

**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>	
<b>DIRETTORE PROGETTAZIONE</b> Responsabile integrazione discipline specialistiche	<b>IL PROGETTISTA</b>														
<b>Ing. R. Crova</b> Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 6038S	<b>Ing. F. Rizzo</b> Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 9337K	<b>STRUTTURE E METODI COSTRUTTIVI STAZIONI PROFONDE – STAZIONE PASTRENGO RELAZIONE DI CALCOLO GALLERIE DI BANCHINA</b>													
		ELABORATO									REV.		SCALA	DATA	
		BIM MANAGER Geom. L. D'Accardi	MT	L2	T1	A2	D	STR	SPA	R	004	Int.	Est.	-	30/09/2022

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	30/09/22	VFI	ECA	FRI	RCR
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-

<table border="1"> <tr> <td>LOTTO 2</td> <td>CARTELLA</td> <td>9.2.4</td> <td>4</td> <td>MTL2T1A2D</td> <td>STRSPAR004</td> </tr> </table>						LOTTO 2	CARTELLA	9.2.4	4	MTL2T1A2D	STRSPAR004	<b>STAZIONE APPALTANTE</b>  DIRETTORE DI DIVISIONE INFRASTRUTTURE E MOBILITÀ Ing. R. Bertasio  RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. A. Strozziro					
LOTTO 2	CARTELLA	9.2.4	4	MTL2T1A2D	STRSPAR004												

 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

## 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>6</b>
<b>1.3</b>	<b>ORGANIZZAZIONE DELLA RELAZIONE</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 RIVESTIMENTO DI PRIMA FASE GALLERIA	11
3.1.2	CALCESTRUZZO UTILIZZATO PER RIVESTIMENTO DEFINITIVO GALLERIA	11
<b>3.2</b>	<b>ACCIAI PER ARMATURE IN C.A.</b>	<b>12</b>
<b>3.3</b>	<b>PROFILATI E PIASTRE PER CENTINE</b>	<b>12</b>
<b>4.</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA</b>	<b>14</b>
<b>5.</b>	<b>SEZIONE TIPO E FASI ESECUTIVE</b>	<b>18</b>
<b>6.</b>	<b>CRITERI DI PROGETTAZIONE E METODOLOGIA APPLICATA ALLA MODELLAZIONE NUMERICA</b>	<b>20</b>
<b>6.1</b>	<b>MODELLAZIONE DELL'AZIONE SISMICA</b>	<b>20</b>
6.1.1	CONSIDERAZIONI GENERALI	20
6.1.2	CONDIZIONI SISMICHE	21
6.1.3	ACCELERAZIONE MASSIMA AL SUOLO	21
6.1.4	PARAMETRI AG, FO, TC*	22
6.1.5	APPLICAZIONE AL MODELLO NUMERICO	23
<b>6.2</b>	<b>LEGGE DI COMPORTAMENTO DEI MATERIALI</b>	<b>26</b>
6.2.1	TERRENO	26
<b>6.3</b>	<b>CARICHI VARIABILI – ACCIDENTALI</b>	<b>27</b>
<b>6.4</b>	<b>SOSTEGNO DI PRIMA FASE</b>	<b>27</b>
<b>6.5</b>	<b>RIVESTIMENTO DEFINITIVO</b>	<b>28</b>
<b>6.6</b>	<b>CONSOLIDAMENTO DA P.C.</b>	<b>29</b>
<b>6.7</b>	<b>SEQUENZA ESECUTIVA</b>	<b>29</b>
<b>7.</b>	<b>MODELLI NUMERICI</b>	<b>31</b>
<b>7.1</b>	<b>ANALISI NUMERICA PER LE VERIFICHE DEI SOSTEGNI DI PRIMA FASE</b>	<b>31</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>
<b>Stazione Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina</b>	<b>MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1</b>

<b>7.2</b>	<b>ANALISI NUMERICA PER IL DIMENSIONAMENTO DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO</b>	<b>35</b>
7.2.1	SOLLECITAZIONI NEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO	37
<b>8.</b>	<b>VERIFICHE STRUTTURALI</b>	<b>39</b>
<b>8.1</b>	<b>VERIFICHE STRUTTURALI DEL RIVESTIMENTO DI PRIMA FASE</b>	<b>39</b>
8.1.1	RIVESTIMENTO PRIMA FASE CLS IN FASE MATURAZIONE – STAZIONE PASTRENCO	39
<b>8.2</b>	<b>VERIFICHE STRUTTURALI IL RIVESTIMENTO DEFINITIVO</b>	<b>41</b>
8.2.1	RIVESTIMENTO DEFINITIVO	41
8.2.2	CONDIZIONI STATICHE – SLU FLESSIONE	41
8.2.3	CONDIZIONI STATICHE – SLU SFORZO DI TAGLIO	46
8.2.3.1	SLU Sforzo di Taglio, Calotta & Piedritti Sp=60cm	46
8.2.3.2	SLU taglio, Arco rovescio Sp=60cm	47
8.2.3.3	SLU taglio, Arco rovescio Sp=70cm	48
8.2.3.4	SLU taglio, Piedritti, Sp=70cm	49
8.2.3.5	SLU taglio, Muretti, Sp=80cm	50
8.2.3.6	SLU taglio, Muretti, Sp=90cm	51
<b>8.3</b>	<b>CONDIZIONI STATICHE – SLE FESSURAZIONE</b>	<b>52</b>
8.3.1	SLE, CALOTTA & PIEDRITTI, SP=60CM	52
8.3.2	SLE, ARCO ROVESCIO, SP=60CM	52
8.3.3	SLE, ARCO ROVESCIO, SP=70CM	53
8.3.4	SLE, PIEDRITTI, SP=70CM	54
8.3.5	SLE, MURETTI, SP=80CM	55
8.3.6	SLE, MURETTI SP=90CM	56
<b>8.4</b>	<b>MODELLAZIONE E VERIFICHE SISMICHE</b>	<b>56</b>
8.4.1	MODELLAZIONE SISMICHE	56
8.4.2	VERIFICHE STRUTTURALI DELLE SIMICHE	59
<b>9.</b>	<b>STABILITA' DEL FRONTE DI SCAVO</b>	<b>60</b>
<b>ALLEGATO N.1</b>		<b>63</b>

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.	Key-plan della linea 2 – tratta funzionale Politecnico-Rebaudengo	5
Figura 2.	Modello 3D-Stazione Pastrengo	6
	Galleria di banchina della stazione Pastrengo (in rosso)	7


 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

Figura 3.	7	
Figura 4.	Stralcio stratigrafia stazione Pastreng	14
Figura 5.	Sezione tipo galleria banchina – Sezione di scavo e rivestimento definitivo	18
Figura 6.	Sezione Galleria banchina– Tipologie di consolidamento	18
Figura 7.	Procedura “trial & error”	26
Figura 8.	Modello costitutivo Hardening Soil	26
Figura 9.	Calcolo della sezione equivalente secondo Carranza Torres (2004)	28
Figura 10.	Fasi di scavo e rilasci per la realizzazione di un tunnel	29
Figura 11.	Modello Plaxis2D – Sezione Pastrengo	31
Figura 12.	Sollecitazioni rivestimento di prima fase (cls in fase di maturazione)	35
Figura 13.	Variazione dello spessore del rivestimento definitivo	36
Figura 14.	Sollecitazioni nel rivestimento definitivo N,M,V (fattore di scala=1E9)	38
Figura 15.	Verifica rivestimento di prima fase – calcestruzzo in fase maturazione (Scavo di calotta), Stazione Pastrengo	40
	Verifica rivestimento di prima fase – calcestruzzo in fase maturazione (Scavo di ribasso), Stazione Pastrengo	40
Figura 16.	40	
Figura 17.	l'impostazione del modello numerico per lo studio l'effetto sismico	57
Figura 18.	Raggiungimento della deformazione obiettivo mediante modello numerico	58
Figura 19.	sollecitazioni dedotte nel rivestimento definitivo sull'azione sismica	58
Figura 20.	Schema di base per la soluzione di Caquot (Carranza-Torres, 2004)	60
Figura 21.	Schema dello “Shear Strength Reduction” utilizzato per valutare il fattore di sicurezza per modelli agli elementi finite e alle differenze finite—Dawson et al. (1999)	61
Figura 22.	Calcolo del raggio del tunnel modificato per l’analisi di stabilità del fronte (C. Carranza-Torres, 2004)	62

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1	Parametri geotecnici	15
Tabella 2	Parametri colonne Jet grouting	16
Tabella 3	Livelli di falda	16
Tabella 4	Coefficienti amplificativi dei carichi secondo NTC	17
Tabella 5	Coefficienti riduttivi dei parametri di resistenza del terreno secondo NTC	17
Tabella 6	Coefficienti riduttivi della resistenza globale del sistema secondo NTC	17
Tabella 7.	Sintesi delle caratteristiche della sezioni tipo di scavo	19
Tabella 8.	Parametri spettrali del sito	22
Tabella 9.	Fattore moltiplicativo C secondo Hashash, 2001	24


 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

Tabella 10. Fattore moltiplicativo k secondo Hashash, 2001	24
Tabella 11. Caratteristiche rivestimento di prima fase in Plaxis2D	27
Tabella 12. Parametri utilizzati per la simulazione del consolidamento da p.c.	29
Tabella 13. Fattori di sicurezza parziale dei materiali	39
Tabella 14. Fattori di sicurezza parziale dei materiali	41



CITTA' DI TORINO

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

Stazione Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina

MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

## 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 alla galleria di banchina della stazione Pastrengo.

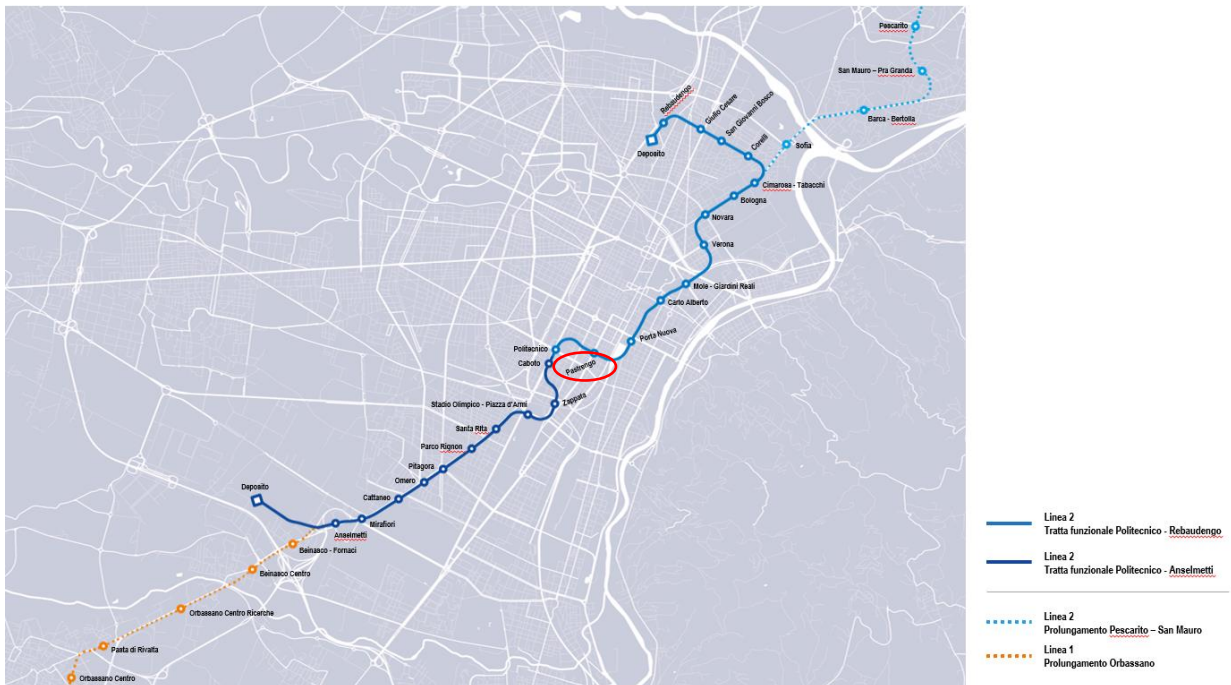


Figura 1. Key-plan della linea 2 – tratta funzionale Politecnico-Rebaudengo

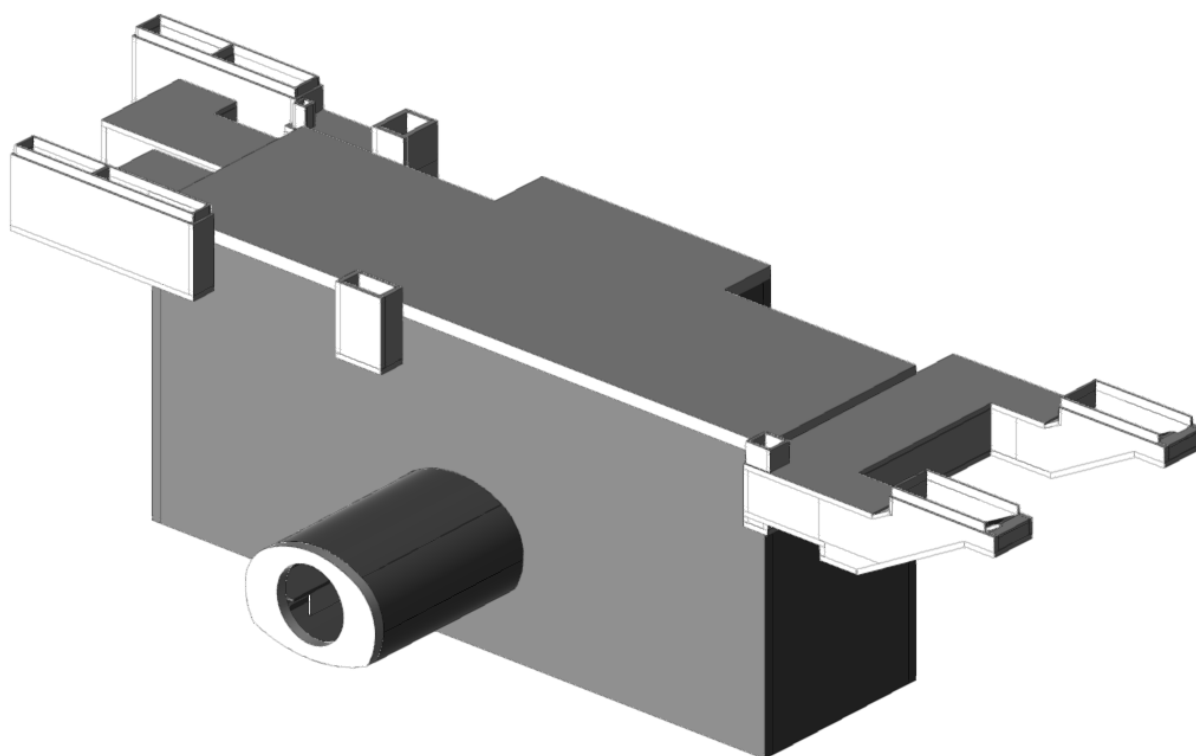


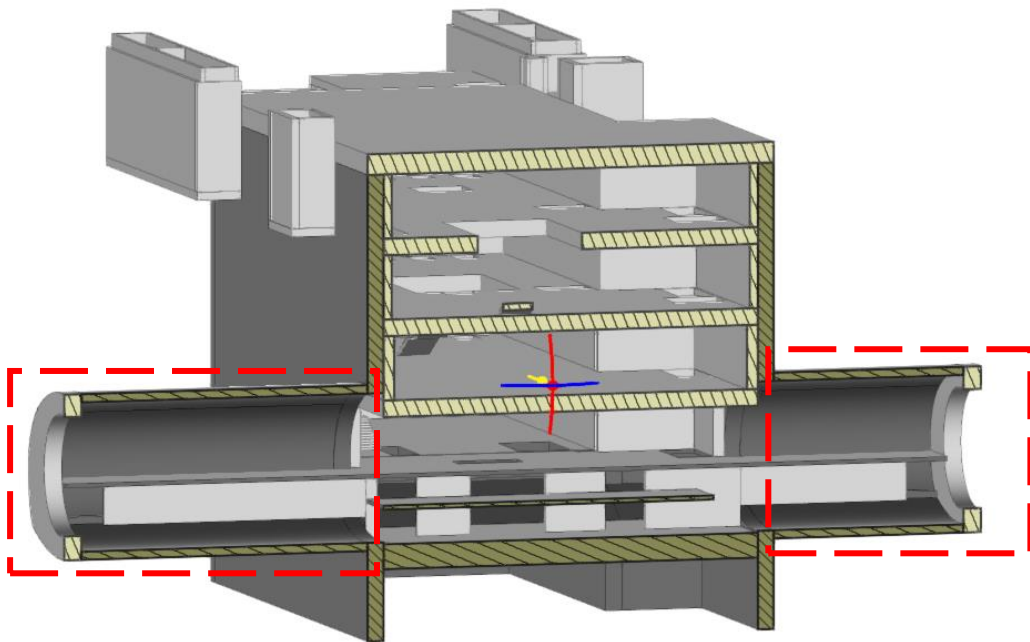
Figura 2. Modello 3D-Stazione Pastrengo

## 1.1 Scopo e campo di applicazione

In questa relazione sono presentati gli studi numerici per le verifiche dei sostegni di prima fase e il dimensionamento del rivestimento definitivo relative alle gallerie di banchina.

## 1.2 Descrizione delle opere

La galleria di banchina è di grandi dimensioni in condizioni di terreno prevalentemente soffice sotto falda freatica, di conseguenza questo tunnel sarà costruito sotto un terreno consolidato con colonne jet-grout, seguite da un rivestimento permanente in cemento armato gettato in opera per garantire la stabilità a lungo termine durante fase di servizio della stazione.




