

AUTOSTRADA A14: BOLOGNA-TARANTO
TRATTA VASTO SUD-TERMOLI

REALIZZAZIONE DI UNA BRETELLA AUTOSTRADALE
IN LOCALITÀ PETACCIATO
TRA IL km 461+938 E IL km 463+576
(VIADOTTI CACCHIONE E MARINELLA)

PROGETTO DEFINITIVO

BRETELLA AUTOSTRADALE

STRADA INTERPODERALE AL Km.0+619.42
VERIFICHE GEOTECNICHE

-	SEZIONE: OPERE D'ARTE	ELABORATO N. 6.03
---	------------------------------	--------------------------

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
3	PROGETTO DEFINITIVO	MARZO 2009	GROSSI	BONIZZONI	ROCCHI
2	PROGETTO 2001	OTTOBRE 2001	-	-	-
1	PROGETTO 1996	APRILE 1996	-	-	-

 <p>STUDIO GEOTECNICO ITALIANO s.r.l. ingegneria geotecnica-geologia applicata-ingegneria sismica</p>	IL DIRETTORE TECNICO Ing. GianFrancesco Rocchi Ord. Ingg. Milano N.16492																
	<table border="1"> <tr> <th>CODICE</th> <th>COMMESSA</th> <th>PROGRESSIVO</th> <th>ELABORATO</th> <th>EMISSIONE</th> <th></th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>7 6 2 2</td> <td>- 0 3 0</td> <td>R 0 3</td> <td>E 0 2</td> <td>MARZO 2009</td> </tr> </table>	CODICE	COMMESSA	PROGRESSIVO	ELABORATO	EMISSIONE		0	7 6 2 2	- 0 3 0	R 0 3	E 0 2	MARZO 2009				
CODICE	COMMESSA	PROGRESSIVO	ELABORATO	EMISSIONE													
0	7 6 2 2	- 0 3 0	R 0 3	E 0 2	MARZO 2009												

<p>autostrade // per l'italia Società per azioni</p> <p>IL RESPONSABILE:</p>	
---	--

AUTOSTRADE per l'ITALIA S.p.A.
Roma

A14

BOLOGNA-TARANTO

Tratta Vasto Sud-Termoli

**Bretella autostradale in località Petacciato
tra il km 461+938 e il km 463+576
(viadotti Cacchione e Marinella)**

Progetto Esecutivo

Bretella autostradale

Strada interpodereale al km0+619.42

Verifiche geotecniche

I N D I C E

1.	INTRODUZIONE.....	7
2.	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	8
3.	FINALITA' E CARATTERISTICHE DELL'OPERA	11
4.	COMPORTAMENTO GEOTECNICO DELL'OPERA DI SOSTEGNO	14
4.1	Premessa	14
4.2	Sezione corrente con altezza di scavo 5.5 m.....	15
4.2.1	Analisi FEM 2D con PLAXIS (vers.8.6) – Sezione 5.5 m-A.....	15
4.2.2	Analisi semplificate con PARATIE (vers.7)	20
4.2.2.1	Sezione 5.5 m-A.....	20
4.2.2.2	Sezione 5.5 m-B	25
4.3	Sezione corrente con altezza di scavo 5 m.....	27
4.4	Sezione corrente con altezza di scavo 4.3 m.....	29
4.5	Sezione corrente di altezza di scavo 3 m.....	31
4.6	Sezione nel tratto in scatolare.....	33
5.	VERIFICHE STRUTTURALI DELL'OPERA DI SOSTEGNO E DELLO SCATOLARE.....	37
6.	MONITORAGGIO DELL'OPERA.....	38
7.	BIBLIOGRAFIA.....	39

FIGURE:

- 4.1: Sezione 5.5 m-A - Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale – Scavo 5.5 m – Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1) – Griglia di calcolo
- 4.2: Sezione 5.5 m-A - Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale – Scavo 5.5 m – Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1) – Andamento del coefficiente di spinta del terreno al termine della fase 0
- 4.3: Sezione 5.5 m-A - Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale – Scavo 5.5 m – Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1) – Accelerogramma applicato alla base del modello numerico
- 4.4a: Sezione 5.5 m-A - Analisi PLAXIS e PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale – Scavo 5.5 m – Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1) –

Andamento dei momenti flettenti nei setti di diaframma della paratia di sinistra nelle varie fasi (pari a quelli di analisi per 2.5 m): caso 1

- 4.4b: Sezione 5.5 m-A - Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Andamento dei momenti flettenti nei setti di diaframma della paratia di sinistra nelle varie fasi (pari a quelli di analisi per 2.5 m): caso 2
- 4.5a: Sezione 5.5 m-A - Analisi PLAXIS e PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Andamento dei momenti flettenti nei setti di diaframma della paratia di destra nelle varie fasi (pari a quelli di analisi per 2.5 m): caso 1
- 4.5b: Sezione 5.5 m-A - Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Andamento dei momenti flettenti nei setti di diaframma della paratia di destra nelle varie fasi (pari a quelli di analisi per 2.5 m): caso 2
- 4.6: Sezione 5.5 m-A - Analisi PLAXIS e PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m), caso 1 e caso 2
- 4.7: Sezione 5.5 m-A - Analisi PLAXIS e PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Involuppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m), caso 1 e caso 2
- 4.8: Sezione 5.5 m-A - Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Andamento degli spostamenti orizzontali della paratia di sinistra: a) caso 1; b) caso 2
- 4.9: Sezione 5.5 m-A - Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Andamento degli spostamenti orizzontali della paratia di destra: a) caso 1; b) caso 2
- 4.10: Sezione 5.5 m-A - Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Andamento del momento flettente nella soletta di base utilizzabile anche per l'Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1): a) caso 1; b) caso 2

- 4.11: Sezione 5.5 m-A - Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Azione assiale nella soletta di base: a) caso1; b) caso 2
- 4.12: Sezione 5.5 m-A - Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Andamento dell'accelerazione orizzontale in testa paratia nella fase sismica -Caso 1
- 4.13: Sezione 5.5 m-A - Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Andamento dello spostamento orizzontale in testa paratia nella fase sismica -Caso 1
- 4.14a: Sezione 5.5 m-A - Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1) - Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.14b: Sezione 5.5 m-B - Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1) - Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.15a: Sezione 5.5 m-A - Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1) - Involuppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.15b: Sezione 5.5 m-B - Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1) - Involuppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.16: Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.17: Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Involuppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)

- 4.18: Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5 m - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1) - Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.19: Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 5 m - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1) - Involuppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.20: Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 4.3 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.21: Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 4.3 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Involuppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.22: Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 4.3 m - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1) - Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.23: Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 4.3 m - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1) - Involuppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.24: Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 3 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.25: Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 3 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Involuppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.26: Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 3 m - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1) - Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)

- 4.27: Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale - Scavo 3 m - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1) - Involuppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.28: Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Griglia di calcolo
- 4.29: Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.30: Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Involuppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.31: Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Andamento del momento flettente nella soletta di base
- 4.32: Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Azione assiale nella soletta di base
- 4.33: Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Involuppo dei momenti flettenti nei ritti e nella copertura in kNm/m
- 4.34: Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Involuppo dei tagli nei ritti e nella copertura in kN/m
- 4.35: Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1) - Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)
- 4.36: Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1) - Involuppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m)

- 4.37: Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale – Tratto in scatolare – Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1) – Andamento del momento flettente nella soletta di base
- 4.38: Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale – Tratto in scatolare – Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1) – Azione assiale nella soletta di base
- 4.39: Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale – Tratto in scatolare – Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1) – Involuppo dei momenti flettenti nei ritti e nella copertura in kNm/m
- 4.40: Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale – Tratto in scatolare – Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1) – Involuppo dei tagli nei ritti e nella copertura in kN/m

APPENDICI:

- 1: Validazione del modello numerico PLAXIS ai fini della propagazione del segnale nella fase che riproduce l'evento sismico (incluse le figg. A1.1→A1.5)
- 2: Metodo statico equivalente – Valutazione degli effetti prodotti dal terremoto in termini di regimi di spinta sull'opera di sostegno (inclusa la Figura A2.1)

1. **INTRODUZIONE**

Oggetto della presente relazione è l'opera di sostegno degli scavi previsti per la deviazione e sistemazione della strada interpodereale che interferisce (sottopassa) la bretella autostradale in progetto, a monte dei viadotti Cacchione e Marinella dell'autostrada A14.

Come evidenziato nei [Doc.Rif.\[5\]](#), [Doc.Rif.\[14\]](#) e [Doc.Rif.\[15\]](#) l'opera in oggetto viene a collocarsi nell'ambito di un'ampia area franosa che si estende tra l'abitato di Petacciato e la costa adriatica, soggetta periodicamente a riattivazione dei movimenti.

Dopo un breve inquadramento, nel quale si illustrano le finalità e caratteristiche dell'opera (capitolo 3), vengono analizzati i seguenti aspetti:

- Comportamento in campo statico e sismico dell'opera di sostegno (capitolo 4), con restituzione delle sollecitazioni negli elementi resistenti utili per il dimensionamento strutturale.
- Monitoraggio dell'opera (capitolo 6).

Per l'esame degli aspetti suddetti si è fatto riferimento alla documentazione tecnica elencata nel capitolo 2, con particolare riguardo all'esito degli studi descritti nei [Doc.Rif.\[5\]](#) (inquadramento geologico, geomorfologico, idrogeologico e sismico), [Doc.Rif.\[14\]](#) (inquadramento geotecnico) e [Doc.Rif.\[15\]](#) (inquadramento sulle condizioni di stabilità del versante).

2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Nella stesura della presente relazione si è fatto riferimento alla seguente documentazione:

Elaborati di progetto 2008

1. Relazione generale – **Elaborato: 1.02**
2. Corografia generale(1:10.000) – **Elaborato: 1.03**
3. Planimetria sullo stato di fatto:
 - Documentazione sullo stato di fatto – **Elaborato: 1.06**
 - Planimetria dello stato di fatto – Tav.1/3 (1:1.000) – **Elaborato: 1.07**
 - Planimetria dello stato di fatto – Tav.2/3 (1:1.000) – **Elaborato: 1.08**
 - Planimetria dello stato di fatto – Tav.2/3 (1:500) – **Elaborato: 1.09**
4. Planimetria di progetto:
 - Tav.1/4 (1:500) – **Elaborato: 1.11**
 - Tav.2/4 (1:500) – **Elaborato: 1.12**
 - Tav.3/4 (1:500) – **Elaborato: 1.13**
 - Tav.4/4 (1:500) – **Elaborato: 1.14**
5. Relazione geologica, geomorfologica e idrogeologica – **Elaborato: 3.01**
6. Carta e sezioni geologiche (1:5.000 - Riprese e leggermente modificate dallo studio dei Proff. V Cotecchia e G.Melidoro) – **Elaborato: 3.02**
7. Carta geomorfologica (1:5.000 - Ripresa e leggermente modificata dallo studio dei Proff.V Cotecchia e G.Melidoro) – **Elaborato: 3.03**
8. Carta delle evidenze geomorfologiche della riattivazione del movimento franoso del Gennaio 1991 (1:5.000) – **Elaborato: 3.04**
9. Carta delle evidenze geomorfologiche della riattivazione del movimento franoso del Febbraio 2009 (1:5.000) – **Elaborato: 3.05**
10. Planimetria ubicazione indagini geognostiche (1:5.000 - 1:2.500)– **Elaborato: 3.06**
11. Indagini geognostiche in sito – **Elaborato: 3.07**
12. Prove di laboratorio – **Elaborato: 3.08**
13. Letture inclinometriche – **Elaborato: 3.09**
14. Relazione di caratterizzazione geotecnica – **Elaborato: 4.01**
15. Relazione di stabilità del versante in frana – **Elaborato: 4.02**
16. Sezioni geotecniche:

- Sezioni n.1 n.2 (1:1000 – 1:2500) – **Elaborato: 4.03**
 - Sezioni n.3 n.4 n.5 (1:1000 – 1:2500) – **Elaborato: 4.04**
17. Bretella autostradale – profilo longitudinale:
- Tav.1/2 (1:1000 – 1:100) – **Elaborato: 5.03**
 - Tav.2/2 (1:1000 – 1:100) – **Elaborato: 5.04**
 - Deviazione Nord (1:1000 – 1:100) – **Elaborato: 5.05**
 - Deviazione Sud (1:1000 – 1:100) – **Elaborato: 5.06**
18. Bretella autostradale – sezioni tipo e dettagli:
- Tav.1/3 (1:500) – **Elaborato: 5.09**
 - Tav.2/3 (1:500) – **Elaborato: 5.10**
 - Tav.3/3 (1:500) – **Elaborato: 5.11**
19. Bretella autostradale – sezioni trasversali
- Dalla B1 alla B12 (1:200) – **Elaborato: 5.12**
 - Dalla B13 alla B23 (1:200) – **Elaborato: 5.13**
 - Dalla B24 alla B33 (1:200) – **Elaborato: 5.14**
 - Dalla B34 alla B45 (1:200) – **Elaborato: 5.15**
 - Dalla B46 alla B56 (1:200) – **Elaborato: 5.16**
 - Dalla B57 alla B65 (1:200) – **Elaborato: 5.17**
 - Deviazione Nord (1:200) – **Elaborato: 5.18**
 - Deviazione Sud (1:200) – **Elaborato: 5.19**
20. Strada interpoderale al km.0+619.42 – profilo longitudinale (1:1000 – 1:100) – **Elaborato: 5.21**
21. Strada interpoderale al km.0+619.42 – sezioni tipo e dettagli (varie) – **Elaborato: 5.22**
22. Strada interpoderale al km.0+619.42 – sezioni trasversali (1:200) – **Elaborato: 5.23**
23. Bretella autostradale – rilevati, trincee stradali e opere di stabilizzazione locale – Verifiche geotecniche – **Elaborato: 6.01**
24. Bretella autostradale – rilevati stradali - opere di stabilizzazione locale - elaborati grafici:
- Elaborati stradali – **Elaborati: 5.01÷5.19**
 - Fosso Cacchione – Ritombamento e stabilizzazione rilevato – **Elaborati: 9.02÷9.14**
 - Stabilizzazione rilevati zona viadotto Marinella – **Elaborati: 10.02÷10.10**
25. Bretella autostradale – Paratia dal km.0+300.45 al km.0+478.96 – verifiche geotecniche – **Elaborato: 6.02**
26. Strada interpoderale al km.0+619.42 – verifiche geotecniche – **Elaborato: 6.03**

27. Strada interpoderale al km.0+619.42 – verifiche strutturali – **Elaborato: 8.03**
28. Strada interpoderale al km.0+619.42 – elaborati grafici:
 - Elaborati stradali – **Elaborati: 5.20÷5.24**
 - Elaborati strutturali – **Elaborati: 8.04÷8.11**
29. Idraulica:
 - Planimetria idraulica – Stato di fatto e di progetto – Tav.1/3 – **Elaborato: 11.03**
 - Planimetria idraulica – Stato di fatto e di progetto – Tav.2/3 – **Elaborato: 11.04**
 - Planimetria idraulica – Stato di fatto e di progetto – Tav.3/3 – **Elaborato: 11.05**
 - Profili idraulici – Tav.1/2 – **Elaborato: 11.06**
 - Profili idraulici – Tav.2/2 – **Elaborato: 11.07**
 - Strada interpoderale al km.0+619.42 – Rilevati e trincee stradali – Dettagli opere idrauliche – **Elaborato: 11.10**

Norme Tecniche

30. Norme Tecniche per le Costruzioni del 14 Gennaio 2008.
31. Società Autostrade – Roma - Norme Tecniche di Appalto.

3. FINALITA' E CARATTERISTICHE DELL'OPERA

L'opera in oggetto viene a essere realizzata nell'ambito di un'ampia area franosa che si sviluppa fra l'abitato di Petacciato e la vicina costa adriatica. Come discusso nel [Doc.Rif.\[5\]](#), in tale area periodicamente si riattivano movimenti gravitativi profondi tali da creare problemi all'abitato, alla viabilità di accesso all'abitato e alle infrastrutture di trasporto situate nella parte bassa del versante (autostrada A14, ferrovia e strada statale).

In base a quanto riportato nel [Doc.Rif.\[5\]](#), esiste un movimento principale con scorrimenti a profondità superiori alle lunghezze dei tubi inclinometrici di monitoraggio dell'area; sono inoltre presenti scorrimenti secondari multipli a profondità inferiori a 70 m, localizzabili principalmente a profondità di 15÷20 m, 30÷40 m e 50÷70 m.

In relazione alle notevoli profondità delle superfici di scorrimento, opere di stabilizzazione convenzionali (strutturali o drenanti) risultano non del tutto efficaci; basti pensare che gli interventi progettati ed eseguiti dalle Ferrovie dello Stato e dalla società Autostrade per l'Italia a seguito della riattivazione del 1979 (pali trivellati di grande diametro e pozzi di lunghezza 30÷40 m, si veda il [Doc.Rif.\[5\]](#)), non sono stati in grado di evitare gli effetti prodotti dalla successiva riattivazione del 1991.

Per i fenomeni gravitativi profondi non resta che procedere con (si veda ad esempio [Melidoro & Mazzabotta, 1996](#)):

- Il ricorso al monitoraggio e alla sorveglianza continua dell'area;
- Periodici interventi di manutenzione dell'autostrada con totale o parziale interruzione del traffico.

Sotto tali presupposti, al fine di mitigare gli effetti prodotti in termini di tempi d'interruzione della viabilità, la società Autostrade per l'Italia si propone di realizzare una bretella a monte dei viadotti Cacchione e Marinella, costituita in gran parte da rilevati e trincee di modesta altezza, localmente sostenuti al piede da opere di presidio costituiti da setti di diaframma (si vedano ad esempio i [Doc.Rif.\[4\]](#), [Doc.Rif.\[19\]](#), [Doc.Rif.\[23\]](#) e [Doc.Rif.\[24\]](#)); tali opere, anche se danneggiate da nuove riattivazioni dei movimenti gravitativi profondi, richiederanno infatti tempi di ripristino ragionevolmente inferiori rispetto a quelli necessari per le strutture dei viadotti.

La strada interpoderale che sottopassa il viadotto Marinella e lo costeggia immediatamente a monte per un tratto, per poi deviare verso il pendio lungo la linea di massima pendenza, viene a interferire con la bretella suddetta. Il progetto prevede la

deviazione dell'attuale tracciato planimetrico e l'approfondimento della livelletta per consentire il sottopasso della bretella. In corrispondenza dell'asse della bretella la nuova livelletta della strada interpodereale viene a posizionarsi a circa 3 m dal p.c. attuale. La necessità di raccogliere e convogliare verso il Fosso degli Ulivi (o Fosso Cacchione) le acque di filtrazione (il livello di falda è infatti prossimo al p.c. attuale) e le acque meteoriche richiede altresì la realizzazione di opere di drenaggio (trincee drenanti) lungo i due lati del tratto di strada ribassato rispetto alle condizioni attuali, con un approfondimento massimo degli scavi dall'attuale p.c. dell'ordine di 5.5 m.

Per garantire la stabilità degli scavi, sia in fase di costruzione sia in fase di esercizio, il progetto prevede l'esecuzione lungo i due lati della strada interpodereale di una paratia costituita da pannelli di diaframma collegati in testa da una trave di coronamento; i pannelli di diaframma hanno sezione 0.8 m x 2.5 m e lunghezza, dall'intradosso della trave di coronamento, variabile tra 9 e 16 m in funzione dell'altezza di scavo, come indicato nei [Doc.Rif.\[28\]](#).

In fase di scavo le paratie saranno puntellate in testa; i puntoni saranno costituiti di profilati HEB240 o HEB280 in acciaio disposti ad interassi variabili in funzione delle geometrie degli scavi e dell'opera, in accordo a quanto riportato nei [Doc.Rif.\[28\]](#). L'impiego di puntelli provvisori è stato preferito a quello di tiranti attivi per il motivo principale che essi sarebbero andati a occupare un'area facente parte del corpo franoso nell'ambito della quale potrebbe risultare necessario in futuro procedere con interventi di stabilizzazione integrativi.

Una volta raggiunto il fondo scavo, nel tratto caratterizzato da altezze di scavo superiori a 2.5 m, verrà gettata una soletta in c.a di spessore 0.6 m con la funzione di puntello definitivo in fase di esercizio; nella soletta saranno predisposti dei fori di diametro 5 cm, disposti secondo quanto riportato nei [Doc.Rif.\[28\]](#), con la funzione di sfogo delle pressioni interstiziali. Al di sopra della soletta verrà predisposto il sistema di smaltimento delle acque meteoriche e di filtrazione, nonché il pacchetto stradale.

A circa 1 m dal piano stradale è altresì prevista l'esecuzione di dreni suborizzontali microfessurati, rivestiti con calza in geotessile, delle seguenti caratteristiche:

- Lunghezza = 5 m
- Diametro perforazione = 80 mm
- Diametro del tubo microfessurato = 2"
- Lunghezza del tratto cieco = 0.9 m
- Inclinazione = 3° sull'orizzontale verso l'alto.

In corrispondenza della bretella, tra le sezioni di progetto n.7 e n.8, all'interno dello scavo sostenuto dai pannelli di diaframma, verrà alloggiato uno scatolare avente sezione interna di 6.20 m x 6.00 m (si veda il [Doc.Rif.\[28\]](#)).

Come evidenziato nel [Doc.Rif.\[15\]](#), l'opera di sostegno descritta non ha alcun effetto (né positivo, né negativo) sulle condizioni di stabilità dei corpi franosi profondi; sotto tali presupposti si accetta che, in presenza delle periodiche riattivazioni e/o di eventi sismici, possa subire spostamenti pluridecimetrici verso valle (si veda quanto riportato sempre nel [Doc.Rif.\[15\]](#)), oltre quelli relativamente contenuti presentati nel presente elaborato, conseguenti unicamente alle deformazioni locali indotte dagli scavi.

4. COMPORAMENTO GEOTECNICO DELL'OPERA DI SOSTEGNO

4.1 Premessa

La valutazione del comportamento in campo statico e in campo sismico delle paratie descritte nel **capitolo 3** è stata effettuata sia per diverse sezioni esterne al tratto in scatolare, sia per la sezione in scatolare.

Per le sezioni esterne al tratto in scatolare si è operato mediante:

- Analisi tensio-deformative agli elementi finiti (FEM) 2D (condizioni di deformazione piana), in condizioni statiche e sismiche (dinamiche nel dominio del tempo), con il codice di calcolo [PLAXIS \(vers.8.6\)](#); tali analisi sono state condotte per la sezione di massima altezza di scavo non sovraccaricata dal rilevato della bretella (terzo pannello di diaframma a partire dal filo esterno dello scatolare); nel seguito tale sezione verrà denominata 5.5 m-A.
- Analisi semplificate in condizioni statiche e sismiche (metodo statico equivalente) con il codice di calcolo [PARATIE \(vers.7\)](#) per la stessa sezione 5.5 m-A con cui sono state condotte le analisi FEM 2D e calibrazione del metodo sulla base del confronto con i risultati ottenuti con le analisi FEM 2D; tale calibrazione ha riguardato anche il coefficiente sismico orizzontale da introdurre nel metodo statico equivalente.
- Analisi semplificate in condizioni statiche e sismiche (metodo statico equivalente) con il codice di calcolo [PARATIE \(vers.7\)](#) per le altre sezioni di interesse (inclusa quella nelle immediate vicinanze dello scatolare sovraccaricata dal rilevato della bretella, nel seguito denominata 5.5 m-B), utilizzando il coefficiente sismico orizzontale calibrato per la sezione 5.5 m-A.

Per la sezione in scatolare si è operato mediante analisi tensio-deformative agli elementi finiti (FEM) 2D (condizioni di deformazione piana), in condizioni statiche e sismiche (dinamiche nel dominio del tempo), con il codice di calcolo [PLAXIS \(vers.8.6\)](#).

La descrizione delle analisi FEM 2D relative alla sezione 5.5 m-A e i risultati conseguiti sono riportati nel **paragrafo 4.2.1**.

La descrizione delle analisi semplificate per le altre sezioni esterne al tratto in scatolare, inclusa quella 5.5 m-B, e i risultati conseguiti sono riportati nei **paragrafi 4.2.2, 4.3, 4.4 e 4.5**.

La descrizione delle analisi FEM 2D relative alla sezione in scatolare e i risultati conseguiti sono riportati nel **paragrafo 4.6**.

4.2 Sezione corrente con altezza di scavo 5.5 m

4.2.1 Analisi FEM 2D con PLAXIS (vers.8.6) – Sezione 5.5 m-A

In corrispondenza della sezione 5.5 m-A i pannelli di diaframma di dimensioni planimetriche 0.8 m x 2.5 m hanno lunghezza 17 m (inclusa la trave di coronamento). I puntelli provvisori sono posti a interasse 2.5 m.

La valutazione del comportamento delle paratie è fatta facendo riferimento alle sezioni geotecniche n. 3 e 5 riportate nel [Doc.Rif.\[16\]](#). Tale valutazione è particolarmente complessa in quanto richiede un'analisi di interazione in campo statico e sismico tra pannelli di diaframma, puntellati in testa, in fase provvisoria, e a fondo scavo, in fase definitiva, e terreno, costituito dalle argille plio-pleistoceniche appartenenti al corpo di frana, quindi caratterizzate dalla presenza di discontinuità strutturali che rendono il comportamento dell'ammasso meno resistente di quello del materiale intatto.

Si rileva che rispetto alla situazione che si riscontra in corrispondenza dell'opera di sostegno all'imbocco Nord della bretella (si veda il [Doc.Rif.\[25\]](#)), quella associabile all'opera in oggetto è più favorevole; infatti eventuali superfici di debolezza/scorrimento relativamente superficiali, lungo le quali possono essere operativi i parametri di resistenza residui, esercitano la loro influenza in direzione parallela all'allineamento delle paratie, non avendo effetti sul regime di spinta delle terre agente sull'opera di sostegno. Nelle analisi che seguono la presenza a tergo della paratia di materiale che appartiene al corpo di frana, è pertanto tenuta in conto unicamente adottando involuppi di resistenza ridotti (fattorizzati) rispetto a quelli del materiale intatto (si veda quanto riportato nel [Doc.Rif.\[14\]](#)). Tale situazione stratigrafico-geotecnica viene associata alle verifiche SLU secondo l'Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1), previste dal [Doc.Rif.\[30\]](#).

Al fine di ottenere risultati i più realistici possibile, le analisi di interazione suddette sono state effettuate in condizioni 2D (deformazione piana) con il metodo degli elementi finiti e con l'ausilio del codice di calcolo [PLAXIS \(vers.8.6\)](#).

Nelle **Figura 4.1** è riportato un particolare della griglia di calcolo, che riproduce quanto rappresentato nella sezione geotecnica n. 5 riportata nel [Doc.Rif.\[16\]](#); nella figura sono indicate le dimensioni del modello numerico, la stratigrafia di riferimento (costituita unicamente dalle argille plio-pleistoceniche), le opere in progetto (setti di diaframma puntellati nelle fasi provvisorie e definitiva). La base del modello numerico, ove viene imposto l'accelerogramma nella fase sismica, è posta a circa 100 m dal p.c.. Si rileva che,

nel caso specifico, la differenziazione in strati indicata nella **Figura 4.1** deriva unicamente dal fatto che i materiali sono caratterizzati da gradi di sovraconsolidazione decrescenti con la profondità (si veda il [Doc.Rif.\[14\]](#)).

Il livello della falda a monte dei setti di diaframma è assunto coincidente con il piano campagna; quello a valle dei setti di diaframma è posto in corrispondenza del fondo scavo.

Le analisi sono state condotte tenendo conto delle seguenti fasi:

Caso 1:

- Fase 0: determinazione dello stato di sforzo iniziale;
- Fase 1: inserimento dei setti di diaframma (condizioni drenate);
- Fase 2: scavo di 1 m ed inserimento del puntone provvisorio a 0.5 m dal p.c. (condizioni drenate);
- Fase 3: scavo fino alla quota massima di 5.5 m dal p.c. (condizioni drenate); in questa fase è stato considerato un sovraccarico uniforme a monte della paratia di destra di 10 kPa, per tenere conto della presenza di mezzi di lavoro;
- Fase 4: getto della soletta di base, rimozione del puntone provvisorio, riporto di materiale granulare fino alla quota del piano stradale (condizioni drenate); l'altezza da sostenere diventa pari a 3.4 m; in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico uniforme a monte delle paratie;
- Fase 5: applicazione dell'accelerogramma alla base del modello (condizioni non drenate); in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico a monte delle paratie;
- Fase 6: dissipazione delle sovrappressioni interstiziali generate dal terremoto (condizioni accoppiate); in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico a monte delle paratie.

Caso 2 (utile ai fini della valutazione del comportamento nel tempo della soletta di base definitiva):

- Fase 0: come caso 1;
- Fase 1: come caso 1;
- Fase 2: scavo di 1 m ed inserimento del puntone provvisorio a 0.5 m dal p.c. (condizioni non drenate);
- Fase 3: scavo fino alla quota massima di circa 5.5 m (condizioni non drenate); in questa fase è stato considerato un sovraccarico uniforme a monte della paratia di destra di 10 kPa;

- Fase 4a: getto della soletta di base, rimozione del puntone provvisorio, riporto di materiale granulare fino alla quota del piano stradale (condizioni non drenate); l'altezza da sostenere diventa pari a 3.4 m; in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico uniforme a monte delle paratie;
- Fase 4b: dissipazione delle sovrappressioni interstiziali generate nelle argille dalla fase di scavo (condizioni accoppiate); in questa fase non stato considerato alcun sovraccarico uniforme a monte delle paratie;
- Fase 5: applicazione dell'accelerogramma alla base del modello (condizioni non drenate); in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico a monte delle paratie;
- Fase 6: dissipazione delle sovrappressioni interstiziali generate dal terremoto (condizioni accoppiate); in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico a monte della paratia.

Nelle fasi 0, 1, 2, 3, 4 e 6, rappresentative delle condizioni statiche, le condizioni al contorno sono:

- Base del modello numerico: spostamenti verticali impediti, spostamenti orizzontali impediti;
- Confini laterali del modello: spostamenti verticali liberi; spostamenti orizzontali impediti.

Nella fase 5, rappresentativa delle condizioni sismiche, le condizioni al contorno sono:

- Base del modello numerico: spostamenti verticali impediti, spostamenti orizzontali assegnati;
- Confini laterali del modello: spostamenti verticali impediti; spostamenti orizzontali liberi.

Vengono di seguito riportati alcuni dettagli relativi alle varie fasi di analisi.

Fase 0

Lo stato di sforzo iniziale è stato introdotto nel modello in accordo alla seguente procedura: a) nei vari elementi zona costituenti la griglia di calcolo è stato assegnato lo stato tensionale efficace in termini di pressioni verticali ed orizzontali ipotizzato nel [Doc.Rif.\[14\]](#), nelle condizioni di piano campagna orizzontale; b) ricerca della condizione di equilibrio.

Per convenienza connessa con aspetti di convergenza numerica, una prima fase di riequilibrio delle tensioni è stata condotta con modelli costitutivi semplificati (elasto-plastici con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb); una seconda fase di riequilibrio è stata condotta con il modello elasto-plastico di [Al Tabbaa & Muir Wood \(1989\)](#) descritto nel

Doc.Rif.[14]. Agli elementi zona caratterizzati con il modello costitutivo di [Al Tabba & Muir Wood \(1989\)](#) sono stati assegnati i parametri geotecnici riportati sempre nel **Doc.Rif.[14]**, con un angolo di attrito (fattorizzato) pari a 20° .

Nella **Figura 4.2** sono riportati i valori del rapporto tra le tensioni orizzontali efficaci e le tensioni verticali efficaci al termine della fase 0, in corrispondenza dei setti di diaframma. A commento del risultato conseguito si riportano le seguenti considerazioni:

- In relazione al fatto che nella sezione di calcolo il piano campagna a monte delle opere di sostegno è orizzontale, i valori del coefficiente di spinta ricavati non sono sostanzialmente diversi da quelli di input per la fase di riequilibrio.
- In relazione al fatto che nella direzione ortogonale alla sezione di calcolo il piano campagna è inclinato, i valori del coefficiente di spinta ricavati, utilizzati per la verifica delle paratie, dovrebbero essere dal lato della sicurezza in quanto superiori a quelli reali.

