una adeguata schematizzazione a traliccio. Gli elementi resistenti dell'ideale traliccio sono: le armature trasversali, le armature longitudinali, il corrente compresso di calcestruzzo e i puntoni d'anima inclinati. L'inclinazione  $\theta$  dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della trave deve rispettare i limiti seguenti:

$$1 < ctg\theta < 2.5$$

La verifica di resistenza (SLU) è soddisfatta se è verificata la seguente relazione:

$$V_{Rd} \geq V_{Ed} \text{ dove } V_{Ed}$$

è il valore di calcolo dello sforzo di taglio agente.

La resistenza di calcolo a "taglio trazione" dell'armatura trasversale è stata calcolata con la seguente relazione:

$$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (ctg\alpha + ctg\theta) \cdot \sin\alpha$$

La resistenza di calcolo a "taglio compressione" del calcestruzzo d'anima è stata calcolata con la seguente relazione:

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (ctg\alpha + ctg\theta) / (1 + ctg^2\theta)$$

La resistenza al taglio della sezione è la minore delle due relazioni sopra definite:

$$V_{Rd} = \min (V_{Rsd}, V_{Rcd})$$

La verifica delle azioni taglianti è condotta per pannello di paratia pari a 2,80 m.

Per verifica vengono adottate due tipologie di staffatura, una con staffa esterna a 2 braccia diametro 16 mm ed una interna a 4 braccia diametro da 14 mm con passo 200 mm. La seconda tipologia è costituita da una con staffa esterna a 2 braccia diametro 16 mm ed una interna a 6 braccia diametro da 16 mm con passo 100 mm. L'immagine di seguito mostra l'involuppo delle azioni taglianti e la resistenza offerta dalla sezione.

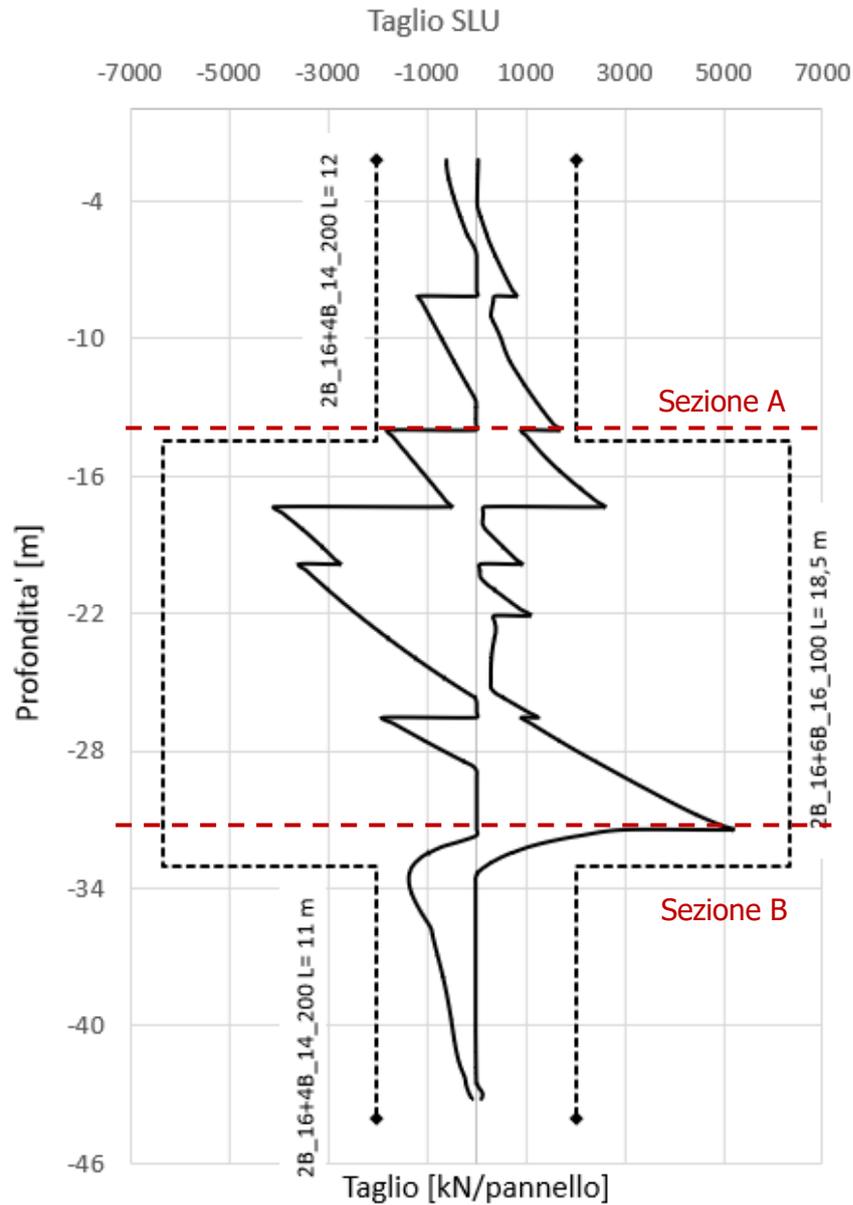


Figura 15. Diaframma - SLU Diaframma delle sollecitazioni taglianti


**Tabella 19 Diaframma - Verifica SLU – Taglio – Sezione A**

Verifica elementi a taglio			
<i>Pannello diaframma 2800 x 1000 mm - <math>\phi 16</math> 2 braccia + <math>\phi 14</math> 4 braccia passo 200 mm</i>			
<b>Geometria</b>			
Altezza sezione	H	1200	mm
Base sezione	B	2800	mm
Barre longitudinali tese	$\phi_{sl}$	26	mm
Diametro staffe	$\phi_{sw}$	16	mm
Copriferro	c	75	mm
Altezza utile	d	1096	mm
<b>Materiali</b>			
<b>Calcestruzzo</b>			
Resistenza caratteristica cubica	$R_{ck}$	30	MPa
Resistenza caratteristica cilindrica	$f_{ck}$	25	MPa
Coefficiente parziale calcestruzzo	$\gamma_c$	1,5	
Coefficiente che tiene conto degli effetti a lungo termine	$\alpha_{cc}$	0,85	
Resistenza di progetto a compressione calcestruzzo	$f_{cd}$	14,17	MPa
Resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo d'anima	$f'_{cd}$	7,08	MPa
<b>Acciaio</b>			
Resistenza a snervamento dell'acciaio	$f_{yk}$	450	MPa
Coefficiente di sicurezza parziale acciaio	$\gamma_s$	1,15	
Resistenza di progetto a trazione dell'acciaio	$f_{yd}$	391,30	MPa
<b>Elementi con armatura a taglio</b>			
Diametro staffe esterne	$\phi_{sw1}$	16	mm
Numero braccia	$n_{b1}$	2	
Diametro staffe esterne	$\phi_{sw2}$	14	mm
Numero braccia	$n_{b2}$	4	
Passo staffe	s	200	mm
Inclinazione tra puntone compresso e asse elemento	$\theta$	45,00	°
Inclinazione armatura trasversale rispetto asse elemento	$\alpha$	90	°
Area sezione trasversale armatura a taglio	$A_{sw}$	1017,36	mm <sup>2</sup>
Braccio coppia interna	z	986,4	mm
Resistenza offerta dall'armatura a taglio	$V_{Rsd}$	1963	kN
Resistenza offerta dai puntoni	$V_{Rcd}$	9782	kN
<b>Resistenza a taglio della sezione armata trasversalmente</b>	<b><math>V_{Rd}</math></b>	<b>1963</b>	<b>kN</b>
<b>Taglio sollecitante SLU</b>	<b><math>V_{ed}</math></b>	<b>1703</b>	<b>kN</b>
			Verificato


**Tabella 20 Diaframma - Verifica SLU – Taglio – Sezione B**

Verifica elementi a taglio			
<b>Pannello diaframma 2800 x 1000 mm - <math>\phi</math>16 2 braccia + <math>\phi</math>16 6 braccia passo 100 mm</b>			
<b>Geometria</b>			
Altezza sezione	H	1200	mm
Base sezione	B	2800	mm
Barre longitudinali tese	$\phi_{sl}$	26	mm
Diametro staffe	$\phi_{sw}$	16	mm
Copriferro	c	75	mm
Altezza utile	d	1096	mm
<b>Materiali</b>			
<b>Calcestruzzo</b>			
Resistenza caratteristica cubica	$R_{ck}$	30	MPa
Resistenza caratteristica cilindrica	$f_{ck}$	25	MPa
Coefficiente parziale calcestruzzo	$\gamma_c$	1,5	
Coefficiente che tiene conto degli effetti a lungo termine	$\alpha_{cc}$	0,85	
Resistenza di progetto a compressione calcestruzzo	$f_{cd}$	14,17	MPa
Resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo d'anima	$f'_{cd}$	7,08	MPa
<b>Acciaio</b>			
Resistenza a snervamento dell'acciaio	$f_{yk}$	450	MPa
Coefficiente di sicurezza parziale acciaio	$\gamma_s$	1,15	
Resistenza di progetto a trazione dell'acciaio	$f_{yd}$	391,30	MPa
<b>Elementi con armatura a taglio</b>			
Diametro staffe esterne	$\phi_{sw1}$	16	mm
Numero braccia	$n_{b1}$	2	
Diametro staffe esterne	$\phi_{sw2}$	16	mm
Numero braccia	$n_{b2}$	6	
Passo staffe	s	100	mm
Inclinazione tra puntone compresso e asse elemento	$\theta$	45,00	°
Inclinazione armatura trasversale rispetto asse elemento	$\alpha$	90	°
Area sezione trasversale armatura a taglio	$A_{sw}$	1607,68	mm <sup>2</sup>
Braccio coppia interna	z	986,4	mm
Resistenza offerta dall'armatura a taglio	$V_{Rsd}$	6205	kN
Resistenza offerta dai puntoni	$V_{Rcd}$	9782	kN
<b>Resistenza a taglio della sezione armata trasversalmente</b>	<b><math>V_{Rd}</math></b>	<b>6205</b>	<b>kN</b>
<b>Taglio sollecitante SLU</b>	<b><math>V_{ed}</math></b>	<b>5185</b>	<b>kN</b>
			Verificato

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 7.1 Barrette temporanee - Verifiche SLU

Le barrette temporanee vengono verificate nella condizione di carico più gravose risultanti in quelle in cui i quattro solai sovrastanti il fondo scavo sono stati realizzati e le puntonature temporanee sono state rimosse.

Nel report MTL2T1A2DSTRSCAR002 delle strutture interne, le barrette vengono studiate nel dettaglio e dimensionate considerando lo stage construction simulato con il software strutturale oltre a tenere conto della tridimensionalità della stazione, dando così risultati più accurati; per tale motivo si rimanda al suddetto report per quanto riguardano le dovute verifiche strutturali dei setti provvisori.

## 7.2 Verifiche SLE

Nelle verifiche agli SLE si è tenuto in conto che per tutte le strutture sono state previste condizioni ambientali "ordinarie" con classi di esposizione XC2.

In funzione del tipo di armatura (poco sensibili) i limiti fessurativi risultano:

- Combinazione di azioni caratteristica:  $w_k \leq w = 0.3 \text{ mm}$

I limiti tensionali considerati per i diaframmi (C 25/30) sono relativi alla combinazione di carico caratteristica.

Calcestruzzo:

Combinazione di azioni	Limite tensionale
Caratteristica (rara)	$\sigma_c \leq 0.60 f_{ck} = 14.94 \text{ MPa (C25/30)}$

Acciaio:

Combinazione di azioni	Limite tensionale
Caratteristica (rara)	$\sigma_a \leq 0.80 f_{yk} = 360 \text{ MPa}$

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

**Tabella 21 Diaframmi - Verifica SLE –Sezione A -Seconda Gabbia**

<b>Sezione di verifica SLE: Sezione A</b>		
<b>Geometria sezione:</b>		
Altezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1200	[mm]
Larghezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1000	[mm]
Copriferro	75	[mm]
Altezza utile della sezione	1075	[mm]
<b>Limitazione delle tensioni</b>		
Area dell'armatura tesa	10619	[mm <sup>2</sup> ]
Area dell'armatura compressa	12742	[mm <sup>2</sup> ]
Momento sollecitante	2010	[kNm]
Posizione dell'asse neutro	369,92	[mm]
Momento d'inerzia della sezione rispetto a x	1,34062E+11	[mm <sup>4</sup> ]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione caratteristica	15,0	[MPa]
Tensione ammissibile nell'acciaio per le combinazioni a SLS	360,0	[MPa]
<b>Tensione nel calcestruzzo</b>	<b>5,5</b>	<b>[MPa]</b>
Tensione calcestruzzo < 15 Mpa		Verificato
<b>Tensione nell'armatura tesa</b>	<b>194,0</b>	<b>[MPa]</b>
Tensione acciaio < 360 Mpa		Verificato
<b>Apertura delle fessure</b>		
Tensione indotta nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	193,96	[MPa]
Valore medio della resistenza a trazione efficace del calcestruzzo	2,56	[MPa]
Fattore dipendente dalla durata del carico	0,40	[-]
Altezza efficace	276,69	[mm]
Area efficace del calcestruzzo teso attorno all'armatura	276695	[mm <sup>2</sup> ]
Rapporto geometrico sull'area efficace	0,0384	[-]
Rapporto tra Es/Ecm	6,67	[-]
Differenza tra la deformazione nell'acciaio e quella nel calcestruzzo	0,000764	[-]
Determinazione del diametro equivalente delle barre tese	26,00	[mm]
Distanza massima tra le fessure	370,17	[mm]
<b>Ampiezza delle fessure</b>	<b>0,283</b>	<b>[mm]</b>
<b>Ampiezza massima delle fessure</b>	<b>0,3</b>	<b>[mm]</b>
		Verificato

**Tabella 22 Diaframmi - Verifica SLE –Sezione B -Terza Gabbia**



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere  
di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

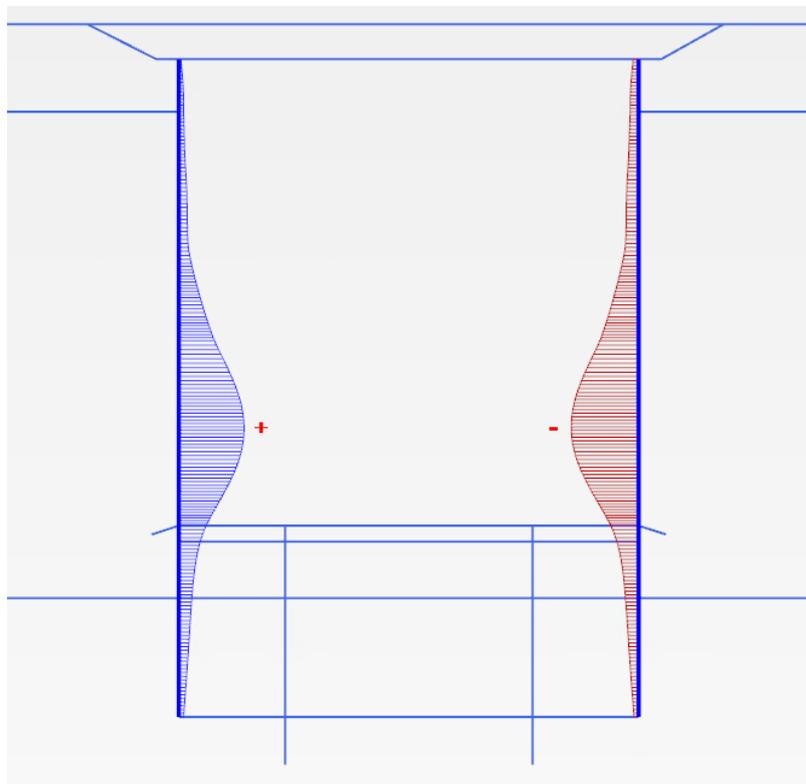
<b><u>Sezione di verifica SLE: Sezione B</u></b>	
<b>Geometria sezione:</b>	
Altezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1200 [mm]
Larghezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1000 [mm]
Copriferro	75 [mm]
Altezza utile della sezione	1075 [mm]
<b>Limitazione delle tensioni</b>	
Area dell'armatura tesa	12742 [mm <sup>2</sup> ]
Area dell'armatura compressa	10619 [mm <sup>2</sup> ]
Momento sollecitante	2337 [kNm]
Posizione dell'asse neutro	417,31 [mm]
Momento d'inerzia della sezione rispetto a x	1,4818E+11 [mm <sup>4</sup> ]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione caratteristica	15,0 [MPa]
Tensione ammissibile nell'acciaio per le combinazioni a SLS	360,0 [MPa]
<b>Tensione nel calcestruzzo</b>	<b>6,6 [MPa]</b>
Tensione calcestruzzo < 15 Mpa	Verificato
<b>Tensione nell'armatura tesa</b>	<b>190,3 [MPa]</b>
Tensione acciaio < 360 Mpa	Verificato
<b>Apertura delle fessure</b>	
Tensione indotta nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	190,31 [MPa]
Valore medio della resistenza a trazione efficace del calcestruzzo	2,56 [MPa]
Fattore dipendente dalla durata del carico	0,40 [-]
Altezza efficace	260,90 [mm]
Area efficace del calcestruzzo teso attorno all'armatura	260898 [mm <sup>2</sup> ]
Rapporto geometrico sull'area efficace	0,0488 [-]
Rapporto tra Es/Ecm	6,67 [-]
Differenza tra la deformazione nell'acciaio e quella nel calcestruzzo	0,000774 [-]
Determinazione del diametro equivalente delle barre tese	26,00 [mm]
Distanza massima tra le fessure	345,50 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure</b>	<b>0,267 [mm]</b>
<b>Ampiezza massima delle fessure</b>	<b>0,3 [mm]</b>
	Verificato



### 7.3 Verifica di deformabilità a lungo termine

La verifica di deformabilità a lungo termine è condotta tenendo in considerazione gli effetti del fluage del calcestruzzo. Per simulare il fluage delle strutture in calcestruzzo sotto carico costante è stato applicato al modulo elastico del calcestruzzo un coefficiente di riduzione pari a 2.75.

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



**Total displacements  $u_x$  (scaled up 200 times)**

Maximum value = 0,02029 m (Element 243 at Node 29485)

Minimum value = -0,02097 m (Element 255 at Node 52157)

**Figura 16. Spostamenti orizzontali a lungo termine**

Per la sezione in oggetto lo spostamento massimo risulta essere di 20.97 mm risulta compatibile con il limite stabilito pari a 15 cm, considerando l'altezza della paratia pari a 30m.



## 8. VERIFICHE GEOTECNICHE

### 8.1 Verifica tampone di fondo

La verifica della stabilità del tampone di fondo è condotta considerando tutti i possibili meccanismi di collasso evidenziati nella figura sottostante.

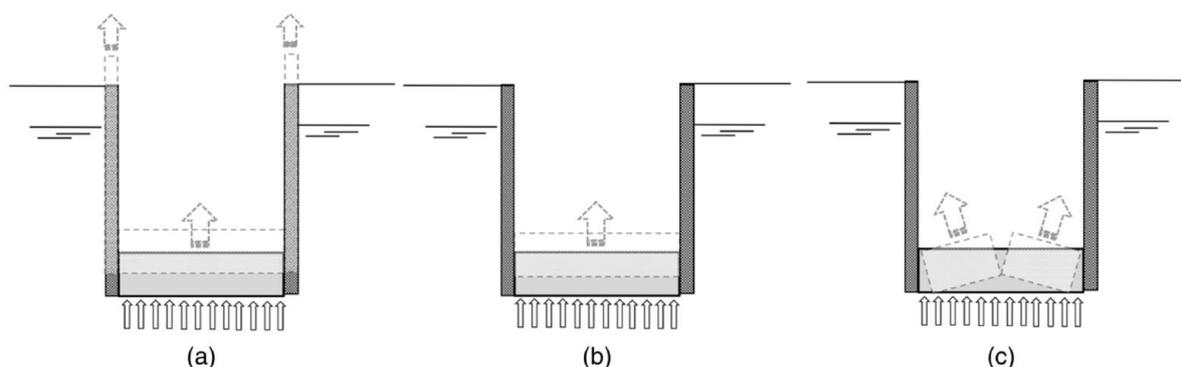


Figura 17. Possibili meccanismi di collasso: a) sollevamento del tampone di fondo e dei diaframmi b) sollevamento del tampone di fondo c) rottura del tampone di fondo

Di seguito sono riportati i parametri utilizzati per le verifiche del tampone e le relative verifiche.

Essendo la snellezza del tampone L/H circa pari 2,28 (elemento tozzo) il meccanismo di rottura (c) non può manifestarsi, pertanto se ne omette la verifica.

Tabella 23 Verifica tampone di fondo

Parametri geometrici e geotecnici			
Larghezza diaframmi	=	1,2	m
Altezza soletta di copertura	=	0,8	m
Altezza solette intermedie	=	1,0	m
Altezza riempimento	=	1,42	m
Larghezza interna scavo	=	27,4	m
Fondo scavo	=	-31,5	m
Hw	=	-15	m
Profondita' paratia	=	-43,50	m
Altezza terreno saturo al di sopra del tampone	=	0,00	m
<b>Battente idraulico</b>	=	<b>28,5</b>	<b>m</b>
<b>Altezza tampone di fondo</b>	=	<b>12,00</b>	<b>m</b>
<b>Profondita' infissione paratia</b>	=	<b>12,00</b>	<b>m</b>



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Coefficients parziali			
$\gamma_G \text{ fav}$	=	0,9	
$\gamma_G \text{ unfav}$	=	1,1	
$\gamma \phi$	=	1,25	
$\gamma c$	=	1,25	
Parametri geotecnici			
$\gamma_{ig}$	=	22	kN/mc
$\gamma_s$	=	19	kN/mc
$\delta$	=	0,5	
$\phi_{s,k}$	=	36,0	°
$c_{s,k}$	=	10,00	kPa
$\phi_{s-int,d}$	=	16,2	°
$c_{s-int,d}$	=	0	kPa
$\phi_{jg,k}$	=	36	°
$c_{jg,k}$	=	150,00	kPa
$c_{jg-int,d}$	=	60	kPa
$\phi_{jg-int,d}$	=	16,2	°
$qu_{jg-int,k}$	=	589	kPa
$qu_{jg-int,d}$	=	471	kPa



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

<b>Verifica galleggiamento della struttura a breve termine</b>			
<b>Forze agenti</b>			
<b>Azioni instabilizzanti</b>			
Pressione U alla base della paratia	=	285,0	kPa
Pressione U alla base del tampone	=	285,0	kPa
Forza instabilizzante	=	8493,0	kN/m
<b>Azioni stabilizzanti</b>			
Peso tampone	=	7233,6	kN/m
Peso terreno saturo sopra tampone	=	0,0	kN/m
Peso diaframmi	=	2524,8	kN/m
Peso riempimento	=	804,0	kN/m
Peso soletta copertura	=	548,0	kN/m
Peso di 3 solette intermedie	=	2055,0	kN/m
Forze stabilizzanti totali	=	13165,4	kN/m
<b>Resistenze</b>			
$K_a$	=	0,56	
Tensione normale media agente sulla paratia	=	110,4	kPa
Contributo angolo di attrito	=	1349,7	kN/m
Contributo coesione	=	0	kN/m
Forza stabilizzante dovuta all'attrito	=	2699,3	kN/m
Forza instabilizzante progetto	=	9342,3	kN/m
Forza stabilizzante + resistenze di progetto	=	14548,2	kN/m
FS	=	1,56	OK



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Verifica a galleggiamento del tampone di fondo a breve termine			
<b>Forze agenti</b>			
<b>Azioni instabilizzanti</b>			
Pressione U alla base del tampone	=	285,00	kPa
Forza instabilizzante	=	7809,00	kN/m
<b>Azioni stabilizzanti</b>			
Peso tampone	=	7233,60	kN/m
Peso terreno saturo sopra tampone	=	0,00	kN/m
Forze stabilizzanti totali	=	7233,60	kN/m
<b>Resistenze</b>			
$K_0$	=	0,72	
<b>Soil</b>			
Tensione normale media	=	0,0	kPa
Contributo angolo di attrito	=	0,0	kN/m
Contributo coesione	=	0,0	kN/m
Forza stabilizzante dovuta all'attrito	=	0,0	kN/m
<b>Grout</b>			
Tensione normale media	=	95,2	kPa
Contributo angolo di attrito	=	331,9	kN/m
Contributo coesione	=	720,0	kN/m
Forza stabilizzante dovuta all'attrito	=	2103,9	kN/m
Forza instabilizzante progetto	=	8589,90	kN/m
Forza stabilizzante + resistenze di progetto	=	8614,11	kN/m
FS	=	1,00	OK

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Verifica resistenza interna tampone di fondo			
<b>Forze agenti</b>			
<b>Azioni instabilizzanti</b>			
M instabilizzante	=	29420	kNm/m
<b>Azioni stabilizzanti</b>			
M stabilizzante	=	22298	kNm/m
<b>Resistenze</b>			
Resistenza interna del tampone di fondo	=	10174	kNm/m
Forza instabilizzante progetto	=	29420,41	kNm/m
Forza stabilizzante + resistenze di progetto	=	32471,74	kNm/m
FS	=	<b>1,10</b>	<b>OK</b>

## 8.2 Verifica capacità portante barrette (kingpost)

Le barrette realizzate all'interno del corpo stazione sostengono quasi tutto il carico assiale trasmesso dalla copertura e dalle solette intermedie nella fase costruttiva, per cui i diaframmi laterali risultano quasi scarichi in tutte le fasi di realizzazione della stazione. A lungo termine il carico della stazione verrà trasmesso al terreno tramite la soletta di base. Le verifiche di capacità portante delle barrette sono riportate nel seguito, mentre le verifiche strutturali vengono riportate nella relazione di calcolo delle strutture interne essendo i carichi a lungo termine maggiori di quelli transitori. Il valore delle tensioni efficaci adottato per la verifica è desunto dalle analisi numeriche.

La capacità portante della barretta può essere assimilata a quella di un palo di fondazione isolato e pertanto la verifica è condotta con il seguente procedimento.

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

$$P_{lim} = A_p(cN_c d_c s_c + \eta q N_q d_q s_q + \frac{1}{2} \gamma B_p N_\gamma s_\gamma)$$

Con:

$P_{lim}$  è la capacità portante di base

$A_p$  è l'area della base del palo

$N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$  sono i fattori di capacità; portante relativi a coesione, sovraccarico e peso proprio del terreno

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

$d_c, d_q, d_v$  sono fattori correttivi relativi profondità del piano di posa

$s_c, s_q, s_v$  sono fattori correttivi relativi alla dimensione della base del palo

$q$  è la tensione verticale efficace al livello della base del palo

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

La capacità portante laterale è valutata secondo la formulazione proposta da Burland in cui la tensione tangenziale resistente è pari a:

$$f_s = Kq \tan \delta$$

In cui:

$K$  è il coefficiente di spinta a riposo valutato con la formulazione di Jacky

$q$  è la tensione verticale efficace media agente lungo la profondità di infissione del palo

$\delta$  è l'angolo d'attrito palo terreno valutato come  $0,5 \varphi$

Secondo quanto prescritto dalle norme tecniche per le costruzioni al par. 6.4.3.1.1 il coefficiente parziale (R3) applicato all'aliquota di resistenza della capacità portante laterale in compressione è pari a 1,15.

Il carico di progetto è stato considerato sulla base dei risultati ottenuti dal modello strutturale (report MTL2T1A2DSTRSCAR002) in quanto tenendo conto della tridimensionalità del problema fornisce risultati più accurati. La barretta con il maggior carico assiale è stata verificata.

**Tabella 24 Verifica capacità portante barrette**

Parametri geotecnici			Forza agente		
$c_k$	40	kPa	Carico caratteristico	27312	kN
$\phi_k$	23	°	Carico di progetto	38236	kN
$\gamma_k$	19	kN/mc			
Dimensione fondazione					
B	1,2	m			
L	2,8	m			
$\theta$	0	°			
Lunghezza immorsata					
Lunghezza	25	m			



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Capacità portante di base	
$s_c$	1,21
$s_q$	1,17
$s_v$	0,83
$d_c$	1,61
$d_q$	1,48
$i_c \ i_q$	1,00
$i_v$	1,00
$N_c$	18,03
$N_q$	8,66
$N_\gamma$	4,87

$q_c$	1400	kPa
$q_q$	5982	kPa
$q_\gamma$	46	kPa

$q_{ult}$	7427	kPa
Fattore sicurezza parziale	1,35	
<b>R di base di progetto</b>	<b>18486</b>	<b>kN</b>

Capacità portante laterale		
$\sigma'_v$ (An. numerica)	400	kPa
$K_0$	0,61	
$\sigma'_h$ average	244	kPa
$\delta$	0,5	
Resistenza palo terreno	11,5	°
$K_a$	0,438	
Attrito palo terreno	124,0	kPa
Resistenza laterale	24820	kN
Fattore di sicurezza parziale	1,15	
<b>R laterale di progetto</b>	<b>21583</b>	<b>kN</b>

<b>R totale di progetto</b>	<b>40068</b>	<b>kN</b>
<b>Carico di progetto</b>	<b>38236</b>	<b>kN</b>
	<b>Verificato</b>	



### 8.3 Verifica capacità portante paratia

Come descritto nel paragrafo precedente i diaframmi risultano sostanzialmente poco caricati durante le differenti fasi costruttive dell'opera. Nella fase costruttiva la maggior parte del carico verticale è portato dalle barrette mentre a lungo termine i carichi sono portati dalla soletta di base. Di seguito si riporta la verifica a capacità portante della paratia nella fase temporanea.

Il valore delle tensioni efficaci adottato per la verifica è desunto dalle analisi numeriche.

**Tabella 25 Verifica capacità portante paratia**

Parametri geotecnici		
$c_k$	10	kPa
$\phi_k$	36	°
$\gamma_k$	19	kN/mc
Dimensione del palo		
B	1,2	m
L	1	m
$\theta$	0	°
Lunghezza del palo		
Lunghezza	12	m

Forza agente		
Carico caratteristico	1919	kN
<b>Carico di progetto</b>	<b>2687</b>	<b>kN</b>

Capacità portante di base	
$s_c$	1,92
$s_q s_\gamma$	1,46
$d_c$	3,27
$d_q d_\gamma$	2,40
$i_c i_q$	1,00
$i_\gamma$	1,00
Nc	50,53
Nq	37,71
N $\gamma$	40,01

$q_c$	3178	kPa
$q_q$	17025	kPa
$q_\gamma$	667	kPa

$q_{ult}$	20870	kPa
Fattore sicurezza parziale	1,35	
R di base di progetto	18551	kN

Capacità portante laterale		
$\sigma'_v$	230	kPa
$\sigma'_v$ average	195	kPa
$K_0$	0,41	
$\sigma'_h$ average	218	kPa
Delta	0,5	
Resistenza palo terreno	18	°
$K_a$	0,260	
Attrito palo terreno	70,83	kPa
Resistenza laterale	3740	kN
Fattore di sicurezza parziale	1,15	
R laterale di progetto	3252	kN

<b>R totale di progetto</b>	<b>21803</b>	<b>kN</b>
<b>Carico di progetto</b>	<b>2687</b>	<b>kN</b>
	<b>Verificato</b>	



### 8.4 Verifica capacità portante della soletta di fondo

Le modellazioni numeriche eseguite non evidenziano criticità in termini deformativi e di sviluppo di fasce plastiche al di sotto della soletta di base anche nella fase finale di disattivazione dei trattamenti del fondo scavo. Per tanto, non sono necessarie ulteriori verifiche della relativa capacità portante.

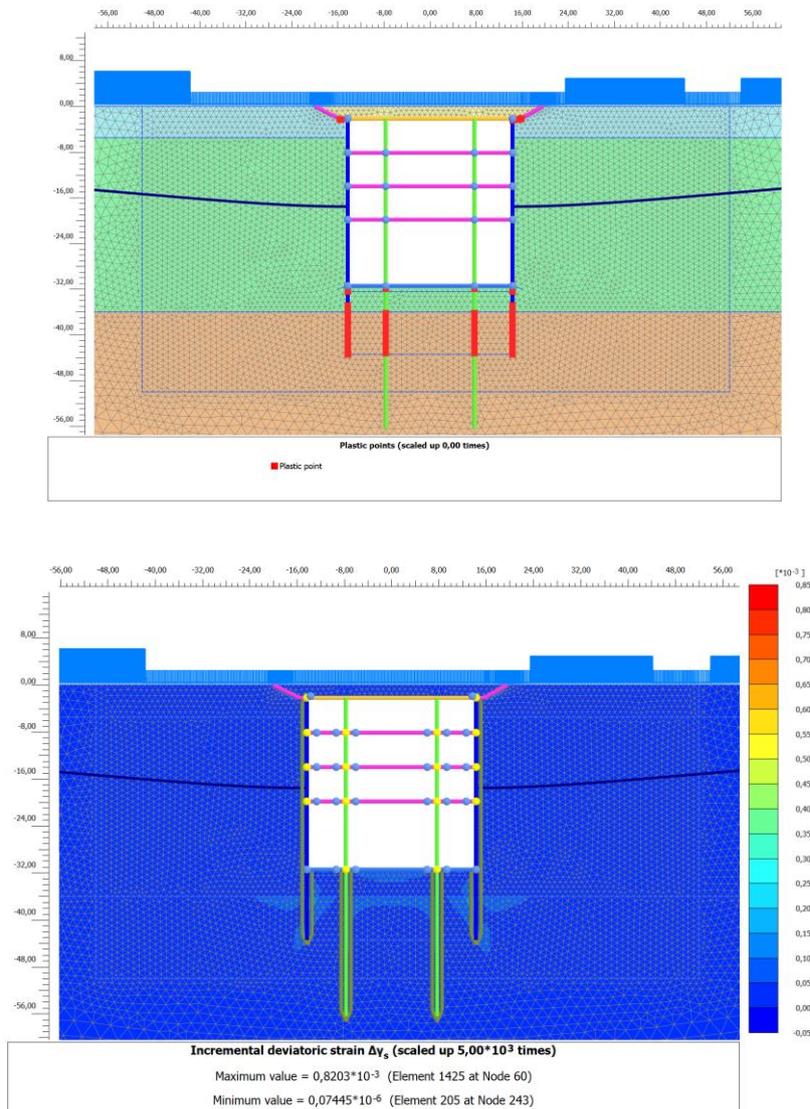


Figura 18. Zone di plasticizzazione



## 8.5 Verifica puntone temporanei

Di seguito viene riportata la verifica strutturale per i puntone temporanei usati durante lo scavo della stazione. Sono presentate le verifiche del puntone spezzato dalle barrette intermedie che hanno lunghezza 14.2m per i quali sono previsti puntone di diametro 833mm e spessore 32mm, e anche la verifica del puntone continuo lungo 25.6m, per i quali sono previsti dei profili tubolari di diametro 1016mm e spessore 30mm solo al primo livello di puntone in quanto rappresenta la condizione più sfavorevole nella fase di passaggio della TBM.

- **Puntone spezzato**

Materiali			
Tensione di snervamento	$f_{yk}$	355	[N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione ultima	$f_{uk}$	510	[N/mm <sup>2</sup> ]
Modulo elastico	E	210000	[N/mm <sup>2</sup> ]
Fattore di sicurezza - Resistenza	$\gamma_{M0}$	1,05	[-]
Fattore di sicurezza - Stabilità	$\gamma_{M1}$	1,05	[-]
Fattore di sicurezza resistenza a SLU	$\gamma_{M2}$	1,25	[-]
Proprietà geometriche			
Diametro esterno	$d_{ext}$	833,00	[mm]
Spessore	t	32,00	[mm]
Lunghezza puntone	L	14,20	[m]
Diametro interno	$d_{int}$	769,00	[mm]
Raggio esterno	$r_{ext}$	416,50	[mm]
Raggio interno	$r_{int}$	384,50	[mm]
Area sezione trasversale	A	80525	[mm <sup>2</sup> ]
Momento d'inerzia	$I_y$	6,4652E+09	[mm <sup>4</sup> ]
Modulo di resistenza elastico	$W_{el,y}$	1,5523E+07	[mm <sup>3</sup> ]
Modulo di resistenza plastico	$W_{pl,y}$	3,5460E+06	[mm <sup>3</sup> ]
Area resistente a taglio	$A_{V,z}$	51264	[mm <sup>2</sup> ]
Raggio d'inerzia	$i_y$	283,35	[mm]
Forze agenti			
Forza normale (positiva se di compressione) caratteristica	$N_k$	11450,00	[kN]
Forza normale (positiva se di compressione) di progetto	$N_{ed}$	16030,00	[kN]
Momento flettente caratteristico	$M_k$	2287,64	[kNm]



Momento flettente di progetto	$M_{ed}$	3202,70	[kNm]
Taglio caratteristico	$V_k$	0,00	[kN]
Taglio di progetto	$V_{ed}$	0,00	[kN]
<b>Classificazione della sezione trasversale</b>			
Coefficiente $\varepsilon$	$\varepsilon$	0,814	[-]
Diametro esterno/spessore	$\rho$	26,031	[-]
Rapporto limite per classe 1	$\rho_1$	33,099	[-]
Rapporto limite per classe 2	$\rho_2$	46,338	[-]
Rapporto limite per classe 3	$\rho_3$	59,577	[-]
<b>Classificazione della sezione trasversale</b>	<b>CL</b>	<b>1</b>	
<b>Verifica di stabilita'</b>			
<b><u>Instabilita' per compressione</u></b>			
Coefficiente di vincolo	$\beta$	1,00	[-]
Lunghezza libera di inflessione	$l$	14200,00	[mm]
Snellezza adimensionalizzata	$\lambda$	50,11	[-]
	$\varepsilon$	0,81	[-]
Snellezza limite	$\lambda_1$	76,37	[-]
	$\underline{\lambda}$	0,66	[-]
	$\alpha$	0,21	[-]
	$\Phi$	0,76	[-]
	$\chi$	0,87	[-]
Resistenza a instabilita' per sezione compressa	$N_{b,Rd}$	23614,23	[kN]
FOS	FS	1,473	[-]
<b><u>Instabilita' per flessione e compressione</u></b>			
	$\beta_M$	1,30	[-]
	$\mu_{calc}$	-0,92	[-]
	$\mu$	-0,92	[-]
	$k_{calc}$	1,62	[-]
	$k$	1,50	[-]
	<b>0,813</b>	<1	Verificato



- Puntone continuo**

Materiali			
Tensione di snervamento	$f_{yk}$	355	[N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione ultima	$f_{uk}$	510	[N/mm <sup>2</sup> ]
Modulo elastico	E	210000	[N/mm <sup>2</sup> ]
Fattore di sicurezza - Resistenza	$\gamma_{M0}$	1,05	[-]
Fattore di sicurezza - Stabilita'	$\gamma_{M1}$	1,05	[-]
Fattore di sicurezza resistenza a SLU	$\gamma_{M2}$	1,25	[-]
Proprieta' geometriche			
Diametro esterno	$d_{ext}$	1016,00	[mm]
Spessore	t	30,00	[mm]
Lunghezza puntone	L	25,60	[m]
Diametro interno	$d_{int}$	956,00	[mm]
Raggio esterno	$r_{ext}$	508,00	[mm]
Raggio interno	$r_{int}$	478,00	[mm]
Area sezione trasversale	A	92928	[mm <sup>2</sup> ]
Momento d'inerzia	$I_y$	1,1298E+10	[mm <sup>4</sup> ]
Modulo di resistenza elastico	$W_{el,y}$	2,2240E+07	[mm <sup>3</sup> ]
Modulo di resistenza plastico	$W_{pl,y}$	3,5460E+06	[mm <sup>3</sup> ]
Area resistente a taglio	$A_{V,z}$	59160	[mm <sup>2</sup> ]
Raggio d'inerzia	$i_y$	348,68	[mm]
Forze agenti			
Forza normale (positiva se di compressione) caratteristica	$N_k$	11450,00	[kN]
Forza normale (positiva se di compressione) di progetto	$N_{ed}$	16030,00	[kN]
Momento flettente caratteristico	$M_k$	15380,38	[kNm]
Momento flettente di progetto	$M_{ed}$	21532,53	[kNm]
Taglio caratteristico	$V_k$	0,00	[kN]
Taglio di progetto	$V_{ed}$	0,00	[kN]
Classificazione della sezione trasversale			
Coefficiente $\varepsilon$	$\varepsilon$	0,814	[-]
Diametro esterno/spessore	$\rho$	33,867	[-]
Rapporto limite per classe 1	$\rho_1$	33,099	[-]
Rapporto limite per classe 2	$\rho_2$	46,338	[-]



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Rapporto limite per classe 3	$\rho_3$	59,577	[-]
<b>Classificazione della sezione trasversale</b>	<b>CL</b>	<b>2</b>	
<b>Verifica di stabilita'</b>			
<b><u>Instabilita' per compressione</u></b>			
Coefficiente di vincolo	$\beta$	1,00	[-]
Lunghezza libera di inflessione	$l$	25600,00	[mm]
Snellezza adimensionalizzata	$\lambda$	73,42	[-]
	$\varepsilon$	0,81	[-]
Snellezza limite	$\lambda_1$	76,37	[-]
	$\underline{\lambda}$	0,96	[-]
	$\alpha$	0,21	[-]
	$\Phi$	1,04	[-]
	$\chi$	0,69	[-]
Resistenza a instabilita' per sezione compressa	$N_{b,Rd}$	21756,08	[kN]
FOS	FS	1,357	[-]
<b><u>Instabilita' per flessione e compressione</u></b>			
	$\beta_M$	1,30	[-]
	$\mu_{calc}$	-1,35	[-]
	$\mu$	-1,35	[-]
	$k_{calc}$	1,99	[-]
	$k$	1,50	[-]
	<b>0,909</b>	<1	Verificato

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 8.6 Verifica trave di ripartizione

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

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

$$M_{Max} = \frac{1}{12} q l^2 \quad V_{Max} = 0.6 q l$$

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

Per il caso in esame l'interasse dei puntoni è di 6 m ed il massimo carico cui sono soggetti è 11450 kN, ne deriva un carico caratteristico uniformemente distribuito di 1908 kN/m.

Il massimo momento sollecitante di calcolo derivante da tale carico è pari a 8014 kNm.

Il massimo taglio sollecitante di calcolo derivante da tale carico è pari a 9616 kN.

La struttura della trave di ripartizione è costituita da n.3 HEM800 affiancate. Nel seguito si riporta la verifica di tale sezione.

**Tabella 26 Verifica trave di ripartizione**

Verifica trave di ripartizione sezione HEM800 - Sezione maggiormente sollecitata			
<b>Azioni sollecitanti</b>			
Forza normale	N <sub>Ed</sub>	0	[kN]
Forza di taglio parallela all'anima	V <sub>z,Ed</sub>	3205	[kN]
Forza di taglio parallela alle ali	V <sub>y,Ed</sub>	0	[kN]
Momento flettente attorno all'asse maggiore di inerzia	M <sub>y,Ed</sub>	2671	[kNm]
Momento flettente attorno all'asse minore di inerzia	M <sub>z,Ed</sub>	0	[kNm]
<b>Materiali</b>			
Valore di snervamento dell'acciaio del profilo	f <sub>yk</sub>	355	[N/mm <sup>2</sup> ]
Valore di rottura dell'acciaio del profilo	f <sub>uk</sub>	510	[N/mm <sup>2</sup> ]
Modulo di elasticità dell'acciaio del profilo	E	210000	[N/mm <sup>2</sup> ]
Modulo di elasticità tangenziale dell'acciaio del profilo	G	80769,23	[N/mm <sup>2</sup> ]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di resistenza	γ <sub>M0</sub>	1,05	[-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di stabilità	γ <sub>M1</sub>	1,05	[-]



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di rottura	$\gamma_{M2}$	1,25	[-]
<b>Geometria profilo</b>		HEM 800	
Altezza della sezione trasversale	h	814	[mm]
Larghezza della sezione trasversale	$b_f$	303	[mm]
Spessore dell'anima	$t_w$	21	[mm]
Spessore dell'ala	$t_f$	40	[mm]
Momento d'inerzia della sezione trasversale attorno all'asse forte	$I_y$	4,43E+09	[mm <sup>4</sup> ]
Modulo di resistenza elastico attorno all'asse forte	$W_{el,y}$	10870000	[mm <sup>3</sup> ]
Modulo di resistenza plastico attorno all'asse forte	$W_{pl,y}$	12490000	[mm <sup>3</sup> ]
Area resistente a taglio nel piano dell'anima	$A_{V,z}$	19430	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Resistenza a taglio</b>			
Area resistente a taglio in direzione parallela all'anima	$A_{Vz,eff}$	19430	[mm <sup>2</sup> ]
Resistenza plastica a taglio in direzione parallela all'anima	$V_{pl,z,Rd}$	3793	[kN]
Verifica a taglio - torsione in direzione parallela all'anima	FS	<b>1,18</b>	<b>OK</b>
<b>Resistenza a flessione</b>			
Modulo di resistenza di calcolo attorno all'asse maggiore	$W_y$	12490000	[mm <sup>3</sup> ]
Resistenza a flessione attorno all'asse maggiore	$M_{cy,Rd}$	4223	[kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse maggiore	FS	<b>1,58</b>	<b>OK</b>
<b>Resistenza combinata per flessione e taglio</b>			
Fattore di riduzione per la presenza della forza di taglio parallela all'anima	$\rho_{Vz,red}$	0,476208	[-]
Resistenza a flessione ridotta, attorno all'asse maggiore	$M_{Vy,Rd}$	3767	[kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse maggiore	FS	<b>1,41</b>	<b>OK</b>



## 8.7 Stabilità globale

Il fattore di sicurezza relativo alla stabilità globale è valutato sia nella fase di breve termine che di lungo termine. L'analisi è stata condotta con la combinazione A2-M2 applicando i fattori di riduzione dei parametri in accordo al punto 6.5.3.1.2 delle NTC.

Lo spostamento di tre punti lungo la paratia viene monitorato: uno in testa, uno al fondo scavo ed uno al piede.

- **Breve termine**

Il fattore di sicurezza ottenuto è pari a 1.98.

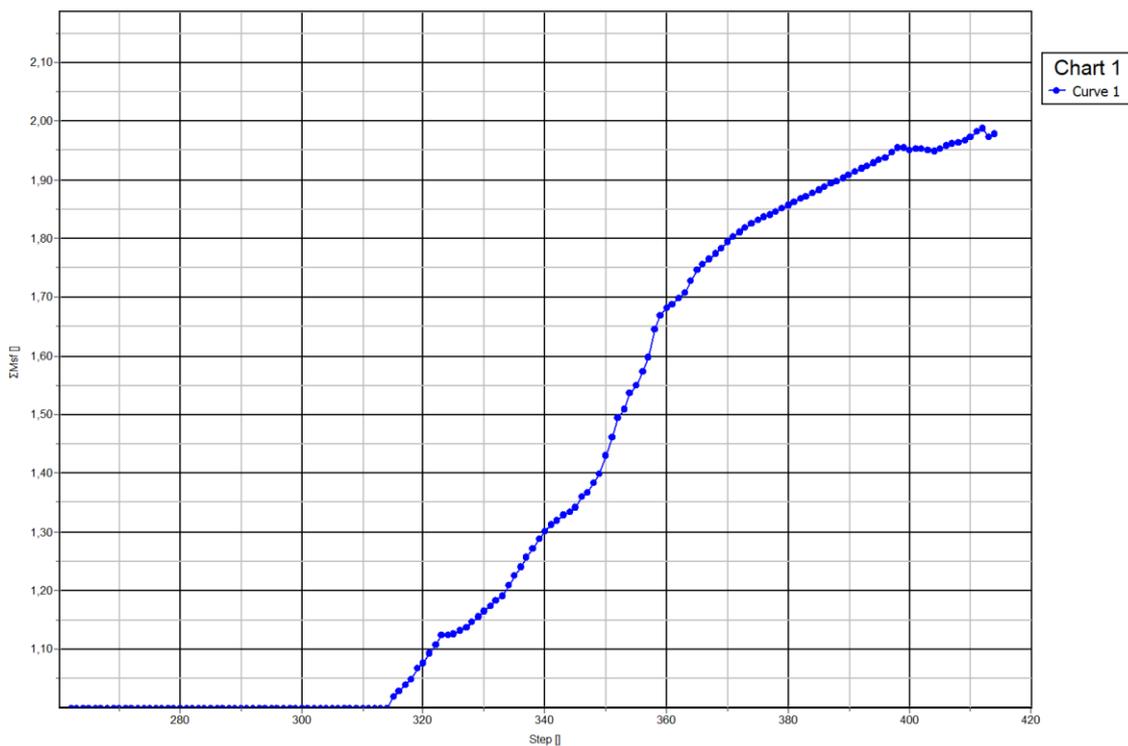
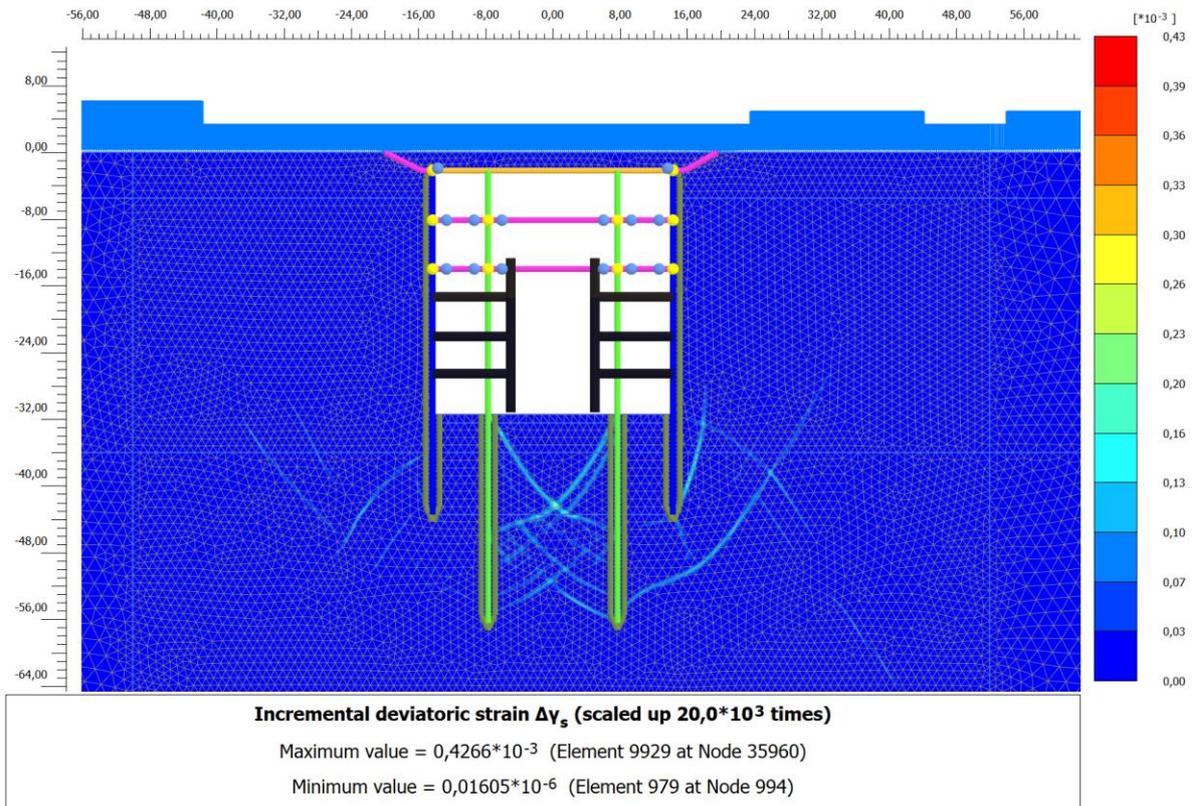


Figura 19. Fattore di sicurezza nella fase costruttiva



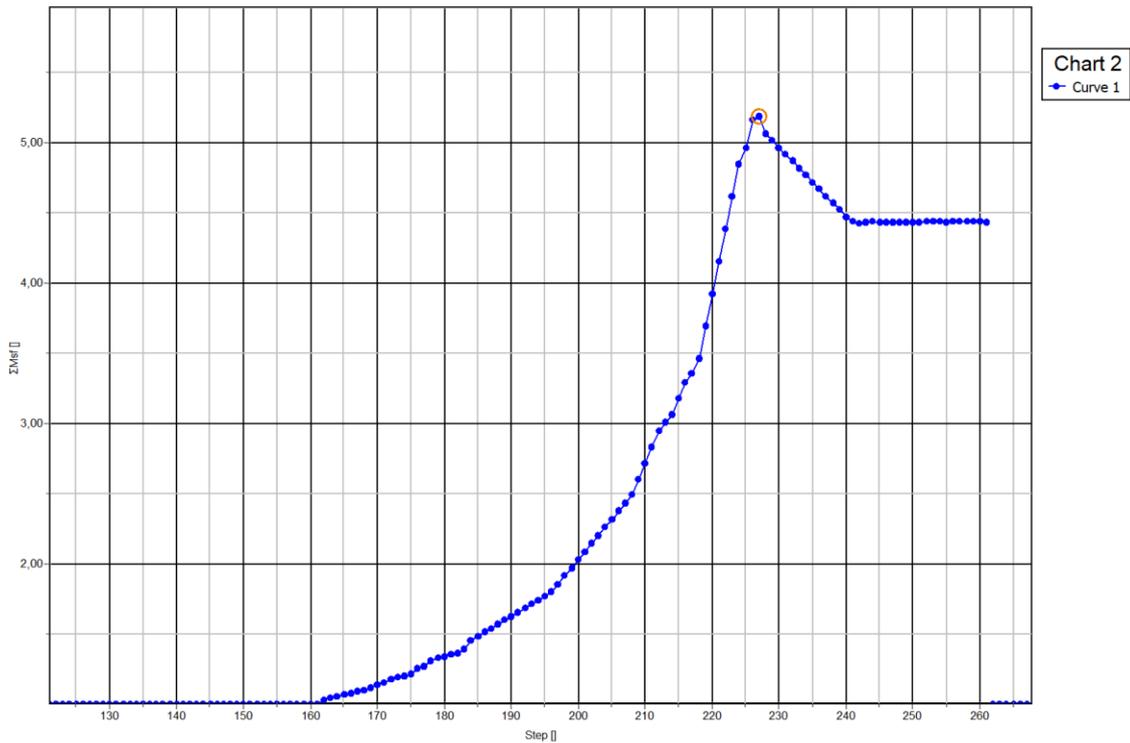
**Figura 20. Rapporto tra tensione tangenziale massima e tensione tangenziale mobilitata – breve termine**

La Figura 20 mostra il rapporto tra tensione tangenziale limite e tensione tangenziale agente in corrispondenza dello step di calcolo a fondo scavo (più critico ai fini di questa analisi).

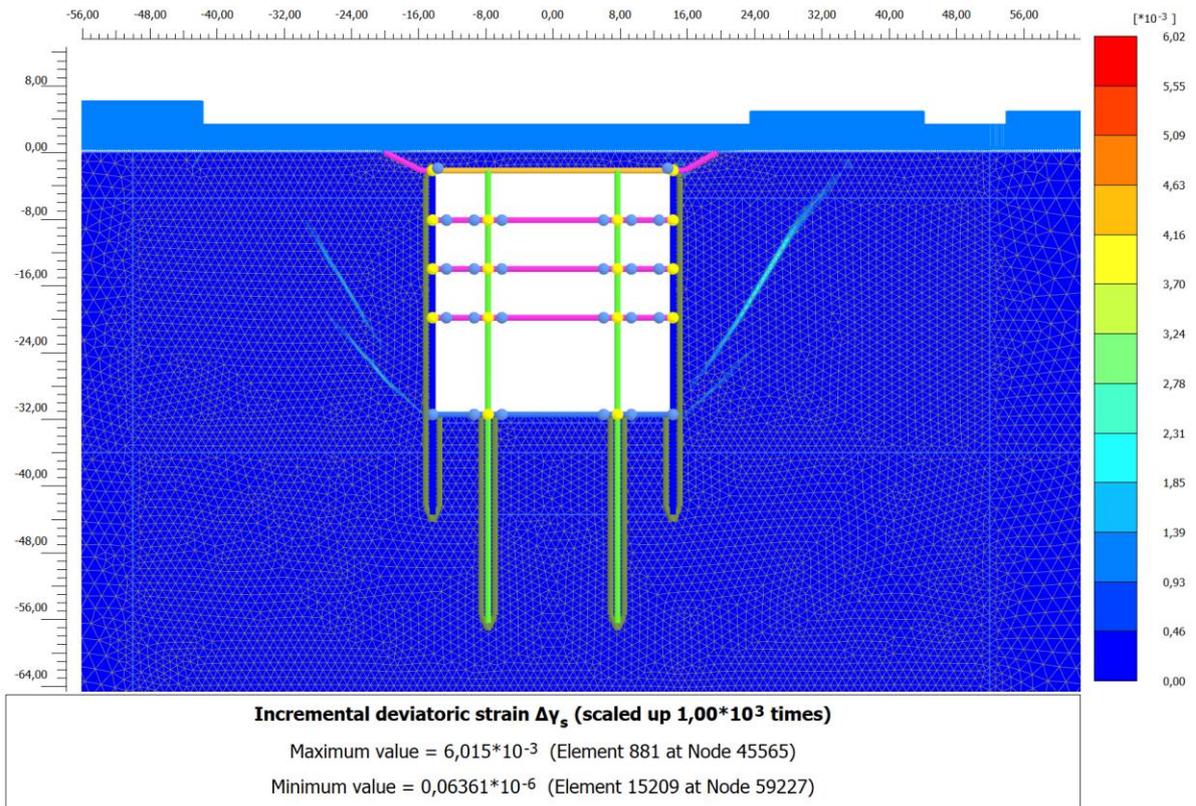


- **Lungo termine**

Il fattore di sicurezza ottenuto è maggiore di 4,4.



**Figura 21. Fattore di sicurezza a lungo termine**



**Figura 22. Rapporto tra tensione tangenziale massima e tensione tangenziale mobilitata – lungo termine**

La Figura 22 mostra il rapporto tra tensione tangenziale limite e tensione tangenziale agente in corrispondenza dell'ultimo step di calcolo. L'output fornisce indicazioni riguardo la mobilitazione delle spinte limite sulla parete.

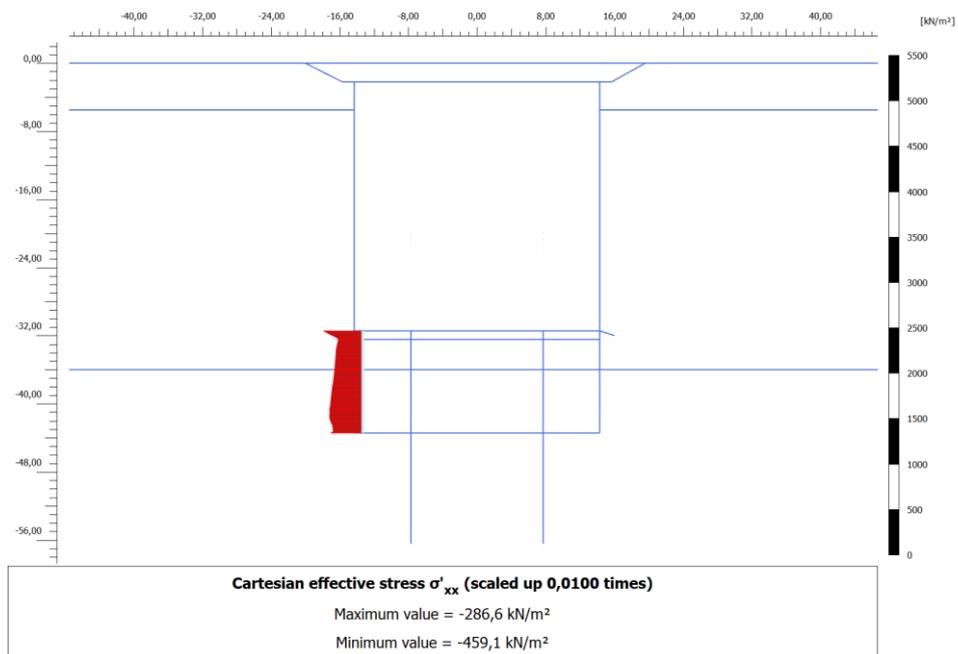
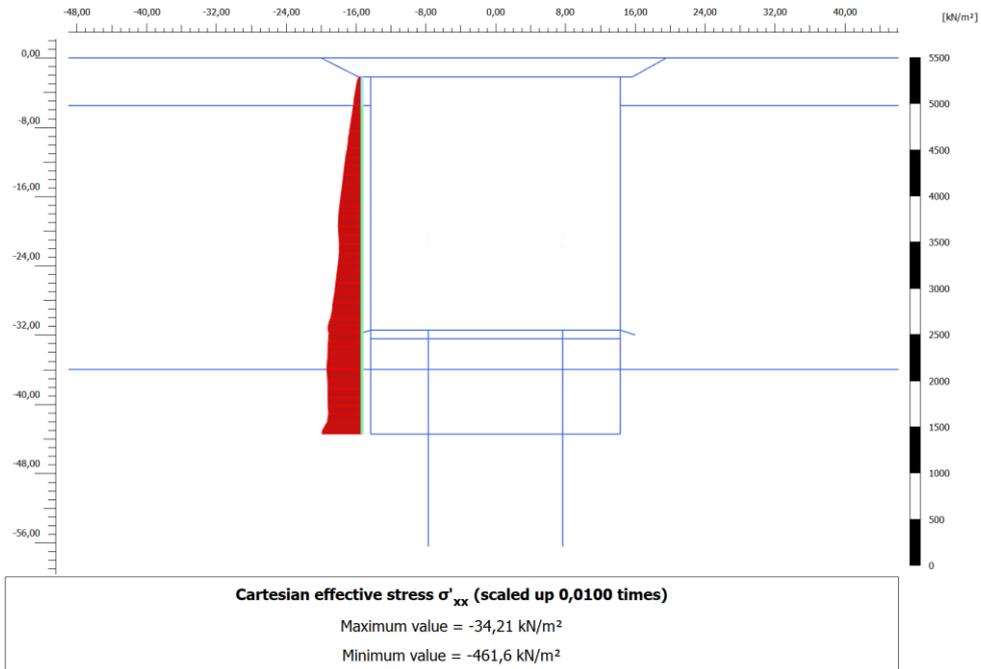


Figura 23. Tensioni orizzontali efficaci paratia

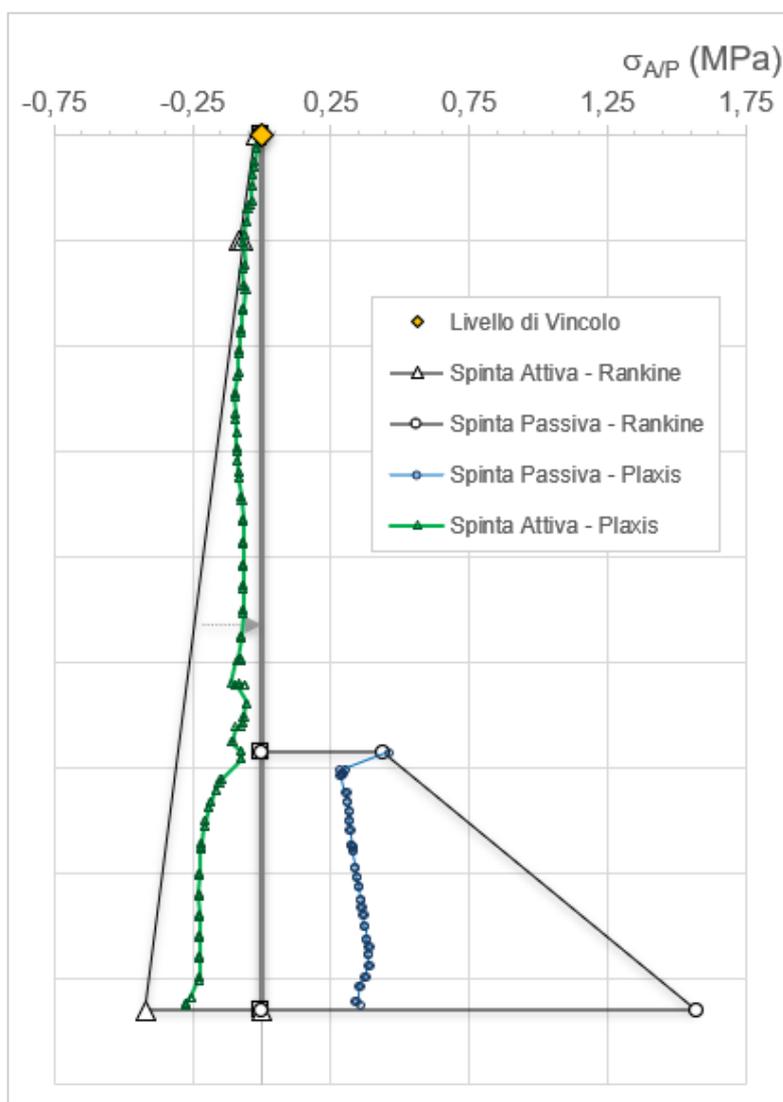


Figura 24. Confronto tensione limite attive e passive con tensioni orizzontali Plaxis

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



### 8.8 Verifica a galleggiamento

		Forze stabilizzanti - Peso			
<b>Ritombamento</b>		<b>Diaframmi</b>		<b>Soletta copertura</b>	
Altezza	H = 1,42 m	Spessore	S = 1,2 m	Altezza	H = 0,8 m
Altezza di calcolo	H <sub>calc</sub> = 0 m	Profondita'	H = 42 m	Area	A = 2196 m <sup>2</sup>
Area	A = 2196 m <sup>2</sup>	Lunghezza	L = 207 m	Peso per unita' di volume	γ = 25 kN/m <sup>3</sup>
Peso per unita' di volume	γ = 18 kN/m <sup>3</sup>	Peso per unita' di volume	γ = 25 kN/m <sup>3</sup>	<b>Peso strutturale</b>	W <sub>cap, str</sub> = 43920 kN
<b>Peso ritombamento</b>	W <sub>rit</sub> = 0 kN	<b>Peso diaframmi</b>	W <sub>diaf</sub> = 260820 kN	<b>Peso non strutturale (10%)</b>	W <sub>cap, non str</sub> = 4392 kN
<b>Solette intermedie</b>		<b>Banchine</b>		<b>Pilastr</b>	
Numero	n = 3	Area soletta banchina x 2	A = 1298 m <sup>2</sup>	Area pilastr tipo 1	A <sub>1</sub> = 2,64 m <sup>2</sup>
Altezza	H = 1,0 m	Spessore soletta banchina	s = 0,3 m	Numero pilastr tipo 1	n <sub>1</sub> = 10
Area	A = 1748 m <sup>2</sup>	Peso per unita' di volume	γ = 25 kN/m <sup>3</sup>	Area pilastr tipo 2	A <sub>2</sub> = 3,4 m <sup>2</sup>
Percentuale vuoti	%v = 30 %	<b>Peso strutturale</b>	W <sub>sof, str</sub> = 9735 kN	Numero pilastr tipo 2	n <sub>2</sub> = 2
Area di calcolo	A <sub>calc</sub> = 1223,6 m <sup>2</sup>	<b>Peso non strutturale (10%)</b>	W <sub>sof, non str</sub> = 974 kN	Altezza	H = 24,5 m
Peso per unita' di volume	γ = 25 kN/m <sup>3</sup>	Muri sotto banchina	L = 198 m	Peso per unita' di volume	γ = 25 kN/m <sup>3</sup>
<b>Peso strutturale</b>	W <sub>sof, str</sub> = 91770 kN	Spessore muri banchina	s = 0,8 m	<b>Peso strutturale</b>	W <sub>pilastr</sub> = 20286 kN
<b>Peso non strutturale (10%)</b>	W <sub>sof, non str</sub> = 9177 kN	<b>Peso strutturale</b>	W <sub>mur, str</sub> = 3960 kN		
<b>Soletta di base</b>		<b>Fodere piana banchina</b>		<b>Fodere</b>	
Altezza	H = 2,1 m	Altezza	H = 9,65 m	Altezza	H = 11 m
Area	A = 1748 m <sup>2</sup>	Spessore	s = 0,8 m	Spessore	s = 0,6 m
Peso per unita' di volume	γ = 25 kN/m <sup>3</sup>	Lunghezza	L = 198 m	Lunghezza	L = 198 m
<b>Peso strutturale</b>	W <sub>sof, str</sub> = 91770 kN	Peso per unita' di volume	γ = 25 kN/m <sup>3</sup>	Peso per unita' di volume	γ = 25 kN/m <sup>3</sup>
<b>Peso non strutturale (10%)</b>	W <sub>sof, non str</sub> = 9177 kN	<b>Peso strutturale</b>	W <sub>fod, str</sub> = 38214 kN	<b>Peso strutturale</b>	W <sub>fod, str</sub> = 32373 kN



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere  
di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

**Forze stabilizzanti - Attrito**

Angolo di attrito terreno	$\phi$	=	30 °
Angolo attrito muro-terreno	$\delta$	=	15 °
Peso per unita' di volume	$\gamma$	=	19,5 kN/m <sup>3</sup>
Coefficiente di spinta a riposo	$K_A$	=	0,33
Tensione normale media	$\sigma_N$	=	68,53 kPa
Resistenza attrito per unita' lungh		=	778,17 kN/m
Lunghezza diaframmi	L	=	207 m
Forza stabilizzante attrito	$F_{attr}$	=	161081 kN

**Forze instabilizzanti**

Fondo scavo	FEL	=	31,55 m da p.c.
Profondita' paratie	$H_{par}$	=	43,55 m da p.c.
H falda breve termine	$H_{w,Breve}$	=	15 m da p.c.
H falda lungo termine	$H_{w,Lungo}$	=	12 m da p.c.
Area soletta di fondo	$A_{sol}$	=	1748 m <sup>2</sup>
Area piede paratie	$A_{par}$	=	248,4 m <sup>2</sup>
<b>Spinta idraulica breve termine U breve</b>		=	<b>360212 kN</b>
<b>Incremento spinta a lungo ter <math>\Delta U</math> lungo</b>		=	<b>59892 kN</b>

**Verifica a galleggiamento a lungo termine**

Coefficiente parziale carichi permanenti favorevoli	$\gamma_{G,fav}$	=	0,9
Coefficiente parziale carichi permanenti sfavorevoli	$\gamma_{G,sfav}$	=	1,1
Coefficiente parziale carichi variabili sfavorevoli	$\gamma_{Q,sfav}$	=	1,5
Forze stabilizzanti di progetto (Peso+Attrito)	$V_{stab}$	=	699883 kN
Forze instabilizzanti di progetto	$V_{inst}$	=	486071 kN
Fattore di sicurezza	FS	=	<b>1,44 Verificato</b>

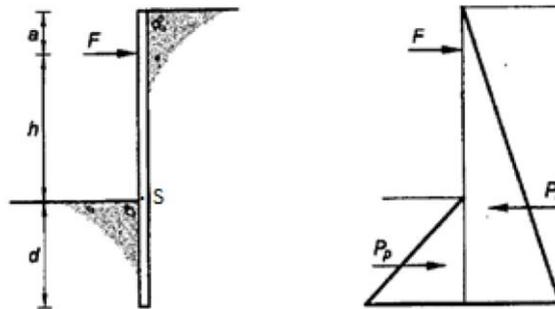


## 9. VALIDAZIONE DEI MODELLI ESEGUITI

I modelli di calcolo descritti nei paragrafi precedenti sono stati validati utilizzando un metodo classico per il calcolo di paratie contrastate. Il metodo è quello denominato *Free-Earth Support* (metodo della paratia con appoggio libero nel terreno) che prende in considerazione anche la presenza della falda ma è stato sviluppato in forma chiusa per un solo vincolo in testa.