**Figura 3. Galleria di banchina della stazione Pastrengo (in rosso)**

### 1.3 Organizzazione della relazione

La relazione è articolata secondo la seguente struttura:

- Capitolo 1: Premessa e Introduzione
- Capitolo 2: Caratteristiche dei materiali
- Capitolo 3: Caratterizzazione geotecnica
- Capitolo 4: Sezione tipo e fasi esecutive
- Capitolo 5: Criteri di progettazione e metodologia applicata alla modellazione numerici
- Capitolo 6: Modellazione numerici
- Capitolo 7: Verifiche strutturali
- Capitolo 8: Stabilità del fronte di scavo




 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

## 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: "Presenza 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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

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

 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

- EN 1993-1-8 Part 1-8: Design of joints
- EN 1993-1-9 Part 1-9: Fatigue
- 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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

### 3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

#### 3.1 Calcestruzzi

##### 3.1.1 Calcestruzzo utilizzato per rivestimento di prima fase galleria

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>

##### 3.1.2 Calcestruzzo utilizzato per rivestimento definitivo galleria


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>

- **Copriferro**

c = 50 mm

Rivestimento definitivo galleria

$\gamma=75$  KN/m<sup>3</sup>

 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 Profilati e piastre per centine

#### ACCIAIO S275


- Tensione caratteristica di rottura  $f_{tk} \geq 430 \text{ MPa}$
- Tensione caratteristica di snervamento  $f_{yk} \geq 275 \text{ MPa}$
- Modulo di elasticità:  $E_a = 210000 \text{ MPa}$

- **Iniezioni dalla superficie**

- Si faccia riferimento al paragrafo successivo per le specifiche tecniche.

- **Impermeabilizzazione**

#### TELI IN PVC PER IMPERMEABILIZZAZIONE

 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

- Spessore: 2±0.5mm
- Peso specifico: 1.3g/cm<sup>3</sup>
- Resistenza a trazione media: 15MPa

TESSUTO NON TESSUTO

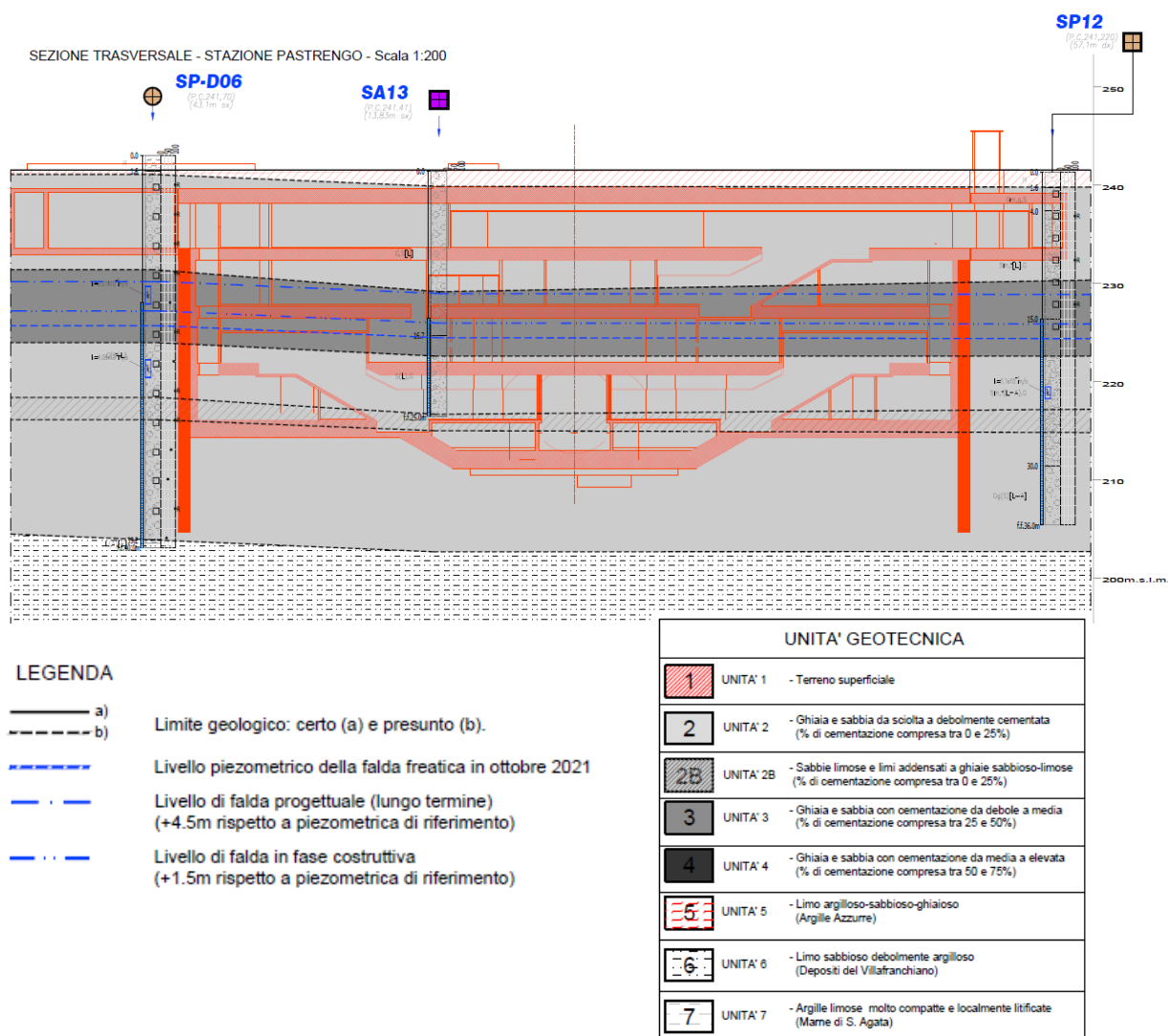
- Massa unitaria: 500g/m<sup>2</sup>
- Spessore: a 2kPa 3.8mm, a 200kPa 1.8mm
- Resistenza a punzonamento: 5.0kN
- Resistenza a trazione media: 45kN/m

CORDOLINO BENTONITICO

- Dimensione: 20x25mm
- Espansione a contatto con acqua: 6 volte il volume iniziale
- Pressione di rigonfiamento dopo 48h: >600kPa

## 4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Lo scavo della stazione denominata Pastrengo, come si evince dalla sezione stratigrafica riportata nel seguito, è interessato da una coltre superiore di circa 1,5 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



**Figura 4. Stralcio stratigrafia stazione Pastreng**




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

Tabella 1 Parametri geotecnici

U1 (Terreno superficiale)					U2 (Ghiaie e sabbie)				
$\gamma$	$\phi$	c	E	v	$\gamma$	$\phi$	c	E	v
[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[kPa]	[MPa]	[-]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[kPa]	[MPa]	[-]
19	29	0	10	0,3	19	36	10	150	0,3
U3 (Terreno superficiale)					U4 (Ghiaie e sabbie)				
$\gamma$	$\phi$	c	E	v	$\gamma$	$\phi$	c	E	v
[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[kPa]	[MPa]	[-]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[kPa]	[MPa]	[-]
19-22	36	20-50	170-200	0,3-0.4	19-22	36-42	50-140	200-260	0,3-0.4
U5 (Argille Azzurre)					U6 (depositi Villafranchiani)				
$\gamma$	$\phi$	c	E	v	$\gamma$	$\phi$	c	E	v
[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[kPa]	[MPa]	[-]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[kPa]	[MPa]	[-]
19-21	20-30	22-45	30-100	0,3-0.35	18-20	26-36	10-35	60-120	0,3-0.35
U7 (marne di Sant'Agata)									
$\gamma$	$\phi$	c	E	v					
[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[kPa]	[MPa]	[-]					
20.4	27-31	15-30	100-200	0,3-0.35					

- $\gamma'$  : peso di volume unitario
- E : modulo di deformabilità



 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

- $\nu'$  : coefficiente di Poisson
- $\phi'$  : angolo di attrito
- $c'$  : coesione apparente

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**

Parametri JG					
$\gamma$	$\phi$	$c$	UCS	E	$\nu$
[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**

Livello piezometrico (da MTL2T1A0DGEOSPAT001)	-17,2	+224.55
Livello piezometrico di riferimento (2018)	-16,5	+225.05
B T (+1.5 da livello piezometrico di riferimento) - Fase costruttiva	-15,0	+226.55
L T (+3 da breve termine) - Ultimo stage	-12,0	+229.55

Il livello di falda utilizzato per le analisi corrisponde ai dati del 2018, che rispetto alle letture estratte nel 2021, presentano condizioni più sfavorevoli. Per i rivestimenti definitivi la falda è stata assunta nella condizione più sfavorevole tra le stazioni S4G (-5.5m da p.c.). A seconda della verifica che si intende effettuare, verranno utilizzati coefficienti che riducono i parametri meccanici di resistenza del terreno o coefficienti che amplificano gli effetti delle azioni.

In particolare, seguendo quanto prescritto al punto 6.2.3 delle Norme Tecniche per le Costruzioni, si sono considerati i seguenti approcci di verifica:

- Verifiche SLU-GEO:  $A_1 - C_2$
- Verifiche SLU-STR:  $A_1 - C_1$

 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

**Tabella 4 Coefficienti amplificativi dei carichi secondo NTC**

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 5 Coefficienti riduttivi dei parametri di resistenza del terreno secondo NTC**

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


Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale $\gamma_M$	(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 6 Coefficienti riduttivi della resistenza globale del sistema secondo NTC**

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>
<b>Stazione Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina</b>	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

**Tabella 7. Sintesi delle caratteristiche della sezioni tipo di scavo**

Supporto di prima fase /Trattamento	Descrizione
Pre-sostegno calotta	Colonne Jet-Grouting (JG) 9-11 passo 1.5 m distribuite in modo da realizzare uno schema di consolidamento "a capanna (come da disegni specifici)
Rinforzo del fronte	10cm cls fibrorinforzato
Centine metalliche	2*IPN 220 passo 1m
Calcestruzzo (cls) proiettato	30cm fibrorinforzato
Impermeabilizzazione	Telo in PVC e TNT applicati in calotta e piedritti Full round solo in corrispondenza dei tratti di interfaccia con le stazioni per una lunghezza di 6,00m
Lunghezza sfondo max	1m
Distanza max getto arco rovescio	1 diametro equivalente ≈ 9,00m
Distanza max getto calotta	4 diametri equivalenti
Rivestimento calotta	60cm
Rivestimento arco rovescio	60cm
Rivestimento Piedritti e spigoli	Variabile (massimo 90cm)

Le fasi esecutive di scavo e realizzazione della galleria di banchina sono le seguenti:

1. Realizzazione dei consolidamenti a capanna da piano campagna con la tecnica del jet-grouting con una geometria tale da interessare il contorno dello scavo ed oltre esso per uno spessore minimo di 3m (i trattamenti)
2. Scavo di avanzamento di calotta a partire dal corpo di stazione (sfondo 1m) con applicazione di calcestruzzo (cls) proiettato fibrorinforzato (spessore=5cm) ;
3. Collocazione del sostegno di prima fase di calotta: centine metalliche e cls proiettato fibrorinforzato (spessore 25cm);
4. Esecuzione dell'arco rovescio provvisorio con cls proiettato fibrorinforzato (spessore 30cm)
5. Scavo di avanzamento dell'arco rovescio (sfondo 1m) con applicazione di cls proiettato fibrorinforzato (spessore=5cm) ad ogni sfondo;
6. Collocazione del sostegno di prima fase: centine metalliche e cls proiettato fibrorinforzato (spessore 25cm)
7. Posa del sistema di impermeabilizzazione, posa armatura e getto dell'arco rovescio
8. Posa del sistema di impermeabilizzazione, posa armatura e getto di calotta e piedritti.

 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

## 6. CRITERI DI PROGETTAZIONE E METODOLOGIA APPLICATA ALLA MODELLAZIONE NUMERICA

Il metodo di calcolo impiegato per valutare l'interazione terreno-struttura ed ottenere le sollecitazioni agenti sui rivestimenti primari e definitivi della galleria è quello degli elementi finiti (FEM) implementato tramite il codice commerciale Plaxis2D. Le condizioni al contorno ed iniziali sono realizzate tramite una maglia di elementi triangolari i cui confini sono stati collocati ad una distanza dalla sezione della galleria tale da non risentire degli effetti di bordo; il bordo superiore del modello coincide con il profilo topografico del terreno.

Lo stato tensionale geostatico è stato riprodotto nel modello tramite la fase 0, applicando un campo di sforzo di tipo gravitazionale.

### 6.1 Modellazione dell'azione sismica

#### 6.1.1 Considerazioni generali

La vita nominale dell'opera  $V_N$  è intesa come il numero di anni nei quali la struttura deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata. Per l'opera oggetto di questo documento si considera 100 anni.

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 d'uso.

Nel caso in esame si fa riferimento alla classe d'uso III (costruzioni che prevedono affollamenti significativi) cui è associato un coefficiente pari a 1.5.


Le azioni sismiche su ciascuna costruzione sono valutate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  definito come prodotto tra la vita nominale ed il coefficiente d'uso.

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

Per il caso in esame si ottiene:  $V_R = 150$  anni

La pericolosità sismica si definisce, per il caso in oggetto, in termini di accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero, su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale, in considerazione di prefissate probabilità di eccedenza  $P_{VR}$  nel periodo di riferimento  $V_R$ .

Il valore di progetto dell'accelerazione  $a_g$  viene definito in funzione della "probabilità di superamento" in un dato "tempo di ritorno". Queste due grandezze sono correlate tra loro:

 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

$$T_R = -V_R / \ln(1 - P_{VR})$$

Dove:

$T_R$  è il tempo di ritorno

$V_R$  il periodo di riferimento dell'opera

$P_{VR}$  è la probabilità di superamento nel periodo di riferimento

Per la struttura in oggetto, le verifiche in condizioni sismiche saranno condotte facendo riferimento allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV).

### 6.1.2 Condizioni sismiche

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

- suolo di tipo B (Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s).
- caratteristiche della superficie topografica tipo T1 (Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media  $i \leq 15^\circ$ )


### 6.1.3 Accelerazione massima al suolo

La definizione dell'azione sismica di progetto, nel DM 14/01/2008, non si basa sulla classificazione sismica del territorio. I parametri necessari per la determinazione dell'azione sismica di progetto sono calcolati direttamente per il sito in esame, utilizzando le informazioni disponibili nel reticolo di riferimento (Allegato B del DM 14/01/2008).

I valori al sito sono ottenuti mediando i parametri spettrali ( $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T^*c$ ) dei 4 nodi più prossimi al sito stesso mediante la seguente formula:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{P_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

Dove:

 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

P =valore del parametro nel sito in esame;

P<sub>i</sub> =valore del parametro nell'i-esimo punto della maglia contenente il sito in esame;

d<sub>i</sub> =distanza del sito in esame dall'i-esimo punto della maglia.

Qualora nel reticolo non siano riportati i valori dei parametri spettrali per il tempo di ritorno richiesto, è possibile ricavare i parametri di interesse mediante interpolazione tra i valori dei parametri corrispondenti ai due tempi di ritorno che comprendono il tempo di ritorno voluto:

$$\log(P) = \log(P_1) + \log(P_2/P_1) \cdot \log(T_R/T_{R1}) \cdot [\log(T_{R2}/T_{R1})]^{-1}$$

Dove:

T<sub>R</sub> è il periodo di ritorno richiesto corrispondente al periodo di riferimento ed alla probabilità di superamento nel periodo di riferimento per lo stato limite considerato.

T<sub>R1</sub> e T<sub>R2</sub> sono i periodi di ritorno più prossimi a T<sub>R</sub> per i quali si dispone del generico parametro P.

#### 6.1.4 Parametri ag, Fo, Tc\*

Per il caso in esame l'accelerazione massima orizzontale al sito per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) varia lungo il tracciato da 0.066g (Staz. Corelli) a 0.086 (Staz. Anselmetti).

Nella tabella seguente si riportano i valori dell'accelerazione massima su suolo roccioso (a<sub>g</sub>) e dei parametri spettrali (F<sub>0</sub>, T\*c) per lo SLV ed il rispettivo tempo di ritorno.

**Tabella 8. Parametri spettrali del sito**


Referenza	Comune	ag/g [g]	F0	T*c [Sec]
Stz.Corelli	Torino	0.067	2.85	0.29
Stz. Anselmetti	Torino	0.086	2.78	0.29

Cautelativamente si è considerata la massima accelerazione ag/g=0.086.

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

$$a_{max} = a_g \cdot SS \cdot ST = 0.086 \cdot 1.20 \cdot 1.0 = 0.103g$$

essendo SS=1.2, ST=1.0.

 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

Gli effetti di amplificazione locale dovuti alla stratigrafia ed alla conformazione topografica vengono messi in conto mediante i parametri  $S_S$  ed  $S_T$ .

La categoria di suolo più attinente è la C pertanto, in considerazione dei parametri  $a_g$  ed  $F_0$  definiti nella Tabella 4.2, si ottiene  $SS=1.5$  (DM 14/01/2008 Tab.3.2.V).

Per tener conto delle condizioni topografiche si utilizzano i valori del coefficiente topografico  $S_T$  riportati nella Tab.3.2.VI del DM 14/01/2008. Per il caso in esame si assume  $S_T=1.0$ .

### 6.1.5 Applicazione al modello numerico

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

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

La metodologia da seguire per calcolare gli effetti di ovaling è la seguente:

1. Ottenimento della PGA e della magnitudo  $M_w$  del terremoto di riferimento.
2. Amplificazione della PGA in funzione del tipo di terreno che si ha in sito (moltiplicazione per il fattore  $S$ ).

$$a_{max} = PGA \cdot S$$


Il fattore  $S_S$  è stato già presentato nel paragrafo precedente.

3. Deamplificazione dell'accelerazione trovata in funzione dell'approfondimento del tunnel

$$a_{z,max} = a_{max} \cdot C = 0.13$$

Il fattore  $C$  viene definito nella Tabella 4 dell'articolo (Hashash, 2001) presentata di seguito e viene assunto in modo cautelativo pari a 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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

**Tabella 9. Fattore moltiplicativo C secondo Hashash, 2001**

Tunnel depth (m)	Ratio of ground motion at tunnel depth to motion at ground surface
≤ 6	1.0
6–15	0.9
15–30	0.8
> 30	0.7

4. Il valore di  $a_{z,max}$  viene utilizzato per trovare la deformazione massima nelle condizioni di free-field, che è funzione della  $V_s$  (velocità di picco, funzione a sua volta della magnitudo e della distanza dalla fonte sismica,  $k$ ).

$$\gamma_{max} = \frac{V_s}{C_s}$$

$$V_s = k \cdot a_{z,max}$$

Il fattore  $k$  viene definito nella Tabella 3 dell'articolo (Hashash, 2001) presentata di seguito.