Fase 1

L'inserimento dei setti di diaframma è stato simulato introducendo nel modello numerico un elemento "beam" avente inerzia e area per metro lineare rispettivamente pari a 0.042 m^4 e 0.8 m^2 . L'elemento "beam" ha comportamento elastico ed è caratterizzato da un modulo di Young pari a 30000 MPa e un peso di volume $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$.

Fase 2

L'inserimento dei puntoni in acciaio è stato simulato introducendo nel modello numerico un elemento "beam" avente area, per metro lineare, pari a circa $100 \text{ cm}^2/2.5 \text{ m}$; nella sezione di analisi considerata i puntoni sono costituiti da profilati HEB240 in acciaio posti ad interasse 2.5 m .

L'elemento "beam" è incernierato alle estremità, ha comportamento elastico ed è caratterizzato da un modulo di Young pari a 210000 MPa e un peso di volume $\gamma = 78.5 \text{ kN/m}^3$.

Fase 4

L'inserimento della soletta in c.a. è stato simulato introducendo nel modello numerico elementi zona di altezza 0.6 m ; gli elementi zona hanno comportamento elastico e sono caratterizzati da un modulo di Young pari a 30000 MPa e un peso di volume $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$; tra tali elementi zona della soletta e le "beams" costituenti le paratie è stato inserito un elemento interfaccia a comportamento attritivo, con angolo di attrito δ pari a 35° .

Il riporto al di sopra della soletta è stato simulato introducendo nel modello numerico elementi zona; gli elementi zona hanno comportamento elasto-plastico con criterio di

rottura alla Mohr-Coulomb e sono caratterizzati da un modulo di Young pari a 30 MPa, un peso di volume $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$ e un angolo di attrito pari a 35° . Tra tali elementi zona del riporto e le "beams" costituenti le paratie è stato inserito un elemento interfaccia a comportamento attritivo, con angolo di attrito δ pari a 35° .

Fase 5

L'effetto del terremoto è stato simulato imponendo alla base del modello numerico (circa 100 m dal p.c.) un'accelerogramma rappresentativo per il sito in oggetto; sono stati inoltre presi particolari accorgimenti al fine di eliminare effetti indesiderati dovuti alle riflessioni delle onde di taglio e di compressione in corrispondenza dei confini del modello e far sì che la propagazione del segnale in verticale avvenga in modo il più omogeneo possibile e in accordo a quanto ottenuto dall'analisi di risposta sismica 1D con il codice di calcolo EERA (si veda il [Doc.Rif.\[15\]](#)). L'adeguatezza degli accorgimenti presi è dimostrata con il modello numerico descritto nell'**Appendice 1**.

L'accelerogramma di riferimento per le analisi è quello del Friuli, stazione di Tolmezzo, che ha prodotto i maggiori spostamenti sia nelle analisi dei rilevati (si veda il [Doc.Rif.\[23\]](#)), sia nelle analisi di stabilità del versante (si veda il [Doc.Rif.\[15\]](#)). L'accelerogramma applicato alla base del modello numerico, risultante dall'analisi di risposta sismica locale, è riportato nella **Figura 4.3** (si veda quanto descritto nell'**Appendice 1**).

A favore di sicurezza tale fase è stata condotta nell'ipotesi di falda a p.c., senza tenere conto dell'effetto favorevole esercitato dai dreni suborizzontali microfessurati.

Fase 6

La fase di dissipazione delle sovrappressioni interstiziali è stata valutata dal codice di calcolo con la teoria di consolidazione accoppiata di Biot valida per mezzi bifase.

I risultati delle analisi sono rappresentati nelle seguenti figure:

- **Figura 4.4:** andamento dei momenti flettenti nei setti di diaframma della paratia di sinistra nelle varie fasi di analisi (pari a quelli di analisi per 2.5 m): a) caso 1, b) caso 2.
- **Figura 4.5:** andamento dei momenti flettenti nei setti di diaframma nella paratia di destra nelle varie fasi di analisi (pari a quelli di analisi per 2.5 m): a) caso 1, b) caso 2.
- **Figura 4.6:** involucro dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quelli di analisi per 2.5 m), caso 1 e caso 2.
- **Figura 4.7:** involucro dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quelli di analisi per 2.5 m), caso 1 e caso 2.
- **Figura 4.8:** andamento degli spostamenti orizzontali dei setti di diaframma della paratia di sinistra; – a) caso 1, b) caso 2.

- **Figura 4.9:** andamento degli spostamenti orizzontali dei setti di diaframma della paratia di destra; – a) caso 1, b) caso 2.
- **Figura 4.10:** andamento dei momenti flettenti nella soletta di base definitiva, in kNm/m; – a) caso 1, b) caso 2.
- **Figura 4.11:** andamento delle azioni assiali nella soletta di base definitiva, in kN/m; – a) caso 1, b) caso 2.
- **Figura 4.12:** andamento dell'accelerazione orizzontale a testa paratia nella fase sismica, caso 1.
- **Figura 4.13:** andamento dello spostamento orizzontale a testa paratia nella fase sismica, caso 1.

L'azione assiale massima nel puntello provvisorio è pari a $356 \times 2.5 = 890$ kN.

4.2.2 Analisi semplificate con **PARATIE (vers.7)**

4.2.2.1 Sezione 5.5 m-A

4.2.2.1.1 Calibrazione del modello semplificato

Con riferimento alla sezione 5.5 m-A, considerata nelle analisi descritte nel **paragrafo 4.2.1**, il calcolo, è stato ripetuto impiegando il codice di calcolo **PARATIE (vers.7)**, con le seguenti fasi di costruzione:

- Fasi 0-1: situazione iniziale corrispondente a quella immediatamente successiva all'esecuzione dei pannelli di diaframma.
- Fase 2: scavo di 1 m e messa in opera dei puntelli provvisori a 0.5 m dal p.c. (condizioni drenate).
- Fase 3: scavo fino alla quota massima di 5.5 m (condizioni drenate); in questa fase è stato considerato un sovraccarico uniforme a monte della paratia di destra di 10 kPa.
- Fase 4: getto della soletta di base e rimozione del puntello provvisorio (condizioni drenate); in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico uniforme a monte delle paratie.
- Fase 5: applicazione del terremoto di progetto; in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico a monte delle paratie.

L'analisi è stata condotta con riferimento ai seguenti parametri geotecnici di calcolo (fattorizzati):

$$\gamma_n = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$c' = 0 \text{ kPa}$$

$$\varphi' = 20^\circ$$

$$E' = \text{modulo di Young} = 25 \text{ MPa.}$$

In analogia a quanto indicato per l'analisi FEM descritta nel **paragrafo 4.2**, la situazione stratigrafico-geotecnica sopra indicata è associabile alle verifiche SLU secondo l'Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1), previste dal **Doc.Rif.[30]**.

La definizione della legge costitutiva che governa il comportamento delle molle con cui è schematizzato il terreno in condizioni statiche richiede altresì la valutazione, sulla base dei valori dei parametri geotecnici sopra elencati, dei coefficienti di spinta riportati nella **Tabella 4.1**.

In analogia a quanto assunto per l'analisi di cui al **paragrafo 4.2**, il livello di falda di monte è stato posto in corrispondenza del piano campagna; quello di valle è stato posto in corrispondenza del fondo scavo.

Le condizioni sismiche sono state analizzate ricorrendo al metodo statico equivalente, introducendo nell'analisi un incremento di spinta a monte e una riduzione della reazione passiva del terreno a valle in accordo a quanto descritto nell'**Appendice 2**. I risultati conseguiti sono riportati nella **Tabella 4.2**.

Tabella 4.1: Analisi con PARATIE - Coefficienti di spinta del terreno in condizioni statiche per le verifiche SLU – Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1)

K_o (-) ⁽¹⁾	K_a (-) ⁽²⁾	K_p (-) ⁽³⁾
2.53 fino a circa 5 m dl p.c.	0.49	3
2.2 da 5 m a 20 m dal p.c.	0.49	3

(1) Coefficiente di spinta a riposo valutato sulla base di quanto riportato in **Figura 4.2**
(2) Coefficiente di spinta attiva valutato in accordo a [Caquot & Kerisel \(1948\)](#) e a $\delta/\varphi' = 2/3 \div 1$
(3) Coefficiente di spinta passiva valutato in accordo a [Caquot & Kerisel \(1948\)](#) e a $\delta/\varphi' = 2/3 \div 1$

Tabella 4.2: Analisi con PARATIE - Coefficienti di spinta del terreno in condizioni sismiche per le verifiche SLU – Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1)

K_o (-) ⁽¹⁾	K_a (-) ⁽²⁾	K_p (-) ⁽³⁾
2.53 fino a circa 5 m dl p.c.	0.61	1.76
2.2 da 5 m a 20 m dal p.c.	0.61	1.76

(1) Coefficiente di spinta a riposo valutato sulla base di quanto riportato in **Figura 4.2**
(2) Coefficiente di spinta attiva valutato in accordo a [Mononobe-Okabe](#) e a $\delta/\varphi' = 2/3 \div 1$
(3) Coefficiente di spinta passiva valutato in accordo a [Mononobe-Okabe](#) e a $\delta/\varphi' = 0$

Il coefficiente sismico K_h è stato determinato in modo tale che i risultati ottenuti con il codice di calcolo **PARATIE (vers.7)** risultano comparabili con quelli ottenuti dall'analisi dinamica (più rigorosa) descritta nel **paragrafo 4.2**. Per l'opera in esame il coefficiente sismico K_h è risultato dell'ordine di $0.5 \times 0.175 = 0.0875$, in linea con quanto previsto dal **Doc.Rif.[30]** per accelerazione massima in superficie $a_{max} = 0.175$ (risultante dall'analisi di risposta sismica locale, si veda il **Doc.Rif.[15]**), profilo di deformabilità intermedio tra le categorie di suolo B e C, spostamenti attesi inferiori a 5 cm.

I risultati delle analisi sono rappresentati e messi a confronto con quelli delle analisi di cui al **paragrafo 4.2** nelle seguenti figure:

- **Figura 4.4:** andamento dei momenti flettenti nei setti di diaframma della paratia di sinistra nelle varie fasi (pari a quelli di analisi per 2.5 m).
- **Figura 4.5:** andamento dei momenti flettenti nei setti di diaframma della paratia di destra nelle varie fasi (pari a quelli di analisi per 2.5 m).
- **Figura 4.6:** involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m).
- **Figura 4.7:** involuppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quello di analisi per 2.5 m).

L'azione assiale massima nel puntello provvisorio è pari a $267.4 \times 2.5 = 668.5$ kN.

L'azione assiale massima nella soletta di base definitiva è pari a 671.3 kN/m.

Il confronto tra i risultati ottenuti con l'analisi dinamica (più rigorosa) e l'analisi statica equivalente appare soddisfacente; il dimensionamento degli elementi strutturali può essere pertanto effettuato sulla base dei risultati ottenuti con l'analisi statica equivalente, con le seguenti precisazioni:

- le azioni assiali nei puntelli provvisori vengono incrementate per 1.35 per tenere conto della differenza tra i risultati dell'analisi FEM con **PLAXIS (vers.8.6)** di cui al **paragrafo 4.2.1** e quella dell'analisi semplificata con **PARATIE (vers.7)**;
- per le sollecitazioni flessionali nella soletta di base definitiva si terrà conto di quanto ottenuto con l'analisi FEM con **PLAXIS (vers.8.6)** di cui al **paragrafo 4.2.1**.

I risultati riportati nelle **Figura 4.6** e **4.7**, unitamente a quelli riportati nella **tabella 4.3** e nelle **Figura 4.10** e **Figura 4.11**, sono da intendersi utilizzabili per le verifiche SLU secondo l'Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1) previste dal **Doc.Rif.[30]**. Le azioni assiali, i tagli e i momenti non sono pertanto da fattorizzare.

Tabella 4.3: Azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva – Scavo = 5.5 m - Verifiche SLU secondo l'Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1)

Fase	Descrizione	N_{max} puntello provvisorio	N_{max} soletta di base definitiva
3	Scavo a 5.5 m dal p.c.	$267.4 \times 2.5 \times 1.35 = 902.5$ kN	-
4	Getto soletta e rimozione puntone	-	487.2 kN/m
5	Fase sismica	-	671.3 kN/m

Nel caso di Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1) previsto dal [Doc.Rif.\[30\]](#) si ottengono invece i risultati riportati nella **Tabella 4.4a** (azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva) e nelle **Figura 4.14a** (involuppo dei momenti flettenti nelle paratie) e **Figura 4.15a** (involuppo dei tagli nelle paratie); per le sollecitazioni flessionali nella soletta di base definitiva si terrà cautelativamente conto di quanto ottenuto con l'analisi FEM di cui al **paragrafo 4.2.1** (**Figura 4.10** e **Figura 4.11**). In questo caso le azioni assiali, i tagli e i momenti verranno fattorizzati, adottando $\gamma_F = \gamma_E = 1.3$.

Tabella 4.4a: Sezione 5.5 m-A - Azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva – Scavo = 5.5 m - Verifiche SLU secondo l'Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1)

Fase	Descrizione	N_{max} puntello provvisorio	N_{max} soletta di base definitiva
3	Scavo a 5.5 m dal p.c.	$234.1 \times 2.5 \times 1.35 = 790$ kN	-
4	Getto soletta e rimozione puntone	-	411.2 kN/m
5	Fase sismica	-	645.6 kN/m

Si precisa che i risultati di cui alla **tab.4.5a** e nelle **figg. 4.14a** e **4.15a** sono ottenuti con la stessa procedura descritta per l'analisi con il codice di calcolo [PARATIE \(vers.7\)](#), modificando unicamente i valori dei parametri di resistenza del terreno, portandoli cautelativamente a:

$$c' = 0 \text{ kPa}$$

$\varphi' = 26^\circ$.

I coefficienti di spinta utilizzati nelle analisi sono quelli riportati nelle **Tabella 4.5** e **Tabella 4.6**.

Tabella 4.5: Analisi con PARATIE - Coefficienti di spinta del terreno in condizioni statiche per le verifiche SLU – Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1)

k_o (-) ⁽¹⁾	K_a (-) ⁽²⁾	K_p (-) ⁽⁴⁾
2.53 fino a circa 5 m dl p.c.	0.4	4.5
2.2 da 5 m a 17 m dal p.c.	0.4	4.5

(1) Coefficiente di spinta a riposo valutato sulla base di quanto riportato in **Figura 4.2**
 (2) Coefficiente di spinta attiva valutato in accordo a [Caquot & Kerisel \(1948\)](#) e a $\delta/\varphi' = 2/3 \div 1$
 (3) Coefficiente di spinta passiva valutato in accordo a [Caquot & Kerisel \(1948\)](#) e a $\delta/\varphi' = 2/3 \div 1$

Tabella 4.6: Analisi con PARATIE - Coefficienti di spinta del terreno in condizioni sismiche per le verifiche SLU – Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1)

k_o (-) ⁽¹⁾	K_a (-) ⁽²⁾	K_p (-) ⁽³⁾
2.53 fino a circa 5 m dl p.c.	0.49	2.26
2.2 da 5 m a 17 m dal p.c.	0.49	2.26

(1) Coefficiente di spinta a riposo valutato sulla base di quanto riportato in **Figura 4.2**
 (2) Coefficiente di spinta attiva valutato in accordo a [Mononobe-Okabe](#) e a $\delta/\varphi' = 2/3 \div 1$
 (3) Coefficiente di spinta passiva valutato in accordo a [Mononobe-Okabe](#) e a $\delta/\varphi' = 0$

4.2.2.1.2 Verifica dell'adeguatezza dell'infissione del pannello di diaframma

La verifica dell'adeguatezza dell'infissione dei pannelli di diaframma rispetto alla quota massima di scavo di 5.5 m è stata effettuata con il metodo proposto ad esempio dall'[USS Steel Sheet Piling Design Manual](#) e dal [BSC Piling Handbook](#) (si veda anche [Padfield & Mair, 1984](#)). In accordo a tali metodi, definita con $-d-$ l'infissione che determina l'instabilità geotecnica dell'opera, l'infissione di progetto, che garantisce adeguati margini di sicurezza nei confronti del raggiungimento di fenomeni di instabilità geotecnica, risulta pari a $d \cdot F_d$, essendo, per opere definitive, $F_d = 1.5$.

Nel caso specifico, dal lato della sicurezza, l'infissione minima $-d-$ è stata valutata ripetendo l'analisi di cui al **paragrafo 4.2.2.1.1** (Approccio 1 – Combinazione 2) per varie lunghezze di pannello, determinando quella che in condizioni statiche (fino alla fase 4) determina l'instabilità dell'opera per rottura del terreno. Essa risulta pari a 7.6 m.

Il metodo adottato è da ritenersi ampiamente dal lato della sicurezza per i seguenti motivi:

- Tenuto conto della bassa permeabilità delle argille plio-pleistoceniche, le fasi da 0 a 4 avverranno in condizioni più prossime a quelle non drenate; il regime di spinta è quindi più favorevole di quello drenato di dimensionamento. Anche la fase di reinterro fino al raggiungimento della quota viabile avverrà quando gran parte delle sovrappressioni interstiziali negative (di suzione) generate dallo scavo non saranno ancora dissipate.
- Anche in condizioni drenate, il metodo conduce per le fasi da = a 4 a risultati più restrittivi di quelli ottenibili con la verifica di stabilità globale prevista dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 14 Gennaio 2008 secondo l'Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R2).
- Le sollecitazioni indotte dal terremoto avverranno in condizioni non drenate, quando l'altezza da sostenere (da testa paratia a piano viabile) è soltanto pari a 3.4 m.

4.2.2.2 Sezione 5.5 m-B

Con riferimento alla sezione caratterizzata dalla massima altezza di scavo, sovraccaricata dal rilevato della bretella (primi due pannelli esterni al tratto in scatolare), limitatamente al caso dimensionante rappresentato dall'Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1) previsto dal [Doc.Rif.\[30\]](#), il calcolo, è stato ripetuto con le seguenti fasi di costruzione:

- Fasi 0-1: situazione iniziale corrispondente a quella immediatamente successiva all'esecuzione dei pannelli di diaframma.
- Fase 2: scavo di 1 m e messa in opera dei puntelli provvisori a 0.5 m dal p.c. (condizioni drenate).
- Fase 3: scavo fino alla quota massima di 5.5 m (condizioni drenate); in questa fase è stato considerato un sovraccarico uniforme a monte della paratia di destra di 10 kPa.
- Fase 4: getto della soletta di base e rimozione del puntello provvisorio (condizioni drenate); in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico uniforme a monte delle paratie.
- Fase 5: costruzione del rilevato della bretella.
- Fase 6: applicazione del terremoto di progetto.

Anche in questo caso le condizioni sismiche sono state analizzate ricorrendo al metodo statico equivalente, introducendo nell'analisi un incremento di spinta a monte e

una riduzione della reazione passiva del terreno a valle; il coefficiente sismico K_h è stato assunto pari a 0.0875.

I risultati ottenuti sono riportati nella **Tabella 4.4b** (azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva) e nelle **Figura 4.14b** (involuppo dei momenti flettenti nelle paratie) e **Figura 4.15b** (involuppo dei tagli nelle paratie); per le sollecitazioni flessionali nella soletta di base definitiva si terrà ancora conto di quanto ottenuto con l'analisi FEM di cui al **paragrafo 4.2.1 (Figura 4.10 e Figura 4.11)**. In questo caso le azioni assiali, i tagli e i momenti verranno fattorizzati, adottando $\gamma_F = \gamma_E = 1.3$.

Tabella 4.4b: Sezione 5.5 m-B - Azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva – Scavo = 5.5 m - Verifiche SLU secondo l'Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1)

Fase	Descrizione	N_{max} puntello provvisorio	N_{max} soletta di base definitiva
3	Scavo a 5.5 m dal p.c.	$234.1 \times 2.5 \times 1.35 = 790$ kN	-
4	Getto soletta e rimozione puntone	-	411.2 kN/m
5	Costruzione rilevato della bretella	-	645.6 kN/m
6	Fase sismica	-	645.6 kN/m

4.3 Sezione corrente con altezza di scavo 5 m

In analogia a quanto effettuato per le sezioni 5.5 m-A e 5.5 m-B (si veda il **paragrafo 4.2.2**), l'analisi è stata ripetuta per la sezione di altezza di scavo 5 m.

In corrispondenza di tale sezione i pannelli di diaframma di dimensioni planimetriche 0.8 m x 2.5 m hanno lunghezza 16 m (inclusa la trave di coronamento). I puntelli provvisori sono posti ad interasse 2.5 m.

Sono state adottate le seguenti fasi di costruzione:

- Fasi 0-1: situazione iniziale corrispondente a quella immediatamente successiva all'esecuzione dei pannelli di diaframma.
- Fase 2: scavo di 1 m e messa in opera dei puntelli provvisori a 0.5 m dal p.c. (condizioni drenate).
- Fase 3: scavo fino alla quota massima di 5 m (condizioni drenate); in questa fase è stato considerato un sovraccarico uniforme a monte della paratia di destra di 10 kPa.
- Fase 4: getto della soletta di base e rimozione del puntello provvisorio (condizioni drenate); in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico uniforme a monte delle paratie.
- Fase 5: applicazione del terremoto di progetto; in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico a monte delle paratie.

I risultati ottenuti sono riportati nelle seguenti figure e tabelle:

- Per le verifiche SLU, Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1): **Figura 4.16** (involuppo dei momenti flettenti nelle paratie) e **Figura 4.17** (involuppo dei tagli nelle paratie) e **Tabella 4.7** (azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva).
- Per le verifiche SLU, Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1): **Figura 4.18** (involuppo dei momenti flettenti nelle paratie) e **Figura 4.19** (involuppo dei tagli nelle paratie) e **Tabella 4.8** (azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva).

Per le sollecitazioni flessionali nella soletta di base definitiva, per entrambe le verifiche, si terrà conto di quanto ottenuto con l'analisi FEM di cui al **paragrafo 4.2.2**.

Tabella 4.7: Azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva – Scavo = 5 m - Verifiche SLU secondo l'Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1)

Fase	Descrizione	N_{max} puntello provvisorio	N_{max} soletta di base definitiva
3	Scavo a 5 m dal p.c.	$228.1 \times 2.5 \times 1.35 = 769.8$ kN	-
4	Getto soletta e rimozione puntone	-	394.4 kN/m
5	Fase sismica	-	558.8 kN/m

Tabella 4.8: Azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva – Scavo = 5 m - Verifiche SLU secondo l'Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1)

Fase	Descrizione	N_{max} puntello provvisorio	N_{max} soletta di base definitiva
3	Scavo a 5 m dal p.c.	$211.1 \times 2.5 \times 1.35 = 712.5$ kN	-
4	Getto soletta e rimozione puntone	-	336.3 kN/m
5	Fase sismica	-	547.3 kN/m

Anche in questo caso la verifica dell'adeguatezza dell'infissione dei pannelli di diaframma rispetto alla quota massima di scavo di 5 m è soddisfatta risultando quella che in condizioni statiche (fino alla fase 4) determina l'instabilità dell'opera per rottura del terreno pari a 6.9 m. Si tenga inoltre presente che:

- Tenuto conto della bassa permeabilità delle argille plio-pleistoceniche, le fasi da 0 a 4 avverranno in condizioni più prossime a quelle non drenate; il regime di spinta è quindi più favorevole di quello drenato di dimensionamento.
- Anche la fase di reinterro fino al raggiungimento della quota viabile avverrà quando gran parte delle sovrappressioni interstiziali negative (di suzione) generate dallo scavo non saranno ancora dissipate.
- Le sollecitazioni indotte dal terremoto avverranno in condizioni non drenate, quando l'altezza da sostenere (da testa paratia a piano viabile) è soltanto pari a 2.9 m.

4.4 Sezione corrente con altezza di scavo 4.3 m

In analogia a quanto effettuato per le sezioni 5.5 m-A e 5.5 m-B (si veda il **paragrafo 4.2.2**), l'analisi è stata ripetuta per la sezione di altezza di scavo 4.3 m.

In corrispondenza di tale sezione i pannelli di diaframma di dimensioni planimetriche 0.8 m x 2.5 m hanno lunghezza 14 m (inclusa la trave di coronamento). Nelle analisi i puntelli provvisori sono posti ad interasse di 2.5 m.

Sono state adottate le seguenti fasi di costruzione:

- Fasi 0-1: situazione iniziale corrispondente a quella immediatamente successiva all'esecuzione dei pannelli di diaframma.
- Fase 2: scavo di 1 m e messa in opera dei puntelli provvisori a 0.5 m dal p.c. (condizioni drenate).
- Fase 3: scavo fino alla quota massima di 4.3 m (condizioni drenate); in questa fase è stato considerato un sovraccarico uniforme a monte della paratia di destra di 10 kPa.
- Fase 4: getto della soletta di base e rimozione del puntello provvisorio (condizioni drenate); in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico uniforme a monte delle paratie.
- Fase 5: applicazione del terremoto di progetto; in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico a monte delle paratie.

I risultati ottenuti sono riportati nelle seguenti figure e tabelle:

- Per le verifiche SLU, Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1): **Figura 4.20** (involuppo dei momenti flettenti nelle paratie) e **Figura 4.21** (involuppo dei tagli nelle paratie) e **Tabella 4.9** (azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva).
- Per le verifiche SLU, Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1): **Figura 4.22** (involuppo dei momenti flettenti nelle paratie) e **Figura 4.23** (involuppo dei tagli nelle paratie) e **Tabella 4.10** (azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva).

Per le sollecitazioni flessionali nella soletta di base definitiva, per entrambe le verifiche, si terrà conto di quanto ottenuto con l'analisi FEM di cui al **paragrafo 4.2.2**.

Tabella 4.9: Azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva – Scavo = 4.3 m - Verifiche SLU secondo l'Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1)

Fase	Descrizione	N _{max} puntello provvisorio	N _{max} soletta di base definitiva
3	Scavo a 4.3 m dal p.c.	182.5x2.5x1.35=616 kN	-
4	Getto soletta e rimozione puntone	-	295.1 kN/m
5	Fase sismica	-	425.9 kN/m

Tabella 4.10: Azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva – Scavo = 4.3 m - Verifiche SLU secondo l'Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1)

Fase	Descrizione	N _{max} puntello provvisorio	N _{max} soletta di base definitiva
3	Scavo a 4.3 m dal p.c.	182.1x2.5x1.35=614.5 kN	-
4	Getto soletta e rimozione puntone	-	265.4 kN/m
5	Fase sismica	-	430.5 kN/m

Anche in questo caso la verifica dell'adeguatezza dell'infissione dei pannelli di diaframma rispetto alla quota massima di scavo di 5 m è soddisfatta risultando quella che in condizioni statiche (fino alla fase 4) determina l'instabilità dell'opera per rottura del terreno pari a 5.9 m. Si tenga inoltre presente che:

- Tenuto conto della bassa permeabilità delle argille plio-pleistoceniche, le fasi da 0 a 4 avverranno in condizioni più prossime a quelle non drenate; il regime di spinta è quindi più favorevole di quello drenato di dimensionamento.
- Anche la fase di reinterro fino al raggiungimento della quota viabile avverrà quando gran parte delle sovrappressioni interstiziali negative (di suzione) generate dallo scavo non saranno ancora dissipate.
- Le sollecitazioni indotte dal terremoto avverranno in condizioni non drenate, quando l'altezza da sostenere (da testa paratia a piano viabile) è soltanto pari a 2.2 m.

4.5 Sezione corrente di altezza di scavo 3 m

In analogia a quanto effettuato per le sezioni 5.5 m-A e 5.5 m-B (si veda il **paragrafo 4.2.2**), l'analisi è stata ripetuta per la sezione di altezza di scavo 3 m.

In corrispondenza di tale sezione i pannelli di diaframma di dimensioni planimetriche 0.8 m x 2.5 m hanno lunghezza 10 m (inclusa la trave di coronamento).

Nelle analisi i puntelli provvisori sono posti ad interasse di 5.0 m.

Sono state adottate le seguenti fasi di costruzione:

- Fasi 0-1: situazione iniziale corrispondente a quella immediatamente successiva all'esecuzione dei pannelli di diaframma.
- Fase 2: scavo di 1 m e messa in opera dei puntelli provvisori a 0.5 m dal p.c. (condizioni drenate).
- Fase 3: scavo fino alla quota massima di 3 m (condizioni drenate); in questa fase è stato considerato un sovraccarico uniforme a monte della paratia di 10 kPa.
- Fase 4: getto della soletta di base e rimozione del puntello provvisorio (condizioni drenate); in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico uniforme a monte delle paratie.
- Fase 5: applicazione del terremoto di progetto; in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico a monte delle paratie.

I risultati ottenuti sono riportati nelle seguenti figure e tabelle:

- Per le verifiche SLU, Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1): **Figura 4.24** (involuppo dei momenti flettenti nelle paratie) e **Figura 4.25** (involuppo dei tagli nelle paratie) e **Tabella 4.11** (azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva).
- Per le verifiche SLU, Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1): **Figura 4.26** (involuppo dei momenti flettenti nelle paratie) e **Figura 4.27** (involuppo dei tagli nelle paratie) e **Tabella 4.12** (azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva).

Per le sollecitazioni flessionali nella soletta di base definitiva, per entrambe le verifiche, si terrà conto di quanto ottenuto con l'analisi FEM di cui al **paragrafo 4.2.2**.

Tabella 4.11: Azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva – Scavo = 3 m - Verifiche SLU secondo l'Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1)

Fase	Descrizione	N _{max} puntello provvisorio	N _{max} soletta di base definitiva
3	Scavo a 3 m dal p.c.	104.6x5x1.35=706 kN	-
4	Getto soletta e rimozione puntone	-	145.3 kN/m
5	Fase sismica	-	211.8 kN/m

Tabella 4.12: Azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva – Scavo = 3 m - Verifiche SLU secondo l'Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1)

Fase	Descrizione	N _{max} puntello provvisorio	N _{max} soletta di base definitiva
3	Scavo a 3 m dal p.c.	110.6x5x1.35=746.5 kN	-
4	Getto soletta e rimozione puntone	-	141.2 kN/m
5	Fase sismica	-	225 kN/m

Anche in questo caso la verifica dell'adeguatezza dell'infissione dei pannelli di diaframma rispetto alla quota massima di scavo di 5 m è soddisfatta risultando quella che in condizioni statiche (fino alla fase 4) determina l'instabilità dell'opera per rottura del terreno pari a 4.2 m. Si tenga inoltre presente che:

- Tenuto conto della bassa permeabilità delle argille plio-pleistoceniche, le fasi da 0 a 4 avverranno in condizioni più prossime a quelle non drenate; il regime di spinta è quindi più favorevole di quello drenato di dimensionamento.
- Anche la fase di reinterro fino al raggiungimento della quota viabile avverrà quando gran parte delle sovrappressioni interstiziali negative (di suzione) generate dallo scavo non saranno ancora dissipate.
- Le sollecitazioni indotte dal terremoto avverranno in condizioni non drenate, quando l'altezza da sostenere (da testa paratia a piano viabile) è soltanto pari a 0.9 m.

4.6 Sezione nel tratto in scatolare

L'analisi della sezione nel tratto in scatolare è stata effettuata in analogia a quanto fatto per la sezione 5.5 m-A (si veda il **paragrafo 4.2.1**).

In corrispondenza di tale sezione i pannelli di diaframma di dimensioni planimetriche 0.8 m x 2.5 m, hanno lunghezza 17 m (inclusa la trave di coronamento). I puntelli provvisori sono posti a interasse 2.5 m.

La base dello scatolare è costituita, come nella sezione corrente, da una soletta di spessore 60 cm; i ritzi dello scatolare hanno spessore 60 cm; la copertura dello scatolare ha spessore 40 cm.

L'altezza del rilevato della bretella è pari a 3 m.

Nella **Figura 4.28** si riporta la griglia di calcolo, ove sono rappresentati anche lo scatolare e il rilevato della bretella.

La stratigrafia e il livello di falda sono uguali a quelli considerati per la sezione 5.5 m-A (si veda il **paragrafo 4.2.1**).