Nel seguito, pertanto, verranno fatte alcune semplificazioni per rendere congruenti le sollecitazioni flettenti calcolate con le formule proposte in letteratura con il modello di calcolo sviluppato con il software Plaxis.

Il metodo Free Earth support, assume che la paratia sia rigida e che possa ruotare a livello dell'elemento di contrasto/ancoraggio, con una modalità di collasso per rotazione attorno al contrasto pensato fisso. La pressione passiva si sviluppa nel terreno antistante la paratia, mentre quella attiva si manifesta alle spalle della paratia stessa.



L'equilibrio alla rotazione, intorno al punto di applicazione della forza  $F$ , consente di determinare  $d$ , successivamente l'equilibrio alla traslazione orizzontale permette di determinare il valore della forza  $F$ .

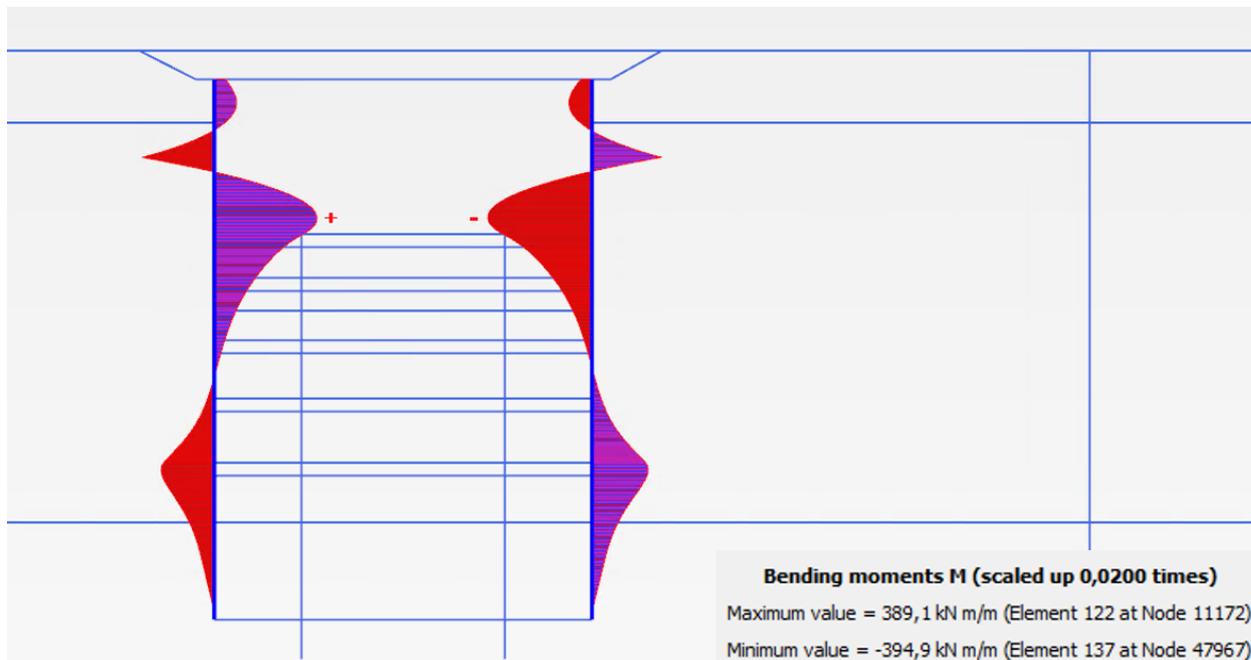
Nel seguito si riporta il calcolo effettuato attraverso il metodo semplificato dello Step di calcolo n. 10 del modello di calcolo effettuato con il software Plaxis (vedi Paragrafo 6.1), che prevede lo scavo fino a quota -14.00 m da p.c. sotto la soletta del piano 1° mezzanino, per la realizzazione della soletta. La quota di scavo inserita nel foglio di calcolo del modello semplificato è pari a 11.80 m (-14.00 m da p.c.) perché è misurata dalla quota di testa della Paratia ubicata a -2,20 m da p.c. Le caratteristiche geotecniche prevalenti sono quelle dell'Unità Geotecnica 2 (vedi Tabella 1), mentre il sovraccarico uniforme applicato a tergo della Paratia è pari a  $q = 20$  kPa. In questa fase di calcolo risulta già installata la soletta di copertura e la soletta piano atrio. Dato che in queste prime fasi di calcolo la soletta di copertura lavora poco, si considera la presenza della sola soletta del piano atrio ubicato a - 8.15 m da p.c. e quindi a 5.95 m da testa paratia. Nel seguito si riporta il foglio di calcolo utilizzato per la valutazione del momento massimo utilizzando il metodo

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

semplificato Free-Earth Support. Nel suddetto foglio di calcolo sono indicati anche i valori delle spinte del terreno e del sovraccarico a tergo della paratia e la reazione dell'elemento di contrasto.

<b>Metodo Free Earth Support</b>		
<b>Geometria Stazione e dati di input</b>		
<b>Quota fondo scavo H</b>	m (da testa paratia)	11,80
<b><math>\gamma</math></b>	kN/m <sup>3</sup>	19,0
<b>Ka</b>	-	0,260
<b>Kp</b>	-	3,852
<b>q</b>	kPa	20
<b>Quota Puntone</b>	m (da testa paratia)	5,95

<b>P1 [kPa]</b>	29,35	Pressione della spinta attiva al livello della soletta atrio (Punto F)
<b>S1 [kN]</b>	87,32	Spinta attiva del terreno sopra il livello soletta atrio
<b>P_Scavo [Kpa]</b>	58,21	Pressione della spinta attiva al livello fondo scavo tergo paratia (Punto S)
<b>Dist. S1_F [m]</b>	1,98	Distanza dal punto di applicazione S1 e Punto F
<b>SPr1 [kN]</b>	171,70	Spinta attiva rettangolare tratto FS (rettangolare)
<b>Dist. SPr1_F [m]</b>	2,93	Distanza dal punto di applicazione SPr1 e Punto F
<b>SPT1 [kN]</b>	84,40	Spinta attiva triangolare tratto FS (triangolare)
<b>Dist. SPT1_F [m]</b>	3,90	Distanza dal punto di applicazione SPT1 e Punto F
<b>PaO [kPa]</b>	71,45	Pressione Attiva del terreno fino al livello O
<b>PpO [kPa]</b>	196,49	Pressione Passiva del terreno fino al livello O
<b>SPd [kN]</b>	263,78	Spinta Passiva del terreno fino al livello d
<b>Dist. SPd_F [m]</b>	7,64	Distanza dal punto di applicazione SPd e SAd e Punto F
<b>SAd [kN]</b>	156,28	Spinta Attiva del terreno fino al livello d (rettangolare)
<b>Dist. Sad_F [m]</b>	7,19	Distanza dal punto di applicazione SAd e Punto F
<b>Std [kN]</b>	17,78	Spinta Attiva del terreno fino al livello d (triangolare)
<b>Sq [kPa]</b>	75,21	Componente carico accidentale
<b>Dist. qF [m]</b>	1,29	Distanza dal punto di applicazione Sq e Punto F
<b>d [m]</b>	2,68	Distanza d determinato dall'equilibrio rotazionale attorno il punto di applicazione di F
<b>F [kN]</b>	328,90	Forza assiale nel puntone (soletta Atrio) dato dall'equilibrio delle forze orizzontali (Sa e Sp)
<b>M [kNm]</b>	<b>346,01</b>	Momento flettente nella paratia calcolato al livello di taglio nullo



Il momento massimo si manifesta in corrispondenza del punto di taglio nullo. In questo caso si assume che il momento massimo si trovi tra la quota della falda e la linea del fondo scavo, in analogia a quanto calcolato con il modello di calcolo effettuato con il Software Plaxis. Nel seguito si riporta il momento massimo calcolato con il metodo Free-Earth Support.

Momento flettente massimo [kNm]		Variazione [%]
Plaxis	Free-Earth Support	
392 (media dei massimi)	346	11.70

I momenti calcolati con il metodo semplificato risultano essere circa 12% inferiore al valore calcolato con il software Plaxis che risulta essere più preciso nel calcolo degli effetti del sovraccarico sui primi metri della Paratia e quindi più cautelativo del metodo semplificato. Si ritiene che il modello di calcolo sia corretto dal punto di vista delle condizioni al contorno impostate e dal punto di vista del calcolo svolto.

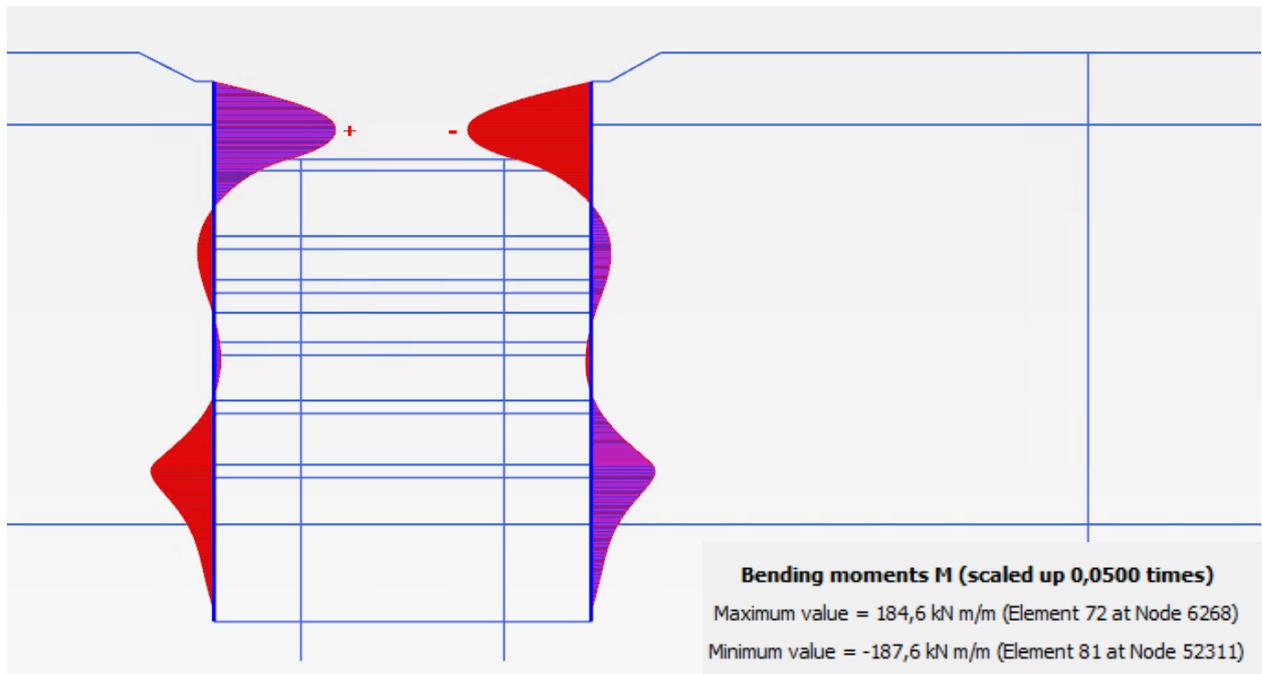
 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## **ALLEGATO N.1**

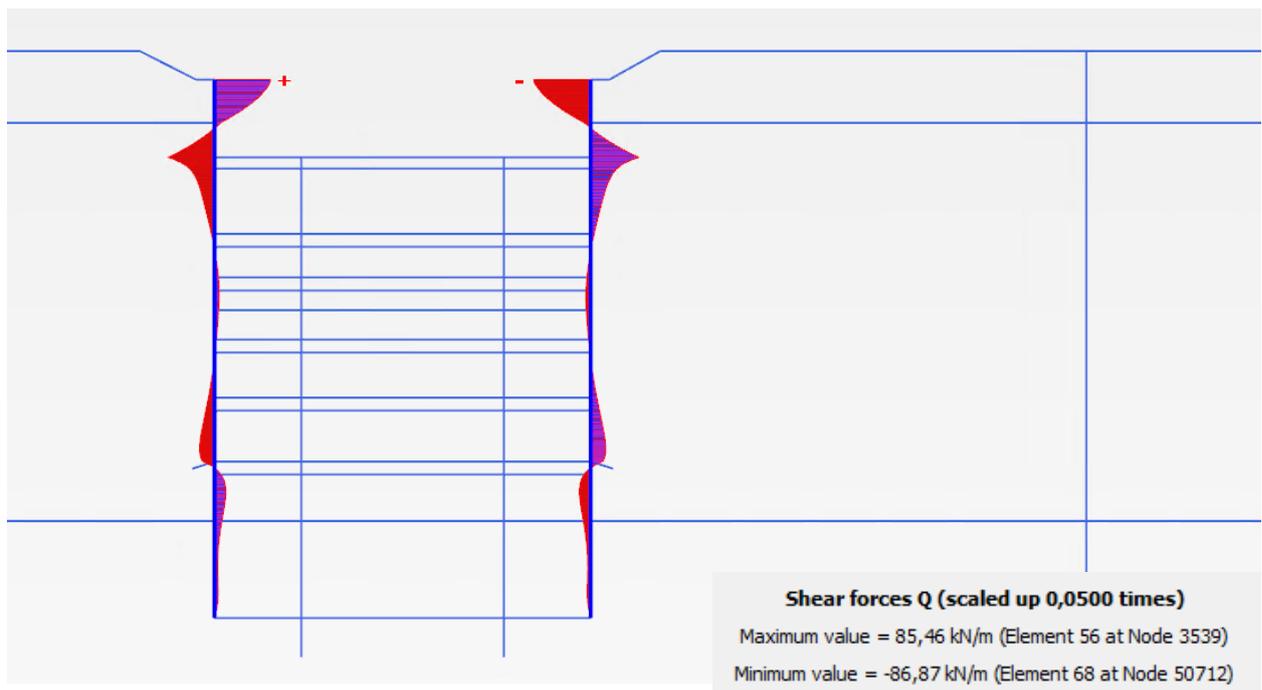
### **Risultati delle analisi numeriche**



Scavo 1 – Momento flettente

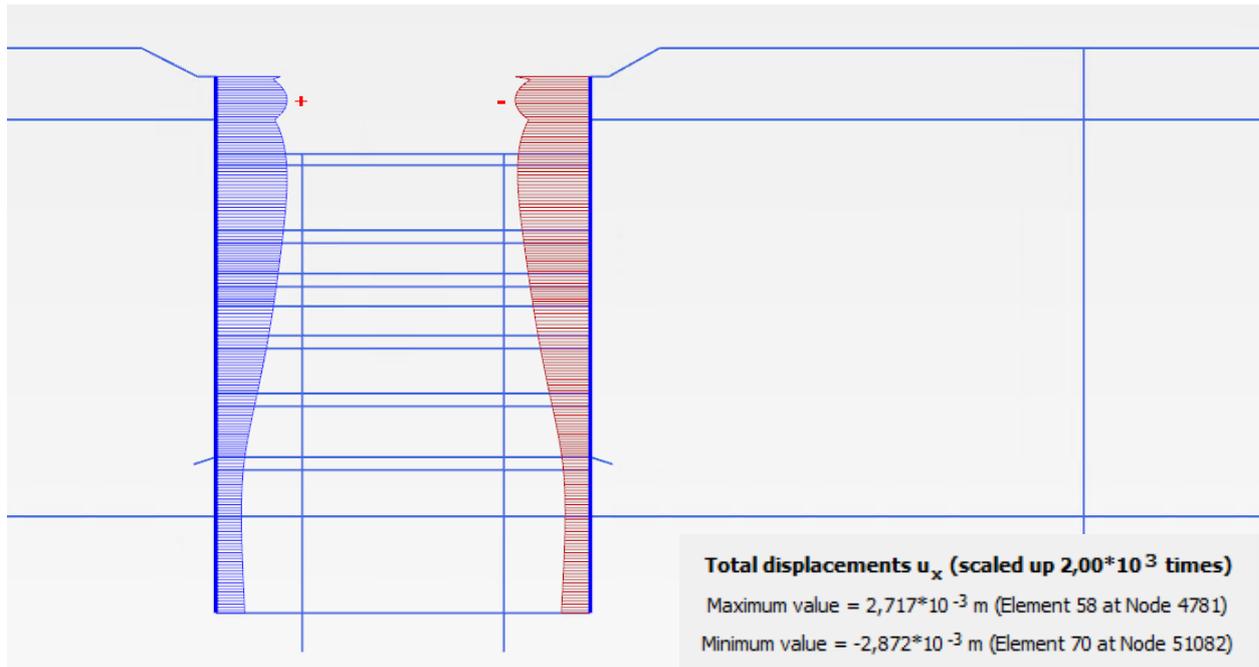


Scavo 1 – Taglio

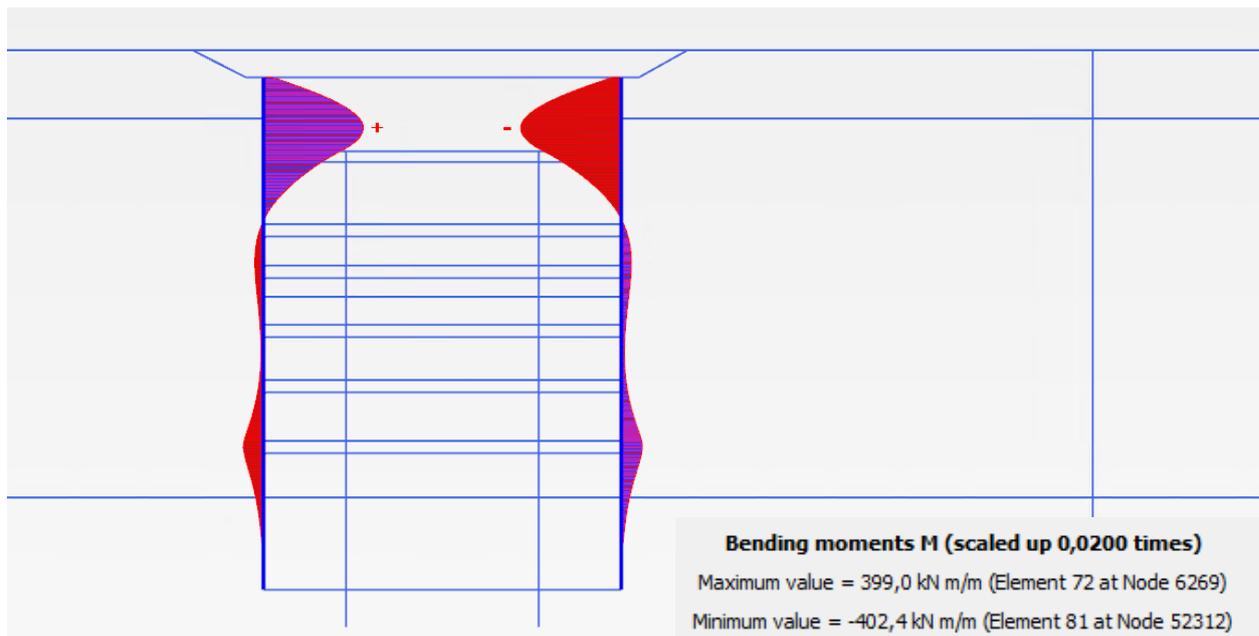




### Scavo 1 – Spostamenti orizzontali

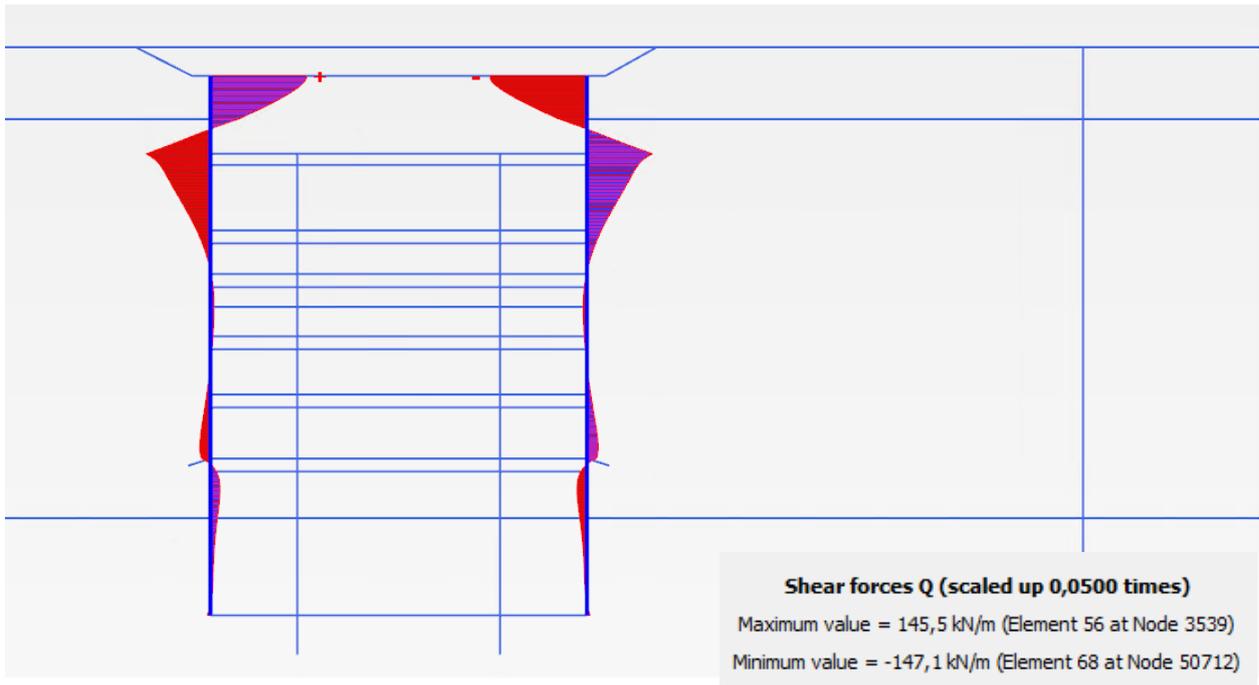


### Top filling – Momento flettente

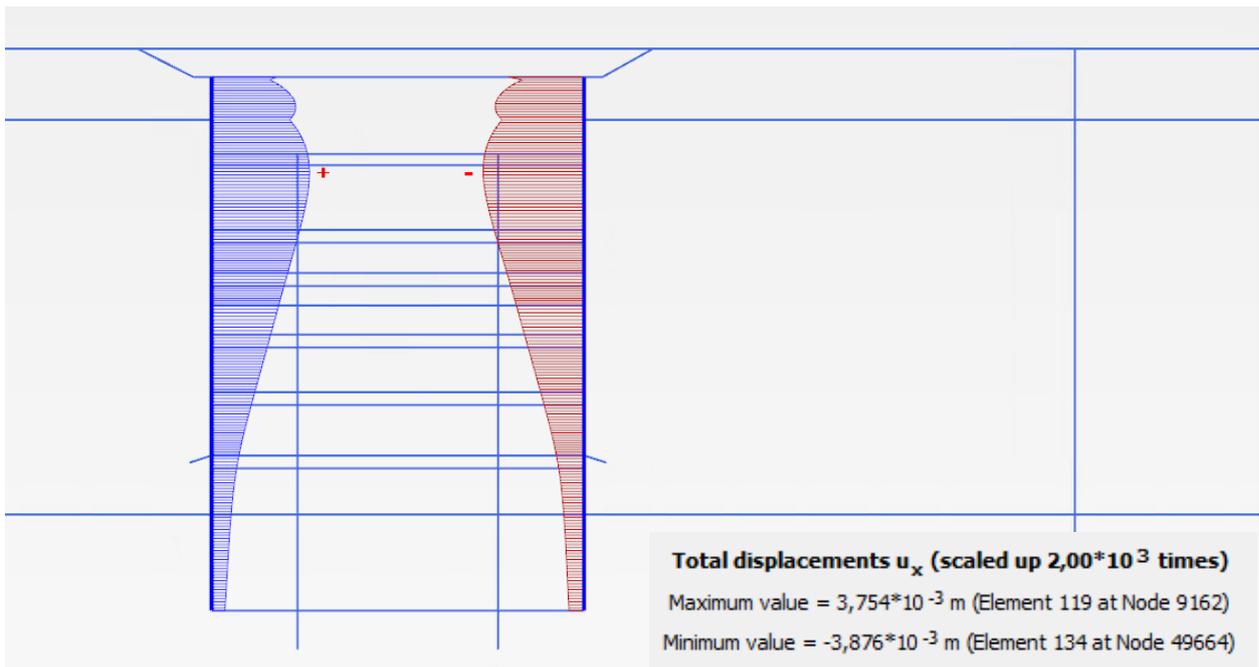




Top filling – Taglio

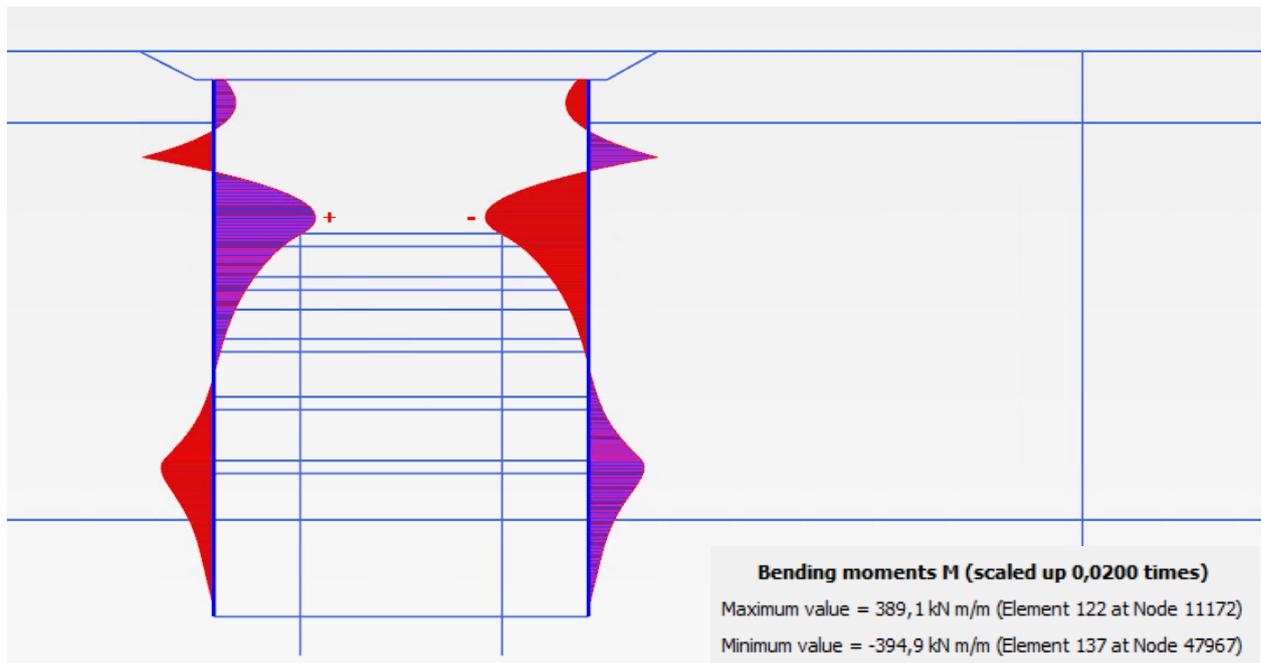


Top filling – Spostamenti orizzontali

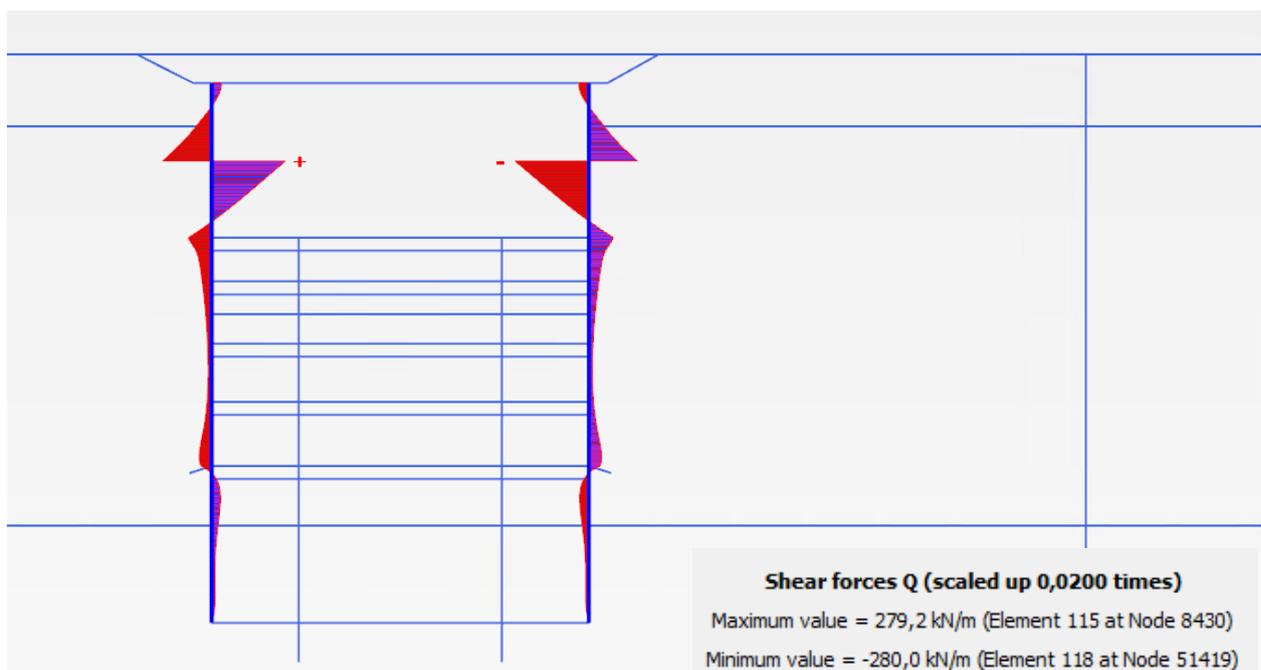




Scavo 2 – Momento flettente

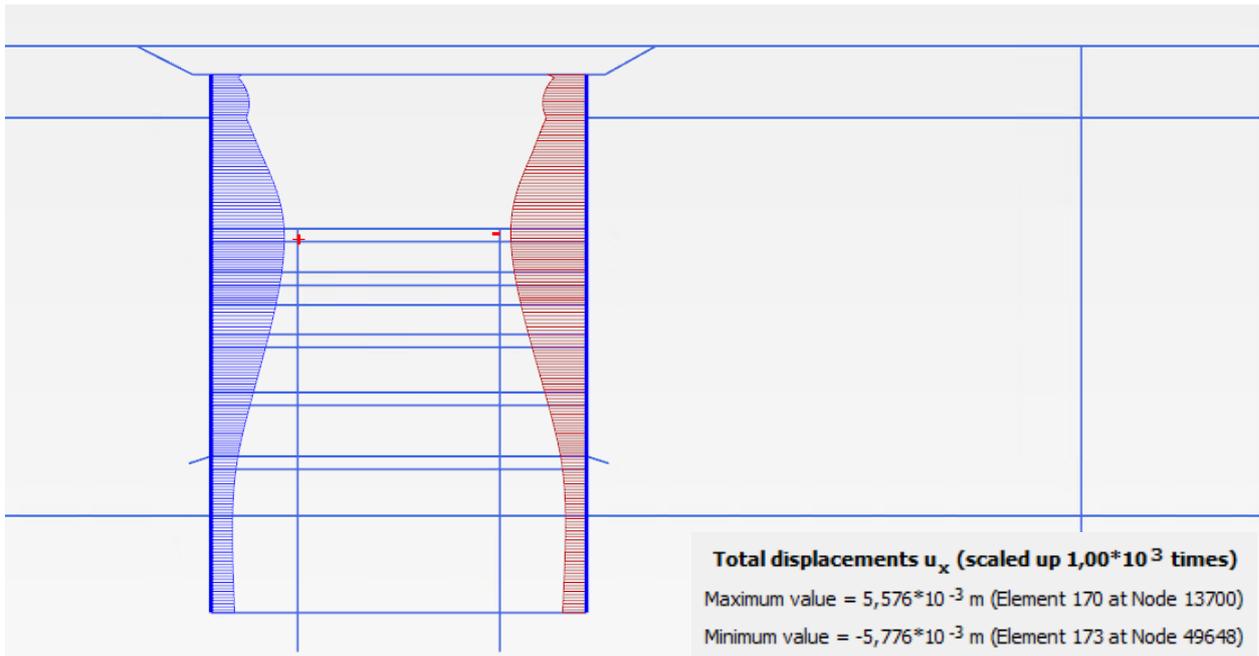


Scavo 2 – Taglio

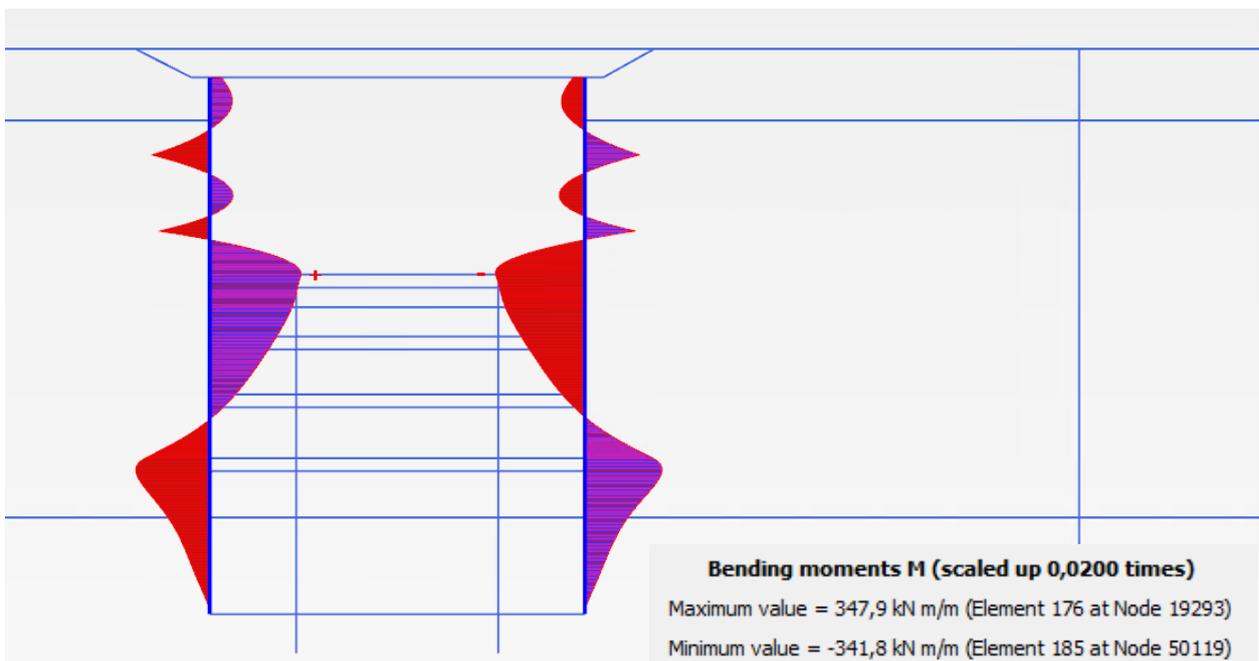




### Scavo 2 – Spostamenti orizzontali

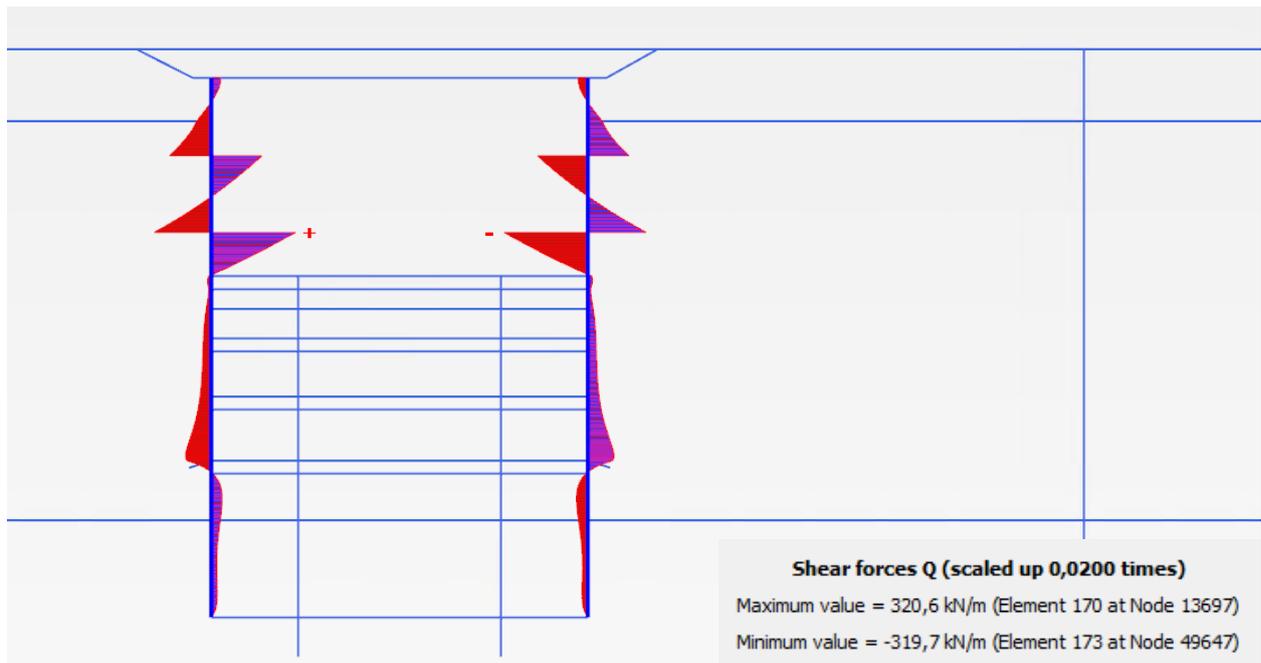


### Scavo 3 – Momento flettente

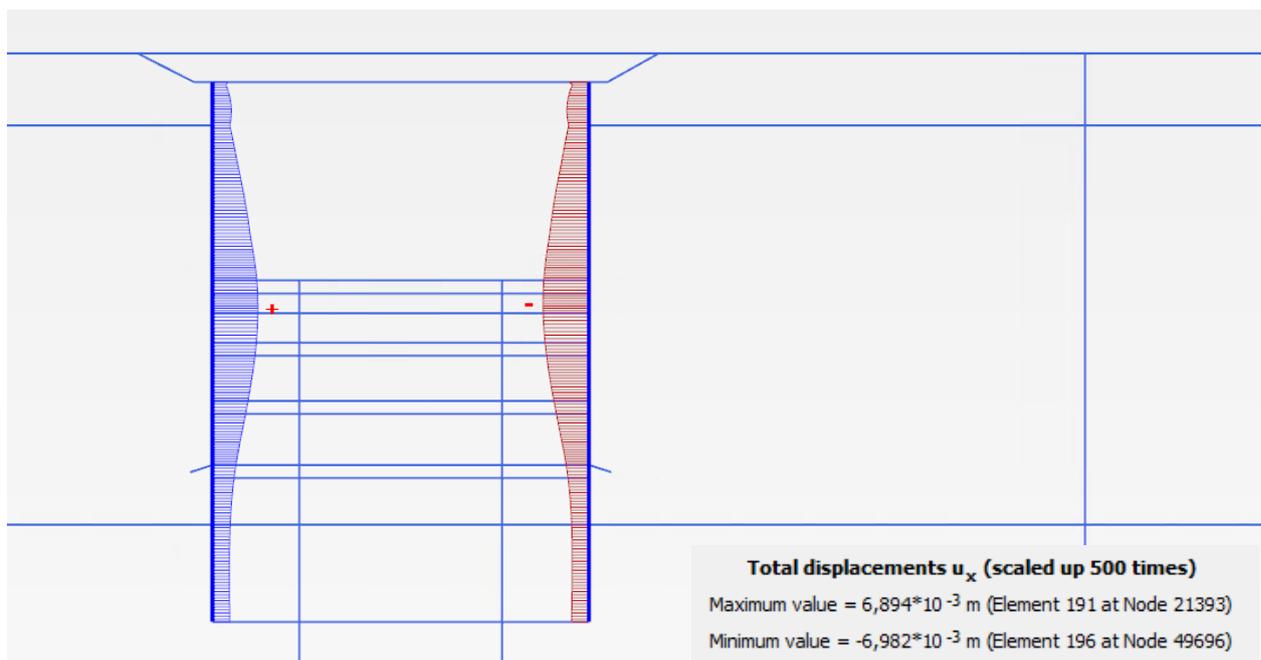




### Scavo 3 – Taglio

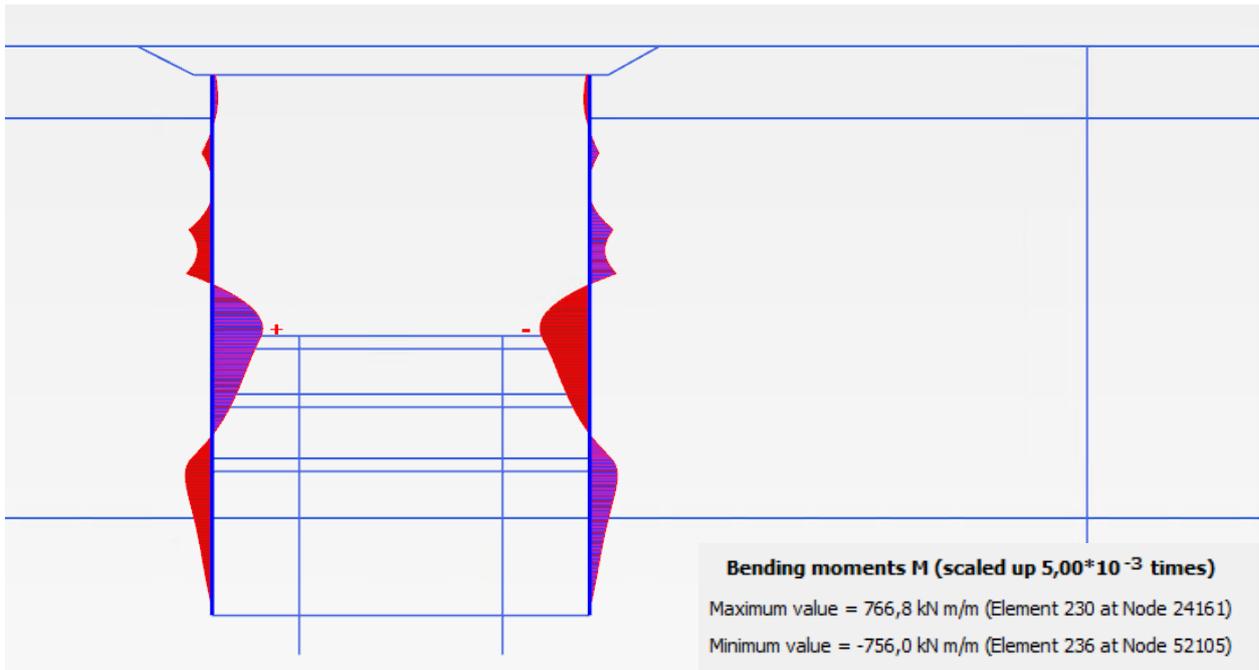


### Scavo 3 – Spostamenti orizzontali

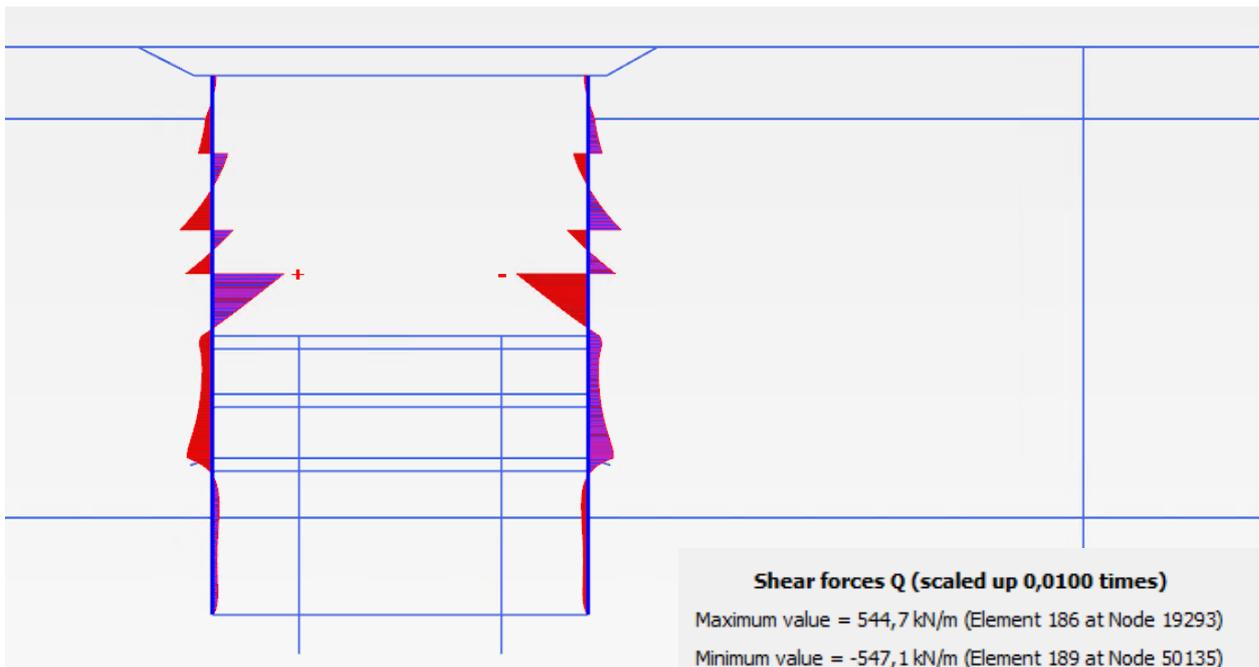




Scavo 4 – Momento flettente

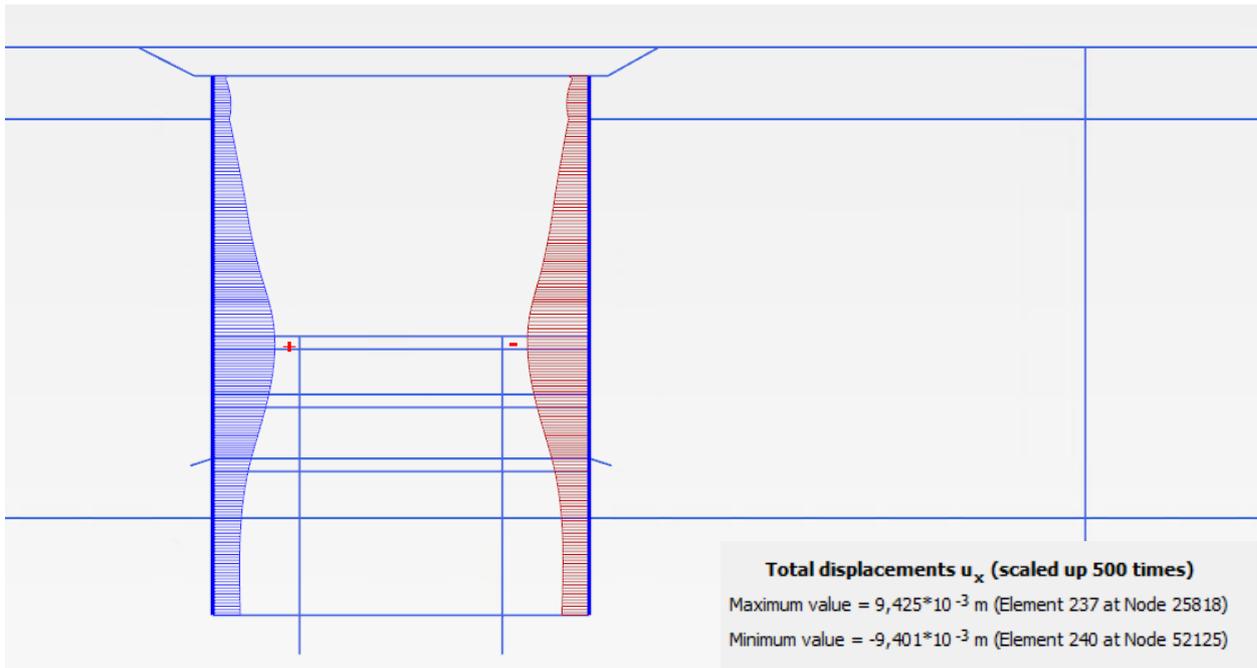


Scavo 4 – Taglio

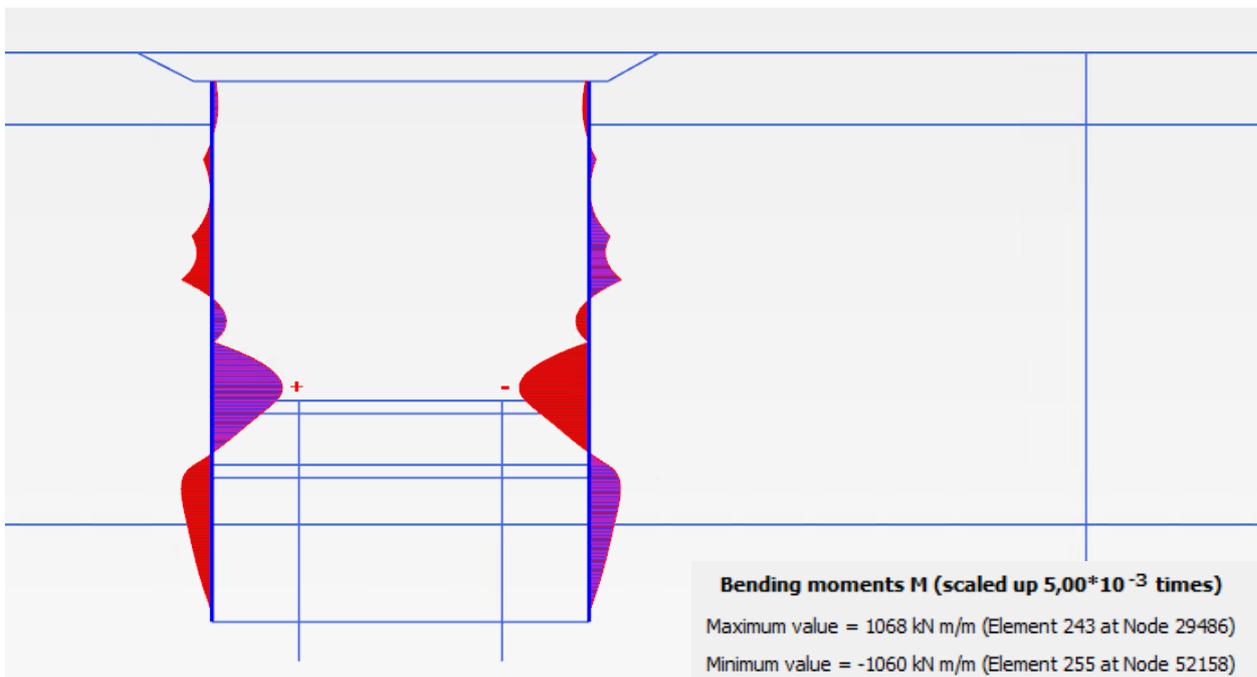




### Scavo 4 – Spostamenti orizzontali

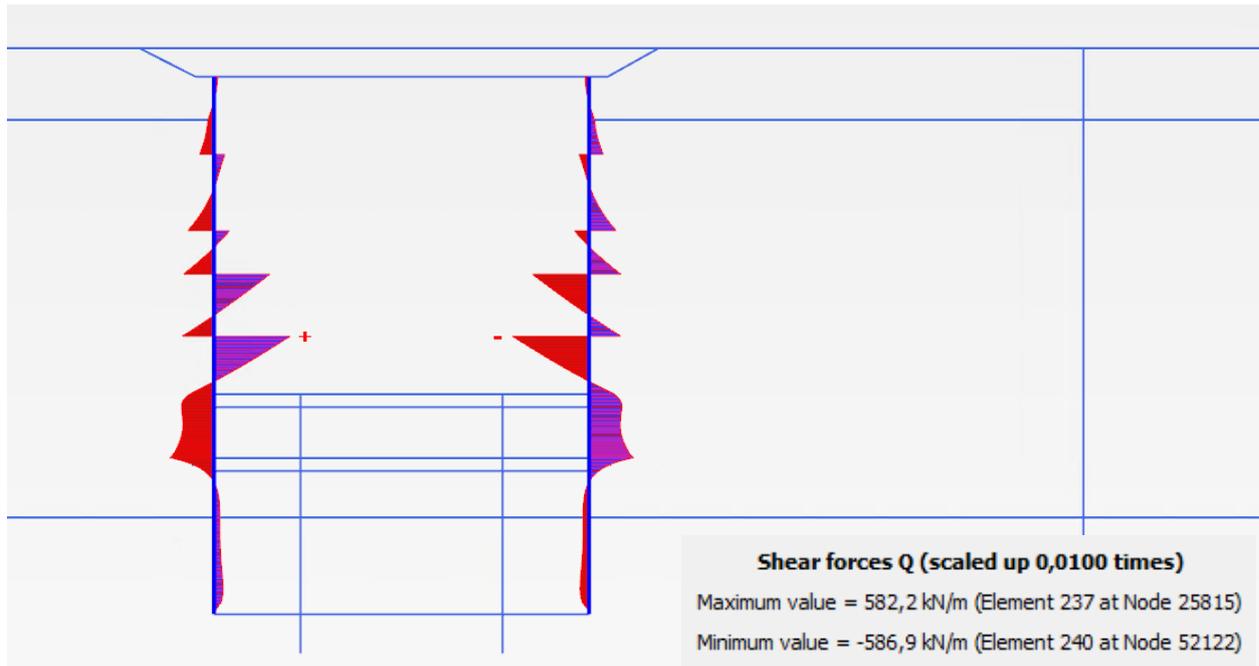


### Scavo 5 – Momento flettente

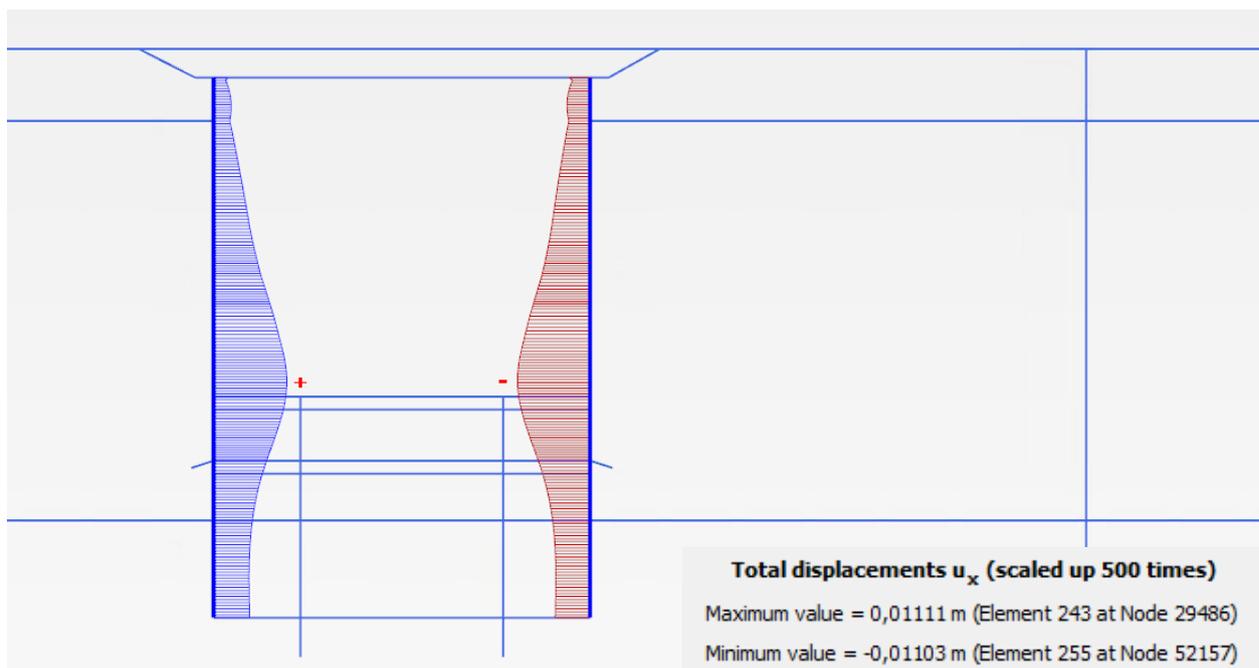




### Scavo 5 – Taglio

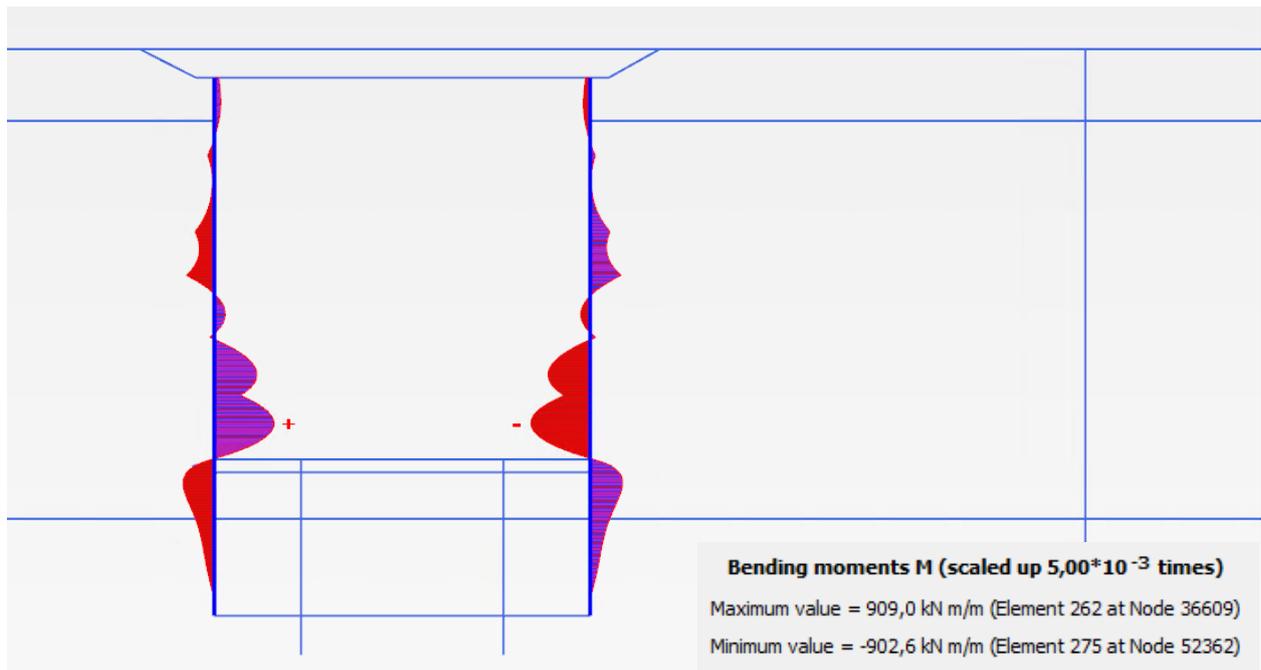


### Scavo 5 – Spostamenti orizzontali

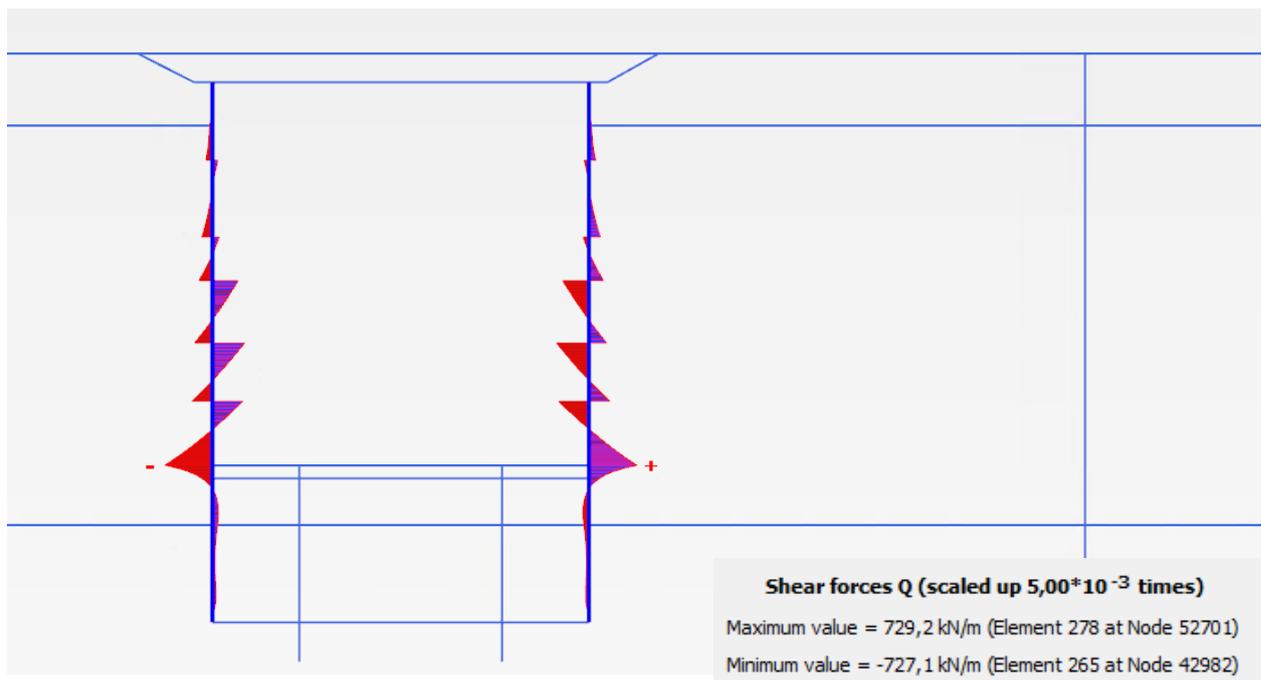




Scavo 6 – Momento flettente

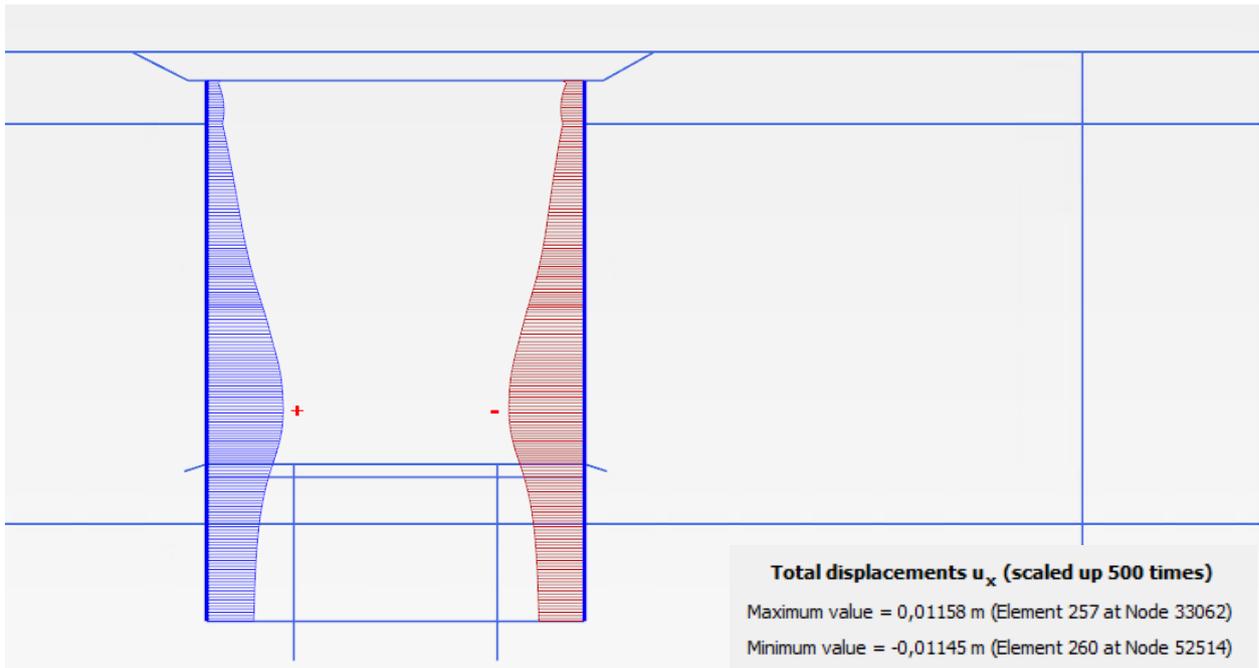


Scavo 6 – Taglio

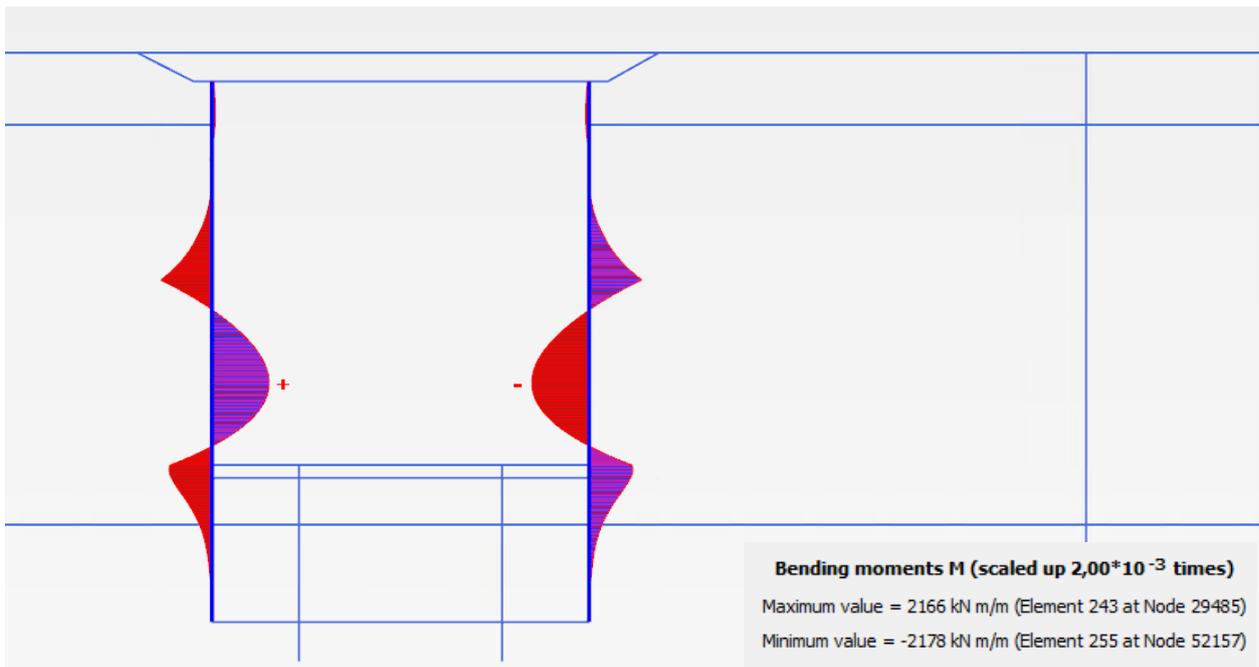




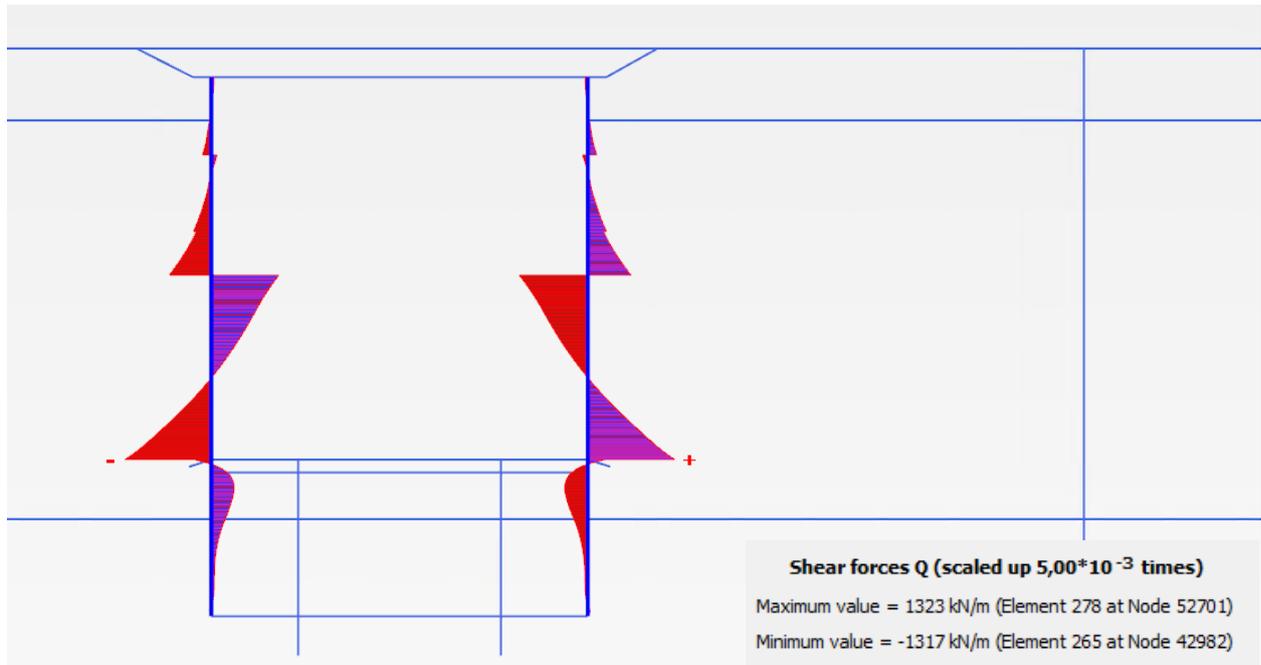
Scavo 6 – Spostamenti orizzontali



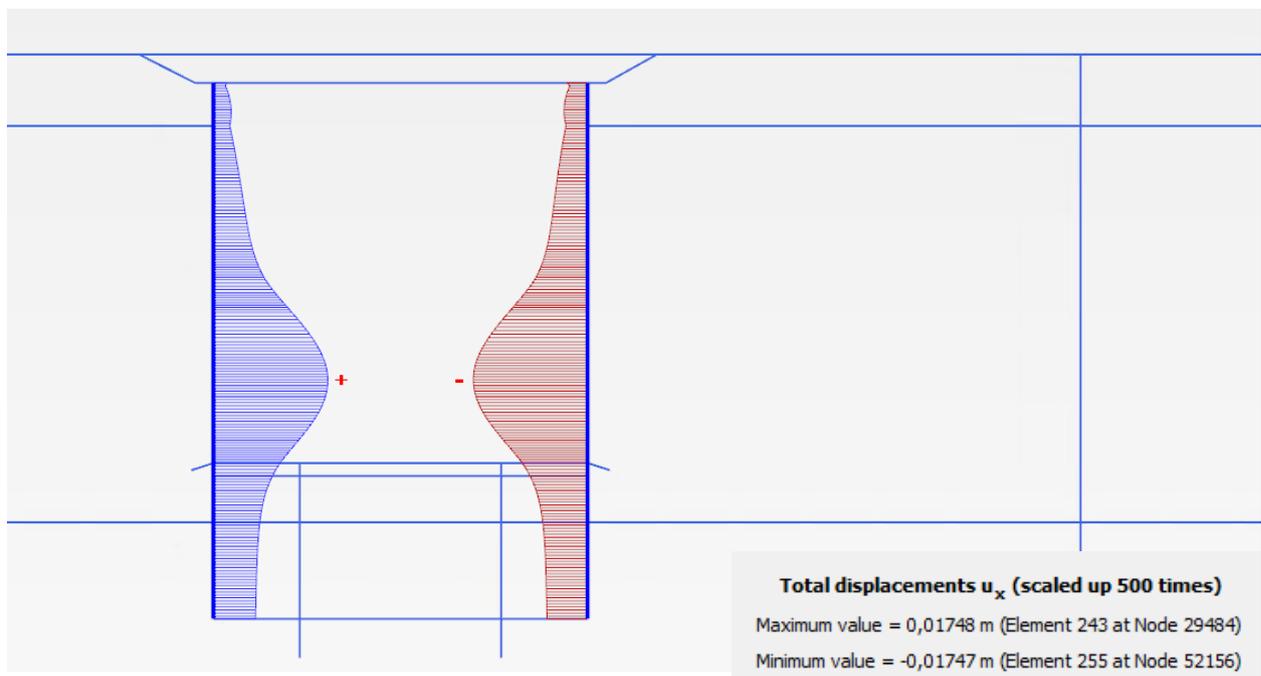
Rimozione puntoni 2-3 – Momento flettente