**Tabella 10. Fattore moltiplicativo k secondo Hashash, 2001**



Moment magnitude ( $M_w$ )	Ratio of peak ground velocity (cm/s) to peak ground acceleration (g)		
	Source-to-site distance (km)		
	0-20	20-50	50-100
<i>Rock<sup>a</sup></i>			
6.5	66	76	86
7.5	97	109	97
8.5	127	140	152
<i>Stiff soil<sup>a</sup></i>			
6.5	94	102	109
7.5	140	127	155
8.5	180	188	193
<i>Soft soil<sup>a</sup></i>			
6.5	140	132	142
7.5	208	165	201
8.5	269	244	251

<sup>a</sup>In this table, the sediment types represent the following shear wave velocity ranges: rock  $\geq 750$  m/s; stiff soil is 200-750 m/s; and soft soil  $< 200$  m/s. The relationship between peak ground velocity and peak ground acceleration is less certain in soft soils.

Una volta trovata la deformazione massima  $\gamma_{max}$ , occorre ricavare le sollecitazioni indotte da questa deformazione sul rivestimento della galleria.

Nel modello Plaxis2D si impone uno spostamento proporzionale alla deformata che si vuole ottenere.

$$\Delta x_{max} = \gamma_{max} \left( \frac{h_{mod}}{2} \right)$$

$\Delta x_{max} = 0.022$  m (inserimento nel modello numerica)

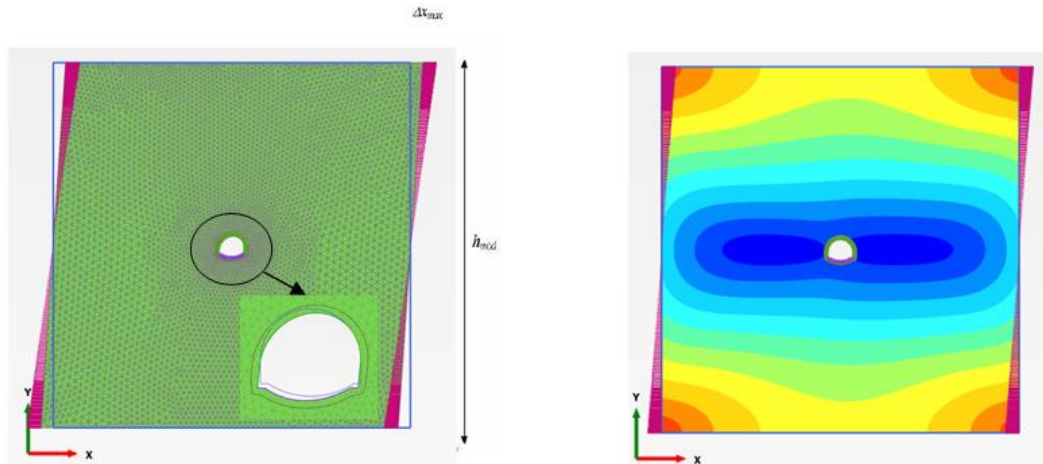


Figura 7. Procedura "trial & error"

## 6.2 Legge di comportamento dei materiali

### 6.2.1 Terreno

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

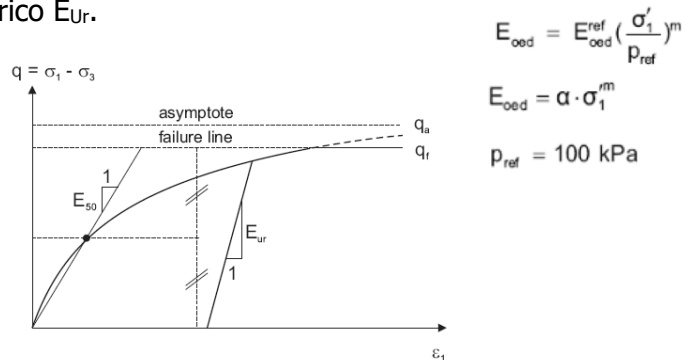



Figura 8. Modello costitutivo Hardening Soil

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

 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

$$K_0 = 1 - \sin \varphi'$$

### 6.3 Carichi variabili – Accidentali

Un carico variabile pari a 20 kN/m<sup>2</sup> uniformemente distribuito è applicato in superficie in tutte le fasi di calcolo.

### 6.4 Sostegno di prima fase

Il sostegno di prima fase è stato simulato con elementi plate aventi comportamento elastico-lineare. Gli elementi plate, nel modello matematico, sono stati simulati con un materiale di rigidità equivalente ed è considerata la sezione omogeneizzata composta da centina-shotcrete. Il sostegno di prima fase è stato verificato sia in condizioni maturazione iniziale, sia in condizioni di completa maturazione.

**Tabella 11. Caratteristiche rivestimento di prima fase in Plaxis2D**

Sezione	E <sub>shotcrete</sub> (MPa)	f <sub>ck shotcrete</sub> (MPa)	f <sub>cd shotcrete</sub> (MPa)	E <sub>acciaio</sub> (MPa)	EA <sub>sez. equivalente</sub> (kN/m)	EI <sub>sez. equivalente</sub> (kNm <sup>2</sup> /m)
Shotcrete + centine	15000	15.0	10.0	200000	3.677e6	1.212e4

Le caratteristiche della sezione equivalente sono state calcolate secondo il metodo di Carranza Torres (2004).

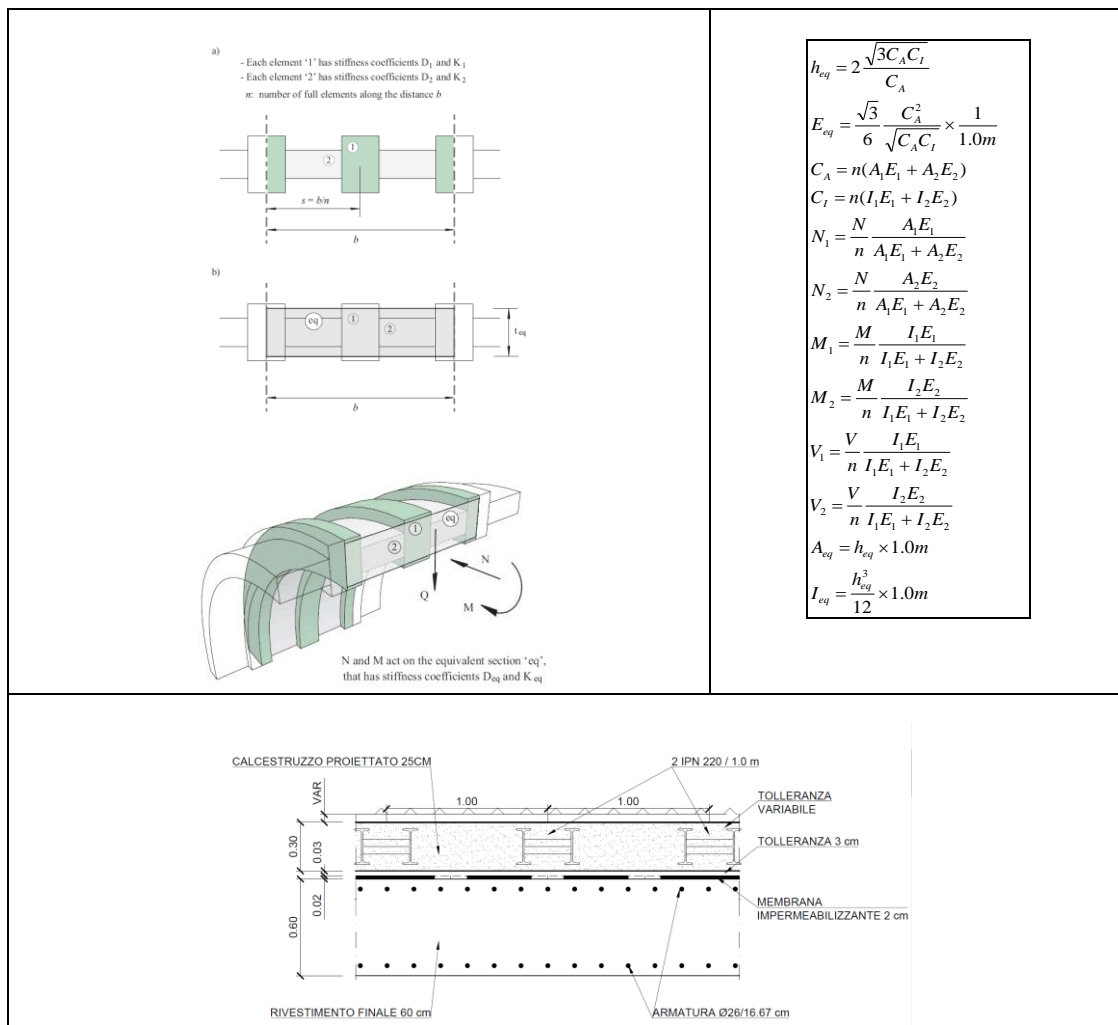


Figura 9. Calcolo della sezione equivalente secondo Carranza Torres (2004)

### 6.5 Rivestimento definitivo

A lungo termine si è ipotizzato che il sostegno di prima fase e gli interventi di trattamento del terreno non siano più attivi ed i carichi siano trasferiti al rivestimento definitivo.

Il rivestimento definitivo è simulato tramite elementi *plate* aventi comportamento elastico-lineare.

Al momento della loro attivazione, è stato disattivato qualsiasi intervento di miglioramento delle condizioni del terreno nell'intorno dello scavo.



### 6.6 Consolidamento da p.c.

La zona di consolidamento a capanna eseguito dalla superficie è stata simulata come una zona di elementi triangolari di ampiezza pari a circa 3.0m sulla calotta ed in corrispondenza dei piedritti. I parametri assegnati a tale materiale sono riassunti nella tabella seguente.

Tabella 12. Parametri utilizzati per la simulazione del consolidamento da p.c.

$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	c [kPa]	$\phi$ [°]	E [MPa]	$\nu$ [-]
19	150	36	450	0.3

### 6.7 Sequenza esecutiva

Le fasi esecutive e l'effetto del passaggio del fronte di scavo attraverso la generica sezione di calcolo, sono simulate tramite il valore di  $\lambda$  (rilascio tensionale).

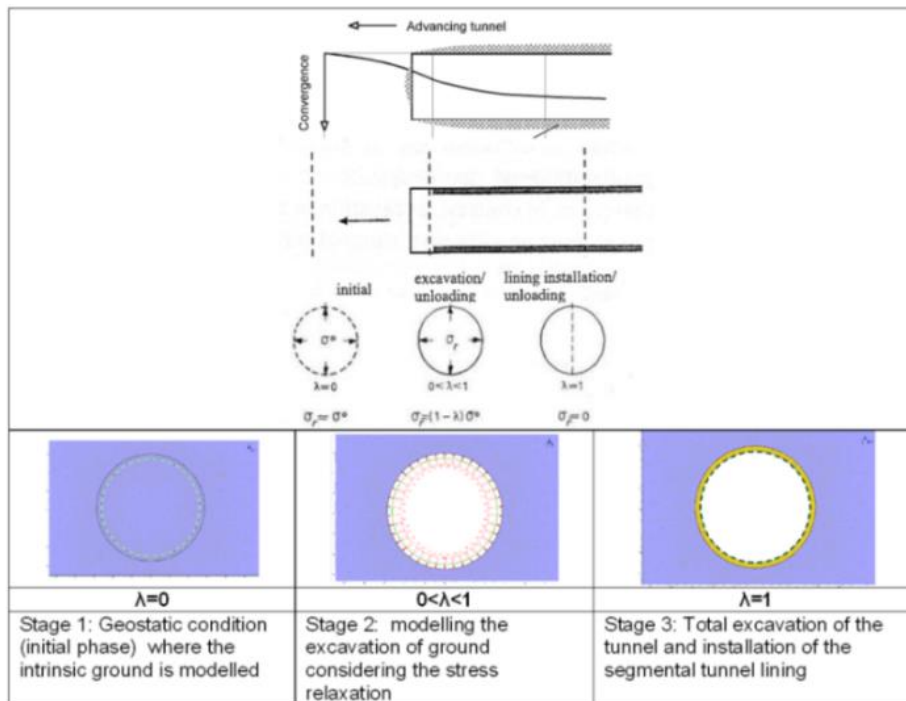




Figura 10. Fasi di scavo e rilasci per la realizzazione di un tunnel

Di seguito sono indicate le fasi ipotizzate nella modellazione

- Fase 0: condizione geostatica;

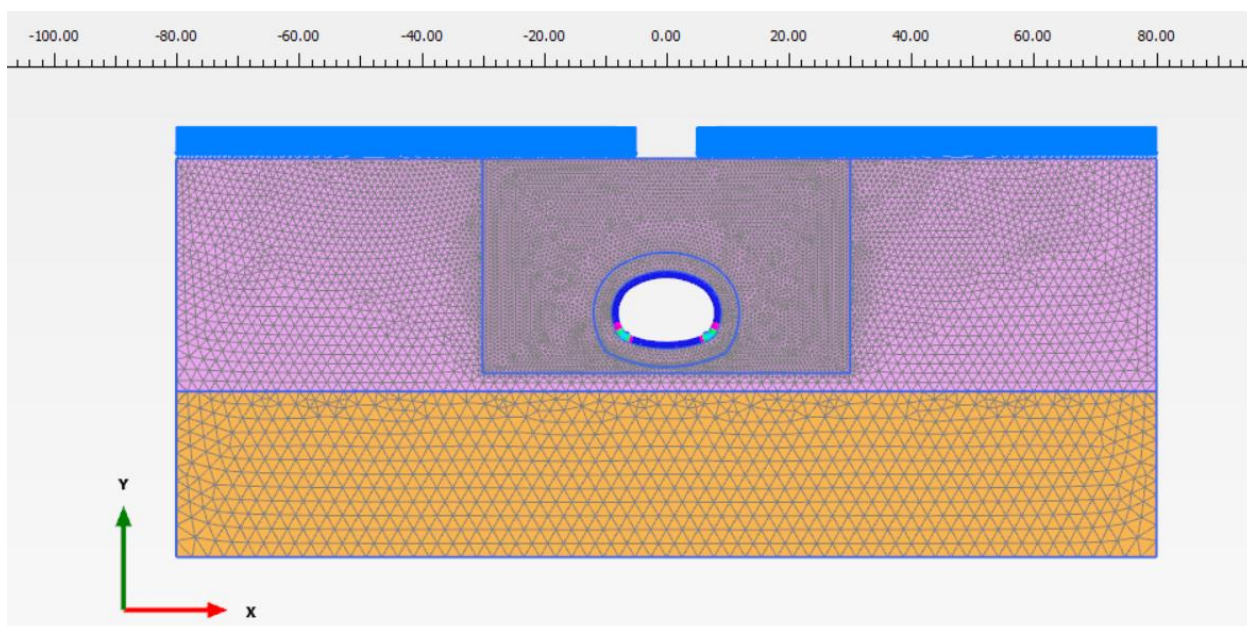
 <b>CITTA' DI TORINO</b>	<b>Metropolitana di Torino - Linea 2</b> <b>Tratta: Politecnico-Rebaudengo</b> <b>Lotto Costruttivo 2: Bologna-Politecnico</b>
Stazione Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

- Fase 1:attivazione del carico superficiale;
- Fase 2:attivazione del consolidamento;
- Fase 3:applicazione del rilascio tensionale pari a 30% per la simulazione dello scavo di calotta;
- Fase 4:situazione a 1m dal fronte con installazione del sostegno di prima fase – cls in fase di maturazione ( $\lambda=1.0$ ) per lo scavo di calotta ;
- Fase 5:applicazione del rilascio tensionale pari a 70% per lo scavo di ribasso;
- Fase 6: applicazione del rilascio totale e contestuale installazione del sostegno di prima fase – cls in fase di maturazione ( $l=1.0$ ) per lo scavo di ribasso;
- Fase 7:riduzione dei parametri di resistenza del terreno per la simulazione della condizione a lungo termine fino al 20% e posa del rivestimento definitivo; disattivazione del sostegno di prima fase e del consolidamento.
- Fase 8:getto in opera del rivestimento definitivo, disattivazione del consolidamento e del rivestimento di I fase per la condizione di lungo termine.
- Fase 9: ripristino della falda di progetto

 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

## 7. MODELLI NUMERICI

Nelle figure seguenti sono presentati i modelli numerici utilizzati per le analisi delle sezioni indicate.



**Figura 11. Modello Plaxis2D – Sezione Pastrengo**

### 7.1 Analisi numerica per le verifiche dei sostegni di prima fase

I risultati in termini di caratteristiche di sollecitazione sul rivestimento di prima fase sono presentati di seguito.