L'analisi è stata condotta in accordo alle seguenti fasi:

- Fase 0: determinazione dello stato di sforzo iniziale.
- Fase 1: inserimento dei setti di diaframma (condizioni drenate).
- Fase 2: scavo di 1 m ed inserimento del puntone provvisorio a 0.5 m dal p.c. (condizioni drenate).
- Fase 3: scavo fino alla quota massima di 5.5 m dal p.c. (condizioni drenate); in questa fase è stato considerato un sovraccarico uniforme a monte della paratia di destra di 10 kPa, per tenere conto della presenza di mezzi di lavoro.
- Fase 4a: getto della soletta di base e rimozione del puntone provvisorio (condizioni drenate); in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico uniforme a monte delle paratie.
- Fase 4b: inserimento dello scatolare, riporto di materiale granulare fino alla quota del piano stradale (l'altezza da sostenere diventa pari a 3.4 m), inserimento del rilevato della bretella (condizioni drenate); in questa fase sono state considerate tre situazioni inerenti il sovraccarico stradale sulla bretella:
 - sovraccarico stradale cautelativo di 20 kPa esternamente all'area di ingombro dello scatolare, lato sinistro (caso 1);

- sovraccarico stradale cautelativo di 20 kPa esternamente all'area di ingombro dello scatolare, lato sinistro, e sull'area di ingombro dello scatolare (caso 2);
- sovraccarico stradale cautelativo di 20 kPa esternamente all'area di ingombro dello scatolare, lato sinistro e lato destro, e sull'area di ingombro dello scatolare (caso 3).
- Fase 5: applicazione dell'accelerogramma alla base del modello (condizioni non drenate); in questa fase non è stato considerato alcun sovraccarico stradale sulla bretella;
- Fase 6: dissipazione delle sovrappressioni interstiziali generate dal terremoto (condizioni accoppiate); anche in questa fase sono state considerate le tre situazioni inerenti il sovraccarico stradale indicate per la fase 4b.

Nella parte soprastante la quota estradosso trave di coronamento della paratia che sostiene gli scavi, lo scatolare è stato schematizzato con elementi "beams" aventi inerzia e area per metro lineare rispettivamente pari a 0.018 m^4 e 0.6 m^2 (ritti) e a 0.0053 m^4 e 0.4 m^2 (copertura). Gli elementi "beam" hanno comportamento elastico e sono caratterizzati da un modulo di Young pari a 30000 MPa e un peso di volume $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$.

Nella parte tra quota estradosso trave di coronamento della paratia che sostiene gli scavi e la soletta di base, i setti di diaframma della paratia e i ritti dello scatolare sono stati schematizzati con elementi "beam" aventi inerzia e area per metro lineare pari alla somma di quelle dei due elementi strutturali. In fase di restituzione grafica delle sollecitazioni agenti negli elementi strutturali, i valori di calcolo sono stati scomposti convenientemente.

Il riporto al di sopra della soletta ed il rilevato sono stati simulati introducendo nel modello numerico elementi zona; gli elementi zona hanno comportamento elasto-plastico con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb e sono caratterizzati da un modulo di Young pari a 30 MPa , un peso di volume $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ e un angolo di attrito pari a 35° .

I risultati delle analisi sono rappresentati nelle seguenti figure:

- **Figura 4.29:** involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quelli di analisi per 2.5 m).
- **Figura 4.30:** involuppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sinistra e di destra (pari a quelli di analisi per 2.5 m).
- **Figura 4.31:** andamento dei momenti flettenti nella soletta di base definitiva, in kNm/m .
- **Figura 4.32:** andamento delle azioni assiali nella soletta di base definitiva, in kN/m .

- **Figura 4.33a, Figura 4.33b e Figura 4.33c:** andamento dei momenti flettenti nei ritti (sinistra e destra) e nella copertura dello scatolare.
- **Figura 4.34a, Figura 4.34b e Figura 4.34c:** andamento dei tagli nei ritti (sinistra e destra) e nella copertura dello scatolare.
- **Figura 4.35a₁, Figura 4.35a₂, Figura 4.35b₁, Figura 4.35b₂ e Figura 4.35c:** andamento delle azioni assiali nei ritti e nella copertura dello scatolare; per i ritti sono riportati due andamenti; uno considera che, nel tratto compreso tra l'estradosso della trave di coronamento della paratia di sostegno dello scavo e la soletta di base, possa esserci una ripartizione di carico tra ritto e setti della paratia (ipotesi 1); l'altro considera che l'azione sia interamente assorbita dai ritti (ipotesi 2). Il dimensionamento delle armature verrà effettuato facendo riferimento alla condizione peggiore.

L'azione assiale massima nel puntello provvisorio è riportata nella **Tabella 4.13**.

I risultati riportati in **Figura 4.29, Figura 4.30, Figura 4.31, Figura 4.32, Figura 4.33a, b, c, Figura 4.34a, b, c e Figura 4.35a₁, a₂, b₁, b₂, c**, unitamente a quelli riportati nella **Tabella 4.13**, sono da intendersi utilizzabili per le verifiche SLU secondo l'Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1) previste dal [Doc.Rif.\[30\]](#). Le azioni assiali, i tagli e i momenti non sono pertanto da fattorizzare.

Tabella 4.13: Azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva – Tratto in scatolare - Verifiche SLU secondo l'Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R1)

Fase	Descrizione	N _{max} puntello provvisorio	N _{max} soletta di base definitiva
3	Scavo a 5.5 m dal p.c.	379.8x2.5=949.5 kN	-

Nel caso di Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1) previsto dal [Doc.Rif.\[30\]](#) si ottengono invece i risultati riportati nelle **Figura 4.36, Figura 4.37, Figura 4.38, Figura 4.39, Figura 4.40a, b, c, Figura 4.41a, b, c e Figura 4.42a₁, a₂, b₁, b₂, c** nella **Tabella 4.14**. In questo caso le azioni assiali, i tagli e i momenti sono da fattorizzare, adottando $\gamma_F = \gamma_E = 1.3$.

Tabella 4.14: Azioni assiali nei puntelli provvisori e nella soletta di base definitiva – Tratto in scatolare - Verifiche SLU secondo l'Approccio 1 – Combinazione 1 (A1+M1+R1)

Fase	Descrizione	N_{\max} puntello provvisorio	N_{\max} soletta di base definitiva
3	Scavo a 5.5 m dal p.c.	$319.3 \times 2.5 = 798.3$ kN	-

Si precisa che i risultati di cui alla tabella e alle figure citate sono ottenuti con la stessa procedura descritta, modificando unicamente i valori dei parametri di resistenza del terreno, portandoli cautelativamente a:

$$c' = 0 \text{ kPa}$$

$$\varphi' = 26^\circ.$$

5. VERIFICHE STRUTTURALI DELL'OPERA DI SOSTEGNO E DELLO SCATOLARE

Le verifiche strutturali dell'opera di sostegno e dello scatolare sono riportate nel

Doc.Rif.[27].

6. MONITORAGGIO DELL'OPERA

Considerando l'importanza dell'opera in progetto, ed in accordo anche con quanto prescritto nel [Doc.Rif.\[30\]](#), è prevista l'attivazione di un piano di monitoraggio geotecnico-strutturale così definito:

- predisposizione di n.10 mire topografiche installate sopra la trave di coronamento dei diaframmi in corrispondenza delle sezioni S6, S7, S8, S9 ed S10; per ciascuna sezione si prevede di porre una copia di mire ottiche disposte sui diaframmi contrastanti.
- predisposizione di n.4 mire topografiche installate sui quattro vertici dello scatolare.
- misurazione topografica delle mire di cui ai punti precedente appoggiandosi ad un caposaldo posto esterno all'area di frana. Le letture topografiche alle mire avranno cadenza settimanale (compatibilmente con il programma lavori) a partire dalla loro installazione; tali letture saranno sottoposte all'esame della Direzione Lavori.
- predisposizione di n.2 celle di carico e n.2 termometri in corrispondenza del puntone corrispondente al diaframma rappresentato dalla sezione S8.
- attivazione immediata del monitoraggio del puntone strumentato (si veda il punto precedente) con collegamenti ad una centralina di acquisizione dati; tale attivazione dovrà avvenire subito dopo la messa in opera del puntone.

Le letture alle mire topografiche installate proseguiranno anche dopo la costruzione. In condizioni normali il monitoraggio topografico avverrà alle seguenti cadenze:

- frequenza mensile durante il primo anno dal completamento dell'opera;
- frequenza semestrale fino al terzo anno dal completamento dell'opera;
- frequenza annuale per il resto della vita dell'opera.

Rilievi topografici verranno effettuati anche successivamente ad ogni riattivazione dei movimenti gravitativi profondi.

7. **BIBLIOGRAFIA**

Al-Tabbaa A., Wood M.D. (1989) "An experimentally based "bubble" model for clay" Proc. of Numerical Models in Geomechanics. NUMOG III, eds. Pande G. N. & Pietruszczak S., pp. 91-98, London, Elsevier.

Caquot A., Kerisel J. (1948) "Tables for the calculation of passive pressure, active pressure and bearing capacity of foundations" Gautiers-Villars, Paris.

Melidoro G., Mezzabotta M. (1996) "Monitoraggio ultrasecolare delle deformazioni gravitative costiere adriatiche" Convegno Internazionale, La Prevenzione delle Catastrofi Idrogeologiche: il Contributo della Ricerca Scientifica, 343-356.

Mononobe, N. and Matsuo, H. (1929) "On the Determination of Earth Pressures During Earthquakes" Proceedings, World Engineering Congress

Okabe, S. (1926) "General Theory of Earth Pressures" Journal of the Japan Society of Civil Engineering, Vol. 12, No.1.

Padfield C.J. e Mair, R.J. (1984) "Design of retaining walls embedded in stiff clays". CIRIA Report n.104.

FIGURE

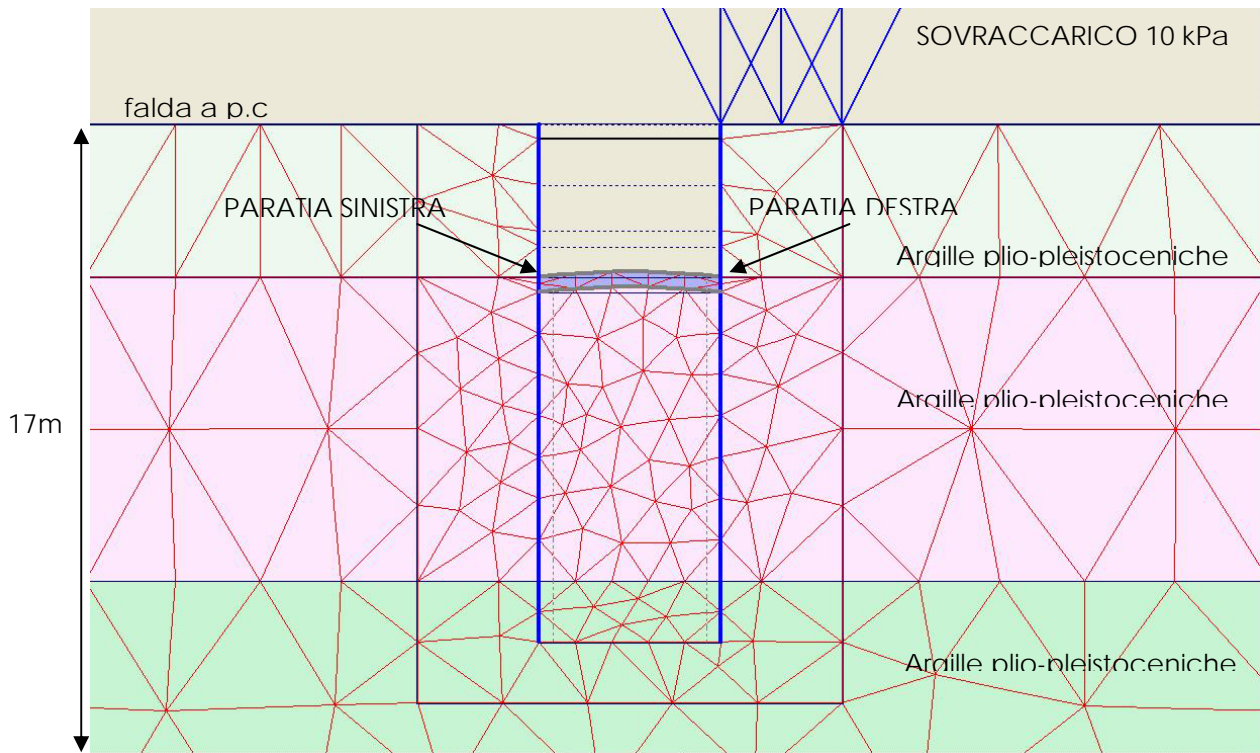


Figura 4.1 Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Sezione 5.5m -A -
 Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1) - Particolare della griglia di calcolo

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5.5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
Andamento del coefficiente di spinta del terreno
al termine della fase 0

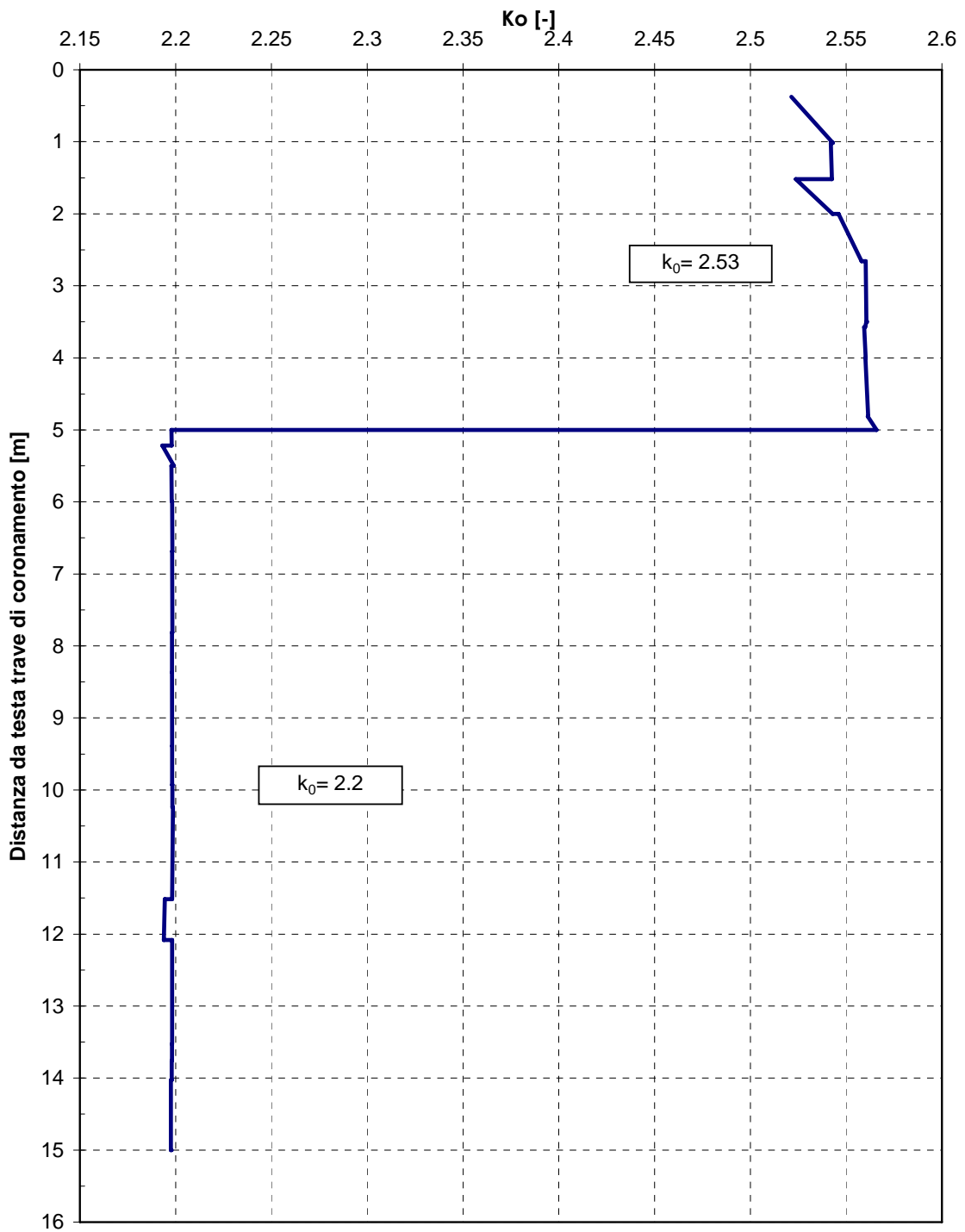


Figura 4.2: Sezione 5.5m - A

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5.5 m - Appoggio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
Accelerogramma applicato alla base del modello numerico

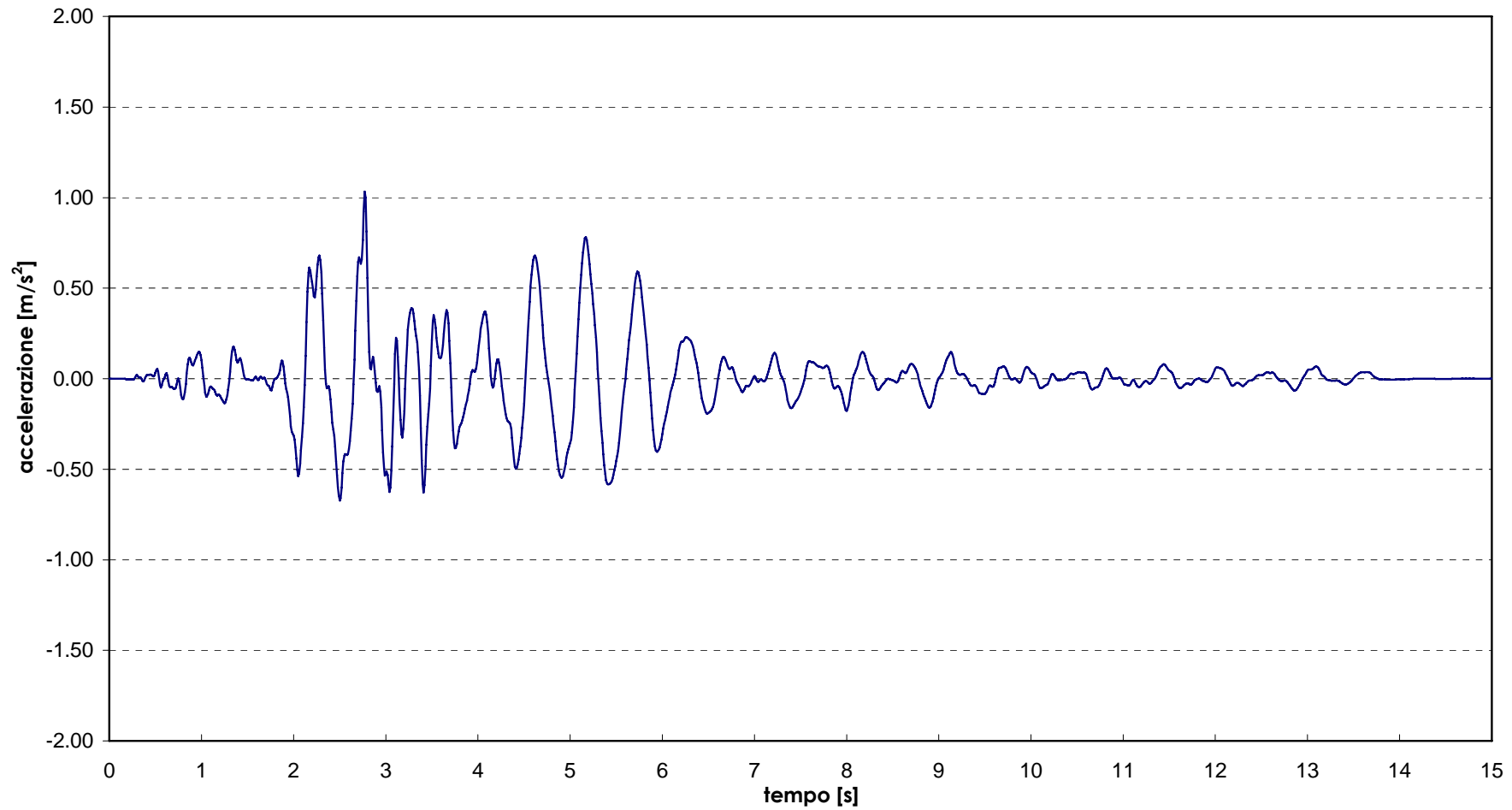


Figura 4.3: Sezione 5.5m - A

**Analisi PLAXIS e PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5.5m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)**
Andamento momenti flettenti nei setti di diaframma della paratia di
sx nelle varie fasi (pari a quelli di analisi per 2.5m) - Caso 1 -

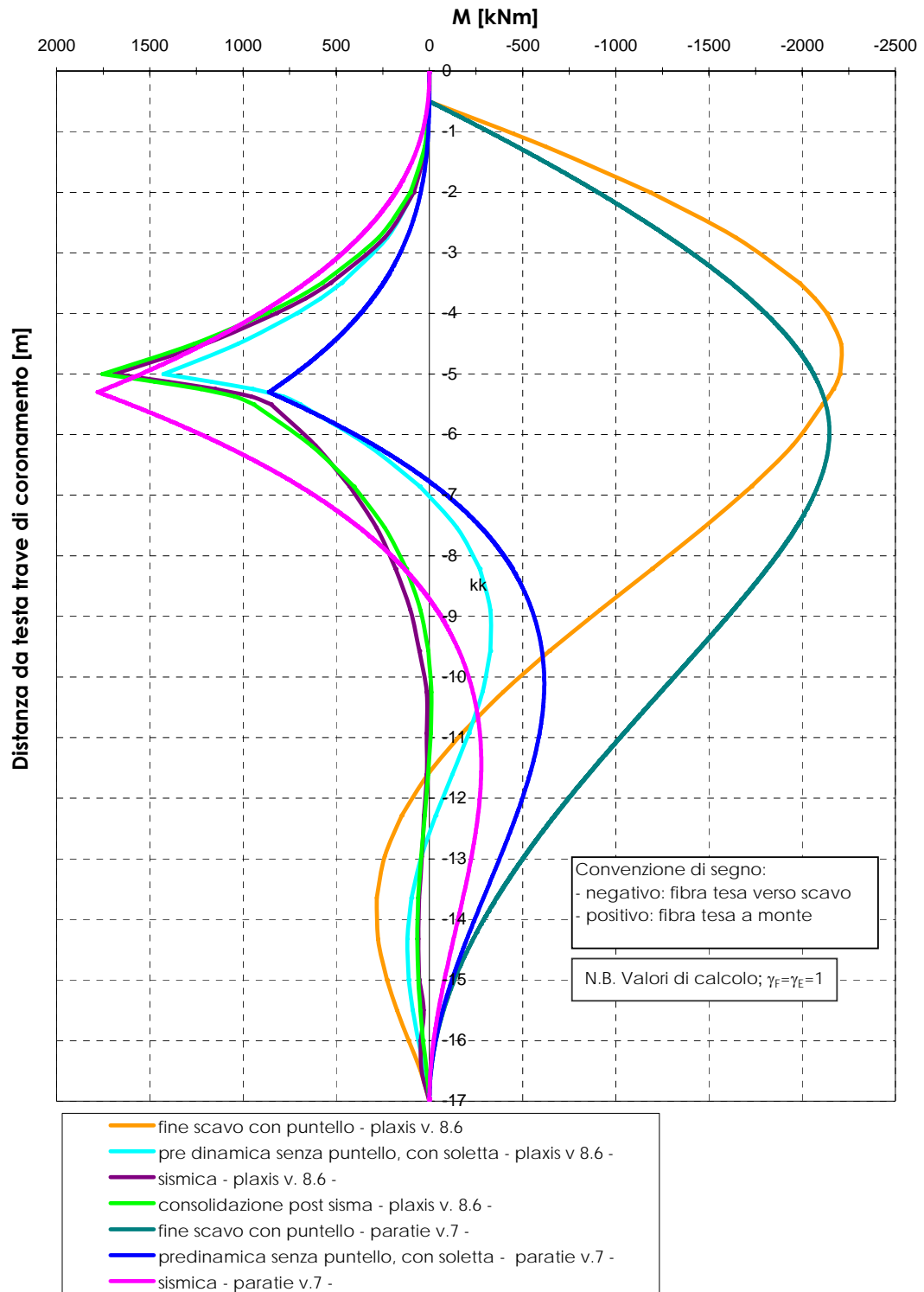


Figura 4.4a: Sezione 5.5m - A

**Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpodereale Scavo 5.5m -
 Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)**
 Andamento momenti flettenti nei setti di diaframma della paratia di
 sx nelle varie fasi (pari a quelli di analisi per 2.5m) - Caso 2 -

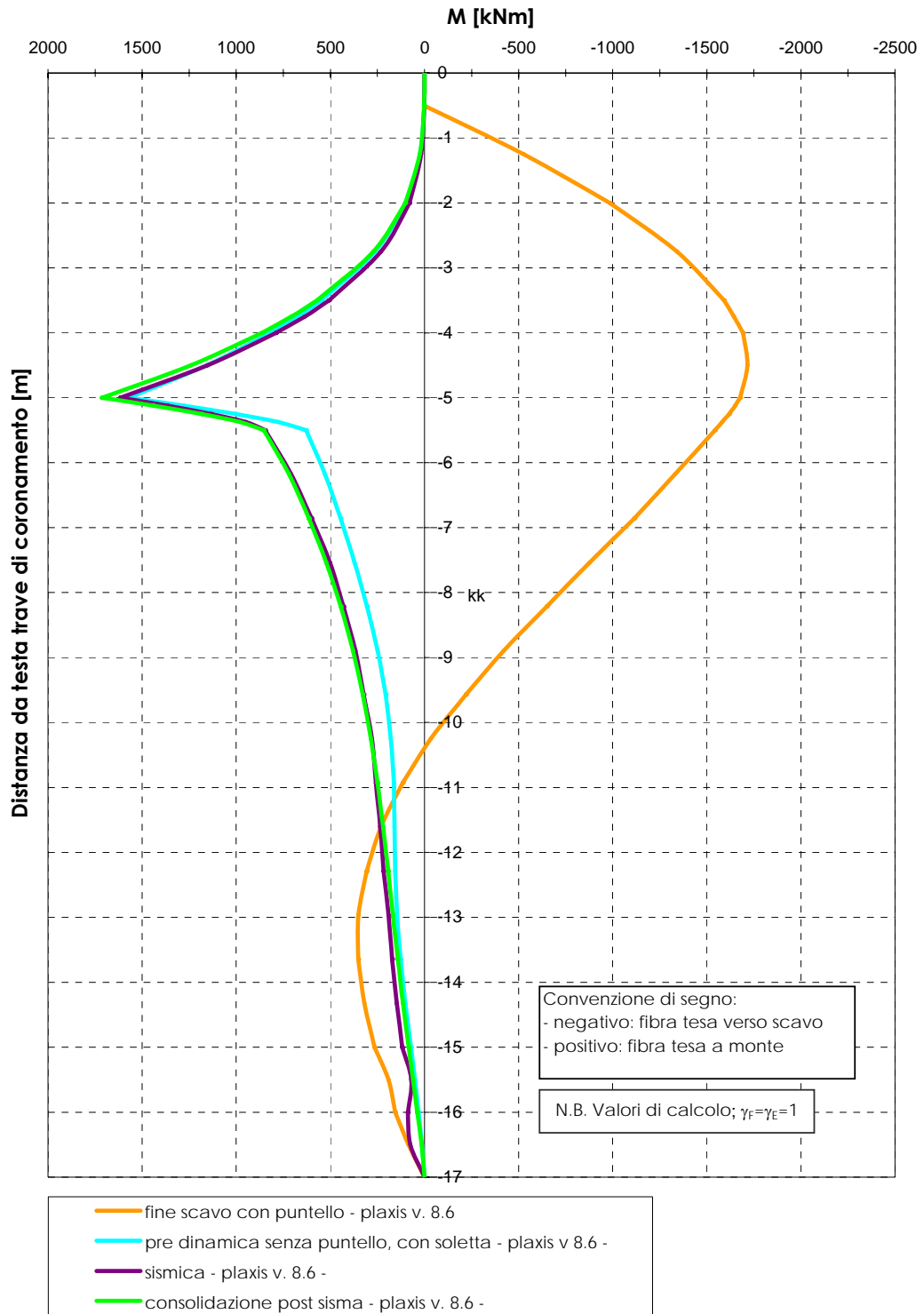


Figura 4.4b: Sezione 5.5m - A

**Analisi PLAXIS e PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale
 Scavo 5.5m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)**
 Andamento momenti flettenti nei setti di diaframma della paratia di
 dx nelle varie fasi (pari a quelli di analisi per 2.5m) - Caso 1 -

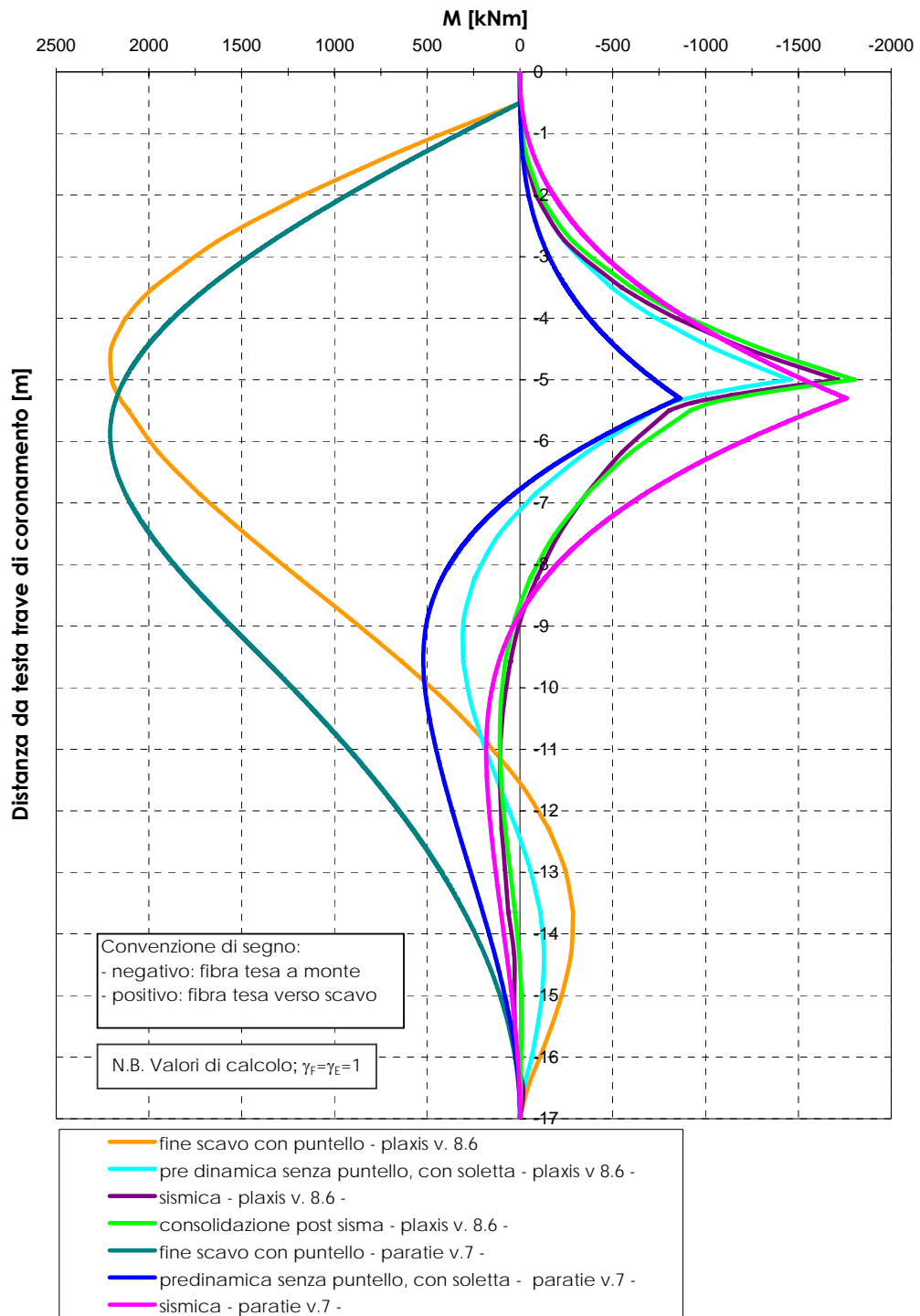


Figura 4.5a: Sezione 5.5m - A

**Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale Scavo 5.5m -
 Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)**