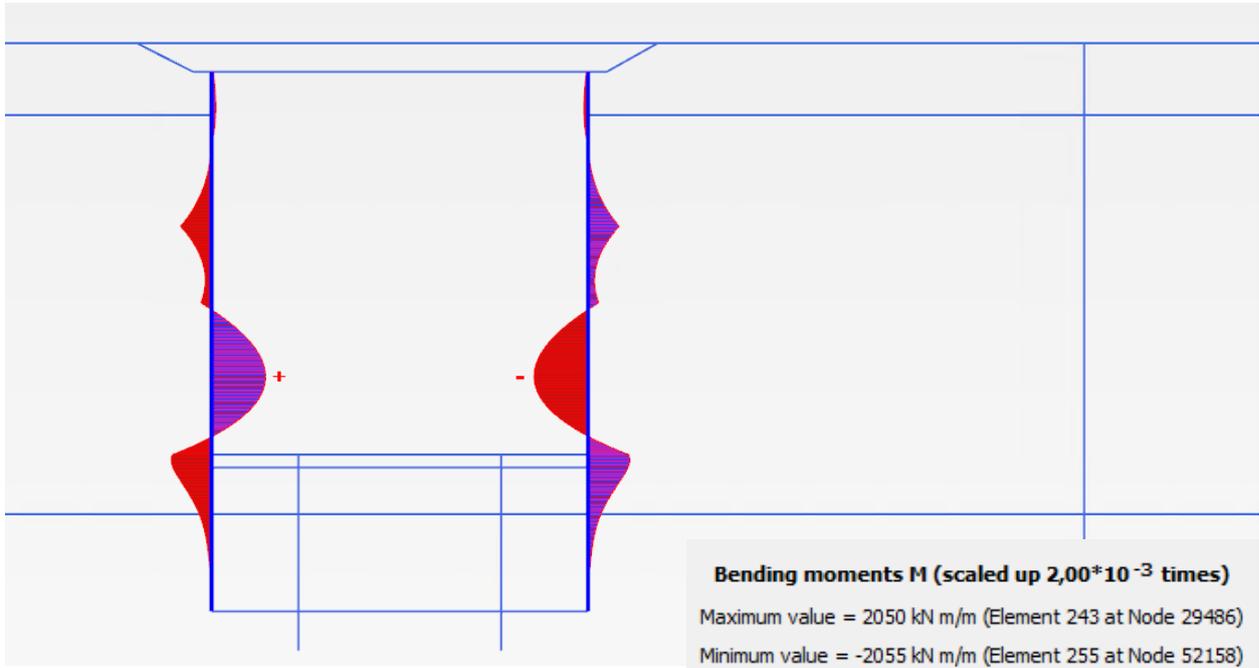
Rimozione puntoni 2-3 – Taglio



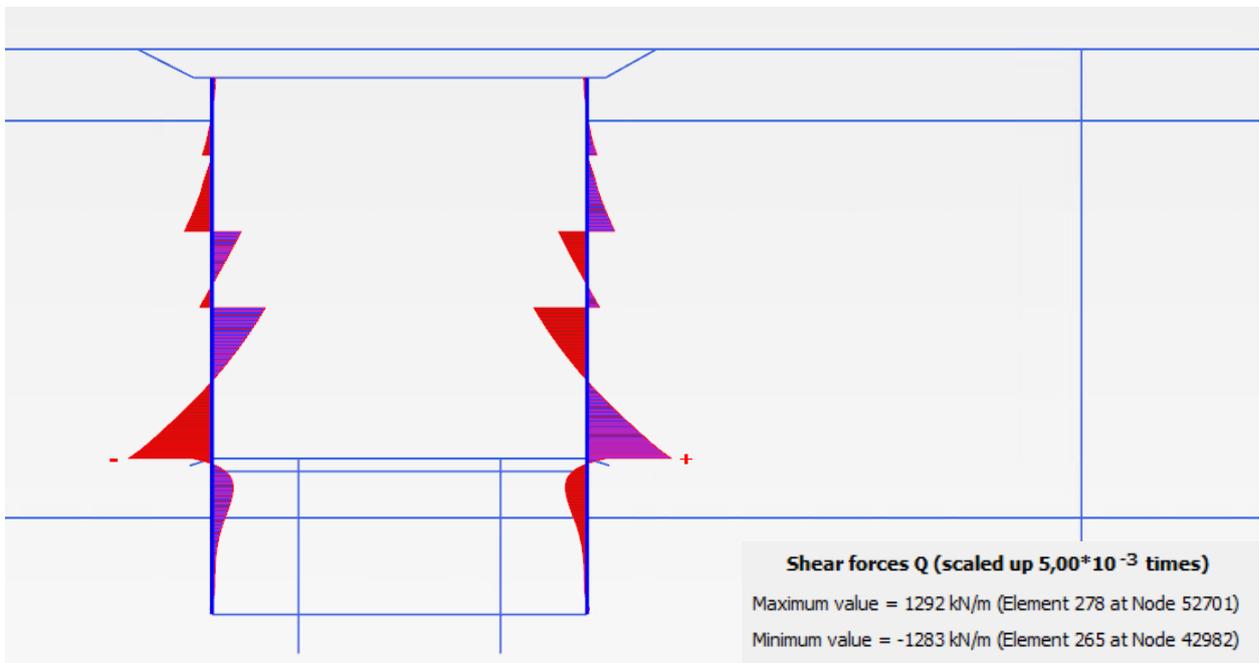
Rimozione puntoni 2-3 – Spostamenti orizzontali



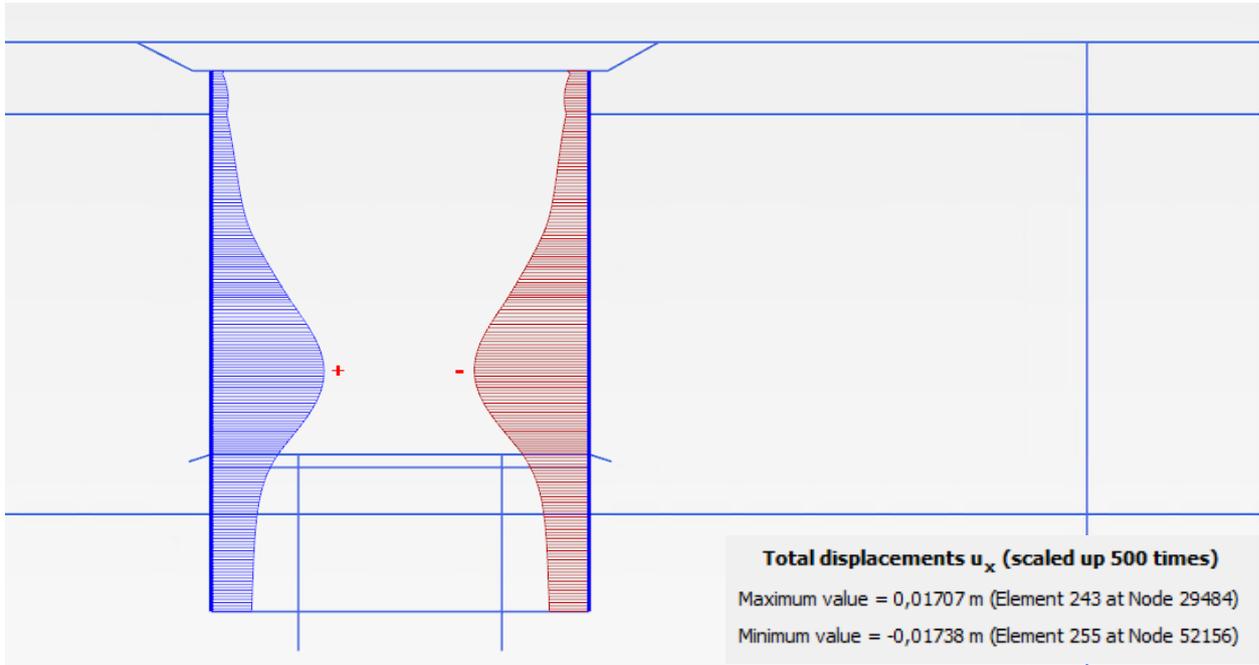
Rimozione puntoni 1 dopo realizzazione terza soletta – Momento flettente



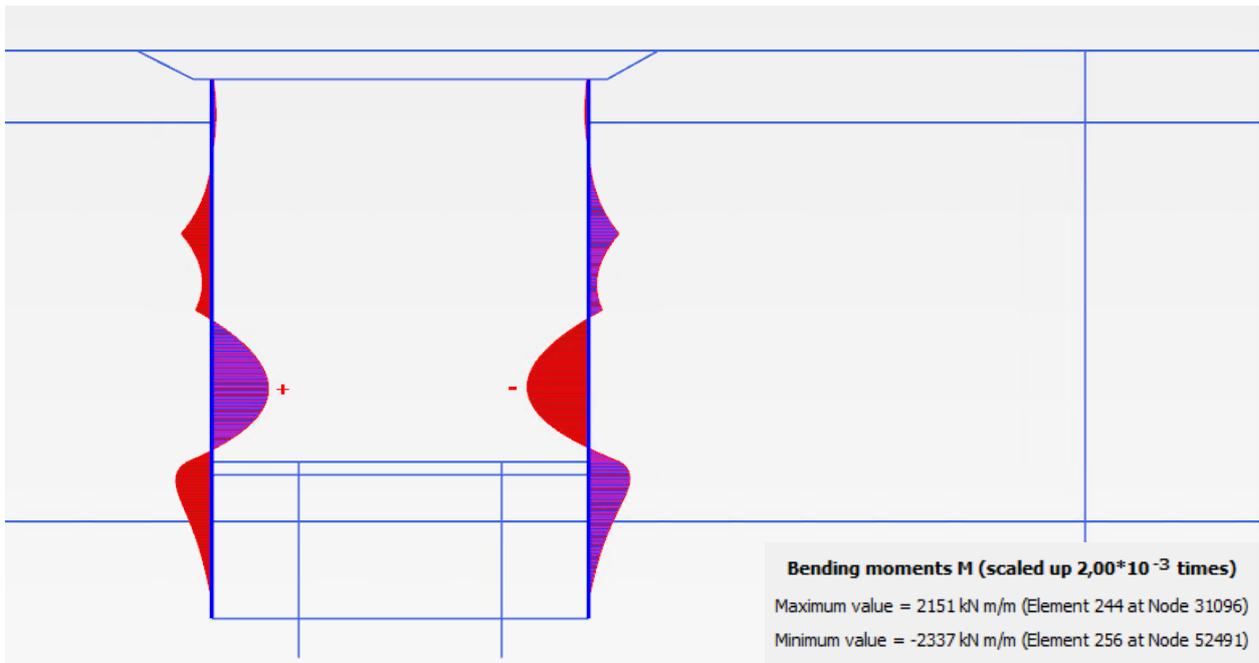
Rimozione puntoni 1 dopo realizzazione terza soletta – Taglio



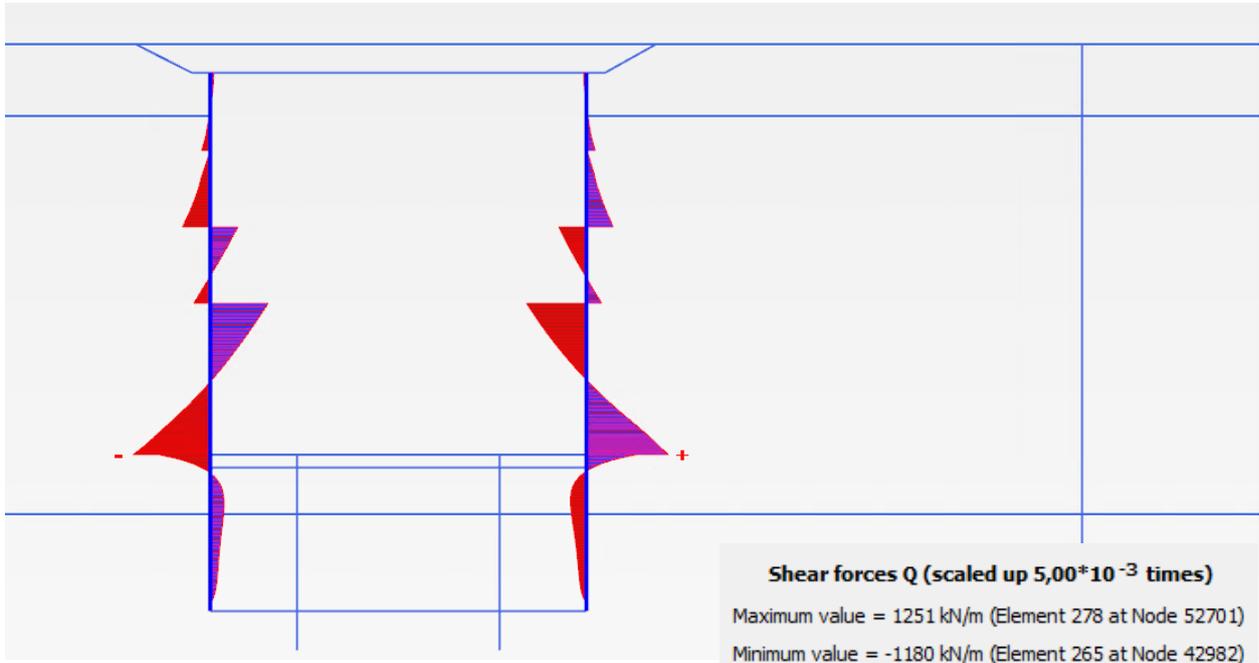
Rimozione puntoni 1 dopo realizzazione terza soletta – Spostamenti orizzontali



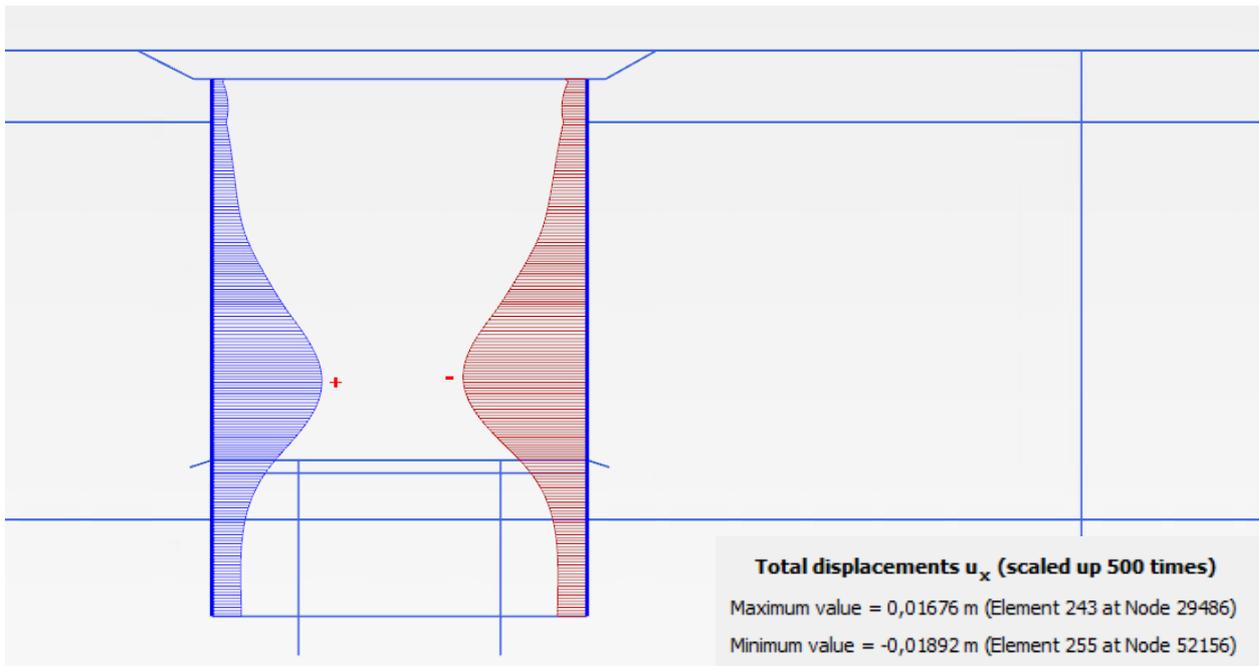
Stop dewatering – Momento flettente



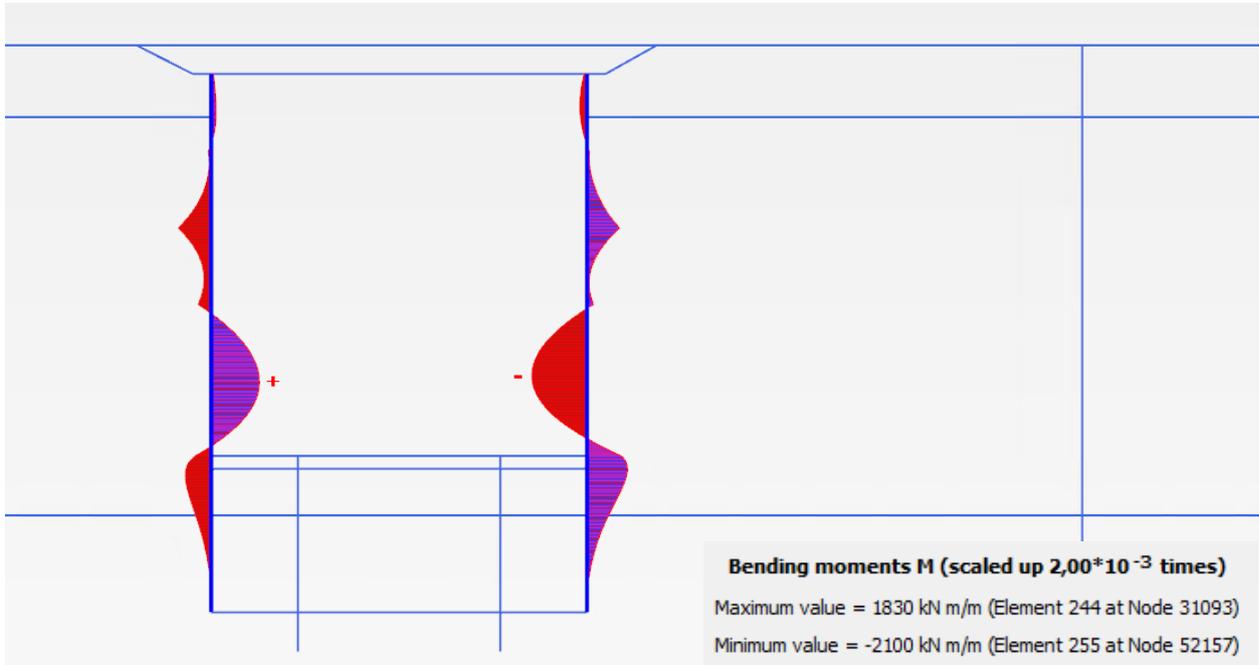
Stop dewatering – Taglio



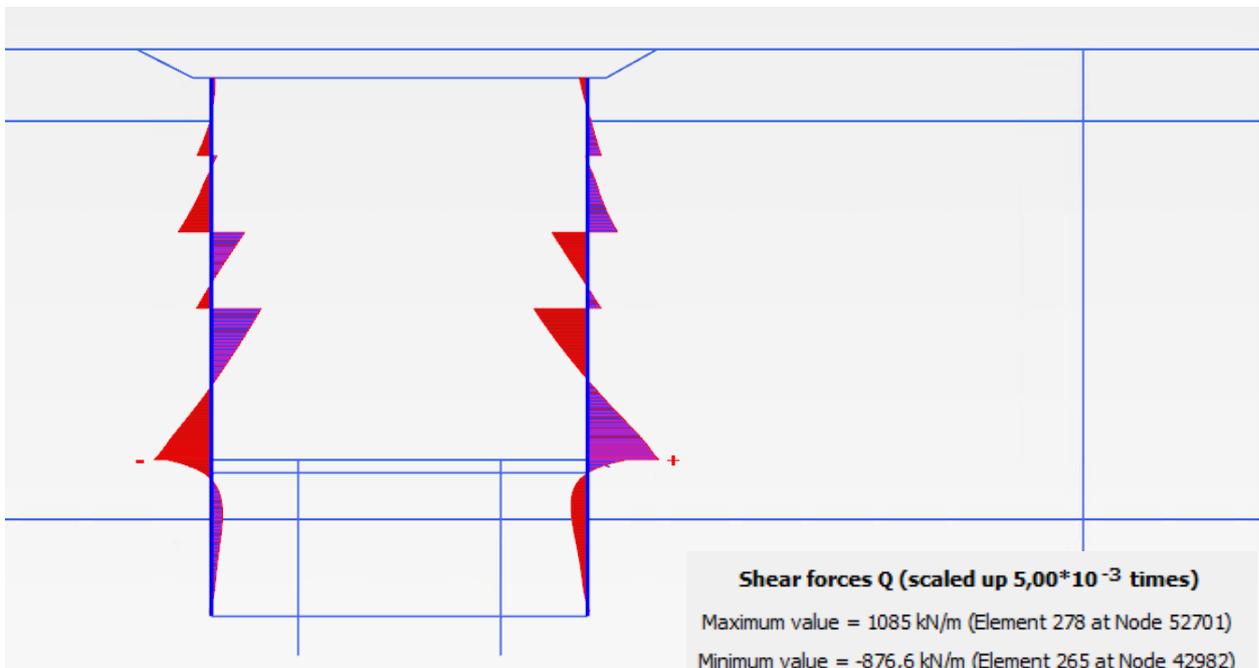
Stop dewatering – Spostamenti orizzontali



Sisma - Momento flettente



### Sisma - Taglio



### Sisma – Spostamenti orizzontali

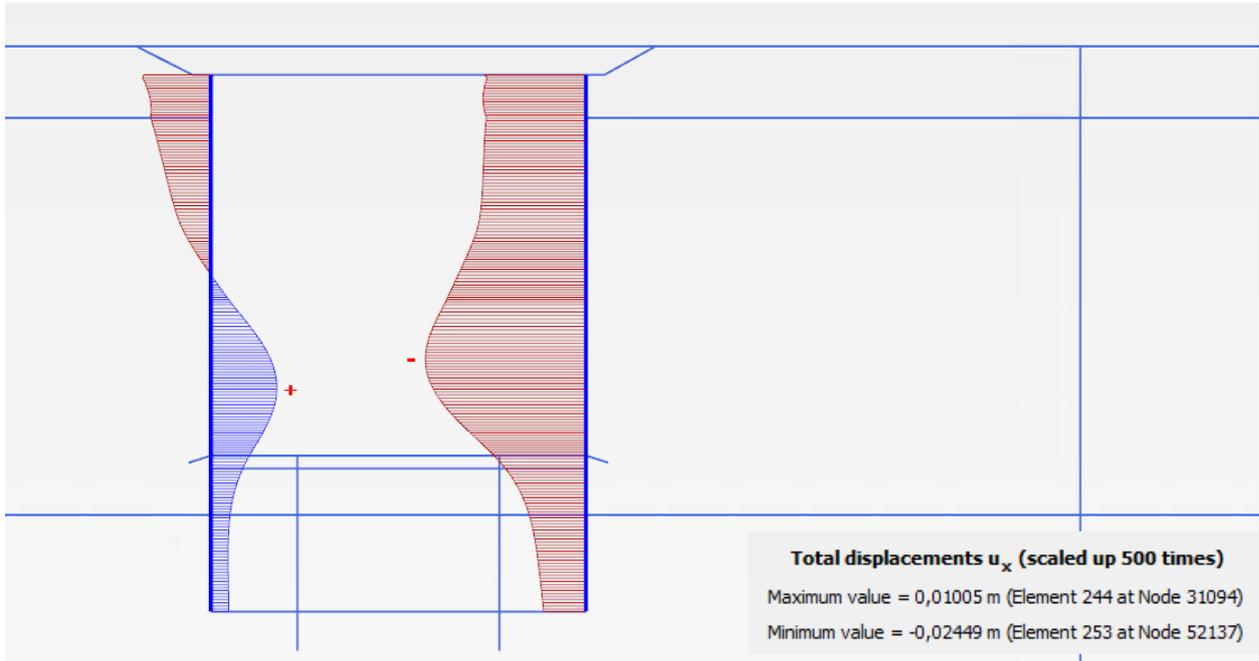


CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere  
di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1



 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## **ALLEGATO N.2**

### **Verifica strutturale\_GFRP**

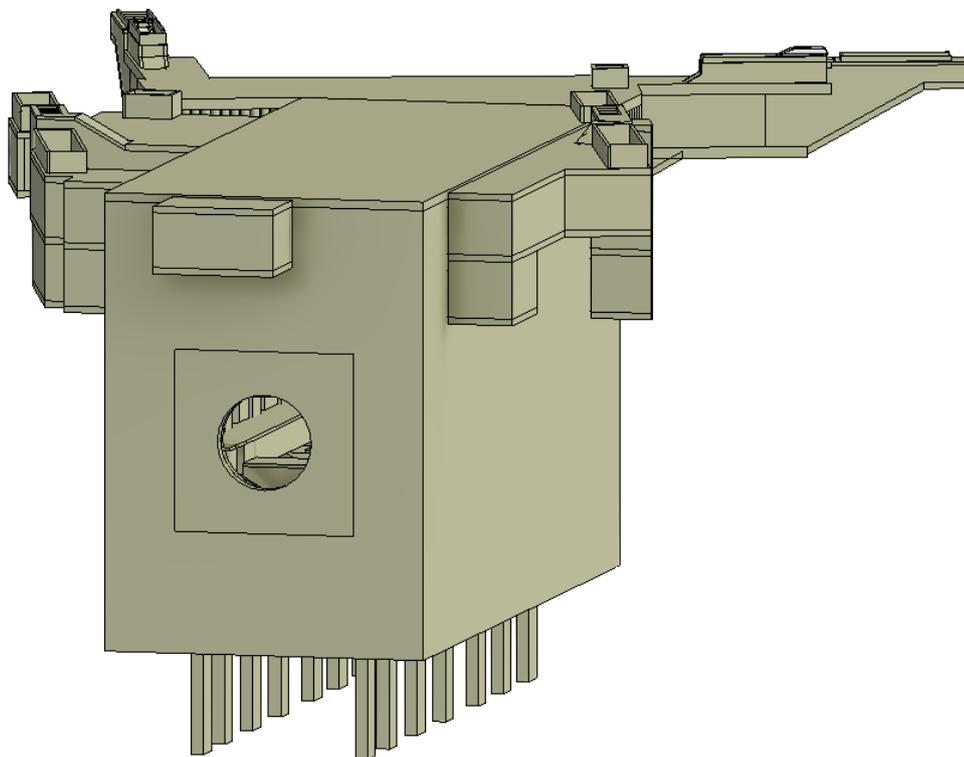


Figura 25. Modello 3D-gabbia soft eye

Ai lati della stazione, i diaframmi saranno armati con armature che consentano il passaggio della TBM (soft eye) ovvero a mezzo di gabbie di rinforzo in fibra di vetro. Ai fini della verifica strutturale l'ACI Standard 440 raccomanda l'approccio descritto di seguito.

Secondo l'ACI440, la resistenza alla trazione di progetto dovrebbe essere determinata da:

$$\frac{f_{fu}}{\gamma_{GFRP}} = C_e \cdot f_{fu}$$

Dove:

$C_e$  - fattori di riduzione ambientale

$\gamma_{GFRP}$  - Secondo CNR 203, il valore di  $\gamma_{GFRP}$  è assunto pari a 1.5.

Secondo la tabella 6.2 dell'ACI 440.1R-15, il valore di  $C_e$  è assunto pari a 0,7 perché l'elemento in calcestruzzo è esposto alla terra e il tipo di fibre è in materiale vetroso.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

- **Verifica del momento flettente**

Secondo l'approccio classico usato per il C.A, dovrebbe essere garantito la rottura duttile. In questo caso, sia il calcestruzzo che il GFRP sono materiali fragili, l'ACI applica fattori di sicurezza più alti e controlla la modalità di rottura rivedendo la quantità di rinforzo GFRP.

Per la verifica del momento flettente, deve essere soddisfatta la seguente espressione:

$$\phi \cdot M_n \geq M_u$$

$M_n$ : Momento flettente resistente nominale

$M_u$ : Momento flettente di progetto

$\phi$ : Fattore di riduzione della resistenza

La resistenza alla flessione di una sezione trasversale rinforzata con GFRP è governata dal suo modo di rottura e dipende completamente dalla quantità di rinforzo. Tuttavia, c'è una quantità di rinforzo equilibrata alla quale entrambi i tipi di rottura possono verificarsi simultaneamente, è il cosiddetto rapporto di rinforzo equilibrato.

La modalità di rottura può essere valutata confrontando la quantità di rinforzo con la quantità bilanciata di rinforzo.

Il rapporto di rinforzo può essere calcolato come:

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d}$$

Mentre il rapporto di rinforzo bilanciato è dato da:

$$\rho_{fb} = 0.85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_{fu}} \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}}$$

Dove:

$\beta_1$ : Fattore che dipende da valore  $f_{cu}$

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

$E_f$ : Modulo elastico dal produttore di GFRP

$\varepsilon_{cu}$ : Deformazione ultima nel calcestruzzo

$f_{fu}$ : Resistenza allo snervamento finale di GFRP

Confrontando i valori delle equazioni di cui sopra, se:

- $\rho_f > \rho_{fb}$  la rottura avviene prima sul calcestruzzo e la resistenza nominale a flessione può essere calcolata come

$$M_n = \rho_f \cdot f_f \left( 1 - 0.59 \frac{\rho_f \cdot f_f}{f'_c} \right) \cdot b \cdot d^2$$

Con

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \cdot \beta_1 \cdot f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} \leq f_{fu}$$

Dove

$f_f$ : Tensione nel GFRP

$b$ : Larghezza della sezione

$d$ : distanza dalla fibra di compressione estrema al centroide dell'armatura di tensione

- $\rho_f < \rho_{fb}$  la rottura avviene prima sul GFRP e la resistenza nominale a flessione può essere calcolata come:

$$M_n = A_f \cdot f_{fu} \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c_b}{2} \right)$$

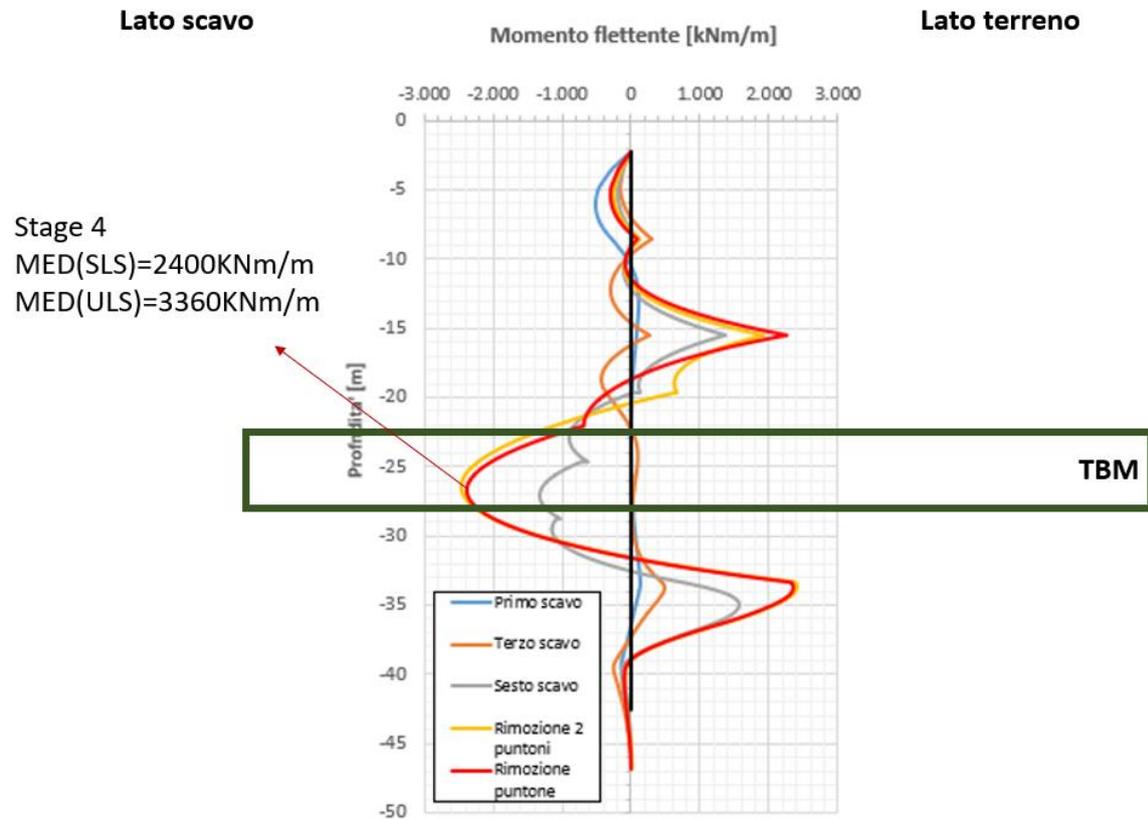
Dove

$$c_b = \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) \cdot d$$

Il fattore di riduzione al momento flettente resistente nominale  $\phi$  è dato dalle espressioni:



$$\phi = \begin{cases} 0.55 \text{ for } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0.3 + 0.25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \text{ for } \rho_{fb} < \rho_f < 1.4\rho_{fb} \\ 0.65 \text{ for } \rho_f \geq 1.4\rho_{fb} \end{cases}$$





GFRP - Characteristics		
Type of application	<b>Concrete Exposed to earth and weather</b>	
Characteristic yield strength of reinforcement (supplier)	$f_{yk} = f_{fu}^*$ [MPa]	1155
Partial safety factor for material	$\gamma_{GFRP}$ [-]	1,5
Ambient reduction factor	$C_E$ [-]	0,7
Design value of modulus of elasticity of GFRP	$E_f$ [MPa]	60000
Yield strain of reinforcement	$\epsilon_{yd} = \epsilon_{fu}$ [-]	1,05%
Ultimate strain of reinforcement	$\epsilon_{su} = \epsilon_{fu}^*$ [-]	1,50%
Design yield strength of reinforcement	$f_{yd} = f_{fu}$ [MPa]	539,00

CAGE (GFRP)	Lato terreno (M -)	Lato scavo (M +)
Entrance Side	Yes	
$\phi_1$ [mm]	26	26
$\phi_2$ [mm]	0	26
$\phi_3$ [mm]	0	26
A [mm <sup>2</sup> ]	5309,29	15927,87
MINIMUM REINF. VERIFICATION	OK	
MAXIMUM REINF. VERIFICATION	OK	
$M_{e,d}$ [kNm]	0,00	3360,00
$M_{R,d}$ [kNm]	-1545,20	4098,62
$FS_{N=COST}$ [-]	#DIV/0!	1,22
$w_k$ [mm]	-	-
VERIFICATION	-	-

### - Verifica al taglio

La resistenza al taglio di una sezione rinforzata con GFRP si calcola come la somma della resistenza al taglio del calcestruzzo senza armatura  $V_c$ , e la resistenza al taglio fornita dalle staffe GFRP  $V_f$ , moltiplicata per un fattore di riduzione  $\phi$  che è stabilito dall'ACI come 0,75. La resistenza al taglio deve essere inferiore alla forza di taglio di progetto che agisce sulla sezione trasversale  $V_u$ .

$$\phi \cdot V_n \geq V_u$$

$$\phi \cdot (V_c + V_f) \geq V_u$$

$V_u$ : Forza di taglio di progetto

$\phi$ : Fattore di riduzione della resistenza

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

$V_n$ : Capacità di taglio nominale

$V_c$ : Resistenza a taglio del calcestruzzo

$V_f$ : Resistenza a taglio

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot c$$

Dove

$b_w$ : Larghezza della sezione

$c$ : Profondità dell'asse neutro della sezione trasformata fessurata (in mm) e data da:

$$c = k \cdot d$$

con

$$k = \sqrt{2 \cdot \rho_f \cdot n_f + (\rho_f \cdot n_f)^2} - \rho_f \cdot n_f$$

$n_f$ : Rapporto tra il modulo di elasticità delle barre FRP e il modulo di elasticità del calcestruzzo

La resistenza a taglio delle staffe disposte ortogonalmente all'asse dell'elemento deve essere calcolata come:

$$V_f = \frac{A_{fv} \cdot f_{fv} \cdot d}{s}$$

Dove

$A_{fv}$ : Area di rinforzo a taglio

$f_{fv}$ : Resistenza alla trazione dell'armatura a taglio in GFRP

$$f_{fv} = 0.004 E_f \leq f_{fb}$$

Con

$E_f$ : Modulo di elasticità del GFRP garantito dal fornitore.

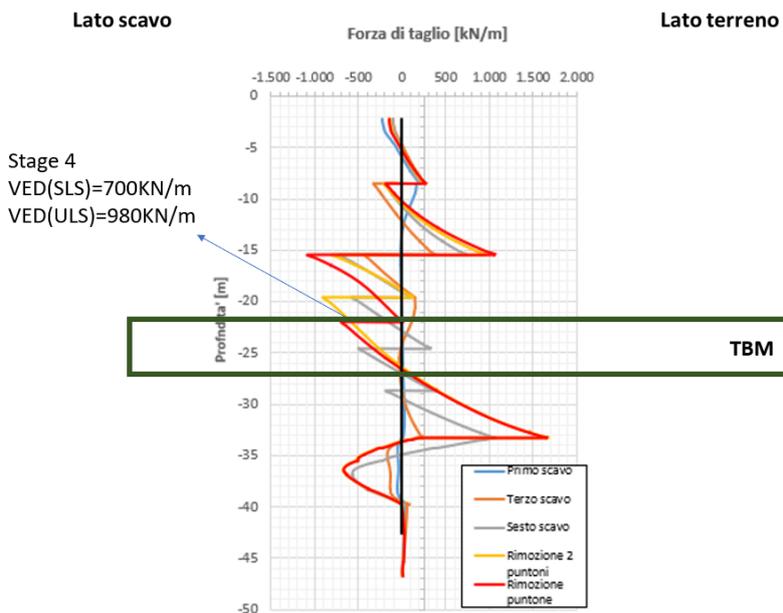


CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1



**GFRP SHEAR REINFORCEMENT**

		NOT SHEAR REINFORCEMENT	
		<b>U.L.S. STATIC</b>	$V_{MAX}$
		$V_d$ [kN/m]	980,00
		$N_d$ [kN/m]	0,00
		$\sigma_{cp}$ [MPa]	0,00
		$V_{Rd,c}$ [kN/m]	311,58
		<b>VERIFICATION</b>	<b>NO</b>

$\phi_{sw}$ [mm]	16
$s_{sw,Transversal}$ [mm]	200
$s_{sw,Longitudinal}$ [mm]	200

<b>VERIFICATION MIN. REINF.</b>	<b>OK</b>
---------------------------------	-----------

		SHEAR REINFORCEMENT	
		<b>U.L.S. STATIC</b>	$V_{MAX}$
		$V_d$ [kN/m]	980,00
		$b_w$ [mm]	1000
		$d$ [mm]	1031
		$z$ [mm]	927,9
		$\vartheta$ [°]	45
		$\alpha$ [°]	90,00
		$V_c$ [kN/m]	311,58
		$V_f$ [kN/m]	1243,77
		$V_n$ [kN/m]	1166,51
		<b>VERIFICATION</b>	<b>OK</b>
		$V_d < V_n$	<b>OK</b>

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## **ALLEGATO N.3**

**Verifiche integrative del nodo di connessione soletta / diaframma**



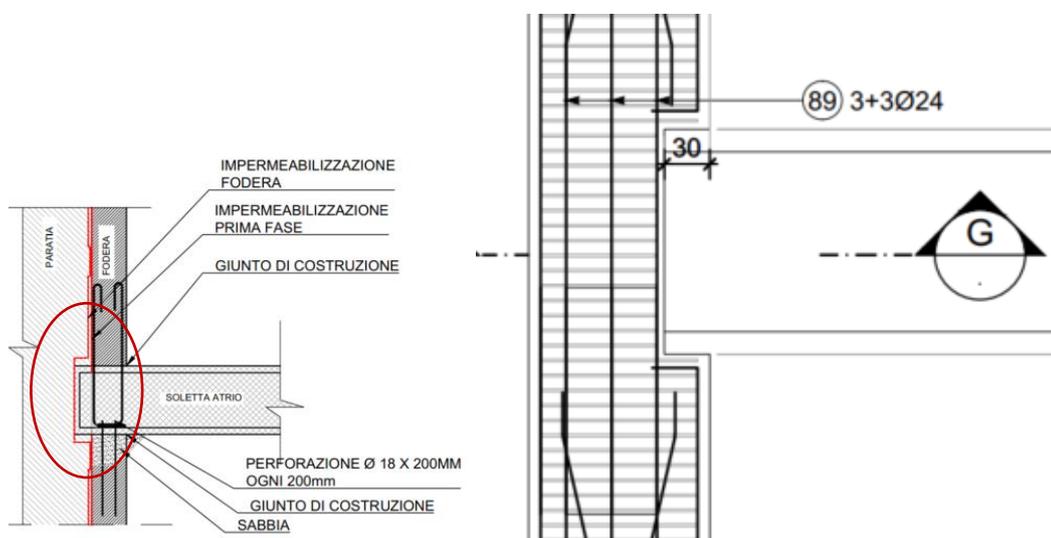
## 1. VERIFICA DELLA CONNESSIONE SOLETTA-DIAFRAMMA

### 1.1 Introduzione

Il collegamento tra le solette di stazione e le paratie è realizzato per mezzo di tasche d'appoggio rettangolari, realizzate grazie all'inserimento di scatole metalliche, già assemblate nelle gabbie d'armatura dei diaframmi.

Le tasche di appoggio hanno larghezza pari a 30 cm e la sezione corrente del diaframma presenta una zona localizzata di spessore ridotto da 120 cm a 90cm. Con lo scopo di dimostrare il corretto funzionamento del nodo di connessione si presentano di seguito le seguenti analisi/verifiche integrative:

1. valutazione degli effetti della eccentricità dei carichi dovuti alla connessione diaframma/solette
2. verifiche a flessione e taglio della sezione ridotta del diaframma
3. verifiche delle massime pressioni di contatto localizzate sugli appoggi
4. verifiche delle massime pressioni di contatto sulle impermeabilizzazioni





## 1.2 Analisi Plaxis aggiuntive per tener conto dell'eccentricità

La verifica strutturale include la valutazione degli effetti della eccentricità dei carichi dovuti alla connessione diaframma/solette. Tale contributo è stato verificato mediante modello *ad hoc* come rappresentato nella figura seguente, considerando le stazioni S4G in quanto presentano le condizioni più sfavorevoli in termini di reazioni vincolari sull'appoggio (assenza di king-post).

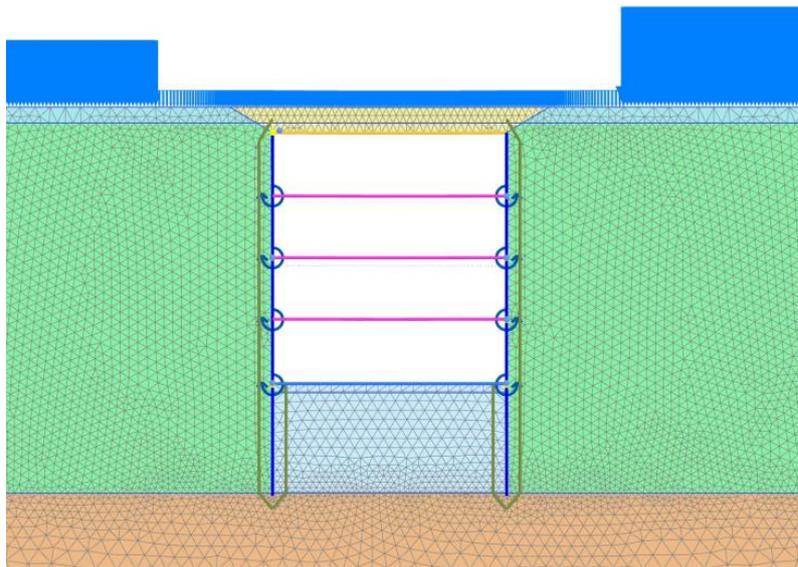
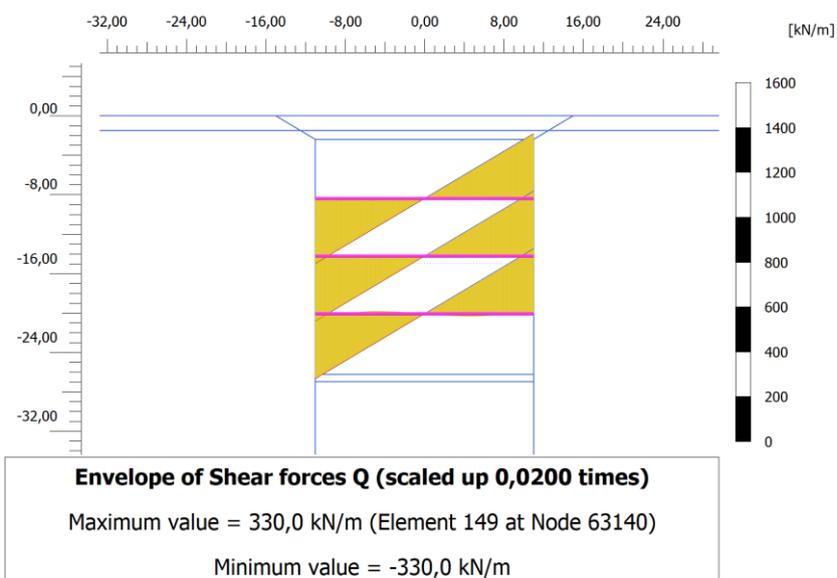
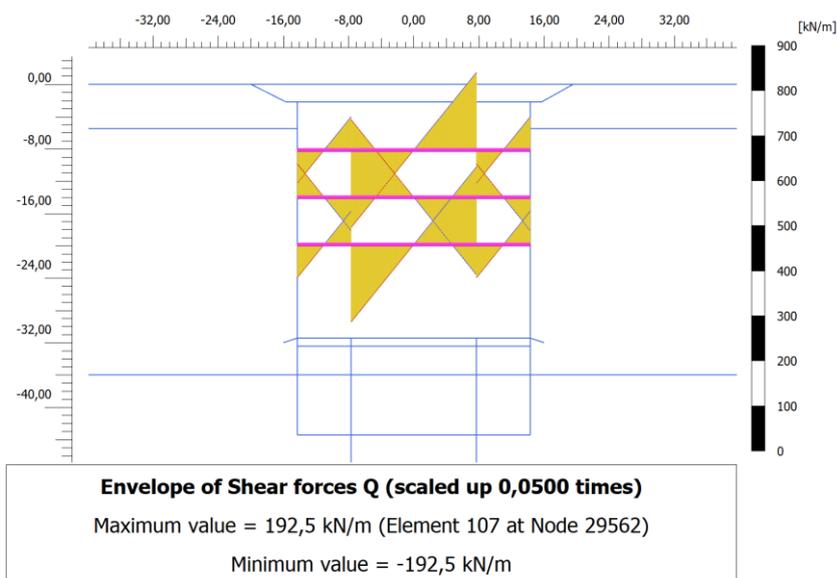


Figura 26. Modellazione dell'eccentricità tra soletta e diaframma – Stazioni S4G

Il modello è stato modificato introducendo sul nodo generico di collegamento soletta/diaframma un momento calcolato come il valore della reazione massima, pari a 330KN/m moltiplicata per l'eccentricità massima pari a 0.45m.



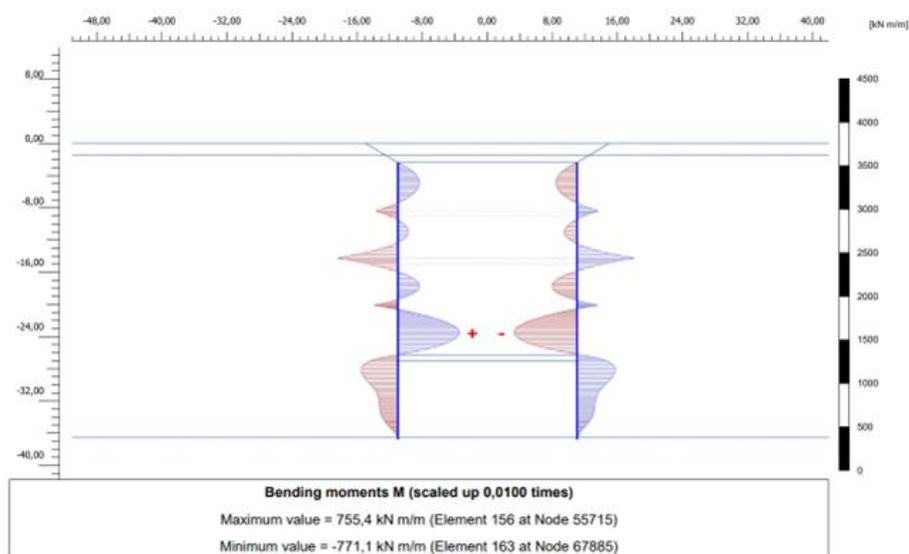
**Figura 27. Valore di reazione vincolare di riferimento per il calcolo del momento flettente aggiuntivo – Stazioni S4G**



**Figura 28. Valore di reazione vincolare di riferimento per il calcolo del momento flettente aggiuntivo – Stazione Carlo Alberto**

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

L'analisi è stata eseguita con riferimento alla fase più sfavorevole ovvero durante lo scavo delle stazioni in assenza delle fodere e considerando la reazione vincolare più gravosa (stazioni S4G 330KN/m). Si è riscontrato come le variazioni in termini di sollecitazioni flettenti siano inferiori al 5% del valore dimensionante e pertanto trascurabili ai fini del progetto delle strutture. Nel caso della stazione in oggetto si ritengono valide le valutazioni eseguite per le stazioni S4G in quanto, come mostrato nella Figura 28, i valori di reazione vincolare sono notevolmente più bassi (193KN/m).



**Figura 29. Distribuzione dei momenti flettenti in assenza di eccentricità (fase finale di scavo – assenza di fodere)**

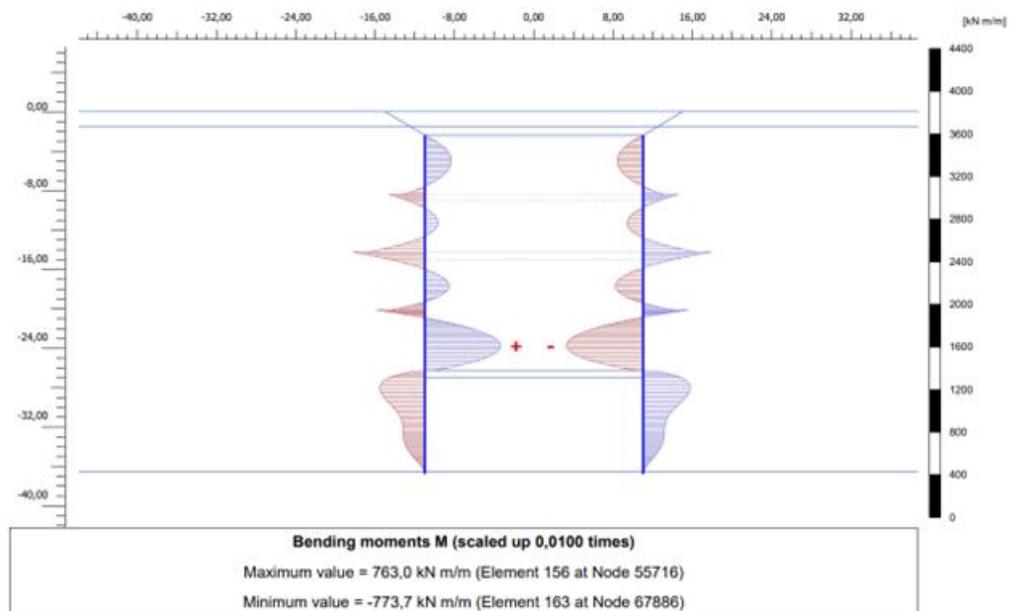


Figura 30. Distribuzione dei momenti flettenti in presenza di eccentricità (fase finale di scavo – assenza di fodere)

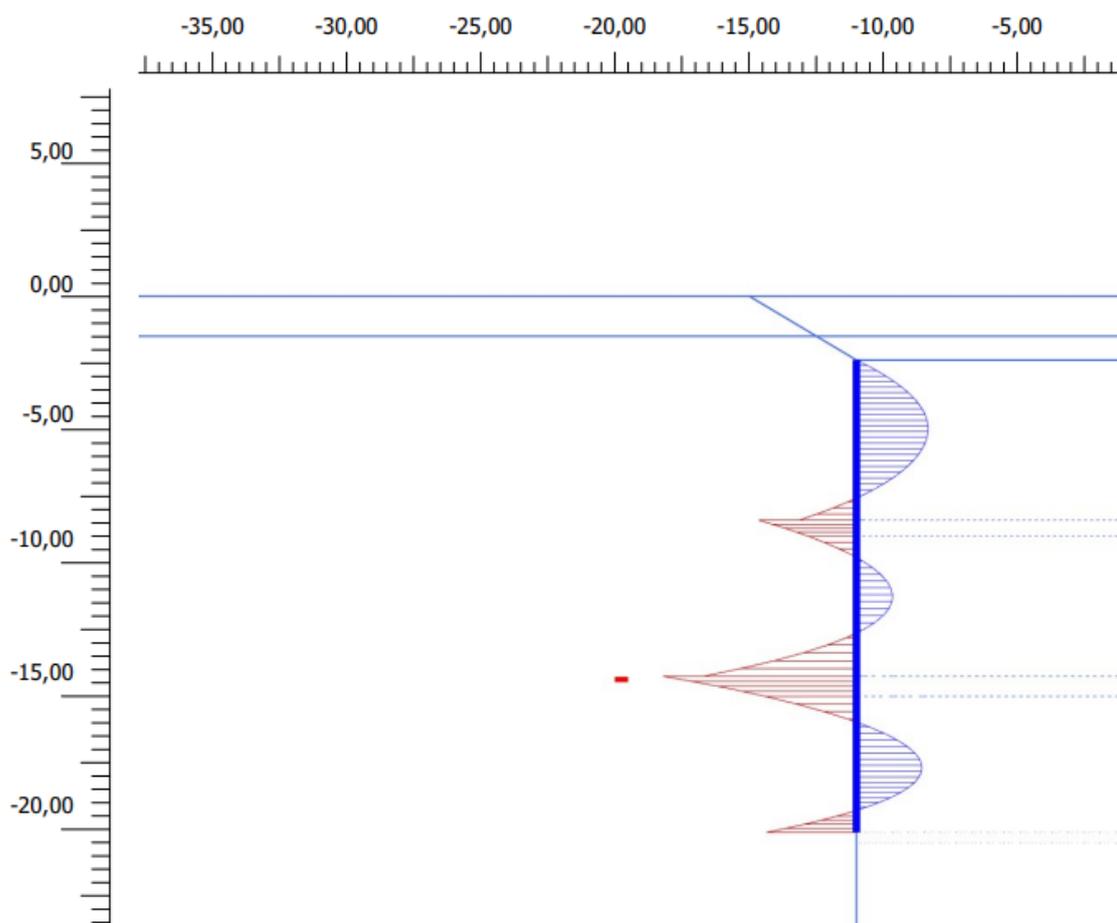


Figura 31. Distribuzione dei momenti flettenti in presenza di eccentricità (fase finale di scavo – assenza di fodere)



### 1.3 Verifica a flessione e taglio della sezione ridotta

Si presentano di seguito le verifiche a flessione e taglio considerando l'involuppo delle sollecitazioni a breve termine. A lungo termine la verifica non è più necessaria in quanto le solette sono completate e per tanto si garantisce la continuità della sezione.

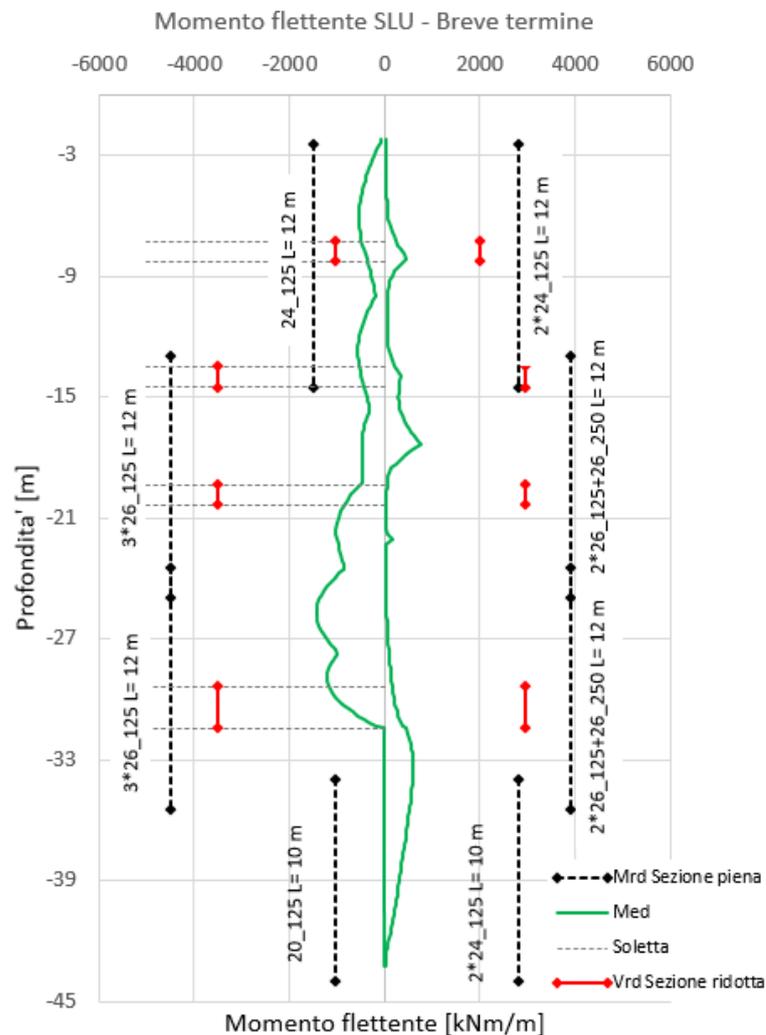


Figura 32. Diaframmi – SLU Diagramma delle sollecitazioni flettenti – Sezione ridotta

Si riporta la verifica della zona più critica, che nel caso in esame è quella relativa al piano atrio.

**Tabella 27 Diaframmi – Verifica SLU flessione - Sezione ridotta -Piano Banchina**

<b>Sezione di verifica SLU: Tasca Banchina</b>		
<b>Geometria sezione:</b>		
Altezza della sezione trasversale di calcestruzzo	900	[mm]
Larghezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1000	[mm]
Copriferro	75	[mm]
Altezza utile della sezione	775	[mm]
<b>Armature</b>		
<b>Armatura tesa</b>		
Diametro dei ferri correnti	26	[mm]
Numero dei ferri correnti	8	[-]
Diametro dei ferri correnti secondo strato	26	[mm]
Numero dei ferri correnti secondo strato	8	[-]
Diametro dei ferri correnti terzo strato	26	[-]
Numero dei ferri correnti terzo strato	8	[-]
Area dell'armatura tesa	12742	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura compressa</b>		
Diametro dei ferri correnti	26	[mm]
Numero dei ferri correnti	8	[-]
Diametro dei ferri correnti secondo strato	26	[mm]
Numero dei ferri correnti secondo strato	8	[-]
Diametro dei ferri correnti terzo strato	26	[-]
Numero dei ferri correnti terzo strato	4	[-]
Area dell'armatura compressa	10619	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Materiali</b>		
<b>Calcestruzzo</b>		
Resistenza caratteristica cubica	30	[MPa]
Coefficiente di sicurezza parziale per il calcestruzzo	1,5	[-]
Coefficiente che tiene conto degli effetti di lungo termine	0,85	[-]
Resistenza di progetto a compressione del calcestruzzo	14,17	[MPa]
Resistenza di progetto a trazione del calcestruzzo	1,20	[MPa]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione caratteristica	15,00	[MPa]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione quasi permanente	11,25	[MPa]
<b>Acciaio</b>		
Resistenza a snervamento dell'acciaio	450	[MPa]
Coefficiente di sicurezza parziale per l'acciaio	1,15	[-]
Resistenza di progetto a trazione dell'acciaio	391	[MPa]
Tensione ammissibile nell'acciaio per le combinazioni a SLS	360	[MPa]
<b>Momento resistente della sezione</b>	<b>3522,52</b>	<b>[kNm]</b>
<b>Momento sollecitante a SLU assunto in valore assoluto</b>	<b>967,00</b>	<b>[kNm]</b>
		Verificato

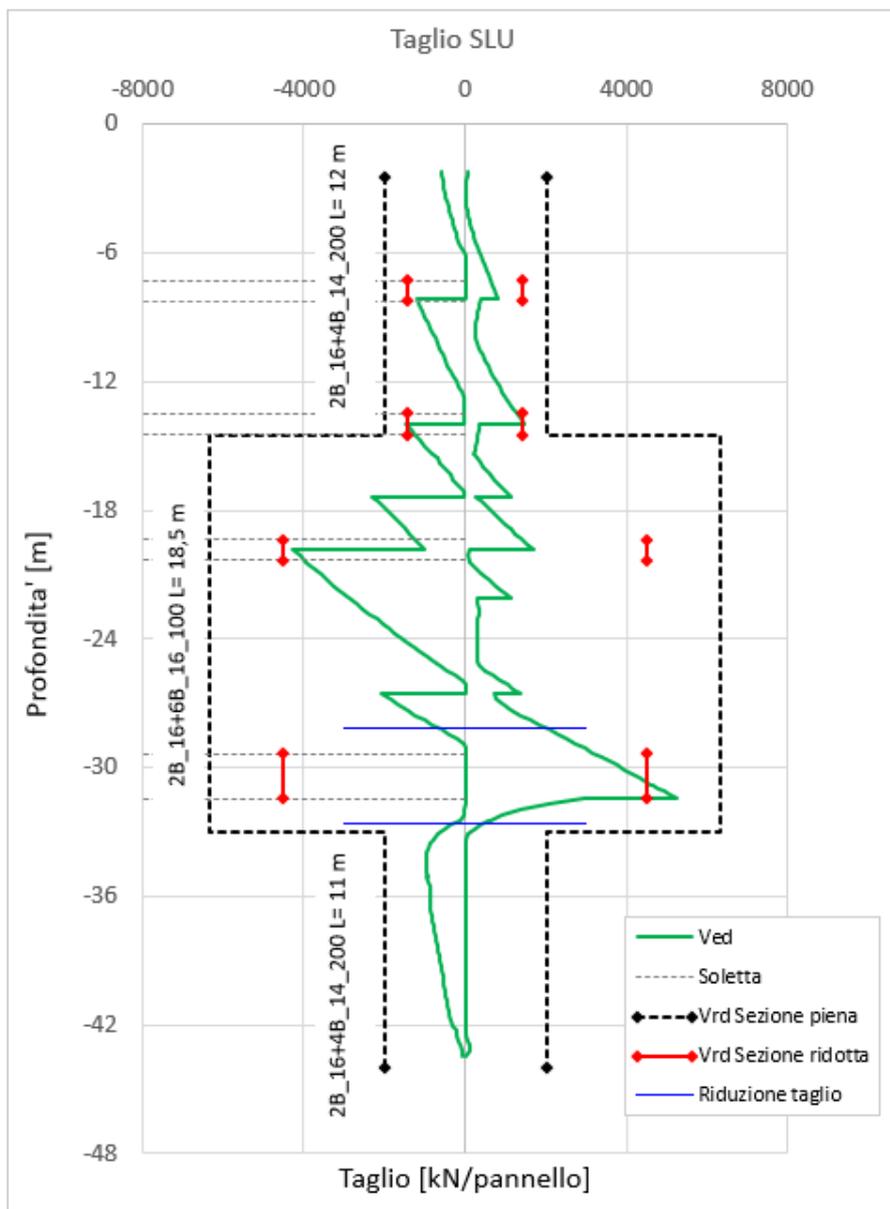


Figura 33. Diaframmi – SLU Diagramma delle sollecitazioni taglianti – Sezione ridotta

Considerando che dovuto alla modellazione si presentano dei picchi in corrispondenza dei nodi tra gli elementi strutturali, le sollecitazioni di taglio possono essere ridotte e sarà sempre cautelativo assumere nel tratto terminale il valore di taglio agente calcolato alla distanza  $d$  dall'appoggio. Per cui i diaframmi risultano verificati a taglio pur considerando la sezione ridotta in corrispondenza delle tasche di appoggio delle solette.