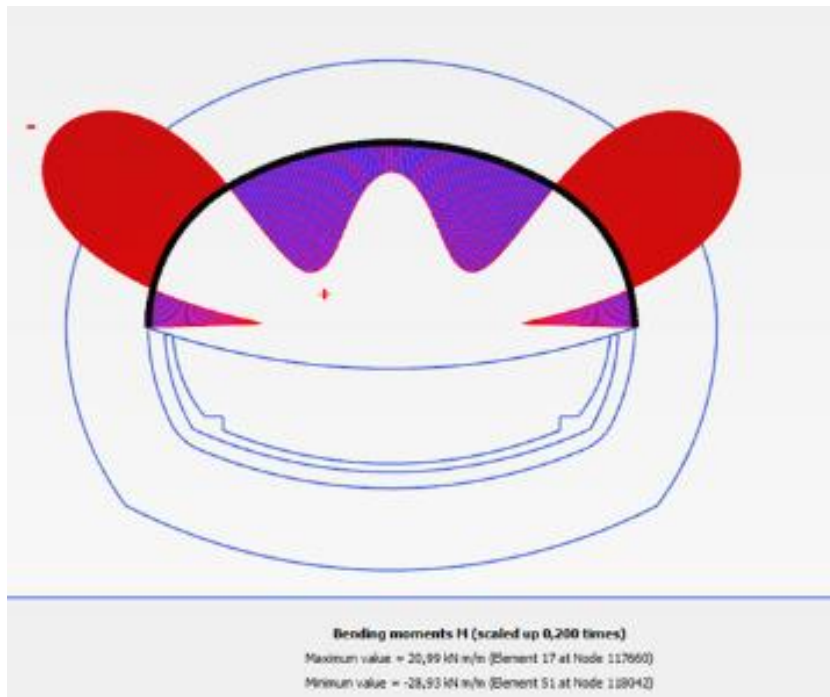
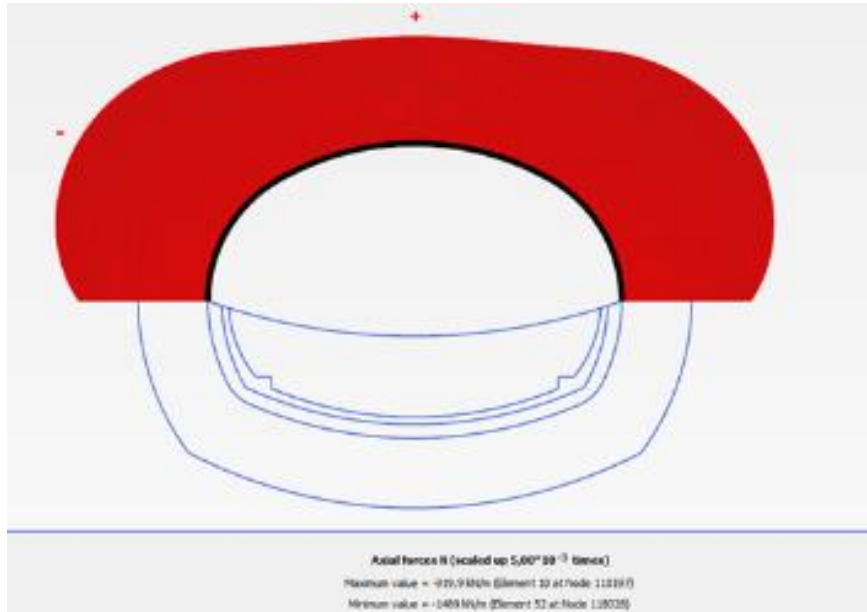
CITTA' DI TORINO

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

Stazione Pastrengo - Relazione di calcolo  
gallerie di banchina

MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

### Fase 4 – Scavo di Calotta



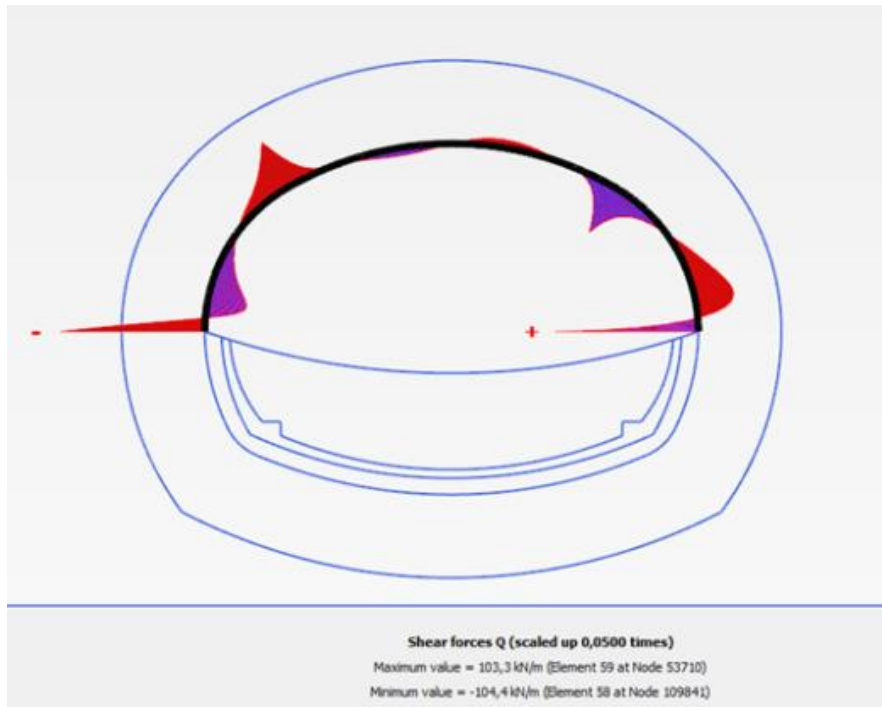


CITTA' DI TORINO

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

Stazione Pastrengo - Relazione di calcolo  
gallerie di banchina

MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1



**Fase 5 – Scavo di ribasso**

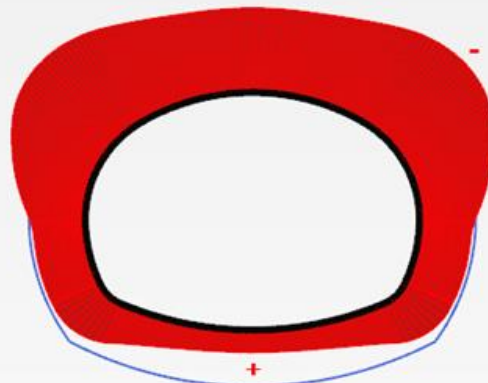


CITTA' DI TORINO

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

Stazione Pastrengo - Relazione di calcolo  
gallerie di banchina

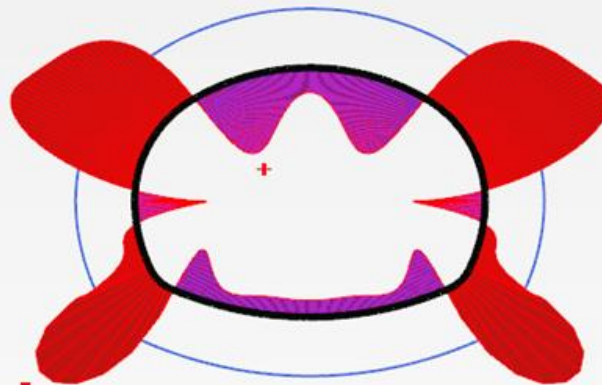
MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1



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

Maximum value = -241,9 kN/m (Element 226 at Node 56468)

Minimum value = -1172 kN/m (Element 68 at Node 80474)



**Bending moments M (scaled up 0,200 times)**

Maximum value = 19,30 kN m/m (Element 16 at Node 117632)

Minimum value = -37,96 kN m/m (Element 186 at Node 91873)

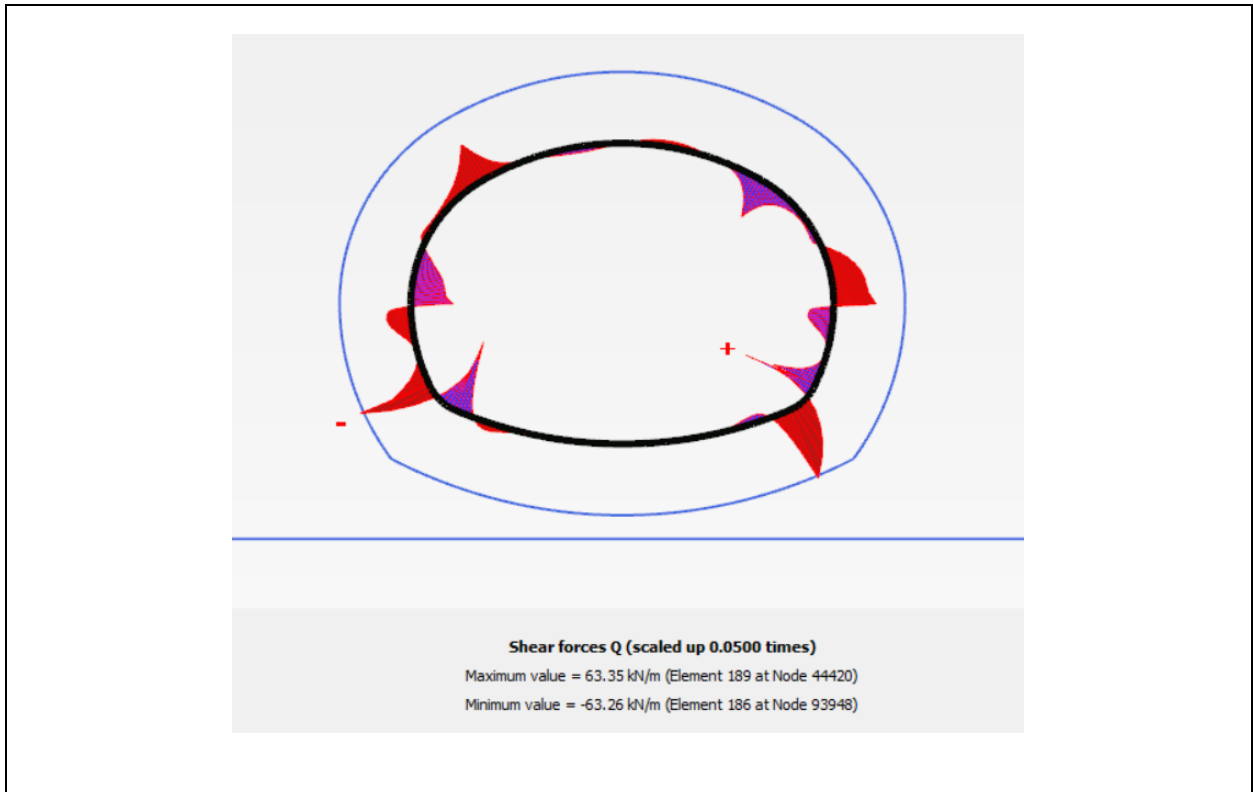
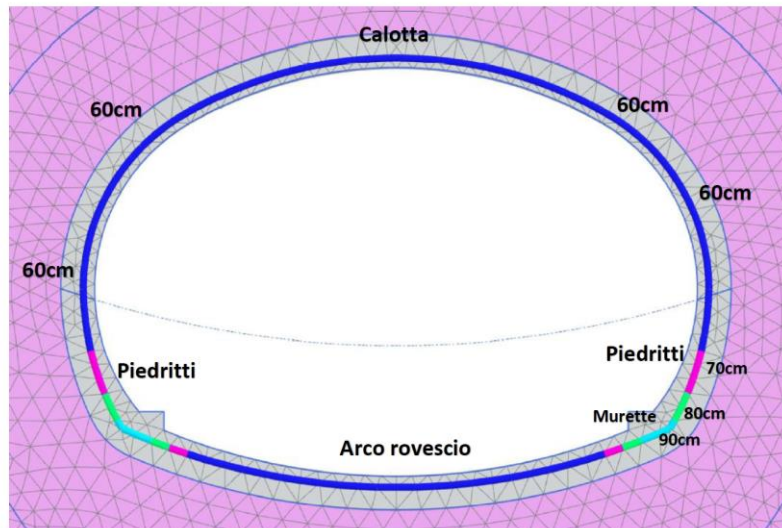


Figura 12. Sollecitazioni rivestimento di prima fase (cls in fase di maturazione)

## 7.2 Analisi numerica per il dimensionamento del rivestimento definitivo

I risultati in termini di caratteristiche di sollecitazione sul rivestimento definitivo in funzione dello spessore variabile dello stesso sono presentati di seguito.

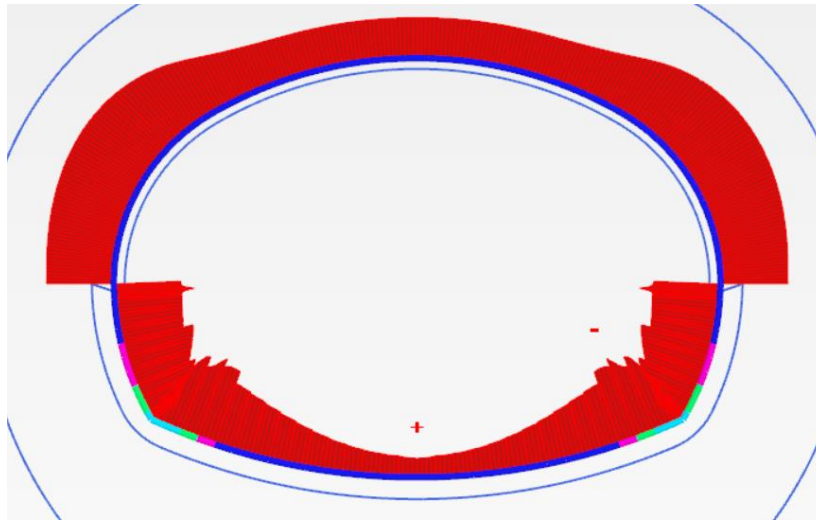


	60cm
	70cm
	80cm
	90cm

Figura 13. Variazione dello spessore del rivestimento definitivo

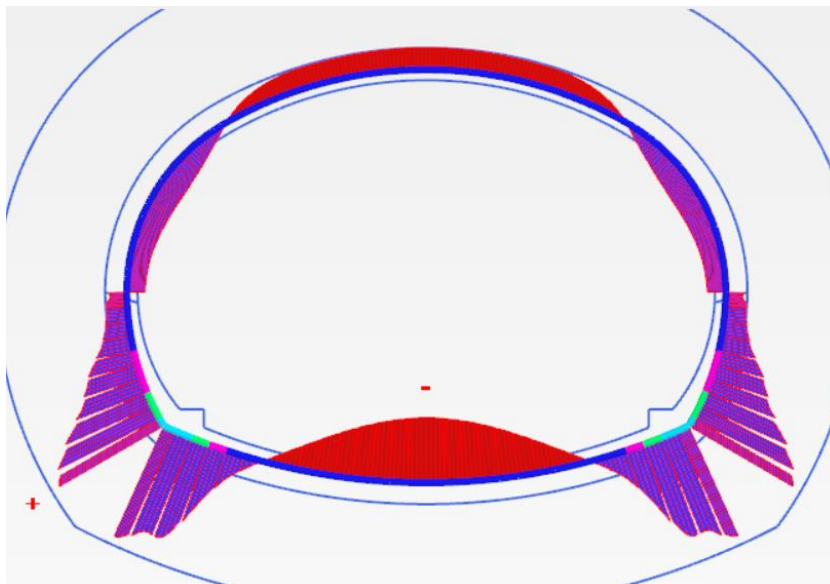


### 7.2.1 Sollecitazioni nel rivestimento definitivo



Axial forces N (scaled up  $1.25 \cdot 10^6$  times)

Maximum value =  $-0.4131 \cdot 10^{-6}$  kN/m (Element 214 at Node 56638)  
Minimum value =  $-1.876 \cdot 10^{-6}$  kN/m (Element 190 at Node 46926)



Bending moments M (scaled up  $10.0 \cdot 10^6$  times)

Uniform value of  $0.3361 \cdot 10^{-6}$  kN m/m

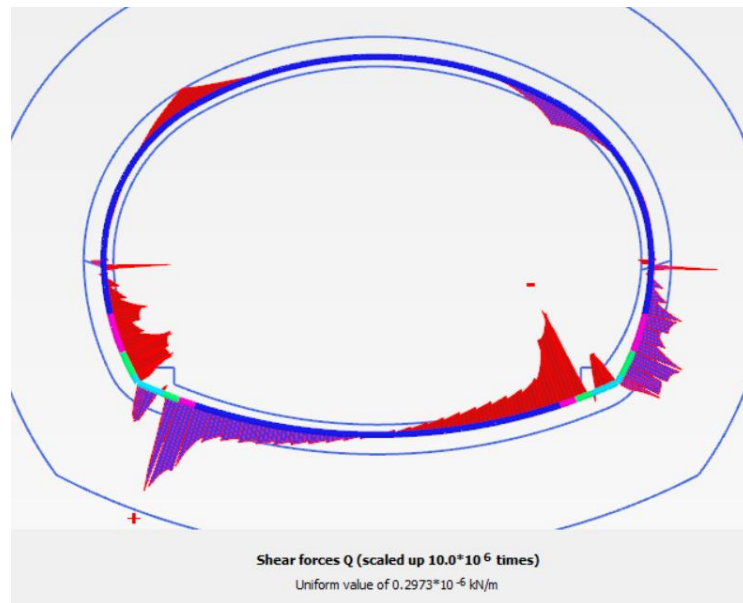


CITTA' DI TORINO

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

Stazione Pastrengo - Relazione di calcolo  
gallerie di banchina


MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1



**Figura 14. Sollecitazioni nel rivestimento definitivo N,M,V (fattore di scala=1E9)**

Per maggiori dettagli si rimanda all'Allegato 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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

## 8. VERIFICHE STRUTTURALI

### 8.1 Verifiche strutturali del rivestimento di prima fase

Le verifiche strutturali sono state eseguite allo stato limite ultimo (SLU). Le azioni permanenti utilizzate sono riferite ai valori caratteristici ottenuti dal modello di Plaxis2D e le successive verifiche sono rapportate al valore del coefficiente parziale di sicurezza delle azioni permanenti  $\gamma_G = 1.30$ .

I valori di calcolo delle resistenze dei materiali sono ricavati dividendo ciascun valore caratteristico per il fattore di sicurezza parziale  $\gamma_M$  specifico del materiale considerato (si veda la tabella seguente).