Andamento momenti flettenti nei setti di diaframma della paratia di
 dx nelle varie fasi (pari a quelli di analisi per 2.5m) - Caso 2 -

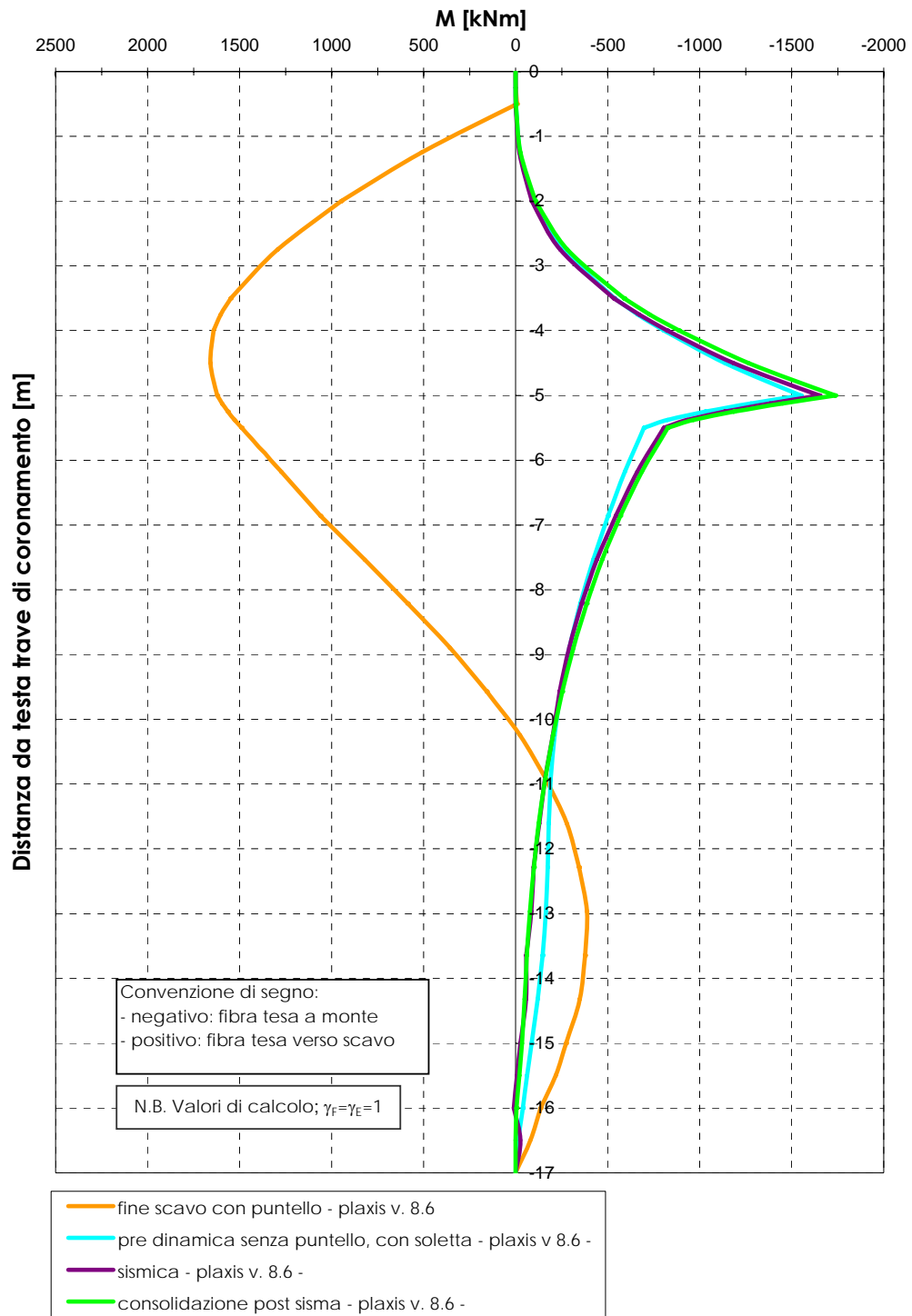


Figura 4.5b: Sezione 5.5m - A

Analisi PLAXIS e PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5.5m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Inviluppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di
 sx e di dx (pari a quelli di analisi per 2.5m) -Caso1 e Caso 2 -

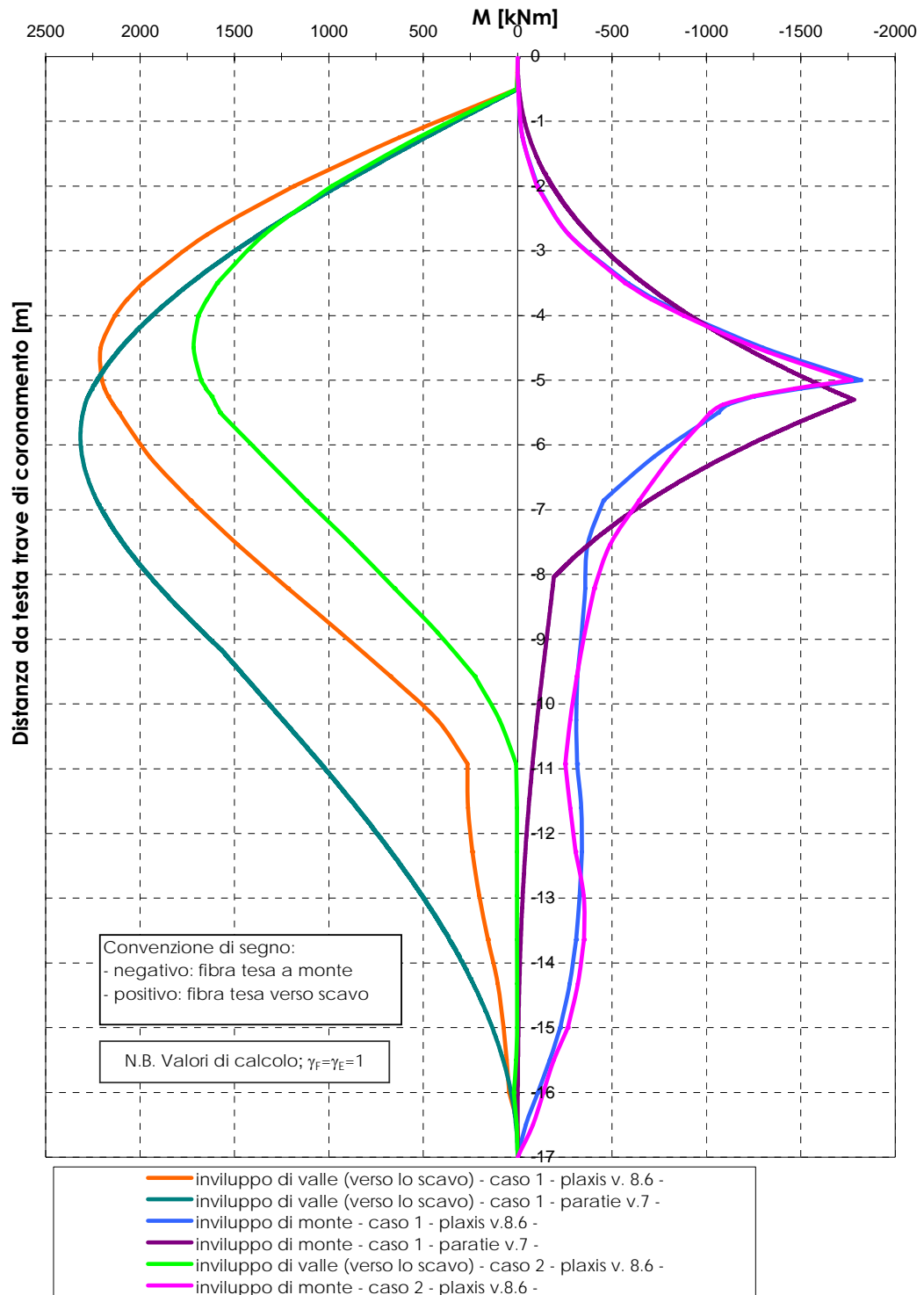


Figura 4.6: Sezione 5.5m - A

Analisi PLAXIS e PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5.5m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Inviluppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sx e di dx
 (pari a quelli di analisi per 2.5m) - Caso1 e Caso 2 -

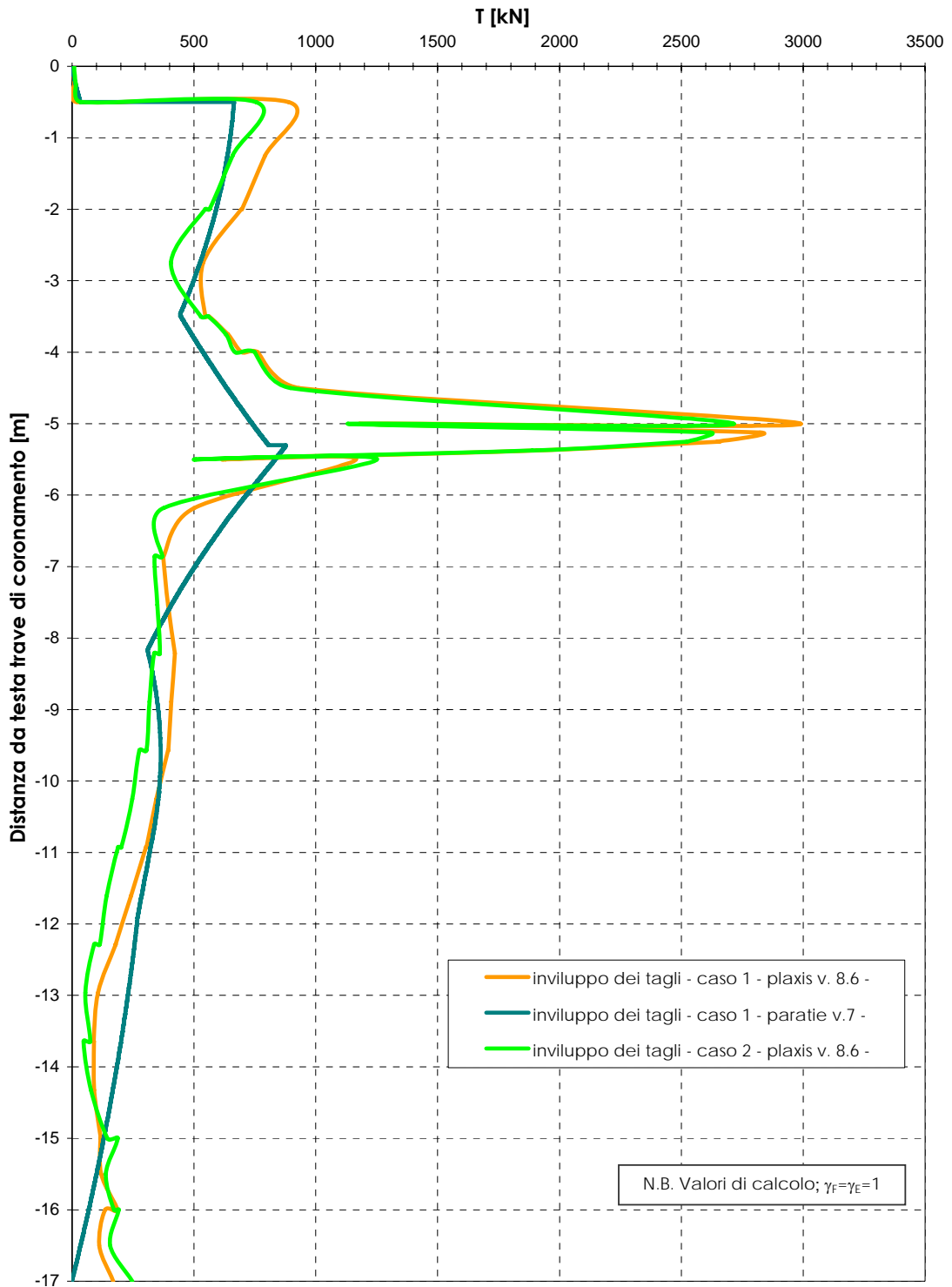


Figura 4.7: Sezione 5.5m - A

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5.5m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Andamento degli spostamenti orizzontali nei setti di diaframma
 della paratia di sinistra - Caso 1 -

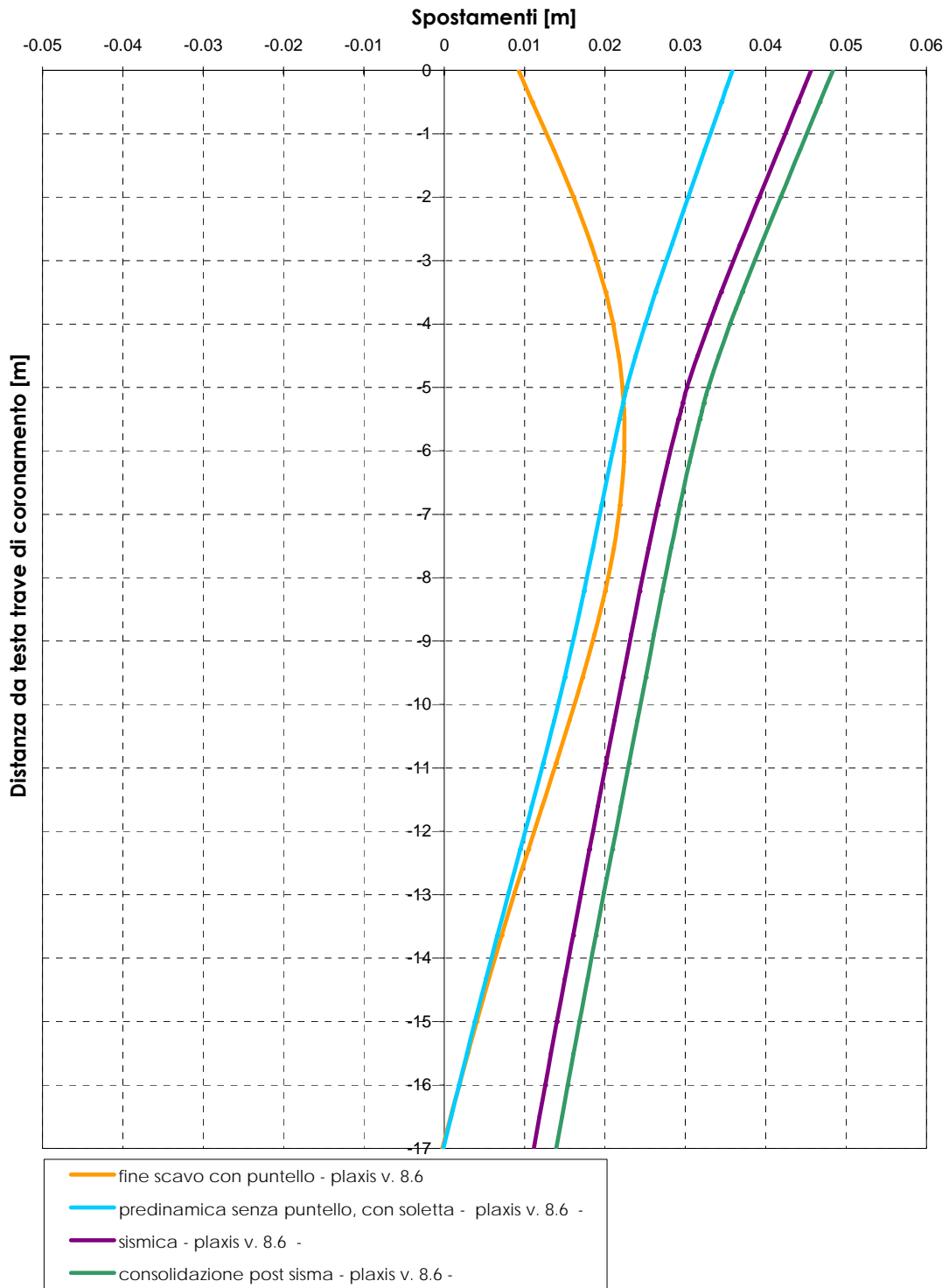


Figura 4.8a: Sezione 5.5m - A

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5.5m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
Andamento degli spostamenti orizzontali nei setti di diaframma
della paratia di sinistra - Caso 2 -

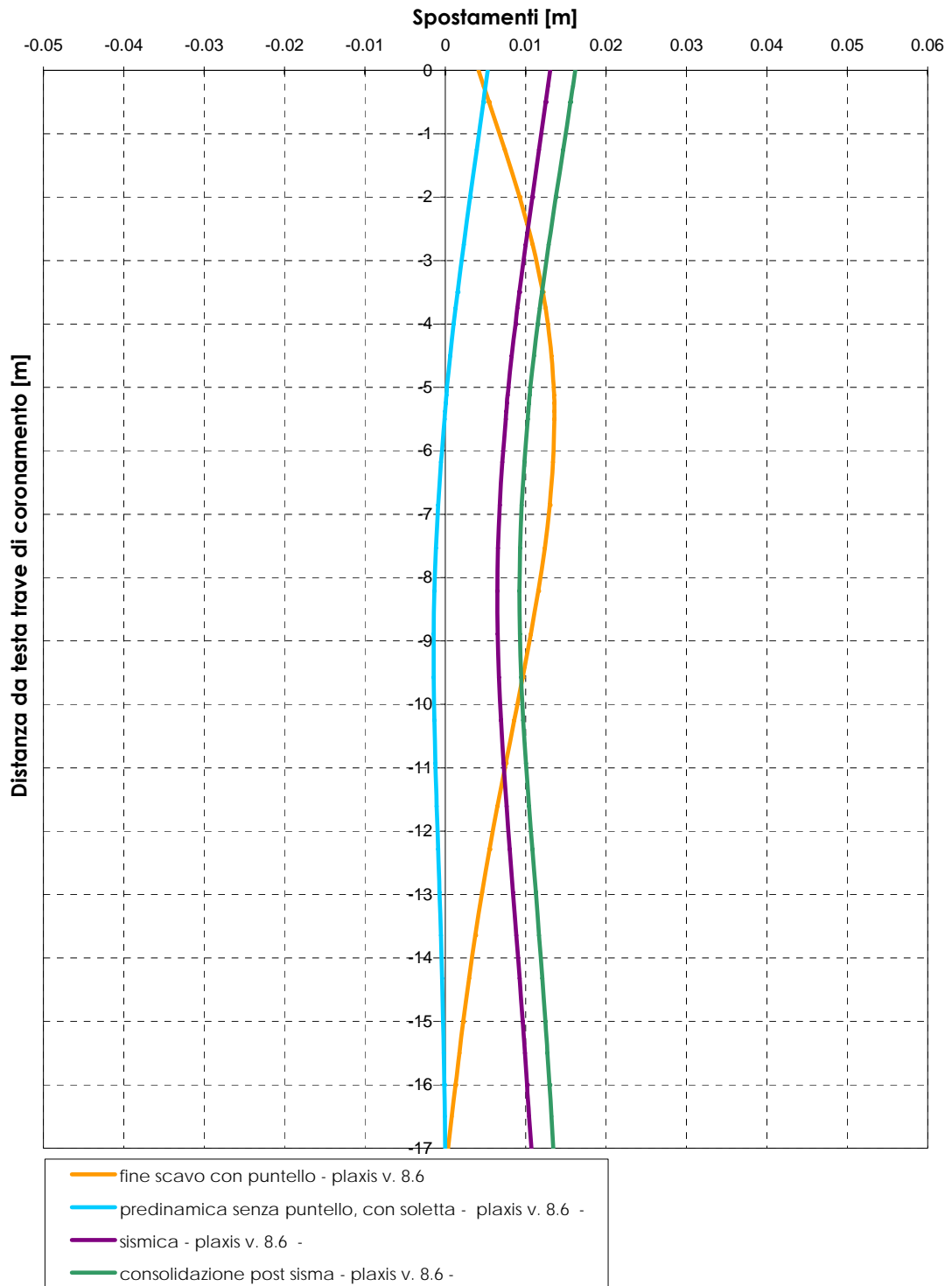


Figura 4.8b: Sezione 5.5m - A

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5.5m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Andamento degli spostamenti orizzontali nei setti di diaframma
 della paratia di destra - Caso 1 -

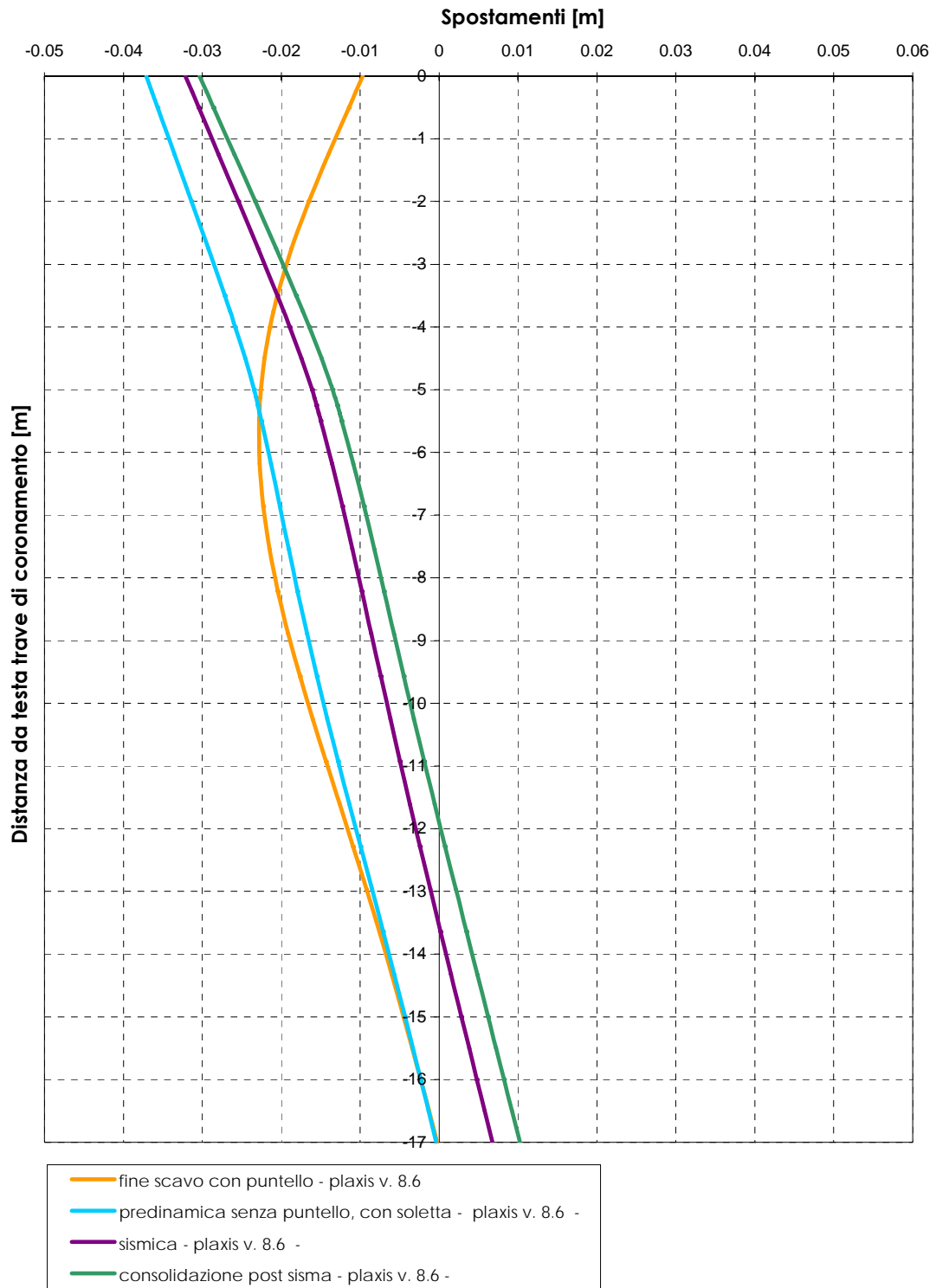


Figura 4.9a: Sezione 5.5m - A

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5.5m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Andamento degli spostamenti orizzontali nei setti di diaframma
 della paratia di destra - Caso 2 -

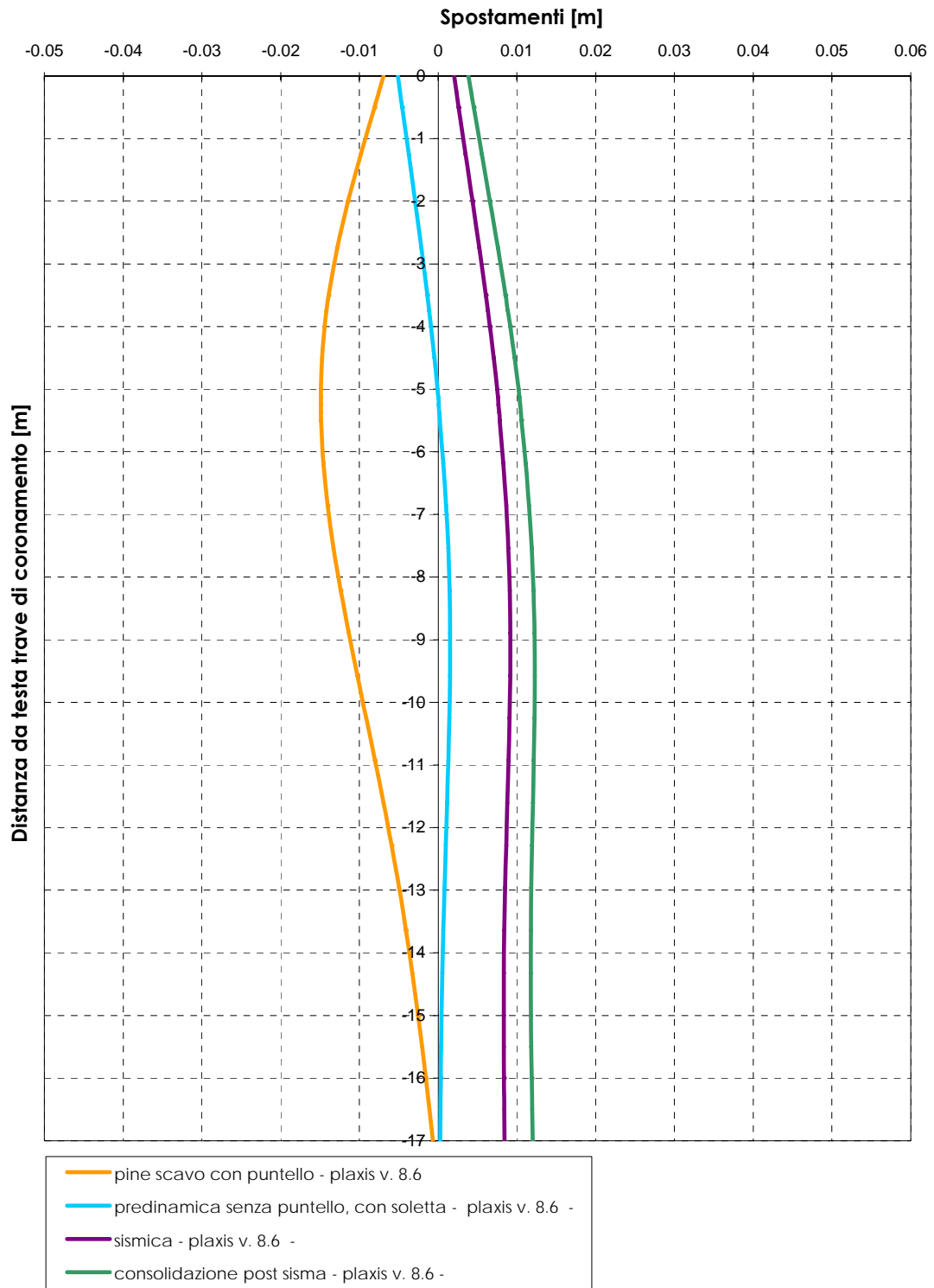


Figura 4.9b: Sezione 5.5m - A

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5.5m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
(utilizzabile anche per l'Approccio 1 Combinazione 1 (A1+M1+R1))
Andamento del momento flettente nella soletta di base - Caso 1 -

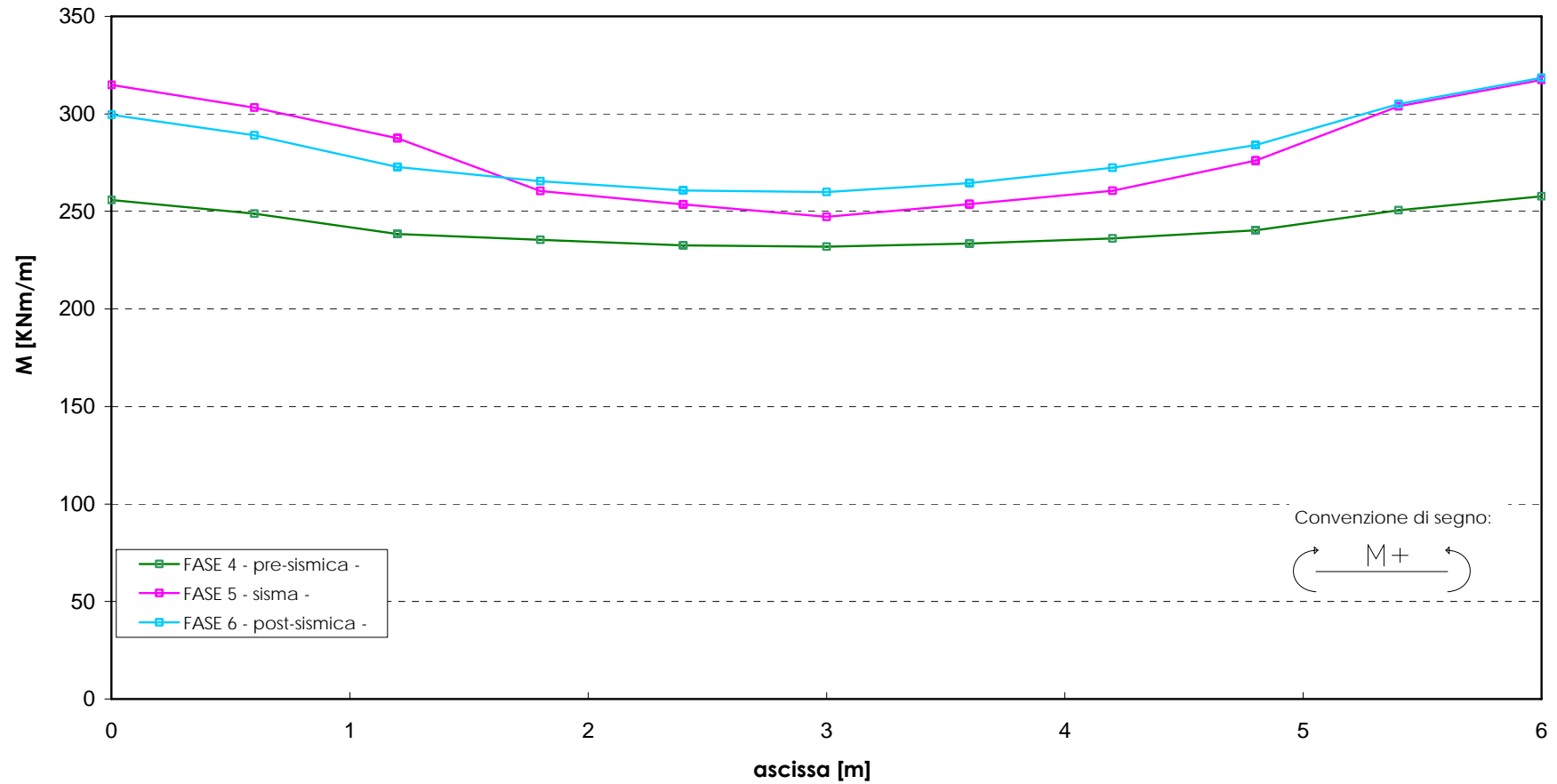


Figura 4.10a: Sezione 5.5m - A

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5.5m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
(utilizzabile anche per l'Approccio 1 Combinazione 1 (A1+M1+R1))
Andamento del momento flettente nella soletta di base - Caso 2 -