**Tabella 28 Diaframmi – Verifica SLU Sollecitazioni taglianti – Sezione ridotta**

Verifica elementi a taglio			
<b>Pannello diaframma 2800 x 1200 mm - <math>\phi</math>16 2 braccia + <math>\phi</math>16 4 braccia passo 100 mm</b>			
<b>Geometria</b>			
Altezza sezione	H	900	mm
Base sezione	B	2800	mm
Barre longitudinali tese	$\phi_{sl}$	26	mm
Diametro staffe	$\phi_{sw}$	16	mm
Copriferro	c	75	mm
Altezza utile	d	796	mm
<b>Materiali</b>			
<b>Calcestruzzo</b>			
Resistenza caratteristica cubica	$R_{ck}$	30	MPa
Resistenza caratteristica cilindrica	$f_{ck}$	25	MPa
Coefficiente parziale calcestruzzo	$\gamma_c$	1,5	
Coefficiente che tiene conto degli effetti a lungo termine	$\alpha_{cc}$	0,85	
Resistenza di progetto a compressione calcestruzzo	$f_{cd}$	14,17	MPa
Resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo d'anima	$f'_{cd}$	7,08	MPa
<b>Acciaio</b>			
Resistenza a snervamento dell'acciaio	$f_{yk}$	450	MPa
Coefficiente di sicurezza parziale acciaio	$\gamma_s$	1,15	
Resistenza di progetto a trazione dell'acciaio	$f_{yd}$	391,30	MPa
<b>Elementi con armatura a taglio</b>			
Diametro staffe esterne	$\phi_{sw1}$	16	mm
Numero braccia	$n_{b1}$	2	
Diametro staffe esterne	$\phi_{sw2}$	16	mm
Numero braccia	$n_{b2}$	6	
Passo staffe	s	100	mm
Inclinazione tra puntone compresso e asse elemento	$\theta$	45,00	°
Inclinazione armatura trasversale rispetto asse elemento	$\alpha$	90	°
Area sezione trasversale armatura a taglio	$A_{sw}$	1607,68	mm <sup>2</sup>
Braccio coppia interna	z	716,4	mm
Resistenza offerta dall'armatura a taglio	$V_{Rsd}$	4507	kN
Resistenza offerta dai puntoni	$V_{Rcd}$	7104	kN
<b>Resistenza a taglio della sezione armata trasversalmente</b>	<b><math>V_{Rd}</math></b>	<b>4507</b>	<b>kN</b>
<b>Taglio sollecitante SLU</b>	<b><math>V_{ed}</math></b>	<b>2295</b>	<b>kN</b>
			Verificato



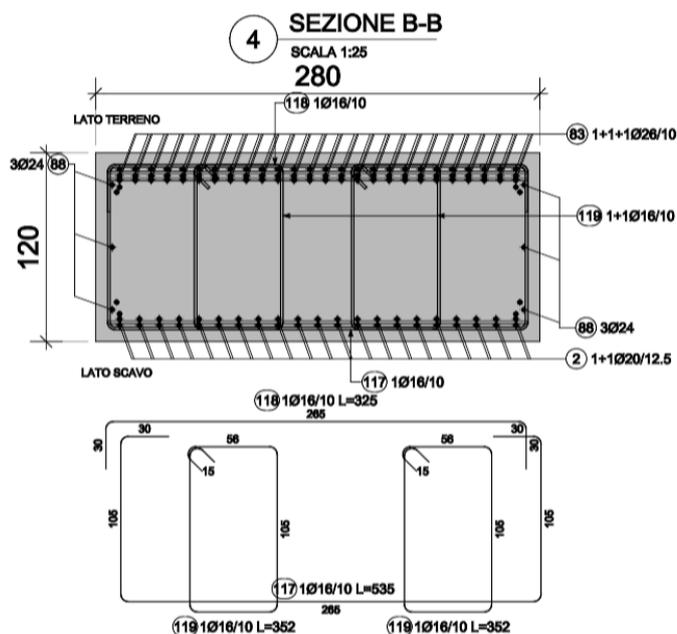
### 1.4 Verifica dell'appoggio soletta-paratia

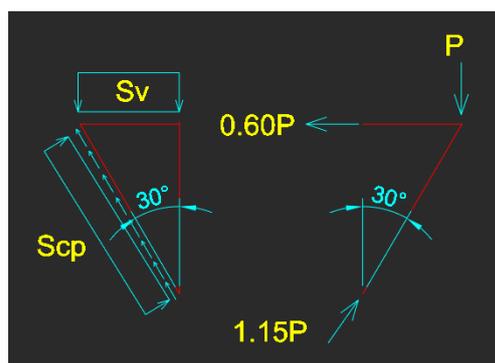
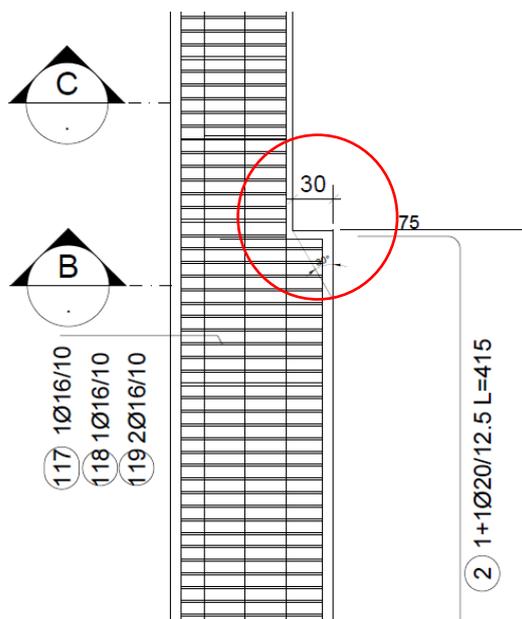
La massima reazione applicata  $R=330\text{kN/m}$  (Stazioni S4G – per le altre stazioni tale reazione e' minore di  $180\text{kN/m}$ )

$$V_{Ed} = 1.4 \times R = 462 \text{ kN/m}$$

Per la valutazione della resistenza del cuneo si ipotizza una modalit  di rottura a taglio su un piano inclinato a 30 gradi (da normativa tale valore risulta in un range 22.5-45 gradi)

I meccanismi resistenti sono rappresentati dal contributo del calcestruzzo al taglio nel piano di rottura, dal contributo dell'armatura principale (barra n.2 -  $2\phi 20/125$ ) intercettata in due sezioni e dal contributo delle staffe (barre n. 117,118 e 119 -  $6\phi 16/100$ ).





## - Resistenza al taglio del calcestruzzo:

Caratteristiche della sezione				
<b>GEOMETRIA</b>				
H	=	60	cm	altezza sezione
b <sub>w</sub>	=	100	cm	larghezza sezione
h'	=	10	cm	copriferro
d	=	50	cm	altezza utile
<b>ARMATURA TESA</b>				
∅	=	0	mm	diametro armatura
n°	=	0		numero barre
A <sub>s</sub>	=	0.0	cm <sup>2</sup>	area dell'armatura tesa
ρ <sub>l</sub>	=	0.0000		rapporto geometrico d'armatura longitudinale (≤0,02) min[As/bd;0,02]
<b>AZIONI DI COMPRESSIONE</b>				
N <sub>Ed</sub>	=	380	kN	valore di calcolo della compressione assiale (se presente)
σ <sub>cp</sub>	=	0.63	Mpa	tensione media di compressione min[Ned/bh;0,2fcd]
<b>Resistenza senza armatura a taglio</b>				
<b>RESISTENZA SENZA ARMATURA A TAGLIO</b>				
V <sub>Rd</sub>	=	<b>383 kN</b>		max[Vrd1;Vrd2]
Resistencia concreto	V <sub>Rd,C</sub>	Con riferimento all'elemento fessurato da momento flettente, la resistenza di progetto a taglio si valuta con $V_{Rd} = \max \left[ \left[ 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] b_w \cdot d; (v_{\min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \right] \quad [4.1.23]$		
con				
f <sub>ck</sub> espresso in MPa				
k = 1 + (200/d) <sup>1/2</sup> ≤ 2				
v <sub>min</sub> = 0,035k <sup>3/2</sup> f <sub>ck</sub> <sup>1/2</sup>				

V<sub>Rd,c</sub> = 383 kN/m < V<sub>Ed</sub> .... è necessario considerare il contributo delle barre di armatura

- Contributo delle barre di armatura (contributo valutato su pannelli larghi 2,80 m)

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

i) Contributo dell'armatura principale (barra n.2 - 2 $\phi$ 20/125)

numero di barre = 21    numero di strati = 2    Totale barre = 2x21 = 42

Diametro barra = 20mm

Nota: il piano di rottura interseca i due strati dell'armatura principale in due sezioni, tuttavia viene considerata in modo conservativo solo un strato e una sezione.

$$N_{ef} = 21 \quad A_s = 3.14\text{cm}^2 \quad f_{yd} = 390 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,s} = N_{ef} A_s f_{yd} = 21 \times 314 \times 390 / 1000 = 2570 \text{ kN}$$

ii) Contributo delle staffe (barre n. 117,118 e 119 - 6 $\phi$ 16/100)

Numero di barre = 6    Numero di strati = 3    Totale barre = 3x6 = 18

Diametro barra = 16mm

Nota: il piano di rottura interseca tre strati delle staffe, in modo conservativo se ne considerano due.

$$N_{ef} = 2 \times 6 = 12 \quad A_s = 2.01\text{cm}^2 \quad f_{yd} = 390 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,s} = N_{ef} A_s f_{yd} = 12 \times 201 \times 390 / 1000 = 940 \text{ kN}$$

iii) Contributo dei rinforzi (per unità di larghezza)

$$V_{Rd,s} = (2570 + 940) / 2.80 = 1250 \text{ kN/m} > V_{ed} \quad \dots \text{FS} = 1250 / 462 = 2.70$$

iv) Verifica della tensione nell'armatura orizzontale

$$N_{Ed} = 0.60 \times V_{Ed} = 0.60 \times 462 \text{ kN/m} = 278 \text{ kN/m}$$

Considerando conservativamente solo uno strato di armatura orizzontale

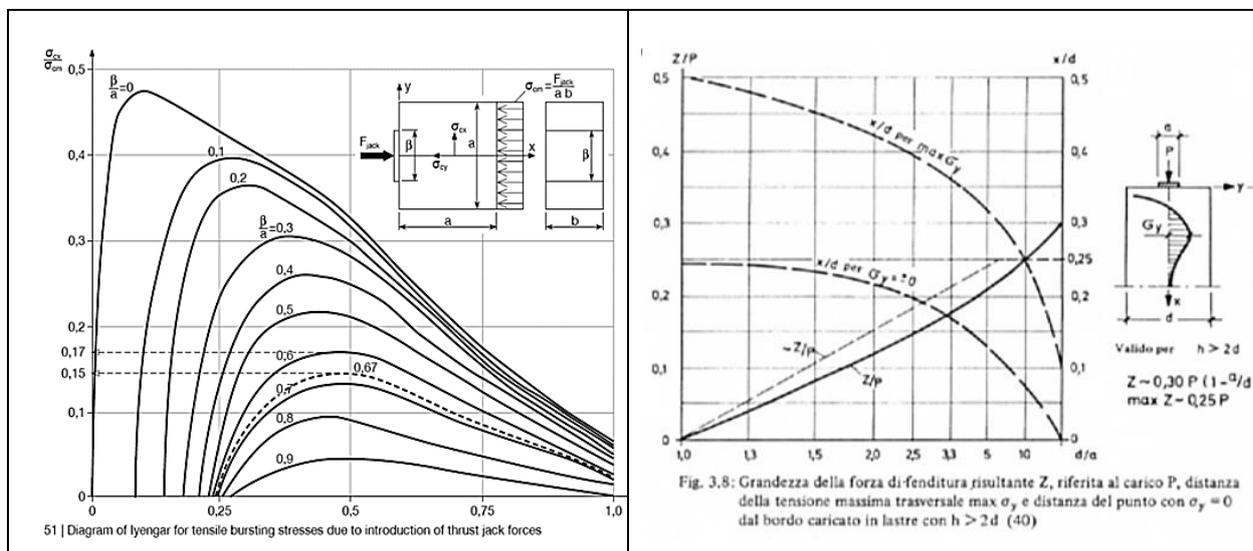
$$A_s = 8\phi 20 = 8 \times 3.14\text{cm}^2 = 25.12 \text{ cm}^2$$

$$N_{Rd,s} = A_s f_{yd} = 2512 \times 390 / 1000 = 980 \text{ kN/m} > N_{ed} \quad \dots \text{FS} = 980 / 278 = 3.50$$



v) Verifica delle trazioni indotte localmente

La compressione alla base della tasca induce tensioni di trazioni orizzontali locali immediatamente al di sotto della base di appoggio. Utilizzando i consueti metodi di analisi delle pressioni indotte (Leonardth and Iyengar), nelle condizioni più estreme, le trazioni indotte sono limitate al 50% delle massime sollecitazioni di compressione.



$$\sigma_{t\_max} = 0.50 \times \sigma_{cm} = 0.50 \times 1.54 \text{ MPa} = 0.77 \text{ MPa} < f_{ctm} = 2.60 \text{ MPa}$$

La verifica e' pertanto soddisfatta

### 1.5 Verifica delle pressioni di contatto sulle impermeabilizzazioni

Pressione di contatto media:

$$\sigma_{cm} = VEd / A_c \quad \text{dove} \quad A_c = 30\text{cm} \times 100\text{cm} = 3000 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{cm} = 462 / 300 = 1.54 \text{ MPa} < 7.0 \text{ MPa} \text{ Resistenza a compressione a lungo termine}$$



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Spessore effettivo	2.00 (-5 / +10 %) mm incl. strato segnaletico	(EN 1849-2)
Massa areica	2.56 (-5 / +10 %) kg/m <sup>2</sup>	(EN 1849-2)

### INFORMAZIONI TECNICHE

Resistenza a trazione	17.0 (± 2.0) N/mm <sup>2</sup> (longitudinale) 16.0 (± 2.0) N/mm <sup>2</sup> (trasversale)	(ISO 527)(EN 12311-2)
Allungamento a rottura	≥ 300 % (longitudinale/trasversale)	(ISO 527)
Modulo di elasticità a trazione	≤ 20 N/mm <sup>2</sup> (longitudinale/trasversale) (tra 1 % e 2 % di allungamento, v = 5mm/min)	(ISO 527)
Resistenza allo scoppio	≥ 80 % (D=1.0 m)	(EN 14151)
Resistenza al punzonamento statico	2.35 (± 0.25) kN	(EN ISO 12236)
Resistenza all'urto	Impermeabile con altezza di caduta di 750 mm (peso 500 g, Metodo A)	(EN 12691)
Resistenza a compressione a lungo termine	Impermeabile con carico di 7.0 N/mm <sup>2</sup> (50 h)	(simile a SIA V280/14)
Flessibilità a freddo	Nessuna rottura a - 20 °C	(EN 495-5)
Variatione dimensionale dopo riscaldamento	<2.0% (longitudinale/trasversale)	(EN 1107-2) (+80 °C / 6 h)
Resistenza all'ossidazione	Variatione dell'allungamento a rottura ≤ 10 % Variatione della resistenza a trazione ≤ 10 %	(EN 14575) (120 gg / 80 °C)
Comportamento dopo stoccaggio in acqua calda	Variatione della resistenza a trazione < 20 % (longitudinale/trasversale) Variatione dell'allungamento a rottura < 20 % (longitudinale/trasversale) Variatione di massa < 4 % Variatione di massa < 10 %	(SIA V280/13 e OEBV) (+50 °C / 8 mesi) (EN 14415) (+70 °C / 360 gg)

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico-Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna-Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## INDICE

<b>1.</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>5</b>
<b>1.1</b>	<b>SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE</b>	<b>6</b>
<b>1.2</b>	<b>DESCRIZIONE DELLE OPERE</b>	<b>7</b>
<b>2.</b>	<b>NORMATIVE DI RIFERIMENTO</b>	<b>8</b>
<b>3.</b>	<b>CARATTERISTICHE DEI MATERIALI</b>	<b>11</b>
<b>3.1</b>	<b>CALCESTRUZZI</b>	<b>11</b>
3.1.1	CALCESTRUZZO UTILIZZATO PER I SOLAI DI STAZIONE E STRUTTURE INTERNE	11
3.1.2	CALCESTRUZZO UTILIZZATO PER DIAFRAMMI	11
<b>3.2</b>	<b>ACCIAI PER ARMATURE IN C.A.</b>	<b>11</b>
<b>3.3</b>	<b>ACCIAIO PER CARPENTERIA METALLICA</b>	<b>12</b>
<b>3.4</b>	<b>GFRP</b>	<b>12</b>
<b>4.</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA</b>	<b>13</b>
<b>5.</b>	<b>PRINCIPALI ASSUNZIONI DELLA PROGETTAZIONE</b>	<b>16</b>
<b>5.1</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE SISMICA</b>	<b>16</b>
<b>5.2</b>	<b>COMBINAZIONI DI CARICO</b>	<b>17</b>
<b>5.3</b>	<b>CRITERI DELLA MODELLAZIONE NUMERICA</b>	<b>19</b>
5.3.1	GEOMETRIA DEL MODELLO NUMERICO	19
5.3.2	ELEMENTI STRUTTURALI	21
5.3.3	CARICHI	22
5.3.3.1	Carichi superficiali	22
5.3.3.2	Azione sismica	22
<b>6.</b>	<b>ANALISI NUMERICHE</b>	<b>26</b>
<b>6.1</b>	<b>FASI DI CALCOLO MODELLO GEOTECNICO</b>	<b>26</b>
<b>6.1</b>	<b>OUTPUT</b>	<b>38</b>
6.1.1	SOLLECITAZIONI PARATIA	38
6.1.2	SPOSTAMENTI PARATIA	40
6.1.3	SOLLECITAZIONI BARRETTE TEMPORANEE	41
6.1.4	SOLLECITAZIONE PARATIA DI PALI MEDI 800 MM – ACCESSO SPECIALE	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
<b>7.</b>	<b>VERIFICHE STRUTTURALI</b>	<b>43</b>

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

<b>7.1</b>	<b>DIAFRAMMI - VERIFICHE DELLE SOLLECITAZIONI FLETTENTI SLU</b>	<b>43</b>
<b>7.2</b>	<b>DIAFRAMMI - VERIFICA DELLE SOLLECITAZIONI TAGLIANTI SLU</b>	<b>47</b>
<b>7.1</b>	<b>BARRETTE TEMPORANEE - VERIFICHE SLU</b>	<b>51</b>
<b>7.2</b>	<b>VERIFICHE SLE</b>	<b>51</b>
<b>7.3</b>	<b>VERIFICA DI DEFORMABILITÀ A LUNGO TERMINE</b>	<b>54</b>
<b>8.</b>	<b>VERIFICHE GEOTECNICHE</b>	<b>55</b>
<b>8.1</b>	<b>VERIFICA TAMPONE DI FONDO</b>	<b>55</b>
<b>8.2</b>	<b>VERIFICA CAPACITÀ PORTANTE BARRETTE (KINGPOST)</b>	<b>59</b>
<b>8.3</b>	<b>VERIFICA CAPACITÀ PORTANTE PARATIA</b>	<b>62</b>
<b>8.4</b>	<b>VERIFICA CAPACITÀ PORTANTE DELLA SOLETTA DI FONDO</b>	<b>63</b>
<b>8.5</b>	<b>VERIFICA PUNTONI TEMPORANEI</b>	<b>64</b>
<b>8.6</b>	<b>VERIFICA TRAVE DI RIPARTIZIONE</b>	<b>68</b>
<b>8.7</b>	<b>STABILITÀ GLOBALE</b>	<b>70</b>
<b>8.8</b>	<b>VERIFICA A GALLEGGIAMENTO</b>	<b>76</b>
<b>9.</b>	<b>VALIDAZIONE DEI MODELLI ESEGUITI</b>	<b>78</b>
	<b>ALLEGATO N.1</b>	<b>81</b>
	<b>ALLEGATO N.2</b>	<b>99</b>
	<b>ALLEGATO N.3</b>	<b>107</b>
<b>1.</b>	<b>VERIFICA DELLA CONNESSIONE SOLETTA-DIAFRAMMA</b>	<b>108</b>
<b>1.1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>108</b>
<b>1.2</b>	<b>ANALISI PLAXIS AGGIUNTIVE PER TENER CONTO DELL' ECCENTRICITÀ</b>	<b>109</b>
<b>1.3</b>	<b>VERIFICA A FLESSIONE E TAGLIO DELLA SEZIONE RIDOTTA</b>	<b>114</b>
<b>1.4</b>	<b>VERIFICA DELL' APPOGGIO SOLETTA-PARATIA</b>	<b>118</b>
<b>1.5</b>	<b>VERIFICA DELLE PRESSIONI DI CONTATTO SULLE IMPERMEABILIZZAZIONI</b>	<b>121</b>

## INDICE DELLE FIGURE

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

5

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Figura 2.	Modello 3D – Stazione Carlo Alberto	6
Figura 3.	Stralcio stratigrafia stazione Carlo Alberto	14
Figura 4.	Sezione di calcolo	20
Figura 5.	Schematizzazione metodo di Wood	23
Figura 6.	Stralcio planimetria stazione Carlo Alberto con indicazione della sezione di calcolo A-A	26
Figura 7.	Fasi di calcolo modello geotecnico	36
Figura 8.	Modello numerico Plaxis – Accesso speciale.	37
Figura 9.	Diaframma - SLE Momento flettente - Inviluppo	38
Figura 10.	Diaframma - SLE Diagramma taglio - Inviluppo	39
Figura 11.	Diaframma - SLE Diagramma degli spostamenti orizzontali fase 22	40
Figura 12.	Barrette - Momento flettente - Inviluppo	41
Figura 13.	Barrette – Digramma taglio – Inviluppo	42
Tabella 15	Sollecitazioni barretta	42
Figura 14.	Paratia pali medi – Digramma taglio e momento – Inviluppo	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figura 15.	Diaframmi - SLU Diagramma delle sollecitazioni flettenti	44
Figura 16.	Diaframma - SLU Diagramma delle sollecitazioni taglianti	48
Figura 17.	Spostamenti orizzontali a lungo termine	54
Figura 18.	Possibili meccanismi di collasso: a) sollevamento del tampone di fondo e dei diaframmi b) sollevamento del tampone di fondo c) rottura del tampone di fondo	55
Figura 19.	Zone di plasticizzazione	63
Figura 20.	Fattore di sicurezza nella fase costruttiva	70
Figura 21.	Rapporto tra tensione tangenziale massima e tensione tangenziale mobilitata – breve termine	71
Figura 22.	Fattore di sicurezza a lungo termine	72
Figura 23.	Rapporto tra tensione tangenziale massima e tensione tangenziale mobilitata – lungo termine	73
Figura 24.	Tensioni orizzontali efficaci paratia	74
Figura 25.	Confronto tensione limite attive e passive con tensioni orizzontali Plaxis	75
Figura 26.	Modello 3D-gabbia soft eye	100
Figura 27.	Modellazione dell'eccentricità tra soletta e diaframma – Stazioni S4G	109
Figura 28.	Valore di reazione vincolare di riferimento per il calcolo del momento flettente aggiuntivo – Stazioni S4G	110
Figura 29.	Valore di reazione vincolare di riferimento per il calcolo del momento flettente aggiuntivo – Stazione Carlo Alberto	110
Figura 30.	Distribuzione dei momenti flettenti in assenza di eccentricità (fase finale di scavo – assenza di fodere)	111
Figura 31.	Distribuzione dei momenti flettenti in presenza di eccentricità (fase finale di scavo – assenza di fodere)	112
Figura 32.	Distribuzione dei momenti flettenti in presenza di eccentricità (fase finale di scavo – assenza di fodere)	113

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Figura 33. Diaframmi – SLU Diagramma delle sollecitazioni flettenti – Sezione ridotta	114
Figura 34. Diaframmi – SLU Diagramma delle sollecitazioni taglianti – Sezione ridotta	116

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 Parametri geotecnici	15
Tabella 2 Parametri colonne Jet grouting	15
Tabella 3 Livelli di falda	15
Tabella 4 Probabilità di superamento PVR con SLV	16
Tabella 5 Parametri sismici del sito	17
Tabella 6 Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I)	18
Tabella 7 Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (Tab. 6.2.II)	18
Tabella 8 Coefficienti parziali per le verifiche agli stati limite ultimi STR e GEO di muri di sostegno (Tab. 6.5.I)	18
Tabella 9 Parametri input elementi strutturali	21
Tabella 10 Carichi superficiali	22
Tabella 11 Parametri input azione sismica	24
Tabella 12 Parametri input azione sismica	25
Tabella 13 Fasi di calcolo	27
Tabella 14 Sollecitazioni paratia	40
Tabella 15 Sollecitazioni barretta	42
Tabella 16 Armature longitudinali paratia	43
Tabella 17 Diaframmi - Verifica SLU flessione Sezione A – Seconda gabbia	45
Tabella 18 Diaframmi - Verifica SLU flessione Sezione B – Terza Gabbia	46
Tabella 19 Diaframma - Verifica SLU – Taglio – Sezione A	49
Tabella 20 Diaframma - Verifica SLU – Taglio – Sezione B	50
Tabella 23 Diaframmi - Verifica SLE –Sezione A -Seconda Gabbia	52
Tabella 24 Diaframmi - Verifica SLE –Sezione B -Terza Gabbia	52
Tabella 25 Verifica tampone di fondo	55
Tabella 26 Verifica capacità portante barrette	60
Tabella 27 Verifica capacità portante paratia	62
Tabella 28 Verifica trave di ripartizione	68
Tabella 29 Diaframmi – Verifica SLU flessione - Sezione ridotta -Piano Banchina	115
<b>Tabella 30 Diaframmi – Verifica SLU Sollecitazioni taglianti – Sezione ridotta</b>	<b>117</b>



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 1. PREMESSA

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, geotecniche e le verifiche relative alle opere di sostegno della Stazione Carlo Alberto.

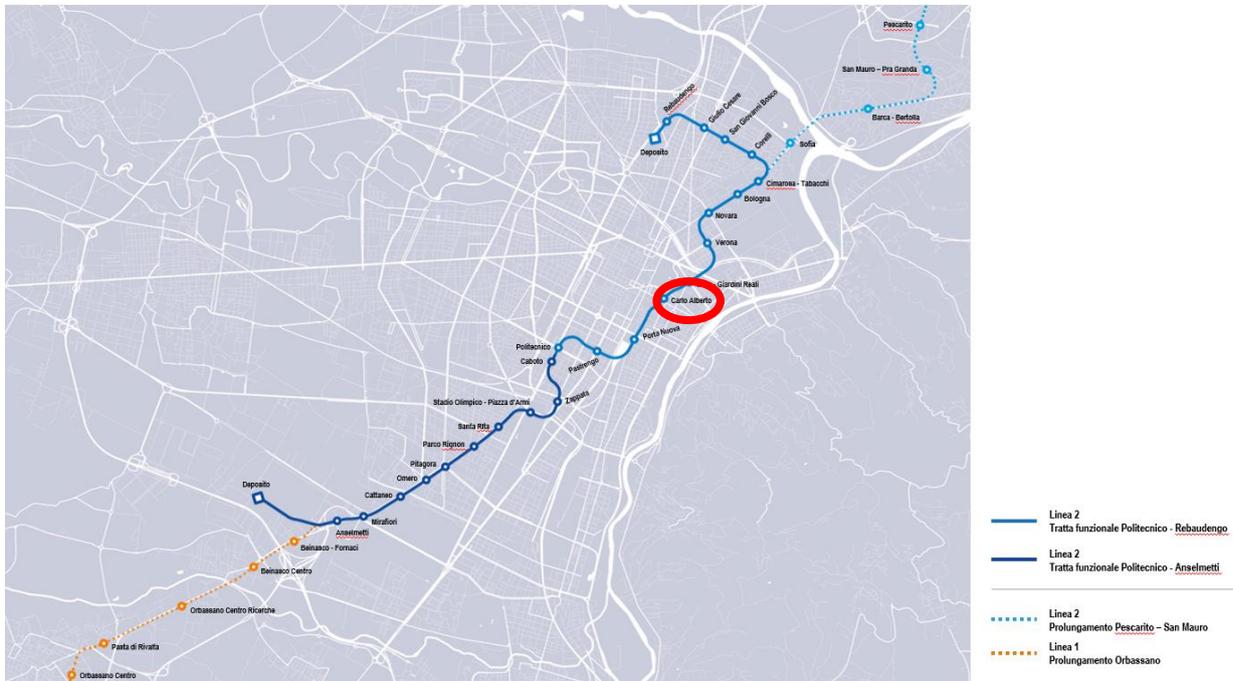


Figura 1. Key-plan della linea 2 – tratta funzionale Politecnico-Rebaudengo

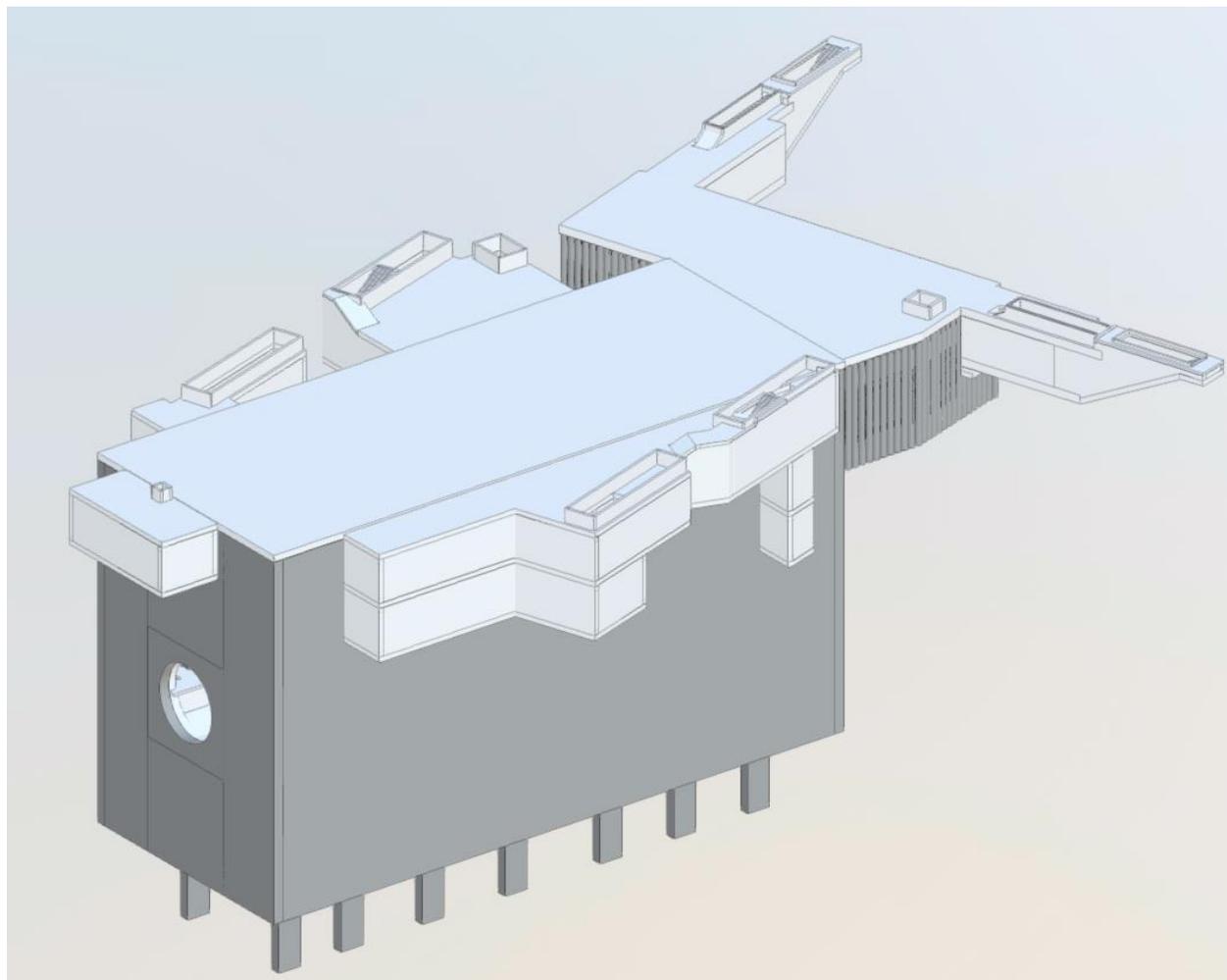


Figura 2. Modello 3D – Stazione Carlo Alberto

### 1.1 Scopo e campo di applicazione

In questa relazione vengono dimensionati soltanto i diaframmi e le strutture di sostegno temporanee; infatti, sebbene inserite nei modelli di calcolo, le verifiche relative alle solette di copertura, intermedia vengono riportate nella relazione relativa alle strutture interne (MTL2T1A2DSTRSCAR002) in quanto i carichi dimensionanti per tali strutture sono quelli a lungo termine. Nella presente relazione vengono altresì riportate le verifiche strutturali della paratia di pali su cui sarà appoggiato il solaio di copertura dell'accesso speciale (atrio di stazione). Tale struttura ha funzioni statiche di breve (scavo sotto soletta top down) e di lungo termine.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 1.2 Descrizione delle opere

La stazione Carlo Alberto è un manufatto interrato a quattro livelli, con fondo scavo posto alla profondità di circa 32 m rispetto al piano campagna. Al suo interno troviamo un solettone di fondo di spessore variabile e sagomato per consentire il passaggio a vuoto della TBM, un livello quota banchina, tre solai intermedi ed uno di copertura il cui estradosso è posto ad una quota pari a -1.80 m rispetto al piano campagna.

La stazione verrà realizzata tramite la tecnologia esecutiva di tipo *top-down* caratterizzata da uno scavo sostenuto da diaframmi contrastati da solai permanenti e puntoni temporanei. I diaframmi presentano spessore di 1.20 m e sono immorsati al di sotto del fondo scavo di circa 12.0 m. La stabilità del fondo scavo è garantita da un tampone di fondo realizzato mediante colonne in Jet Grouting.

Data la luce della stazione verranno realizzati in concomitanza alla realizzazione dei diaframmi dei setti temporanei che fungeranno da sostegno alle solette di copertura ed intermedie. Durante le fasi costruttive, al di sotto della seconda soletta intermedia, lo scavo sarà sostenuto da tre livelli di puntoni temporanei. La rimozione degli ultimi due livelli di puntoni temporanei si rende necessaria al fine di garantire gli spazi necessari per il passaggio a vuoto della TBM. Il primo livello di puntoni sarà mantenuto fino alla realizzazione della terza soletta intermedia che avverrà nella fase successiva al passaggio della macchina di scavo.

Il sistema di costruzione dei diaframmi in calcestruzzo armato consiste nel realizzare inizialmente i primari e poi i secondari con una sovrapposizione compresa tra i 10 e i 30cm. In relazione a tale tecnica esecutiva, anche le gabbie di armatura saranno calibrate per prevedere la sovrapposizione dei diaframmi secondari sui primari. L'esecuzione delle paratie è preceduta dalla costruzione di coree guida che seguono il tracciato.

Il collegamento tra il solaio e le paratie è realizzato per mezzo di tasche d'appoggio rettangolari, realizzate grazie all'inserimento di scatole metalliche, già inserita nelle gabbie d'armatura dei diaframmi.

L'accesso speciale verrà scavato contestualmente al corpo stazione e dopo aver realizzato una paratia di medio pali di 400 mm a protezione degli edifici posti lungo Via Cesare Battisti. Il solaio di copertura sarà appoggiato lungo tutto il perimetro dell'accesso speciale su una paratia di pali trivellati di diametro 800 mm e interasse 900 mm.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

La progettazione è stata realizzata facendo riferimento alle Normative Nazionali sottoelencate:

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

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

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

Quando necessario, saranno altresì assunti a riferimento i Codici Normativi Europei elencati di seguito:

#### Eurocode 0 – Basis of structural design

- EN 1990 Basis of structural design.

#### Eurocode 1 – Actions on structures

- EN 1991-1-1 Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings
- EN 1991-1-2 Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire.
- EN 1991-1-3 Part 1-3: General actions – Snow loads.
- EN 1991-1-4 Part 1-4: General actions – Wind actions.
- EN 1991-1-5 Part 1-5: General actions – Thermal actions.
- EN 1991-1-6 Part 1-6: General actions – Actions during execution.
- EN 1991-1-7 Part 1-7: General actions – Accidental Actions.
- EN 1991-2 Part 2: Traffic loads on bridges.
- EN 1991-3 Part 3: Actions induced by cranes and Machinery.
- EN 1991-4 Part 4: Silos and tanks.

#### Eurocode 2 – Design of concrete structures

- EN 1992-1-1 Part 1-1: General rules and rules for Buildings.
- EN 1992-1-2 Part 1-2: General rules – Structural fire Design.
- EN 1992-3 Part 3: Liquid retaining and containment Structures.

#### Eurocode 3 – Design of steel structures

- EN 1993-1-1 Part 1-1: General rules and rules for Buildings
- EN 1993-1-2 Part 1-2: General rules Structural fire design
- EN 1993-1-3 Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting
- EN 1993-1-4 Part 1-4: General rules – Supplementary rules for stainless steels
- EN 1993-1-5 Part 1-5: Plated structural elements
- EN 1993-1-6 Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures
- EN 1993-1-7 Part 1-7: Plated structures subject to out of plane loading
- EN 1993-1-8 Part 1-8: Design of joints
- EN 1993-1-9 Part 1-9: Fatigue

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

- EN 1993-1-10 Part 1-10: Material Toughness and through-thickness properties
- EN 1993-1-11 Part 1-11: Design of structures with tension components
- EN 1993-1-12 Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S 700
- EN 1993-2 Part 2: Steel Bridges
- EN 1993-3-1 Part 3-1: Towers, masts, and chimneys -Towers and masts
- EN 1993-3-2 Part 3-2: Towers, masts, and chimneys – Chimneys
- EN 1993-4-1 Part 4-1: Silos
- EN 1993-4-2 Part 4-2: Tanks
- EN 1993-4-3 Part 4-3: Pipelines
- EN 1993-5 Part 5: Piling
- EN 1993-6 Part 6: Crane supporting structures

#### Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures

- EN 1994-1-1 Part 1-1: General rules and rules for Buildings
- EN 1994-1-2 Part 1-2: General rules – Structural Fire Design
- EN 1994-2 Part 2: General rules and rules for bridges

#### Eurocode 7 – Geotechnical design

- EN 1997-1 Part 1: General rules
- EN 1997-2 Part 2: Ground investigation and testing
- EN 1997-3 Part 3: Design assisted by field testing

#### Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance

- EN 1998-1 Part 1: General rules, seismic actions, and rules for buildings
- EN 1998-2 Part 2: Bridges
- EN 1998-3 Part 3: Assessment of retrofitting of buildings
- EN 1998-4 Part 4: Silos, tanks, and pipelines
- EN 1998-5 Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects
- EN 1998-6 Part 6: Towers, masts, and chimneys

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

### 3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

#### 3.1 Calcestruzzi

##### 3.1.1 Calcestruzzo utilizzato per i solai di stazione e strutture interne

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

##### 3.1.2 Calcestruzzo utilizzato per diaframmi

Tipo:	C25/30
Modulo di deformazione:	$E_c=30000$ Mpa
Resistenza caratteristica cubica:	$R_{ck}=30$ Mpa
Resistenza caratteristica cilindrica:	$f_{ck}=25$ Mpa
Peso per unità di volume:	$Y=25$ KN/m <sup>3</sup>
Classe di Esposizione	<i>XC2 (Superfici di calcestruzzo a contatto con acqua per lungo tempo / Molte fondazioni)</i>

#### 3.2 Acciai per armature in c.a.

Tipo B450C saldabile (ex FeB44K saldabile), per diametri compresi tra 6 e 40 mm:

$$f_{ynom}=450 \text{ Mpa}$$

$$f_{tnom} = 540 \text{ Mpa}$$

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

$$f_{yk} \geq f_{ynom} \text{ frattile } 5\%$$

$$f_{tk} \geq f_{tnom} \text{ frattile } 5\%$$

$$1.15 \leq (f_t/f_y) k \leq 1.35 \text{ frattile } 10\%$$

$$(f_y/f_{ynom}) k \leq 1.25 \text{ frattile } 10\%$$

$$\text{Allungamento } (A_{gt})k \geq 7.5\% \text{ frattile } 10\%$$

Reti e tralici elettrosaldati:

$$f_{yk} \geq 450 \text{ Mpa}$$

$$f_{tk} \geq 540 \text{ Mpa}$$

$$(f_{tk}/f_{yk}) \geq 1.10$$

### 3.3 Acciaio per carpenteria metallica

Tipo:	S355 J0	
	$t \leq 40\text{mm}$	$40\text{mm} < t \leq 80\text{mm}$
Modulo di deformazione:	$E_c = 210 \text{ Gpa}$	$E_c = 210\text{Gpa}$
Resistenza a snervamento caratteristica:	$f_{yk} = 355 \text{ Mpa}$	$f_{yk} = 335 \text{ Mpa}$
Resistenza a snervamento di progetto:	$f_{yd} = 338 \text{ Mpa}$	$f_{yd} = 319 \text{ Mpa}$
Resistenza a rottura caratteristica:	$f_{yk} = 510 \text{ Mpa}$	$f_{yk} = 470 \text{ Mpa}$
Peso per unità di volume:	$\gamma = 78 \text{ KN/m}^3$	$\gamma = 78 \text{ KN/m}^3$

### 3.4 GFRP

Resistenza a flessione di progetto:	$f_{yd} = 900 \text{ MPa}$
Resistenza a taglio di progetto:	$f_{yd} = 150 \text{ MPa}$
Modulo di deformazione:	$E_c = 46000 \text{ MPa}$

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Lo scavo della stazione denominata Carlo Alberto è interessato da una coltre superiore di circa 5,50 m di terreno superficiale denominato Unità 1, mentre a livelli più profondi fino ad una estensione di interesse per le opere di scavo è presente un materiale ghiaioso sabbioso denominato Unità 2 e potenzialmente le unità U5/U7, che non vengono considerate nella presente fase di progettazione, in via cautelativa, a causa del permanere di incertezze in merito alla profondità e continuità degli strati in questione.

La definizione della quota superiore dell'unità U5 nel profilo si basa su alcuni sondaggi di maggiore profondità distanti dall'area in oggetto (oltre 100m). Gli altri sondaggi eseguiti durante le diverse campagne indagini risultano meno profondi e non intercettano le unità U5/U7.

Inoltre, il limite geologico è pertanto indicato negli elaborati MTL2T1A0DGEOSCAT001 e MTL2T1A0DGEOGENTO003.5 come "limite presunto" e permane incertezza in merito alla profondità e continuità dello strato in questione.

Il criterio alla base delle assunzioni è garantire la fattibilità della soluzione considerato l'attuale livello di progettazione e la limitatezza delle informazioni. Pertanto, il progetto della stazione è basato sui profili geotecnici e le interpretazioni precedenti la campagna indagini 2021. Nella successiva fase di progettazione si potranno rivedere le soluzioni a valle di una specifica campagna indagini volta alla conferma del limite geologico della U5, con conseguente possibilità di ottimizzazioni del tampone di fondo.

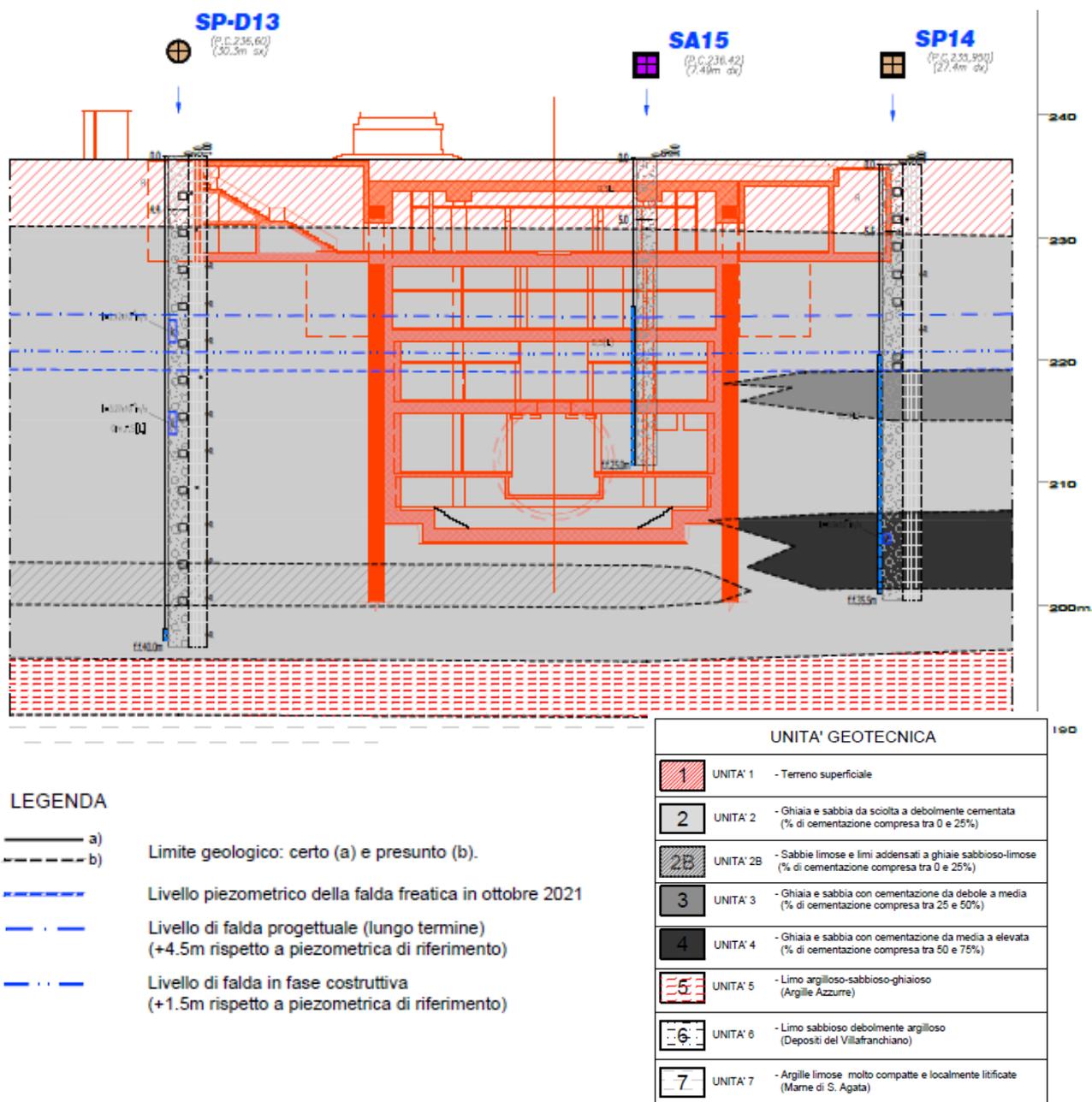


Figura 3. Stralcio stratigrafia stazione Carlo Alberto

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

I parametri geotecnici utilizzati per il presente progetto sono riportati nella seguente tabella:

**Tabella 1 Parametri geotecnici**

<b>Stratigrafia e Parametri geotecnici</b>						
<b>Unità geotecnica</b>	<b>Z da p.c</b>	<b><math>\gamma</math></b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>c</b>	<b>Ev</b>	<b>v</b>
	[m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[kPa]	[Mpa]	[-]
<b>U1</b> (Terreno superficiale)	0 a -5,5	19	29	0	15	0,3
<b>U2</b> (Ghiaie e sabbie)	-5,5 a -36	19	36	10	150	0,3
<b>U5</b> (Argille azzurre)	>-36	20	23	40	65	0,3

I parametri utilizzati per la modellazione delle colonne di Jet grouting costituenti il tampone di fondo sono riassunti nella seguente tabella:

**Tabella 2 Parametri colonne Jet grouting**

<b>Parametri JG</b>					
<b><math>\gamma</math></b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>c</b>	<b>UCS</b>	<b>E</b>	<b>v</b>
[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[-]
22	36	150	590	450	0,3

Il livello della falda considerato è distinto per condizioni di breve periodo e lungo periodo considerando il livello di piano campagna è pari a:

**Tabella 3 Livelli di falda**

	m da p.c.	m.s.l.m
Livello piezometrico 2021 (MTL2T1A0DGEOSCAT001)	-17.0	+218.95
Livello piezometrico 2018	-16.5	+219.45
B T (+1.5 da livello piezometrico di riferimento) - Fase costruttiva	-15.0	+220.95
L T (+3 da breve termine) - Ultimo stage	-12.0	+223.95

Il livello di falda utilizzato per le analisi corrisponde ai dati del 2018, che rispetto alle letture estratte nel 2021, presentano condizioni più sfavorevoli.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 5. PRINCIPALI ASSUNZIONI DELLA PROGETTAZIONE

### 5.1 Caratterizzazione sismica

Secondo quanto prescritto dal D.M. 17 gennaio 2018, ai fini delle verifiche di sicurezza delle strutture devono essere definiti i seguenti parametri:

- Vita nominale dell'opera: intesa come il numero di anni nei quali la struttura deve poter essere utilizzata per lo scopo al quale è stata destinata senza necessita di manutenzioni. Per l'opera oggetto di questo elaborato si considera una vita nominale  $V_N=100$  anni;
- Classe d'uso: in presenza di azioni sismiche, in relazione alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi  $z < d'uso$ . Nel caso in esame si fa riferimento alla classe d'uso III (coefficiente pari a 1.5);
- Periodo di riferimento per l'azione sismica: viene definito come il prodotto tra la vita nominale ed il coefficiente d'uso. Per il caso in esame il periodo di riferimento è di 150 anni.

A partire dalla posizione sul territorio nazionale dell'opera, e in dipendenza dei parametri su descritti, vengono definiti i parametri sismici necessari per le verifiche:

- *Vita nominale dell'opera ( $V_N$ )*: nel caso delle stazioni è di **100 anni**;
- *Classe d'uso ( $C_u$ )*: In caso di costruzioni che prevedono affollamenti significativi **la classe è III**, a cui è associato un coefficiente di 1.5;
- *Periodo di riferimento ( $V_R$ )*: prodotto tra la vita nominale e la classe d'uso ed è pari a **150 anni**.
- *Periodo di ritorno ( $T_R$ )*:  $T_R = -V_R / \ln(1-P_{VR})$ , considerando  $P_{VR}$  la probabilità di superamento nel periodo di riferimento e considerando la condizione SLV, ovvero lo stato limite di salvaguardia della vita.

**Tabella 4 Probabilità di superamento PVR con SLV**

<b>VN</b>	<b>Cu</b>	<b>VR</b>	<b>PVR</b>	<b>TR</b>
<b>[anni]</b>	-	<b>[anni]</b>	-	<b>[anni]</b>
100	1.5	150	10%	1424

In relazione al tempo di ritorno e alla probabilità di superamento dello stato limite considerato è possibile dedurre i parametri di accelerazione massima ( $a_g$ ) e i parametri spettrali ( $F_0, T^*c$ ).

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

**Tabella 5 Parametri sismici del sito**

<b>Stazione</b>	<b>ag</b>	<b>F0</b>	<b>T*c</b>
	<b>[g]</b>	-	<b>[sec]</b>
CARLO ALBERTO	0.067	2.890	0.292

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

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

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

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

## 5.2 Combinazioni di carico

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

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

A seconda della verifica che si intende effettuare, verranno utilizzati coefficienti che riducono i parametri meccanici di resistenza del terreno o coefficienti che amplificano gli effetti delle azioni.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

In particolare, sono stati considerati i seguenti coefficienti per le verifiche:

**Tabella 6 Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I)**

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

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

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

**Tabella 7 Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (Tab. 6.2.II)**

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

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

**Tabella 8 Coefficienti parziali per le verifiche agli stati limite ultimi STR e GEO di muri di sostegno (Tab. 6.5.I)**

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

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

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

### 5.3 Criteri della modellazione numerica

La modellazione numerica viene effettuata con il software bidimensionale agli elementi finiti Plaxis 2D, che permette la simulazione dell'interazione terreno-struttura, delle fasi costruttive e del comportamento non lineare del terreno durante le sequenze di scavo.

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

Tutte le strutture sono state modellate mediante elementi già implementati nella libreria del software. Si è utilizzato:

- per i diaframmi: elementi "plate"
- per le solette: elementi "plate" (vincolate con cerniera ai diaframmi)
- per le barrette: elementi "plate";
- per puntoni temporanei: elementi "Fixed End Anchor"

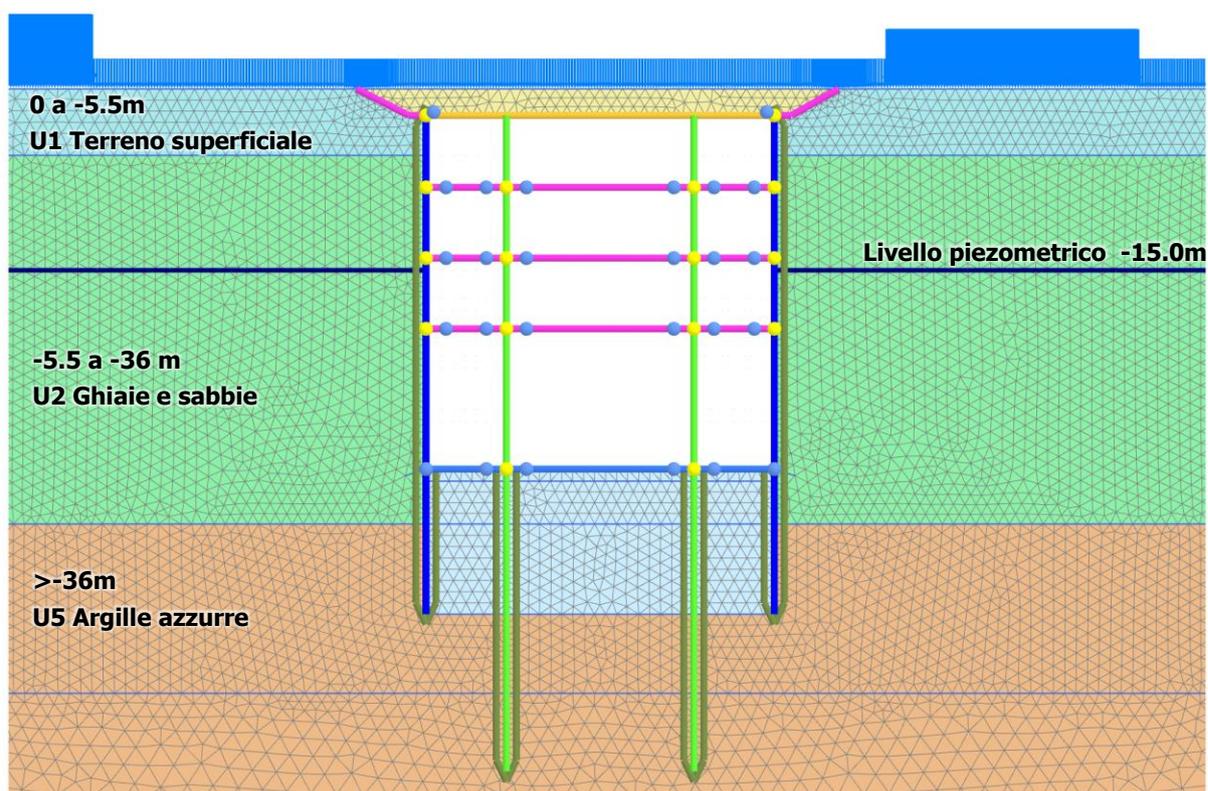
Attraverso l'analisi numerica si intende simulare il percorso delle tensioni e delle deformazioni nel terreno conseguente allo scavo. La condizione geostatica è stata inizializzata ipotizzando un coefficiente di spinta a riposo  $K_0$  ottenuto attraverso la relazione di Jaky:

$$k_0 = 1 - \text{sen}\varphi'$$

Per il terreno è stato considerato il modello costitutivo elasto-plastico tipo "Mohr Coulomb".

#### 5.3.1 Geometria del modello numerico

Il modello geometrico è mostrato nella figura seguente e deriva definizione della geometria della sezione considerata in termini di configurazione delle strutture della stazione e delle condizioni geologiche considerate.


**Figura 4. Sezione di calcolo**

La geometria delle sezioni considerate è generata a partire dalle distanze asse-asse ed è la seguente:

Elemento	Z [m]
Quota piano campagna	0,00
Soletta di copertura	-1.8
Soletta intermedia 1	-7.77
Soletta intermedia 2	-14
Soletta intermedia 3	-19.85
Soletta di base	-31.55
Piede paratia	-43.55
Piede king post	-56.45

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

### 5.3.2 Elementi strutturali

La modellazione degli elementi strutturali è stata effettuata tramite l'utilizzo di elementi plate la cui rigidezza è stata valutata per metro lineare. Per gli elementi quali le barrette temporanee e i micropali, caratterizzati da una spaziatura nel piano ortogonale alla sezione di analisi, la rigidezza assiale e flessionale equivalente al metro lineare è stata valutata in accordo con le seguenti relazioni:

$$EA_{Eq.} = \frac{EA}{i}$$

$$EI_{Eq.} = \frac{EI}{i}$$

I parametri utilizzati nel modello FEM per gli elementi strutturali sono riportati nelle tabelle di seguito.

**Tabella 9 Parametri input elementi strutturali**

<b>Paratia H=120 cm</b>		
EA	37,20E+6	kN/m
EI	4,46E+6	kNm <sup>2</sup> /m

<b>King post 280 x 120 cm</b>		
EA	7,760E+6	kN/m
EI	932,0E+3	kNm <sup>2</sup> /m

<b>Soletta di copertura H=80 cm</b>		
EA	25,60E+6	kN/m
EI	1,36E+6	kNm <sup>2</sup> /m

<b>Soletta intermedia H=100 cm</b>		
EA	32,00E+6	kN/m
EI	2,670E+6	kNm <sup>2</sup> /m

<b>Soletta di base H<sub>media</sub>=210 cm</b>		
EA	69,00E+6	kN/m
EI	25,40E+6	kNm <sup>2</sup> /m

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

### 5.3.3 Carichi

#### 5.3.3.1 Carichi superficiali

La definizione dei carichi distribuiti e puntuali inseriti nel modello è avvenuta in considerazione delle particolari condizioni di carico peculiari della sezione considerata, come la presenza di edifici in adiacenza al manufatto di stazione.

**Tabella 10 Carichi superficiali**

<i><b>Posizione nel modello</b></i>	<i><b>Entità del carico</b></i>	<i><b>Estensione</b></i>
Destra	40 kPa	20,5m
Sinistra	50 kPa	33 m
Destra/Sinistra (ad esclusione della zona maggiorata)	20 kPa	Tutta la superficie
Soletta superficiale	20 kPa	Zona soletta

A tale riguardo non essendo nota la quota di imposta del piano di fondazione di tali strutture, a favore di sicurezza si è ritenuto di trascurare la presenza dei piani interrati essendo il peso di volume del terreno maggiore del carico relativo al solaio interrato.

Riguardo l'entità del riempimento della soletta di copertura si è tenuto in conto lo spessore del ricoprimento di progetto incrementato di ulteriori 0,50 m.

#### 5.3.3.2 Azione sismica

L'azione sismica valutata secondo il metodo di Wood (1973), che fornisce la sovrappinta sismica del terreno su una parete interrata.

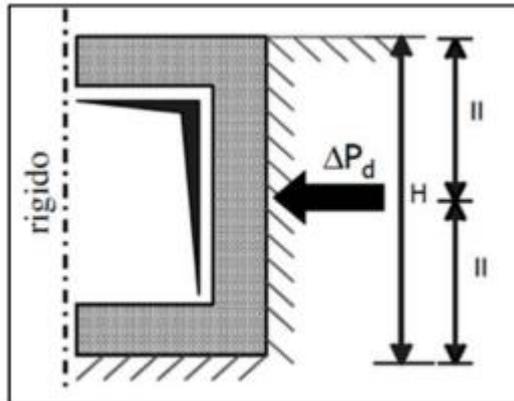


Figura 5. Schematizzazione metodo di Wood

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

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

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

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

L'impatto dell'azione sismica viene valutata per una condizione di carico di lungo periodo in cui sono presenti le fodere interne della struttura alle quali è affidata la spinta idrostatica della falda. Pertanto, la paratia è scaricata della spinta dell'acqua e l'azione sismica è ripartita tra la paratia e le fodere interne secondo la relazione:

$$p_{paratia} = P_{Tot} \frac{I_{paratia}}{I_{paratia} + I_{fodera}}$$

$$p_{Fodera} = P_{Tot} \frac{I_{Fodera}}{I_{paratia} + I_{fodera}}$$

L'entità dell'azione sismica applicata al modello numerico è riportata nel seguito.

**Tabella 11 Parametri input azione sismica**

Calcolo spinta sismica da applicare al modello numerico			
$\gamma_t$	=	19,5	kN/mc
H	=	31,45	m
$a_g$	=	0,067	
$S_s$	=	1,2	
$S_T$	=	1	
$a_{max}$	=	0,0804	
$\alpha$	=	1,0	
$\beta$	=	1,0	
$k_h$	=	0,0804	
$P_{ground}$	=	49,31	kPa
$P_{ground\ su\ paratia}$	=	38,04	kPa
<b>Paratia</b>			
Profondità sopra fondo scavo	=	31,45	m
B	=	1000	mm
H	=	1200	mm
$I_1$	=	1, E+11	mm <sup>4</sup>
<b>Fodera</b>			
B	=	1000	mm
H	=	800	mm
$I_2$	=	4, E+10	mm <sup>4</sup>
$I_{tot}$	=	2, E+11	mm <sup>4</sup>
W paratia	=	943,5	kN
P paratia	=	2,412	kPa
<b>P tot</b>	=	<b>40,45</b>	<b>kPa</b>

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Nella tabella seguente vengono riassunti i carichi applicati al modello.

**Tabella 12 Parametri input azione sismica**

<b>Tipologia carico</b>	<b>Valore</b>	
Peso strutture in calcestruzzo	25	kN/m <sup>3</sup>
Sovraccarico superficiale	20	kPa
Carico edifici	10	kPa/piano
Spinta sismica sulla paratia	40.45	kPa



## 6. ANALISI NUMERICHE

Le analisi numeriche sono condotte seguendo le assunzioni indicate nel capitolo precedente. La sezione ritenuta rappresentativa delle condizioni geotecniche e strutturali del corpo stazione è indicata nella figura di seguito.