**Tabella 13. Fattori di sicurezza parziale dei materiali**

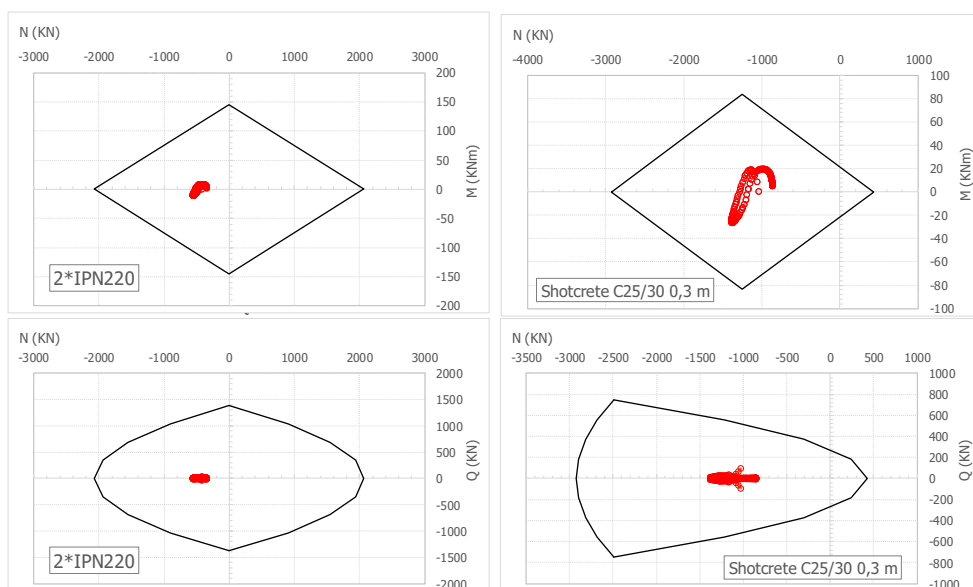
Stato limite	Acciaio Carpenteria $\gamma_M$	Calcestruzzo $\gamma_C$
<b>SLU</b>	1.05	1.50

Le verifiche strutturali dei sostegni di prima fase sono riportate di seguito.

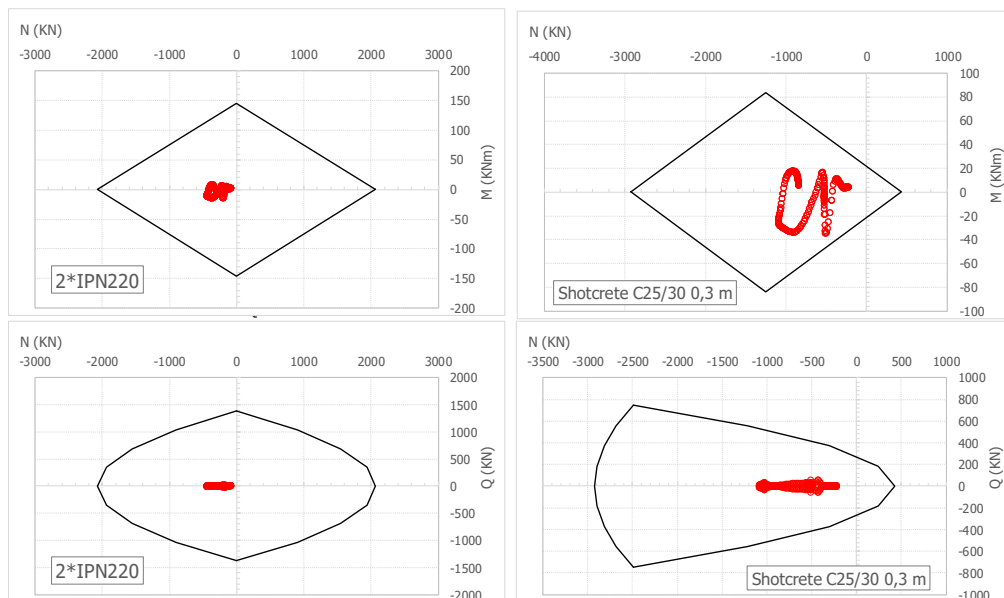
#### 8.1.1 Rivestimento prima fase cls in fase maturazione – Stazione Pastrengo

Centine		Calcestruzzo Giovane	
Acciaio	S275	CLS	C25/30
Profilo	2*IPN220	$f_{ck}$ (MPa)	15.00
$A$ (m <sup>2</sup> )	7.90E-03	$f_{ctk}$ (MPa)	-2.19
$I$ (m <sup>4</sup> )	6.12E-05	$f_{cd}$ (MPa)	10.00
$t$ (m)	0.22	$f_{ctd}$ (MPa)	-1.46
$f_{yk}$ (MPa)	275.00	$E_s$ (kPa)	1.50E+07
$f_{yd}$ (MPa)	261.90	$\nu$ (-)	0.18
$E_s$ (kPa)	2.10E+08		
$\nu$ (-)	0.30	$t$ (m)	0.30
		$A$ (m <sup>2</sup> )	0.30000
Passo (m)	1.00	$I$ (m <sup>4</sup> )	0.00225






**Figura 15. Verifica rivestimento di prima fase – calcestruzzo in fase maturazione (Scavo di calotta), Stazione Pastrengo**



**Figura 16. Verifica rivestimento di prima fase – calcestruzzo in fase maturazione (Scavo di ribasso), Stazione Pastrengo**

 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

## 8.2 Verifiche strutturali il rivestimento definitivo

### 8.2.1 Rivestimento definitivo

I valori di calcolo delle resistenze dei materiali si ricavano dividendo ciascun valore caratteristico per il fattore di sicurezza parziale  $\gamma_m$  specifico del materiale considerato (si veda tabella seguente).

**Tabella 14. Fattori di sicurezza parziale dei materiali**

Stato limite	Acciaio $\gamma_s$	Calcestruzzo $\gamma_c$
SLU	1.15	1.50

Le seguenti verifiche sono state effettuate:

- in condizioni statiche (condizioni di normale esercizio):
  - Verifica a S.L.U. per flessione;
  - Verifica a S.L.U. per taglio;
  - Verifica a S.L.E per fessurazione:  $w < 0.3\text{mm}$ .
- in condizioni sismiche:
  - Verifica a S.L.U. per flessione;
  - Verifica a S.L.U. per taglio.

### 8.2.2 Condizioni statiche – SLU flessione

Si riportano di seguito le verifiche strutturali a SLU.

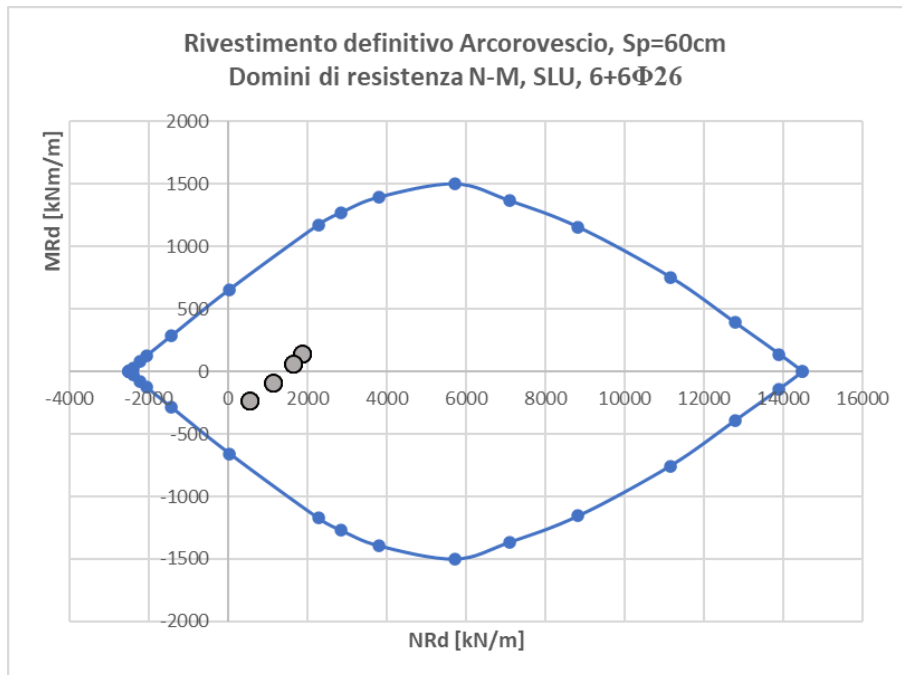
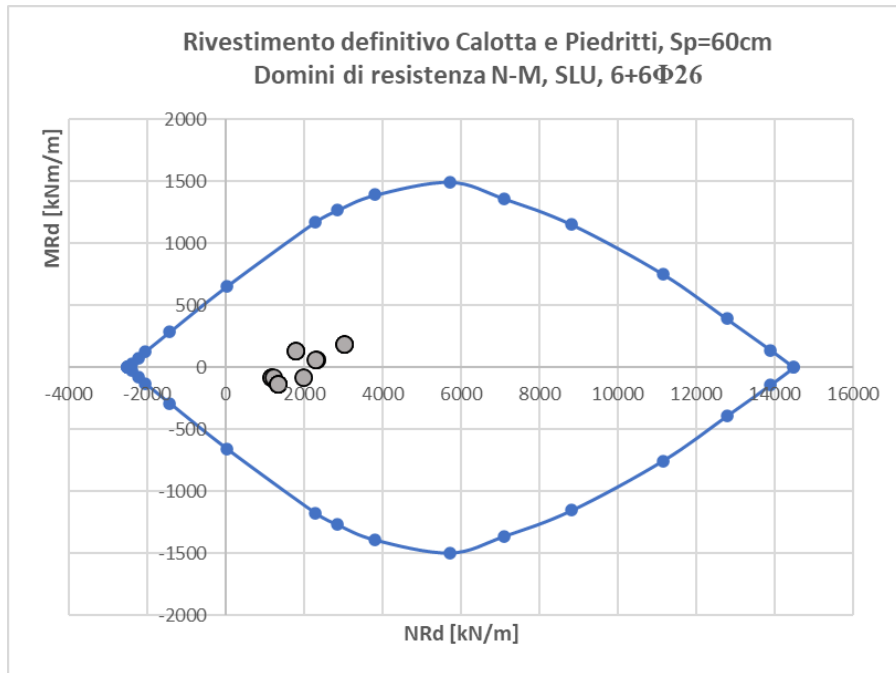


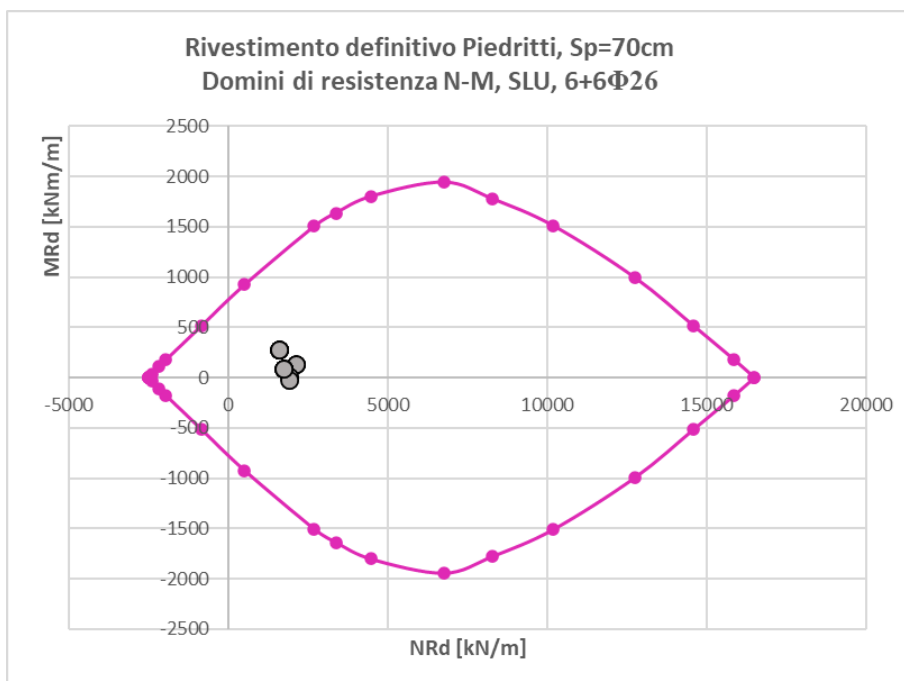
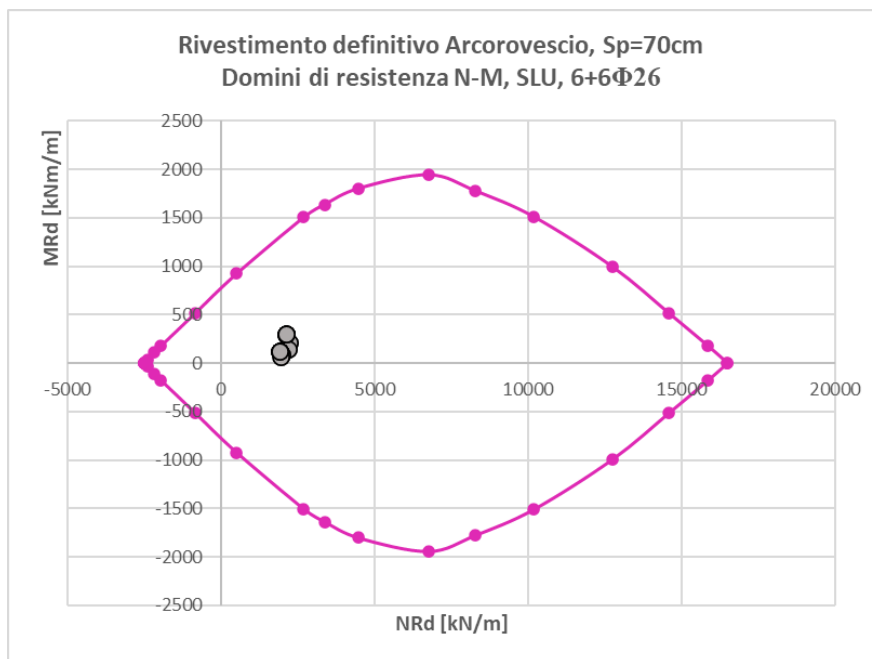
CITTA' DI TORINO

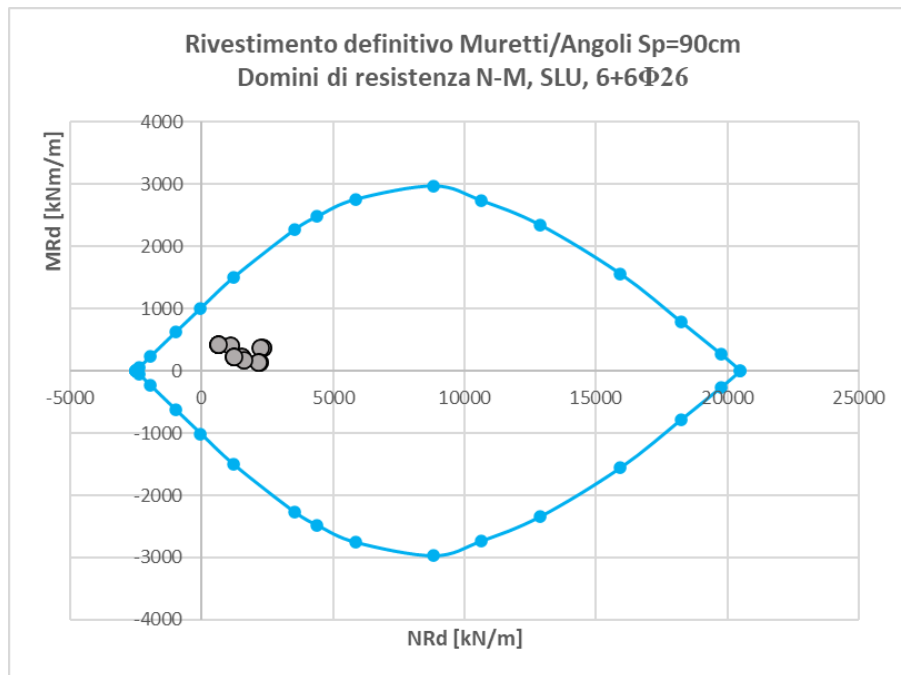
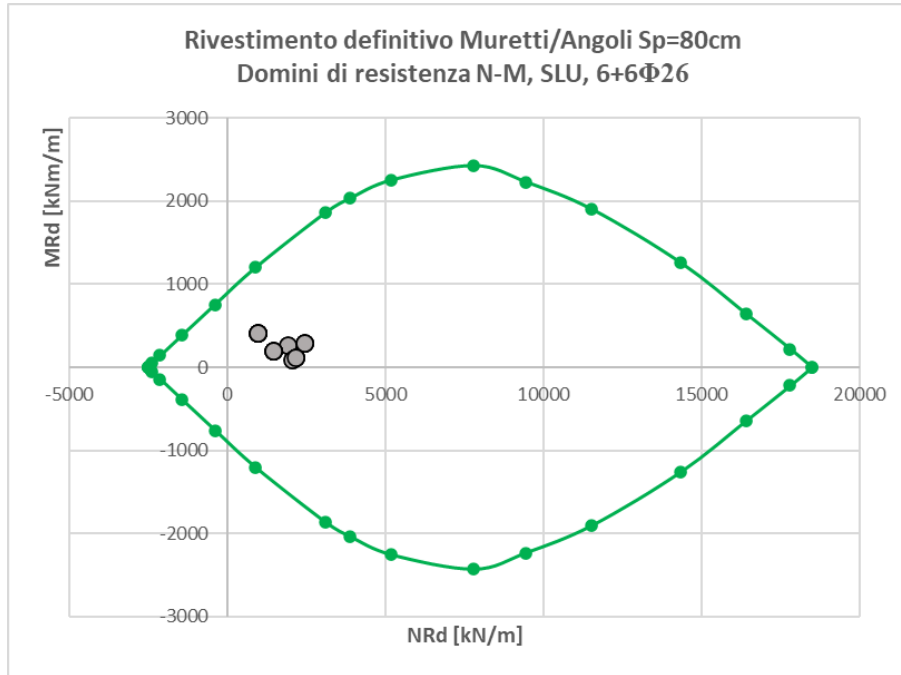
Metropolitana di Torino - Linea 2  
Tratta: Politecnico-Rebaudengo  
Lotto Costruttivo 2: Bologna-Politecnico


Stazione Pastrengo - Relazione di calcolo  
gallerie di banchina

MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1







 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1



## 8.2.3 Condizioni statiche – SLU Sforzo di Taglio

### 8.2.3.1 SLU Sforzo di Taglio, Calotta & Piedritti Sp=60cm

#### VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO

#### VERIFICA A TAGLIO SECONDO NTC (4.1.2.1.3.1 & 4.1.2.1.3.2)

#### Materiali

Acciaio staffe	<b>B450C</b>	fywk	450.0	N/mm <sup>2</sup>
		γs	1.15	
		fywd	391.3	N/mm <sup>2</sup>
CLS	<b>C30/37</b>	fck	30.0	N/mm <sup>2</sup>
		γc	1.5	
		fed	17.0	N/mm <sup>2</sup>
		n <sub>min</sub>	0.5422	N/mm <sup>2</sup>
		n <sub>l</sub>	0.5	