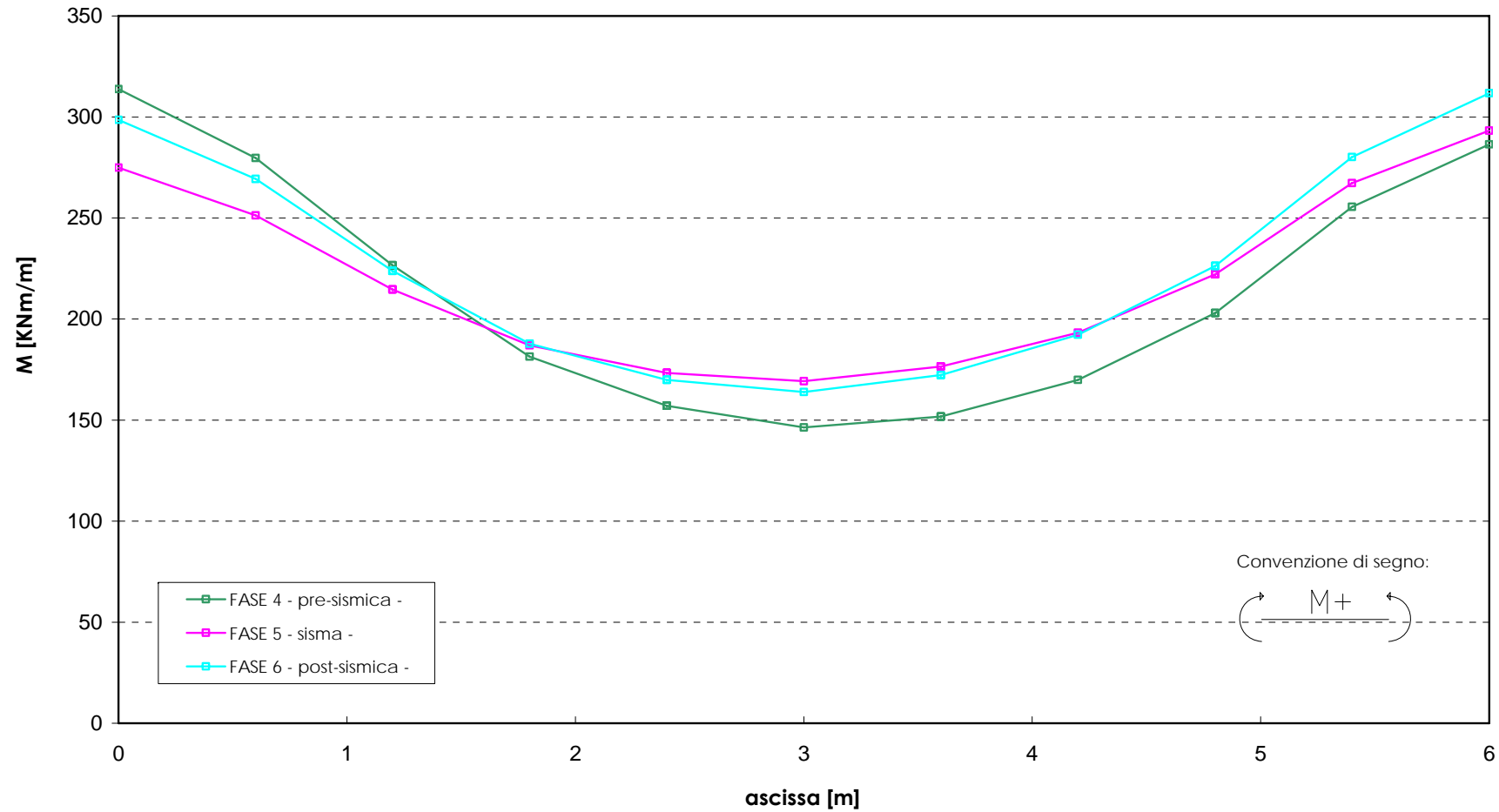


Figura 4.10b: Sezione 5.5m - A

**Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5.5m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)**
Azione assiale nella soletta di base - Caso 1 -

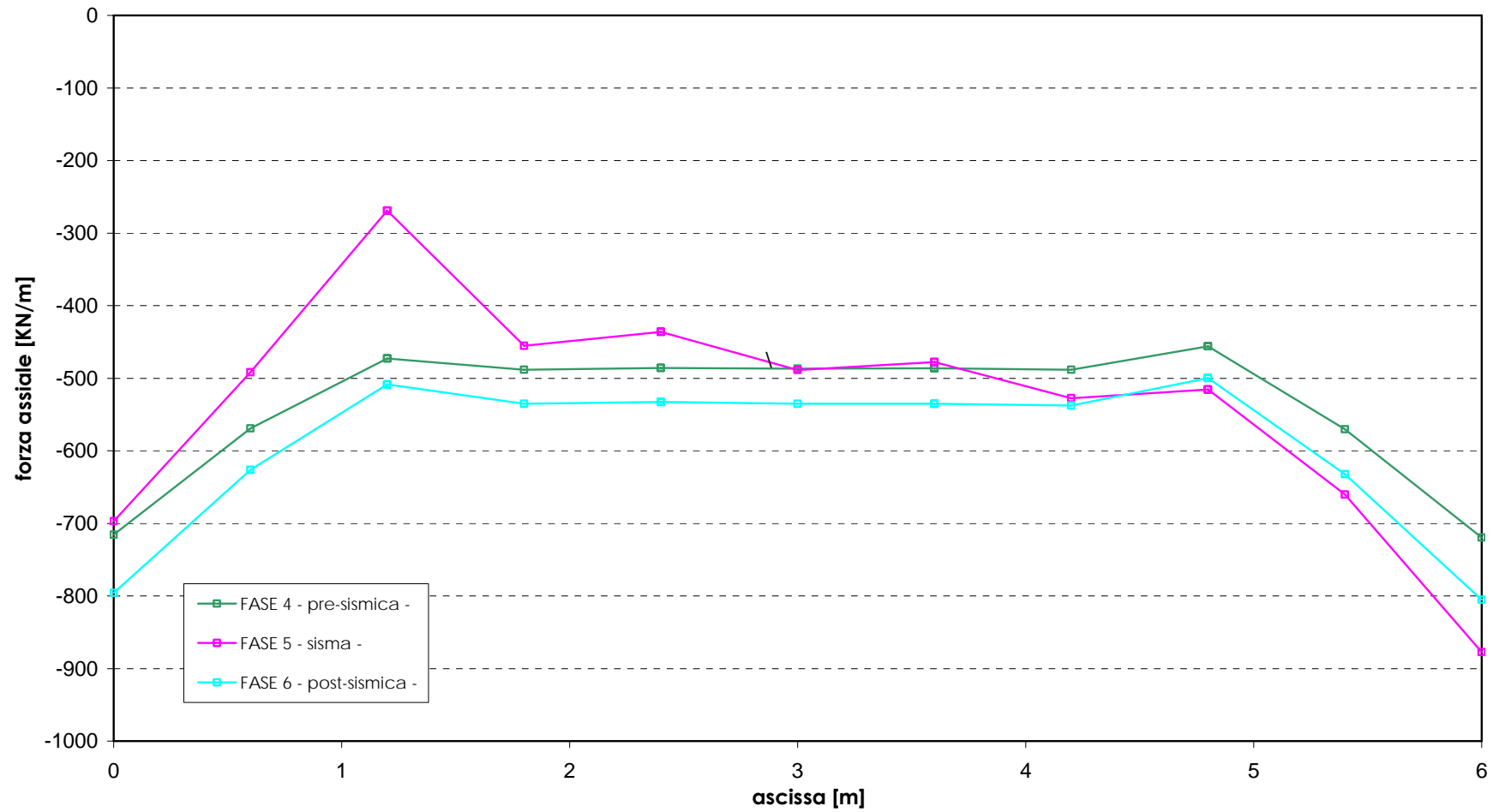


Figura 4.11a: Sezione 5.5m - A

**Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5.5m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)**
Azione assiale nella soletta di base - Caso 2 -

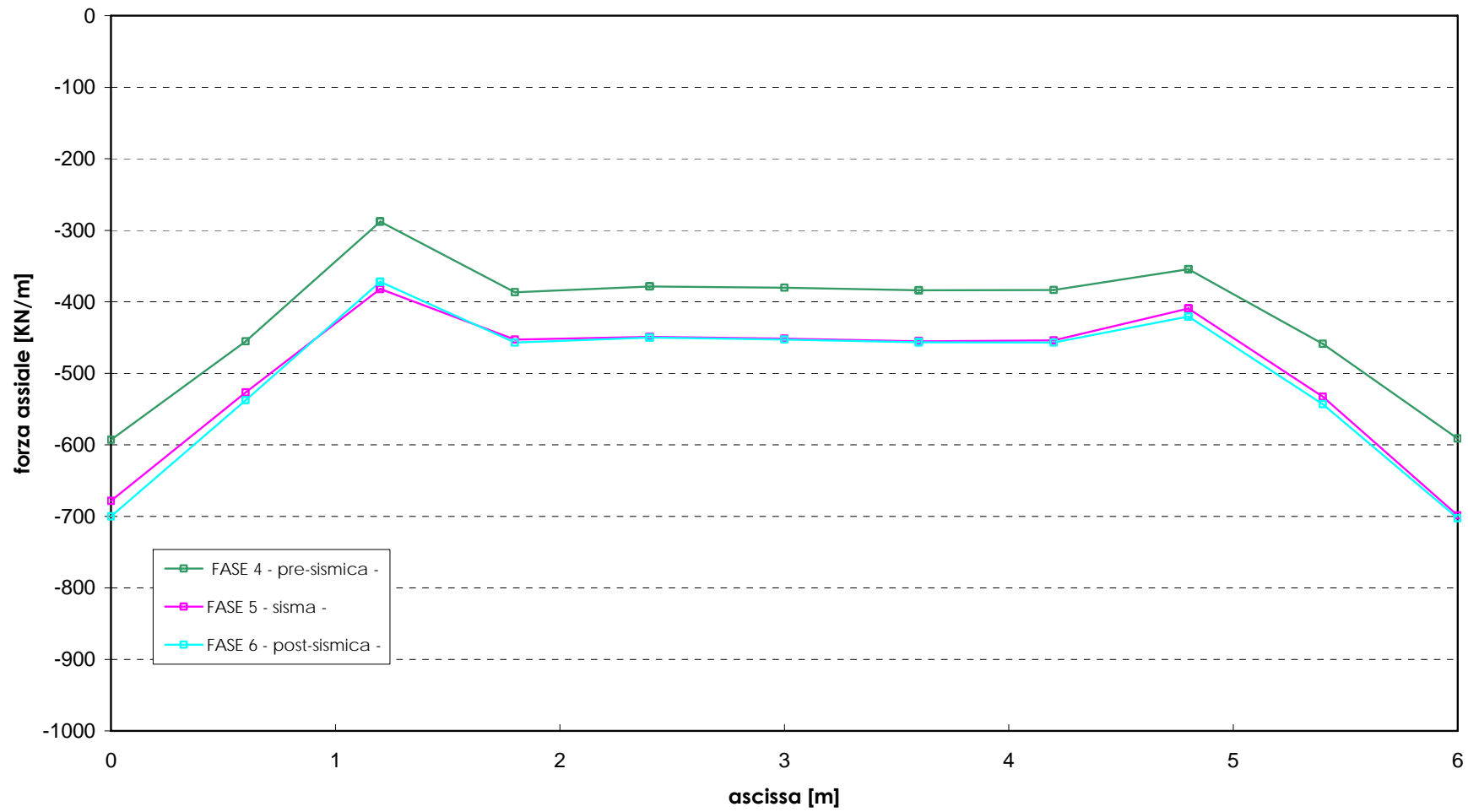


Figura 4.11b: Sezione 5.5m - A

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5.5m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
Andamento dell'accelerazione orizzontale in testa alla paratia nella fase sismica - Caso 1 -

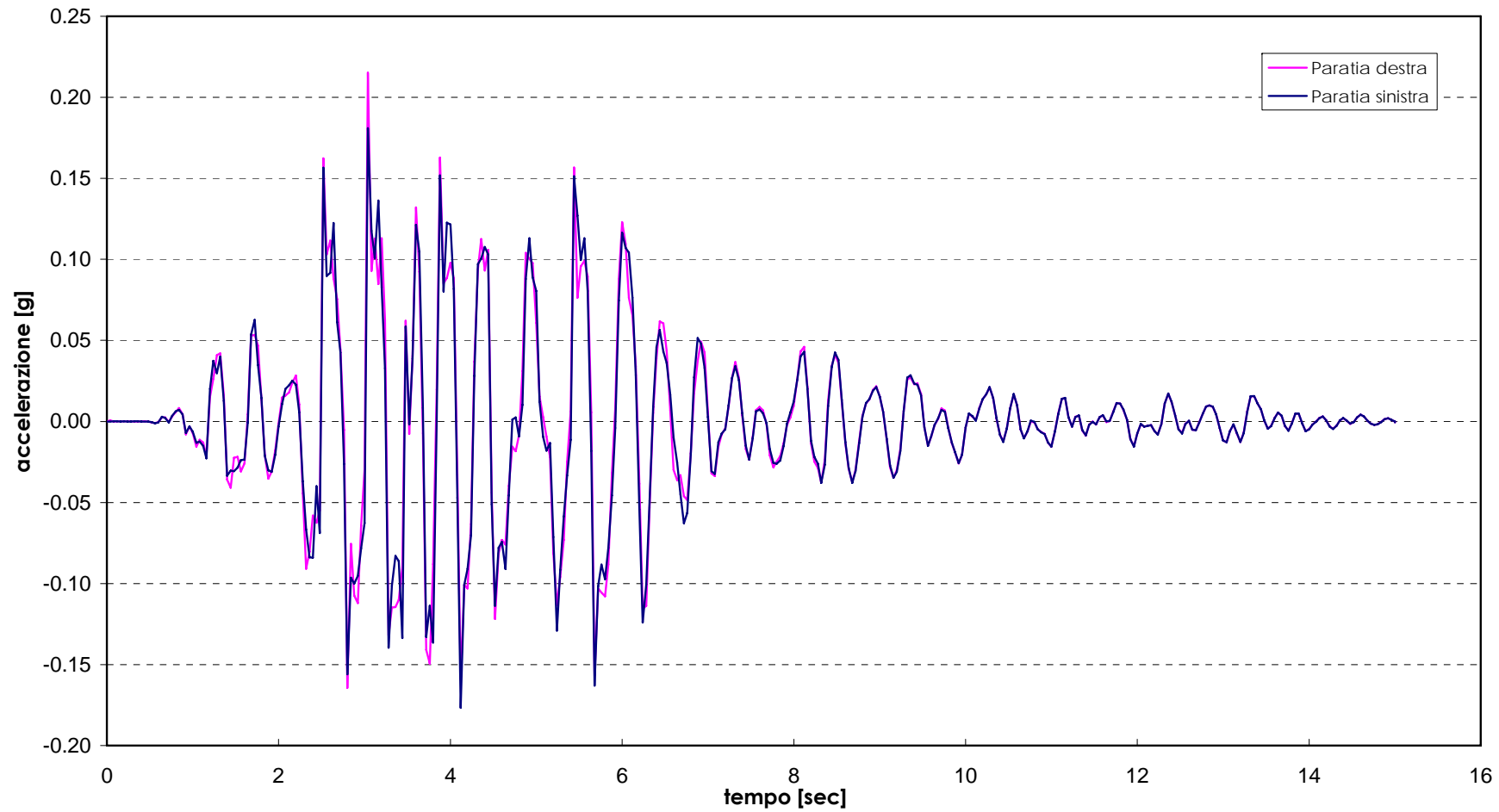


Figura 4.12: Sezione 5.5m - A

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5.5m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
Andamento dello spostamento orizzontale in testa alla paratia nella fase sismica - Caso 1 -

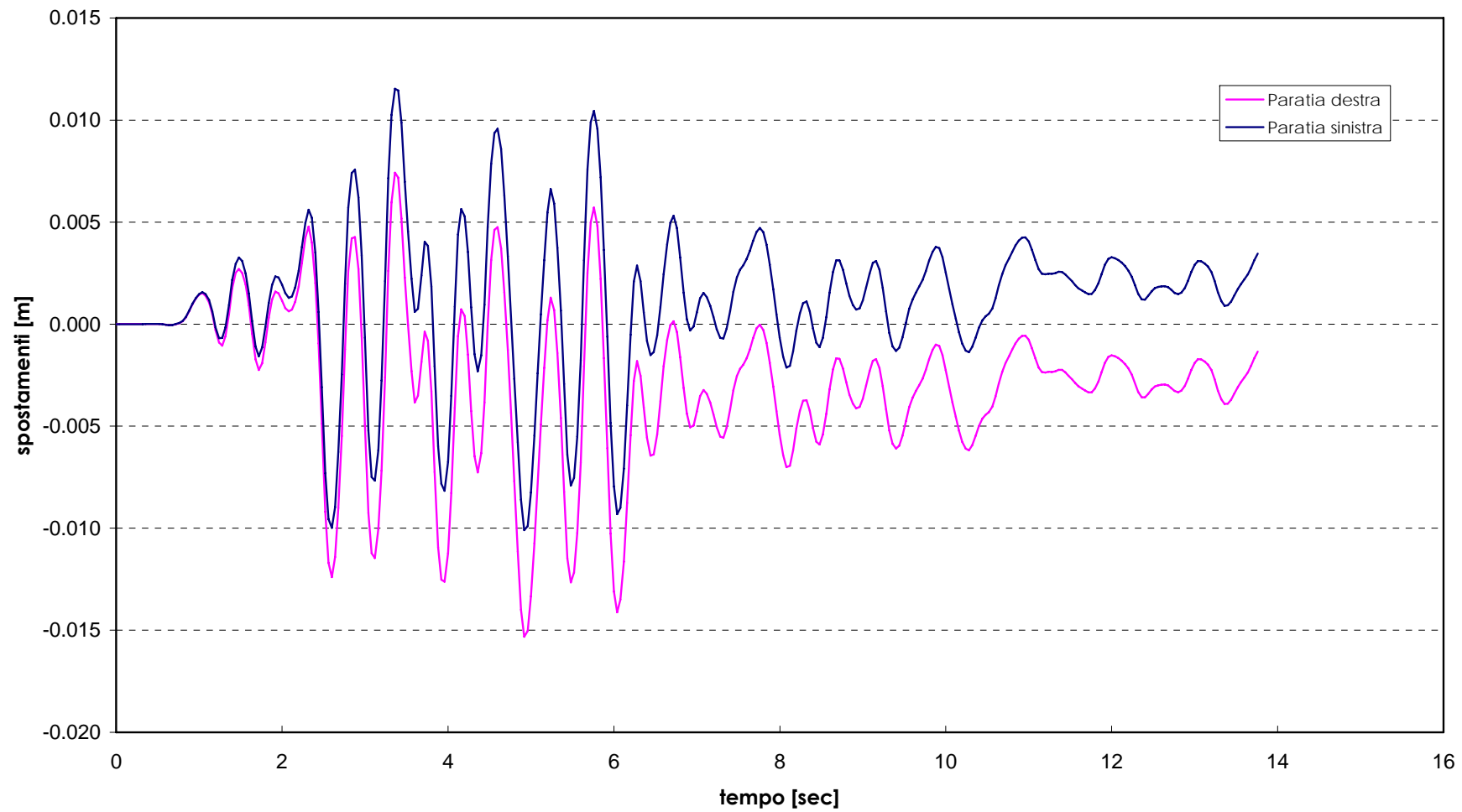


Figura 4.13: Sezione 5.5m - A

Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpodereale Scavo 5.5m
Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Inviluppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di
 sx e di dx (pari a quelli di analisi per 2.5m)

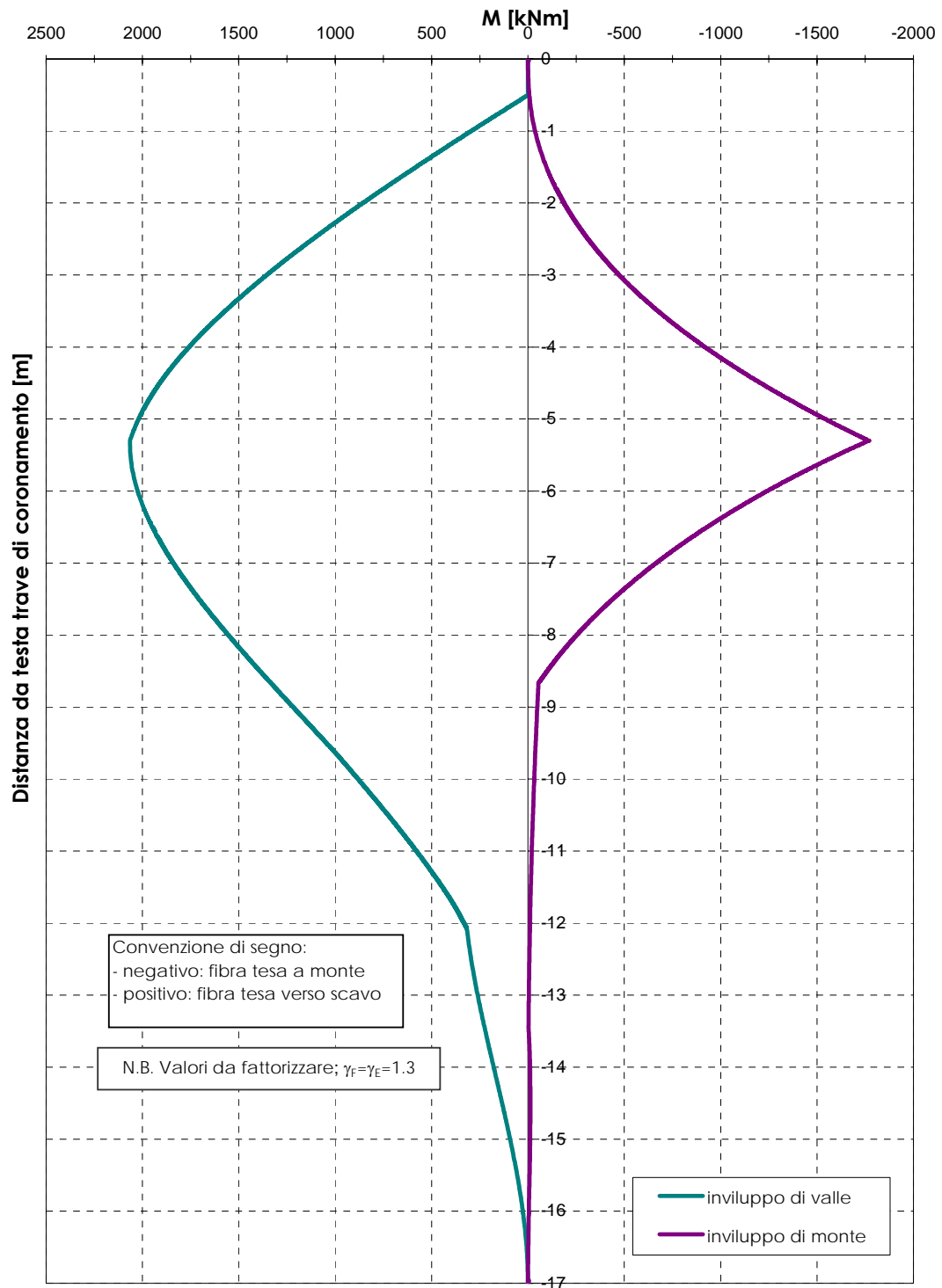


Figura 4.14a: Sezione 5.5m - A

**Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale Scavo 5.5m
 Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)**

Inviluppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma della paratia di sx (pari a quelli di analisi per 2.5m)

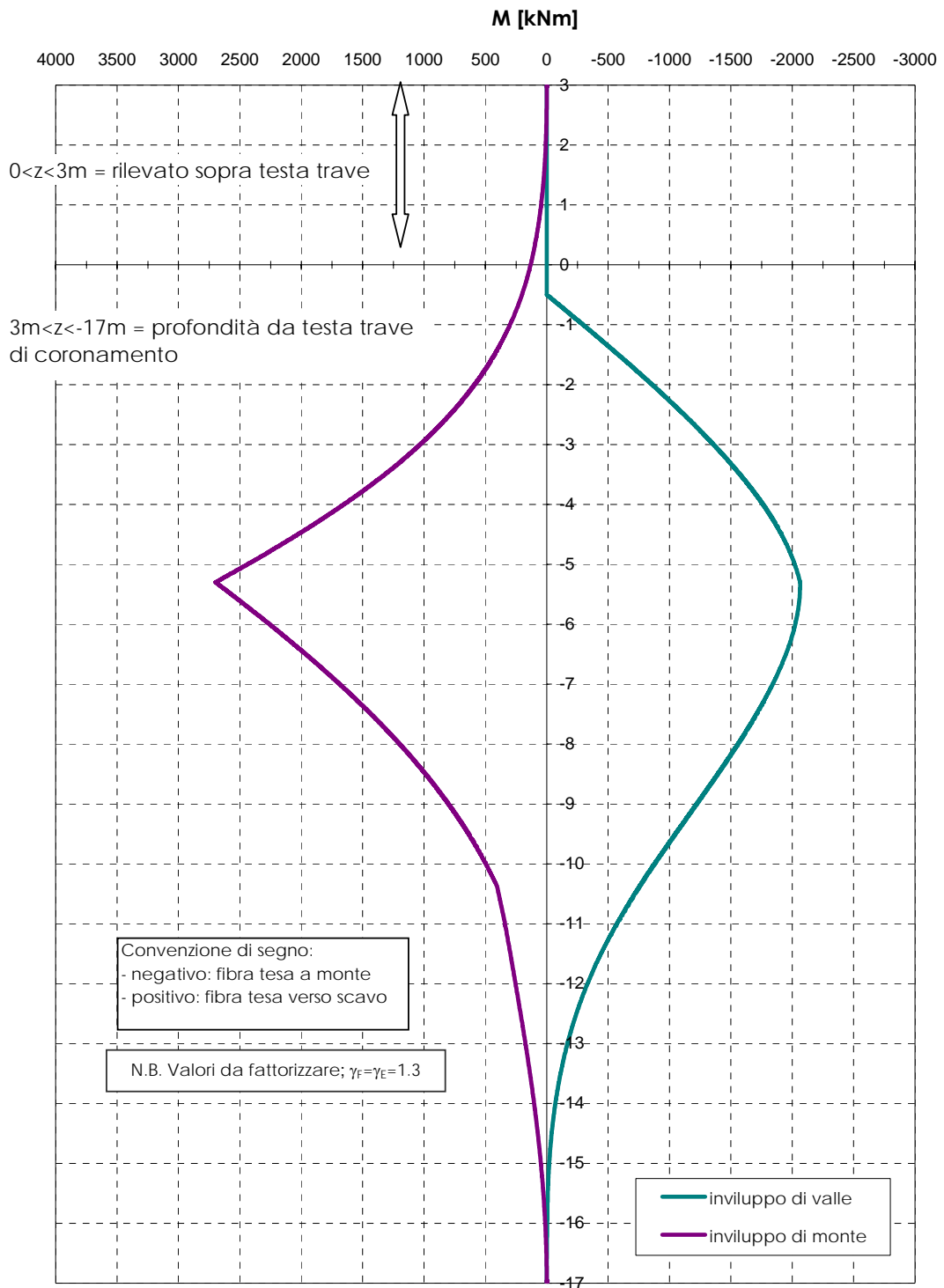


Figura 4.14b: Sezione 5.5m - B

Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpodereale Scavo 5.5m
Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
Inviluppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sx e di dx
(pari a quelli di analisi per 2.5m)

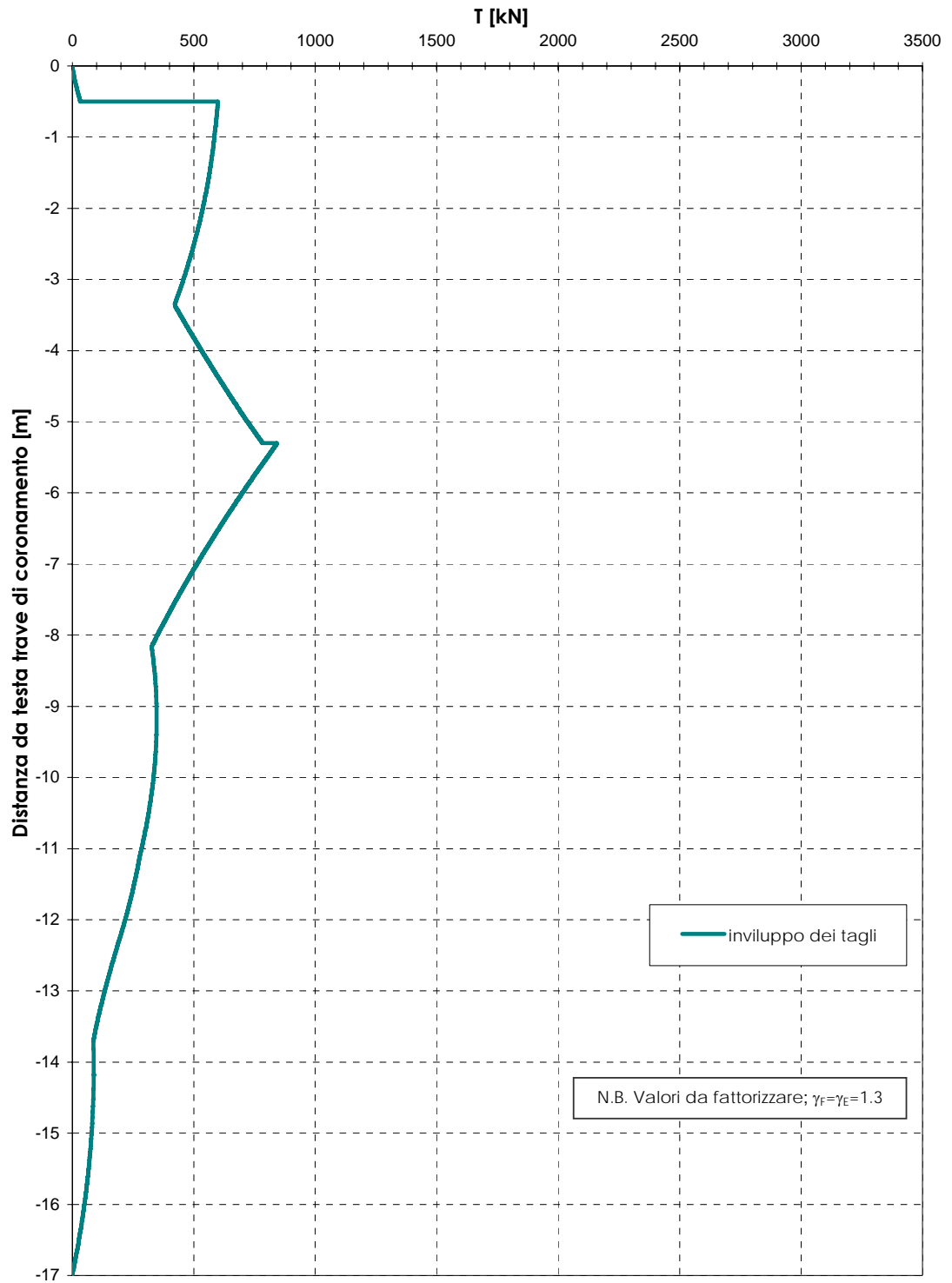


Figura 4.15a: Sezione 5.5m – A

Analisi PARATIE - Opera di sostegno strada interpodereale Scavo 5.5m
Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Involuppo dei tagli nei setti di diaframma della paratia di sx (pari a quelli di analisi per 2.5m)