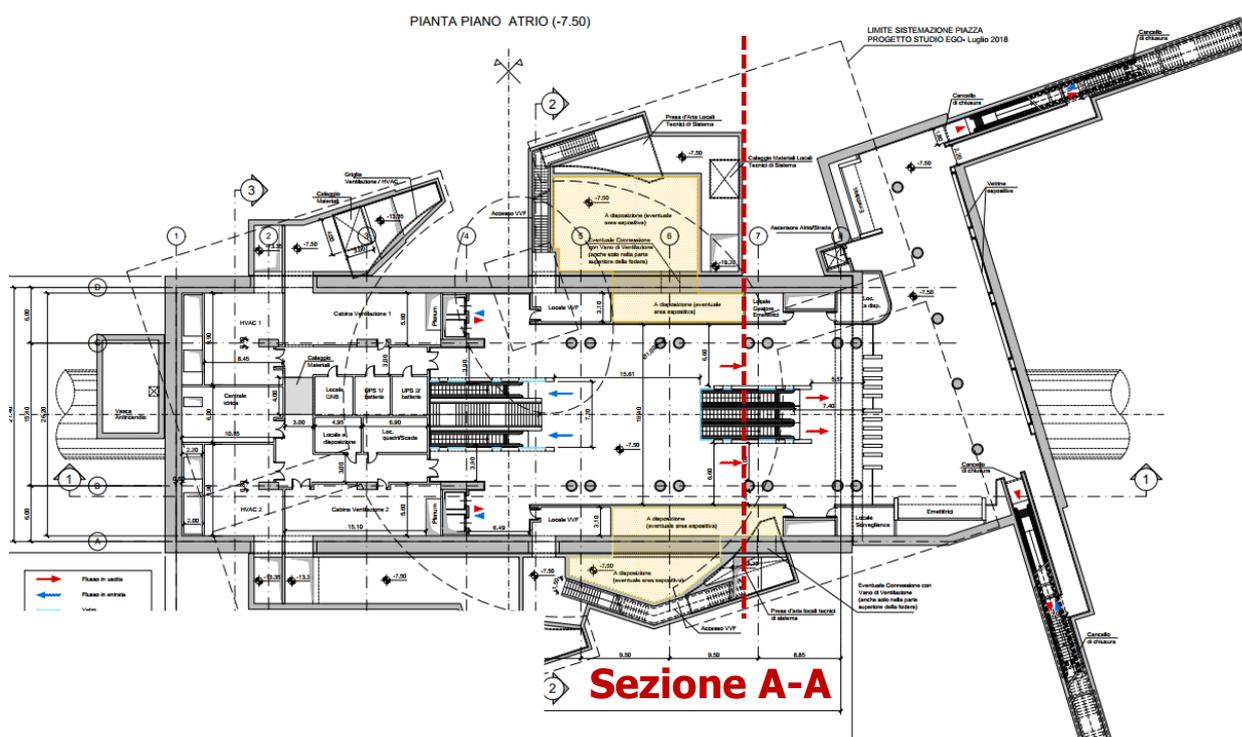


Figura 6. Stralcio planimetria stazione Carlo Alberto con indicazione della sezione di calcolo A-A

### 6.1 Fasi di calcolo modello geotecnico

La modellazione numerica dello scavo con paratie puntonate viene effettuata seguendo differenti fasi di calcolo, ciascuna rappresentativa delle fasi costruttive dell'opera. Tale procedimento si rende necessario in quanto in un'analisi FEM in cui il comportamento del terreno è assunto essere di tipo elastoplastico, la risposta del mezzo in termini tensionali e deformativi è influenzata dalla storia tensionale che subisce e pertanto è importante tenere in considerazione le configurazioni precedenti. Le fasi di calcolo considerate sono riportate nella seguente tabella e nelle successive figure.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

**Tabella 13 Fasi di calcolo**

Fase di calcolo	Descrizione
Fase 1	Definizione delle condizioni geostatiche ed idrostatiche
Fase 2	Definizione dei carichi superficiali accidentali e permanenti
Fase 3	Scavo fino a quota intradosso solaio di copertura
Fase 4	Realizzazione tampone di fondo ed installazione diaframmi e king post
Fase 5	Realizzazione del solaio di copertura
Fase 6	Prima fase di scavo
Fase 7	Ripristino delle condizioni al di sopra della soletta di copertura
Fase 8	Scavo fino a quota della prima soletta intermedia ed abbassamento del livello piezometrico all'interno dello scavo
Fase 9	Installazione prima soletta intermedia
Fase 10	Scavo fino a quota della seconda soletta intermedia ed abbassamento del livello piezometrico all'interno dello scavo
Fase 11	Installazione seconda soletta intermedia
Fase 12	Scavo fino a quota primo livello puntoni
Fase 13	Installazione primo livello puntoni
Fase 14	Scavo fino a quota secondo livello puntoni
Fase 15	Installazione secondo livello puntoni
Fase 16	Scavo fino a quota terzo livello puntoni
Fase 17	Installazione terzo livello puntoni
Fase 18	Scavo fino a quota scavo finale
Fase 19	Installazione soletta di base



CITTA' DI TORINO

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

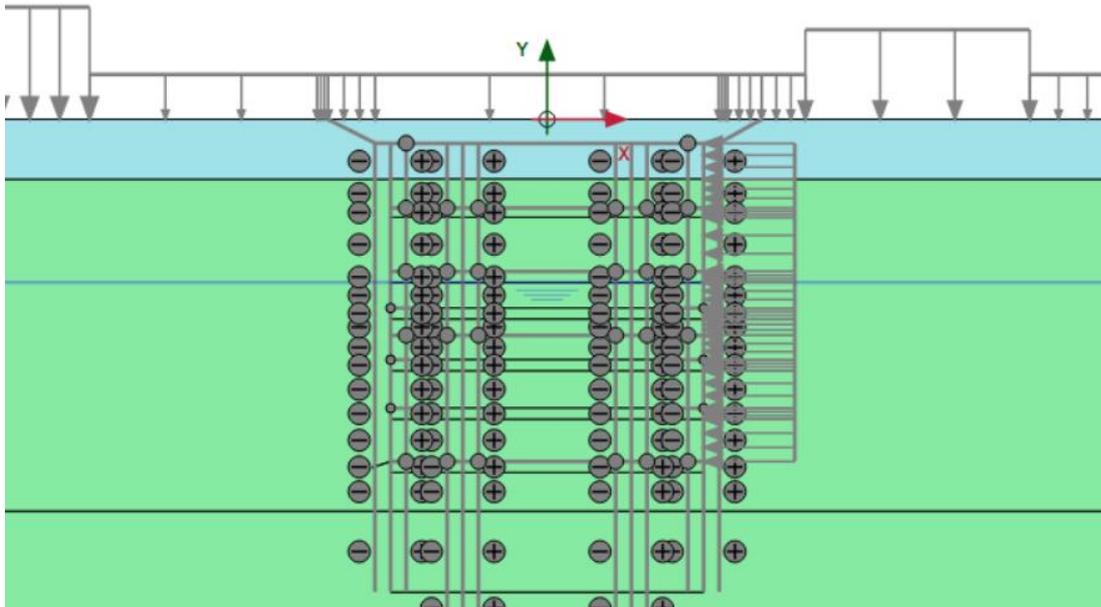
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

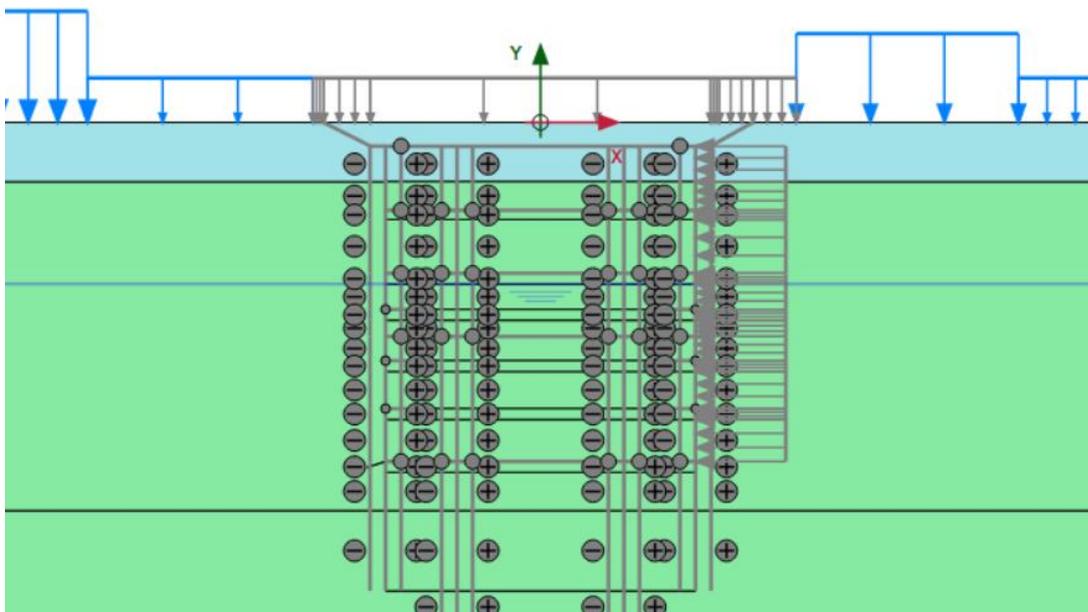
Fase 20	Ripristino delle condizioni idrauliche
Fase 21	Rimozione livello puntoni due e tre
Fase 22	Installazione terza soletta intermedia
Fase 23	Rimozione primo livello di puntoni
Fase 24	Condizioni di carico di lungo termine – riduzione delle pressioni idrostatiche agenti sulla paratia, e rimozione proprietà meccaniche tampone di fondo e ripristino condizioni iniziali
Fase 25	Applicazione dell'azione sismica
Fase 26	Ricerca del fattore di sicurezza di lungo periodo
Fase 27	Valutazione della deformabilità a lungo termine a SLE



Fase 1 – Condizioni iniziali

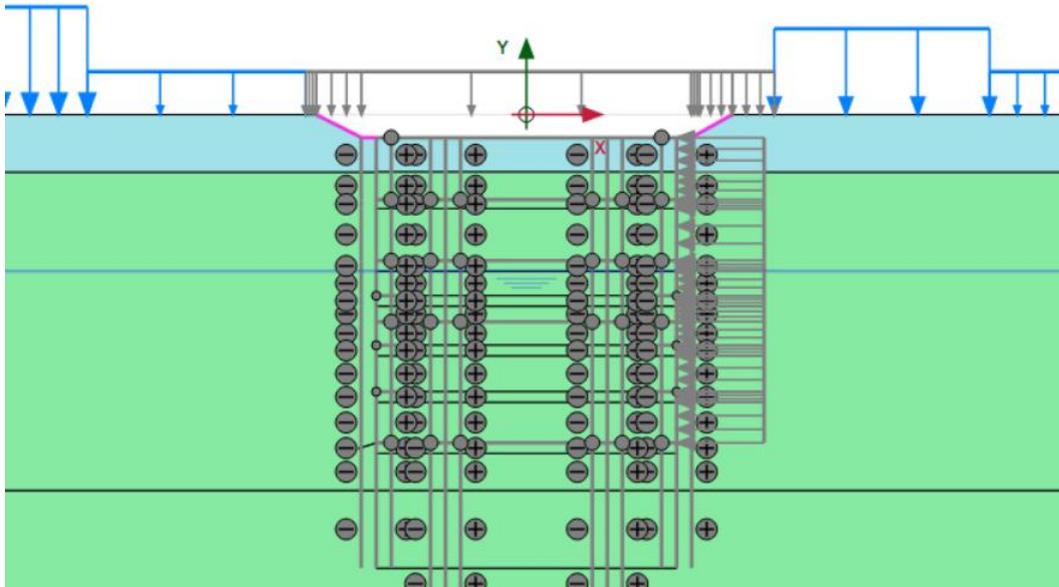


Fase 2 – Applicazione dei carichi superficiali

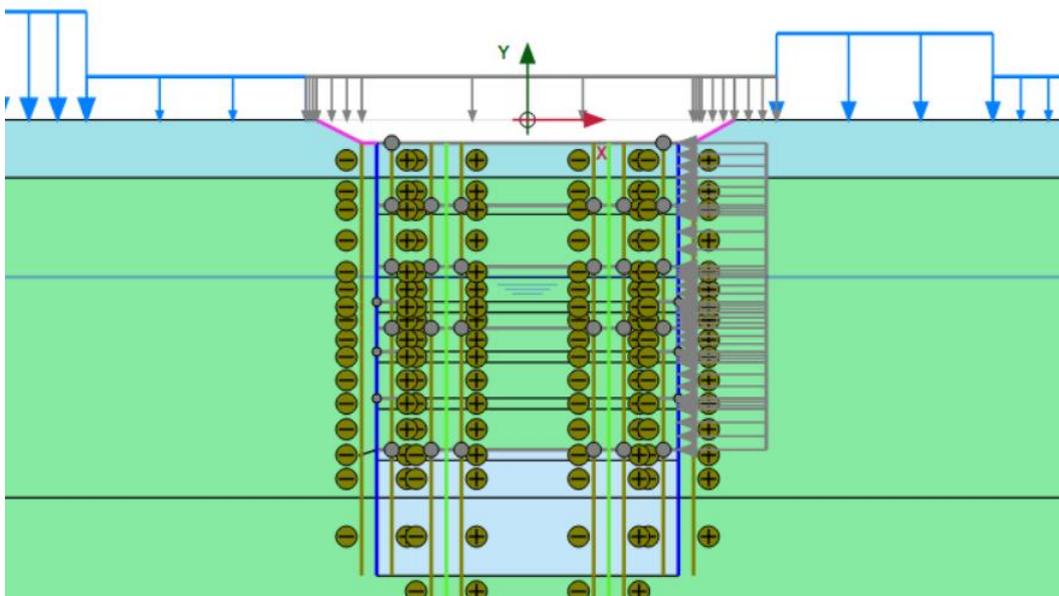




Fase 3 – Scavo fino a quota intradosso copertura

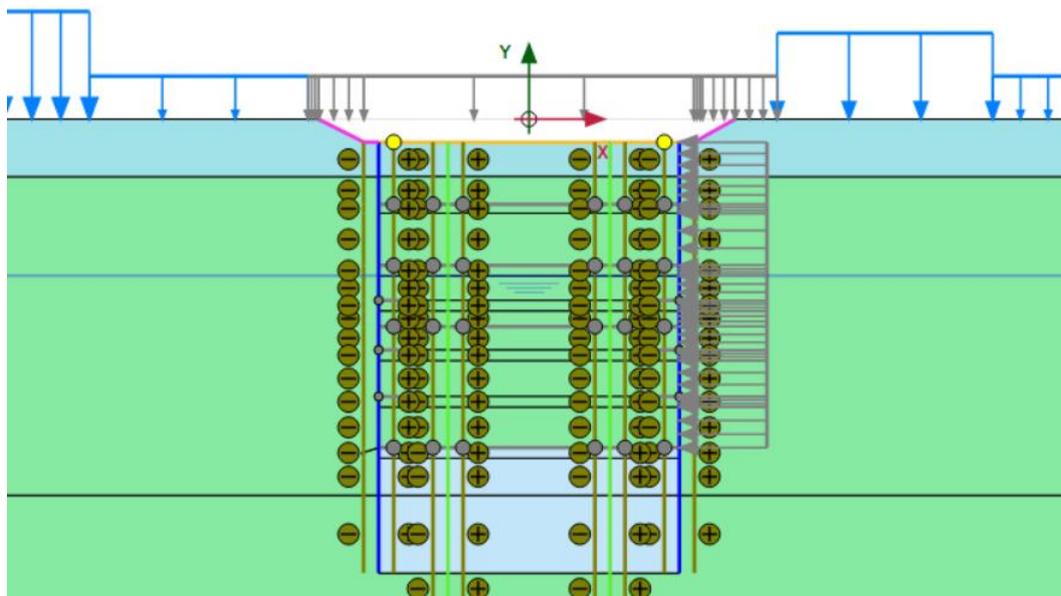


Fase 4 – Installazione diaframmi, king post e tamponi di fondo

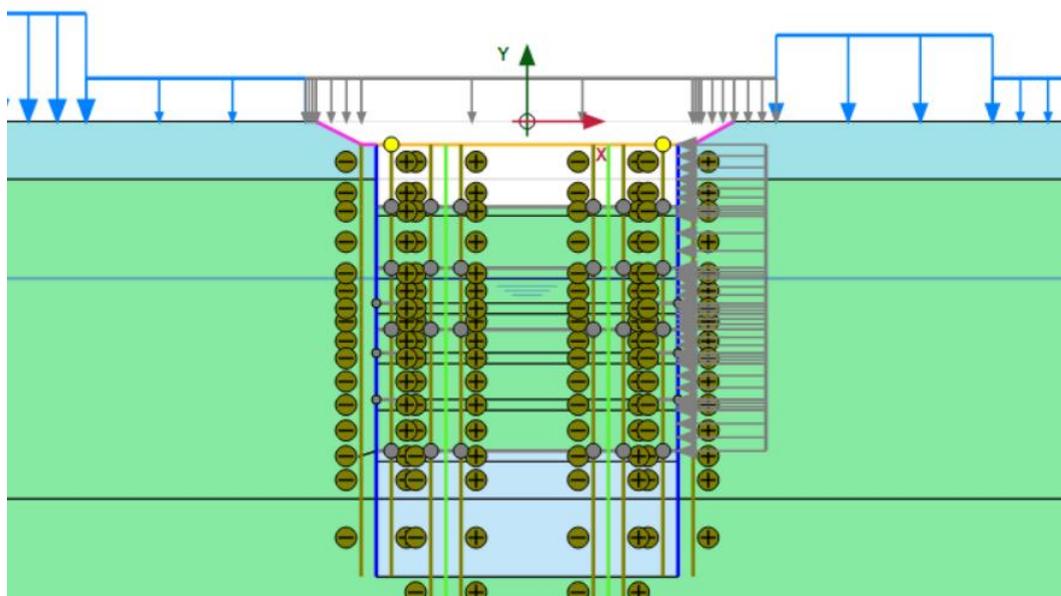




Fase 5 – Installazione soletta di copertura

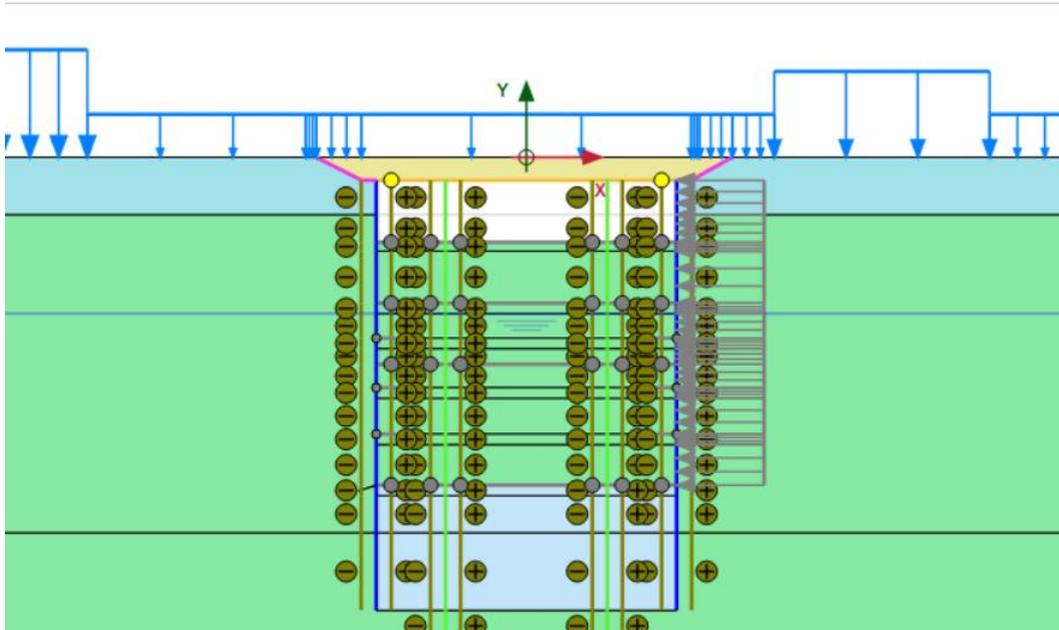


Fase 6 – Prima fase di scavo e installazione soletta di copertura

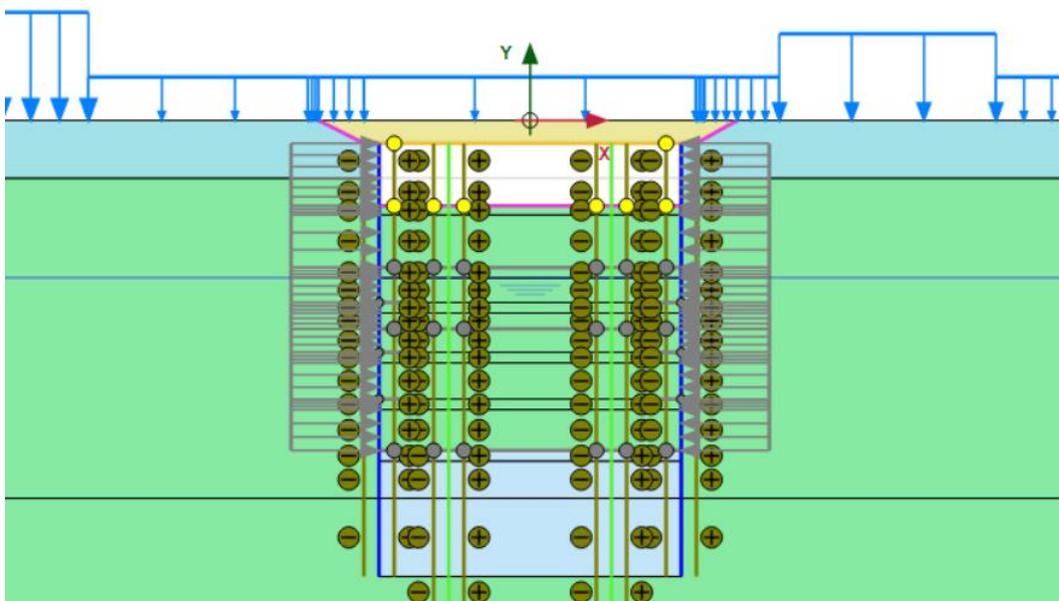




Fase 7 – Ripristino delle condizioni in superficie

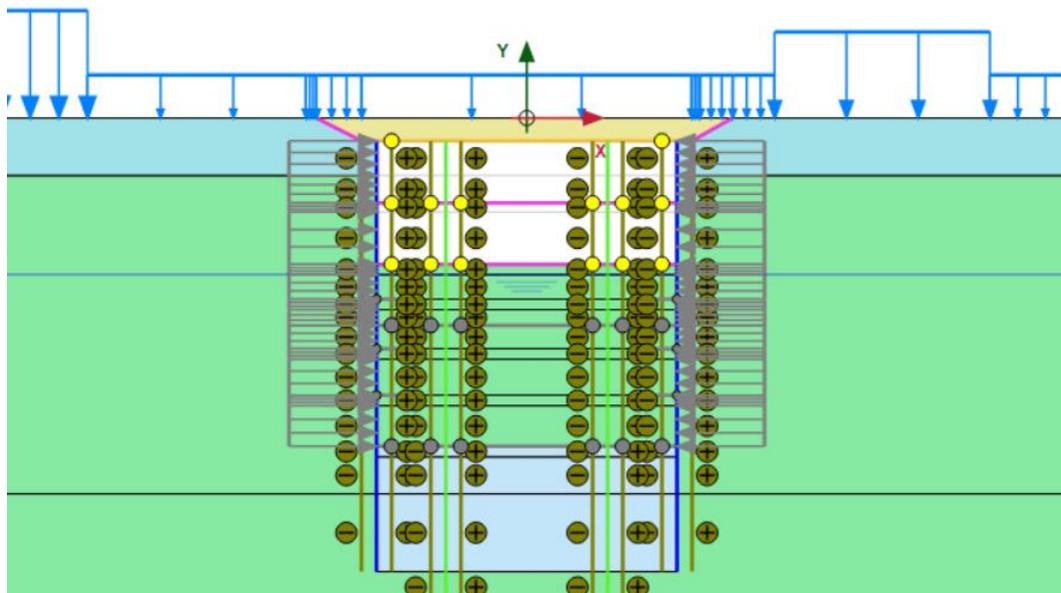


Fase 8-9 – Installazione prima soletta intermedia

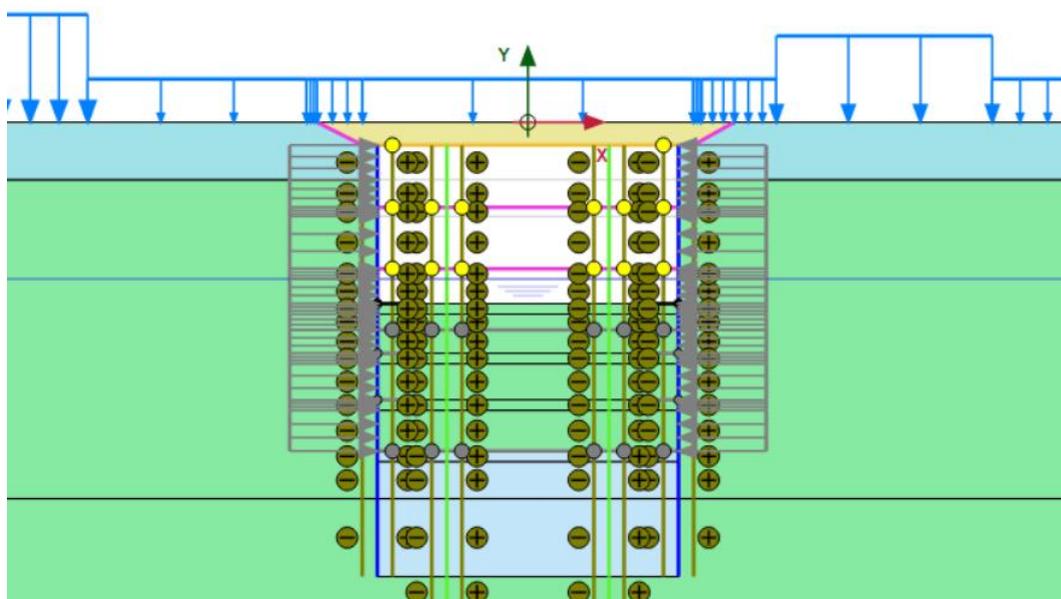




Fase 10-11 – Seconda fase di scavo ed installazione seconda soletta intermedia

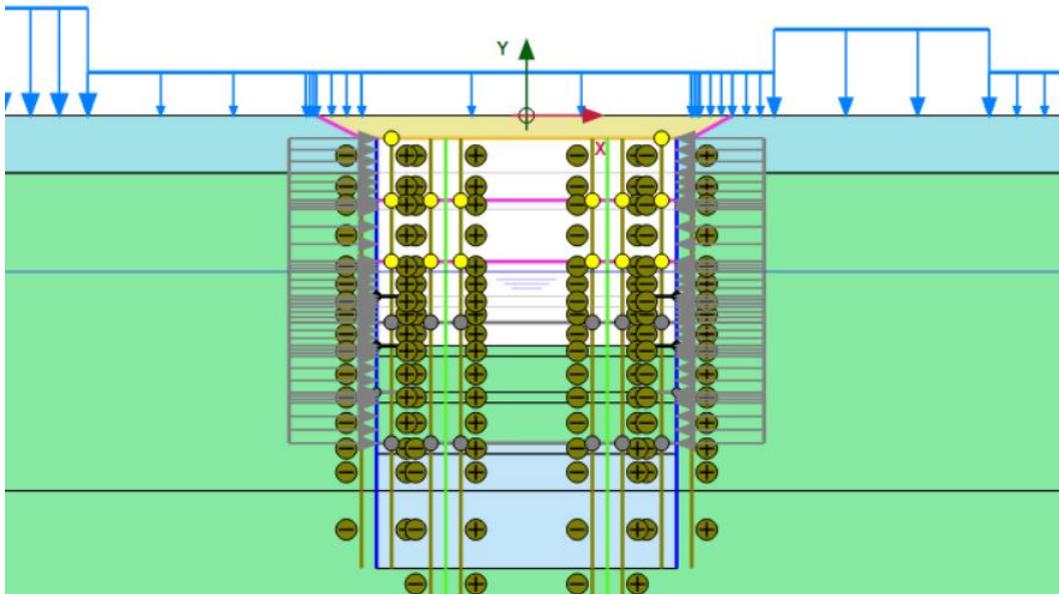


Fase 12-13 – Terza fase di scavo ed installazione primo livello di puntoni

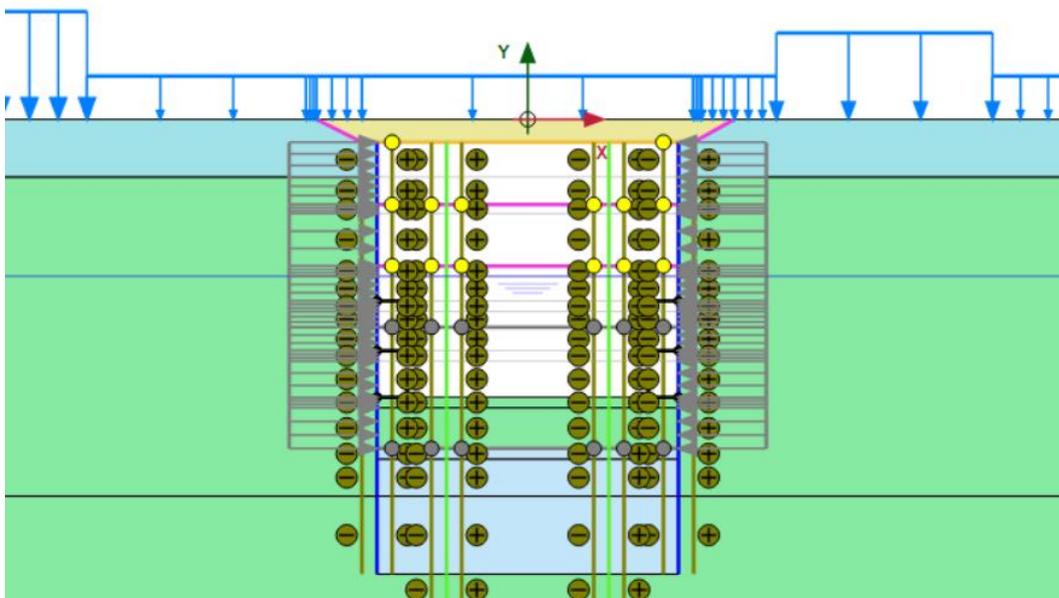




Fase 14-15 – Quarta fase di scavo ed installazione secondo livello di puntoni

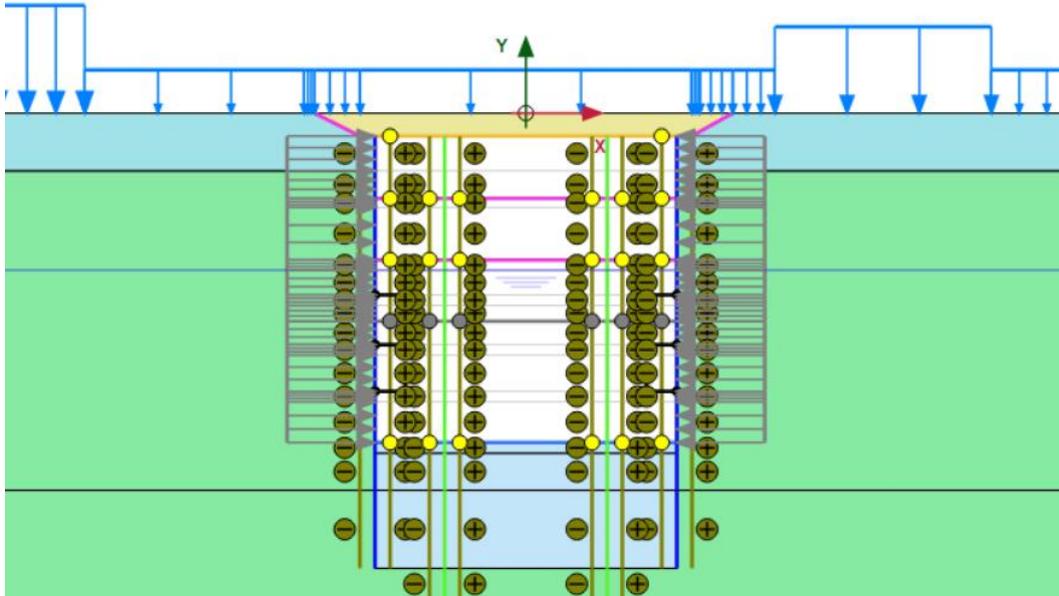


Fase 16-17 – Quarta fase di scavo ed installazione terzo livello di puntoni

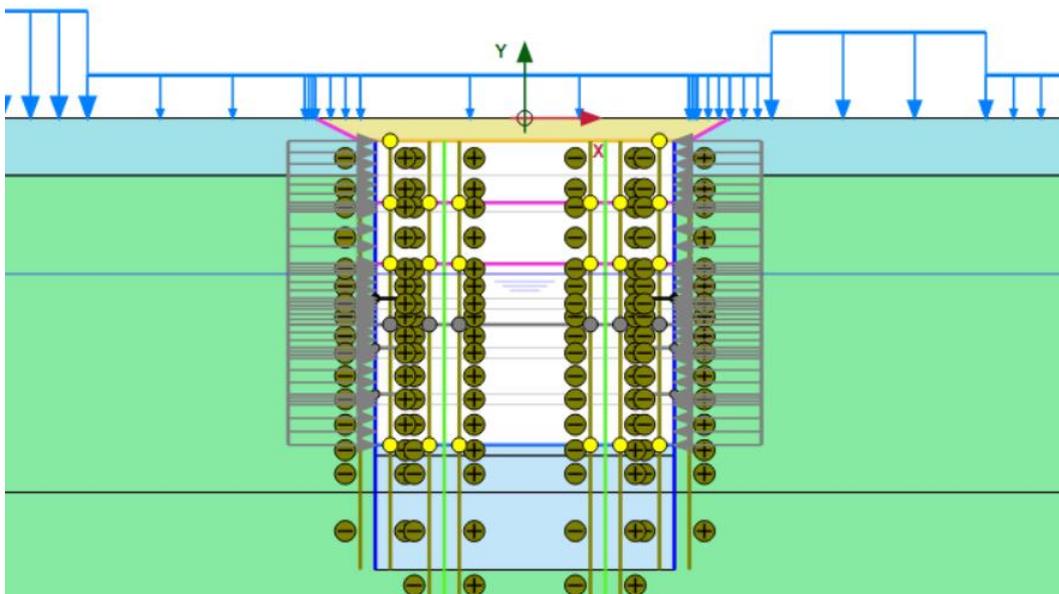




Fase 18-19 – Fase finale di scavo di scavo ed installazione soletta di fondo

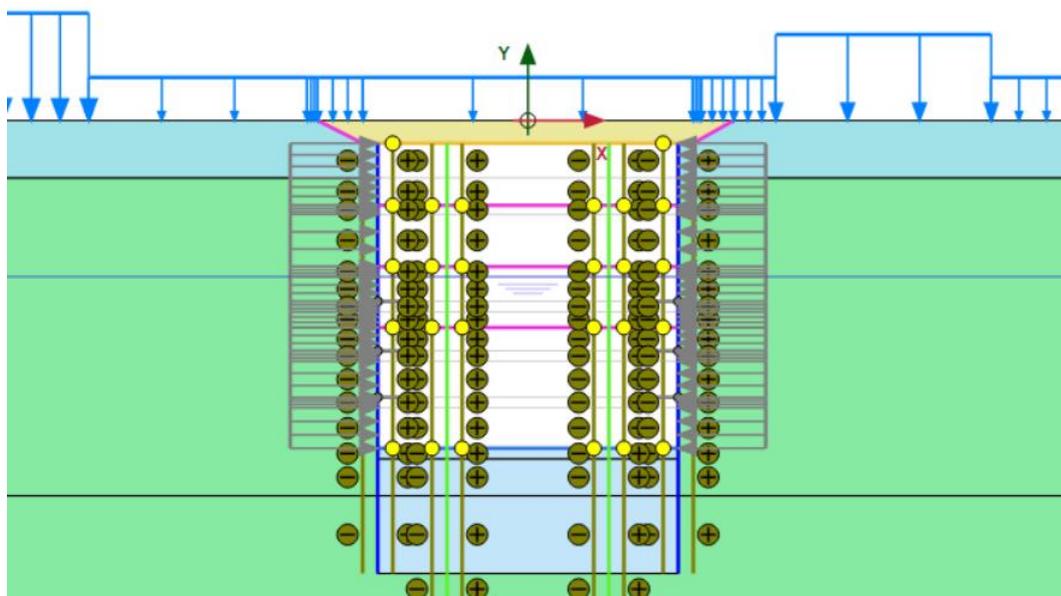


Fase 21 – Rimozione secondo e terzo livello puntoni





Fase 22 – Installazione terza soletta intermedia e rimozione primo livello puntoni



Fase 25 – Ripristino condizioni di lungo termine ed applicazione dell'azione sismica

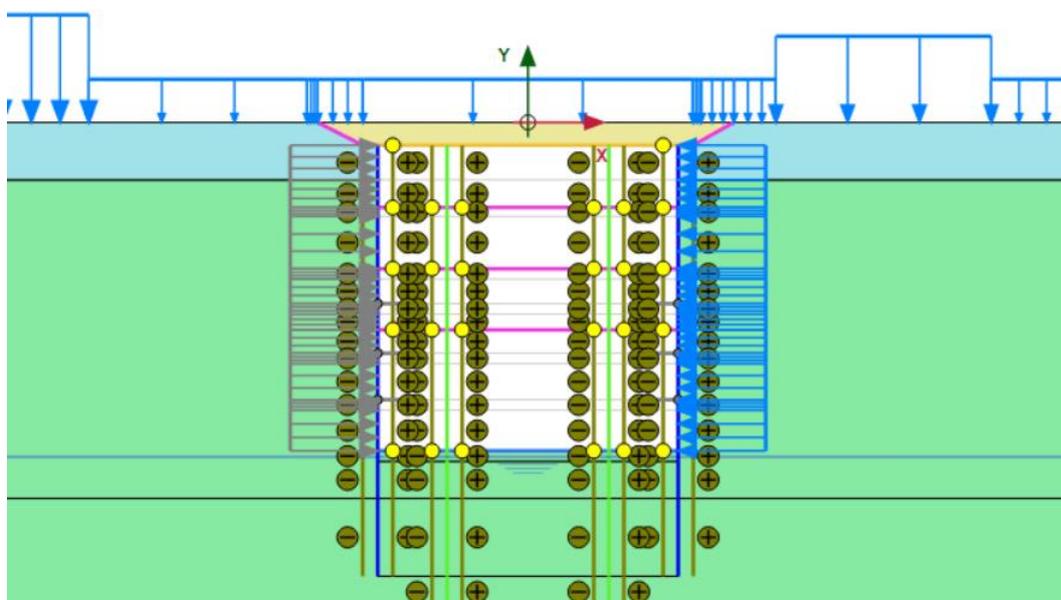
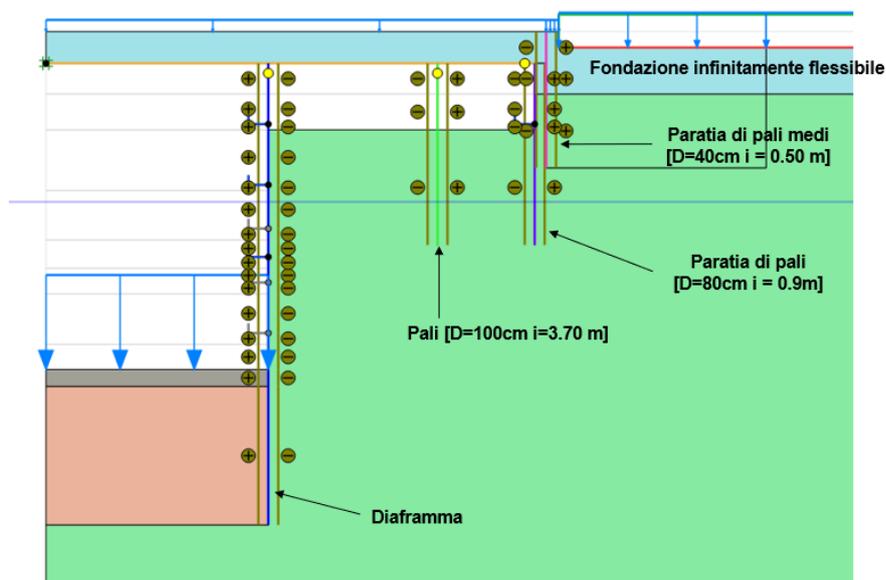


Figura 7. Fasi di calcolo modello geotecnico



Di seguito viene riportata la geometria del modello numerico dell'accesso speciale che verrà realizzato contestualmente al corpo stazione.



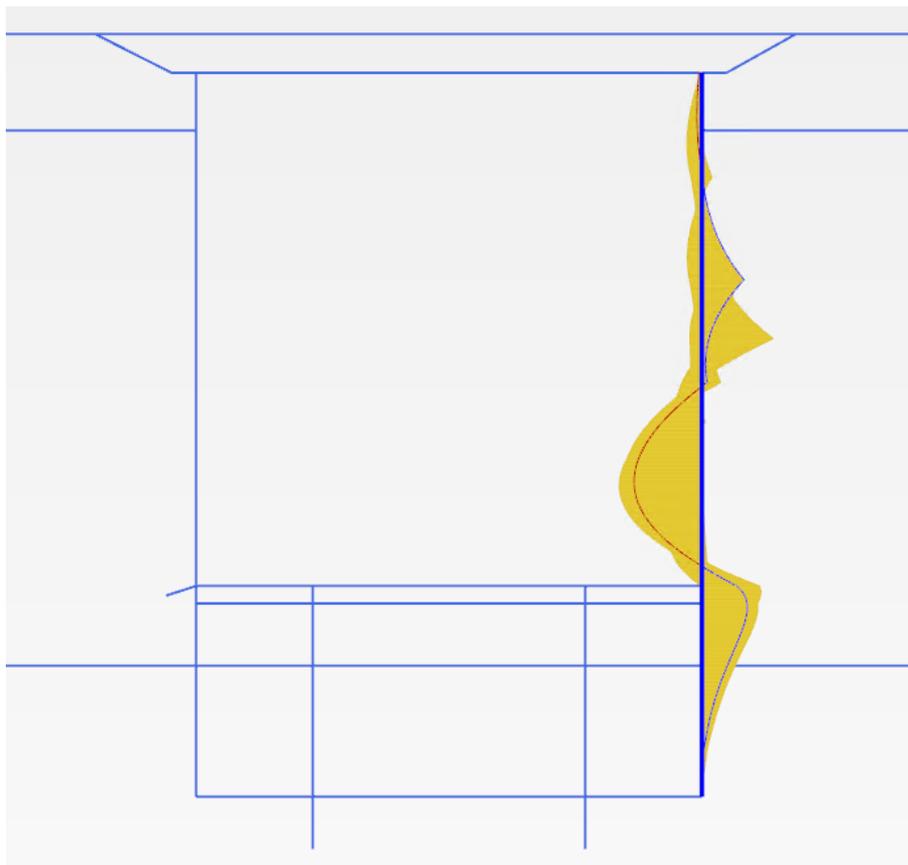
**Figura 8. Modello numerico Plaxis – Accesso speciale.**

Per maggiori dettagli relativi al modello numerico dell'accesso speciale si rimanda a MTL2T1A2DPRCSCAR001 e in MTL2T1A2DSTRSCAR003.



## 6.1 Output

### 6.1.1 Sollecitazioni paratia

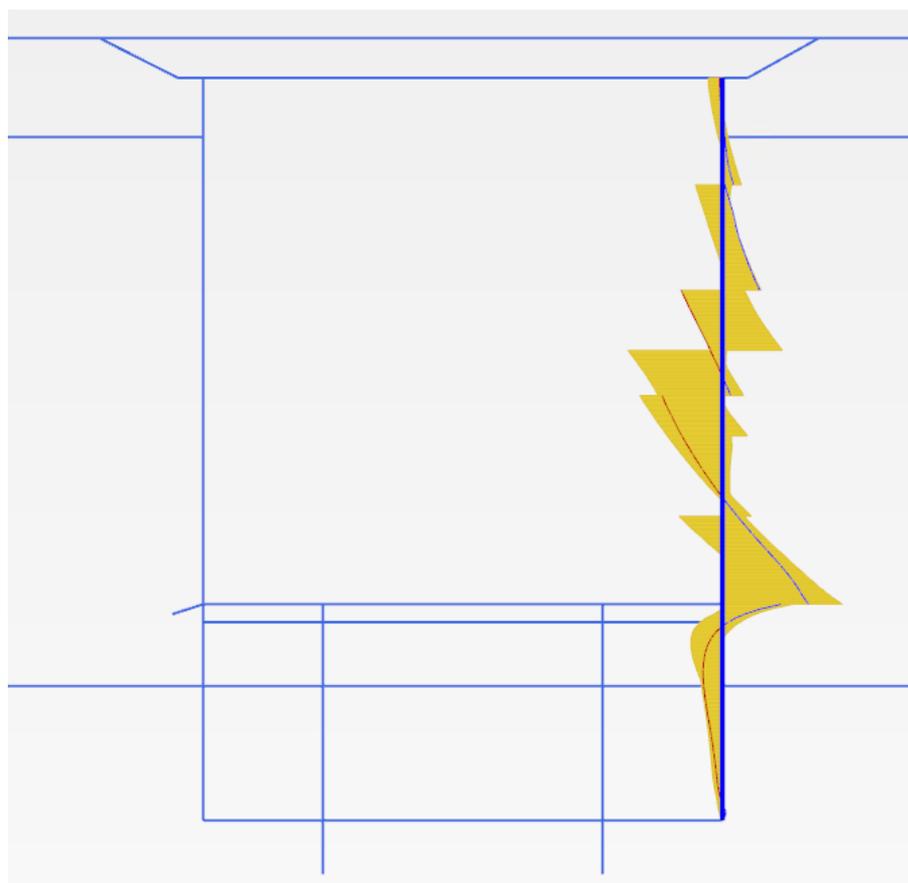


**Envelope of Bending moments M (scaled up  $2,00 \cdot 10^{-3}$  times)**

Maximum value = 2010 kN m/m (Element 189 at Node 50135)

Minimum value = -2337 kN m/m

**Figura 9. Diaframma - SLE Momento flettente - Involuppo**



**Envelope of Shear forces Q (scaled up  $5,00 \cdot 10^{-3}$  times)**

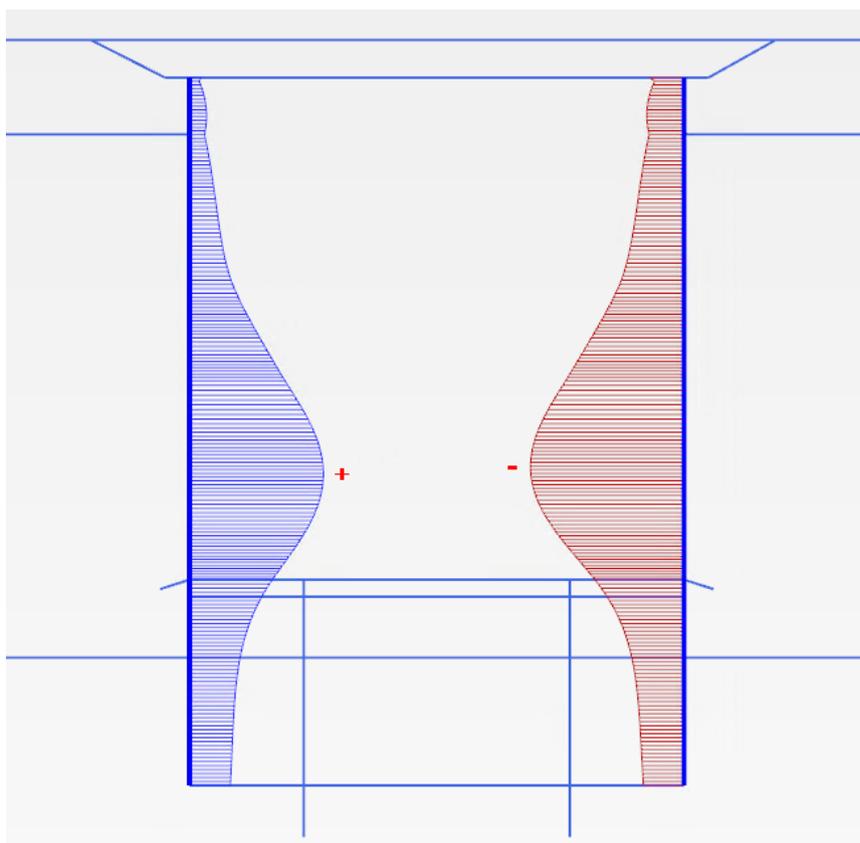
Maximum value = 1323 kN/m (Element 278 at Node 52701)

Minimum value = -1041 kN/m

**Figura 10. Diaframma - SLE Diagramma taglio - Involuppo**



### 6.1.2 Spostamenti paratia



**Total displacements  $u_x$  (scaled up 500 times)**

Maximum value = 0,01549 m (Element 243 at Node 29485)

Minimum value = -0,01776 m (Element 254 at Node 52155)

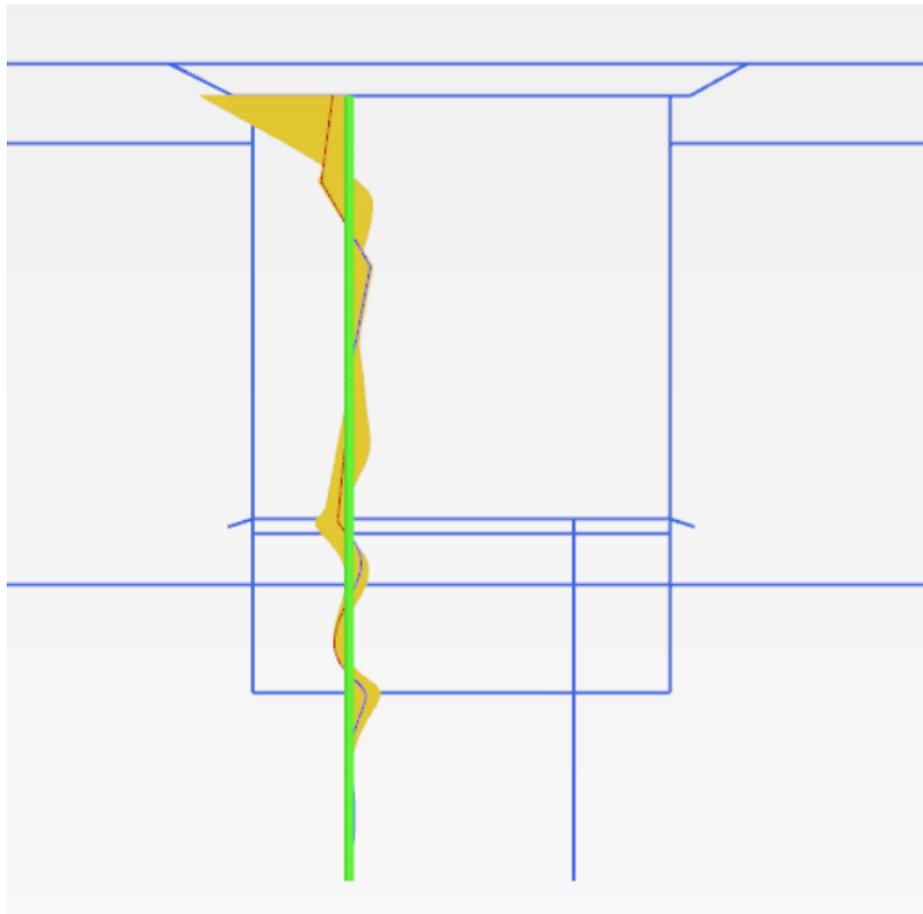
Figura 11. Diaframma - SLE Diagramma degli spostamenti orizzontali fase 22

Tabella 14 Sollecitazioni paratia

	Paratia SLE	Paratia SLU
$M_{max}$ [kNm/m]	2010	2814
$M_{min}$ [kNm/m]	-2337	-3272
$T_{max}$ [kN/m]	1323	1852
$T_{min}$ [kN/m]	-1041	-1457
Spostamento max [mm]	17,76	-



### 6.1.3 Sollecitazioni barrette temporanee

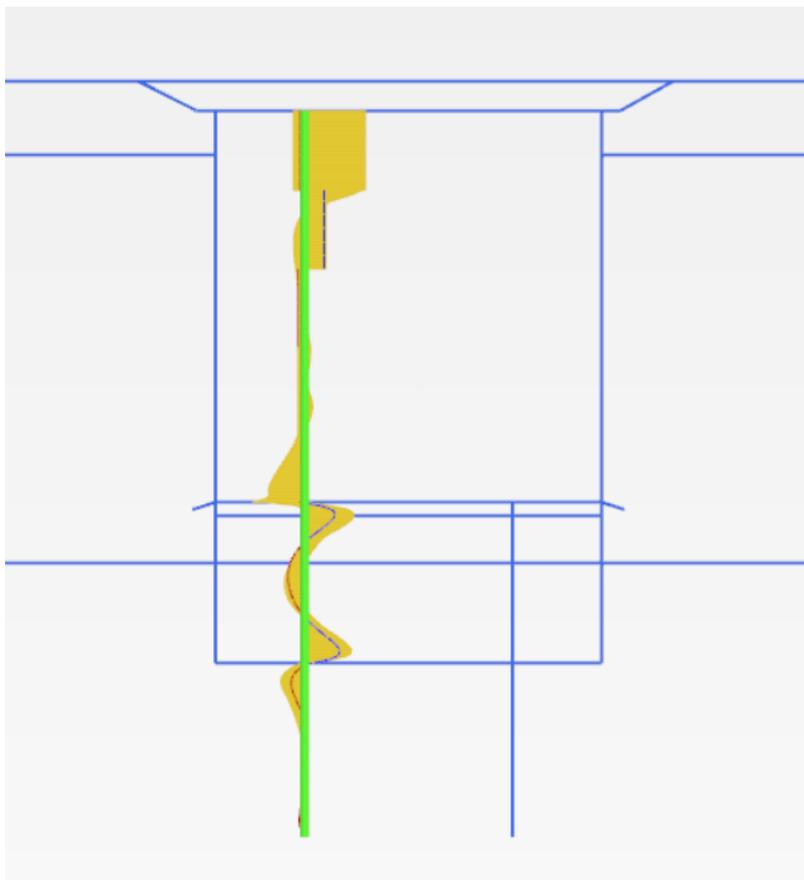


**Envelope of Bending moments M (scaled up 0,0200 times)**

Maximum value = 104,9 kN m/m (Element 347 at Node 60032)

Minimum value = -510,7 kN m/m

**Figura 12. Barrette - Momento flettente - Involuppo**



**Envelope of Shear forces Q (scaled up 0,0500 times)**

Maximum value = 90,09 kN/m (Element 61 at Node 5634)

Minimum value = -77,01 kN/m

**Figura 13. Barrette – Digramma taglio – Inviluppo**

**Tabella 15 Sollecitazioni barretta**

	<b>Barretta</b>
$M_{max}$ [kNm/m]	105
$M_{min}$ [kNm/m]	-511
$T_{max}$ [kN/m]	90
$T_{min}$ [kN/m]	-77

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 7. VERIFICHE STRUTTURALI

Le fasi costruttive prevederanno la realizzazione di diaframmi primari e secondari. Le cui rispettive dimensioni, ipotizzate per le seguenti verifiche, sono: 260 cm per il primario e 280 cm per il secondario.

Le verifiche di seguito riportate sono riferite al diaframma secondario.

### 7.1 Diaframmi - Verifiche delle sollecitazioni flettenti SLU

La verifica agli SLU è stata realizzata attraverso il calcolo dei domini di interazione N-M, ovvero il luogo dei punti rappresentativi di sollecitazioni che portano in crisi la sezione di verifica secondo i criteri di resistenza da normativa.

Nel calcolo dei domini sono state mantenute le consuete ipotesi, tra cui:

- conservazione delle sezioni piane;
- legame costitutivo del calcestruzzo parabola-rettangolo non reagente a trazione, con plateau ad una deformazione pari a 0.002 e a rottura pari a 0.0035 ( $\sigma_{max} = 0.85 \times 0.83 \times R_{ck}/1.5$ );
- legame costitutivo dell'armatura d'acciaio elastico-perfettamente plastico ( $f_{yd} = f_{yk}/1.15$ )

Di seguito sono riportati il diagramma di involuppo dei momenti flettenti e momenti resistenti della sezione e la tabella di determinazione della massima capacità della sezione a SLU.

In riferimento alla paratia considerata verranno adottate 4 gabbie di armatura al fine di coprire i momenti sollecitanti aventi le seguenti caratteristiche:

**Tabella 16 Armature longitudinali paratia**

	Lunghezza [m]	Lato interno SCAVO	Lato esterno TERRENO
Gabbia 1	12	Φ 24/125	2 Φ 24/125
Gabbia 2	12	3 Φ 26/125	2 Φ 26/125+1 Φ 26/250
Gabbia 3	12	3 Φ 26/125	2 Φ 26/125+1 Φ 26/250
Gabbia 4	10	2 Φ 24/125	Φ 20/125

Le lunghezze indicate includono la lunghezza di sovrapposizione.

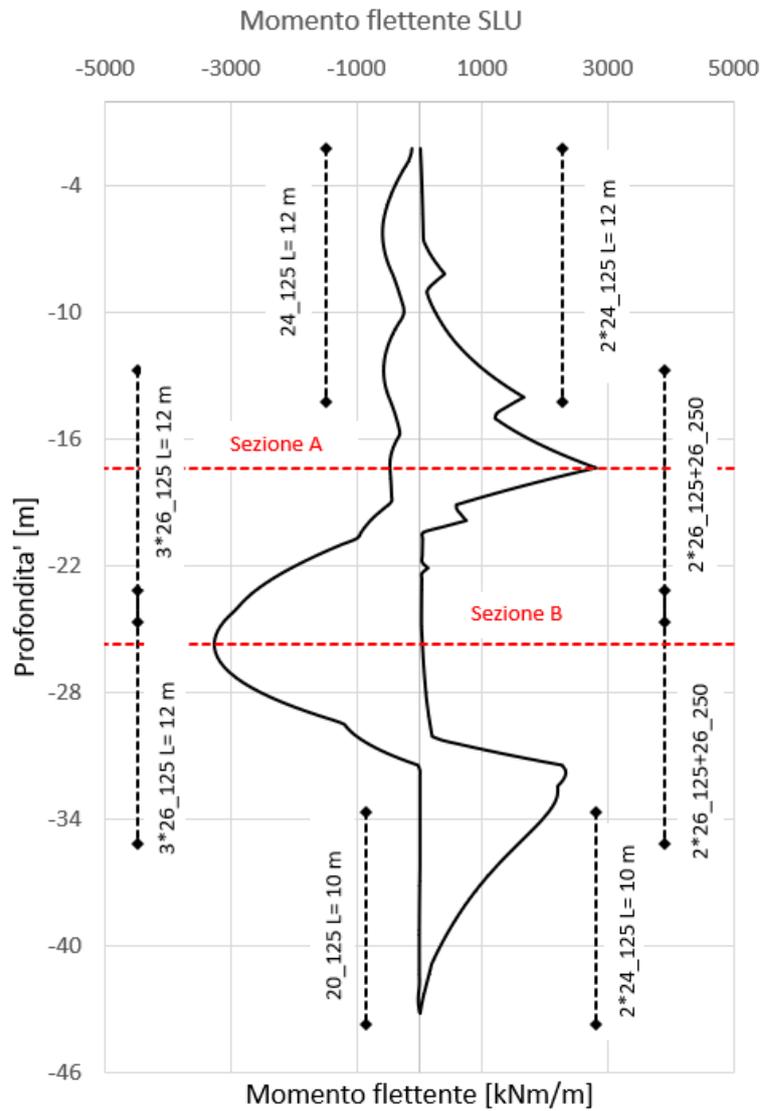


Figura 14. Diaframmi - SLU Diagramma delle sollecitazioni flettenti



Tabella 17 Diaframmi - Verifica SLU flessione Sezione A – Seconda gabbia

<b>Sezione di verifica SLU: Sezione A</b>		
<b>Geometria sezione:</b>		
Altezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1200	[mm]
Larghezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1000	[mm]
Copriferro	75	[mm]
<b>Armature</b>		
<b>Armatura tesa</b>		
Diametro dei ferri correnti	26	[mm]
Numero dei ferri correnti	8	[-]
Diametro dei ferri correnti secondo strato	26	[mm]
Numero dei ferri correnti secondo strato	8	[-]
Diametro dei ferri correnti terzo strato	26	[-]
Numero dei ferri correnti terzo strato	4	[-]
Area dell'armatura tesa	10619	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura compressa</b>		
Diametro dei ferri correnti	26	[mm]
Numero dei ferri correnti	8	[-]
Diametro dei ferri correnti secondo strato	26	[mm]
Numero dei ferri correnti secondo strato	8	[-]
Diametro dei ferri correnti terzo strato	26	[-]
Numero dei ferri correnti terzo strato	8	[-]
Area dell'armatura compressa	12742	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Materiali</b>		
<b>Calcestruzzo</b>		
Resistenza caratteristica cubica	30	[MPa]
Coefficiente di sicurezza parziale per il calcestruzzo	1,5	[-]
Coefficiente che tiene conto degli effetti di lungo termine	0,85	[-]
Resistenza di progetto a compressione del calcestruzzo	14,17	[MPa]
Resistenza di progetto a trazione del calcestruzzo	1,20	[MPa]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione caratteristica	15,00	[MPa]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione quasi permanente	11,25	[MPa]
<b>Acciaio</b>		
Resistenza a snervamento dell'acciaio	450	[MPa]
Coefficiente di sicurezza parziale per l'acciaio	1,15	[-]
Resistenza di progetto a trazione dell'acciaio	391	[MPa]
Tensione ammissibile nell'acciaio per le combinazioni a SLS	360	[MPa]
<b>Momento resistente della sezione</b>		
	<b>4193,89</b>	<b>[kNm]</b>
<b>Momento sollecitante a SLU assunto in valore assoluto</b>		
	<b>2814,00</b>	<b>[kNm]</b>
		Verificato

**Tabella 18 Diaframmi - Verifica SLU flessione Sezione B – Terza Gabbia**

<b>Sezione di verifica SLU: Sezione B</b>		
<b>Geometria sezione:</b>		
Altezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1200	[mm]
Larghezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1000	[mm]
Copriferro	75	[mm]
<b>Armature</b>		
<b>Armatura tesa</b>		
Diametro dei ferri correnti	26	[mm]
Numero dei ferri correnti	8	[-]
Diametro dei ferri correnti secondo strato	26	[mm]
Numero dei ferri correnti secondo strato	8	[-]
Diametro dei ferri correnti terzo strato	26	[-]
Numero dei ferri correnti terzo strato	8	[-]
Area dell'armatura tesa	12742	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura compressa</b>		
Diametro dei ferri correnti	26	[mm]
Numero dei ferri correnti	8	[-]
Diametro dei ferri correnti secondo strato	26	[mm]
Numero dei ferri correnti secondo strato	8	[-]
Diametro dei ferri correnti terzo strato	26	[-]
Numero dei ferri correnti terzo strato	4	[-]
Area dell'armatura compressa	10619	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Materiali</b>		
<b>Calcestruzzo</b>		
Resistenza caratteristica cubica	30	[MPa]
Coefficiente di sicurezza parziale per il calcestruzzo	1,5	[-]
Coefficiente che tiene conto degli effetti di lungo termine	0,85	[-]
Resistenza di progetto a compressione del calcestruzzo	14,17	[MPa]
Resistenza di progetto a trazione del calcestruzzo	1,20	[MPa]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione caratteristica	15,00	[MPa]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione quasi permanente	11,25	[MPa]
<b>Acciaio</b>		
Resistenza a snervamento dell'acciaio	450	[MPa]
Coefficiente di sicurezza parziale per l'acciaio	1,15	[-]
Resistenza di progetto a trazione dell'acciaio	391	[MPa]
Tensione ammissibile nell'acciaio per le combinazioni a SLS	360	[MPa]
<b>Momento resistente della sezione</b>		
	<b>5018,36</b>	<b>[kNm]</b>
<b>Momento sollecitante a SLU assunto in valore assoluto</b>		
	<b>3272,00</b>	<b>[kNm]</b>
Verificato		

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 7.2 Diaframmi - Verifica delle sollecitazioni taglianti SLU

La resistenza a taglio  $V_{Rd}$  di elementi strutturali dotati di specifica armatura a taglio deve essere valutata sulla base di una adeguata schematizzazione a traliccio. Gli elementi resistenti dell'ideale traliccio sono: le armature trasversali, le armature longitudinali, il corrente compresso di calcestruzzo e i puntoni d'anima inclinati. L'inclinazione  $\theta$  dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della trave deve rispettare i limiti seguenti:

$$1 < ctg\theta < 2.5$$

La verifica di resistenza (SLU) è soddisfatta se è verificata la seguente relazione:

$$V_{Rd} \geq V_{Ed} \text{ dove } V_{Ed}$$

è il valore di calcolo dello sforzo di taglio agente.

La resistenza di calcolo a "taglio trazione" dell'armatura trasversale è stata calcolata con la seguente relazione:

$$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (ctg\alpha + ctg\theta) \cdot \sin\alpha$$

La resistenza di calcolo a "taglio compressione" del calcestruzzo d'anima è stata calcolata con la seguente relazione:

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (ctg\alpha + ctg\theta) / (1 + ctg^2\theta)$$

La resistenza al taglio della sezione è la minore delle due relazioni sopra definite:

$$V_{Rd} = \min (V_{Rsd}, V_{Rcd})$$

La verifica delle azioni taglianti è condotta per pannello di paratia pari a 2,80 m.

Per verifica vengono adottate due tipologie di staffatura, una con staffa esterna a 2 braccia diametro 16 mm ed una interna a 4 braccia diametro da 14 mm con passo 200 mm. La seconda tipologia è costituita da una con staffa esterna a 2 braccia diametro 16 mm ed una interna a 6 braccia diametro da 16 mm con passo 100 mm. L'immagine di seguito mostra l'involuppo delle azioni taglianti e la resistenza offerta dalla sezione.

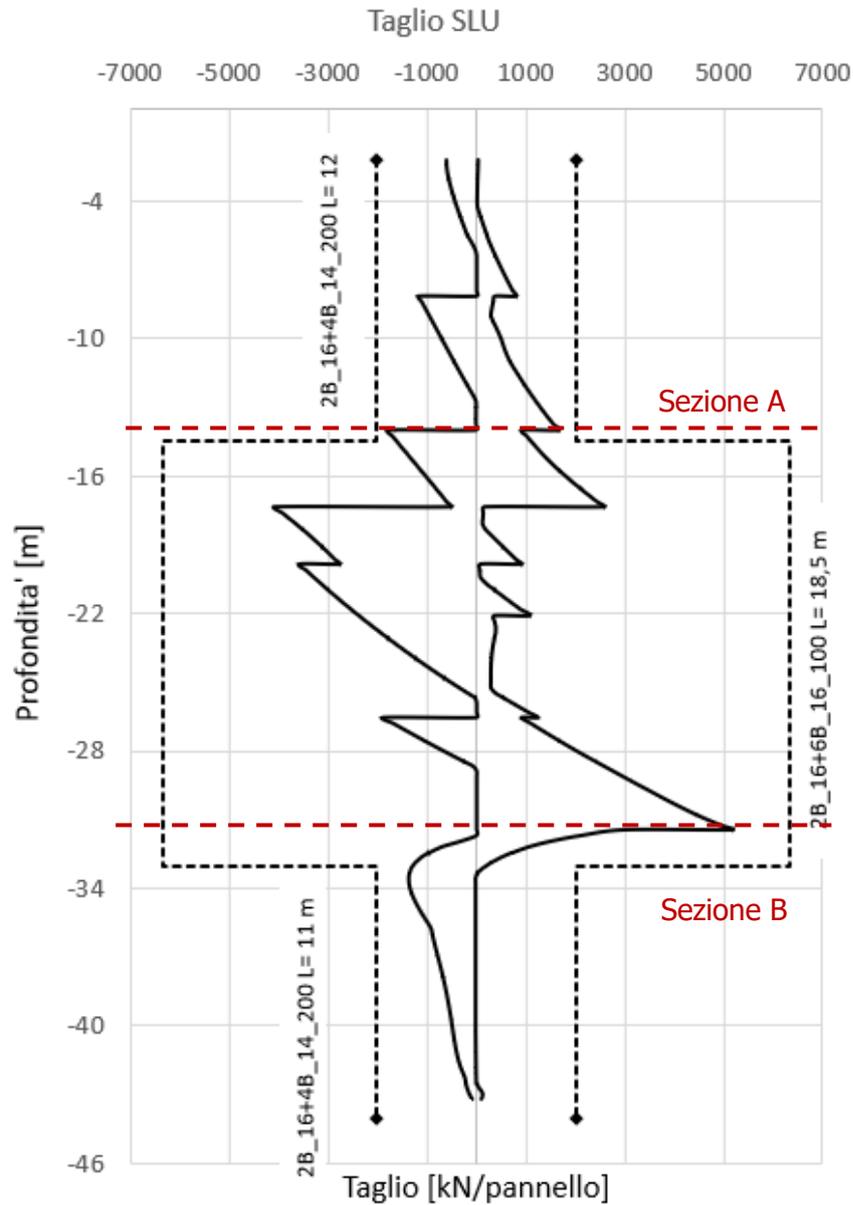


Figura 15. Diaframma - SLU Diagramma delle sollecitazioni taglianti



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere  
 di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

**Tabella 19 Diaframma - Verifica SLU – Taglio – Sezione A**

Verifica elementi a taglio			
<i>Pannello diaframma 2800 x 1000 mm - <math>\phi</math>16 2 braccia + <math>\phi</math>14 4 braccia passo 200 mm</i>			
<b>Geometria</b>			
Altezza sezione	H	1200	mm
Base sezione	B	2800	mm
Barre longitudinali tese	$\phi_{sl}$	26	mm
Diametro staffe	$\phi_{sw}$	16	mm
Copriferro	c	75	mm
Altezza utile	d	1096	mm
<b>Materiali</b>			
<b>Calcestruzzo</b>			
Resistenza caratteristica cubica	$R_{ck}$	30	MPa
Resistenza caratteristica cilindrica	$f_{ck}$	25	MPa
Coefficiente parziale calcestruzzo	$\gamma_c$	1,5	
Coefficiente che tiene conto degli effetti a lungo termine	$\alpha_{cc}$	0,85	
Resistenza di progetto a compressione calcestruzzo	$f_{cd}$	14,17	MPa
Resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo d'anima	$f'_{cd}$	7,08	MPa
<b>Acciaio</b>			
Resistenza a snervamento dell'acciaio	$f_{yk}$	450	MPa
Coefficiente di sicurezza parziale acciaio	$\gamma_s$	1,15	
Resistenza di progetto a trazione dell'acciaio	$f_{yd}$	391,30	MPa
<b>Elementi con armatura a taglio</b>			
Diametro staffe esterne	$\phi_{sw1}$	16	mm
Numero braccia	$n_{b1}$	2	
Diametro staffe esterne	$\phi_{sw2}$	14	mm
Numero braccia	$n_{b2}$	4	
Passo staffe	s	200	mm
Inclinazione tra puntone compresso e asse elemento	$\theta$	45,00	°
Inclinazione armatura trasversale rispetto asse elemento	$\alpha$	90	°
Area sezione trasversale armatura a taglio	$A_{sw}$	1017,36	mm <sup>2</sup>
Braccio coppia interna	z	986,4	mm
Resistenza offerta dall'armatura a taglio	$V_{Rsd}$	1963	kN
Resistenza offerta dai puntoni	$V_{Rcd}$	9782	kN
<b>Resistenza a taglio della sezione armata trasversalmente</b>	<b><math>V_{Rd}</math></b>	<b>1963</b>	<b>kN</b>
<b>Taglio sollecitante SLU</b>	<b><math>V_{ed}</math></b>	<b>1703</b>	<b>kN</b>
			Verificato


**Tabella 20 Diaframma - Verifica SLU – Taglio – Sezione B**

Verifica elementi a taglio			
<i>Pannello diaframma 2800 x 1000 mm - <math>\phi</math>16 2 braccia + <math>\phi</math>16 6 braccia passo 100 mm</i>			
<b>Geometria</b>			
Altezza sezione	H	1200	mm
Base sezione	B	2800	mm
Barre longitudinali tese	$\phi_{sl}$	26	mm
Diametro staffe	$\phi_{sw}$	16	mm
Copriferro	c	75	mm
Altezza utile	d	1096	mm
<b>Materiali</b>			
<b>Calcestruzzo</b>			
Resistenza caratteristica cubica	$R_{ck}$	30	MPa
Resistenza caratteristica cilindrica	$f_{ck}$	25	MPa
Coefficiente parziale calcestruzzo	$\gamma_c$	1,5	
Coefficiente che tiene conto degli effetti a lungo termine	$\alpha_{cc}$	0,85	
Resistenza di progetto a compressione calcestruzzo	$f_{cd}$	14,17	MPa
Resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo d'anima	$f'_{cd}$	7,08	MPa
<b>Acciaio</b>			
Resistenza a snervamento dell'acciaio	$f_{yk}$	450	MPa
Coefficiente di sicurezza parziale acciaio	$\gamma_s$	1,15	
Resistenza di progetto a trazione dell'acciaio	$f_{yd}$	391,30	MPa
<b>Elementi con armatura a taglio</b>			
Diametro staffe esterne	$\phi_{sw1}$	16	mm
Numero braccia	$n_{b1}$	2	
Diametro staffe esterne	$\phi_{sw2}$	16	mm
Numero braccia	$n_{b2}$	6	
Passo staffe	s	100	mm
Inclinazione tra puntone compresso e asse elemento	$\theta$	45,00	°
Inclinazione armatura trasversale rispetto asse elemento	$\alpha$	90	°
Area sezione trasversale armatura a taglio	$A_{sw}$	1607,68	mm <sup>2</sup>
Braccio coppia interna	z	986,4	mm
Resistenza offerta dall'armatura a taglio	$V_{Rsd}$	6205	kN
Resistenza offerta dai puntoni	$V_{Rcd}$	9782	kN
<b>Resistenza a taglio della sezione armata trasversalmente</b>	<b><math>V_{Rd}</math></b>	<b>6205</b>	<b>kN</b>
<b>Taglio sollecitante SLU</b>	<b><math>V_{ed}</math></b>	<b>5185</b>	<b>kN</b>
		Verificato	

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 7.1 Barrette temporanee - Verifiche SLU

Le barrette temporanee vengono verificate nella condizione di carico più gravose risultanti in quelle in cui i quattro solai sovrastanti il fondo scavo sono stati realizzati e le puntonature temporanee sono state rimosse.

Nel report MTL2T1A2DSTRSCAR002 delle strutture interne, le barrette vengono studiate nel dettaglio e dimensionate considerando lo stage construction simulato con il software strutturale oltre a tenere conto della tridimensionalità della stazione, dando così risultati più accurati; per tale motivo si rimanda al suddetto report per quanto riguardano le dovute verifiche strutturali dei setti provvisori.

## 7.2 Verifiche SLE

Nelle verifiche agli SLE si è tenuto in conto che per tutte le strutture sono state previste condizioni ambientali "ordinarie" con classi di esposizione XC2.

In funzione del tipo di armatura (poco sensibili) i limiti fessurativi risultano:

- Combinazione di azioni caratteristica:  $w_k \leq w = 0.3 \text{ mm}$

I limiti tensionali considerati per i diaframmi (C 25/30) sono relativi alla combinazione di carico caratteristica.