#### Sezione

largh. taglio	bw	1000	mm
altezza	h	600	mm
copriferro nom	c <sub>nom</sub>	50	mm
barre longitudinali tese	φsl	26	mm
staffe	φsw	16	mm
altezza utile	d	521	mm

#### Sollecitazioni ultime

Vsd	264	kN
-----	-----	----

#### Verifica richiesta armatura trasversale

φsl	26	mm	barre longitudinali tese
n	6		numero barre
Asl	3185.6	mm <sup>2</sup>	area armatura longitudinale
C <sub>Rd,c</sub>	0.29	N/mm <sup>2</sup>	resistenza tangenziale di base
k	1.62		
ρ <sub>l</sub>	0.0061		
k <sub>l</sub>	0.15		
N <sub>Ed</sub>	0.0	kN	foza assiale o di precompressione
σ <sub>cp</sub>	0.00	N/mm <sup>2</sup>	
VRd,c	282.5	kN	verificato

#### Verifica armatura trasversale

φsw	16	mm	staffe
s	320	mm	passo
n	3		bracci
Asw	603.2	mm <sup>2</sup>	area armatura trasversale
α	90°		inclinazione staffe
ctg q <sub>ott</sub>	3.24		ctg q per VRd,s = VRd,max
ctg q <sub>sw</sub>	0.76		ctg q per VRd,s = Vsd
ctg q <sub>max</sub>	2.50		
ctg q <sub>min</sub>	1.00		
ctg q	2.50		valore di progetto
q	21.80°		inclinazione bielle compresse

#### Verifica biella compressa

VRd,max	1374.4	kN	>	Vsd	verificato
---------	--------	----	---	-----	------------

#### Verifica biella tesa (Metodo dell'inclinazione variabile delle bielle compresse)

VRd,s	864.6	kN	>	Vsd	verificato
-------	-------	----	---	-----	------------

#### Verifica duttilità allo stato limite ultimo

(Asw fywd) / (bw s)	0.74		<	0.5 n <sub>l</sub> fed	verificato
				4.25	



### 8.2.3.2 SLU taglio, Arco rovescio $S_p=60\text{cm}$

#### VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO

#### VERIFICA A TAGLIO SECONDO NTC (4.1.2.1.3.1 & 4.1.2.1.3.2)

##### Materiali

Acciaio staffe	<b>B450C</b>	fywk	450.0	N/mm <sup>2</sup>
		$\gamma_s$	1.15	
		fywd	391.3	N/mm <sup>2</sup>
CLS	<b>C30/37</b>	fck	30.0	N/mm <sup>2</sup>
		$\gamma_c$	1.5	
		fcd	17.0	N/mm <sup>2</sup>
		$n_{\min}$	0.5422	N/mm <sup>2</sup>
		$n_l$	0.5	

##### Sezione

largh. taglio	bw	1000	mm
altezza	h	600	mm
copriferro nom	$c_{nom}$	50	mm
barre longitudinali tese	$\phi_{sl}$	26	mm
staffe	$\phi_{sw}$	16	mm
altezza utile	d	521	mm

##### Sollecitazioni ultime

Vsd	255	kN
-----	-----	----

##### Verifica richiesta armatura trasversale

$\phi_{sl}$	26	mm	barre longitudinali tese
n	6		numero barre
Asl	3185.6	mm <sup>2</sup>	area armatura longitudinale
$C_{Rd,c}$	0.29	N/mm <sup>2</sup>	resistenza tangenziale di base
k	1.62		
$\rho_l$	0.0061		
kl	0.15		
$N_{Ed}$	0.0	kN	foza assiale o di precompressione
$\sigma_{cp}$	0.00	N/mm <sup>2</sup>	
VRd,c	282.5	kN	verificato

##### Verifica armatura trasversale

$\phi_{sw}$	16	mm	staffe
s	320	mm	passo
n	3		bracci
Asw	603.2	mm <sup>2</sup>	area armatura trasversale
$\alpha$	90°		inclinazione staffe
ctg $q_{ott}$	3.24		ctg q per VRd,s = VRd,max
ctg $q_{s,w}$	0.74		ctg q per VRd,s = Vsd
ctg $q_{max}$	2.50		
ctg $q_{min}$	1.00		
ctg q	2.50		valore di progetto
q	21.80°		inclinazione bielle compresse

##### Verifica biella compressa

VRd,max	1374.4	kN	>	Vsd	verificato
---------	--------	----	---	-----	------------

##### Verifica biella tesa (Metodo dell'inclinazione variabile delle bielle compresse)

VRd,s	864.6	kN	>	Vsd	verificato
-------	-------	----	---	-----	------------

##### Verifica duttilità allo stato limite ultimo

(Asw fywd) / (bw s)	0.74		<	0.5 $n_l$ fcd	verificato
				4.25	





### 8.2.3.3 SLU taglio, Arco rovescio Sp=70cm

#### VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO

VERIFICA A TAGLIO SECONDO NTC (4.1.2.1.3.1 & 4.1.2.1.3.2)

#### Materiali

Acciaio staffe	<b>B450C</b>	fywk	450.0	N/mm <sup>2</sup>
		γs	1.15	
		fywd	391.3	N/mm <sup>2</sup>
CLS	<b>C30/37</b>	fck	30.0	N/mm <sup>2</sup>
		γc	1.5	
		fcd	17.0	N/mm <sup>2</sup>
		n <sub>min</sub>	0.5422	N/mm <sup>2</sup>
		n <sub>l</sub>	0.5	

#### Sezione

largh. taglio	bw	1000	mm
altezza	h	700	mm
copriferro nom	c <sub>nom</sub>	50	mm
barre longitudinali tese	φsl	26	mm
staffe	φsw	16	mm
altezza utile	d	621	mm

#### Sollecitazioni ultime

Vsd 367 kN

#### Verifica richiesta armatura trasversale

φsl	26	mm	barre longitudinali tese
n	6		numero barre
Asl	3185.6	mm <sup>2</sup>	area armatura longitudinale
C <sub>Rd,c</sub>	0.28	N/mm <sup>2</sup>	resistenza tangenziale di base
k	1.57		
ρ <sub>l</sub>	0.0051		
kl	0.15		
N <sub>Ed</sub>	0.0	kN	foza assiale o di precompressione
σ <sub>cp</sub>	0.00	N/mm <sup>2</sup>	
VR <sub>d,c</sub>	336.7	kN	necessaria armatura a taglio

#### Verifica armatura trasversale

φsw	16	mm	staffe
s	320	mm	passo
n	3		bracci
Asw	603.2	mm <sup>2</sup>	area armatura trasversale
α	90°		inclinazione staffe
ctg q <sub>ott</sub>	3.24		ctg q per VR <sub>d,s</sub> = VR <sub>d,max</sub>
ctg q <sub>sw</sub>	0.89		ctg q per VR <sub>d,s</sub> = Vsd
ctg q <sub>max</sub>	2.50		
ctg q <sub>min</sub>	1.00		
ctg q	2.50		valore di progetto
q	21.80°		inclinazione bielle compresse

#### Verifica biella compressa

VR<sub>d,max</sub> 1638.2 kN > Vsd **verificato**

#### Verifica biella tesa (Metodo dell'inclinazione variabile delle bielle compresse)

VR<sub>d,s</sub> 1030.6 kN > Vsd **verificato**

#### Verifica duttilità allo stato limite ultimo

(Asw fywd) / (bw s) < 0.5 n<sub>l</sub> fcd **verificato**  
0.74 < 4.25



### 8.2.3.4 SLU taglio, Piedritti, $S_p=70\text{cm}$

#### VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO

VERIFICA A TAGLIO SECONDO NTC (4.1.2.1.3.1 & 4.1.2.1.3.2)

#### Materiali

Acciaio staffe	<b>B450C</b>	fywk	450.0	N/mm <sup>2</sup>
		$\gamma_s$	1.15	
		fywd	391.3	N/mm <sup>2</sup>
CLS	<b>C30/37</b>	fck	30.0	N/mm <sup>2</sup>
		$\gamma_c$	1.5	
		fcd	17.0	N/mm <sup>2</sup>
		$n_{\min}$	0.5422	N/mm <sup>2</sup>
		$n_1$	0.5	

#### Sezione

largh. taglio	bw	1000	mm
altezza	h	700	mm
copriferro nom	$c_{\text{nom}}$	50	mm
barre longitudinali tese	$\phi_{sl}$	26	mm
staffe	$\phi_{sw}$	16	mm
altezza utile	d	621	mm

#### Sollecitazioni ultime

Vsd 211 kN

#### Verifica richiesta armatura trasversale

$\phi_{sl}$	26	mm	barre longitudinali tese
n	6		numero barre
Asl	3185.6	mm <sup>2</sup>	area armatura longitudinale
$C_{Rd,c}$	0.28	N/mm <sup>2</sup>	resistenza tangenziale di base
k	1.57		
$\rho_1$	0.0051		
k <sub>1</sub>	0.15		
$N_{Ed}$	0.0	kN	foza assiale o di precompressione
$\sigma_{cp}$	0.00	N/mm <sup>2</sup>	
VRd,c	336.7	kN	verificato

#### Verifica armatura trasversale

$\phi_{sw}$	16	mm	staffe
s	320	mm	passo
n	3		bracci
Asw	603.2	mm <sup>2</sup>	area armatura trasversale
$\alpha$	90°		inclinazione staffe
ctg q <sub>ott</sub>	3.24		ctg q per VRd,s = VRd,max
ctg q <sub>sw</sub>	0.51		ctg q per VRd,s = Vsd
ctg q <sub>max</sub>	2.50		
ctg q <sub>min</sub>	1.00		
ctg q	2.50		valore di progetto
q	21.80°		inclinazione bielle compresse

#### Verifica biella compressa

VRd,max 1638.2 kN > Vsd **verificato**

#### Verifica biella tesa (Metodo dell'inclinazione variabile delle bielle compresse)

VRd,s 1030.6 kN > Vsd **verificato**

#### Verifica duttilità allo stato limite ultimo

(Asw fywd) / (bw s) < 0.5  $n_1$  fcd **verificato**  
0.74 < 4.25



### 8.2.3.5 SLU taglio, Muretti, $S_p=80cm$

#### VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO

#### VERIFICA A TAGLIO SECONDO NTC (4.1.2.1.3.1 & 4.1.2.1.3.2)

#### Materiali

Acciaio staffe	<b>B450C</b>	fywk	450.0	N/mm <sup>2</sup>
		$\gamma_s$	1.15	
		fywd	391.3	N/mm <sup>2</sup>
CLS	<b>C30/37</b>	fck	30.0	N/mm <sup>2</sup>
		$\gamma_c$	1.5	
		fcd	17.0	N/mm <sup>2</sup>
		$n_{min}$	0.5422	N/mm <sup>2</sup>
		$n_1$	0.5	

#### Sezione

largh. taglio	bw	1000	mm
altezza	h	800	mm
copriferro nom	$c_{nom}$	50	mm
barre longitudinali tese	$\phi_{sl}$	26	mm
staffe	$\phi_{sw}$	16	mm
altezza utile	d	721	mm

#### Sollecitazioni ultime

Vsd	386	kN
-----	-----	----

#### Verifica richiesta armatura trasversale

$\phi_{sl}$	26	mm	barre longitudinali tese
n	6		numero barre
Asl	3185.6	mm <sup>2</sup>	area armatura longitudinale
$C_{Rd,c}$	0.27	N/mm <sup>2</sup>	resistenza tangenziale di base
k	1.53		
$\rho_l$	0.0044		
kl	0.15		
$N_{Ed}$	0.0	kN	foza assiale o di precompressione
$\sigma_{cp}$	0.00	N/mm <sup>2</sup>	
VRd,c	390.9	kN	verificato

#### Verifica armatura trasversale

$\phi_{sw}$	16	mm	staffe
s	320	mm	passo
n	3		bracci
Asw	603.2	mm <sup>2</sup>	area armatura trasversale
$\alpha$	90°		inclinazione staffe
ctg $q_{ott}$	3.24		ctg q per VRd,s = VRd,max
ctg $q_{sw}$	0.81		ctg q per VRd,s = Vsd
ctg $q_{max}$	2.50		
ctg $q_{min}$	1.00		
ctg q	2.50		valore di progetto
q	21.80°		inclinazione bielle compresse

#### Verifica biella compressa

VRd,max	1901.9	kN	>	Vsd	verificato
---------	--------	----	---	-----	------------

#### Verifica biella tesa (Metodo dell'inclinazione variabile delle bielle compresse)

VRd,s	1196.6	kN	>	Vsd	verificato
-------	--------	----	---	-----	------------

#### Verifica duttilità allo stato limite ultimo

(Asw fywd) / (bw s)	0.74		<	0.5 $n_1$ fcd	verificato
				4.25	



### 8.2.3.6 SLU taglio, Muretti, $S_p=90cm$

#### VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO

#### VERIFICA A TAGLIO SECONDO NTC (4.1.2.1.3.1 & 4.1.2.1.3.2)

#### Materiali

Acciaio staffe	<b>B450C</b>	fywk	450.0	N/mm <sup>2</sup>
		$\gamma_s$	1.15	
		fywd	391.3	N/mm <sup>2</sup>
CLS	<b>C30/37</b>	fck	30.0	N/mm <sup>2</sup>
		$\gamma_c$	1.5	
		fcd	17.0	N/mm <sup>2</sup>
		$n_{min}$	0.5422	N/mm <sup>2</sup>
		$n_l$	0.5	

#### Sezione

largh. taglio	bw	1000	mm
altezza	h	900	mm
copriferro nom	$c_{nom}$	50	mm
barre longitudinali tese	$\phi_{sl}$	26	mm
staffe	$\phi_{sw}$	16	mm
altezza utile	d	821	mm

#### Sollecitazioni ultime

Vsd	181	kN
-----	-----	----

#### Verifica richiesta armatura trasversale

$\phi_{sl}$	26	mm	barre longitudinali tese
n	6		numero barre
Asl	3185.6	mm <sup>2</sup>	area armatura longitudinale
$C_{Rd,c}$	0.27	N/mm <sup>2</sup>	resistenza tangenziale di base
k	1.49		
$\rho_l$	0.0039		
kl	0.15		
$N_{Ed}$	0.0	kN	foza assiale o di precompressione
$\sigma_{cp}$	0.00	N/mm <sup>2</sup>	
VRd,c	445.2	kN	verificato

#### Verifica armatura trasversale

$\phi_{sw}$	16	mm	staffe
s	320	mm	passo
n	3		bracci
Asw	603.2	mm <sup>2</sup>	area armatura trasversale
$\alpha$	90°		inclinazione staffe
ctg $q_{ott}$	3.24		ctg q per VRd,s = VRd,max
ctg $q_{sw}$	0.33		ctg q per VRd,s = Vsd
ctg $q_{max}$	2.50		
ctg $q_{min}$	1.00		
ctg q	2.50		valore di progetto
q	21.80°		inclinazione bielle compresse

#### Verifica biella compressa

VRd,max	2165.7	kN	>	Vsd	verificato
---------	--------	----	---	-----	------------

#### Verifica biella tesa (Metodo dell'inclinazione variabile delle bielle compresse)

VRd,s	1362.5	kN	>	Vsd	verificato
-------	--------	----	---	-----	------------

#### Verifica duttilità allo stato limite ultimo

$(A_{sw} f_{ywd}) / (b_w s)$	0.74		<	$0.5 n_l f_{cd}$	verificato
				4.25	



### 8.3 Condizioni statiche – SLE fessurazione

#### 8.3.1 SLE, Calotta & piedritti, Sp=60cm

Nelle sezioni di calotta e piedritti non è necessaria la verifica a fessurazione poiché risultano totalmente compresse.