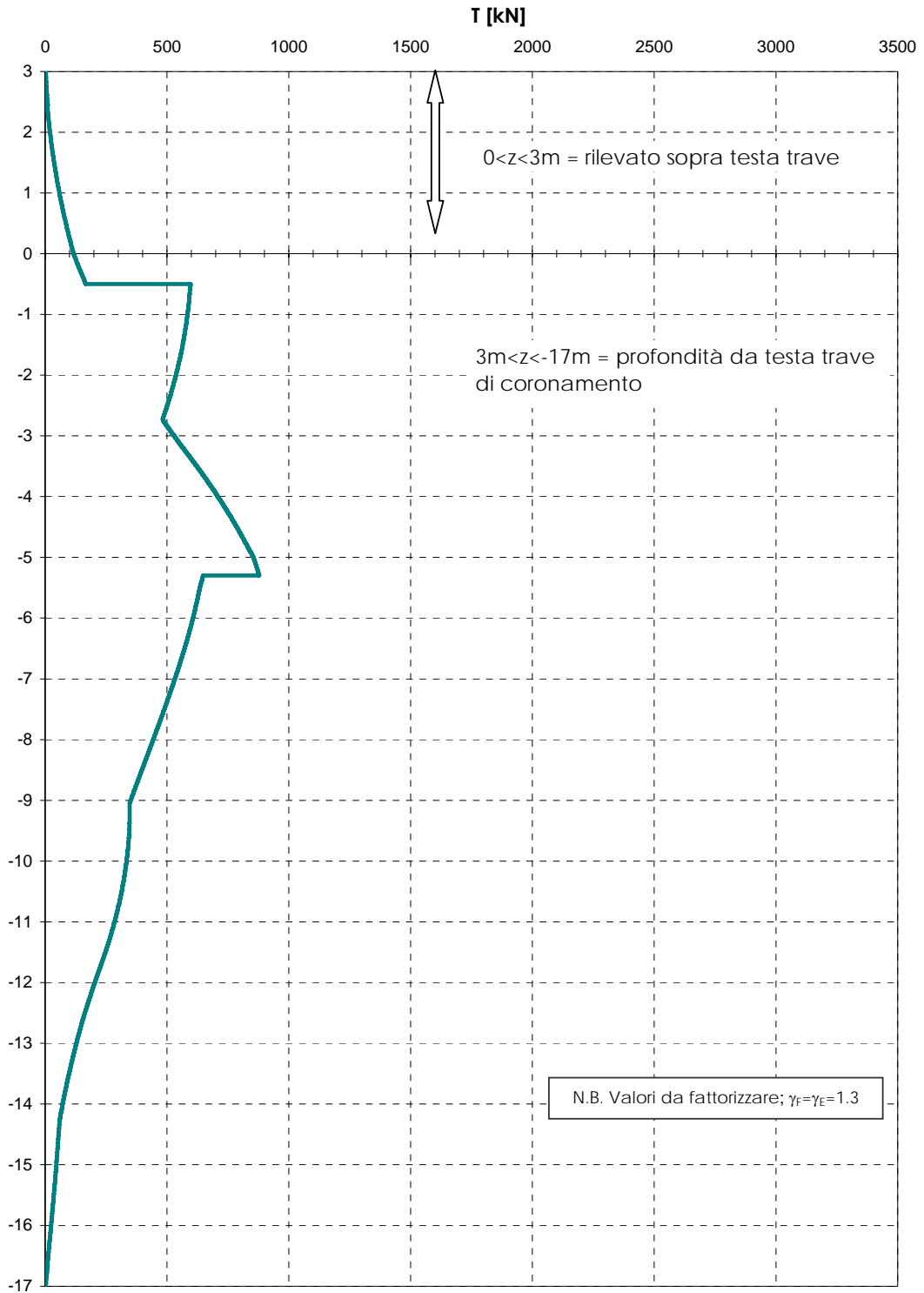


Figura 4.15b: Sezione 5.5m – B

Analisi con PARATIE - Opera di sostegno strada interpodereale
Scavo 5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di
 sx e di dx (pari a quelli di analisi per 2.5m)

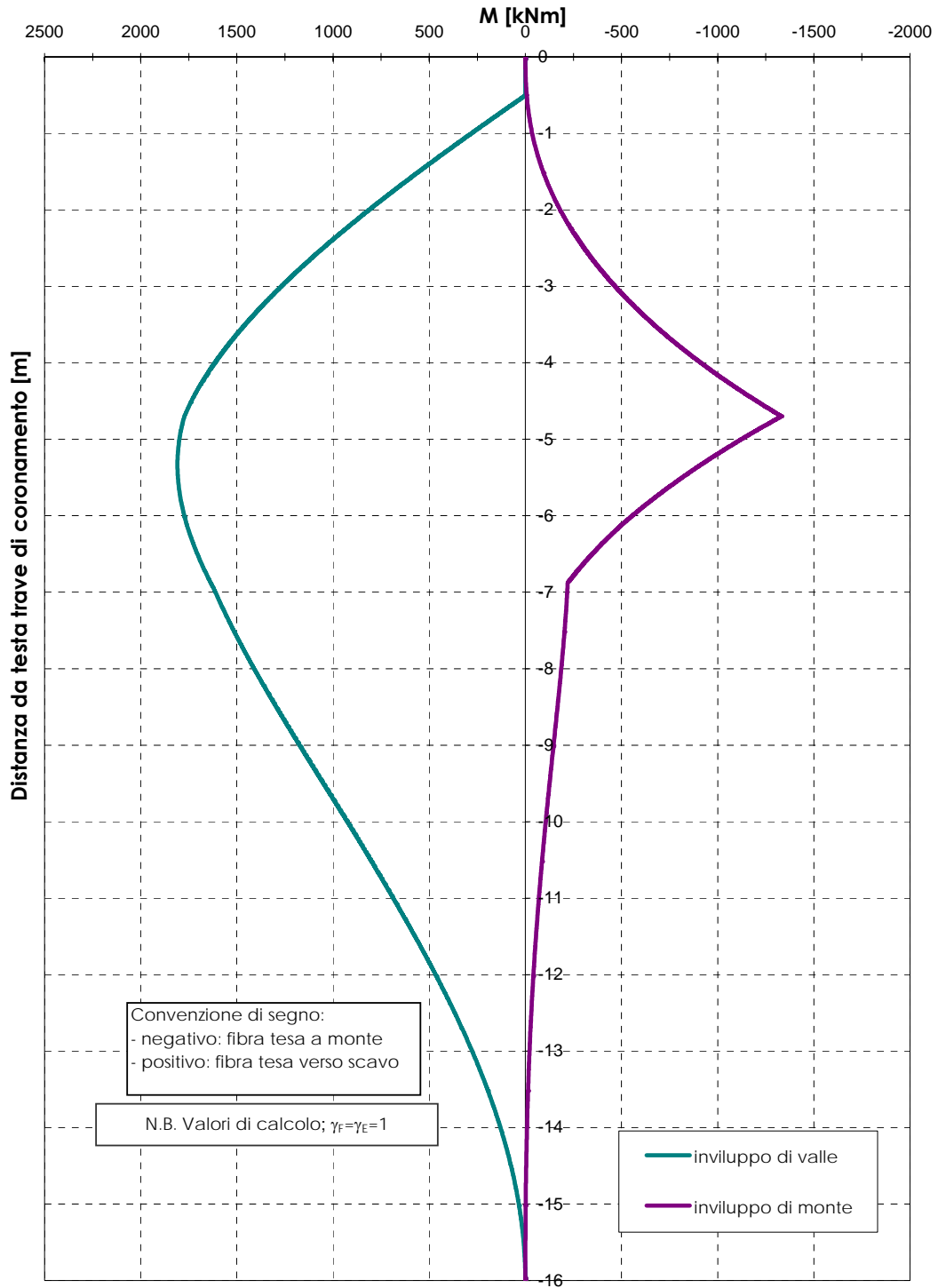


Figura 4.16

Analisi con PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
Inviluppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sx e di dx
(pari a quelli di analisi per 2.5m)

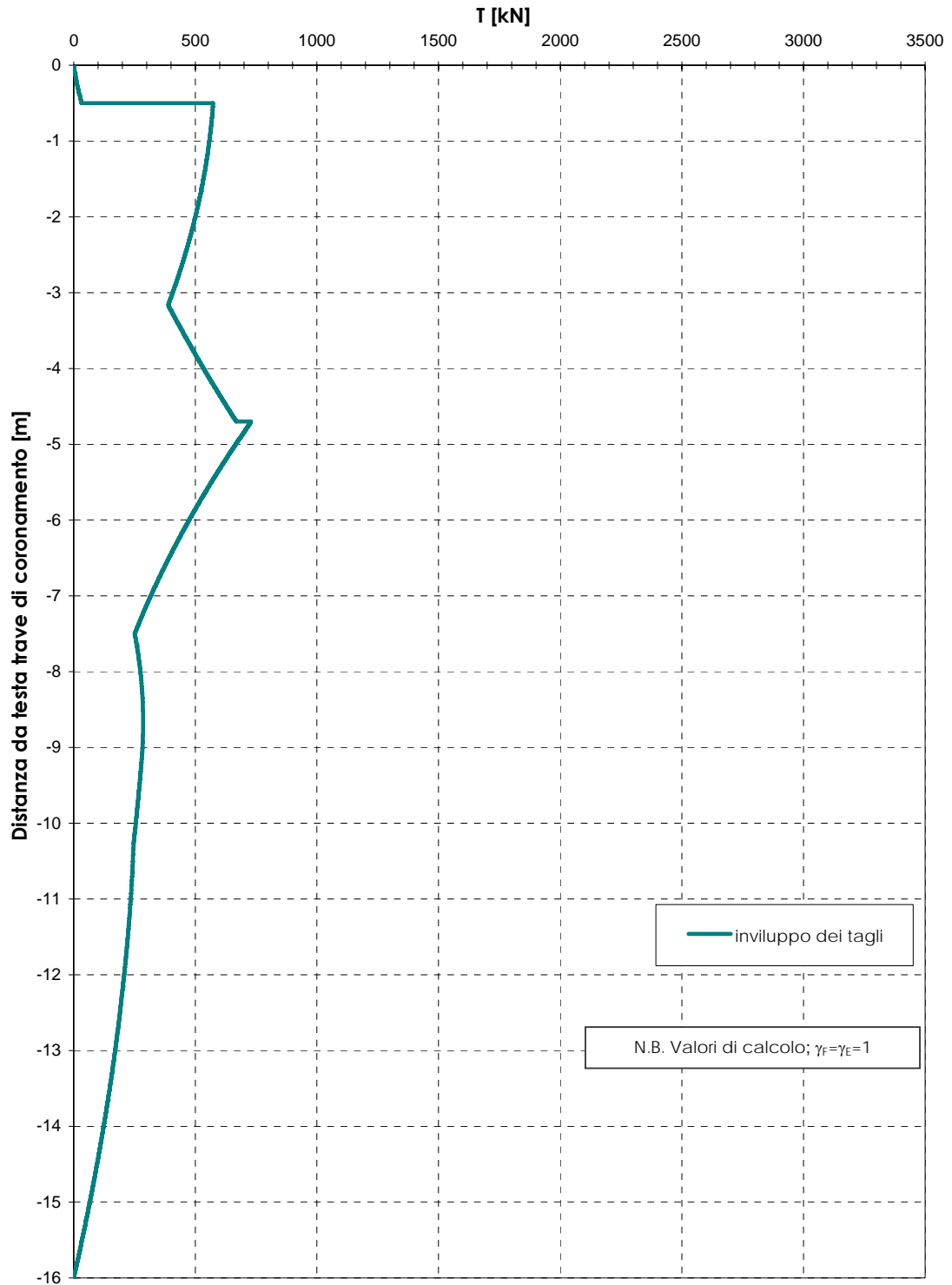


Figura 4.17

Analisi con PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5 m - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Inviluppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di
 sx e di dx (pari a quelli di analisi per 2.5m)

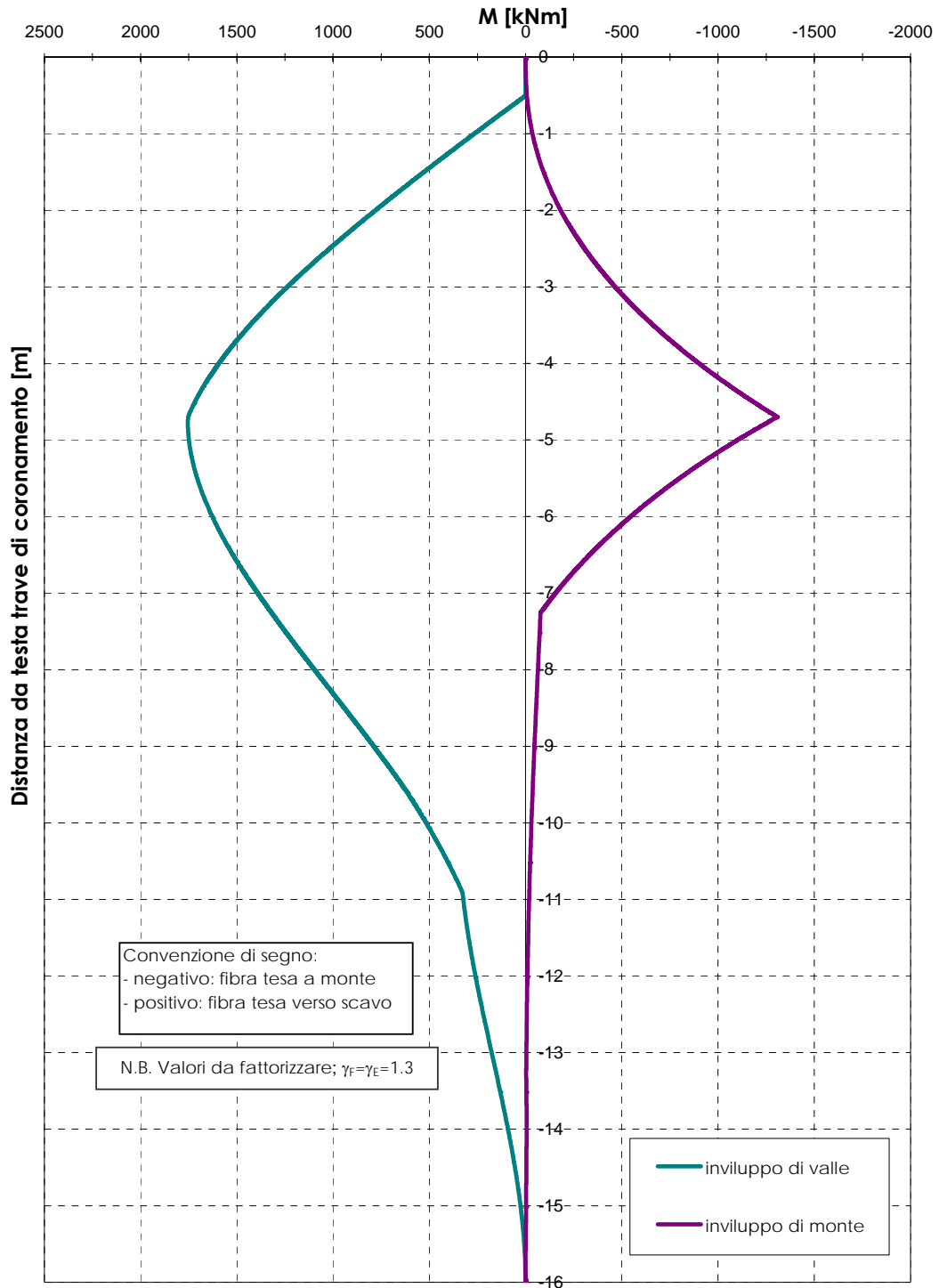


Figura 4.18

Analisi con PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 5 m - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
Inviluppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sx e di dx
(pari a quelli di analisi per 2.5m)

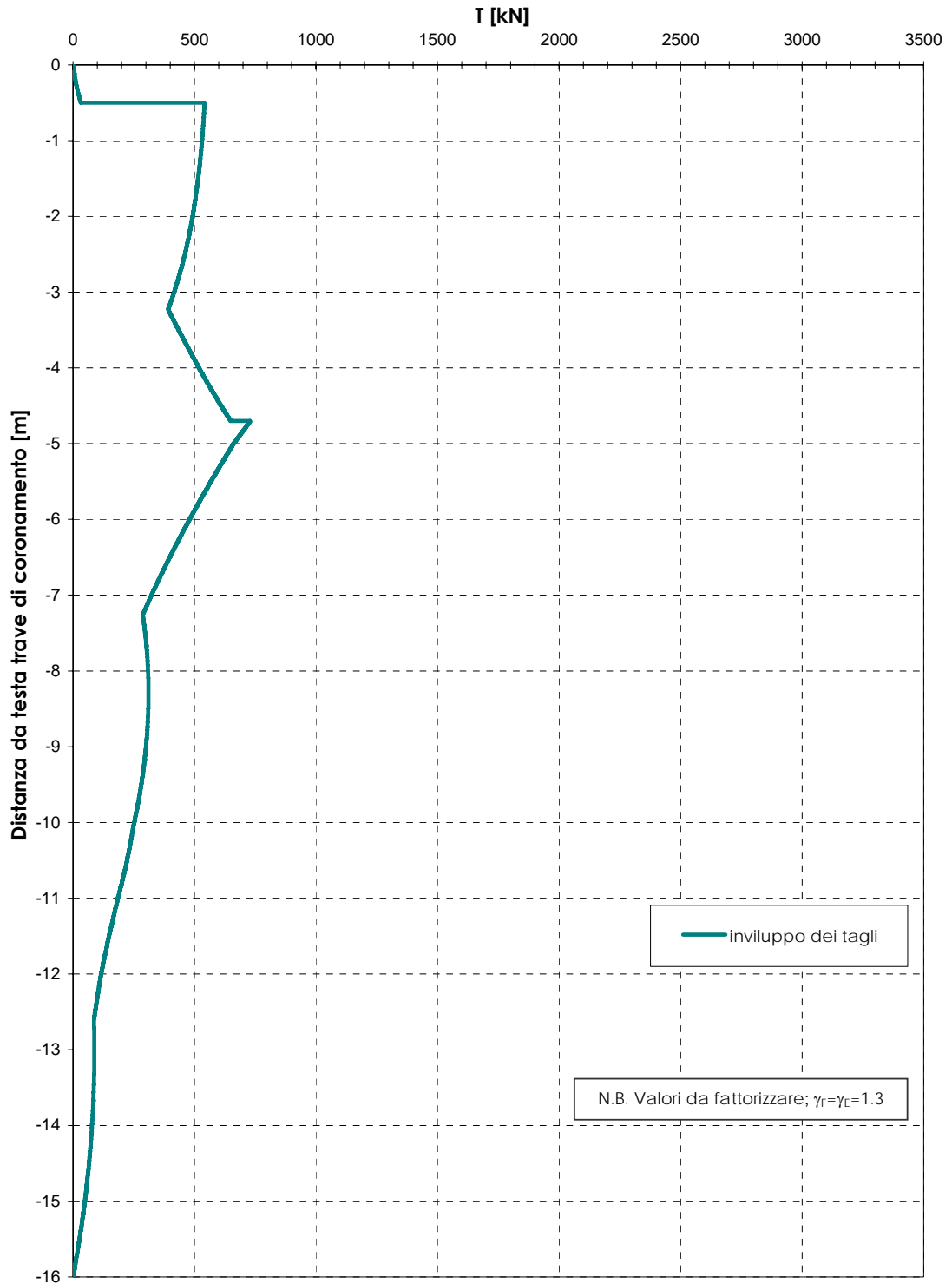


Figura 4.19

Analisi con PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 4.3 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Inviluppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di
 sx e di dx (pari a quelli di analisi per 2.5m)

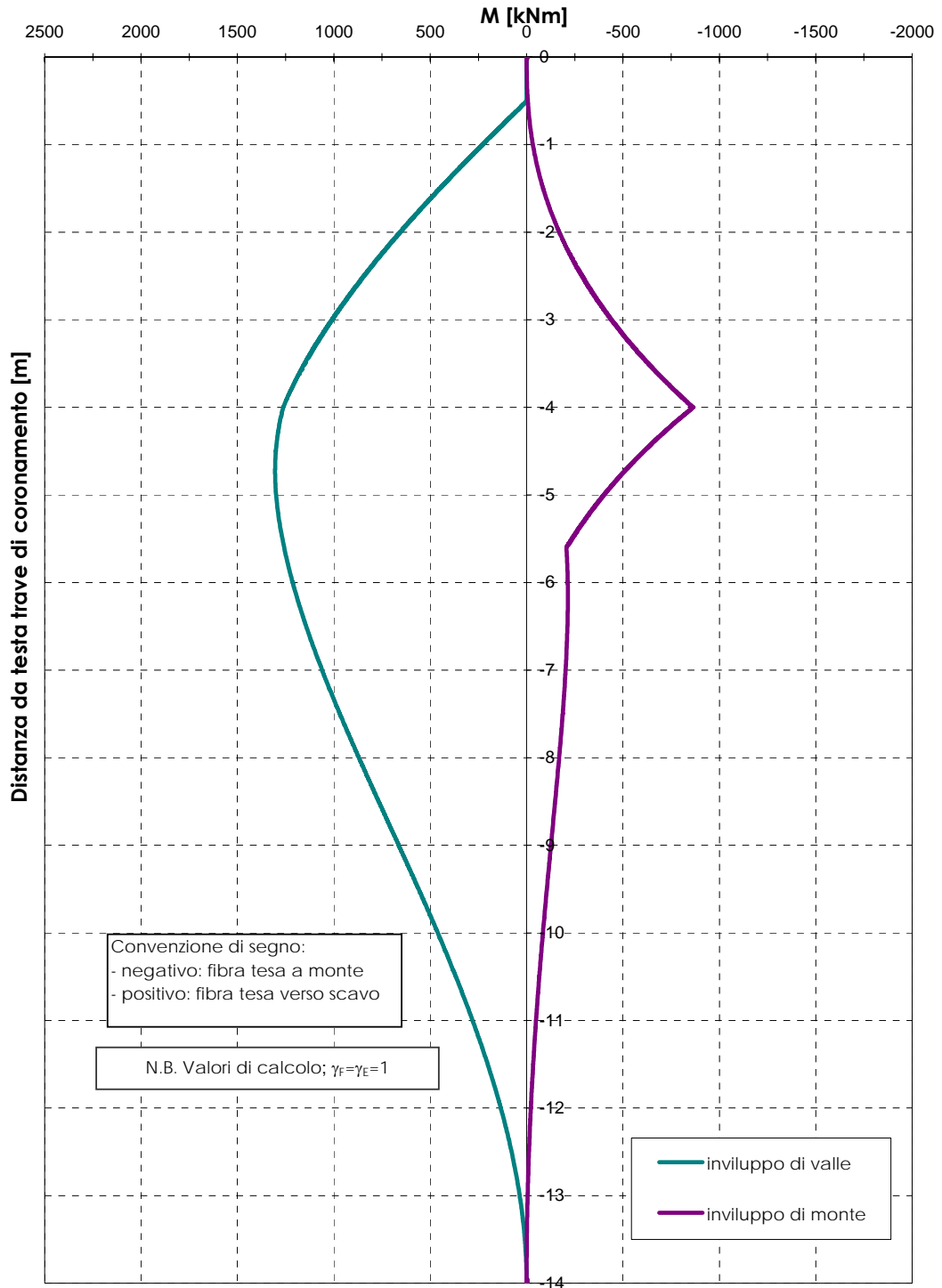


Figura 4.20

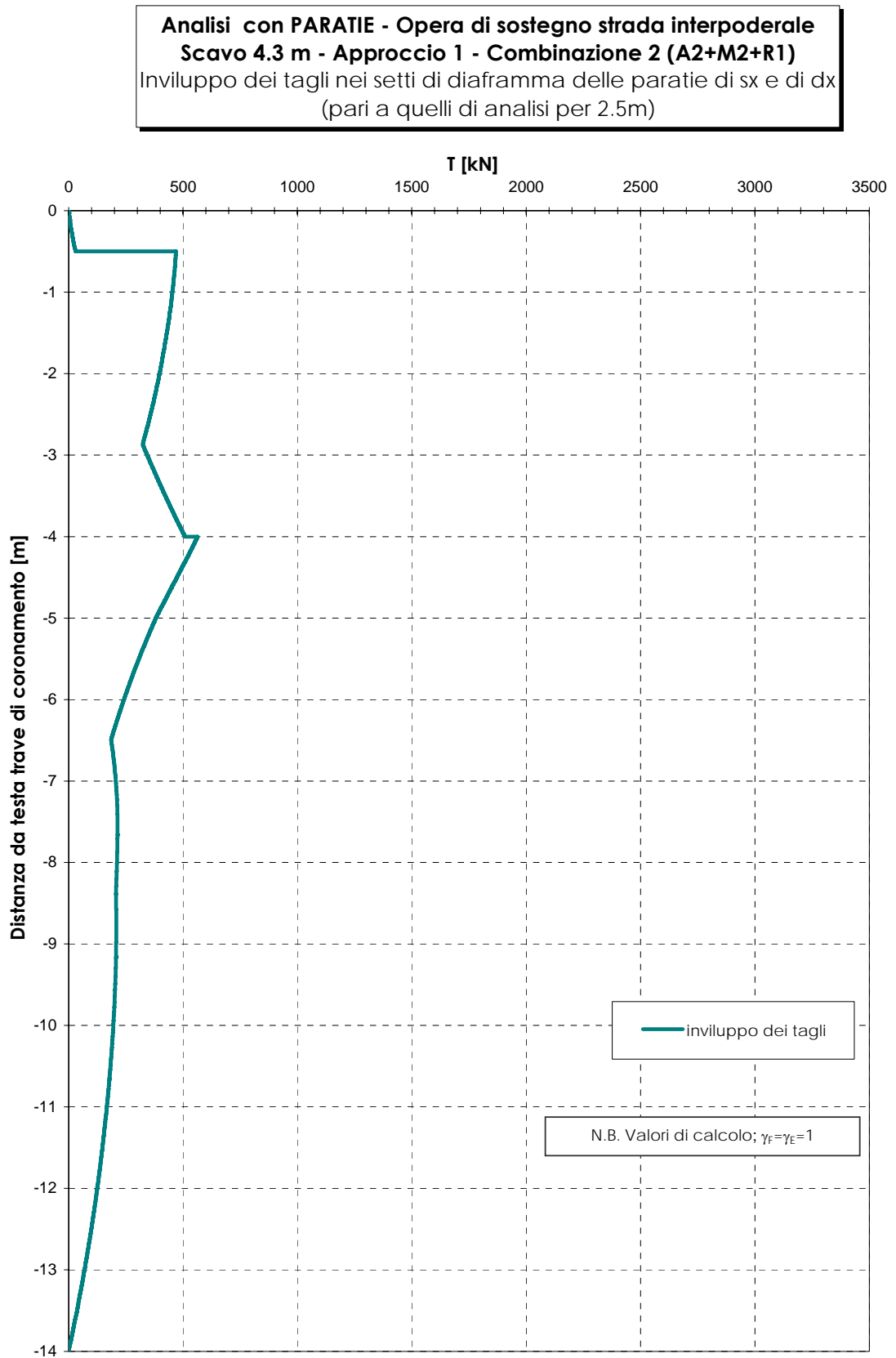


Figura 4.21

Analisi con PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 4.3 m - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di
 sx e di dx (pari a quelli di analisi per 2.5m)

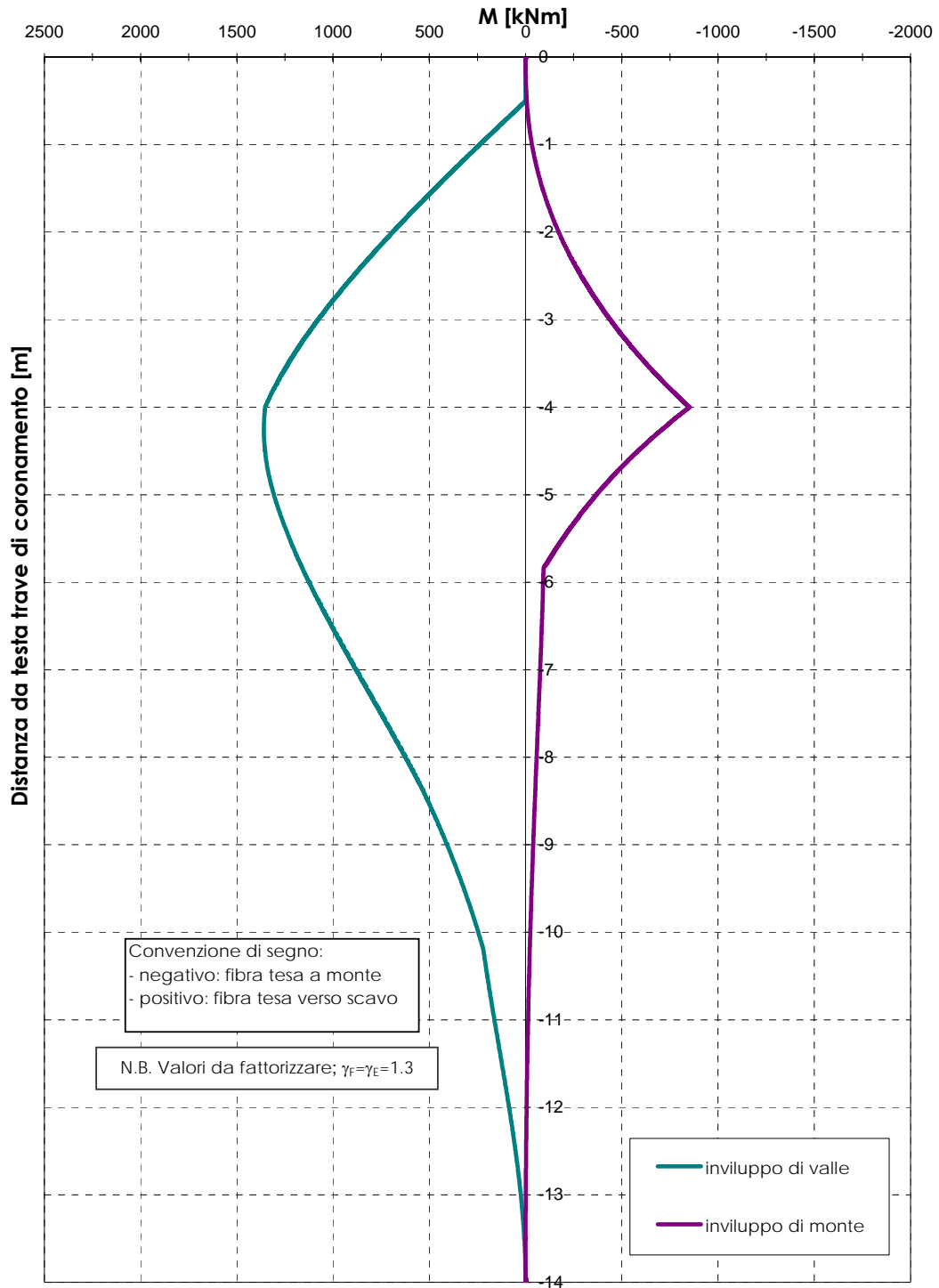


Figura 4.22

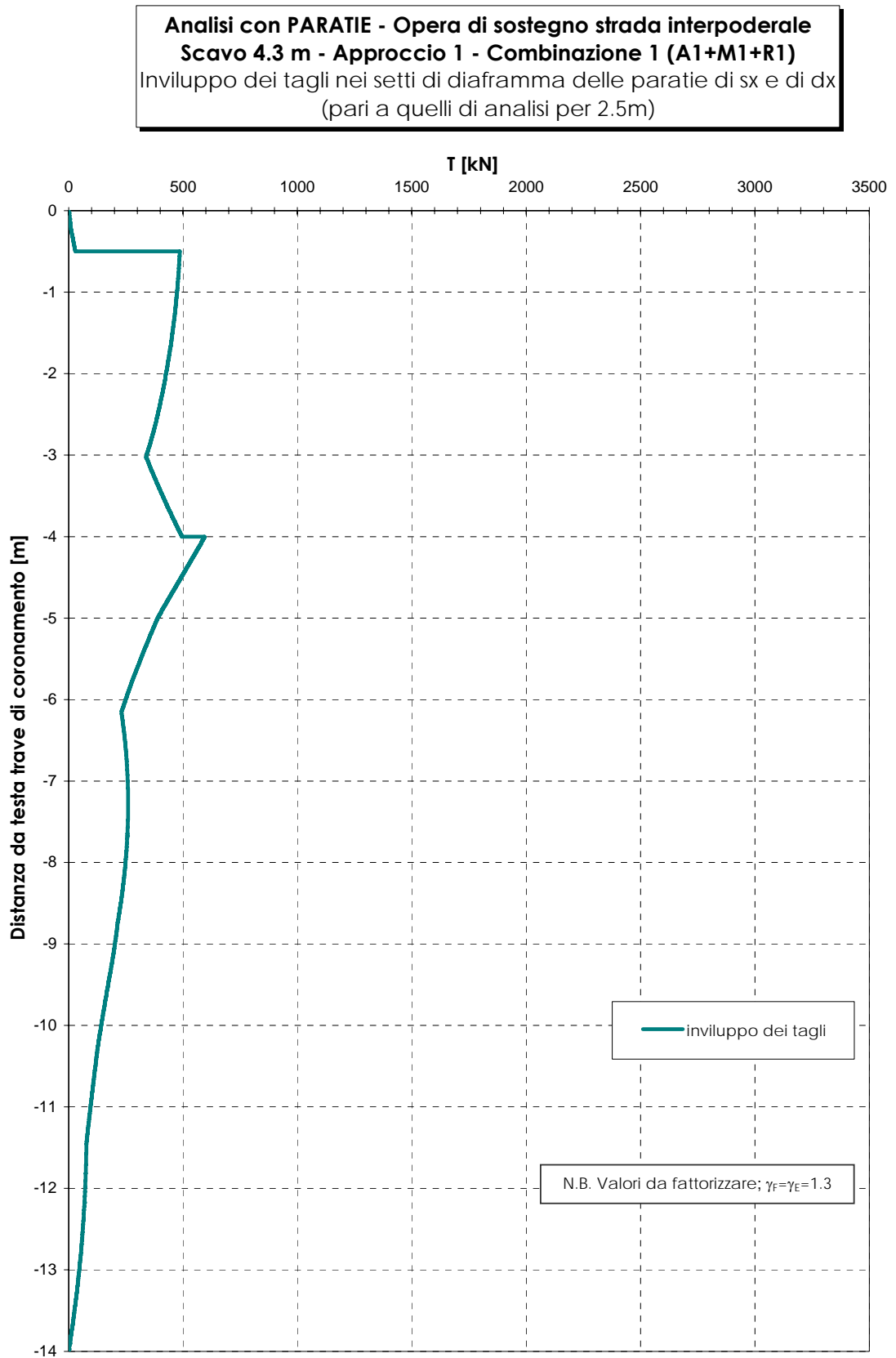


Figura 4.23

Analisi con PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 3 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di
 sx e di dx (pari a quelli di analisi per 2.5m)