Calcestruzzo:

Combinazione di azioni	Limite tensionale
Caratteristica (rara)	$\sigma_c \leq 0.60 f_{ck} = 14.94 \text{ MPa (C25/30)}$

Acciaio:

Combinazione di azioni	Limite tensionale
Caratteristica (rara)	$\sigma_a \leq 0.80 f_{yk} = 360 \text{ MPa}$

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

**Tabella 21 Diaframmi - Verifica SLE –Sezione A -Seconda Gabbia**

<b>Sezione di verifica SLE: Sezione A</b>		
<b>Geometria sezione:</b>		
Altezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1200	[mm]
Larghezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1000	[mm]
Copriferro	75	[mm]
Altezza utile della sezione	1075	[mm]
<b>Limitazione delle tensioni</b>		
Area dell'armatura tesa	10619	[mm <sup>2</sup> ]
Area dell'armatura compressa	12742	[mm <sup>2</sup> ]
Momento sollecitante	2010	[kNm]
Posizione dell'asse neutro	369,92	[mm]
Momento d'inerzia della sezione rispetto a x	1,34062E+11	[mm <sup>4</sup> ]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione caratteristica	15,0	[MPa]
Tensione ammissibile nell'acciaio per le combinazioni a SLS	360,0	[MPa]
<b>Tensione nel calcestruzzo</b>	<b>5,5</b>	<b>[MPa]</b>
Tensione calcestruzzo < 15 Mpa		Verificato
<b>Tensione nell'armatura tesa</b>	<b>194,0</b>	<b>[MPa]</b>
Tensione acciaio < 360 Mpa		Verificato
<b>Apertura delle fessure</b>		
Tensione indotta nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	193,96	[MPa]
Valore medio della resistenza a trazione efficace del calcestruzzo	2,56	[MPa]
Fattore dipendente dalla durata del carico	0,40	[-]
Altezza efficace	276,69	[mm]
Area efficace del calcestruzzo teso attorno all'armatura	276695	[mm <sup>2</sup> ]
Rapporto geometrico sull'area efficace	0,0384	[-]
Rapporto tra Es/Ecm	6,67	[-]
Differenza tra la deformazione nell'acciaio e quella nel calcestruzzo	0,000764	[-]
Determinazione del diametro equivalente delle barre tese	26,00	[mm]
Distanza massima tra le fessure	370,17	[mm]
<b>Ampiezza delle fessure</b>	<b>0,283</b>	<b>[mm]</b>
<b>Ampiezza massima delle fessure</b>	<b>0,3</b>	<b>[mm]</b>
		Verificato

**Tabella 22 Diaframmi - Verifica SLE –Sezione B -Terza Gabbia**



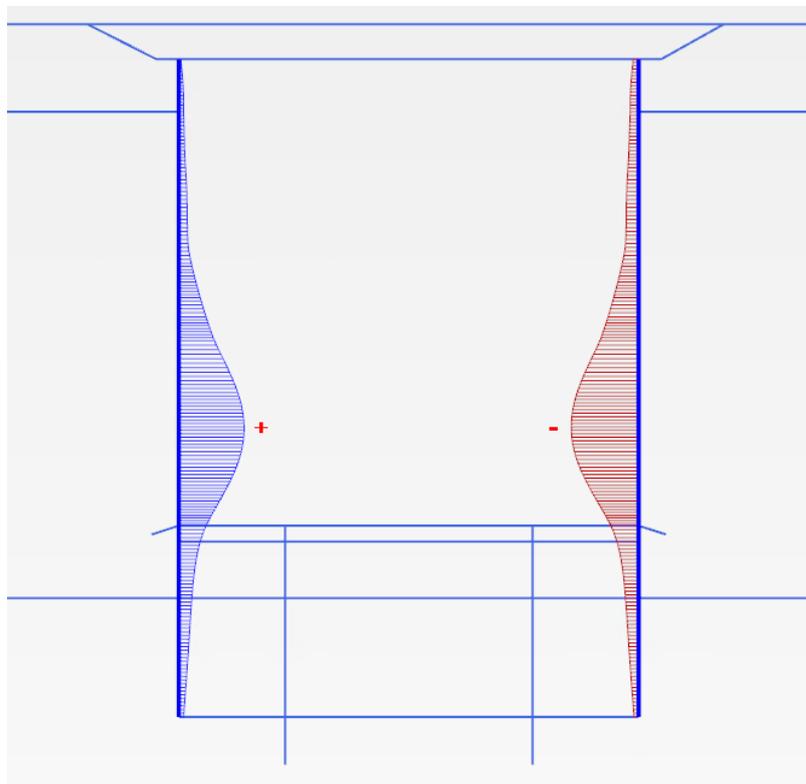
<b><u>Sezione di verifica SLE: Sezione B</u></b>		
<b>Geometria sezione:</b>		
Altezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1200	[mm]
Larghezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1000	[mm]
Copriferro	75	[mm]
Altezza utile della sezione	1075	[mm]
<b>Limitazione delle tensioni</b>		
Area dell'armatura tesa	12742	[mm <sup>2</sup> ]
Area dell'armatura compressa	10619	[mm <sup>2</sup> ]
Momento sollecitante	2337	[kNm]
Posizione dell'asse neutro	417,31	[mm]
Momento d'inerzia della sezione rispetto a x	1,4818E+11	[mm <sup>4</sup> ]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione caratteristica	15,0	[MPa]
Tensione ammissibile nell'acciaio per le combinazioni a SLS	360,0	[MPa]
<b>Tensione nel calcestruzzo</b>	<b>6,6</b>	<b>[MPa]</b>
Tensione calcestruzzo < 15 Mpa		Verificato
<b>Tensione nell'armatura tesa</b>	<b>190,3</b>	<b>[MPa]</b>
Tensione acciaio < 360 Mpa		Verificato
<b>Apertura delle fessure</b>		
Tensione indotta nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	190,31	[MPa]
Valore medio della resistenza a trazione efficace del calcestruzzo	2,56	[MPa]
Fattore dipendente dalla durata del carico	0,40	[-]
Altezza efficace	260,90	[mm]
Area efficace del calcestruzzo teso attorno all'armatura	260898	[mm <sup>2</sup> ]
Rapporto geometrico sull'area efficace	0,0488	[-]
Rapporto tra Es/Ecm	6,67	[-]
Differenza tra la deformazione nell'acciaio e quella nel calcestruzzo	0,000774	[-]
Determinazione del diametro equivalente delle barre tese	26,00	[mm]
Distanza massima tra le fessure	345,50	[mm]
<b>Ampiezza delle fessure</b>	<b>0,267</b>	<b>[mm]</b>
<b>Ampiezza massima delle fessure</b>	<b>0,3</b>	<b>[mm]</b>
		Verificato



### 7.3 Verifica di deformabilità a lungo termine

La verifica di deformabilità a lungo termine è condotta tenendo in considerazione gli effetti del fluage del calcestruzzo. Per simulare il fluage delle strutture in calcestruzzo sotto carico costante è stato applicato al modulo elastico del calcestruzzo un coefficiente di riduzione pari a 2.75.

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



**Total displacements  $u_x$  (scaled up 200 times)**

Maximum value = 0,02029 m (Element 243 at Node 29485)

Minimum value = -0,02097 m (Element 255 at Node 52157)

**Figura 16. Spostamenti orizzontali a lungo termine**

Per la sezione in oggetto lo spostamento massimo risulta essere di 20.97 mm risulta compatibile con il limite stabilito pari a 15 cm, considerando l'altezza della paratia pari a 30m.



## 8. VERIFICHE GEOTECNICHE

### 8.1 Verifica tampone di fondo

La verifica della stabilità del tampone di fondo è condotta considerando tutti i possibili meccanismi di collasso evidenziati nella figura sottostante.

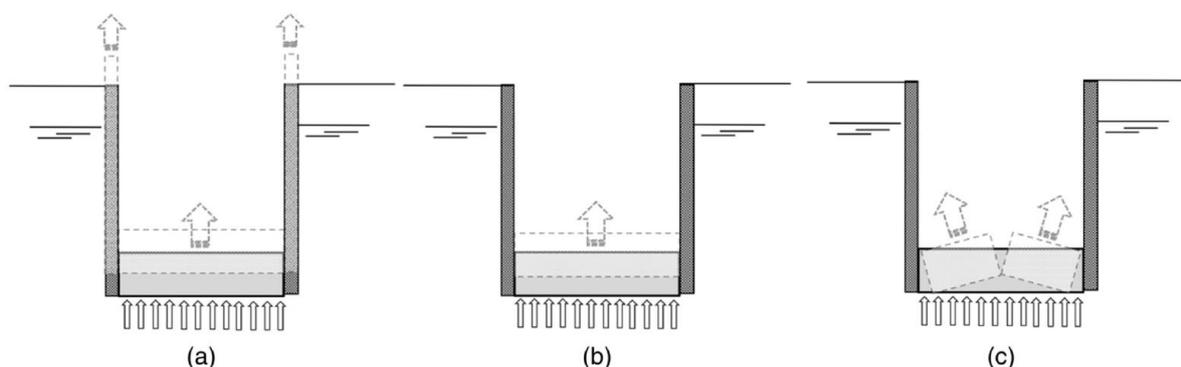


Figura 17. Possibili meccanismi di collasso: a) sollevamento del tampone di fondo e dei diaframmi b) sollevamento del tampone di fondo c) rottura del tampone di fondo

Di seguito sono riportati i parametri utilizzati per le verifiche del tampone e le relative verifiche.

Essendo la snellezza del tampone L/H circa pari 2,28 (elemento tozzo) il meccanismo di rottura (c) non può manifestarsi, pertanto se ne omette la verifica.

Tabella 23 Verifica tampone di fondo

Parametri geometrici e geotecnici			
Larghezza diaframmi	=	1,2	m
Altezza soletta di copertura	=	0,8	m
Altezza solette intermedie	=	1,0	m
Altezza riempimento	=	1,42	m
Larghezza interna scavo	=	27,4	m
Fondo scavo	=	-31,5	m
Hw	=	-15	m
Profondita' paratia	=	-43,50	m
Altezza terreno saturo al di sopra del tampone	=	0,00	m
<b>Battente idraulico</b>	=	<b>28,5</b>	<b>m</b>
<b>Altezza tampone di fondo</b>	=	<b>12,00</b>	<b>m</b>
<b>Profondita' infissione paratia</b>	=	<b>12,00</b>	<b>m</b>



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere  
di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Coefficients parziali			
$\gamma_G$ fav	=	0,9	
$\gamma_G$ unfav	=	1,1	
$\gamma \phi$	=	1,25	
$\gamma c$	=	1,25	
Parametri geotecnici			
$\gamma_{ig}$	=	22	kN/mc
$\gamma_s$	=	19	kN/mc
$\delta$	=	0,5	
$\phi_{s,k}$	=	36,0	°
$c_{s,k}$	=	10,00	kPa
$\phi_{s-int,d}$	=	16,2	°
$c_{s-int,d}$	=	0	kPa
$\phi_{jg,k}$	=	36	°
$c_{jg,k}$	=	150,00	kPa
$c_{jg-int,d}$	=	60	kPa
$\phi_{jg-int,d}$	=	16,2	°
$qu_{jg-int,k}$	=	589	kPa
$qu_{jg-int,d}$	=	471	kPa



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Verifica galleggiamento della struttura a breve termine			
<b>Forze agenti</b>			
<b>Azioni instabilizzanti</b>			
Pressione U alla base della paratia	=	285,0	kPa
Pressione U alla base del tampone	=	285,0	kPa
Forza instabilizzante	=	8493,0	kN/m
<b>Azioni stabilizzanti</b>			
Peso tampone	=	7233,6	kN/m
Peso terreno saturo sopra tampone	=	0,0	kN/m
Peso diaframmi	=	2524,8	kN/m
Peso riempimento	=	804,0	kN/m
Peso soletta copertura	=	548,0	kN/m
Peso di 3 solette intermedie	=	2055,0	kN/m
Forze stabilizzanti totali	=	13165,4	kN/m
<b>Resistenze</b>			
$K_a$	=	0,56	
Tensione normale media agente sulla paratia	=	110,4	kPa
Contributo angolo di attrito	=	1349,7	kN/m
Contributo coesione	=	0	kN/m
Forza stabilizzante dovuta all'attrito	=	2699,3	kN/m
Forza instabilizzante progetto	=	9342,3	kN/m
Forza stabilizzante + resistenze di progetto	=	14548,2	kN/m
FS	=	1,56	OK



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Verifica a galleggiamento del tampone di fondo a breve termine			
<b>Forze agenti</b>			
<b>Azioni instabilizzanti</b>			
Pressione U alla base del tampone	=	285,00	kPa
Forza instabilizzante	=	7809,00	kN/m
<b>Azioni stabilizzanti</b>			
Peso tampone	=	7233,60	kN/m
Peso terreno saturo sopra tampone	=	0,00	kN/m
Forze stabilizzanti totali	=	7233,60	kN/m
<b>Resistenze</b>			
$K_0$	=	0,72	
<b>Soil</b>			
Tensione normale media	=	0,0	kPa
Contributo angolo di attrito	=	0,0	kN/m
Contributo coesione	=	0,0	kN/m
Forza stabilizzante dovuta all'attrito	=	0,0	kN/m
<b>Grout</b>			
Tensione normale media	=	95,2	kPa
Contributo angolo di attrito	=	331,9	kN/m
Contributo coesione	=	720,0	kN/m
Forza stabilizzante dovuta all'attrito	=	2103,9	kN/m
Forza instabilizzante progetto	=	8589,90	kN/m
Forza stabilizzante + resistenze di progetto	=	8614,11	kN/m
FS	=	1,00	OK

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Verifica resistenza interna tampone di fondo			
<b>Forze agenti</b>			
<b>Azioni instabilizzanti</b>			
M instabilizzante	=	29420	kNm/m
<b>Azioni stabilizzanti</b>			
M stabilizzante	=	22298	kNm/m
<b>Resistenze</b>			
Resistenza interna del tampone di fondo	=	10174	kNm/m
Forza instabilizzante progetto	=	29420,41	kNm/m
Forza stabilizzante + resistenze di progetto	=	32471,74	kNm/m
FS	=	<b>1,10</b>	<b>OK</b>

## 8.2 Verifica capacità portante barrette (kingpost)

Le barrette realizzate all'interno del corpo stazione sostengono quasi tutto il carico assiale trasmesso dalla copertura e dalle solette intermedie nella fase costruttiva, per cui i diaframmi laterali risultano quasi scarichi in tutte le fasi di realizzazione della stazione. A lungo termine il carico della stazione verrà trasmesso al terreno tramite la soletta di base. Le verifiche di capacità portante delle barrette sono riportate nel seguito, mentre le verifiche strutturali vengono riportate nella relazione di calcolo delle strutture interne essendo i carichi a lungo termine maggiori di quelli transitori. Il valore delle tensioni efficaci adottato per la verifica è desunto dalle analisi numeriche.

La capacità portante della barretta può essere assimilata a quella di un palo di fondazione isolato e pertanto la verifica è condotta con il seguente procedimento.

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

$$P_{lim} = A_p(cN_c d_c s_c + \eta q N_q d_q s_q + \frac{1}{2} \gamma B_p N_\gamma s_\gamma)$$

Con:

$P_{lim}$  è la capacità portante di base

$A_p$  è l'area della base del palo

$N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$  sono i fattori di capacità; portante relativi a coesione, sovraccarico e peso proprio del terreno

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

$d_c, d_q, d_v$  sono fattori correttivi relativi profondità del piano di posa

$s_c, s_q, s_v$  sono fattori correttivi relativi alla dimensione della base del palo

$q$  è la tensione verticale efficace al livello della base del palo

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

La capacità portante laterale è valutata secondo la formulazione proposta da Burland in cui la tensione tangenziale resistente è pari a:

$$f_s = Kq \tan \delta$$

In cui:

$K$  è il coefficiente di spinta a riposo valutato con la formulazione di Jacky

$q$  è la tensione verticale efficace media agente lungo la profondità di infissione del palo

$\delta$  è l'angolo d'attrito palo terreno valutato come  $0,5 \varphi$

Secondo quanto prescritto dalle norme tecniche per le costruzioni al par. 6.4.3.1.1 il coefficiente parziale (R3) applicato all'aliquota di resistenza della capacità portante laterale in compressione è pari a 1,15.

Il carico di progetto è stato considerato sulla base dei risultati ottenuti dal modello strutturale (report MTL2T1A2DSTRSCAR002) in quanto tenendo conto della tridimensionalità del problema fornisce risultati più accurati. La barretta con il maggior carico assiale è stata verificata.

**Tabella 24 Verifica capacità portante barrette**

Parametri geotecnici			Forza agente		
$c_k$	40	kPa	Carico caratteristico	27312	kN
$\phi_k$	23	°	Carico di progetto	38236	kN
$\gamma_k$	19	kN/mc			
Dimensione fondazione					
B	1,2	m			
L	2,8	m			
$\theta$	0	°			
Lunghezza immorsata					
Lunghezza	25	m			



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Capacità portante di base	
$s_c$	1,21
$s_q$	1,17
$s_v$	0,83
$d_c$	1,61
$d_q$	1,48
$i_c i_q$	1,00
$i_v$	1,00
$N_c$	18,03
$N_q$	8,66
$N_\gamma$	4,87

$q_c$	1400	kPa
$q_q$	5982	kPa
$q_\gamma$	46	kPa

$q_{ult}$	7427	kPa
Fattore sicurezza parziale	1,35	
<b>R di base di progetto</b>	<b>18486</b>	<b>kN</b>

Capacità portante laterale		
$\sigma'_v$ (An. numerica)	400	kPa
$K_0$	0,61	
$\sigma'_h$ average	244	kPa
$\delta$	0,5	
Resistenza palo terreno	11,5	°
$K_a$	0,438	
Attrito palo terreno	124,0	kPa
Resistenza laterale	24820	kN
Fattore di sicurezza parziale	1,15	
<b>R laterale di progetto</b>	<b>21583</b>	<b>kN</b>

<b>R totale di progetto</b>	<b>40068</b>	<b>kN</b>
<b>Carico di progetto</b>	<b>38236</b>	<b>kN</b>
	<b>Verificato</b>	



### 8.3 Verifica capacità portante paratia

Come descritto nel paragrafo precedente i diaframmi risultano sostanzialmente poco caricati durante le differenti fasi costruttive dell'opera. Nella fase costruttiva la maggior parte del carico verticale è portato dalle barrette mentre a lungo termine i carichi sono portati dalla soletta di base. Di seguito si riporta la verifica a capacità portante della paratia nella fase temporanea.

Il valore delle tensioni efficaci adottato per la verifica è desunto dalle analisi numeriche.

**Tabella 25 Verifica capacità portante paratia**

Parametri geotecnici		
$c_k$	10	kPa
$\phi_k$	36	°
$\gamma_k$	19	kN/mc
Dimensione del palo		
B	1,2	m
L	1	m
$\theta$	0	°
Lunghezza del palo		
Lunghezza	12	m

Forza agente		
Carico caratteristico	1919	kN
<b>Carico di progetto</b>	<b>2687</b>	<b>kN</b>

Capacità portante di base	
$s_c$	1,92
$s_q s_\gamma$	1,46
$d_c$	3,27
$d_q d_\gamma$	2,40
$i_c i_q$	1,00
$i_\gamma$	1,00
$N_c$	50,53
$N_q$	37,71
$N_\gamma$	40,01

Capacità portante laterale		
$\sigma'_v$	230	kPa
$\sigma'_v$ average	195	kPa
$K_0$	0,41	
$\sigma'_h$ average	218	kPa
Delta	0,5	
Resistenza palo terreno	18	°
$K_a$	0,260	
Attrito palo terreno	70,83	kPa
Resistenza laterale	3740	kN
Fattore di sicurezza parziale	1,15	
R laterale di progetto	3252	kN

$q_c$	3178	kPa
$q_q$	17025	kPa
$q_\gamma$	667	kPa

<b>R totale di progetto</b>	<b>21803</b>	<b>kN</b>
<b>Carico di progetto</b>	<b>2687</b>	<b>kN</b>
	<b>Verificato</b>	

$q_{ult}$	20870	kPa
Fattore sicurezza parziale	1,35	
R di base di progetto	18551	kN



### 8.4 Verifica capacità portante della soletta di fondo

Le modellazioni numeriche eseguite non evidenziano criticità in termini deformativi e di sviluppo di fasce plastiche al di sotto della soletta di base anche nella fase finale di disattivazione dei trattamenti del fondo scavo. Per tanto, non sono necessarie ulteriori verifiche della relativa capacità portante.

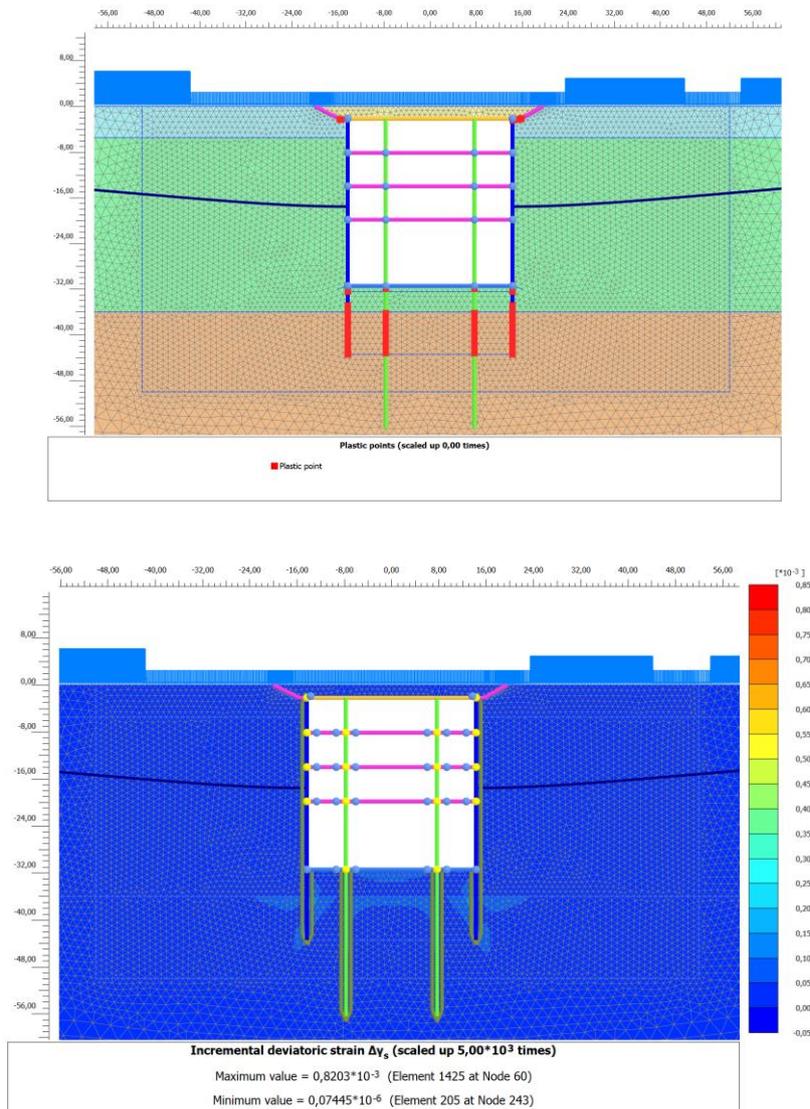


Figura 18. Zone di plasticizzazione



## 8.5 Verifica puntone temporanei

Di seguito viene riportata la verifica strutturale per i puntone temporanei usati durante lo scavo della stazione. Sono presentate le verifiche del puntone spezzato dalle barrette intermedie che hanno lunghezza 14.2m per i quali sono previsti puntone di diametro 833mm e spessore 32mm, e anche la verifica del puntone continuo lungo 25.6m, per i quali sono previsti dei profili tubolari di diametro 1016mm e spessore 30mm solo al primo livello di puntone in quanto rappresenta la condizione più sfavorevole nella fase di passaggio della TBM.

- **Puntone spezzato**

Materiali			
Tensione di snervamento	$f_{yk}$	355	[N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione ultima	$f_{uk}$	510	[N/mm <sup>2</sup> ]
Modulo elastico	E	210000	[N/mm <sup>2</sup> ]
Fattore di sicurezza - Resistenza	$\gamma_{M0}$	1,05	[-]
Fattore di sicurezza - Stabilità	$\gamma_{M1}$	1,05	[-]
Fattore di sicurezza resistenza a SLU	$\gamma_{M2}$	1,25	[-]
Proprietà geometriche			
Diametro esterno	$d_{ext}$	833,00	[mm]
Spessore	t	32,00	[mm]
Lunghezza puntone	L	14,20	[m]
Diametro interno	$d_{int}$	769,00	[mm]
Raggio esterno	$r_{ext}$	416,50	[mm]
Raggio interno	$r_{int}$	384,50	[mm]
Area sezione trasversale	A	80525	[mm <sup>2</sup> ]
Momento d'inerzia	$I_y$	6,4652E+09	[mm <sup>4</sup> ]
Modulo di resistenza elastico	$W_{el,y}$	1,5523E+07	[mm <sup>3</sup> ]
Modulo di resistenza plastico	$W_{pl,y}$	3,5460E+06	[mm <sup>3</sup> ]
Area resistente a taglio	$A_{V,z}$	51264	[mm <sup>2</sup> ]
Raggio d'inerzia	$i_y$	283,35	[mm]
Forze agenti			
Forza normale (positiva se di compressione) caratteristica	$N_k$	11450,00	[kN]
Forza normale (positiva se di compressione) di progetto	$N_{ed}$	16030,00	[kN]
Momento flettente caratteristico	$M_k$	2287,64	[kNm]



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere  
di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Momento flettente di progetto	$M_{ed}$	3202,70	[kNm]
Taglio caratteristico	$V_k$	0,00	[kN]
Taglio di progetto	$V_{ed}$	0,00	[kN]
<b>Classificazione della sezione trasversale</b>			
Coefficiente $\varepsilon$	$\varepsilon$	0,814	[-]
Diametro esterno/spessore	$\rho$	26,031	[-]
Rapporto limite per classe 1	$\rho_1$	33,099	[-]
Rapporto limite per classe 2	$\rho_2$	46,338	[-]
Rapporto limite per classe 3	$\rho_3$	59,577	[-]
<b>Classificazione della sezione trasversale</b>	<b>CL</b>	<b>1</b>	
<b>Verifica di stabilita'</b>			
<b><u>Instabilita' per compressione</u></b>			
Coefficiente di vincolo	$\beta$	1,00	[-]
Lunghezza libera di inflessione	$l$	14200,00	[mm]
Snellezza adimensionalizzata	$\lambda$	50,11	[-]
	$\varepsilon$	0,81	[-]
Snellezza limite	$\lambda_1$	76,37	[-]
	$\underline{\lambda}$	0,66	[-]
	$\alpha$	0,21	[-]
	$\Phi$	0,76	[-]
	$\chi$	0,87	[-]
Resistenza a instabilita' per sezione compressa	$N_{b,Rd}$	23614,23	[kN]
FOS	FS	1,473	[-]
<b><u>Instabilita' per flessione e compressione</u></b>			
	$\beta_M$	1,30	[-]
	$\mu_{calc}$	-0,92	[-]
	$\mu$	-0,92	[-]
	$k_{calc}$	1,62	[-]
	$k$	1,50	[-]
	<b>0,813</b>	<1	Verificato



- Puntone continuo**

Materiali			
Tensione di snervamento	$f_{yk}$	355	[N/mm <sup>2</sup> ]
Tensione ultima	$f_{uk}$	510	[N/mm <sup>2</sup> ]
Modulo elastico	E	210000	[N/mm <sup>2</sup> ]
Fattore di sicurezza - Resistenza	$\gamma_{M0}$	1,05	[-]
Fattore di sicurezza - Stabilita'	$\gamma_{M1}$	1,05	[-]
Fattore di sicurezza resistenza a SLU	$\gamma_{M2}$	1,25	[-]
Proprieta' geometriche			
Diametro esterno	$d_{ext}$	1016,00	[mm]
Spessore	t	30,00	[mm]
Lunghezza puntone	L	25,60	[m]
Diametro interno	$d_{int}$	956,00	[mm]
Raggio esterno	$r_{ext}$	508,00	[mm]
Raggio interno	$r_{int}$	478,00	[mm]
Area sezione trasversale	A	92928	[mm <sup>2</sup> ]
Momento d'inerzia	$I_y$	1,1298E+10	[mm <sup>4</sup> ]
Modulo di resistenza elastico	$W_{el,y}$	2,2240E+07	[mm <sup>3</sup> ]
Modulo di resistenza plastico	$W_{pl,y}$	3,5460E+06	[mm <sup>3</sup> ]
Area resistente a taglio	$A_{V,z}$	59160	[mm <sup>2</sup> ]
Raggio d'inerzia	$i_y$	348,68	[mm]
Forze agenti			
Forza normale (positiva se di compressione) caratteristica	$N_k$	11450,00	[kN]
Forza normale (positiva se di compressione) di progetto	$N_{ed}$	16030,00	[kN]
Momento flettente caratteristico	$M_k$	15380,38	[kNm]
Momento flettente di progetto	$M_{ed}$	21532,53	[kNm]
Taglio caratteristico	$V_k$	0,00	[kN]
Taglio di progetto	$V_{ed}$	0,00	[kN]
Classificazione della sezione trasversale			
Coefficiente $\varepsilon$	$\varepsilon$	0,814	[-]
Diametro esterno/spessore	$\rho$	33,867	[-]
Rapporto limite per classe 1	$\rho_1$	33,099	[-]
Rapporto limite per classe 2	$\rho_2$	46,338	[-]



Rapporto limite per classe 3	$\rho_3$	59,577	[-]
<b>Classificazione della sezione trasversale</b>	<b>CL</b>	<b>2</b>	
<b>Verifica di stabilita'</b>			
<b><u>Instabilita' per compressione</u></b>			
Coefficiente di vincolo	$\beta$	1,00	[-]
Lunghezza libera di inflessione	$l$	25600,00	[mm]
Snellezza adimensionalizzata	$\lambda$	73,42	[-]
	$\varepsilon$	0,81	[-]
Snellezza limite	$\lambda_1$	76,37	[-]
	$\underline{\lambda}$	0,96	[-]
	$\alpha$	0,21	[-]
	$\Phi$	1,04	[-]
	$\chi$	0,69	[-]
Resistenza a instabilita' per sezione compressa	$N_{b,Rd}$	21756,08	[kN]
FOS	FS	1,357	[-]
<b><u>Instabilita' per flessione e compressione</u></b>			
	$\beta_M$	1,30	[-]
	$\mu_{calc}$	-1,35	[-]
	$\mu$	-1,35	[-]
	$k_{calc}$	1,99	[-]
	$k$	1,50	[-]
	<b>0,909</b>	<1	Verificato

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## 8.6 Verifica trave di ripartizione

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

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

$$M_{Max} = \frac{1}{12} q l^2 \quad V_{Max} = 0.6 q l$$

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

Per il caso in esame l'interasse dei puntoni è di 6 m ed il massimo carico cui sono soggetti è 11450 kN, ne deriva un carico caratteristico uniformemente distribuito di 1908 kN/m.

Il massimo momento sollecitante di calcolo derivante da tale carico è pari a 8014 kNm.

Il massimo taglio sollecitante di calcolo derivante da tale carico è pari a 9616 kN.

La struttura della trave di ripartizione è costituita da n.3 HEM800 affiancate. Nel seguito si riporta la verifica di tale sezione.

**Tabella 26 Verifica trave di ripartizione**

Verifica trave di ripartizione sezione HEM800 - Sezione maggiormente sollecitata			
<b>Azioni sollecitanti</b>			
Forza normale	N <sub>Ed</sub>	0	[kN]
Forza di taglio parallela all'anima	V <sub>z,Ed</sub>	3205	[kN]
Forza di taglio parallela alle ali	V <sub>y,Ed</sub>	0	[kN]
Momento flettente attorno all'asse maggiore di inerzia	M <sub>y,Ed</sub>	2671	[kNm]
Momento flettente attorno all'asse minore di inerzia	M <sub>z,Ed</sub>	0	[kNm]
<b>Materiali</b>			
Valore di snervamento dell'acciaio del profilo	f <sub>yk</sub>	355	[N/mm <sup>2</sup> ]
Valore di rottura dell'acciaio del profilo	f <sub>uk</sub>	510	[N/mm <sup>2</sup> ]
Modulo di elasticità dell'acciaio del profilo	E	210000	[N/mm <sup>2</sup> ]
Modulo di elasticità tangenziale dell'acciaio del profilo	G	80769,23	[N/mm <sup>2</sup> ]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di resistenza	γ <sub>M0</sub>	1,05	[-]
Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di stabilità	γ <sub>M1</sub>	1,05	[-]



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere  
di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

Coefficiente parziale di sicurezza per le verifiche di rottura	$\gamma_{M2}$	1,25	[-]
<b>Geometria profilo</b>		HEM 800	
Altezza della sezione trasversale	h	814	[mm]
Larghezza della sezione trasversale	$b_f$	303	[mm]
Spessore dell'anima	$t_w$	21	[mm]
Spessore dell'ala	$t_f$	40	[mm]
Momento d'inerzia della sezione trasversale attorno all'asse forte	$I_y$	4,43E+09	[mm <sup>4</sup> ]
Modulo di resistenza elastico attorno all'asse forte	$W_{el,y}$	10870000	[mm <sup>3</sup> ]
Modulo di resistenza plastico attorno all'asse forte	$W_{pl,y}$	12490000	[mm <sup>3</sup> ]
Area resistente a taglio nel piano dell'anima	$A_{V,z}$	19430	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Resistenza a taglio</b>			
Area resistente a taglio in direzione parallela all'anima	$A_{Vz,eff}$	19430	[mm <sup>2</sup> ]
Resistenza plastica a taglio in direzione parallela all'anima	$V_{pl,z,Rd}$	3793	[kN]
Verifica a taglio - torsione in direzione parallela all'anima	FS	<b>1,18</b>	<b>OK</b>
<b>Resistenza a flessione</b>			
Modulo di resistenza di calcolo attorno all'asse maggiore	$W_y$	12490000	[mm <sup>3</sup> ]
Resistenza a flessione attorno all'asse maggiore	$M_{cy,Rd}$	4223	[kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse maggiore	FS	<b>1,58</b>	<b>OK</b>
<b>Resistenza combinata per flessione e taglio</b>			
Fattore di riduzione per la presenza della forza di taglio parallela all'anima	$\rho_{Vz,red}$	0,476208	[-]
Resistenza a flessione ridotta, attorno all'asse maggiore	$M_{Vy,Rd}$	3767	[kNm]
Verifica flessionale attorno all'asse maggiore	FS	<b>1,41</b>	<b>OK</b>



## 8.7 Stabilità globale

Il fattore di sicurezza relativo alla stabilità globale è valutato sia nella fase di breve termine che di lungo termine. L'analisi è stata condotta con la combinazione A2-M2 applicando i fattori di riduzione dei parametri in accordo al punto 6.5.3.1.2 delle NTC.

Lo spostamento di tre punti lungo la paratia viene monitorato: uno in testa, uno al fondo scavo ed uno al piede.

- **Breve termine**

Il fattore di sicurezza ottenuto è pari a 1.98.

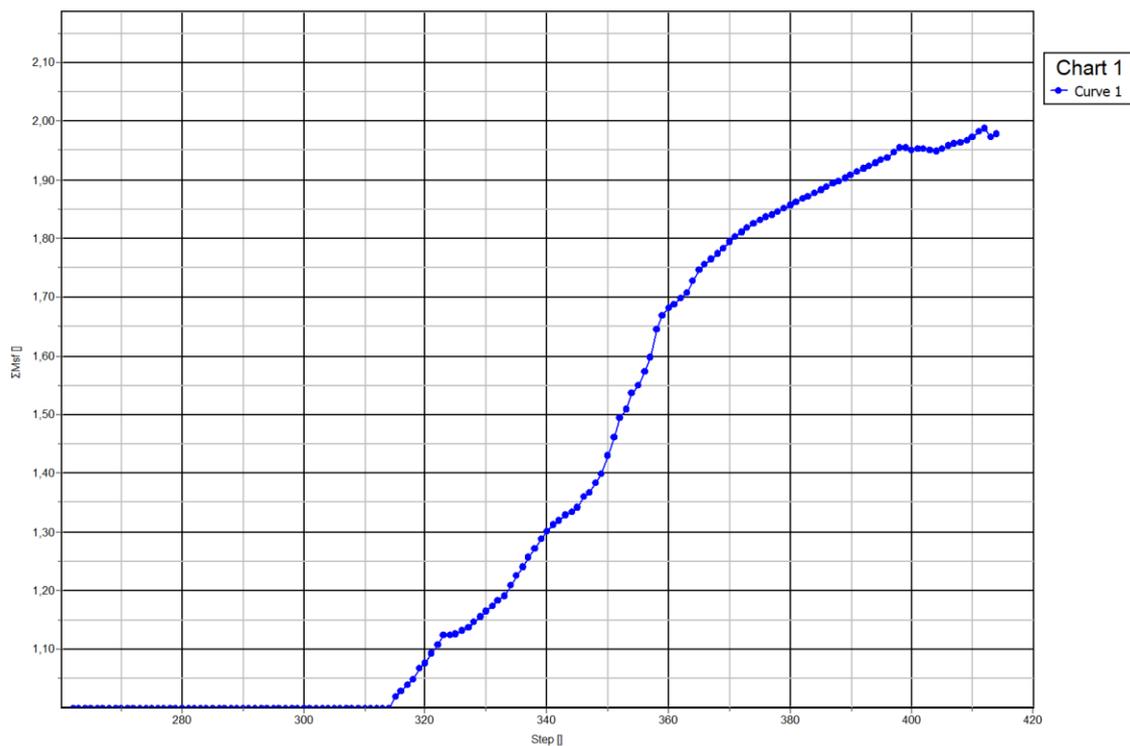
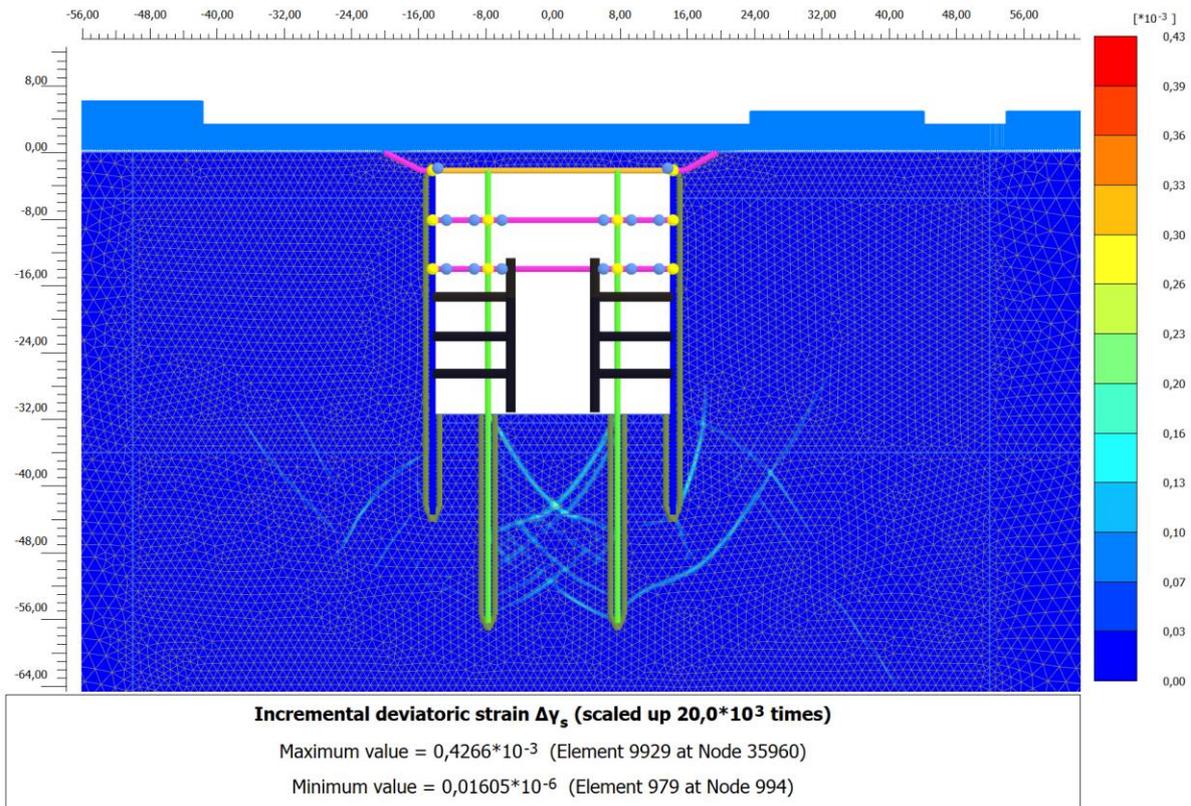


Figura 19. Fattore di sicurezza nella fase costruttiva



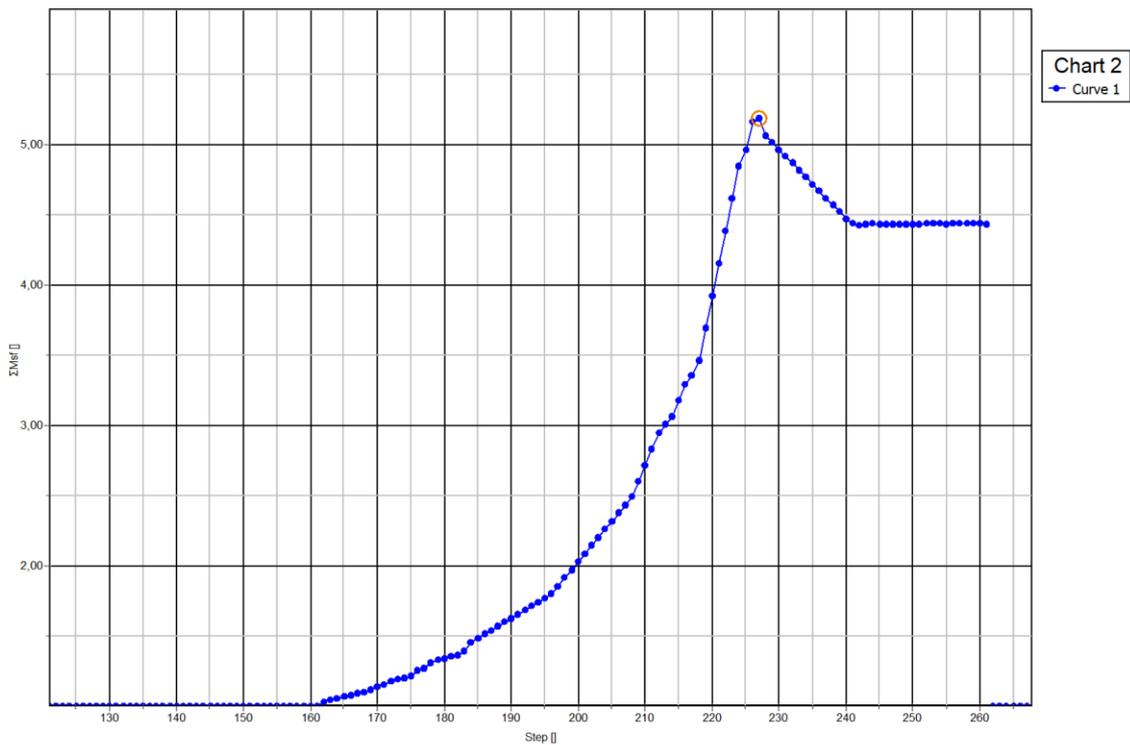
**Figura 20. Rapporto tra tensione tangenziale massima e tensione tangenziale mobilitata – breve termine**

La Figura 20 mostra il rapporto tra tensione tangenziale limite e tensione tangenziale agente in corrispondenza dello step di calcolo a fondo scavo (più critico ai fini di questa analisi).

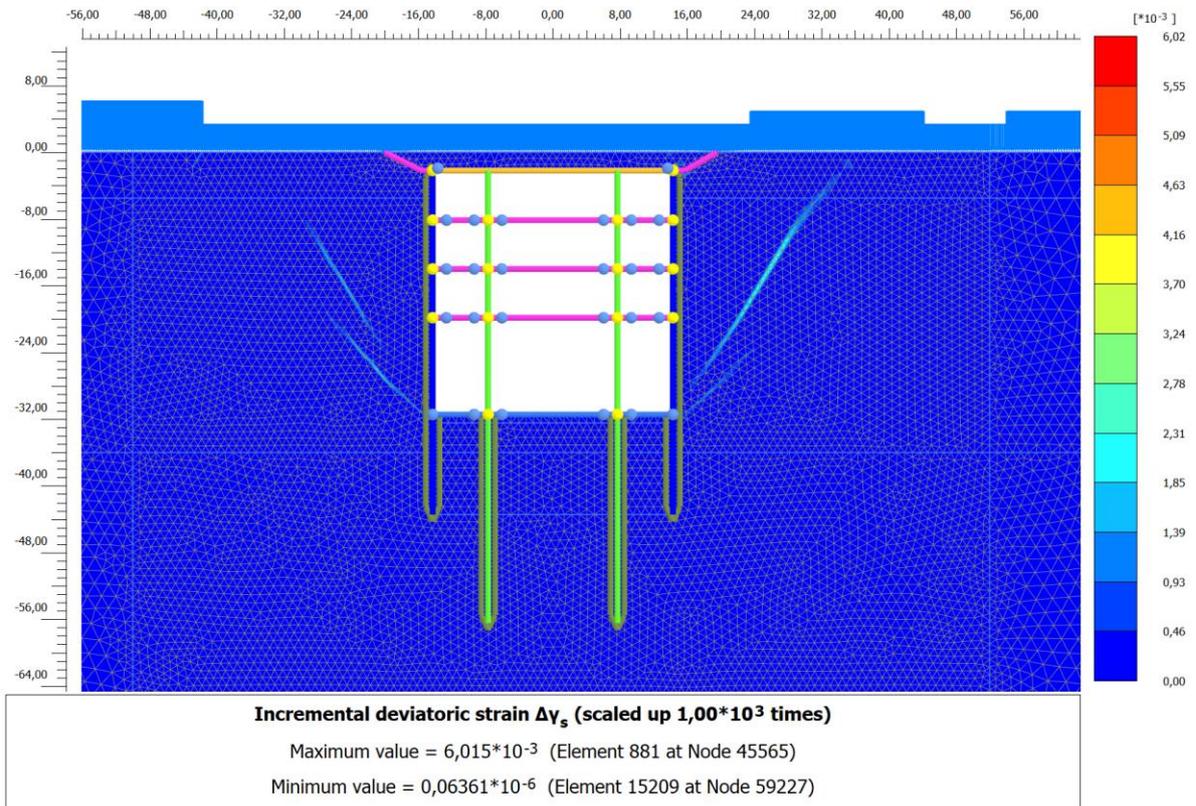


- **Lungo termine**

Il fattore di sicurezza ottenuto è maggiore di 4,4.



**Figura 21. Fattore di sicurezza a lungo termine**



**Figura 22. Rapporto tra tensione tangenziale massima e tensione tangenziale mobilitata – lungo termine**

La Figura 22 mostra il rapporto tra tensione tangenziale limite e tensione tangenziale agente in corrispondenza dell'ultimo step di calcolo. L'output fornisce indicazioni riguardo la mobilitazione delle spinte limite sulla parete.

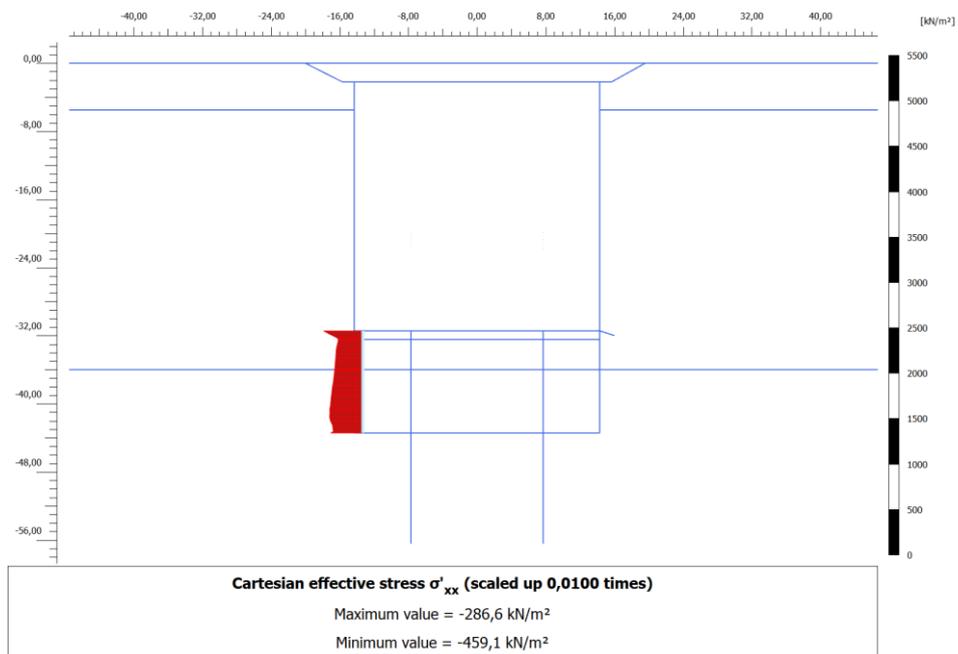
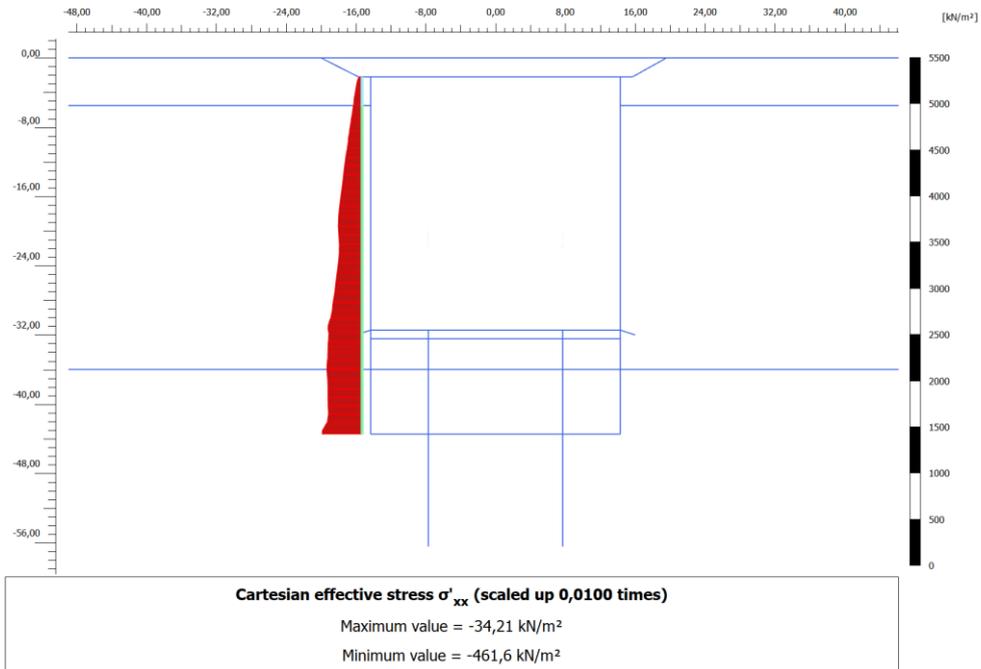


Figura 23. Tensioni orizzontali efficaci paratia

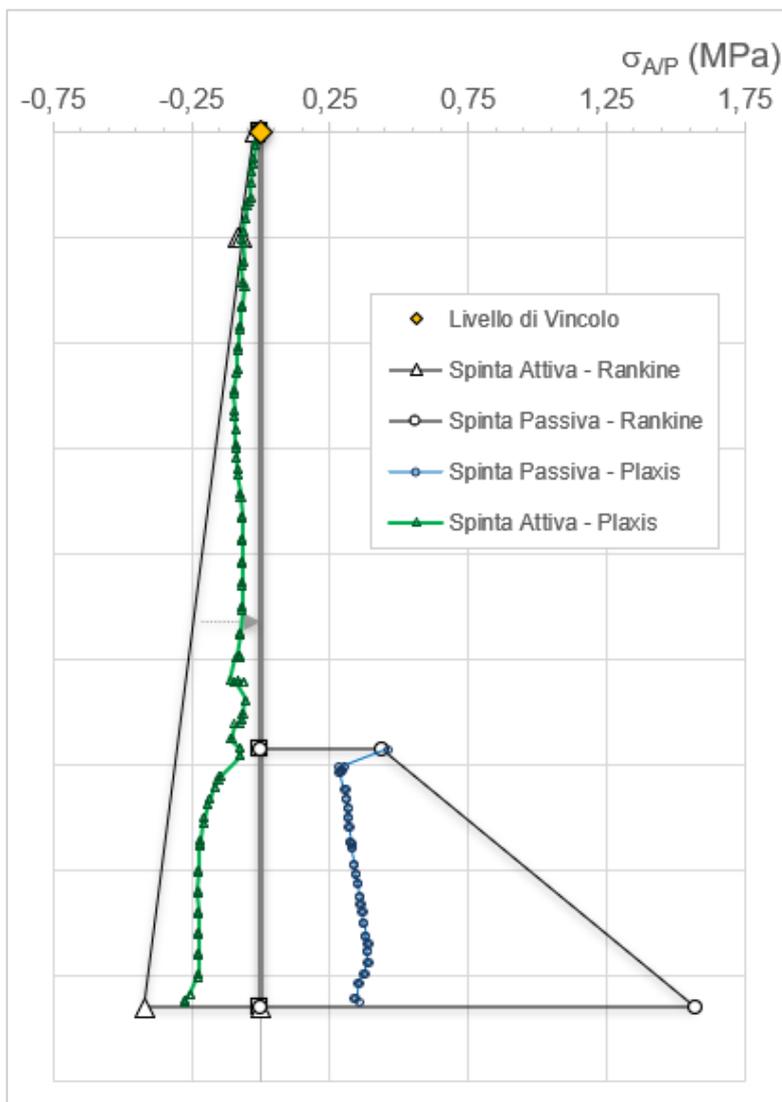


Figura 24. Confronto tensione limite attive e passive con tensioni orizzontali Plaxis

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



### 8.8 Verifica a galleggiamento

		Forze stabilizzanti - Peso			
<b>Ritombamento</b>		H = 1,42 m	S = 1,2 m	<b>Soletta copertura</b>	
Altezza di calcolo	H <sub>calc</sub> = 0 m	H = 42 m	Altezza = 0,8 m		H = 2196 m <sup>2</sup>
Area	A = 2196 m <sup>2</sup>	L = 207 m	Area = 25 kN/m <sup>3</sup>		A = 25 kN/m <sup>3</sup>
Peso per unita' di volume	γ = 18 kN/m <sup>3</sup>	γ = 25 kN/m <sup>3</sup>	Peso per unita' di volume		γ = 43920 kN
Peso ritombamento	W <sub>rit</sub> = 0 kN	W <sub>Daf</sub> = 260820 kN	Peso strutturale		W <sub>cap,nonstr</sub> = 4392 kN
<b>Solette intermedie</b>		<b>Banchine</b>		<b>Pilastri</b>	
Numero	n = 3	Area soletta banchina x 2	A = 1298 m <sup>2</sup>	Area pilastri tipo 1	A <sub>1</sub> = 2,64 m <sup>2</sup>
Altezza	H = 1,0 m	Spessore soletta banchina	s = 0,3 m	Numero pilastri tipo 1	n <sub>1</sub> = 10
Area	A = 1748 m <sup>2</sup>	Peso per unita' di volume	γ = 25 kN/m <sup>3</sup>	Area pilastri tipo 2	A <sub>2</sub> = 3,4 m <sup>2</sup>
Percentuale vuoti	%v = 30 %	Peso strutturale	W <sub>Sol,Str</sub> = 9735 kN	Numero pilastri tipo 2	n <sub>2</sub> = 2
Area di calcolo	A <sub>calc</sub> = 1223,6 m <sup>2</sup>	Peso non strutturale (10%)	W <sub>Sol,nonstr</sub> = 974 kN	Altezza	H = 24,5 m
Peso per unita' di volume	γ = 25 kN/m <sup>3</sup>	Muri sotto banchina	L = 198 m	Peso per unita' di volume	γ = 25 kN/m <sup>3</sup>
Peso strutturale	W <sub>Str,Str</sub> = 91770 kN	Spessore muri banchina	s = 0,8 m	Peso strutturale	W <sub>Str,Str</sub> = 20286 kN
Peso non strutturale (10%)	W <sub>Str,nonstr</sub> = 9177 kN	Peso strutturale	W <sub>Mur,Str</sub> = 3960 kN	<b>Fodere</b>	
<b>Soletta di base</b>		<b>Fodere piana banchina</b>		Altezza = 11 m	
Altezza	H = 2,1 m	Altezza	H = 9,65 m	Spessore	s = 0,6 m
Area	A = 1748 m <sup>2</sup>	Spessore	s = 0,8 m	Lunghezza	L = 198 m
Peso per unita' di volume	γ = 25 kN/m <sup>3</sup>	Lunghezza	L = 198 m	Peso per unita' di volume	γ = 25 kN/m <sup>3</sup>
Peso strutturale	W <sub>cap,Str</sub> = 91770 kN	Peso per unita' di volume	γ = 25 kN/m <sup>3</sup>	Peso strutturale	W <sub>Fod,Str</sub> = 32373 kN
Peso non strutturale (10%)	W <sub>cap,nonstr</sub> = 9177 kN	Peso strutturale	W <sub>Fod,nonstr</sub> = 38214 kN		



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

**Forze stabilizzanti - Attrito**

Angolo di attrito terreno	$\phi$	=	30 °
Angolo attrito muro-terreno	$\delta$	=	15 °
Peso per unita' di volume	$\gamma$	=	19,5 kN/m <sup>3</sup>
Coefficiente di spinta a riposo	$K_A$	=	0,33
Tensione normale media	$\sigma_N$	=	68,53 kPa
Resistenza attrito per unita' lungh		=	778,17 kN/m
Lunghezza diaframmi	L	=	207 m
Forza stabilizzante attrito	$F_{attr}$	=	161081 kN

**Forze instabilizzanti**

Fondo scavo	FEL	=	31,55 m da p.c.
Profondita' paratie	$H_{par}$	=	43,55 m da p.c.
H falda breve termine	$H_{w,Breve}$	=	15 m da p.c.
H falda lungo termine	$H_{w,Lungo}$	=	12 m da p.c.
Area soletta di fondo	$A_{sol}$	=	1748 m <sup>2</sup>
Area piede paratie	$A_{par}$	=	248,4 m <sup>2</sup>
<b>Spinta idraulica breve termine U breve</b>		=	<b>360212 kN</b>
<b>Incremento spinta a lungo ter <math>\Delta U</math> lungo</b>		=	<b>59892 kN</b>

**Verifica a galleggiamento a lungo termine**

Coefficiente parziale carichi permanenti favorevoli	$\gamma_{G,fav}$	=	0,9
Coefficiente parziale carichi permanenti sfavorevoli	$\gamma_{G,sfav}$	=	1,1
Coefficiente parziale carichi variabili sfavorevoli	$\gamma_{Q,sfav}$	=	1,5
Forze stabilizzanti di progetto (Peso+Attrito)	$V_{stab}$	=	699883 kN
Forze instabilizzanti di progetto	$V_{inst}$	=	486071 kN
Fattore di sicurezza	FS	=	<b>1,44 Verificato</b>

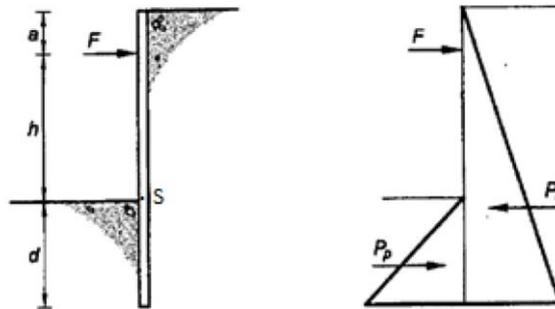


## 9. VALIDAZIONE DEI MODELLI ESEGUITI

I modelli di calcolo descritti nei paragrafi precedenti sono stati validati utilizzando un metodo classico per il calcolo di paratie contrastate. Il metodo è quello denominato *Free-Earth Support* (metodo della paratia con appoggio libero nel terreno) che prende in considerazione anche la presenza della falda ma è stato sviluppato in forma chiusa per un solo vincolo in testa.

Nel seguito, pertanto, verranno fatte alcune semplificazioni per rendere congruenti le sollecitazioni flettenti calcolate con le formule proposte in letteratura con il modello di calcolo sviluppato con il software Plaxis.

Il metodo Free Earth support, assume che la paratia sia rigida e che possa ruotare a livello dell'elemento di contrasto/ancoraggio, con una modalità di collasso per rotazione attorno al contrasto pensato fisso. La pressione passiva si sviluppa nel terreno antistante la paratia, mentre quella attiva si manifesta alle spalle della paratia stessa.



L'equilibrio alla rotazione, intorno al punto di applicazione della forza  $F$ , consente di determinare  $d$ , successivamente l'equilibrio alla traslazione orizzontale permette di determinare il valore della forza  $F$ .

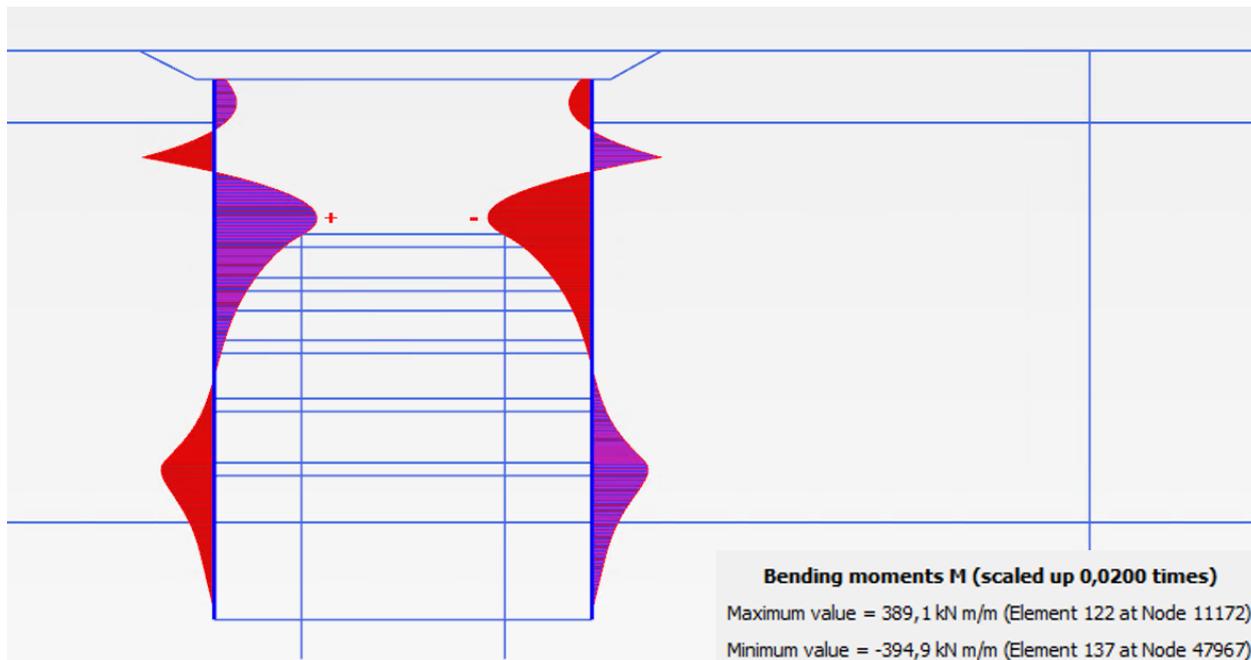
Nel seguito si riporta il calcolo effettuato attraverso il metodo semplificato dello Step di calcolo n. 10 del modello di calcolo effettuato con il software Plaxis (vedi Paragrafo 6.1), che prevede lo scavo fino a quota -14.00 m da p.c. sotto la soletta del piano 1° mezzanino, per la realizzazione della soletta. La quota di scavo inserita nel foglio di calcolo del modello semplificato è pari a 11.80 m (-14.00 m da p.c.) perché è misurata dalla quota di testa della Paratia ubicata a -2,20 m da p.c. Le caratteristiche geotecniche prevalenti sono quelle dell'Unità Geotecnica 2 (vedi Tabella 1), mentre il sovraccarico uniforme applicato a tergo della Paratia è pari a  $q = 20$  kPa. In questa fase di calcolo risulta già installata la soletta di copertura e la soletta piano atrio. Dato che in queste prime fasi di calcolo la soletta di copertura lavora poco, si considera la presenza della sola soletta del piano atrio ubicato a - 8.15 m da p.c. e quindi a 5.95 m da testa paratia. Nel seguito si riporta il foglio di calcolo utilizzato per la valutazione del momento massimo utilizzando il metodo

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

semplificato Free-Earth Support. Nel suddetto foglio di calcolo sono indicati anche i valori delle spinte del terreno e del sovraccarico a tergo della paratia e la reazione dell'elemento di contrasto.

Metodo Free Earth Support		
Geometria Stazione e dati di input		
Quota fondo scavo H	m (da testa paratia)	11,80
$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	19,0
Ka	-	0,260
Kp	-	3,852
q	kPa	20
Quota Puntone	m (da testa paratia)	5,95

P1 [kPa]	29,35	Pressione della spinta attiva al livello della soletta atrio (Punto F)
S1 [kN]	87,32	Spinta attiva del terreno sopra il livello soletta atrio
P_Scavo [Kpa]	58,21	Pressione della spinta attiva al livello fondo scavo tergo paratia (Punto S)
Dist. S1_F [m]	1,98	Distanza dal punto di applicazione S1 e Punto F
SPr1 [kN]	171,70	Spinta attiva rettangolare tratto FS (rettangolare)
Dist. SPr1_F [m]	2,93	Distanza dal punto di applicazione SPr1 e Punto F
SPT1 [kN]	84,40	Spinta attiva triangolare tratto FS (triangolare)
Dist. SPT1_F [m]	3,90	Distanza dal punto di applicazione SPT1 e Punto F
PaO [kPa]	71,45	Pressione Attiva del terreno fino al livello O
PpO [kPa]	196,49	Pressione Passiva del terreno fino al livello O
SPd [kN]	263,78	Spinta Passiva del terreno fino al livello d
Dist. SPd_F [m]	7,64	Distanza dal punto di applicazione SPd e SAd e Punto F
SAd [kN]	156,28	Spinta Attiva del terreno fino al livello d (rettangolare)
Dist. Sad_F [m]	7,19	Distanza dal punto di applicazione SAd e Punto F
Std [kN]	17,78	Spinta Attiva del terreno fino al livello d (triangolare)
Sq [kPa]	75,21	Componente carico accidentale
Dist. qF [m]	1,29	Distanza dal punto di applicazione Sq e Punto F
d [m]	2,68	Distanza d determinato dall'equilibrio rotazionale attorno il punto di applicazione di F
F [kN]	328,90	Forza assiale nel puntone (soletta Atrio) dato dall'equilibrio delle forze orizzontali (Sa e Sp)
M [kNm]	<b>346,01</b>	Momento flettente nella paratia calcolato al livello di taglio nullo



Il momento massimo si manifesta in corrispondenza del punto di taglio nullo. In questo caso si assume che il momento massimo si trovi tra la quota della falda e la linea del fondo scavo, in analogia a quanto calcolato con il modello di calcolo effettuato con il Software Plaxis. Nel seguito si riporta il momento massimo calcolato con il metodo Free-Earth Support.

Momento flettente massimo [kNm]		Variazione [%]
Plaxis	Free-Earth Support	
392 (media dei massimi)	346	11.70

I momenti calcolati con il metodo semplificato risultano essere circa 12% inferiore al valore calcolato con il software Plaxis che risulta essere più preciso nel calcolo degli effetti del sovraccarico sui primi metri della Paratia e quindi più cautelativo del metodo semplificato. Si ritiene che il modello di calcolo sia corretto dal punto di vista delle condizioni al contorno impostate e dal punto di vista del calcolo svolto.