#### 8.3.2 SLE, Arco rovescio, Sp=60cm

Geometria della sezione	
Altezza della sezione	$h$ 600 [mm]
Larghezza della sezione	$b$ 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	$d$ 525 [mm]
Distanza tra asse BARICENTRO armatura e lembo teso	$d'$ 75 [mm]
Ricoprimento dell'armatura PROSSIMA AL LEMBO TES0	$c$ 62 [mm]
<u>Armatura tesa ordinaria</u>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{r,1}$ 6 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{r,1}$ 26 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,1}$ 3186 [mm <sup>2</sup> ]
<u>Armatura tesa di infittimento</u>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{r,2}$ 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{r,2}$ 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,2}$ 0 [mm <sup>2</sup> ]
Caratteristiche dei materiali	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	$f_{ck}$ 30 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	$f_{ctm}$ 2.9 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	$E_{cm}$ 32837 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	$f_{yk}$ 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	$E_s$ 200000 [MPa]
DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE	
Tensione MASSIMA nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	$\sigma_s$ 59 [MPa]
Asse neutro della sezione	$x$ 261 [mm]
Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente	$w_{k,lim}$ 0.30 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	<b><math>w_k</math> 0.07 [mm]</b>



### 8.3.3 SLE, Arco rovescio, Sp=70cm

<b>Geometria della sezione</b>	
Altezza della sezione	h = 700 [mm]
Larghezza della sezione	b = 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d = 625 [mm]
Distanza tra asse BARICENTRO armatura e lembo teso	d' = 75 [mm]
Ricoprimento dell'armatura PROSSIMA AL LEMBO TESO	c = 62 [mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{r,1}$ = 6 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{r,1}$ = 26 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,1}$ = 3186 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	$n_{r,2}$ = 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	$\phi_{r,2}$ = 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	$A_{sf,2}$ = 0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	$f_{ck}$ = 30 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	$f_{ctm}$ = 2.9 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	$E_{cm}$ = 32837 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	$f_{yk}$ = 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	$E_s$ = 200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>	
Tensione MASSIMA nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	$\sigma_s$ = 3 [MPa]
Asse neutro della sezione	x = 682.7 [mm]
Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente	$w_{k,lim}$ = 0.30 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	<b><math>w_k</math> = 0.002 [mm]</b>



### 8.3.4 SLE, Piedritti, Sp=70cm

Geometria della sezione	
Altezza della sezione	h 700 [mm]
Larghezza della sezione	b 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d 625 [mm]
Distanza tra asse BARICENTRO armatura e lembo teso	d' 75 [mm]
Ricoprimento dell'armatura PROSSIMA AL LEMBO TESO	c 62 [mm]
<u>Armatura tesa ordinaria</u>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>f,1</sub> 6 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>f,1</sub> 26 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,1</sub> 3186 [mm <sup>2</sup> ]
<u>Armatura tesa di infittimento</u>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>f,2</sub> 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>f,2</sub> 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,2</sub> 0 [mm <sup>2</sup> ]
Caratteristiche dei materiali	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	f <sub>ck</sub> 30 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f <sub>ctm</sub> 2.9 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E <sub>cm</sub> 32837 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f <sub>yk</sub> 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E <sub>s</sub> 200000 [MPa]
DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE	
Tensione MASSIMA nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ <sub>s</sub> 3.8 [MPa]
Asse neutro della sezione	x 606.9 [mm]
Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente	w <sub>k,lim</sub> 0.30 [mm]
Ampiezza delle fessure (di calcolo)	w <sub>k</sub> 0.003 [mm]



### 8.3.5 SLE, Muretti, Sp=80cm

Geometria della sezione	
Altezza della sezione	h = 800 [mm]
Larghezza della sezione	b = 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d = 725 [mm]
Distanza tra asse BARICENTRO armatura e lembo teso	d' = 75 [mm]
Ricoprimento dell'armatura PROSSIMA AL LEMBO TESO	c = 62 [mm]
<a href="#">Armatura tesa ordinaria</a>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>r,1</sub> = 6 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>r,1</sub> = 26 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,1</sub> = 3186 [mm <sup>2</sup> ]
<a href="#">Armatura tesa di infittimento</a>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>r,2</sub> = 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>r,2</sub> = 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,2</sub> = 0 [mm <sup>2</sup> ]
Caratteristiche dei materiali	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	f <sub>ck</sub> = 30 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f <sub>ctm</sub> = 2.9 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E <sub>cm</sub> = 32837 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f <sub>yk</sub> = 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E <sub>s</sub> = 200000 [MPa]
DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE	
Tensione MASSIMA nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ <sub>s</sub> = 53.3 [MPa]
Asse neutro della sezione	x = 388.6 [mm]
Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente	w <sub>k,lim</sub> = 0.30 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	<b>w<sub>k</sub> = 0.064 [mm]</b>





### 8.3.6 SLE, Muretti Sp=90cm


<b>Geometria della sezione</b>	
Altezza della sezione	h 800 [mm]
Larghezza della sezione	b 1000 [mm]
Altezza utile della sezione	d 725 [mm]
Distanza tra asse BARICENTRO armatura e lembo teso	d' 75 [mm]
Ricoprimento dell'armatura PROSSIMA AL LEMBO TESO	c 62 [mm]
<b>Armatura tesa ordinaria</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>f,1</sub> 6 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>f,1</sub> 26 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,1</sub> 3186 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Armatura tesa di infittimento</b>	
Numero di ferri tesi presenti nella sezione	n <sub>f,2</sub> 0 [-]
Diametro dei ferri tesi presenti nella sezione	φ <sub>f,2</sub> 0 [mm]
Area dei ferri tesi presenti nella sezione	A <sub>sf,2</sub> 0 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Caratteristiche dei materiali</b>	
Resistenza caratteristica cilindrica dal calcestruzzo	f <sub>ck</sub> 30 [MPa]
Resistenza a trazione media del calcestruzzo	f <sub>ctm</sub> 2.9 [MPa]
Modulo di elasticità del calcestruzzo	E <sub>cm</sub> 32837 [MPa]
Resistenza a snervamento dell'acciaio	f <sub>yk</sub> 450 [MPa]
Modulo di elasticità dell'acciaio	E <sub>s</sub> 200000 [MPa]
<b>DETERMINAZIONE DELL'AMPIEZZA DELLE FESSURE</b>	
Tensione MASSIMA nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata	σ <sub>s</sub> 71.65 [MPa]
Asse neutro della sezione	x 346.8 [mm]
Ampiezza limite delle fessure per la combinazione di calcolo pertinente	w <sub>k,lim</sub> 0.30 [mm]
<b>Ampiezza delle fessure (di calcolo)</b>	<b>w<sub>k</sub> 0.090 [mm]</b>

## 8.4 Modellazione e verifiche sismiche

### 8.4.1 Modellazione sismiche

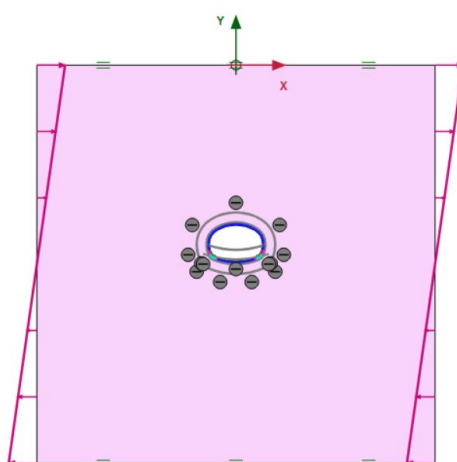
come spiegato in precedenza, la progettazione sismica e la valutazione del rivestimento vengono eseguite.

La verifica in condizioni sismiche del rivestimento definitivo viene eseguita considerando le deformazioni indotte dal sisma sulla struttura in sotterraneo, adottando un metodo pseudostatico. Il metodo si basa sull'improbabilità che un tunnel, circondato dal mezzo circostante, possa deformarsi indipendentemente dal mezzo in cui è immerso.

 <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 Pastrengo - Relazione di calcolo gallerie di banchina	MTL2T1A2DSTRSPAR004-0-1

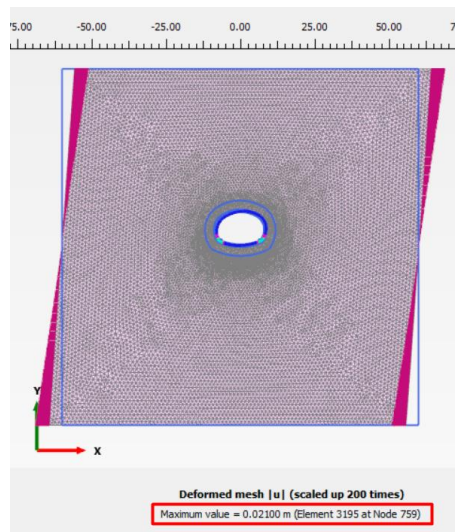
sulla base delle formulazioni di Hashsh et al. (2001) e i parametri geotecnici e le condizioni sismiche del suolo e della zona, lo spostamento orizzontale massimo da tracciare con il modello numerico è di 21 mm.

L'impostazione della modellazione numerica, basata sulla assunzione di una deformazione imposta (spostamento), e' mostrata nella figura seguente.



**Figura 17.      l'impostazione del modello numerico per lo studio l'effetto sismico**

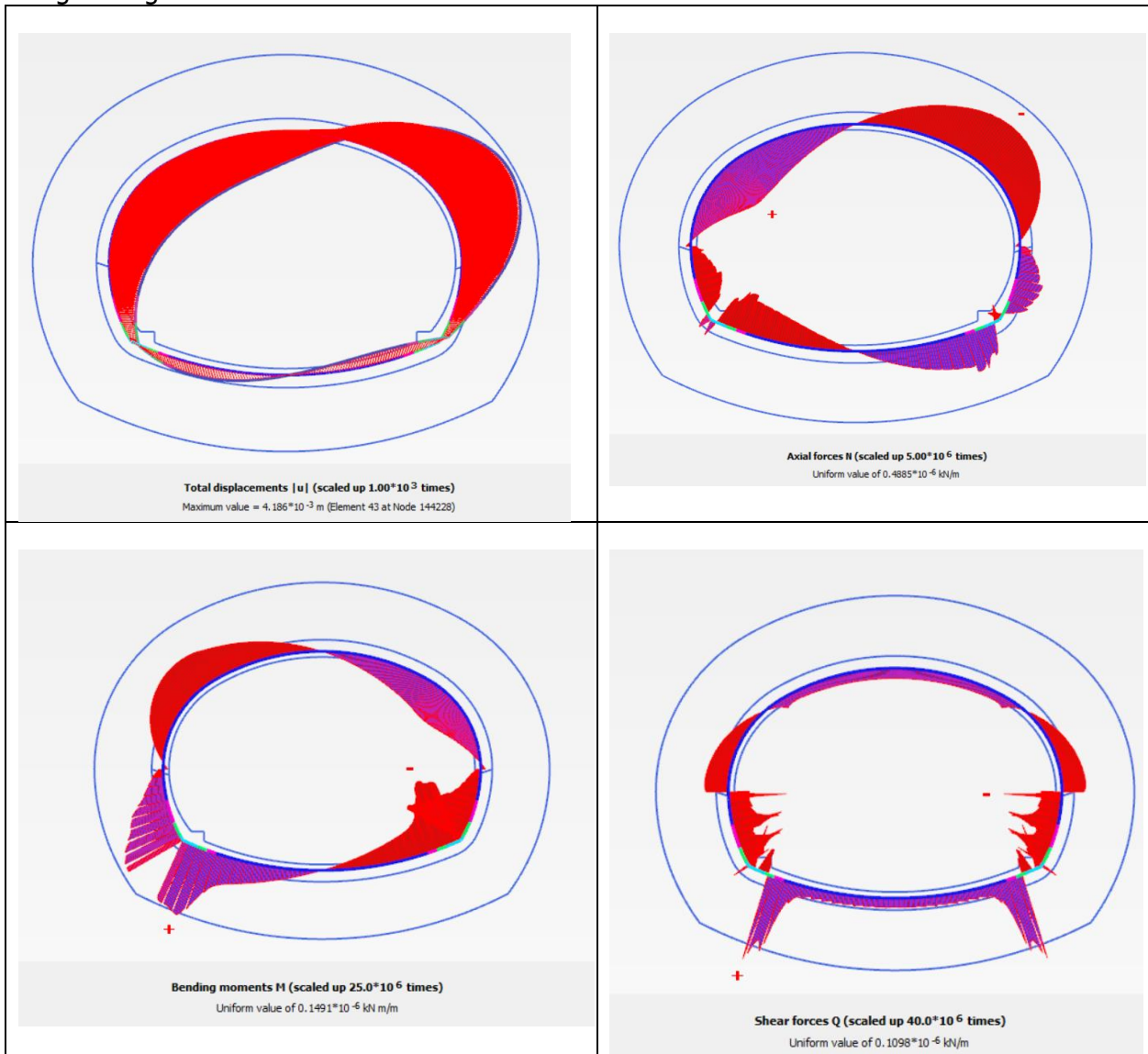
Nella figura seguente sono riportati i risultati del modello in termini di deformazioni totali fino al raggiungimento della deformazione voluta sul diametro della sezione.





**Figura 18. Raggiungimento della deformazione obiettivo mediante modello numerico**

Le figure seguenti mostrano le sollecitazioni indotte nel rivestimento definitivo.



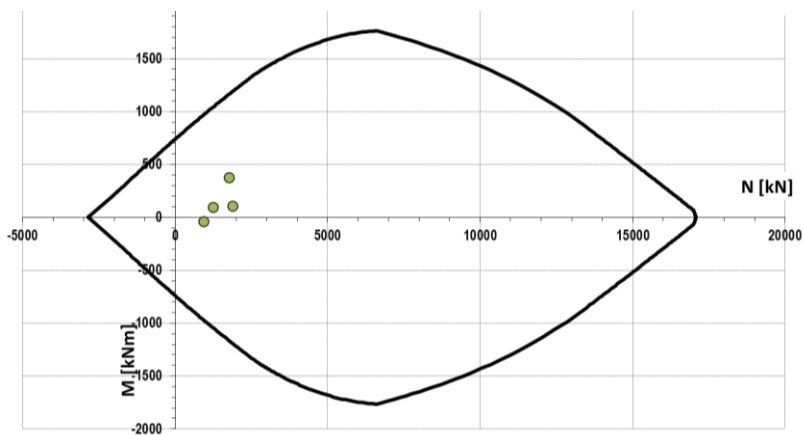
Nota: il fattore di scala per le forze è 1E9

**Figura 19. sollecitazioni dedotte nel rivestimento definitivo sull'azione sismica**



### 8.4.2 verifiche strutturali delle simiche

la verifica per il caso sismico viene effettuata considerando uno spessore del rivestimento di 60 cm uniforme e una armatura metallica  $\Phi 26/160$ .



#### VERIFICA ALLO STATO LIMITE ULTIMO VERIFICA A TAGLIO SECONDO NTC (4.1.2.1.3.1 & 4.1.2.1.3.2)

##### Materiali

Acciaio staffe	B450C	fywk	450.0	N/mm <sup>2</sup>
		$\gamma_s$	1.15	
CLS	C30/37	fywd	391.3	N/mm <sup>2</sup>
		fck	30.0	N/mm <sup>2</sup>
		$\gamma_c$	1.5	
		fcd	17.0	N/mm <sup>2</sup>
		$n_{min}$	0.5422	N/mm <sup>2</sup>
		$n_1$	0.5	

##### Sezione

largh. taglio	bw	1000	mm
altezza	h	600	mm
copriferro nom	$c_{nom}$	50	mm
barre longitudinali tese	$\phi_{sl}$	26	mm
staffe	$\phi_{sw}$	16	mm
altezza utile	d	521	mm

##### Sollecitazioni ultime

$V_{sd}$  60 kN

##### Verifica richiesta armatura trasversale

$\phi_{sl}$  26 mm  
n 6  
 $A_{sl}$  3185.6 mm<sup>2</sup>  
 $C_{rel}$  0.29 N/mm<sup>2</sup>  
k 1.62  
 $\rho_l$  0.0061  
 $k_l$  0.15  
 $N_{i,d}$  0.0 kN  
 $\sigma_{cp}$  0.00 N/mm<sup>2</sup>  
VRdc 282.5 kN

barre longitudinali tese  
numero barre  
area armatura longitudinale  
resistenza tangenziale di base

forza assiale o di precompressione

verificato

##### Verifica armatura trasversale

$\phi_{sw}$  16 mm  
s 320 mm  
n 3  
 $A_{sw}$  603.2 mm<sup>2</sup>  
 $\alpha$  90°  
ctg  $q_{tot}$  3.24  
ctg  $q_{tw}$  0.17  
ctg  $q_{max}$  2.50  
ctg  $q_{min}$  1.00  
ctg q 2.50  
q 21.80°

staffe  
passo  
bracci  
area armatura trasversale  
inclinazione staffe  
ctg q per VRds = VRd,max  
ctg q per VRds = Vsd

valore di progetto  
inclinazione bielle compresse

##### Verifica biella compressa

VRd,max 1374.4 kN

> Vsd

verificato

##### Verifica biella tesa (Metodo dell'inclinazione variabile delle bielle compresse)

VRds 864.6 kN

> Vsd

verificato

##### Verifica duttilità allo stato limite ultimo

( $A_{sw} f_{ywd}$ ) / ( $b w s$ )

0.74

< 0.5  $n_1$  fcd

4.25

verificato



## 9. STABILITA' DEL FRONTE DI SCAVO

L'analisi di stabilità del fronte di scavo è effettuata per determinare la stabilità del fronte e valutare la necessità di trattamenti del terreno al fine di controllare la deformazione e garantire condizioni di sicurezza delle lavorazioni al fronte di scavo.

L'analisi è stata condotta secondo il metodo di Caquot & Kerisel (1956), recentemente rivisto da Carranza Torres (2004) nella formulazione analitica. Il modello di Caquot considera la condizione di equilibrio per il materiale che subisce cedimenti sopra alla calotta di una cavità circolare (cilindrica o sferica). Il materiale ha peso di volume  $\gamma$  e parametri di resistenza in accordo al criterio di Mohr-Coulomb o Hoek-Brown, mentre la distribuzione delle tensioni verticali è litostatica considerando un valore di  $k_0$  pari a 1. Una pressione di confinamento  $p_s$  è applicata all'interno del tunnel. Nella situazione presentata nella figura sottostante la soluzione di Caquot definisce un valore di pressione interna ( $p_s$ ) come il valore minimo o critico di pressione al di sotto del quale il tunnel collasserebbe.