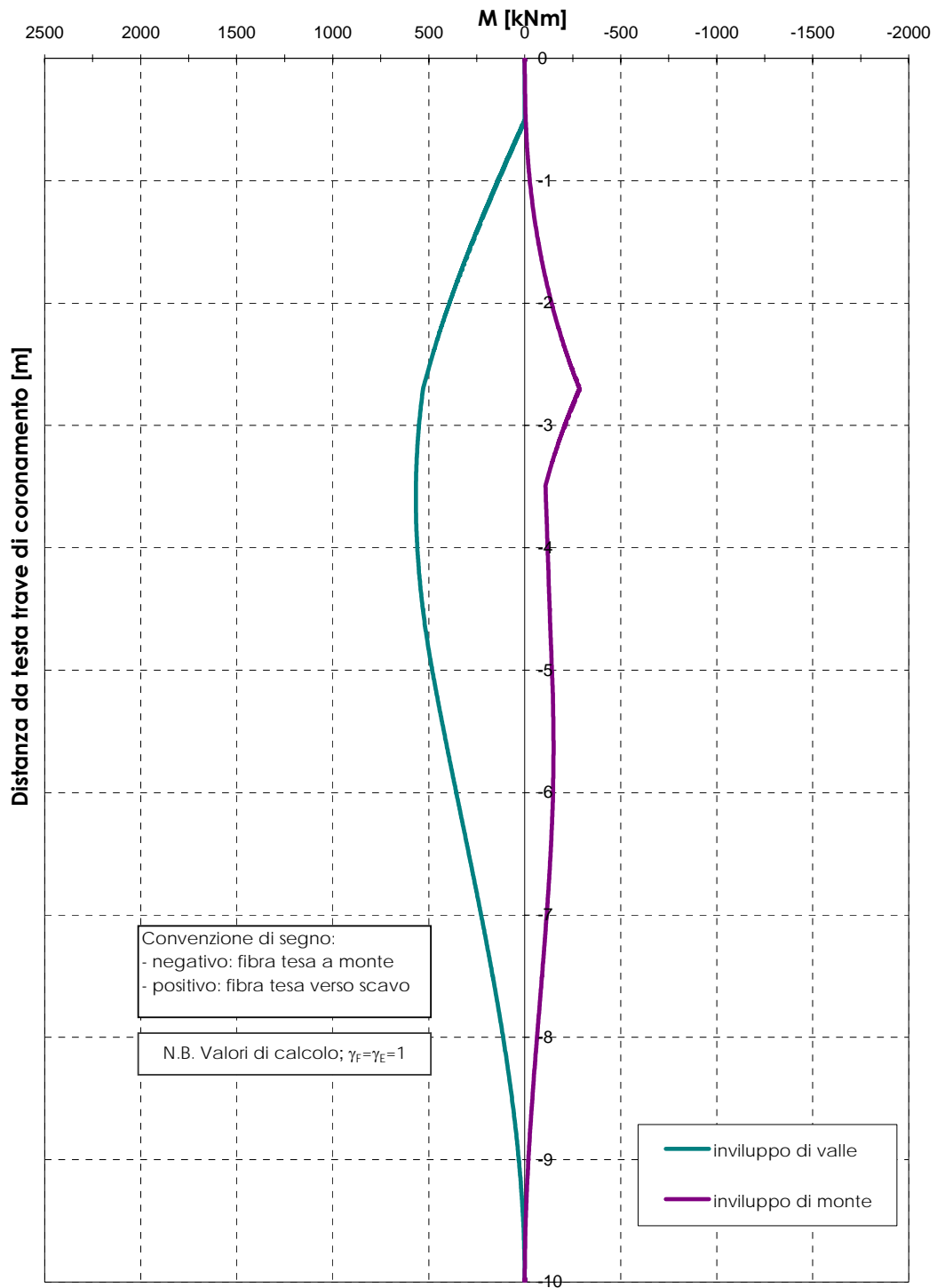


Figura 4.24

Analisi con PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 3 m - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
Inviluppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sx e di dx
(pari a quelli di analisi per 2.5m)

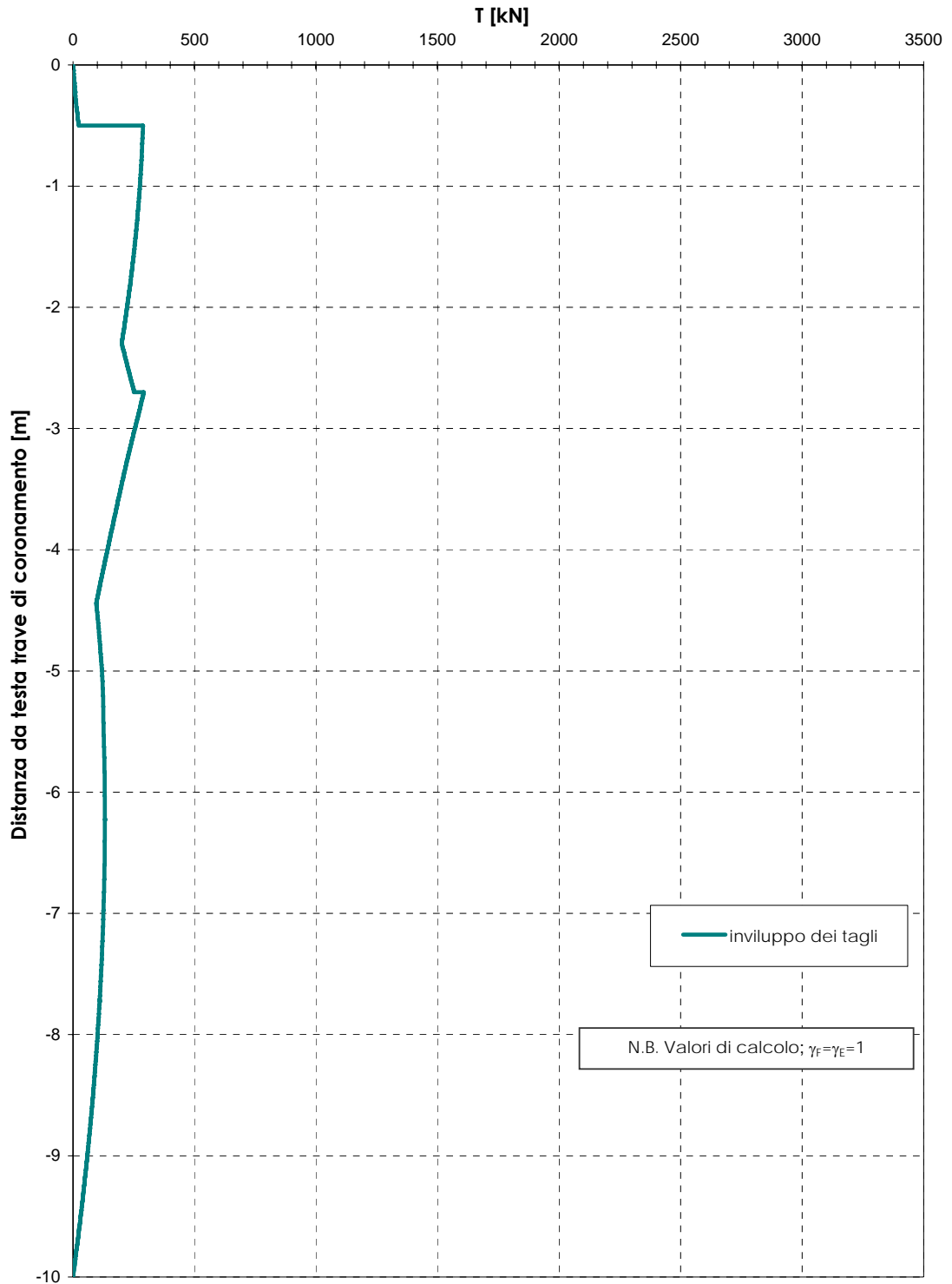


Figura 4.25

Analisi con PARATIE - Opera di sostegno strada interpodereale
Scavo 3 m - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di
 sx e di dx (pari a quelli di analisi per 2.5m)

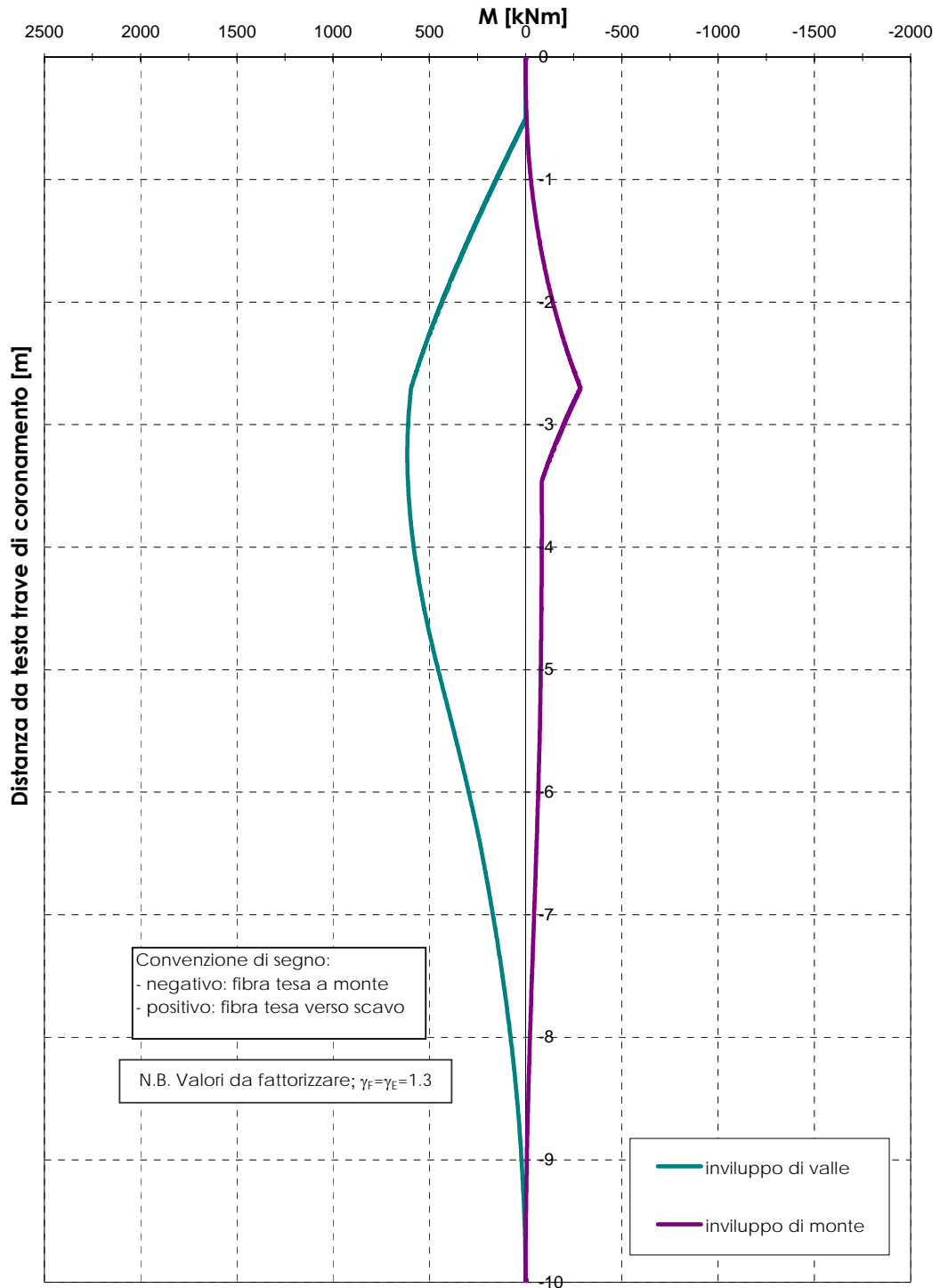


Figura 4.26

Analisi con PARATIE - Opera di sostegno strada interpoderale
Scavo 3 m - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
Inviluppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sx e di dx
(pari a quelli di analisi per 2.5m)

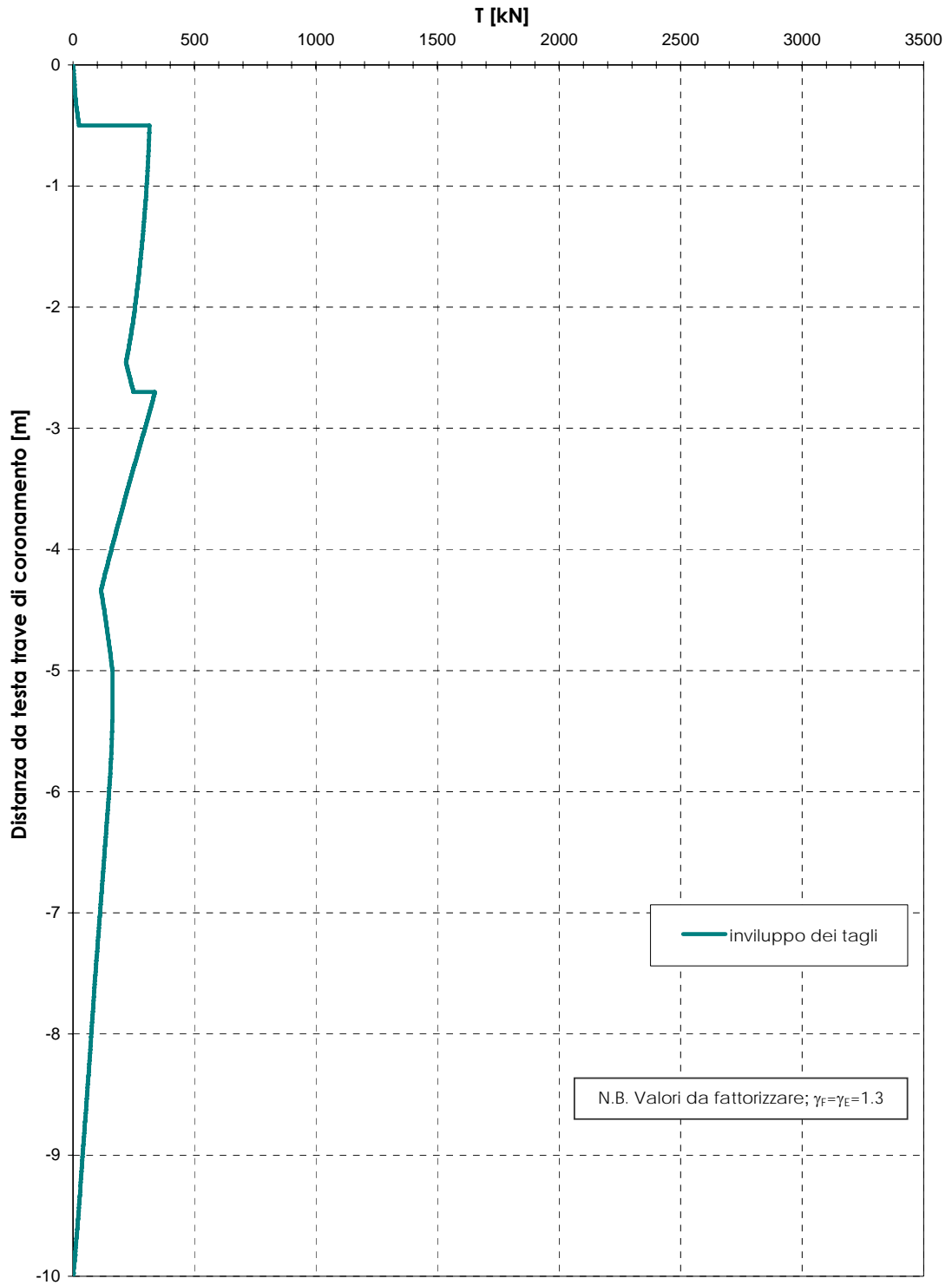


Figura 4.27

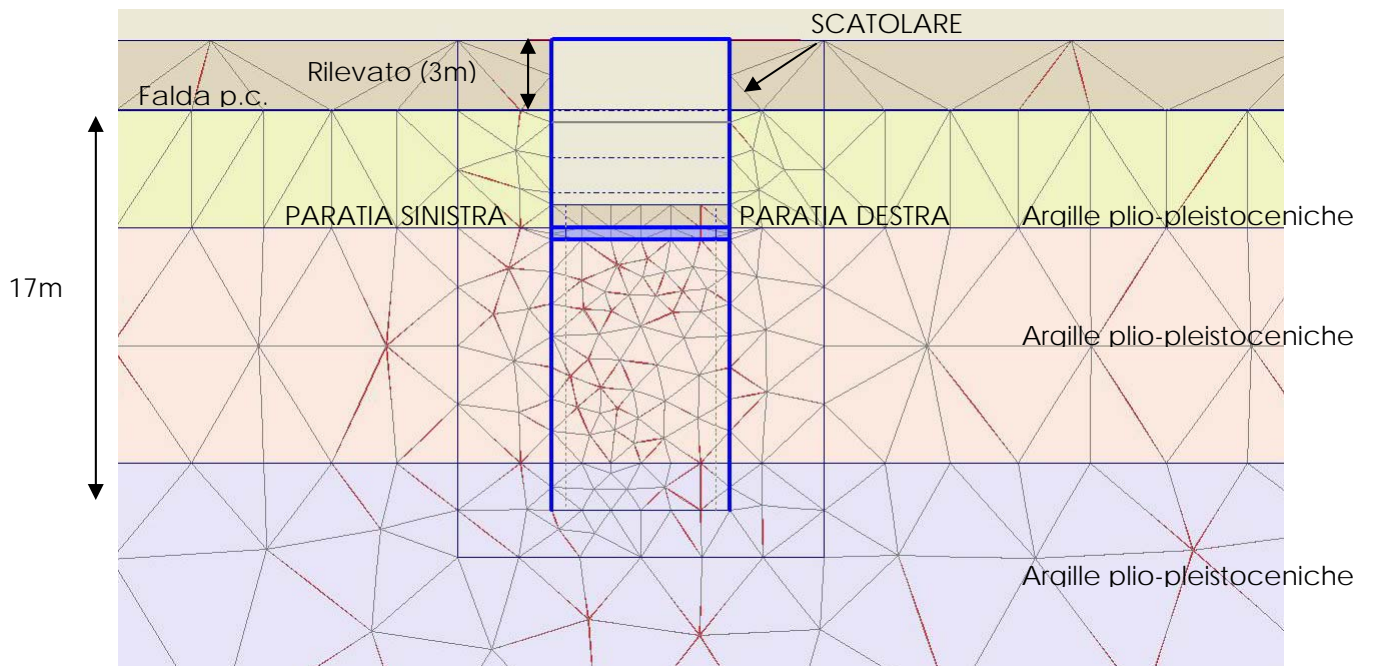


Figura 4.28 Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Particolare della griglia di calcolo

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpodereale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sx e di dx (pari a quelli di analisi per 2.5m)

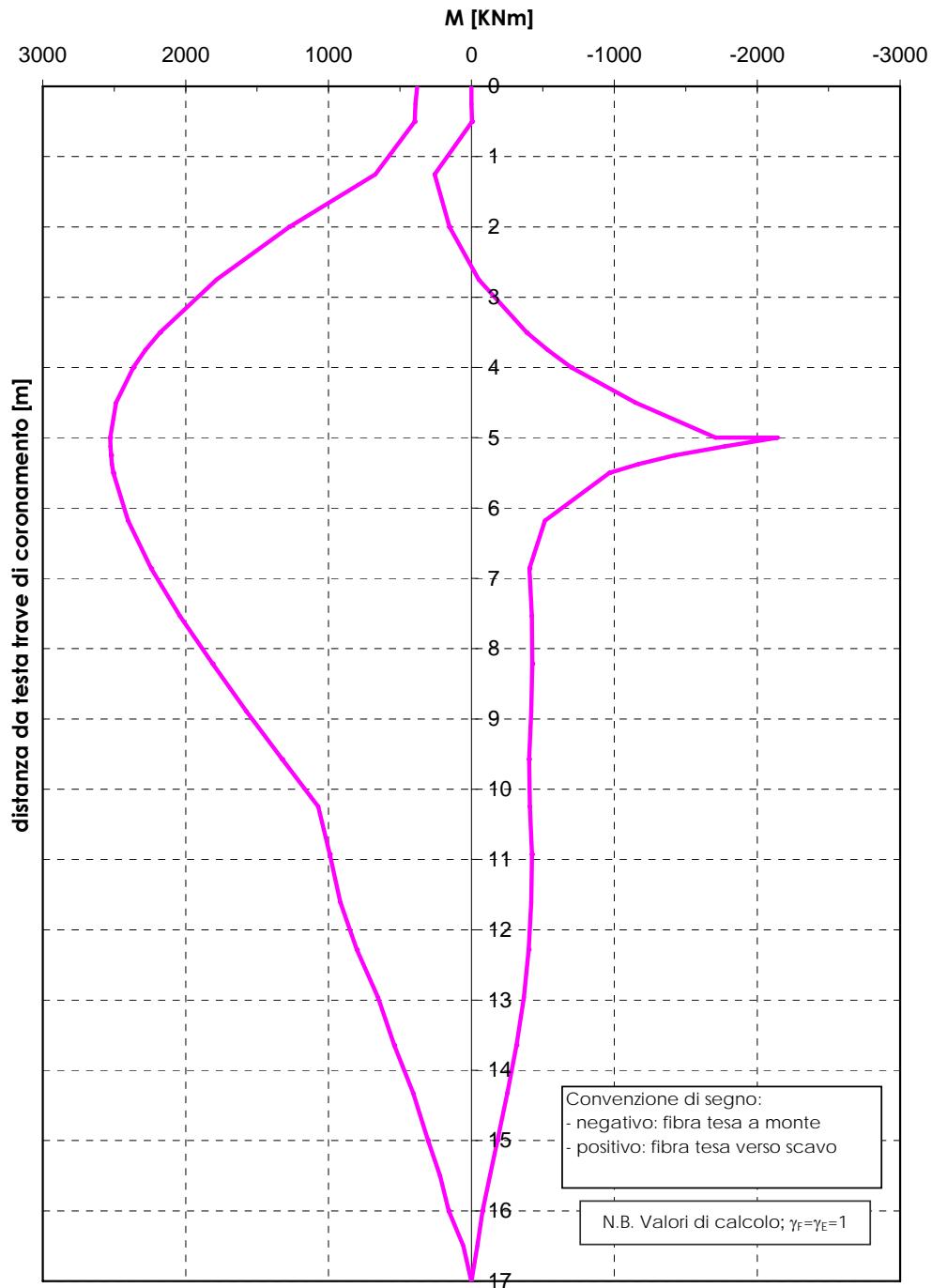


Figura 4.29

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
Involuppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sx e di dx
(pari a quelli di analisi per 2.5m)

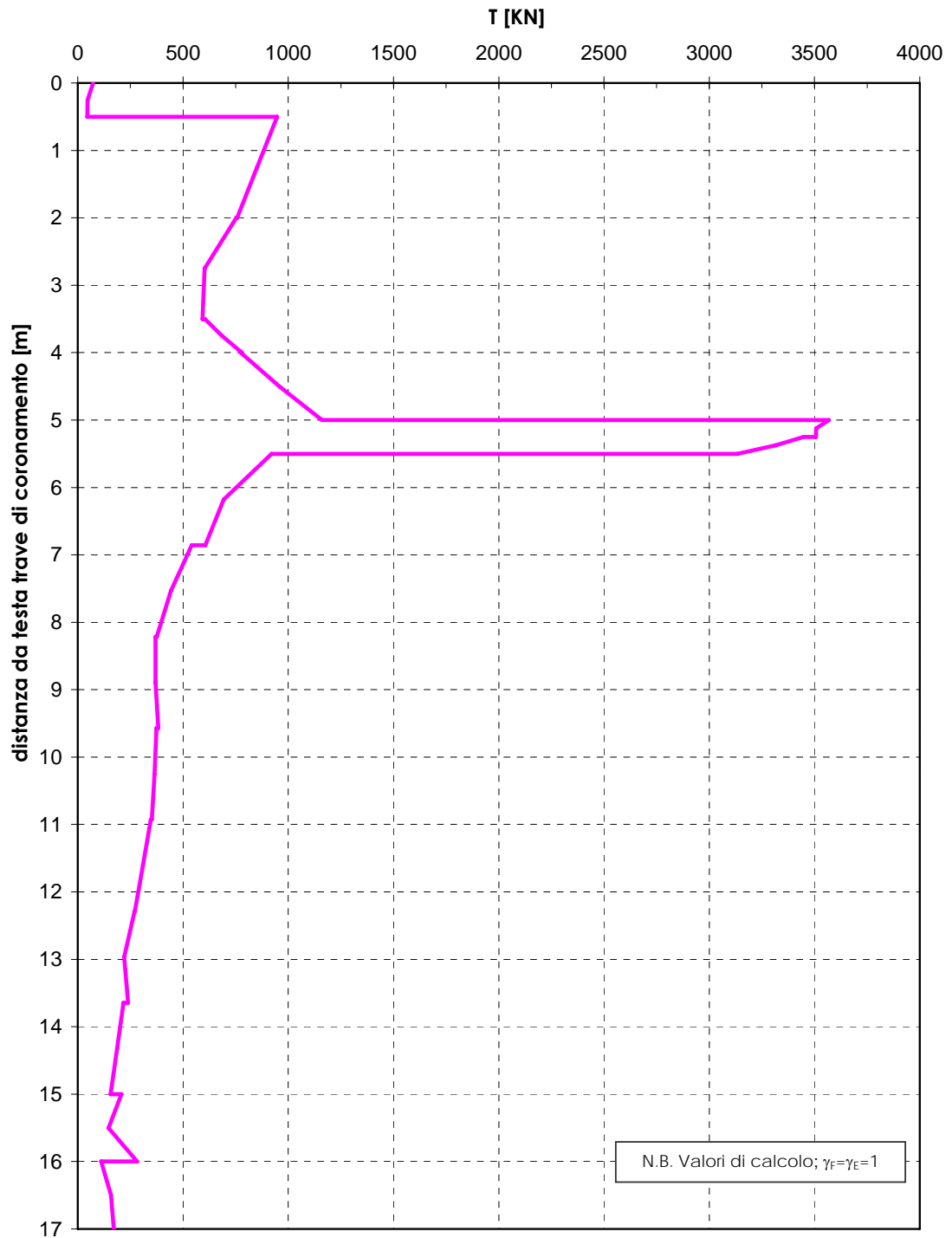


Figura 4.30

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare -
Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Andamento dei momenti flettenti nella soletta di base definitiva

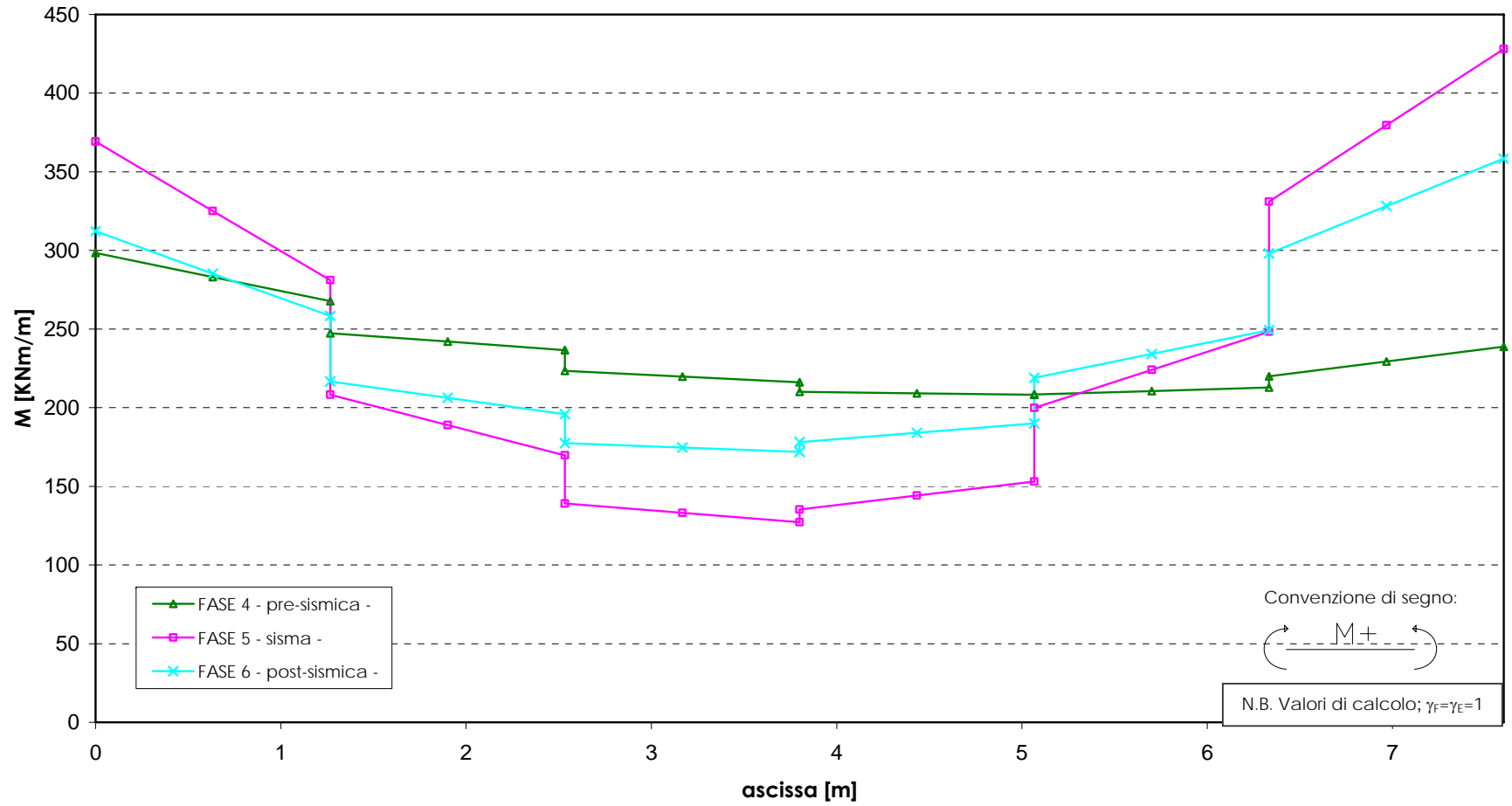


Figura 4.31

**Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare -
Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)**
Andamento delle azioni assiali nella soletta di base definitiva