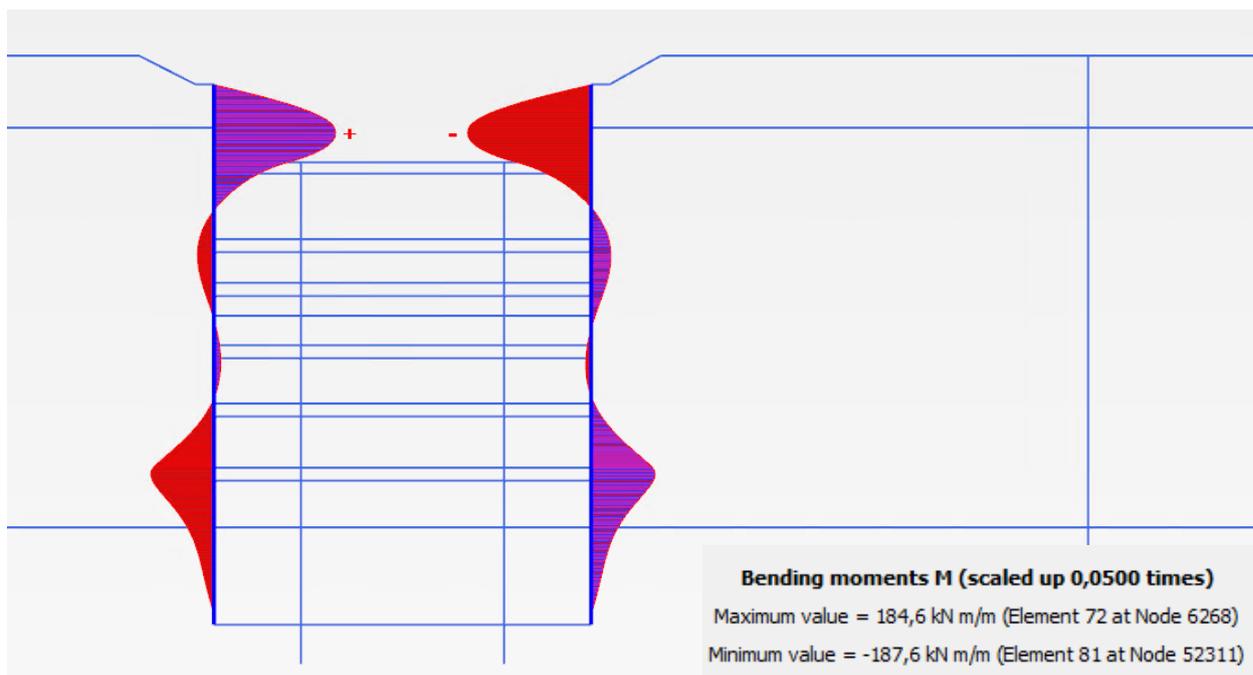
 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## **ALLEGATO N.1**

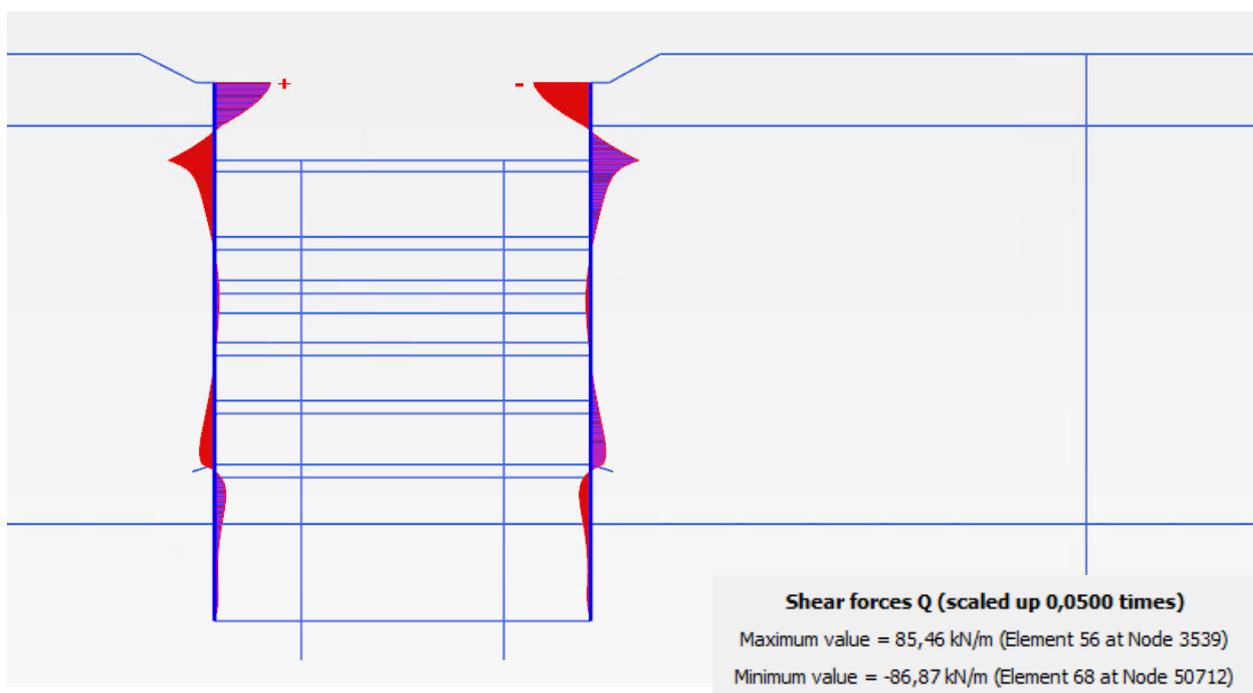
### **Risultati delle analisi numeriche**



Scavo 1 – Momento flettente

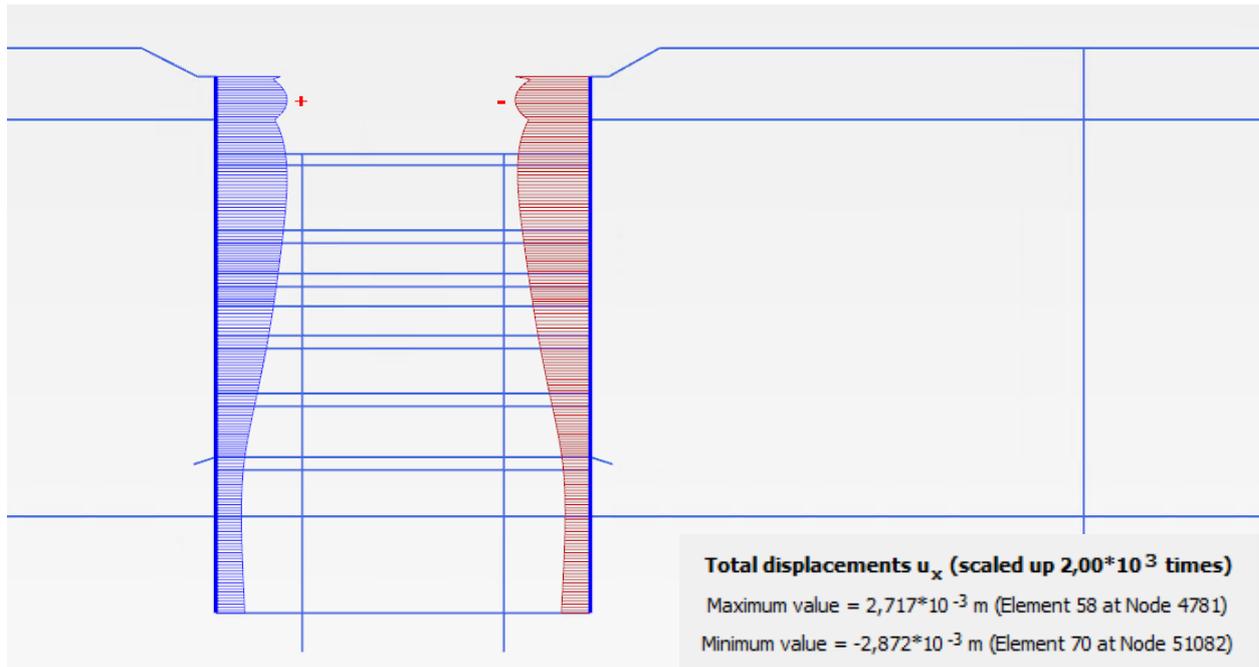


Scavo 1 – Taglio

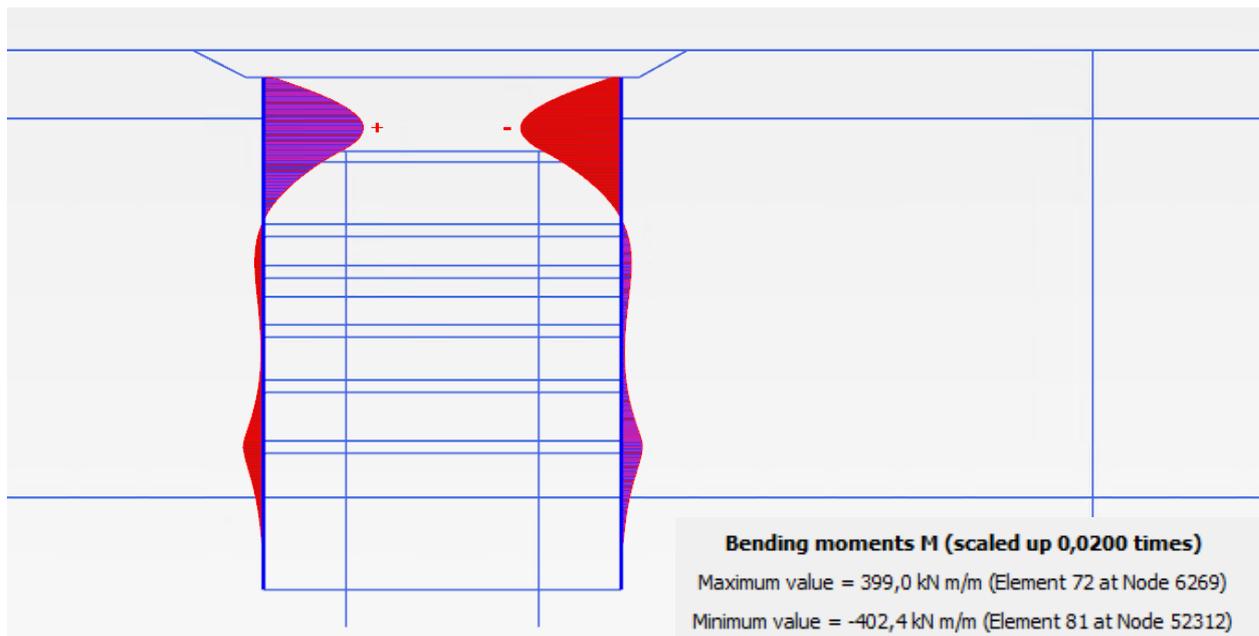




### Scavo 1 – Spostamenti orizzontali

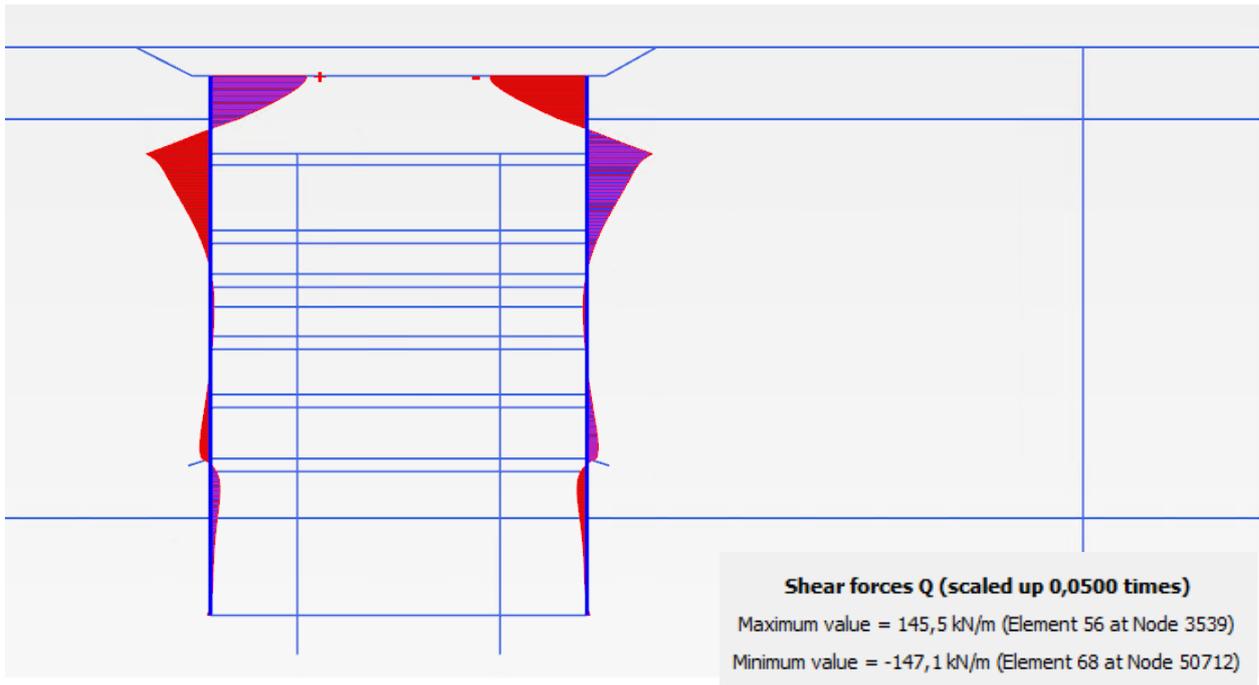


### Top filling – Momento flettente

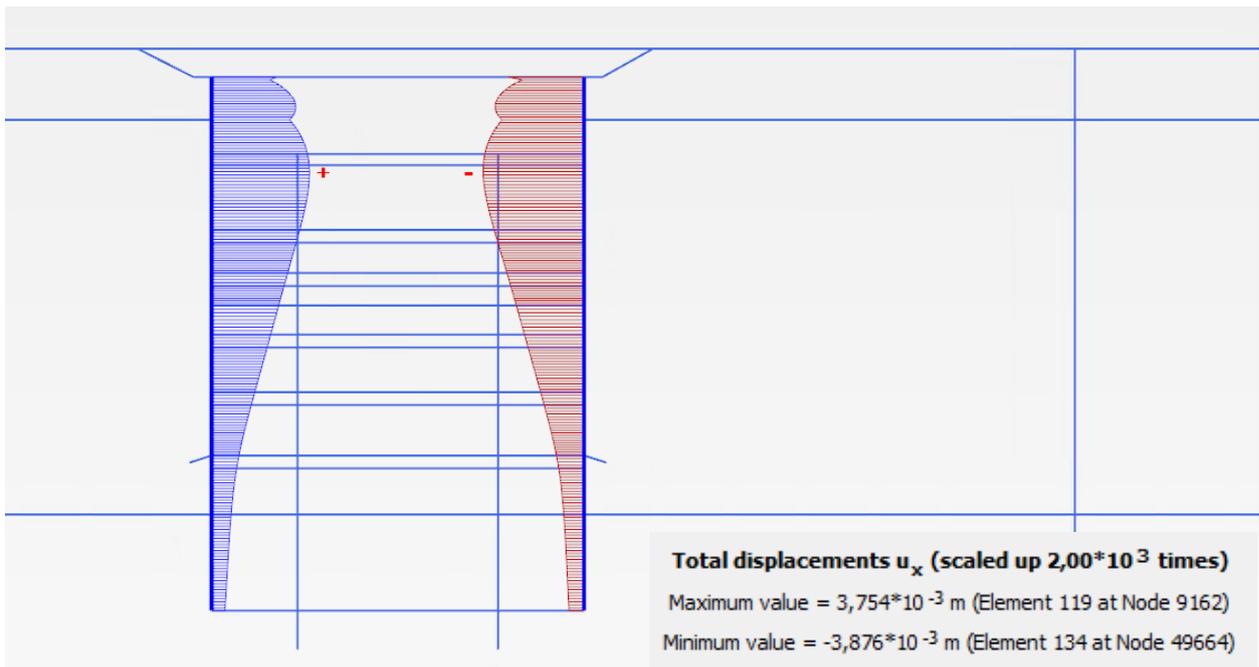




Top filling – Taglio

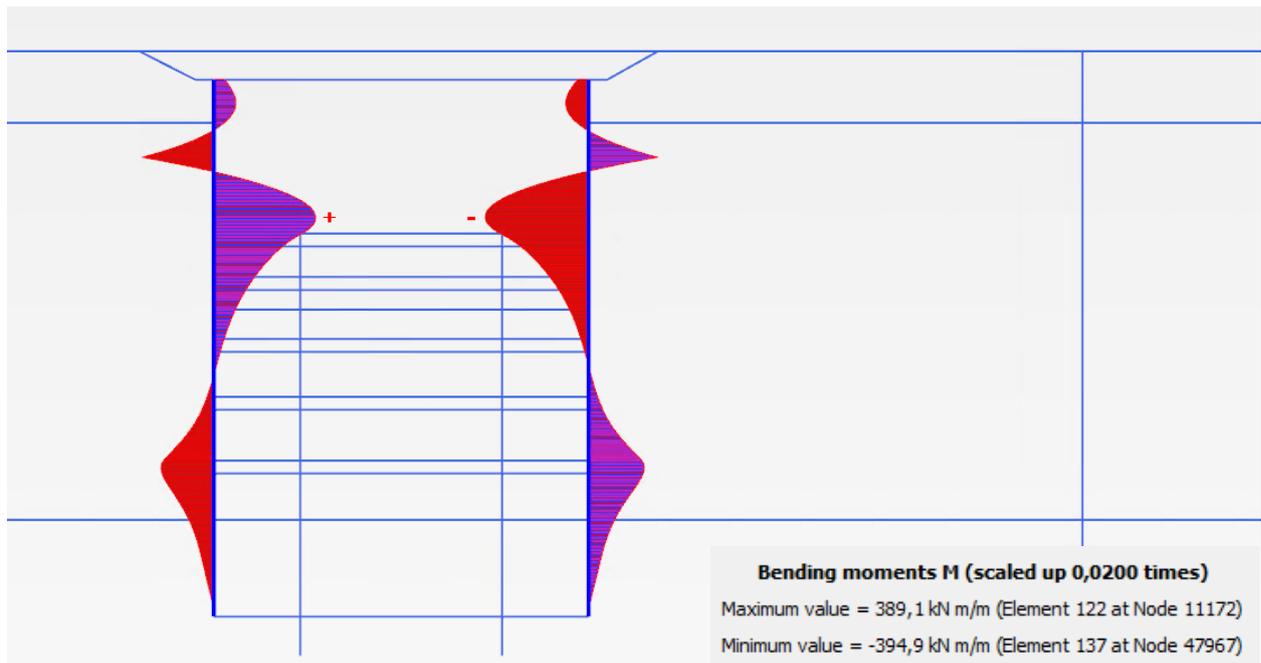


Top filling – Spostamenti orizzontali

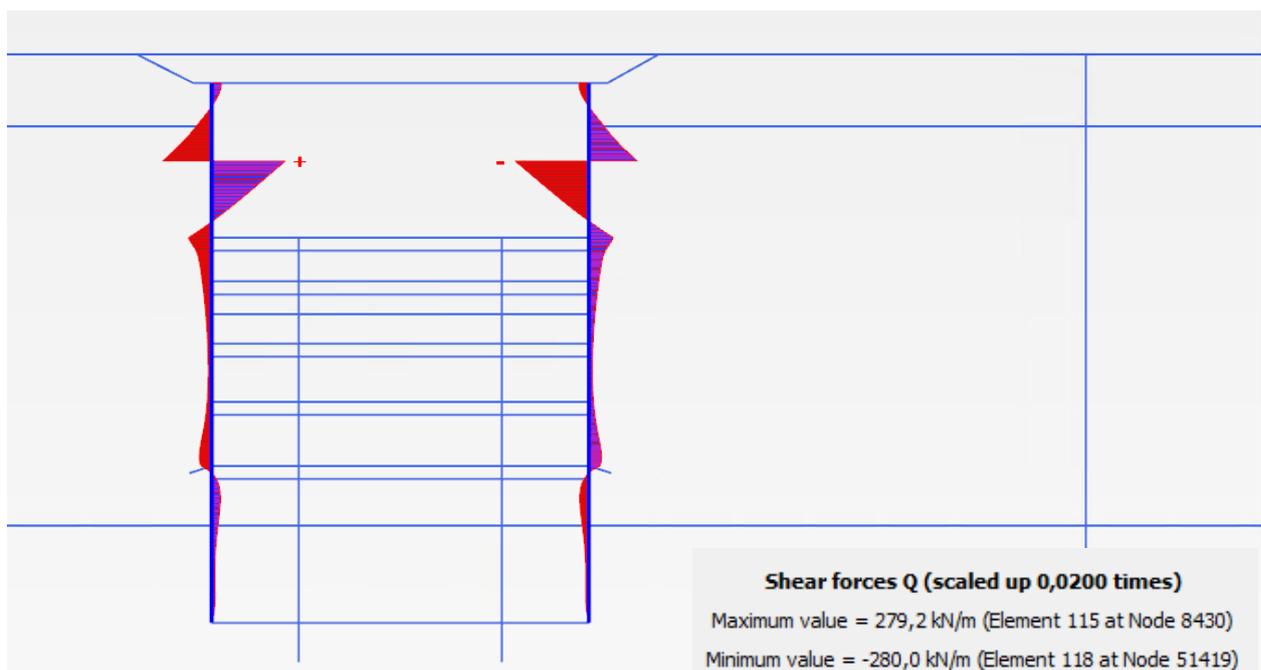




Scavo 2 – Momento flettente

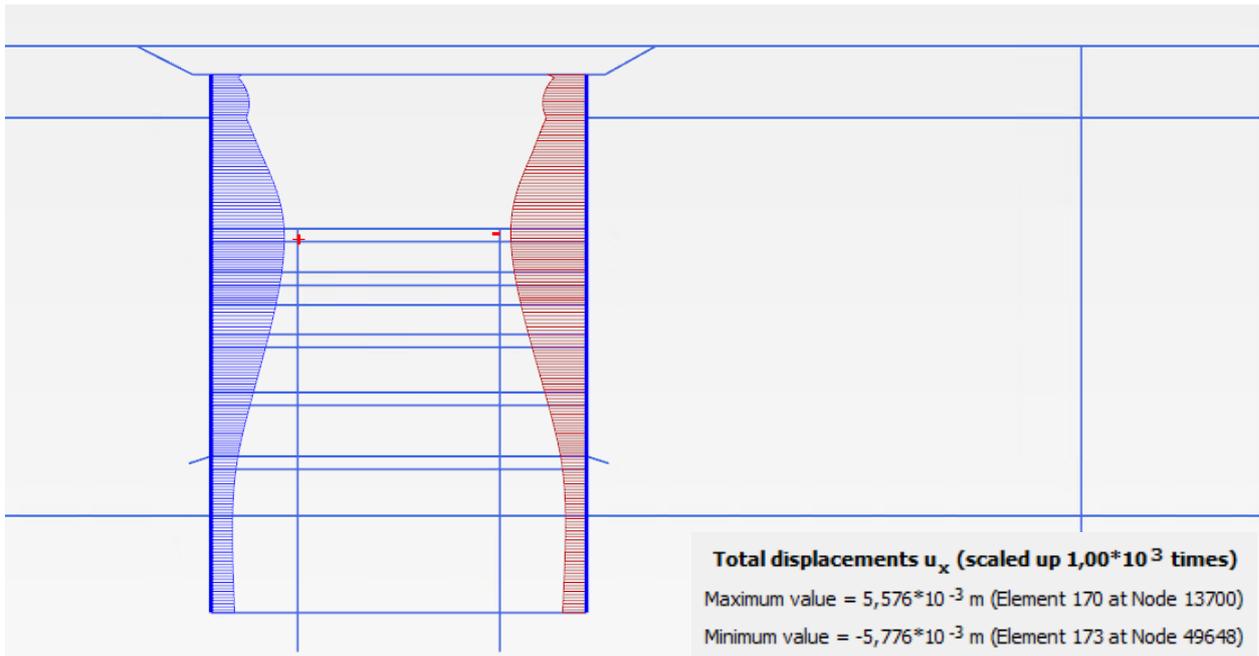


Scavo 2 – Taglio

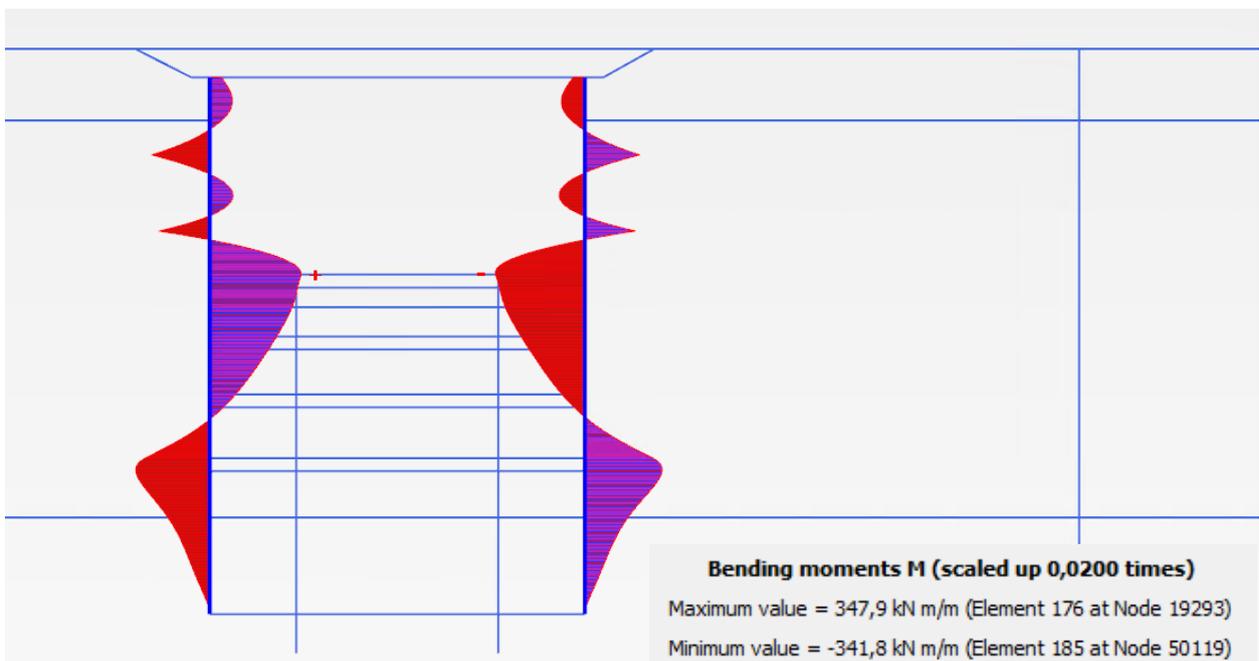




### Scavo 2 – Spostamenti orizzontali

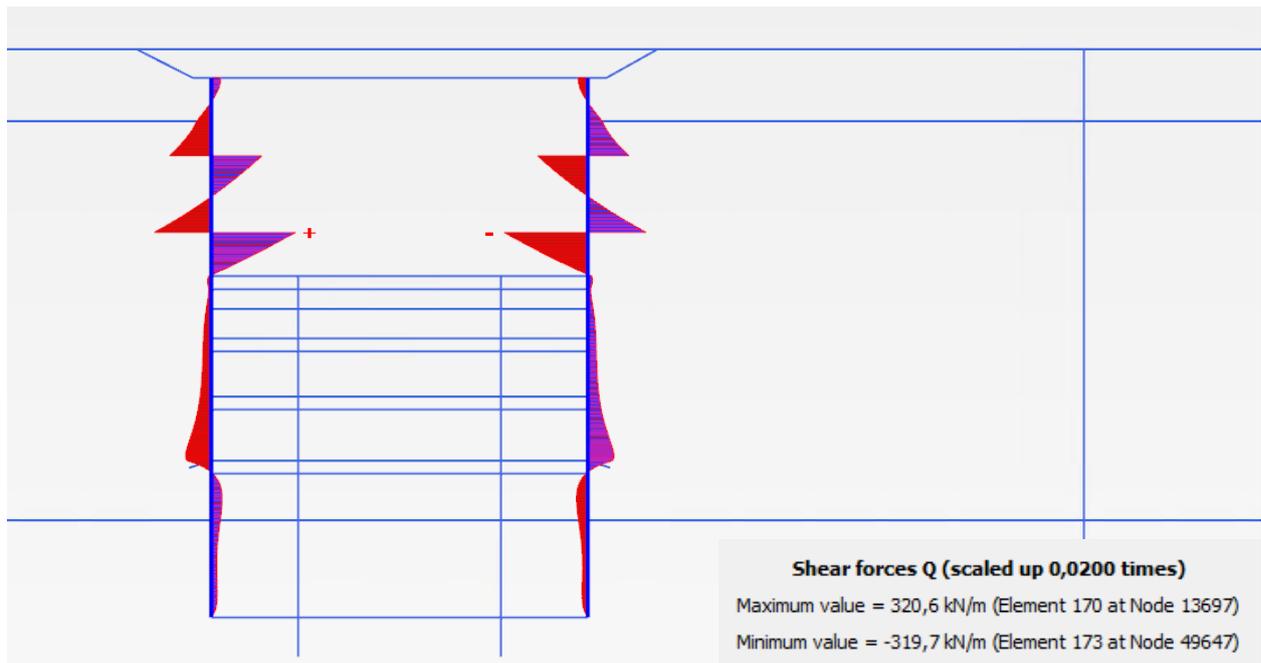


### Scavo 3 – Momento flettente

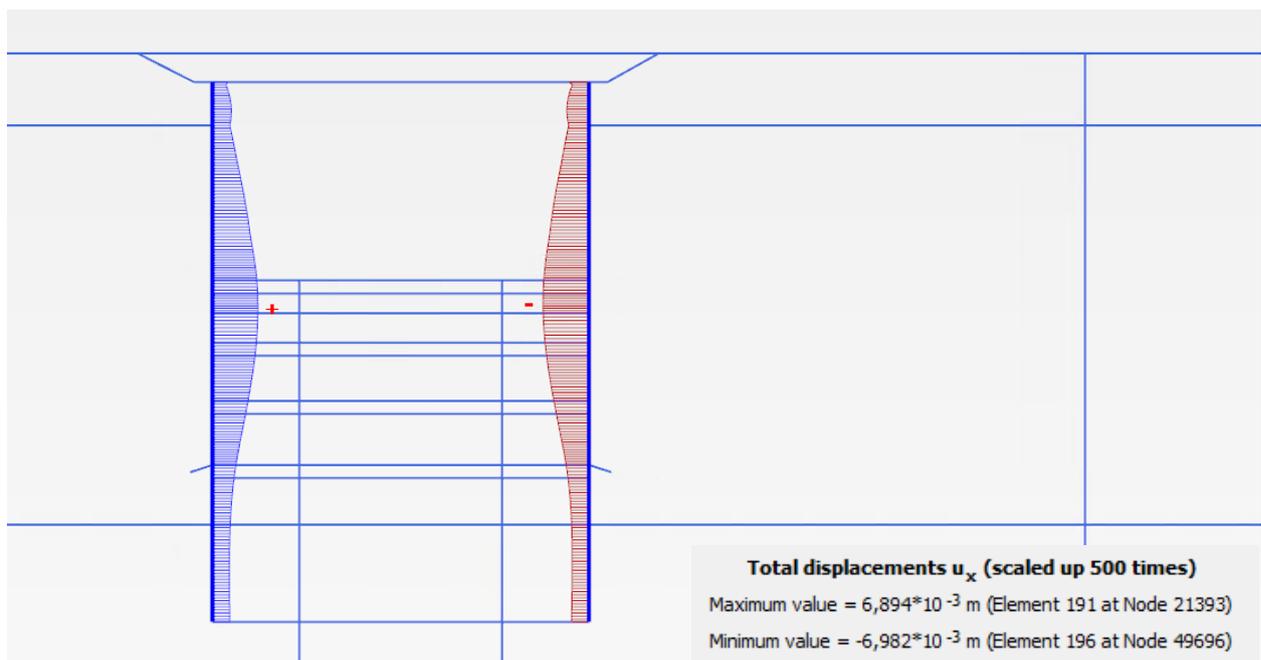




### Scavo 3 – Taglio

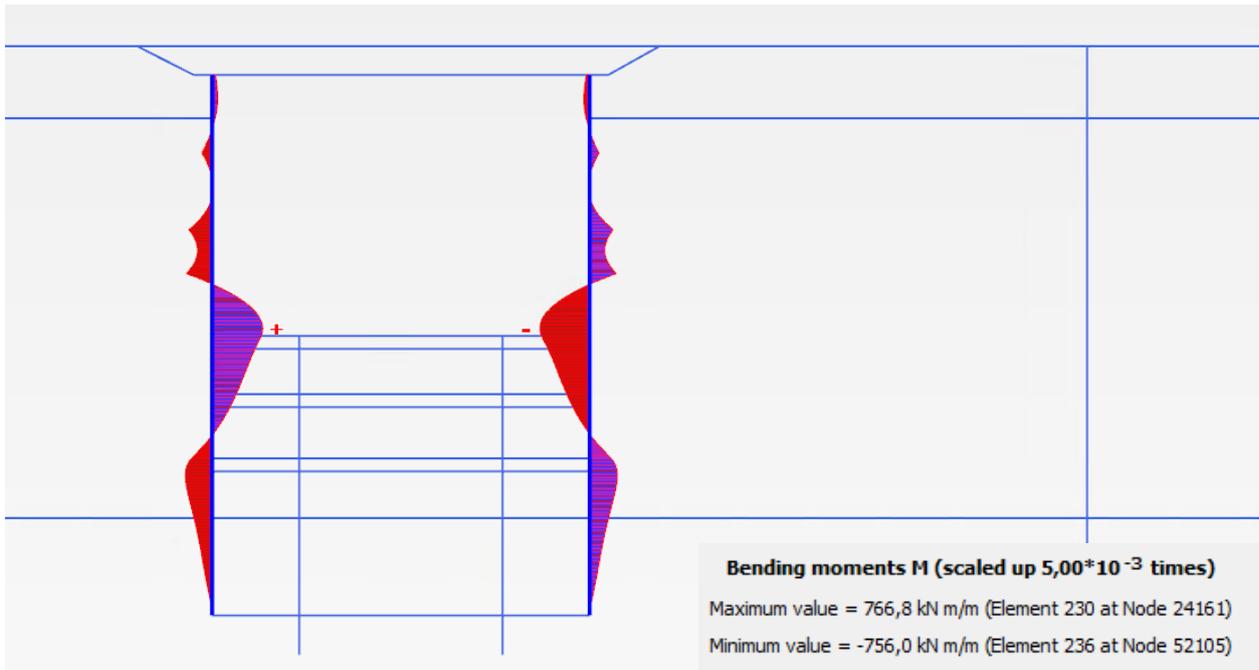


### Scavo 3 – Spostamenti orizzontali

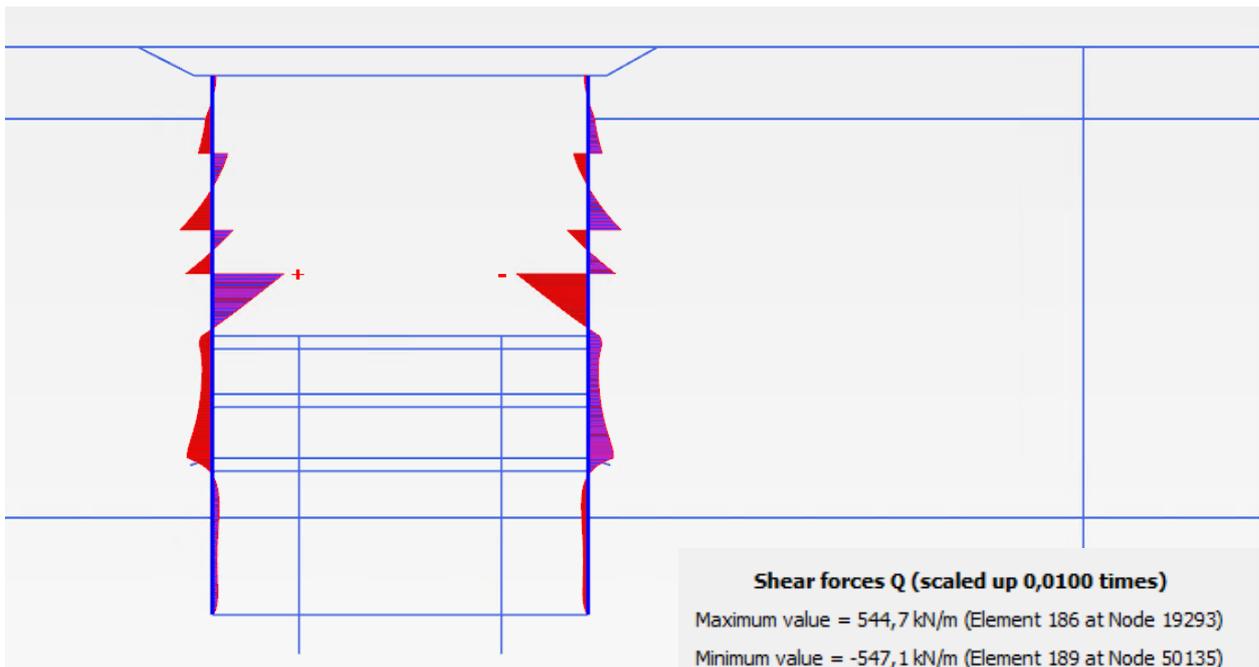




Scavo 4 – Momento flettente

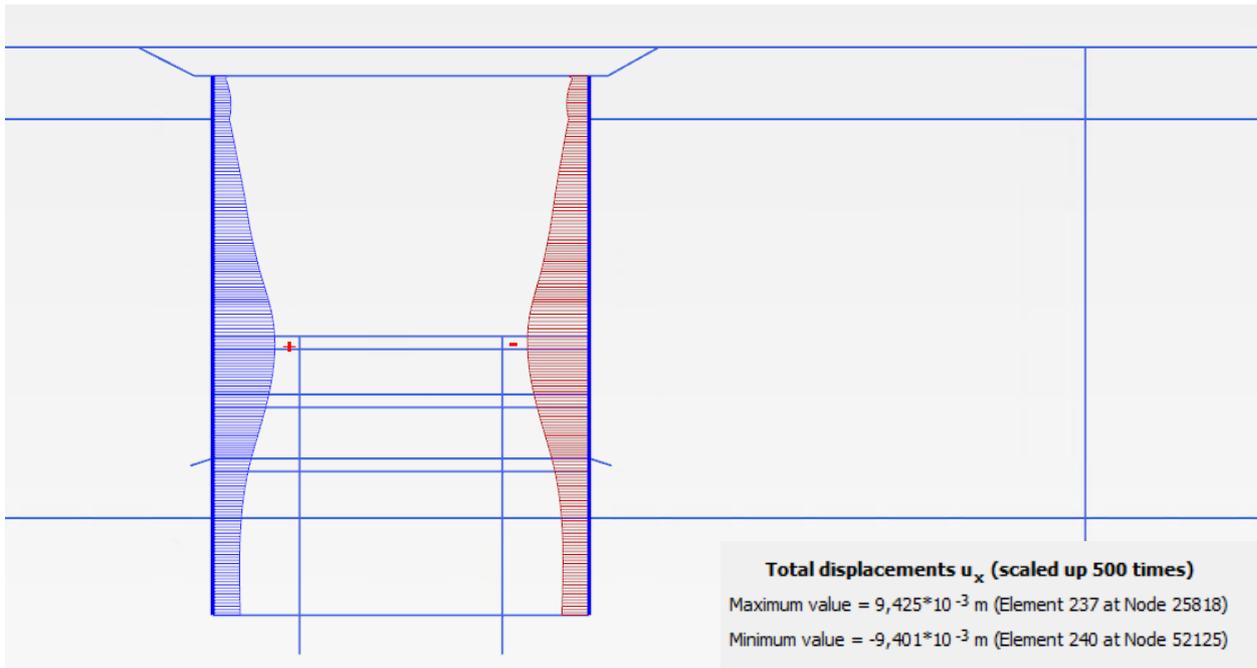


Scavo 4 – Taglio

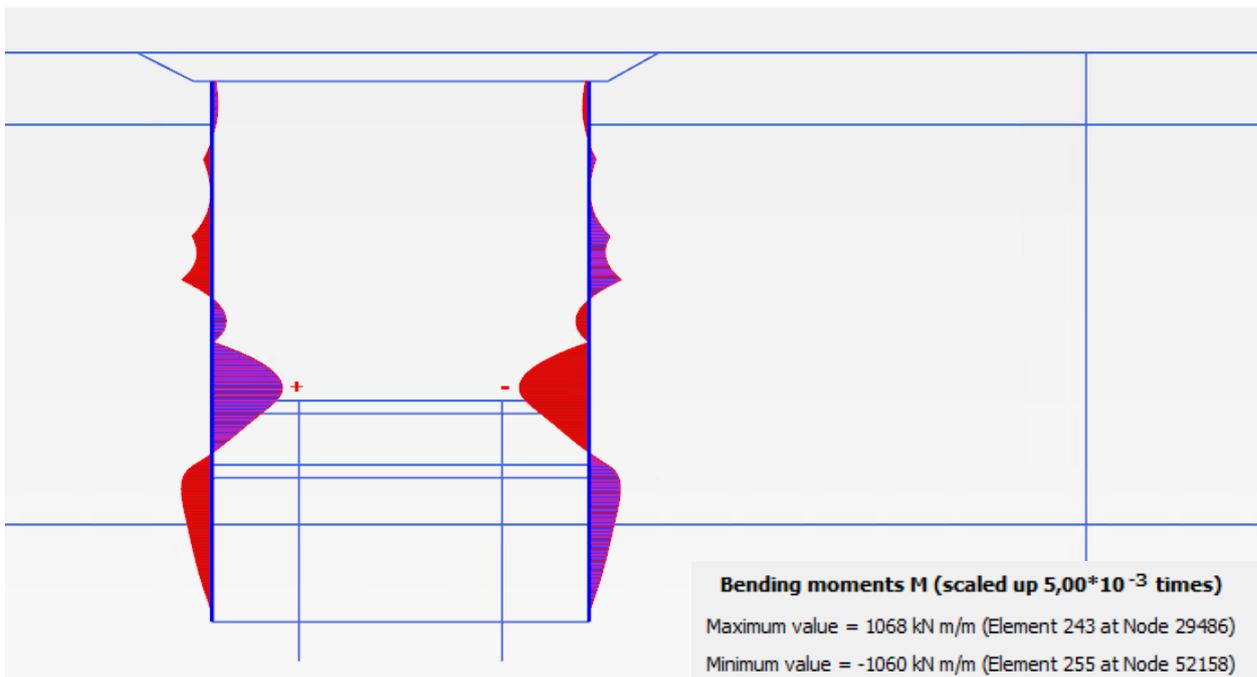




### Scavo 4 – Spostamenti orizzontali

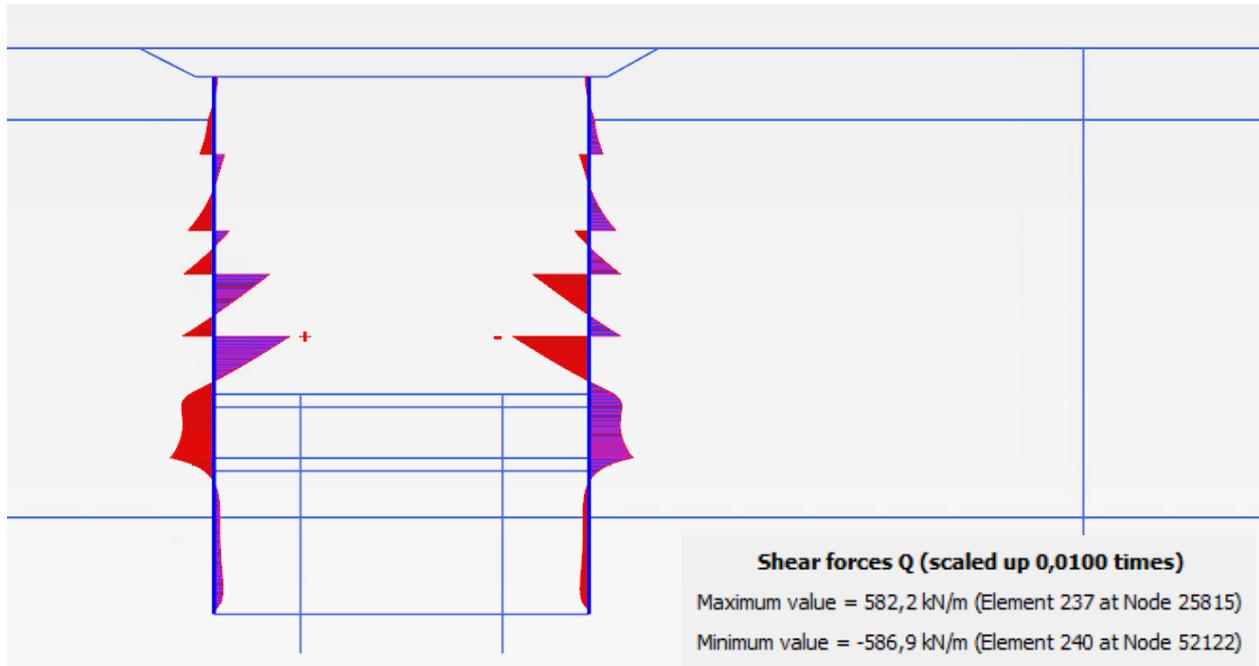


### Scavo 5 – Momento flettente

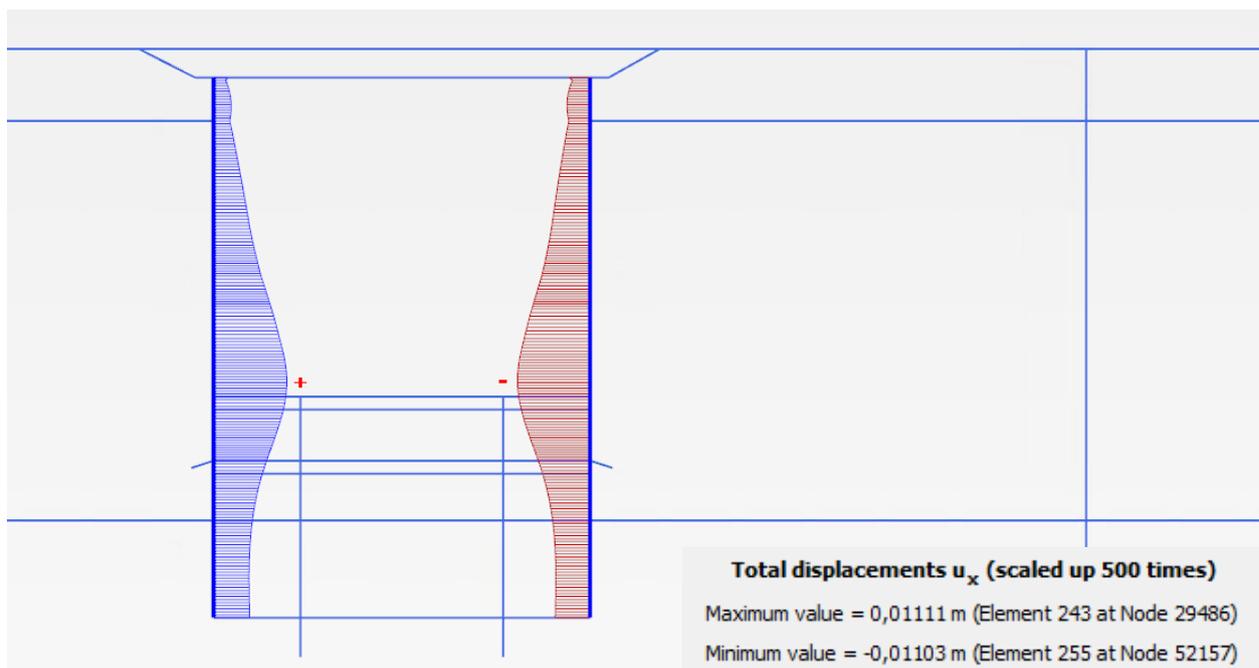




### Scavo 5 – Taglio

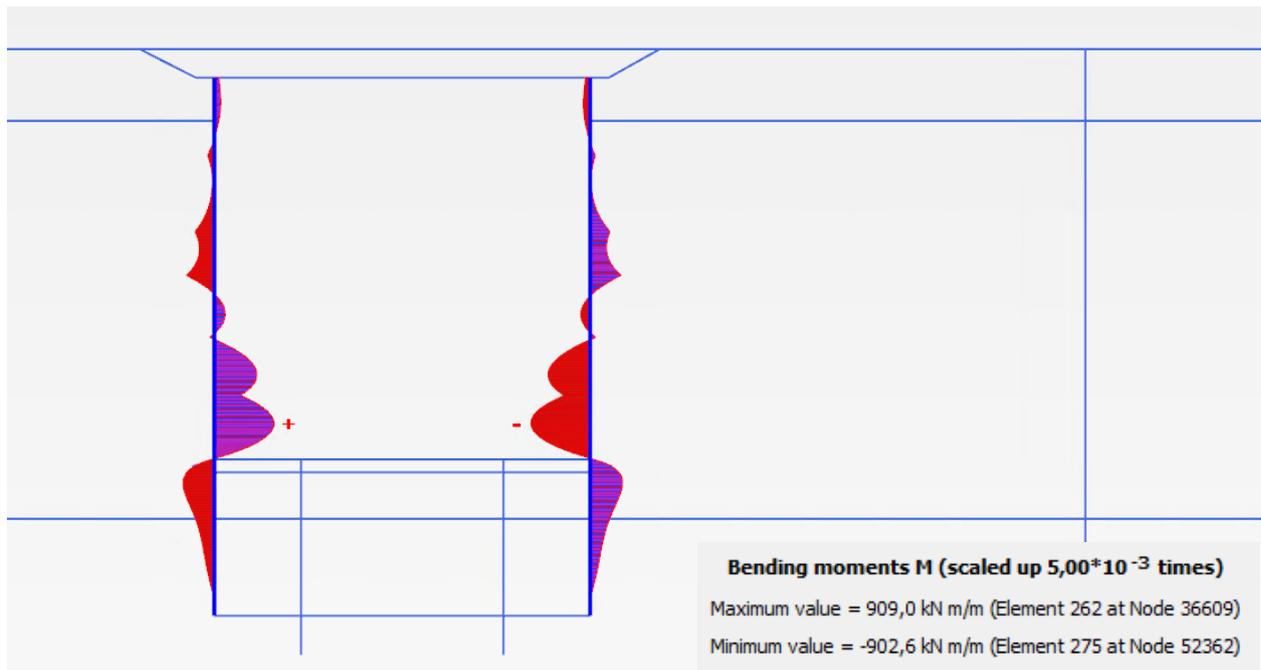


### Scavo 5 – Spostamenti orizzontali

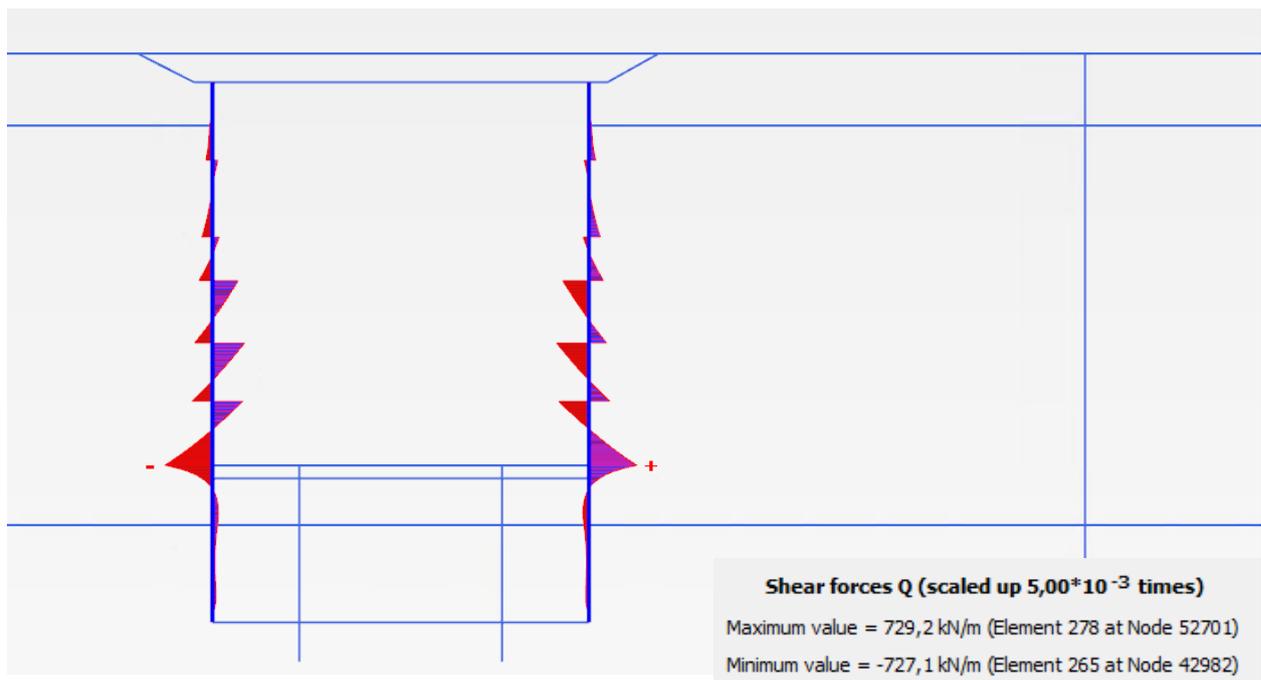




Scavo 6 – Momento flettente

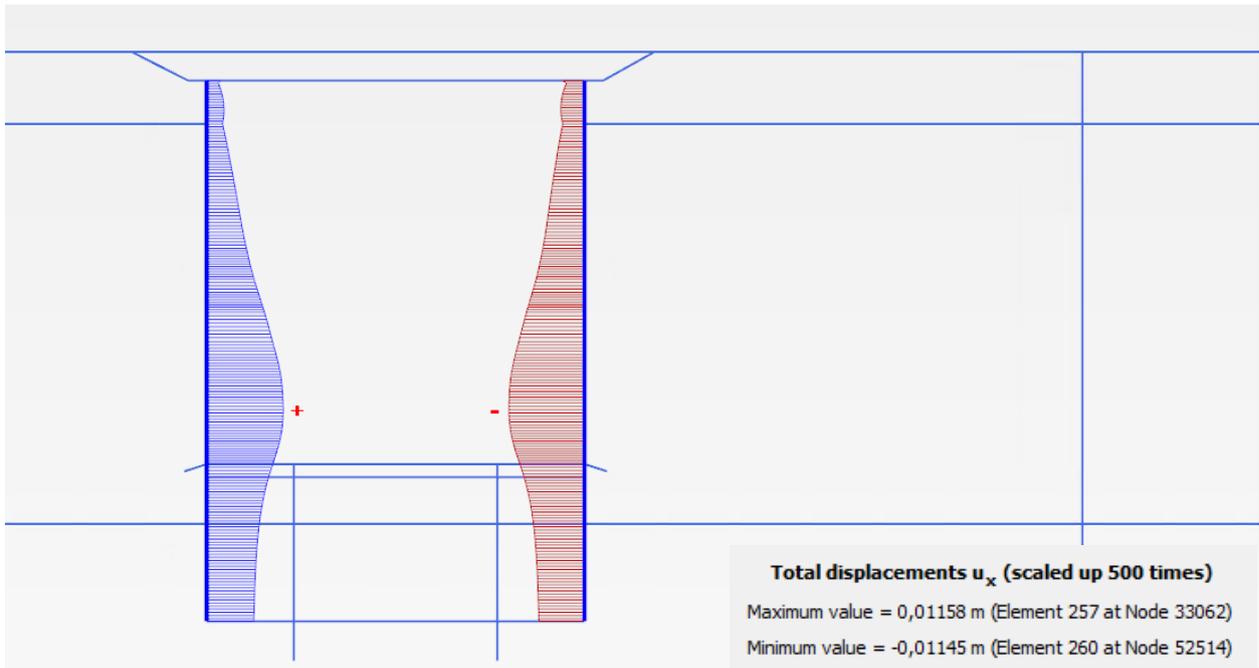


Scavo 6 – Taglio

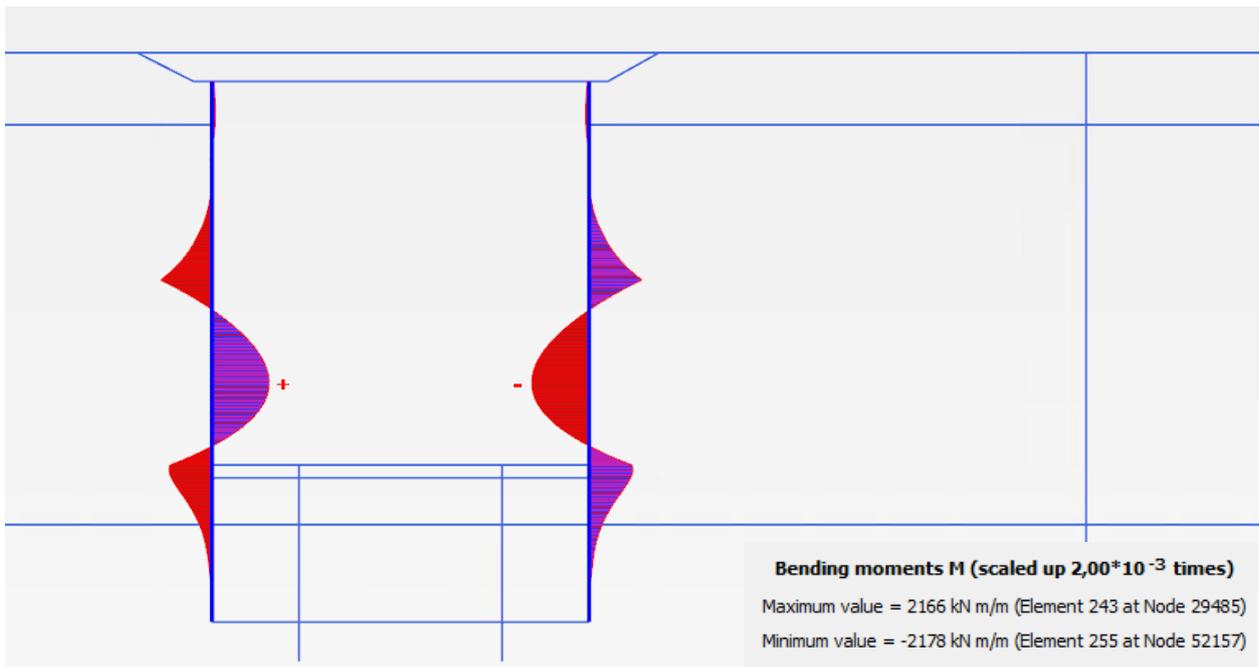




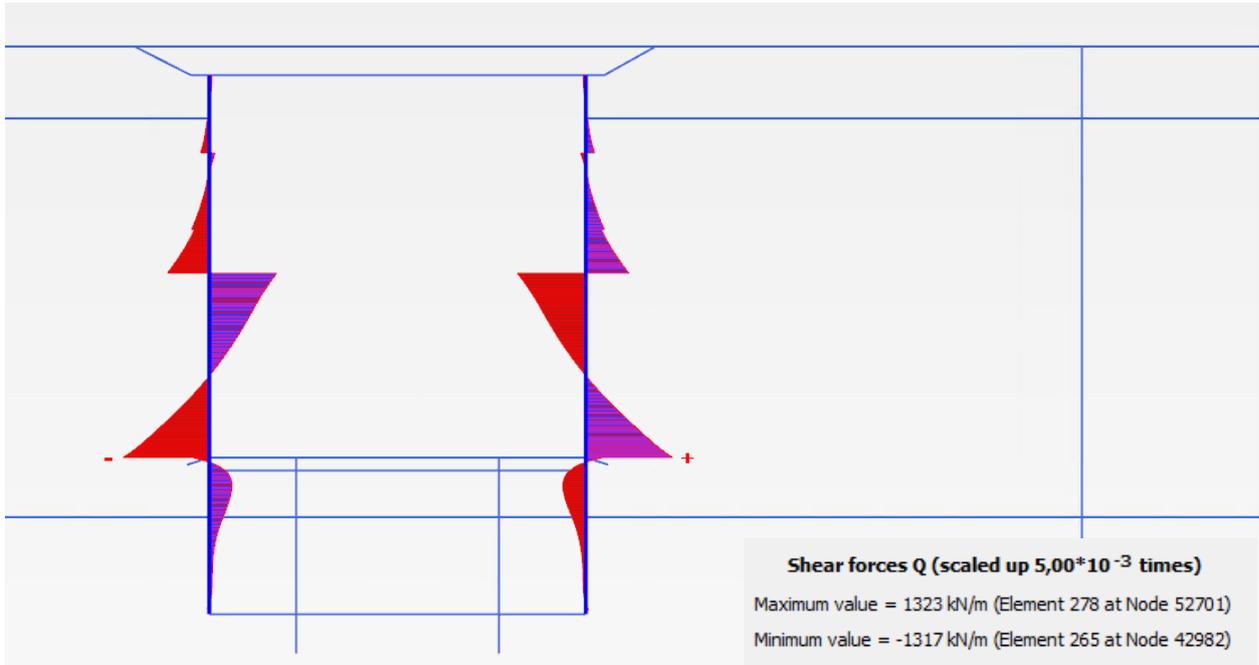
### Scavo 6 – Spostamenti orizzontali



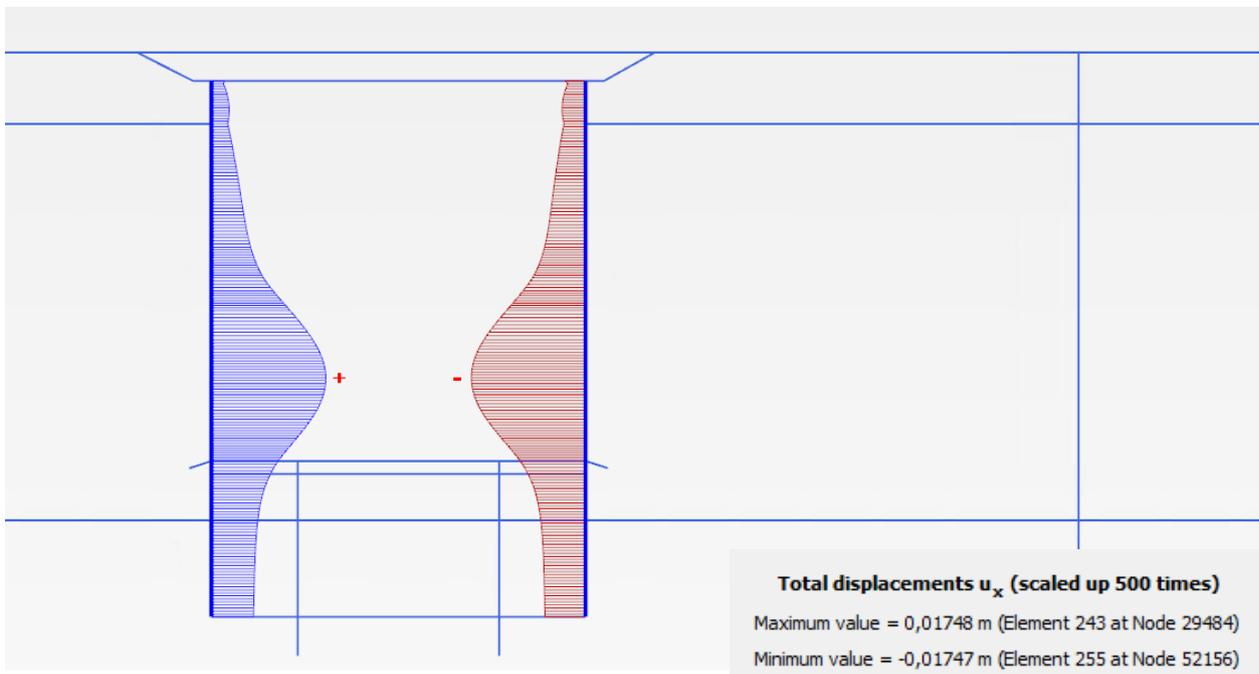
### Rimozione puntoni 2-3 – Momento flettente



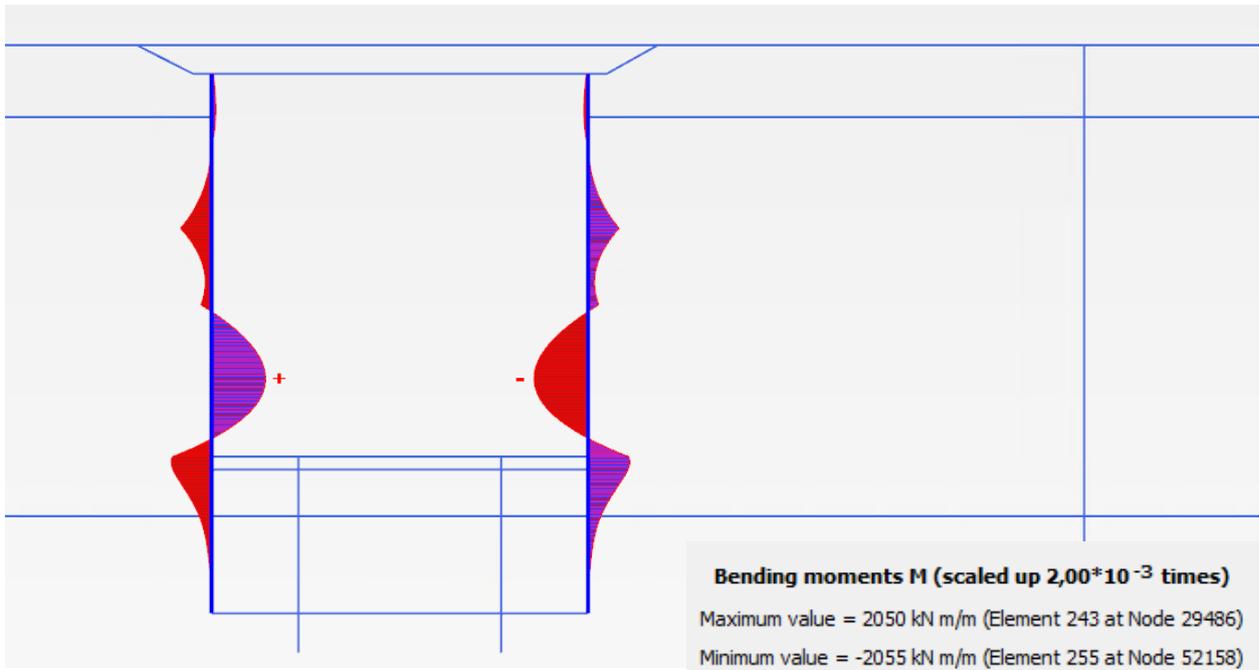
### Rimozione puntoni 2-3 – Taglio



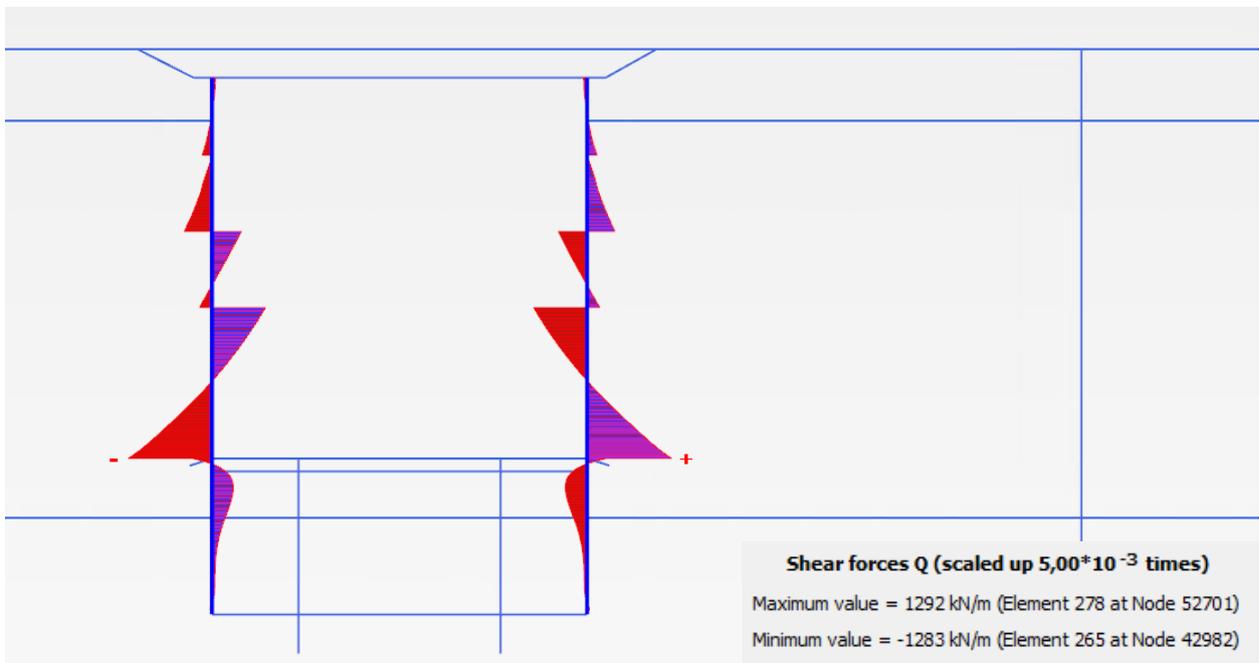
Rimozione puntoni 2-3 – Spostamenti orizzontali



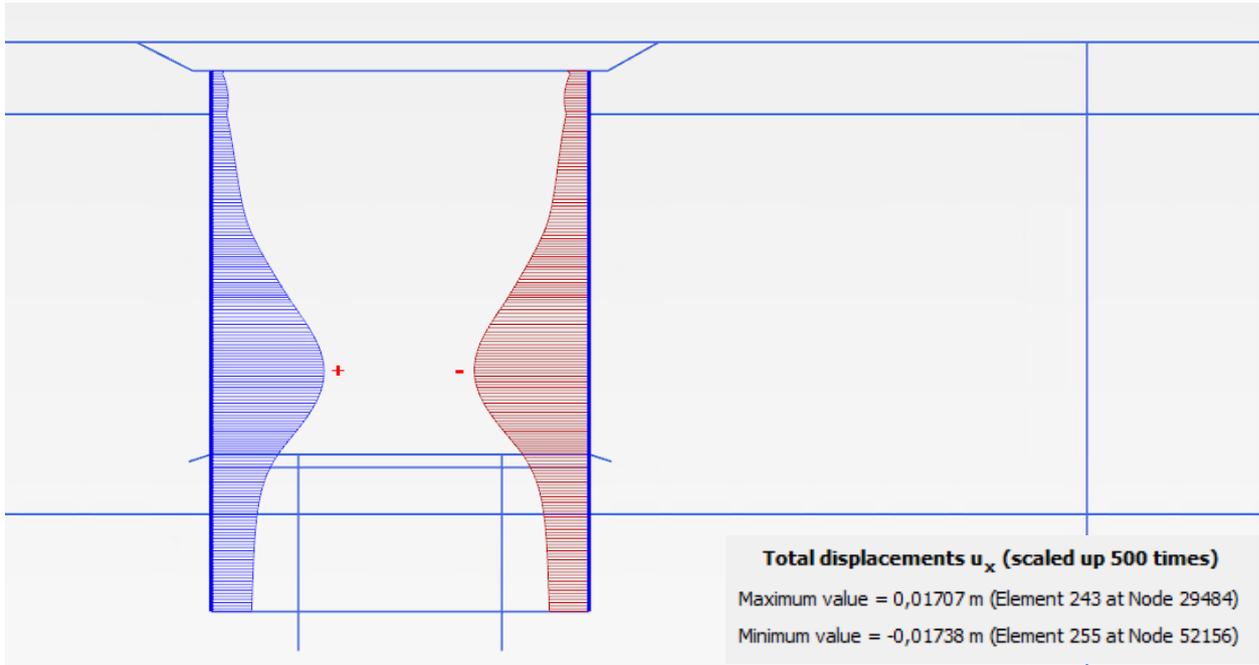
Rimozione puntoni 1 dopo realizzazione terza soletta – Momento flettente