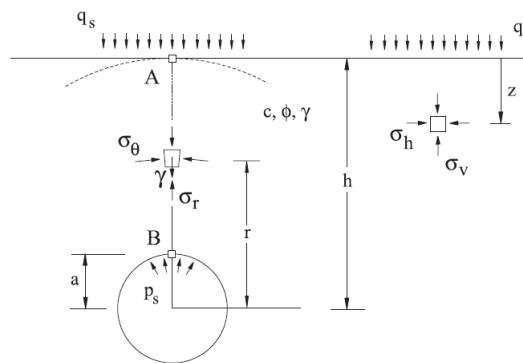


Figura 20. Schema di base per la soluzione di Caquot (Carranza-Torres, 2004)

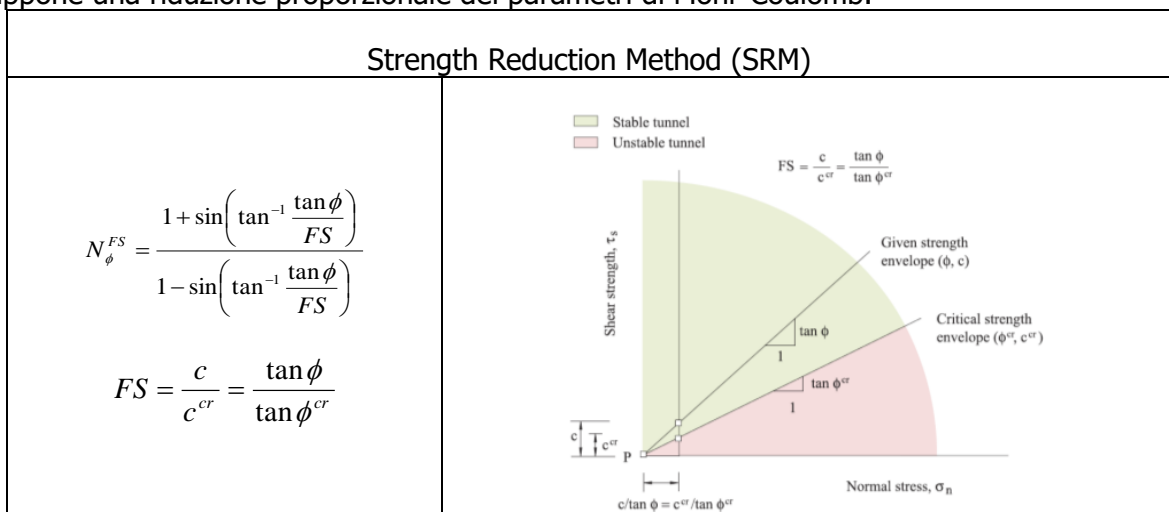
La soluzione generalizzata di Caquot per condizioni asciutte (che includono il fattore di sicurezza, FS), può essere rappresentata dalla seguente equazione sviluppata da Carranza-Torres (2004):

$$\frac{p_s}{\gamma a} = \left( \frac{q_s}{\gamma a} + \frac{c}{\gamma a} \times \frac{1}{\tan \phi} \right) \left( \frac{h}{a} \right)^{-k(N_\phi - 1)} - \frac{1}{k(N_\phi - 1) - 1} \left[ \left( \frac{h}{a} \right)^{1 - k(N_\phi - 1)} - 1 \right] - \frac{c}{\gamma a} \times \frac{1}{\tan \phi}$$

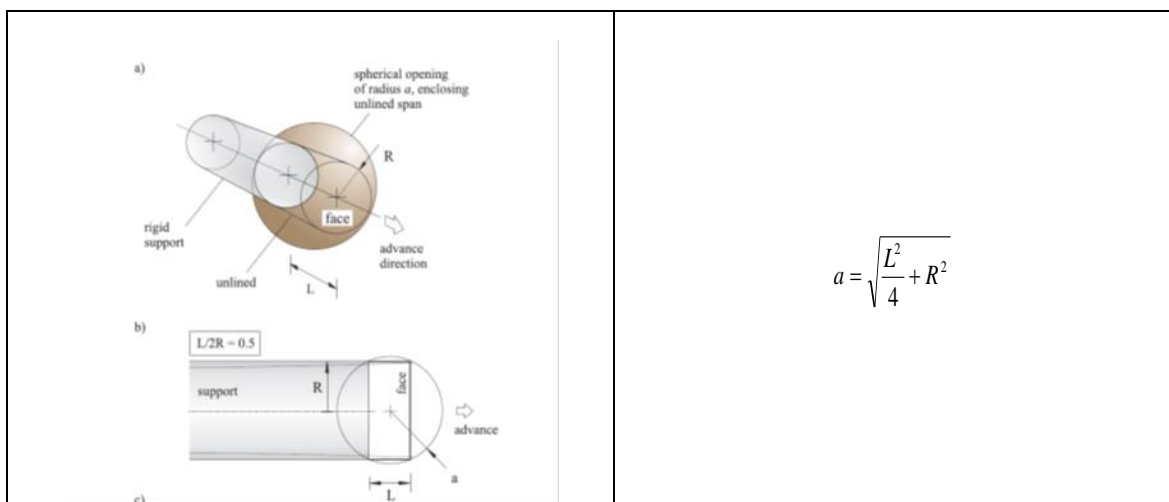
Dove: a=raggio del tunnel; h=profondità dell'asse del tunnel dalla superficie; k=parametri indicatori del tipo di scavo [1=tunnel cilindrico; 2=cavità sferica].



Va notato che l'equazione di cui sopra è valida solo quando i parametri di Mohr-Coulomb indicati portano a uno stato di equilibrio limite - la situazione in cui lo scavo sta per collassare. In generale, la resistenza del materiale sarà maggiore della forza associata allo stato di equilibrio critico della cavità. Il fattore di sicurezza FS è definito come "il rapporto tra i parametri attuali di Mohr-Coulomb e i parametri critici di Mohr-Coulomb", come espresso nelle seguenti equazioni (*Strength Reduction Method*, Dawson et al., 1999); come indicato nella figura sottostante, questo approccio presuppone una riduzione proporzionale dei parametri di Mohr-Coulomb.

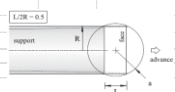


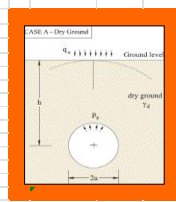
**Figura 21.** Schema dello "Shear Strength Reduction" utilizzato per valutare il fattore di sicurezza per modelli agli elementi finite e alle differenze finite—Dawson et al. (1999)



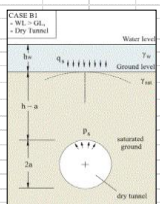
**Figura 22. Calcolo del raggio del tunnel modificato per l'analisi di stabilità del fronte (C. Carranza-Torres, 2004)**

La verifica per la sezione tipo 1 è stata condotta utilizzando la combinazione GEO e di conseguenza applicando i coefficienti  $\gamma_m$  sui parametri del trattamento al fronte [M2].

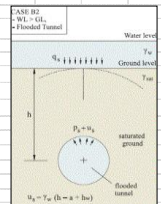
Proprietà generali (per tutti i casi)					
Caso di analisi [1, 2]:	1	1 per la definizione del Fattore di Sicurezza (dato un certo valore della Pressione Interna)			
		2 per la definizione della pressione interna (dato un certo valore del Fattore di Sicurezza)			
Condizioni idrauliche [1, 2, 3]:	1	1 analisi in assenza di falda			
		2 analisi in presenza di falda, pressione interstiziale definita da una falda posta sopra il piano campagna			
		3 analisi in presenza di falda, pressione interstiziale definita da una falda posta sotto il piano campagna			
Raggio del tunnel [m]:	7.67	Lunghezza non sostenuta [m]:	1.0	$L/2R = 0.5$	
Raggio sfera al fronte [m]:	7.7	Raggio della sfera al fronte [m]:	7.7		
Profondità asse del Tunnel [m]:	25.07				
Peso di volume secco [kN/m <sup>3</sup> ]:	19	<b>CASO A</b>			
MC angolo di attrito efficace [°]:	28.8	(vedere a fianco lo schema)			
MC coesione efficace [kPa]:	120	fi	36 g_M2	1.25	$\alpha = \sqrt{\frac{f_i}{4} + R^2}$
Tunnel Support Pressure [kPa]:	0	Attenzione: il dato da inserire dipende dalla scelte effettuata prima			
Sovraccarico in superficie [kPa]:	20				
Proprietà addizionali per le condizioni idrauliche (caso 2 e 3)					
Caso idraulico [1, 2]:	1	1 assenza di acqua all'interno del tunnel in quanto viene pompata via			
		2 lo scavo avviene in acqua senza disturbo alla pressione idrostatica circostante			
Distanza tra la falda e la superficie [m]:	1	Attenzione: deve sempre essere dato positivo			
Peso di volume saturo [kN/m <sup>3</sup> ]:	22				
Peso di volume acqua [kN/m <sup>3</sup> ]:	10				
<b>Risultati</b>		Calcola		Clear Results	
Factor of safety values:	1.40	← CYLINDRICAL tunnel		Clear Input Data	
	2.39	← SPHERICAL cavity		Grid ON/OFF	
Factor of Safety computed successfully...					
		→ $p_{s,min} =$ N/A kPa			



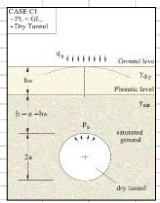
ASPH A - Dry Ground  
dry ground  
dry tunnel



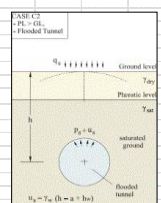
CASE B1  
Water level  
Ground level  
dry tunnel



CASE B2  
Water level  
Ground level  
rounded tunnel



CASE C1  
Phreatic level  
Ground level  
dry tunnel



CASE C2  
Phreatic level  
Ground level  
rounded tunnel

Il fronte risulta stabile senza la necessità di applicare alcun tipo di trattamento del suolo.

## ALLEGATO N.1

### Caratteristiche di sollecitazione del Rivestimento definitivo

- Stazione Pastrengo

Static State Analysis (interested stage)							Crown 60cm			SLE		
Analysis	Node	PLATE	Combinati on	Nk [kN/m]	Mk [kN.m/m]	Vk [kN.m/m]	Nsd [kN]	Msd [kN.m]	Vsd [kN]	Nk[kN]	Mk [kN.m]	Vk[kN]
TORINO 2	110219	13	Nmax,M	-890.0	-60.8	-0.2	-1157.0	-79.1	-0.2	-890.0	-60.8	-0.2
	51549	61	Nmin,M	-1781.1	51.8	188.5	-2315.4	67.4	245.0	-1781.1	51.8	188.5
	101177	68	Mmax,N	-1372.6	107.2	-116.3	-1784.3	139.3	-151.1	-1372.6	107.2	-116.3
	108515	14	Mmin,N	-891.0	-60.9	0.1	-1158.2	-79.1	0.1	-891.0	-60.9	0.1
	106077	62	Vmax	-1755.8	51.4	-202.9	-2282.6	66.8	-263.8	-1755.8	51.4	-202.9
	101177	68	emax	-1372.6	107.2	-116.3	-1784.3	139.3	-151.1	-1372.6	107.2	-116.3
Static State Analysis (the worst stage among all)							SLU			SLE		
Analysis	Node	PLATE	Combinati on	Nk [kN/m]	Mk [kN.m/m]	Vk [kN.m/m]	Nsd [kN]	Msd [kN.m]	Vsd [kN]	Nk[kN]	Mk [kN.m]	Vk[kN]
TORINO 2	110219	13	Nmax,M	-890.0	-60.8	0.7	-1157.0	-79.1	0.8	-890.0	-60.8	0.7
	51549	61	Nmin,M	-1781.1	52.8	188.5	-2315.4	68.7	245.0	-1781.1	52.8	188.5
	101177	67	Mmax,N	-1372.6	107.2	-116.3	-1784.3	139.3	-151.1	-1372.6	107.2	-116.3
	117619	5	Mmin,N	-939.7	-63.1	-4.7	-1221.7	-82.0	-6.1	-939.7	-63.1	-4.7
	106077	62	Vmax	-1755.8	52.4	-202.9	-2282.6	68.1	-263.8	-1755.8	52.4	-202.9
		101177	67	emax	-1372.6	107.2	-116.3	-1784.3	139.3	-151.1	-1372.6	107.2
Static State Analysis (interested stage)							Invert 60cm			SLE		
Analysis	Node	PLATE	Combinati on	Nk [kN/m]	Mk [kN.m/m]	Vk [kN.m/m]	Nsd [kN]	Msd [kN.m]	Vsd [kN]	Nk[kN]	Mk [kN.m]	Vk[kN]
TORINO 2	98324	21	Nmax,M	-413.1	-180.1	0.1	-537.1	-234.1	0.1	-413.1	-180.1	0.1
	117871	1	Nmin,M	-1422.9	110.3	196.0	-1849.8	143.5	254.8	-1422.9	110.3	196.0
	117871	1	Mmax,N	-1422.9	110.3	196.0	-1849.8	143.5	254.8	-1422.9	110.3	196.0
	98324	21	Mmin,N	-413.1	-180.1	0.1	-537.1	-234.1	0.1	-413.1	-180.1	0.1
	117871	1	Vmax	-1422.9	110.3	196.0	-1849.8	143.5	254.8	-1422.9	110.3	196.0
		98324	21	emax	-413.1	-180.1	0.1	-537.1	-234.1	0.1	-413.1	-180.1
Static State Analysis (the worst stage among all)							SLU			SLE		
Analysis	Node	PLATE	Combinati on	Nk [kN/m]	Mk [kN.m/m]	Vk [kN.m/m]	Nsd [kN]	Msd [kN.m]	Vsd [kN]	Nk[kN]	Mk [kN.m]	Vk[kN]
TORINO 2	96187	22	Nmax,M	-414.2	-180.1	-0.1	-538.4	-234.1	-0.2	-414.2	-180.1	-0.1
	117871	1	Nmin,M	-1422.9	110.3	196.0	-1849.8	143.5	254.8	-1422.9	110.3	196.0
	117871	1	Mmax,N	-1422.9	110.3	196.0	-1849.8	143.5	254.8	-1422.9	110.3	196.0
	98324	21	Mmin,N	-414.2	-180.1	0.1	-538.4	-234.1	0.1	-414.2	-180.1	0.1
	117871	1	Vmax	-1422.9	110.3	196.0	-1849.8	143.5	254.8	-1422.9	110.3	196.0
		96187	22	emax	-414.2	-180.1	-0.1	-538.4	-234.1	-0.2	-414.2	-180.1





Static State Analysis (interested stage)							Invert 70cm					
Analysis	Node	PLATE	Combinati on	Nk [kN/m]	Mk [kN.m/m]	Vk [kN.m/m]	SLU			SLE		
							Nsd [kN]	Msd [kN.m]	Vsd [kN]	Nk[kN]	Mk [kN.m]	Vk[kN]
TORINO 2	117802	2	Nmax,M	-1630.3	226.2	-279.1	-2119.4	294.1	-362.8	-1630.3	226.2	-279.1
	117871	1	Nmin,M	-1723.4	164.8	224.0	-2240.4	214.2	291.2	-1723.4	164.8	224.0
	117869	1	Mmax,N	-1633.1	228.8	281.8	-2123.0	297.4	366.3	-1633.1	228.8	281.8
	117807	2	Mmin,N	-1683.4	108.9	-208.3	-2188.5	141.6	-270.7	-1683.4	108.9	-208.3
	117869	1	Vmax	-1633.1	228.8	281.8	-2123.0	297.4	366.3	-1633.1	228.8	281.8
	117869	1	emax	-1633.1	228.8	281.8	-2123.0	297.4	366.3	-1633.1	228.8	281.8
Static State Analysis (the worst stage among all)							SLU			SLE		
Analysis	Node	PLATE	Combinati on	Nk [kN/m]	Mk [kN.m/m]	Vk [kN.m/m]	Nsd [kN]	Msd [kN.m]	Vsd [kN]	Nk[kN]	Mk [kN.m]	Vk[kN]
							Nsd [kN]	Msd [kN.m]	Vsd [kN]	Nk[kN]	Mk [kN.m]	Vk[kN]
TORINO 2	117802	2	Nmax,M	-1630.3	226.2	-279.1	-2119.4	294.1	-362.8	-1630.3	226.2	-279.1
	117871	1	Nmin,M	-1723.4	164.8	224.0	-2240.4	214.2	291.2	-1723.4	164.8	224.0
	117869	1	Mmax,N	-1633.1	228.8	281.8	-2123.0	297.4	366.3	-1633.1	228.8	281.8
	117807	2	Mmin,N	-1683.4	108.9	-208.3	-2188.5	141.6	-270.7	-1683.4	108.9	-208.3
	117869	1	Vmax	-1633.1	228.8	281.8	-2123.0	297.4	366.3	-1633.1	228.8	281.8
	117869	1	emax	-1633.1	228.8	281.8	-2123.0	297.4	366.3	-1633.1	228.8	281.8
Static State Analysis (interested stage)							Sidewall 70cm					
Analysis	Node	PLATE	Combinati on	Nk [kN/m]	Mk [kN.m/m]	Vk [kN.m/m]	SLU			SLE		
							Nsd [kN]	Msd [kN.m]	Vsd [kN]	Nk[kN]	Mk [kN.m]	Vk[kN]
TORINO 2	117371	6	Nmax,M	-1235.9	211.8	-162.6	-1606.6	275.3	-211.4	-1235.9	211.8	-162.6
	117869	1	Nmin,M	-1631.9	107.2	-101.4	-2121.5	139.3	-131.8	-1631.9	107.2	-101.4
	117371	6	Mmax,N	-1235.9	211.8	-162.6	-1606.6	275.3	-211.4	-1235.9	211.8	-162.6
	117803	2	Mmin,N	-1630.1	105.9	99.7	-2119.1	137.6	129.7	-1630.1	105.9	99.7
	117371	6	Vmax	-1235.9	211.8	-162.6	-1606.6	275.3	-211.4	-1235.9	211.8	-162.6
	117371	6	emax	-1235.9	211.8	-162.6	-1606.6	275.3	-211.4	-1235.9	211.8	-162.6
Static State Analysis (the worst stage among all)							SLU			SLE		
Analysis	Node	PLATE	Combinati on	Nk [kN/m]	Mk [kN.m/m]	Vk [kN.m/m]	Nsd [kN]	Msd [kN.m]	Vsd [kN]	Nk[kN]	Mk [kN.m]	Vk[kN]
							Nsd [kN]	Msd [kN.m]	Vsd [kN]	Nk[kN]	Mk [kN.m]	Vk[kN]
TORINO 2	117371	6	Nmax,M	-1235.9	211.8	-162.6	-1606.6	275.3	-211.4	-1235.9	211.8	-162.6
	117869	1	Nmin,M	-1631.9	107.2	-101.4	-2121.5	139.3	-131.8	-1631.9	107.2	-101.4
	117371	6	Mmax,N	-1235.9	211.8	-162.6	-1606.6	275.3	-211.4	-1235.9	211.8	-162.6
	117803	2	Mmin,N	-1630.1	105.9	99.7	-2119.1	137.6	129.7	-1630.1	105.9	99.7
	117371	6	Vmax	-1235.9	211.8	-162.6	-1606.6	275.3	-211.4	-1235.9	211.8	-162.6
	117371	6	emax	-1235.9	211.8	-162.6	-1606.6	275.3	-211.4	-1235.9	211.8	-162.6



Table with 13 columns: Analysis, Node, PLATE, Combinati on, Nk [kN/m], Mk [kN.m/m], Vk [kN.m/m], Nsd [kN], Msd [kN.m], Vsd [kN], Nk[kN], Mk [kN.m], Vk[kN]. It contains three main sections: Corner 80cm (Static State Analysis interested stage and worst stage), and Corner 90cm (Static State Analysis interested stage and worst stage). Each section lists analysis results for TORINO 2 across various nodes and plate types.