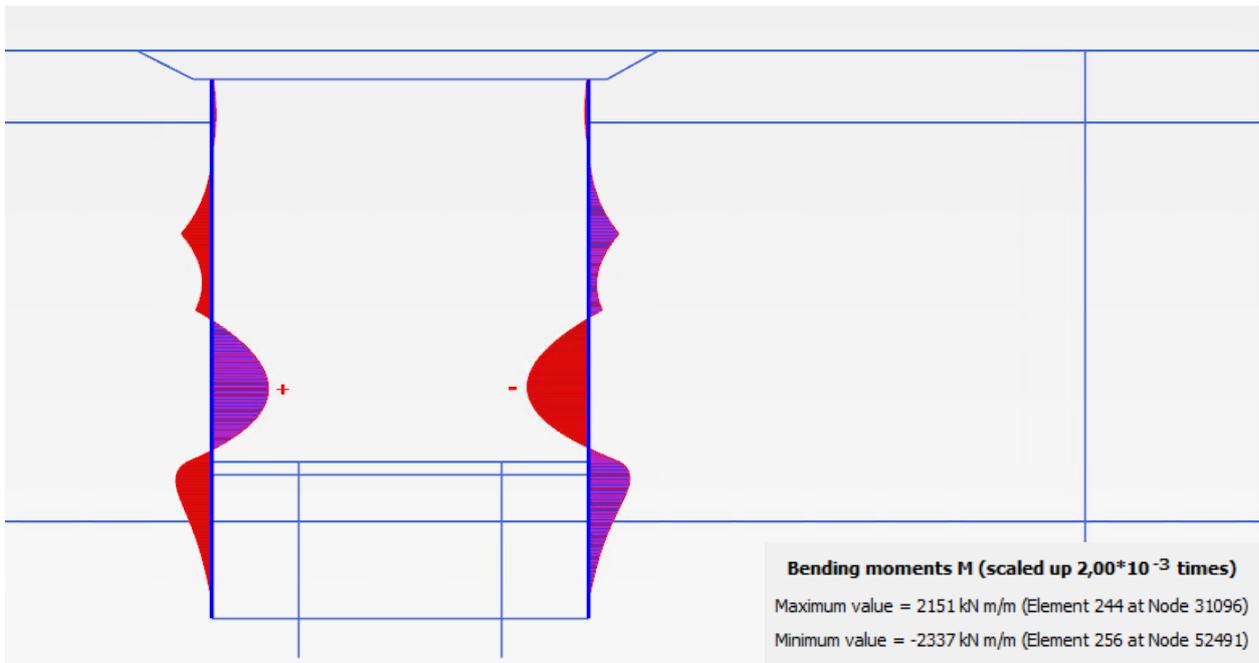
Rimozione puntoni 1 dopo realizzazione terza soletta – Taglio



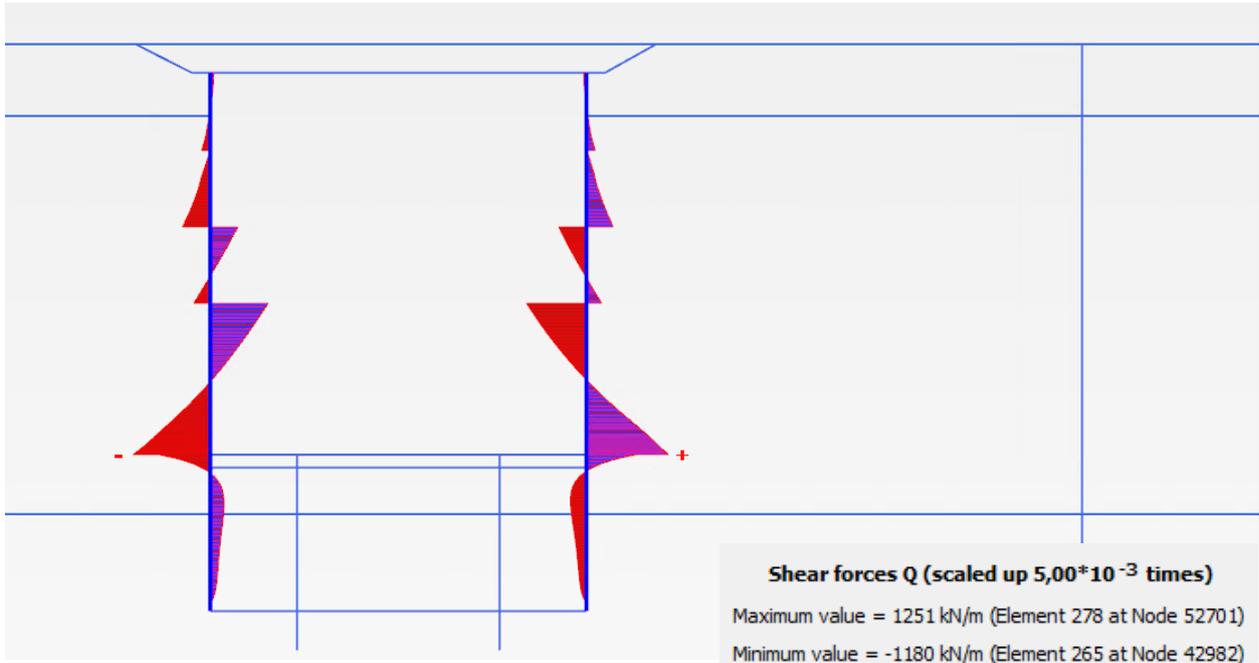
Rimozione puntoni 1 dopo realizzazione terza soletta – Spostamenti orizzontali



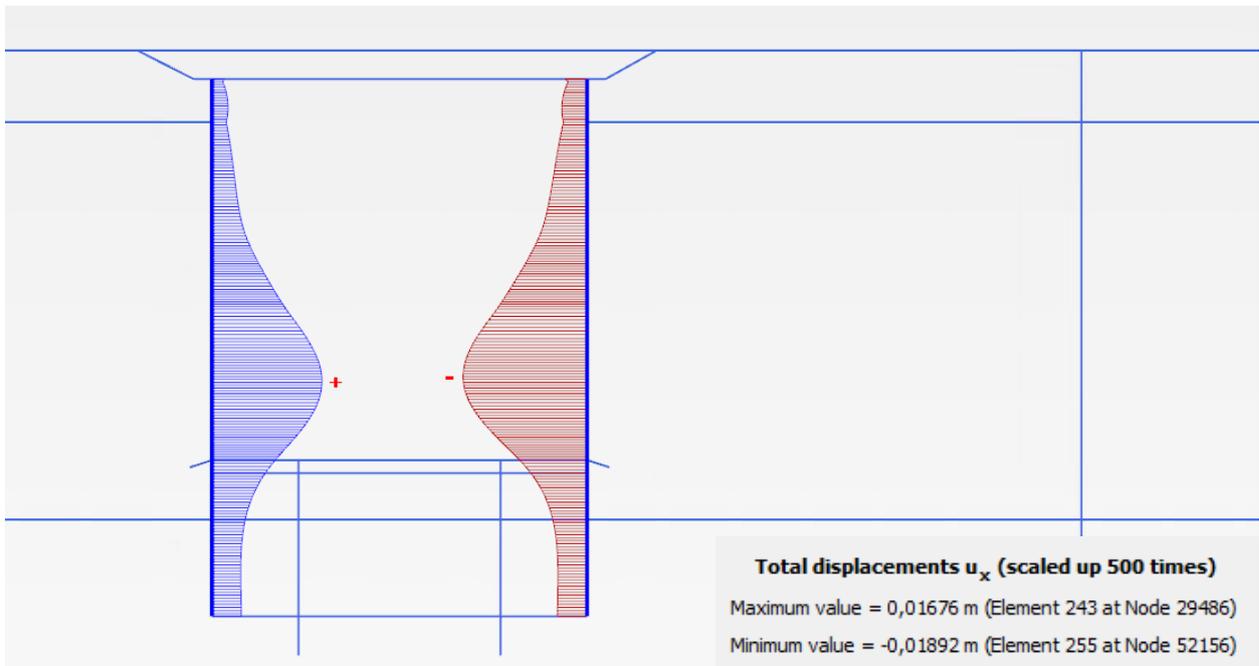
Stop dewatering – Momento flettente



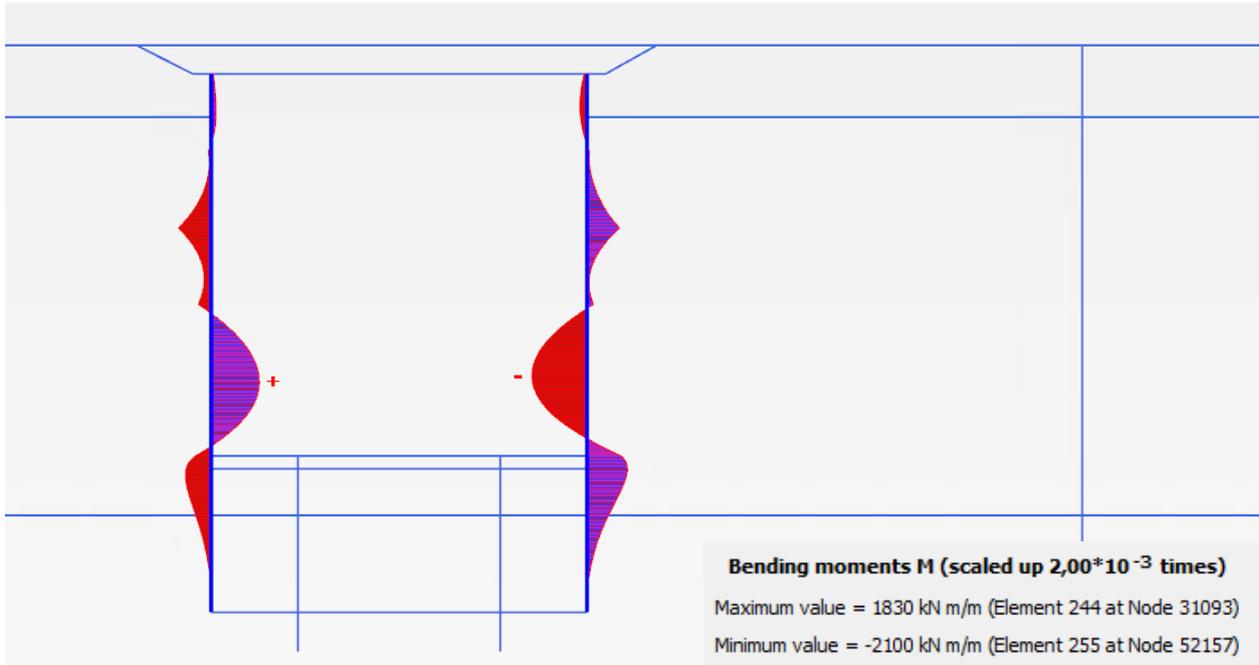
Stop dewatering – Taglio



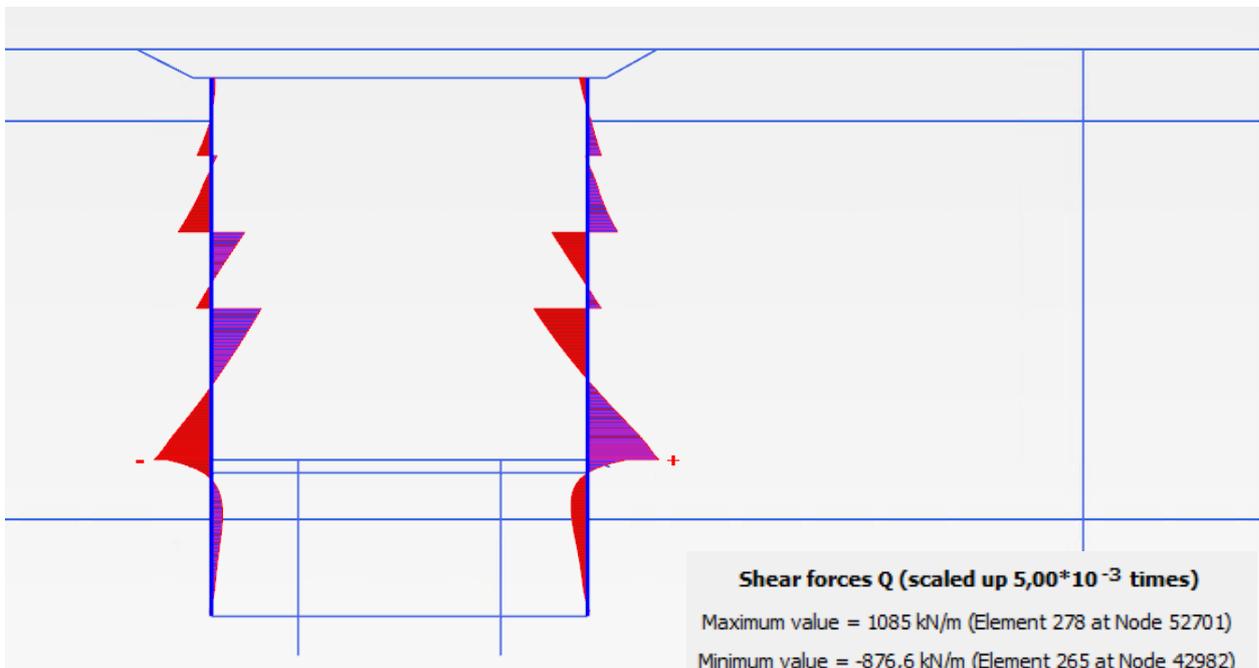
Stop dewatering – Spostamenti orizzontali



Sisma - Momento flettente



Sisma - Taglio



Sisma – Spostamenti orizzontali

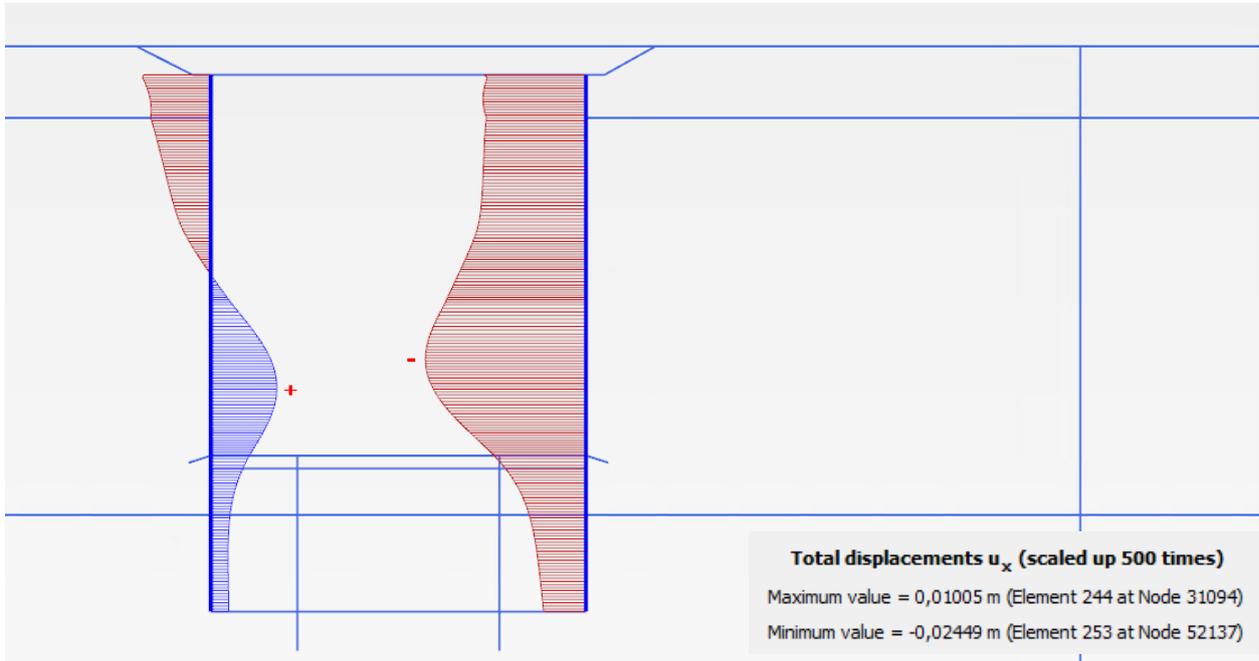


CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere  
di sostegno stazione

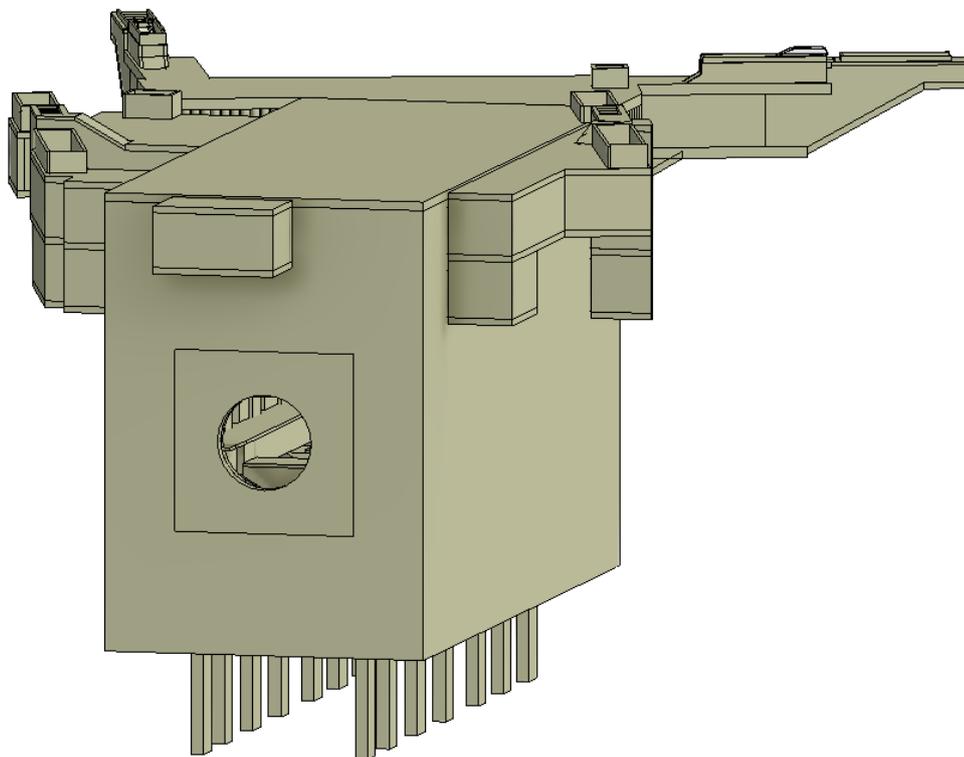
MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1



 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## **ALLEGATO N.2**

### **Verifica strutturale\_GFRP**



**Figura 25. Modello 3D-gabbia soft eye**

Ai lati della stazione, i diaframmi saranno armati con armature che consentano il passaggio della TBM (soft eye) ovvero a mezzo di gabbie di rinforzo in fibra di vetro. Ai fini della verifica strutturale l'ACI Standard 440 raccomanda l'approccio descritto di seguito.

Secondo l'ACI440, la resistenza alla trazione di progetto dovrebbe essere determinata da:

$$\frac{f_{fu}}{\gamma_{GFRP}} = C_e \cdot f_{fu}$$

Dove:

$C_e$  - fattori di riduzione ambientale

$\gamma_{GFRP}$  - Secondo CNR 203, il valore di  $\gamma_{GFRP}$  è assunto pari a 1.5.

Secondo la tabella 6.2 dell'ACI 440.1R-15, il valore di  $C_e$  è assunto pari a 0,7 perché l'elemento in calcestruzzo è esposto alla terra e il tipo di fibre è in materiale vetroso.

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

- **Verifica del momento flettente**

Secondo l'approccio classico usato per il C.A, dovrebbe essere garantito la rottura duttile. In questo caso, sia il calcestruzzo che il GFRP sono materiali fragili, l'ACI applica fattori di sicurezza più alti e controlla la modalità di rottura rivedendo la quantità di rinforzo GFRP.

Per la verifica del momento flettente, deve essere soddisfatta la seguente espressione:

$$\phi \cdot M_n \geq M_u$$

$M_n$ : Momento flettente resistente nominale

$M_u$ : Momento flettente di progetto

$\phi$ : Fattore di riduzione della resistenza

La resistenza alla flessione di una sezione trasversale rinforzata con GFRP è governata dal suo modo di rottura e dipende completamente dalla quantità di rinforzo. Tuttavia, c'è una quantità di rinforzo equilibrata alla quale entrambi i tipi di rottura possono verificarsi simultaneamente, è il cosiddetto rapporto di rinforzo equilibrato.

La modalità di rottura può essere valutata confrontando la quantità di rinforzo con la quantità bilanciata di rinforzo.

Il rapporto di rinforzo può essere calcolato come:

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d}$$

Mentre il rapporto di rinforzo bilanciato è dato da:

$$\rho_{fb} = 0.85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_{fu}} \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}}$$

Dove:

$\beta_1$ : Fattore che dipende da valore  $f_{cu}$

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

$E_f$ : Modulo elastico dal produttore di GFRP

$\varepsilon_{cu}$ : Deformazione ultima nel calcestruzzo

$f_{fu}$ : Resistenza allo snervamento finale di GFRP

Confrontando i valori delle equazioni di cui sopra, se:

- $\rho_f > \rho_{fb}$  la rottura avviene prima sul calcestruzzo e la resistenza nominale a flessione può essere calcolata come

$$M_n = \rho_f \cdot f_f \left( 1 - 0.59 \frac{\rho_f \cdot f_f}{f'_c} \right) \cdot b \cdot d^2$$

Con

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \cdot \beta_1 \cdot f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} \leq f_{fu}$$

Dove

$f_f$ : Tensione nel GFRP

$b$ : Larghezza della sezione

$d$ : distanza dalla fibra di compressione estrema al centroide dell'armatura di tensione

- $\rho_f < \rho_{fb}$  la rottura avviene prima sul GFRP e la resistenza nominale a flessione può essere calcolata come:

$$M_n = A_f \cdot f_{fu} \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c_b}{2} \right)$$

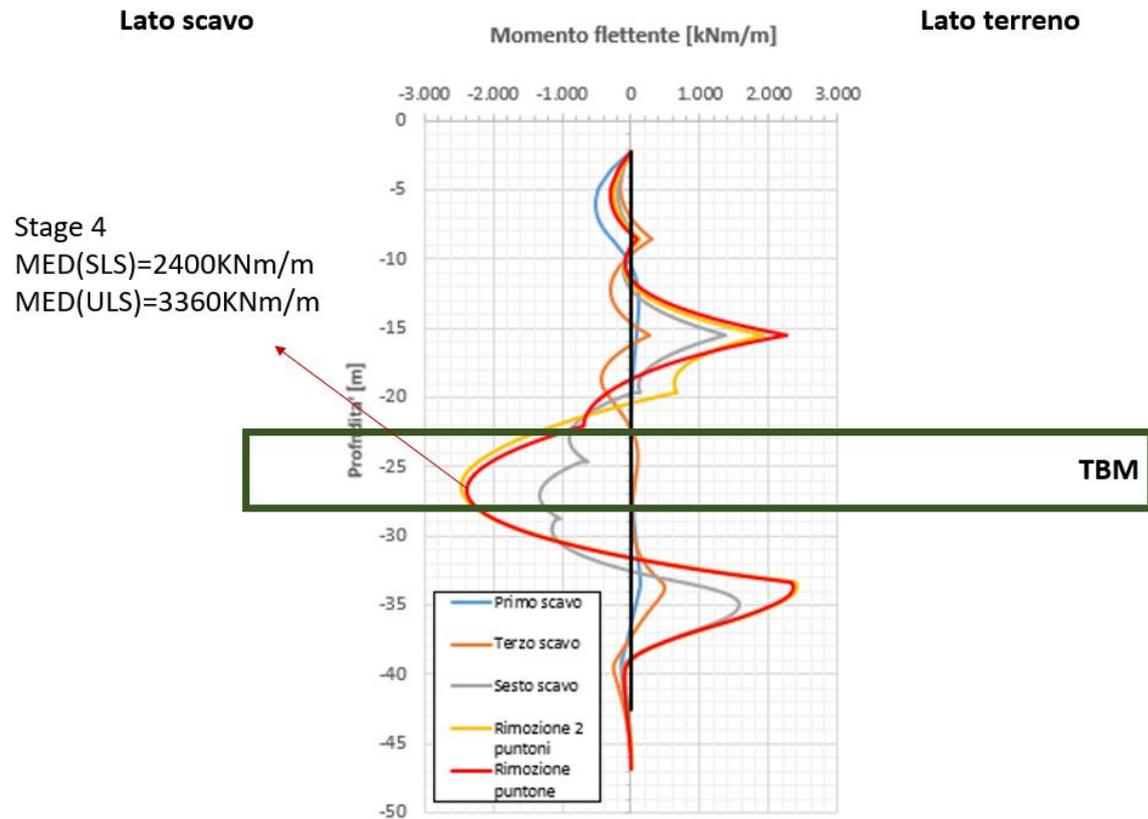
Dove

$$c_b = \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) \cdot d$$

Il fattore di riduzione al momento flettente resistente nominale  $\phi$  è dato dalle espressioni:



$$\phi = \begin{cases} 0.55 \text{ for } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0.3 + 0.25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \text{ for } \rho_{fb} < \rho_f < 1.4\rho_{fb} \\ 0.65 \text{ for } \rho_f \geq 1.4\rho_{fb} \end{cases}$$





GFRP - Characteristics		
Type of application	<b>Concrete Exposed to earth and weather</b>	
Characteristic yield strength of reinforcement (supplier)	$f_{yk} = f_{fu}^*$ [MPa]	1155
Partial safety factor for material	$\gamma_{GFRP}$ [-]	1,5
Ambient reduction factor	$C_E$ [-]	0,7
Design value of modulus of elasticity of GFRP	$E_f$ [MPa]	60000
Yield strain of reinforcement	$\epsilon_{yd} = \epsilon_{fu}$ [-]	1,05%
Ultimate strain of reinforcement	$\epsilon_{su} = \epsilon_{fu}^*$ [-]	1,50%
Design yield strength of reinforcement	$f_{yd} = f_{fu}$ [MPa]	539,00

CAGE (GFRP)	Lato terreno (M -)	Lato scavo (M +)
Entrance Side	Yes	
$\phi_1$ [mm]	26	26
$\phi_2$ [mm]	0	26
$\phi_3$ [mm]	0	26
A [mm <sup>2</sup> ]	5309,29	15927,87
MINIMUM REINF. VERIFICATION	OK	
MAXIMUM REINF. VERIFICATION	OK	
$M_{e,d}$ [kNm]	0,00	3360,00
$M_{R,d}$ [kNm]	-1545,20	4098,62
$FS_{N=COST}$ [-]	#DIV/0!	1,22
$w_k$ [mm]	-	-
VERIFICATION	-	-

### - Verifica al taglio

La resistenza al taglio di una sezione rinforzata con GFRP si calcola come la somma della resistenza al taglio del calcestruzzo senza armatura  $V_c$ , e la resistenza al taglio fornita dalle staffe GFRP  $V_f$ , moltiplicata per un fattore di riduzione  $\phi$  che è stabilito dall'ACI come 0,75. La resistenza al taglio deve essere inferiore alla forza di taglio di progetto che agisce sulla sezione trasversale  $V_u$ .

$$\phi \cdot V_n \geq V_u$$

$$\phi \cdot (V_c + V_f) \geq V_u$$

$V_u$ : Forza di taglio di progetto

$\phi$ : Fattore di riduzione della resistenza

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

$V_n$ : Capacità di taglio nominale

$V_c$ : Resistenza a taglio del calcestruzzo

$V_f$ : Resistenza a taglio

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot c$$

Dove

$b_w$ : Larghezza della sezione

$c$ : Profondità dell'asse neutro della sezione trasformata fessurata (in mm) e data da:

$$c = k \cdot d$$

con

$$k = \sqrt{2 \cdot \rho_f \cdot n_f + (\rho_f \cdot n_f)^2} - \rho_f \cdot n_f$$

$n_f$ : Rapporto tra il modulo di elasticità delle barre FRP e il modulo di elasticità del calcestruzzo

La resistenza a taglio delle staffe disposte ortogonalmente all'asse dell'elemento deve essere calcolata come:

$$V_f = \frac{A_{fv} \cdot f_{fv} \cdot d}{s}$$

Dove

$A_{fv}$ : Area di rinforzo a taglio

$f_{fv}$ : Resistenza alla trazione dell'armatura a taglio in GFRP

$$f_{fv} = 0.004 E_f \leq f_{fb}$$

Con

$E_f$ : Modulo di elasticità del GFRP garantito dal fornitore.

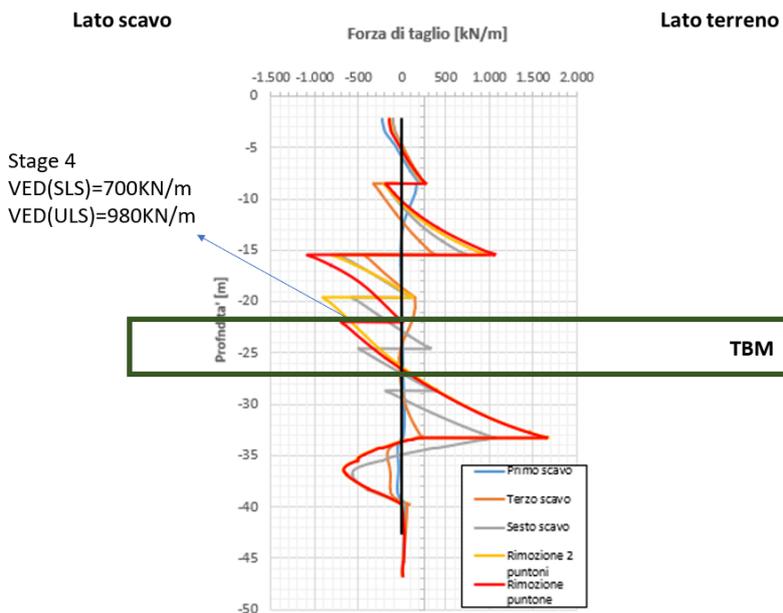


CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1



**GFRP SHEAR REINFORCEMENT**

		NOT SHEAR REINFORCEMENT	
		<b>U.L.S. STATIC</b>	$V_{MAX}$
		$V_d$ [kN/m]	980,00
		$N_d$ [kN/m]	0,00
		$\sigma_{cp}$ [MPa]	0,00
		$V_{Rd,c}$ [kN/m]	311,58
		<b>VERIFICATION</b>	<b>NO</b>

$\phi_{sw}$ [mm]	16
$s_{sw, Transversal}$ [mm]	200
$s_{sw, Longitudinal}$ [mm]	200

<b>VERIFICATION MIN. REINF.</b>	<b>OK</b>
---------------------------------	-----------

		SHEAR REINFORCEMENT	
		<b>U.L.S. STATIC</b>	$V_{MAX}$
		$V_d$ [kN/m]	980,00
		$b_w$ [mm]	1000
		$d$ [mm]	1031
		$z$ [mm]	927,9
		$\vartheta$ [°]	45
		$\alpha$ [°]	90,00
		$V_c$ [kN/m]	311,58
		$V_f$ [kN/m]	1243,77
		$V_n$ [kN/m]	1166,51
		<b>VERIFICATION</b>	<b>OK</b>
		$V_d < V_n$	<b>OK</b>

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

## **ALLEGATO N.3**

**Verifiche integrative del nodo di connessione soletta / diaframma**



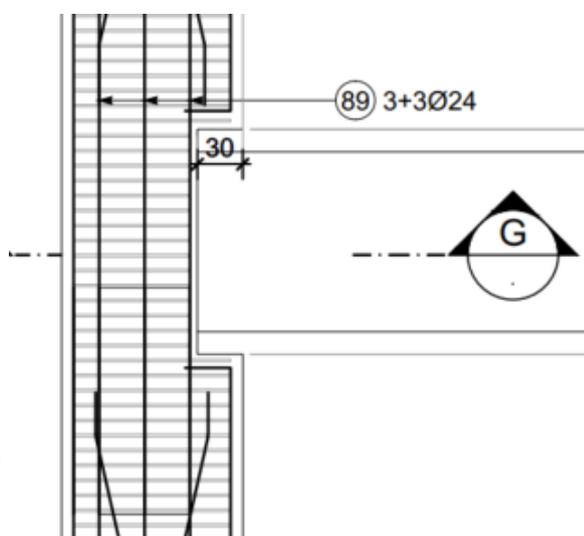
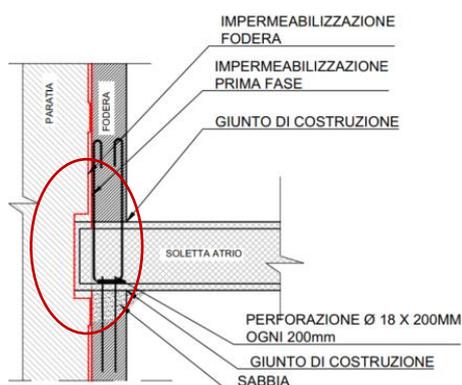
## 1. VERIFICA DELLA CONNESSIONE SOLETTA-DIAFRAMMA

### 1.1 Introduzione

Il collegamento tra le solette di stazione e le paratie è realizzato per mezzo di tasche d'appoggio rettangolari, realizzate grazie all'inserimento di scatole metalliche, già assemblate nelle gabbie d'armatura dei diaframmi.

Le tasche di appoggio hanno larghezza pari a 30 cm e la sezione corrente del diaframma presenta una zona localizzata di spessore ridotto da 120 cm a 90cm. Con lo scopo di dimostrare il corretto funzionamento del nodo di connessione si presentano di seguito le seguenti analisi/verifiche integrative:

1. valutazione degli effetti della eccentricità dei carichi dovuti alla connessione diaframma/solette
2. verifiche a flessione e taglio della sezione ridotta del diaframma
3. verifiche delle massime pressioni di contatto localizzate sugli appoggi
4. verifiche delle massime pressioni di contatto sulle impermeabilizzazioni





## 1.2 Analisi Plaxis aggiuntive per tener conto dell'eccentricità

La verifica strutturale include la valutazione degli effetti della eccentricità dei carichi dovuti alla connessione diaframma/solette. Tale contributo è stato verificato mediante modello *ad hoc* come rappresentato nella figura seguente, considerando le stazioni S4G in quanto presentano le condizioni più sfavorevoli in termini di reazioni vincolari sull'appoggio (assenza di king-post).

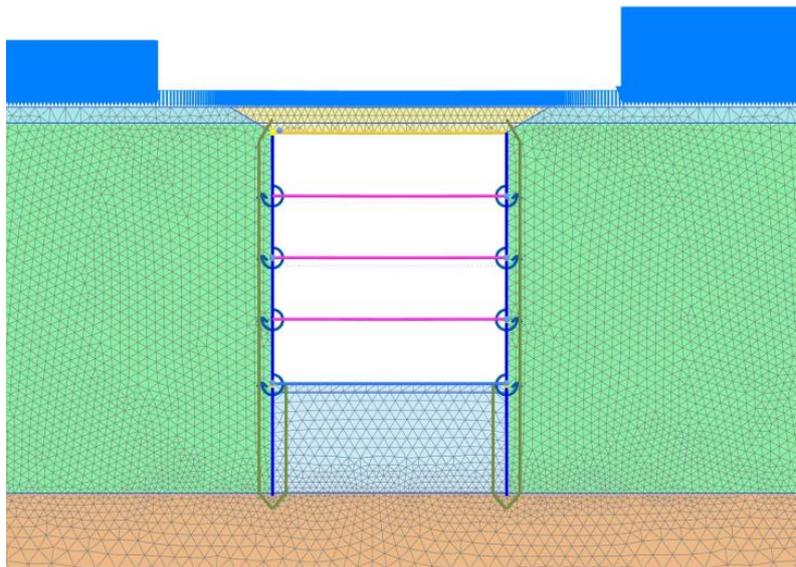


Figura 26. Modellazione dell'eccentricità tra soletta e diaframma – Stazioni S4G

Il modello è stato modificato introducendo sul nodo generico di collegamento soletta/diaframma un momento calcolato come il valore della reazione massima, pari a 330KN/m moltiplicata per l'eccentricità massima pari a 0.45m.

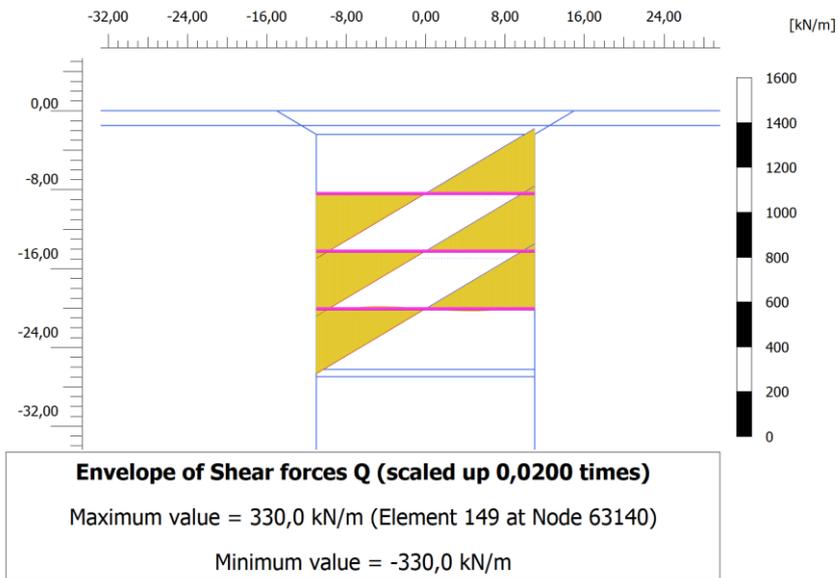


Figura 27. Valore di reazione vincolare di riferimento per il calcolo del momento flettente aggiuntivo – Stazioni S4G

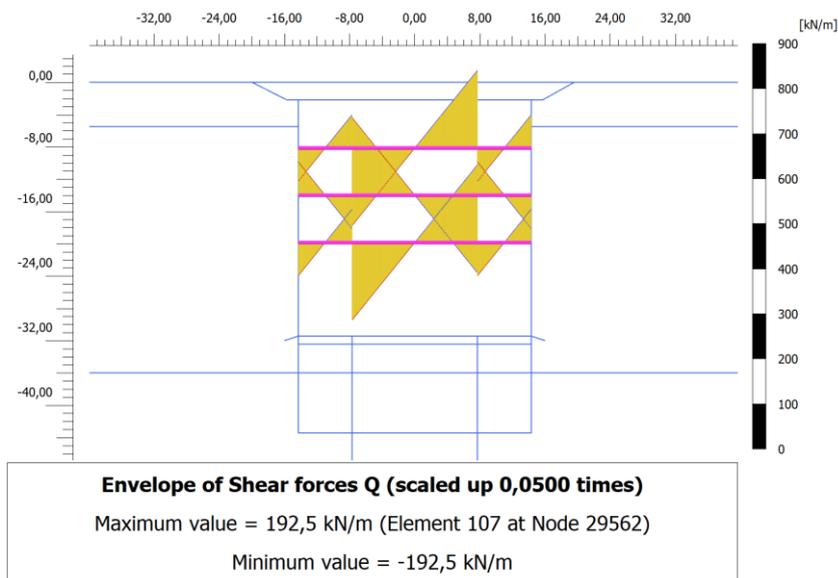
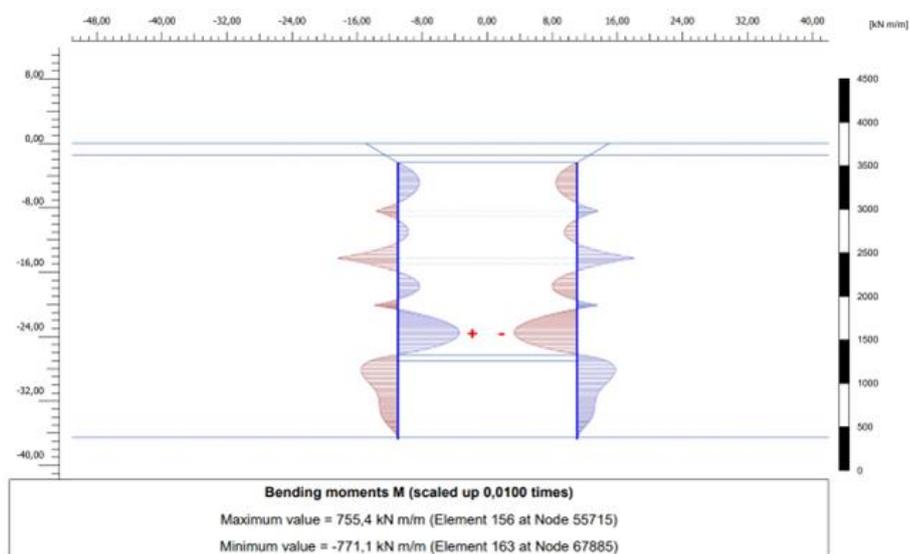


Figura 28. Valore di reazione vincolare di riferimento per il calcolo del momento flettente aggiuntivo – Stazione Carlo Alberto

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

L'analisi è stata eseguita con riferimento alla fase più sfavorevole ovvero durante lo scavo delle stazioni in assenza delle fodere e considerando la reazione vincolare più gravosa (stazioni S4G 330KN/m). Si è riscontrato come le variazioni in termini di sollecitazioni flettenti siano inferiori al 5% del valore dimensionante e pertanto trascurabili ai fini del progetto delle strutture. Nel caso della stazione in oggetto si ritengono valide le valutazioni eseguite per le stazioni S4G in quanto, come mostrato nella Figura 28, i valori di reazione vincolare sono notevolmente più bassi (193KN/m).



**Figura 29. Distribuzione dei momenti flettenti in assenza di eccentricità (fase finale di scavo – assenza di fodere)**



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

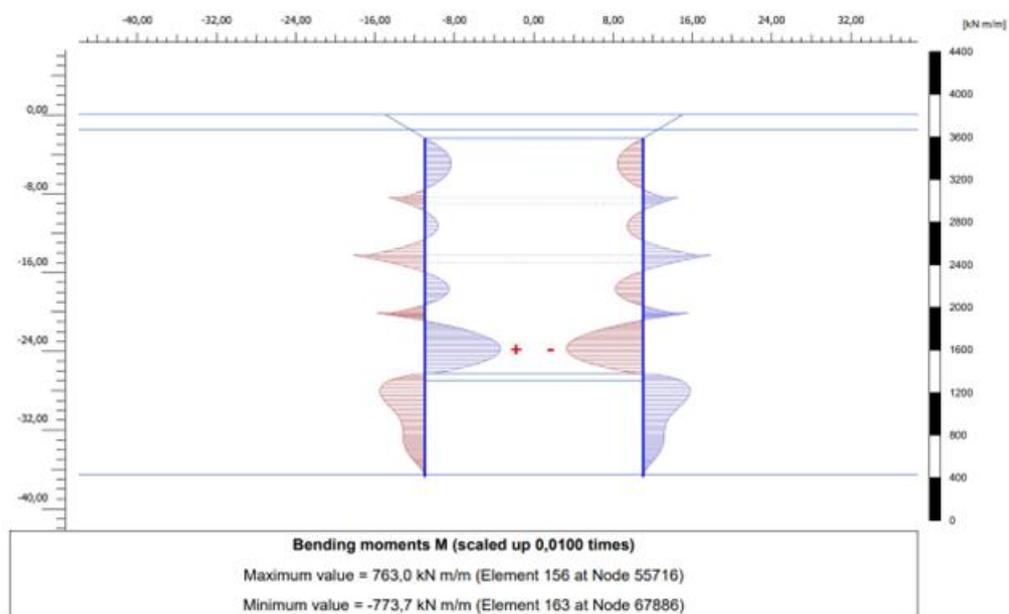


Figura 30. Distribuzione dei momenti flettenti in presenza di eccentricità (fase finale di scavo – assenza di fodere)

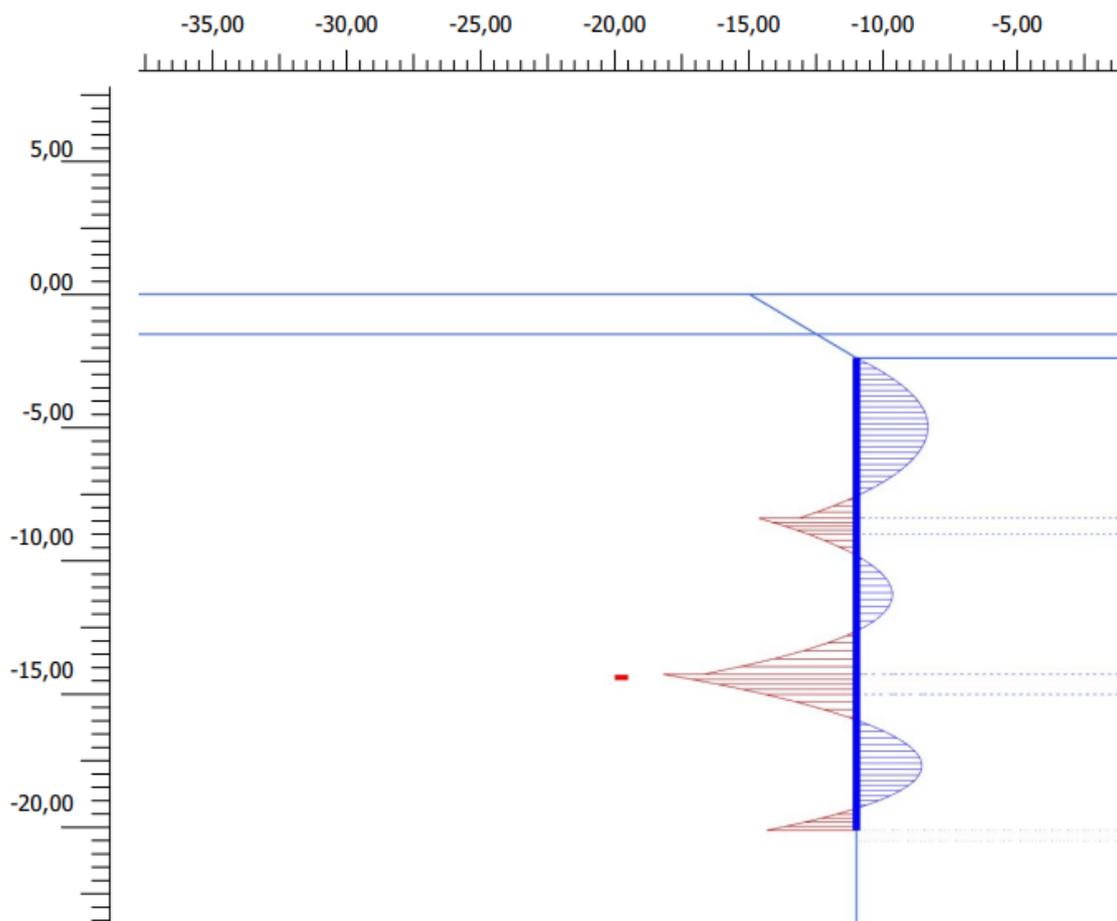


Figura 31. Distribuzione dei momenti flettenti in presenza di eccentricità (fase finale di scavo – assenza di fodere)



### 1.3 Verifica a flessione e taglio della sezione ridotta

Si presentano di seguito le verifiche a flessione e taglio considerando l'involuppo delle sollecitazioni a breve termine. A lungo termine la verifica non è più necessaria in quanto le solette sono completate e per tanto si garantisce la continuità della sezione.

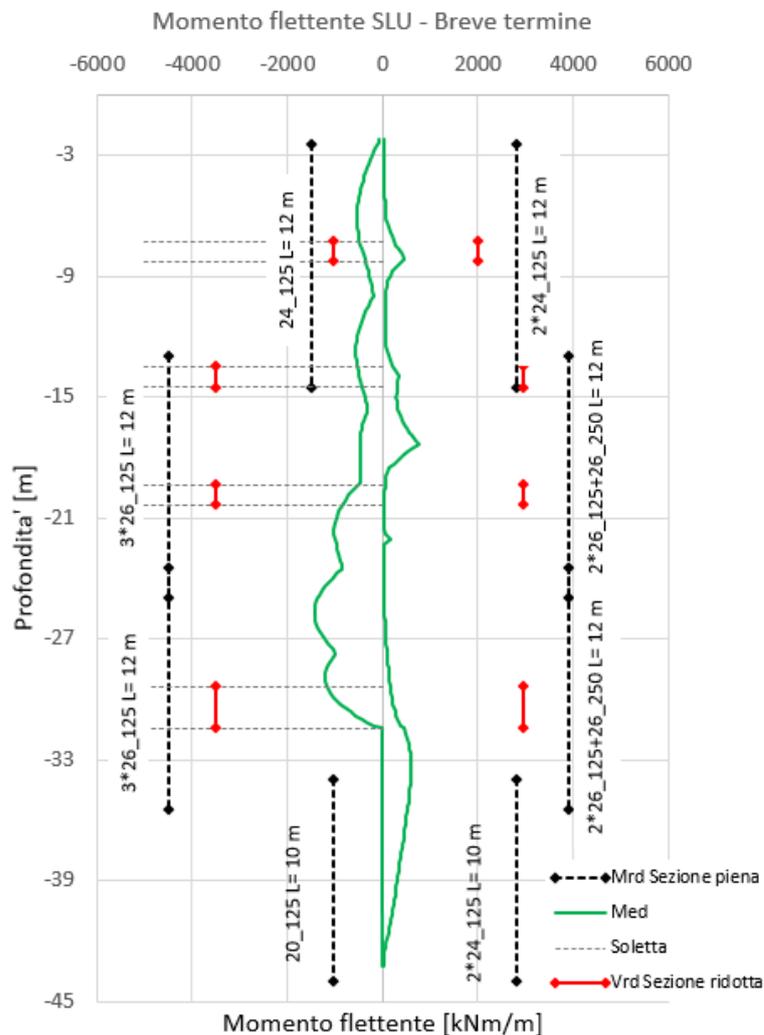


Figura 32. Diaframmi – SLU Diagramma delle sollecitazioni flettenti – Sezione ridotta

Si riporta la verifica della zona più critica, che nel caso in esame è quella relativa al piano atrio.

**Tabella 27 Diaframmi – Verifica SLU flessione - Sezione ridotta -Piano Banchina**

<b>Sezione di verifica SLU: Tasca Banchina</b>		
<b>Geometria sezione:</b>		
Altezza della sezione trasversale di calcestruzzo	900	[mm]
Larghezza della sezione trasversale di calcestruzzo	1000	[mm]
Copriferro	75	[mm]
Altezza utile della sezione	775	[mm]
<b>Armature</b>		
<b>Armatura tesa</b>		
Diametro dei ferri correnti	26	[mm]
Numero dei ferri correnti	8	[-]
Diametro dei ferri correnti secondo strato	26	[mm]
Numero dei ferri correnti secondo strato	8	[-]
Diametro dei ferri correnti terzo strato	26	[-]
Numero dei ferri correnti terzo strato	8	[-]
Area dell'armatura tesa	12742	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura compressa</b>		
Diametro dei ferri correnti	26	[mm]
Numero dei ferri correnti	8	[-]
Diametro dei ferri correnti secondo strato	26	[mm]
Numero dei ferri correnti secondo strato	8	[-]
Diametro dei ferri correnti terzo strato	26	[-]
Numero dei ferri correnti terzo strato	4	[-]
Area dell'armatura compressa	10619	[mm <sup>2</sup> ]
<b>Materiali</b>		
<b>Calcestruzzo</b>		
Resistenza caratteristica cubica	30	[MPa]
Coefficiente di sicurezza parziale per il calcestruzzo	1,5	[-]
Coefficiente che tiene conto degli effetti di lungo termine	0,85	[-]
Resistenza di progetto a compressione del calcestruzzo	14,17	[MPa]
Resistenza di progetto a trazione del calcestruzzo	1,20	[MPa]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione caratteristica	15,00	[MPa]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione quasi permanente	11,25	[MPa]
<b>Acciaio</b>		
Resistenza a snervamento dell'acciaio	450	[MPa]
Coefficiente di sicurezza parziale per l'acciaio	1,15	[-]
Resistenza di progetto a trazione dell'acciaio	391	[MPa]
Tensione ammissibile nell'acciaio per le combinazioni a SLS	360	[MPa]
<b>Momento resistente della sezione</b>	<b>3522,52</b>	<b>[kNm]</b>
<b>Momento sollecitante a SLU assunto in valore assoluto</b>	<b>967,00</b>	<b>[kNm]</b>
		Verificato

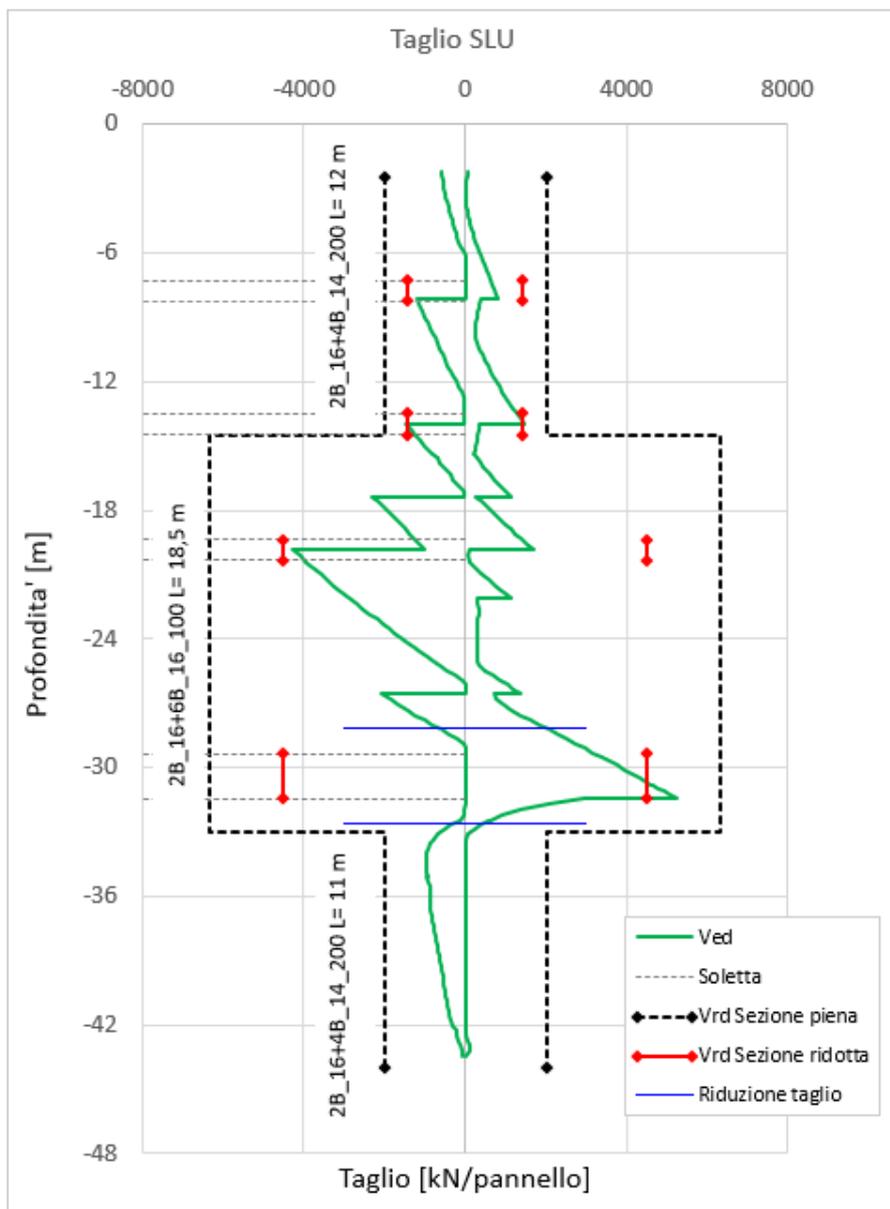


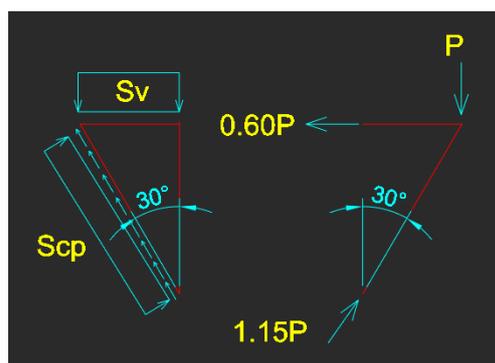
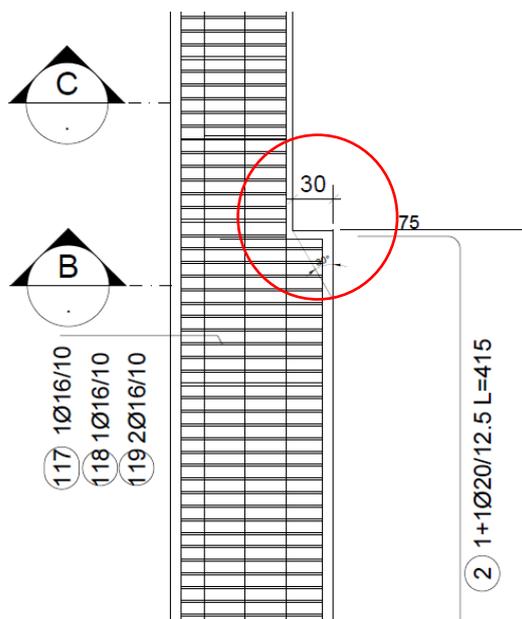
Figura 33. Diaframmi – SLU Diagramma delle sollecitazioni taglianti – Sezione ridotta

Considerando che dovuto alla modellazione si presentano dei picchi in corrispondenza dei nodi tra gli elementi strutturali, le sollecitazioni di taglio possono essere ridotte e sarà sempre cautelativo assumere nel tratto terminale il valore di taglio agente calcolato alla distanza  $d$  dall'appoggio. Per cui i diaframmi risultano verificati a taglio pur considerando la sezione ridotta in corrispondenza delle tasche di appoggio delle solette.


**Tabella 28 Diaframmi – Verifica SLU Sollecitazioni taglianti – Sezione ridotta**

Verifica elementi a taglio			
<b>Pannello diaframma 2800 x 1200 mm - <math>\phi</math>16 2 braccia + <math>\phi</math>16 4 braccia passo 100 mm</b>			
<b>Geometria</b>			
Altezza sezione	H	900	mm
Base sezione	B	2800	mm
Barre longitudinali tese	$\phi_{sl}$	26	mm
Diametro staffe	$\phi_{sw}$	16	mm
Copriferro	c	75	mm
Altezza utile	d	796	mm
<b>Materiali</b>			
<b>Calcestruzzo</b>			
Resistenza caratteristica cubica	$R_{ck}$	30	MPa
Resistenza caratteristica cilindrica	$f_{ck}$	25	MPa
Coefficiente parziale calcestruzzo	$\gamma_c$	1,5	
Coefficiente che tiene conto degli effetti a lungo termine	$\alpha_{cc}$	0,85	
Resistenza di progetto a compressione calcestruzzo	$f_{cd}$	14,17	MPa
Resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo d'anima	$f'_{cd}$	7,08	MPa
<b>Acciaio</b>			
Resistenza a snervamento dell'acciaio	$f_{yk}$	450	MPa
Coefficiente di sicurezza parziale acciaio	$\gamma_s$	1,15	
Resistenza di progetto a trazione dell'acciaio	$f_{yd}$	391,30	MPa
<b>Elementi con armatura a taglio</b>			
Diametro staffe esterne	$\phi_{sw1}$	16	mm
Numero braccia	$n_{b1}$	2	
Diametro staffe esterne	$\phi_{sw2}$	16	mm
Numero braccia	$n_{b2}$	6	
Passo staffe	s	100	mm
Inclinazione tra puntone compresso e asse elemento	$\theta$	45,00	°
Inclinazione armatura trasversale rispetto asse elemento	$\alpha$	90	°
Area sezione trasversale armatura a taglio	$A_{sw}$	1607,68	mm <sup>2</sup>
Braccio coppia interna	z	716,4	mm
Resistenza offerta dall'armatura a taglio	$V_{Rsd}$	4507	kN
Resistenza offerta dai puntoni	$V_{Rcd}$	7104	kN
<b>Resistenza a taglio della sezione armata trasversalmente</b>	<b><math>V_{Rd}</math></b>	<b>4507</b>	<b>kN</b>
<b>Taglio sollecitante SLU</b>	<b><math>V_{ed}</math></b>	<b>2295</b>	<b>kN</b>
			Verificato





## - Resistenza al taglio del calcestruzzo:

Caratteristiche della sezione				
<b>GEOMETRIA</b>				
H	=	60	cm	altezza sezione
$b_w$	=	100	cm	larghezza sezione
$h'$	=	10	cm	copriferro
d	=	50	cm	altezza utile
<b>ARMATURA TESA</b>				
$\phi$	=	0	mm	diametro armatura
$n^\circ$	=	0		numero barre
$A_s$	=	0.0	cm <sup>2</sup>	area dell'armatura tesa
$\rho_l$	=	0.0000		rapporto geometrico d'armatura longitudinale ( $\leq 0,02$ ) min[ $A_s/bd; 0,02$ ]
<b>AZIONI DI COMPRESSIONE</b>				
$N_{Ed}$	=	380	kN	valore di calcolo della compressione assiale (se presente)
$\sigma_{cp}$	=	0.63	Mpa	tensione media di compressione min[ $N_{Ed}/bh; 0,2f_{cd}$ ]
<b>Resistenza senza armatura a taglio</b>				
<b>RESISTENZA SENZA ARMATURA A TAGLIO</b>	<b><math>V_{Rd}</math></b>	=	<b>383</b>	<b>kN</b>
Resistencia concreto	$V_{Rd,C}$			max[ $V_{rd1}; V_{rd2}$ ]
Con riferimento all'elemento fessurato da momento flettente, la resistenza di progetto a taglio si valuta con				
$V_{Rd} = \max \left[ \left[ 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] b_w \cdot d; (v_{\min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \right]$ [4.1.23]				
con				
$f_{sk}$ espresso in MPa				
$k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2$				
$v_{\min} = 0,035k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$				

$V_{Rd,c} = 383 \text{ kN/m} < V_{Ed}$  .... è necessario considerare il contributo delle barre di armatura

- Contributo delle barre di armatura (contributo valutato su pannelli larghi 2,80 m)

 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico – Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna - Politecnico</b>
Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione	MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

i) Contributo dell'armatura principale (barra n.2 - 2 $\phi$ 20/125)

numero di barre = 21    numero di strati = 2    Totale barre = 2x21 = 42

Diametro barra = 20mm

Nota: il piano di rottura interseca i due strati dell'armatura principale in due sezioni, tuttavia viene considerata in modo conservativo solo un strato e una sezione.

$$N_{ef} = 21 \quad A_s = 3.14\text{cm}^2 \quad f_{yd} = 390 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,s} = N_{ef} A_s f_{yd} = 21 \times 314 \times 390 / 1000 = 2570 \text{ kN}$$

ii) Contributo delle staffe (barre n. 117,118 e 119 - 6 $\phi$ 16/100)

Numero di barre = 6    Numero di strati = 3    Totale barre = 3x6 = 18

Diametro barra = 16mm

Nota: il piano di rottura interseca tre strati delle staffe, in modo conservativo se ne considerano due.

$$N_{ef} = 2 \times 6 = 12 \quad A_s = 2.01\text{cm}^2 \quad f_{yd} = 390 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,s} = N_{ef} A_s f_{yd} = 12 \times 201 \times 390 / 1000 = 940 \text{ kN}$$

iii) Contributo dei rinforzi (per unità di larghezza)

$$V_{Rd,s} = (2570 + 940) / 2.80 = 1250 \text{ kN/m} > V_{ed} \quad \dots \text{FS} = 1250 / 462 = 2.70$$

iv) Verifica della tensione nell'armatura orizzontale

$$N_{Ed} = 0.60 \times V_{Ed} = 0.60 \times 462 \text{ kN/m} = 278 \text{ kN/m}$$

Considerando conservativamente solo uno strato di armatura orizzontale

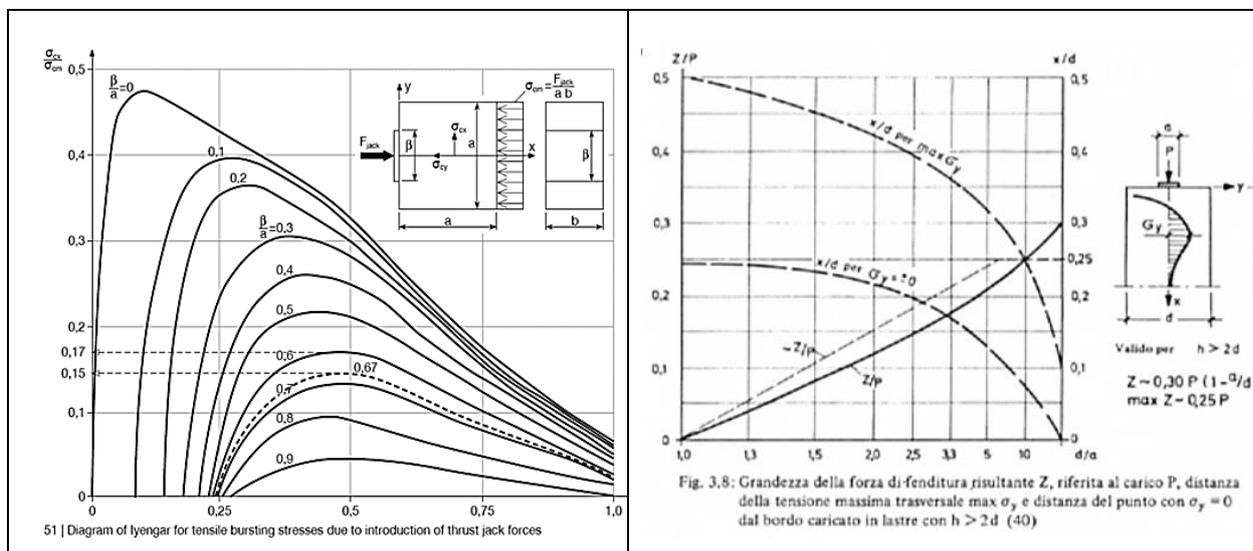
$$A_s = 8\phi 20 = 8 \times 3.14\text{cm}^2 = 25.12 \text{ cm}^2$$

$$N_{Rd,s} = A_s f_{yd} = 2512 \times 390 / 1000 = 980 \text{ kN/m} > N_{ed} \quad \dots \text{FS} = 980 / 278 = 3.50$$



v) Verifica delle trazioni indotte localmente

La compressione alla base della tasca induce tensioni di trazioni orizzontali locali immediatamente al di sotto della base di appoggio. Utilizzando i consueti metodi di analisi delle pressioni indotte (Leonardth and Iyengar), nelle condizioni più estreme, le trazioni indotte sono limitate al 50% delle massime sollecitazioni di compressione.



$$\sigma_{t\_max} = 0.50 \times \sigma_{cm} = 0.50 \times 1.54 \text{ MPa} = 0.77 \text{ MPa} < f_{ctm} = 2.60 \text{ MPa}$$

La verifica e' pertanto soddisfatta

### 1.5 Verifica delle pressioni di contatto sulle impermeabilizzazioni

Pressione di contatto media:

$$\sigma_{cm} = VEd / A_c \quad \text{dove} \quad A_c = 30\text{cm} \times 100\text{cm} = 3000 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{cm} = 462 / 300 = 1.54 \text{ MPa} < 7.0 \text{ MPa} \text{ Resistenza a compressione a lungo termine}$$



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Carlo Alberto - Relazione di calcolo opere di sostegno stazione

MTL2T1A2DSTRSCAR001-0-1

<b>Spessore effettivo</b>	2.00 (-5 / +10 %) mm incl. strato segnaletico	(EN 1849-2)
<b>Massa areica</b>	2.56 (-5 / +10 %) kg/m <sup>2</sup>	(EN 1849-2)

### INFORMAZIONI TECNICHE

<b>Resistenza a trazione</b>	17.0 (± 2.0) N/mm <sup>2</sup> (longitudinale) 16.0 (± 2.0) N/mm <sup>2</sup> (trasversale)	(ISO 527)(EN 12311-2)
<b>Allungamento a rottura</b>	≥ 300 % (longitudinale/trasversale)	(ISO 527)
<b>Modulo di elasticità a trazione</b>	≤ 20 N/mm <sup>2</sup> (longitudinale/trasversale) (tra 1 % e 2 % di allungamento, v = 5mm/min)	(ISO 527)
<b>Resistenza allo scoppio</b>	≥ 80 % (D=1.0 m)	(EN 14151)
<b>Resistenza al punzonamento statico</b>	2.35 (± 0.25) kN	(EN ISO 12236)
<b>Resistenza all'urto</b>	Impermeabile con altezza di caduta di 750 mm (peso 500 g, Metodo A)	(EN 12691)
<b>Resistenza a compressione a lungo termine</b>	Impermeabile con carico di 7.0 N/mm <sup>2</sup> (50 h)	(simile a SIA V280/14)
<b>Flessibilità a freddo</b>	Nessuna rottura a - 20 °C	(EN 495-5)
<b>Variazione dimensionale dopo riscaldamento</b>	<2.0% (longitudinale/trasversale)	(EN 1107-2) (+80 °C / 6 h)
<b>Resistenza all'ossidazione</b>	Variazione dell'allungamento a rottura ≤ 10 % Variazione della resistenza a trazione ≤ 10 %	(EN 14575) (120 gg / 80 °C)
<b>Comportamento dopo stoccaggio in acqua calda</b>	Variazione della resistenza a trazione < 20 % (longitudinale/trasversale) Variazione dell'allungamento a rottura < 20 % (longitudinale/trasversale) Variazione di massa < 4 % Variazione di massa < 10 %	(SIA V280/13 e OEBV) (+50 °C / 8 mesi) (EN 14415) (+70 °C / 360 gg)