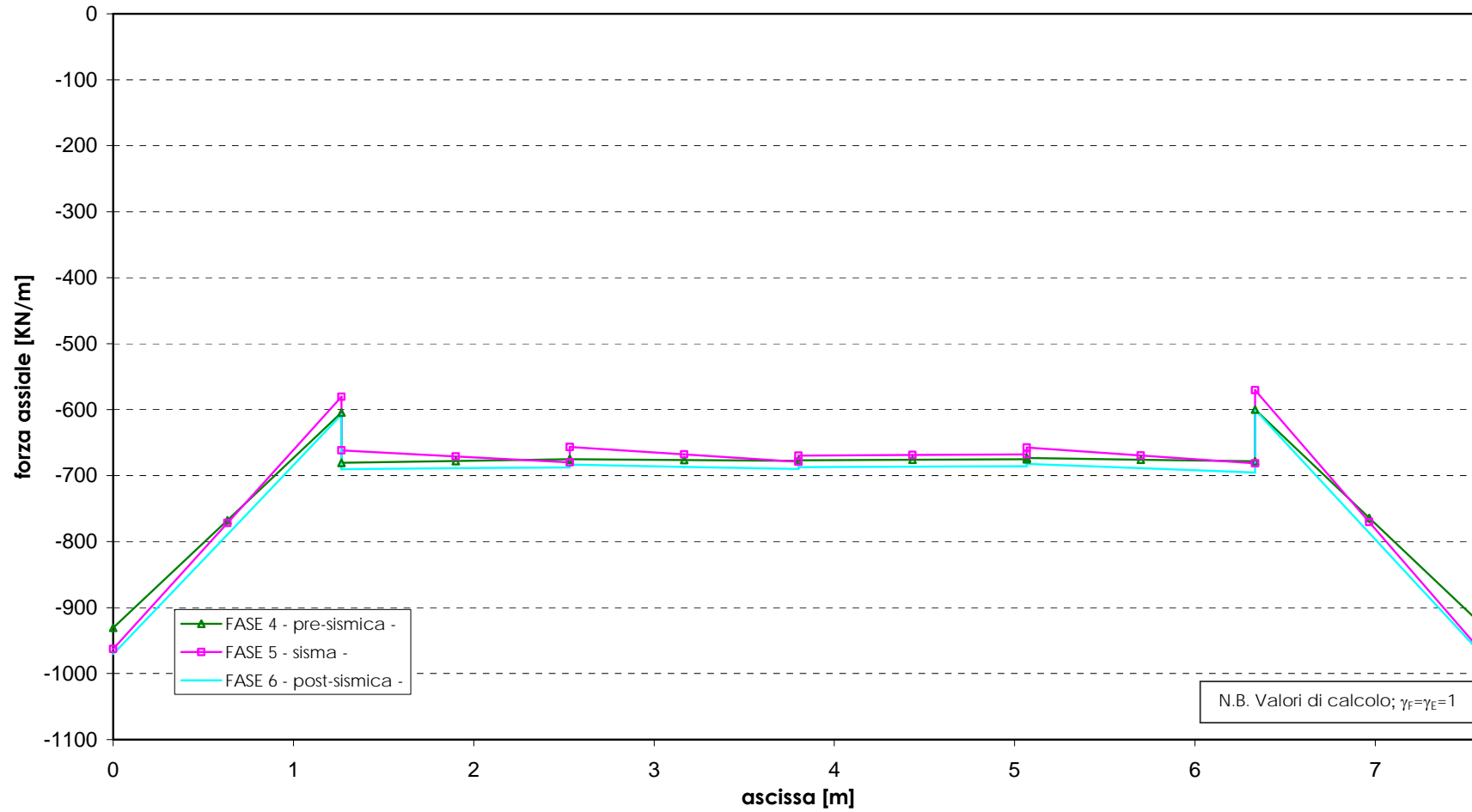


Figura 4.32

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)

Andamento dei momenti flettenti nelle varie fasi nel ritto di sinistra dello scatolare

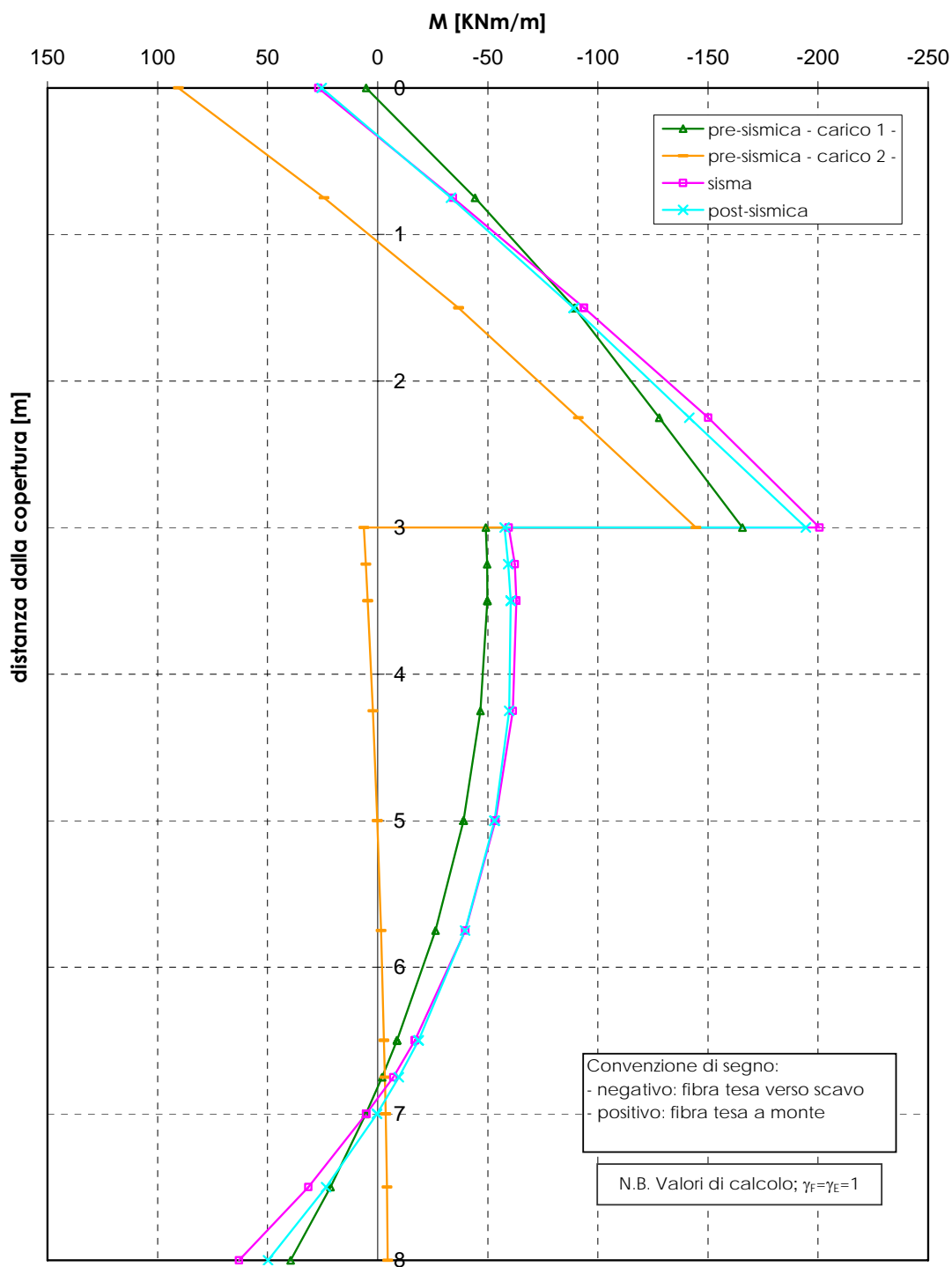


Figura 4.33a

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Andamento dei momenti flettenti nelle varie fasi nel ritto di destra dello scatolare

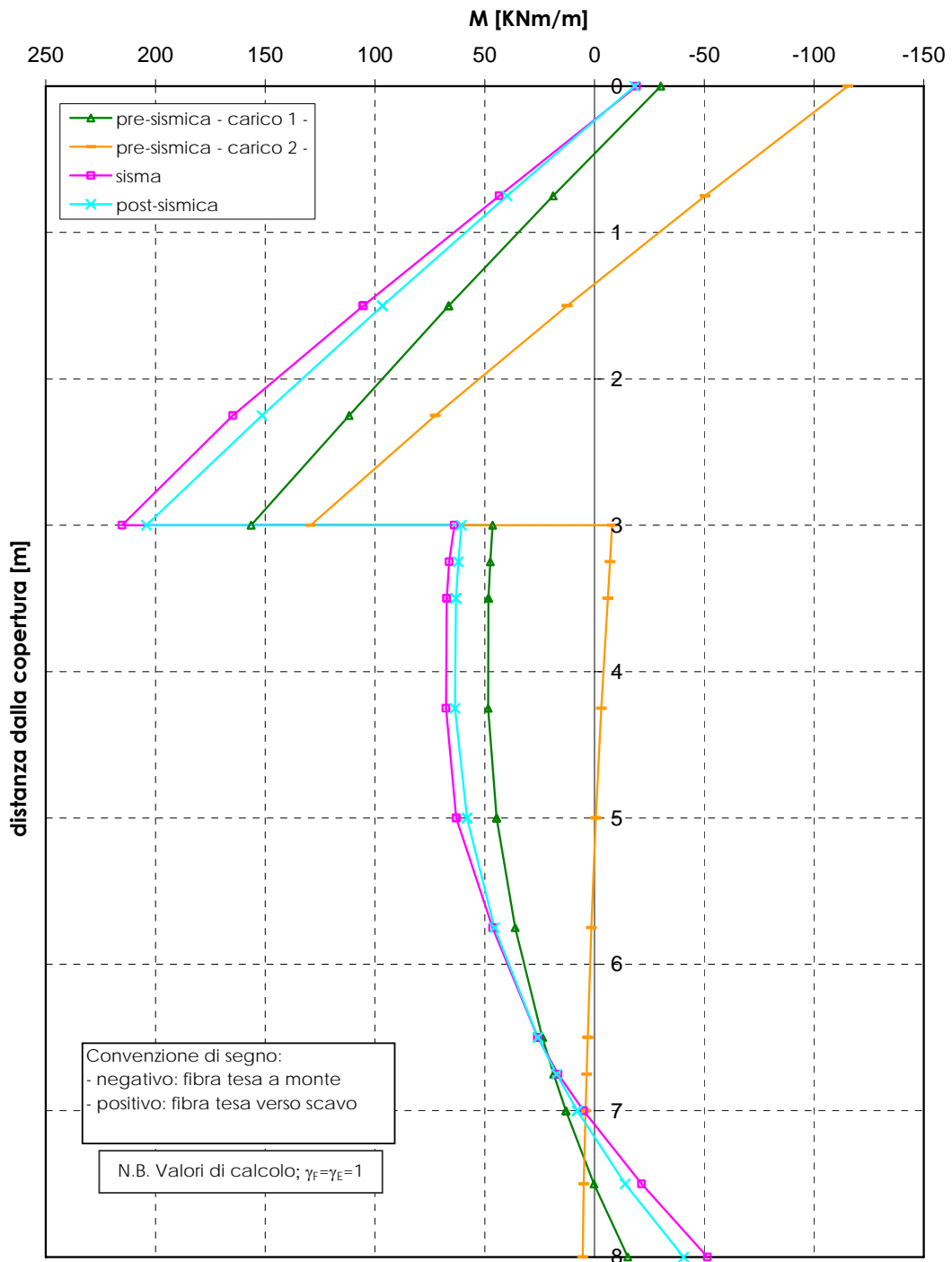


Figura 4.33b

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Andamento dei momenti flettenti nelle varie fasi nella copertura dello scatolare

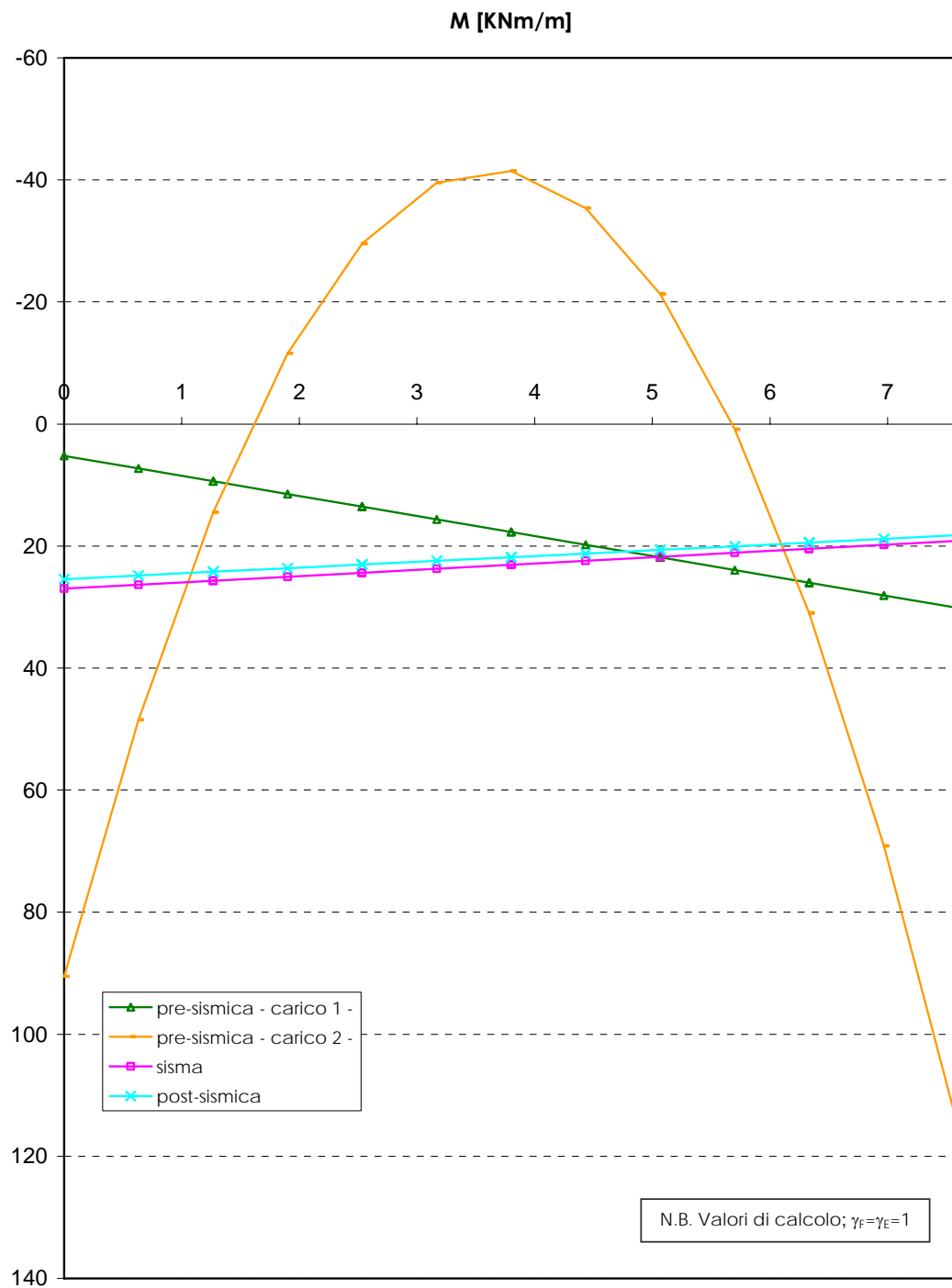


Figura 4.33c

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Andamento dei tagli nelle varie fasi nel ritto di sinistra dello scatolare

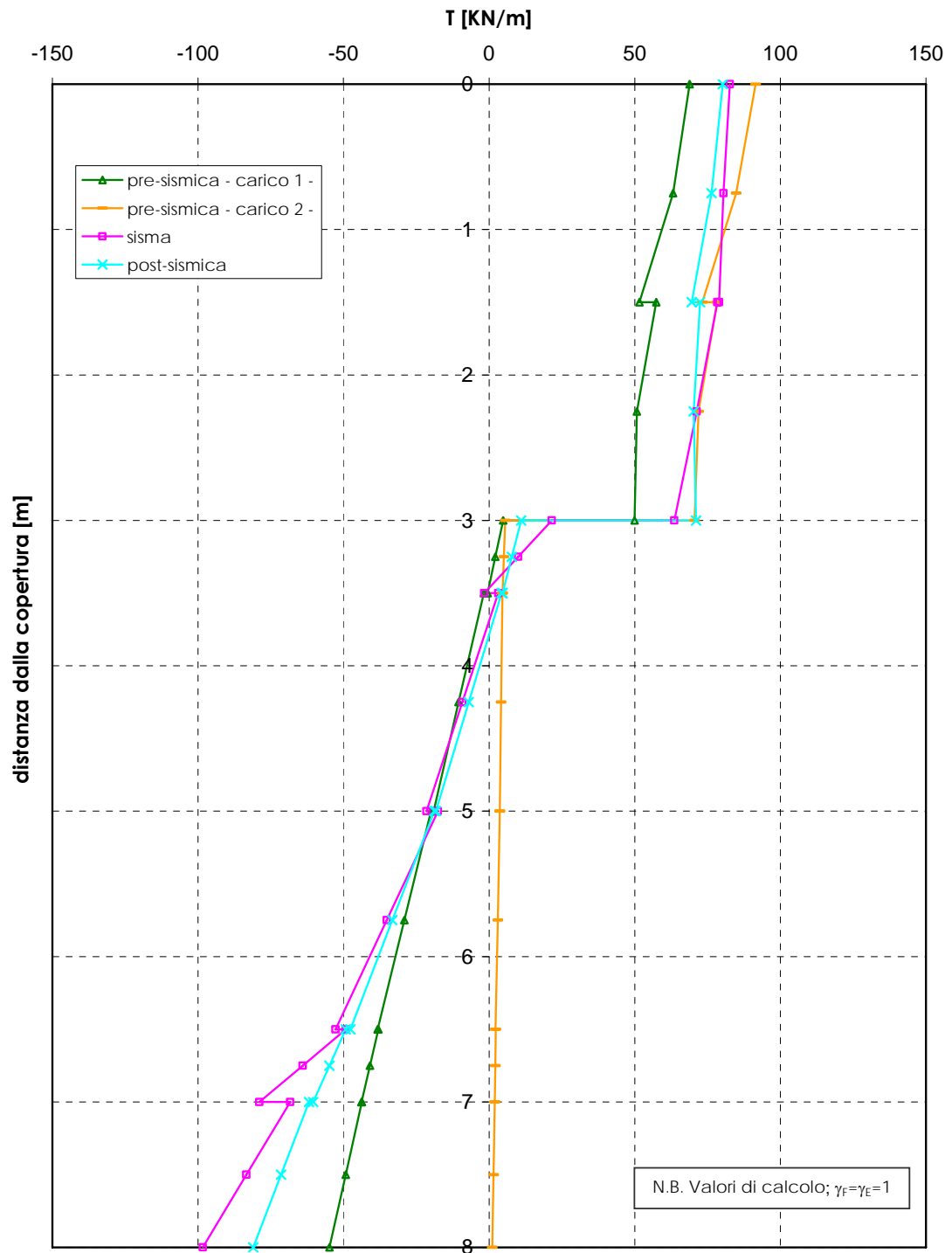


Figura 4.34a

**Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpodereale - Tratto in
scalare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)**
Andamento dei tagli nelle varie fasi nel ritto di destra dello scalare

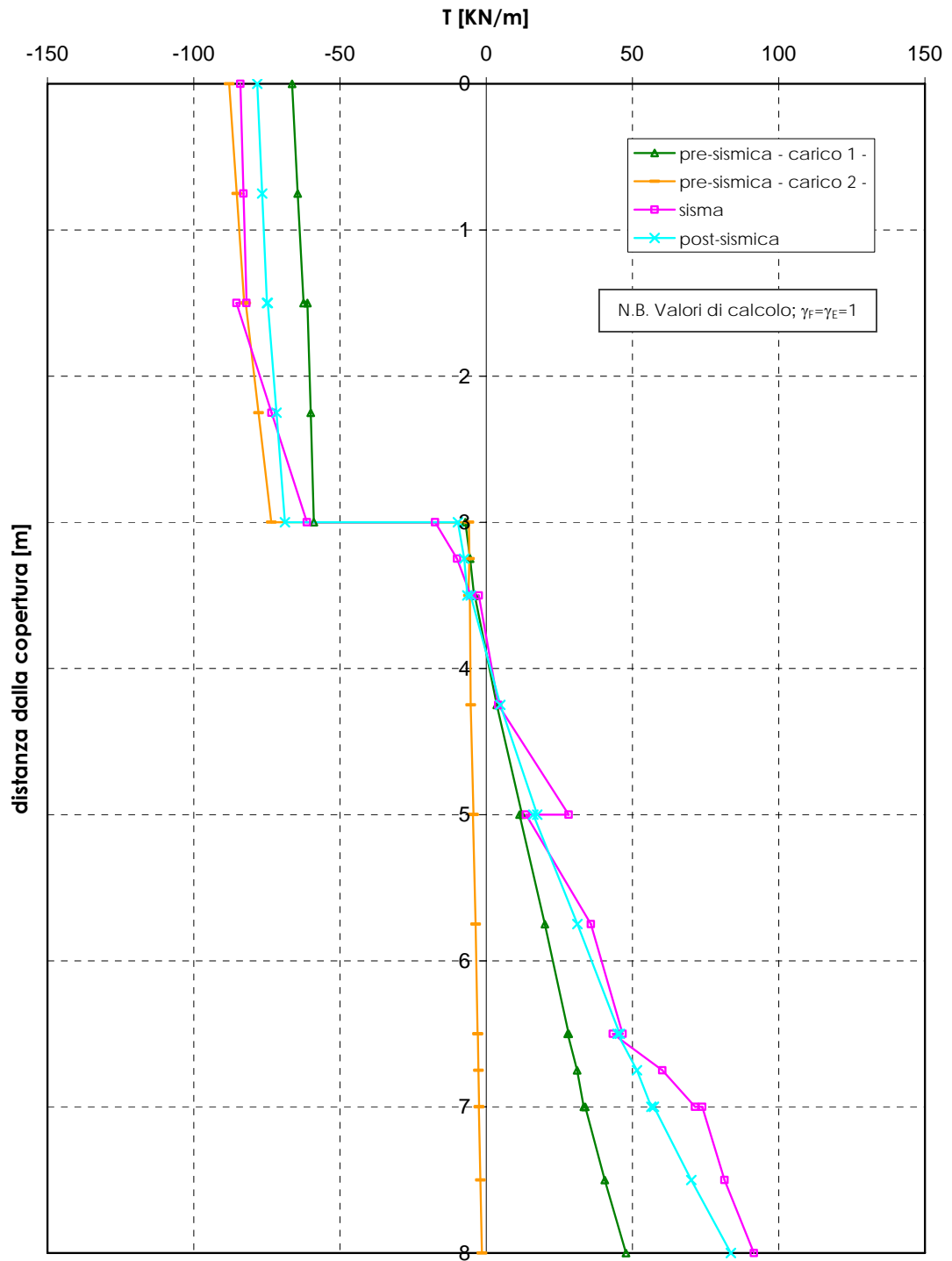


Figura 4.34b

**Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in
scotolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)**
Andamento dei tagli nelle varie fasi nella copertura dello scotolare

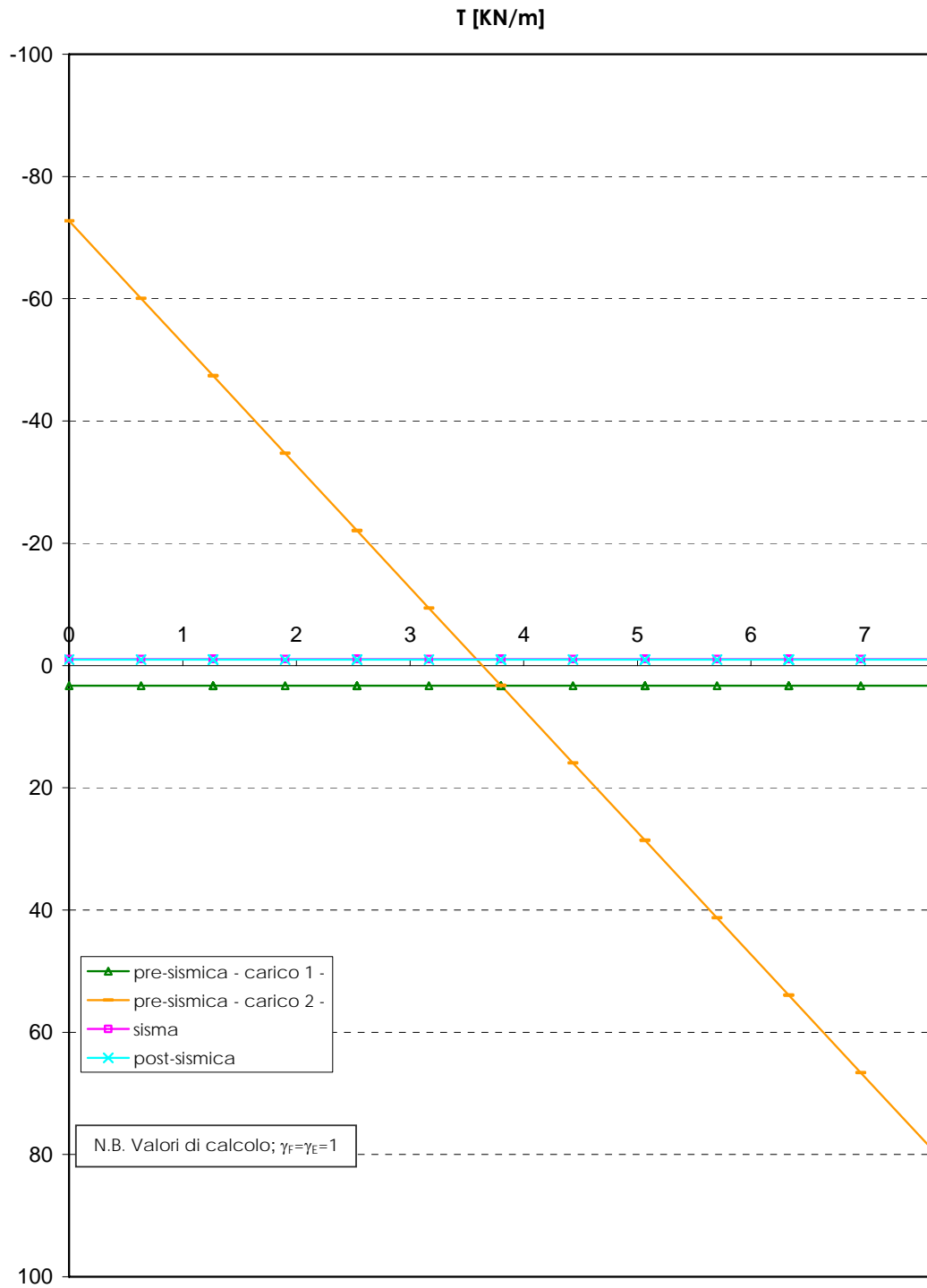
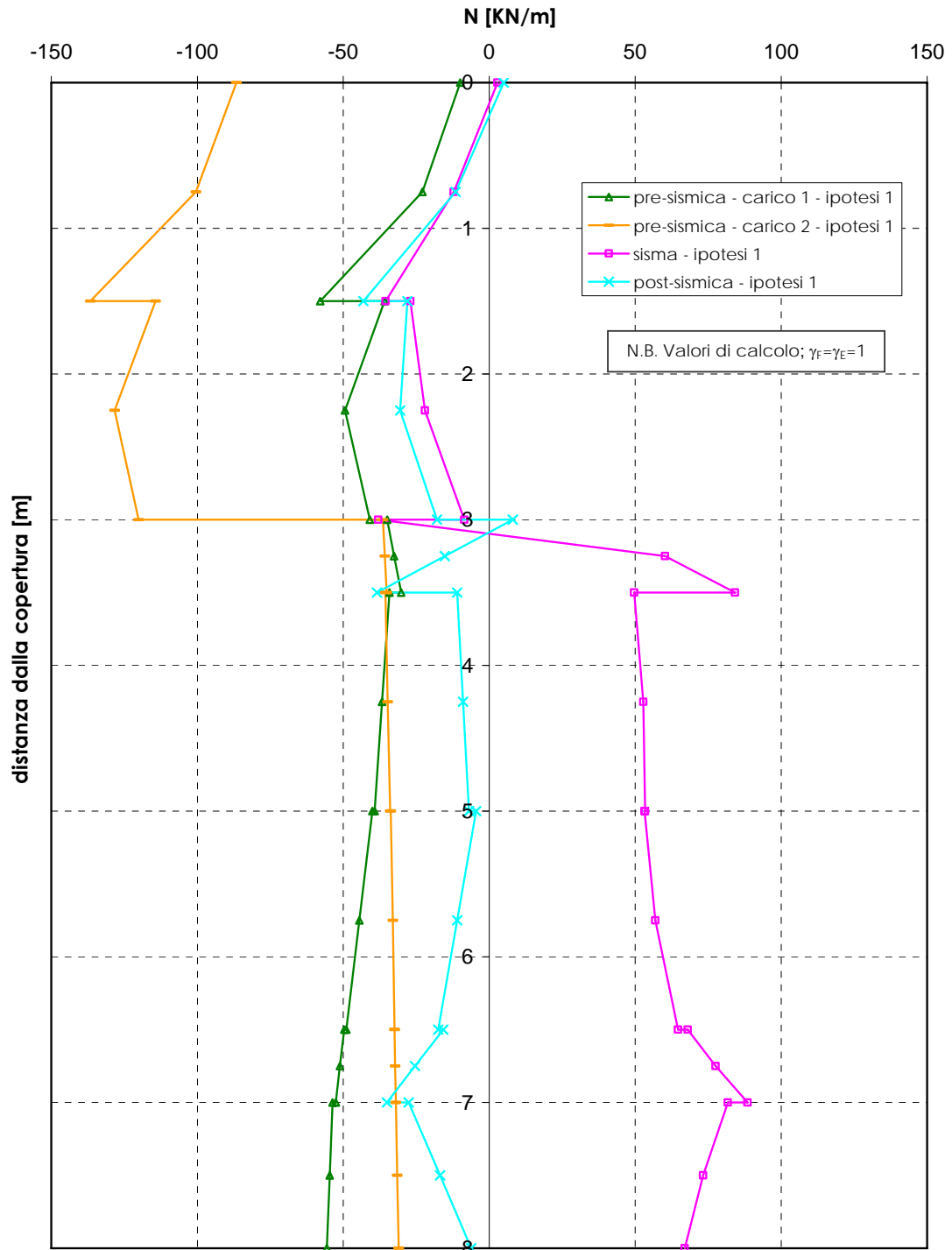


Figura 4.34c

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpodereale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Andamento delle azioni assiali nelle varie fasi nel ritto di sinistra dello scatolare

Figura 4.35a₁

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Andamento delle azioni assiali nelle varie fasi nel ritto di sinistra dello scatolare

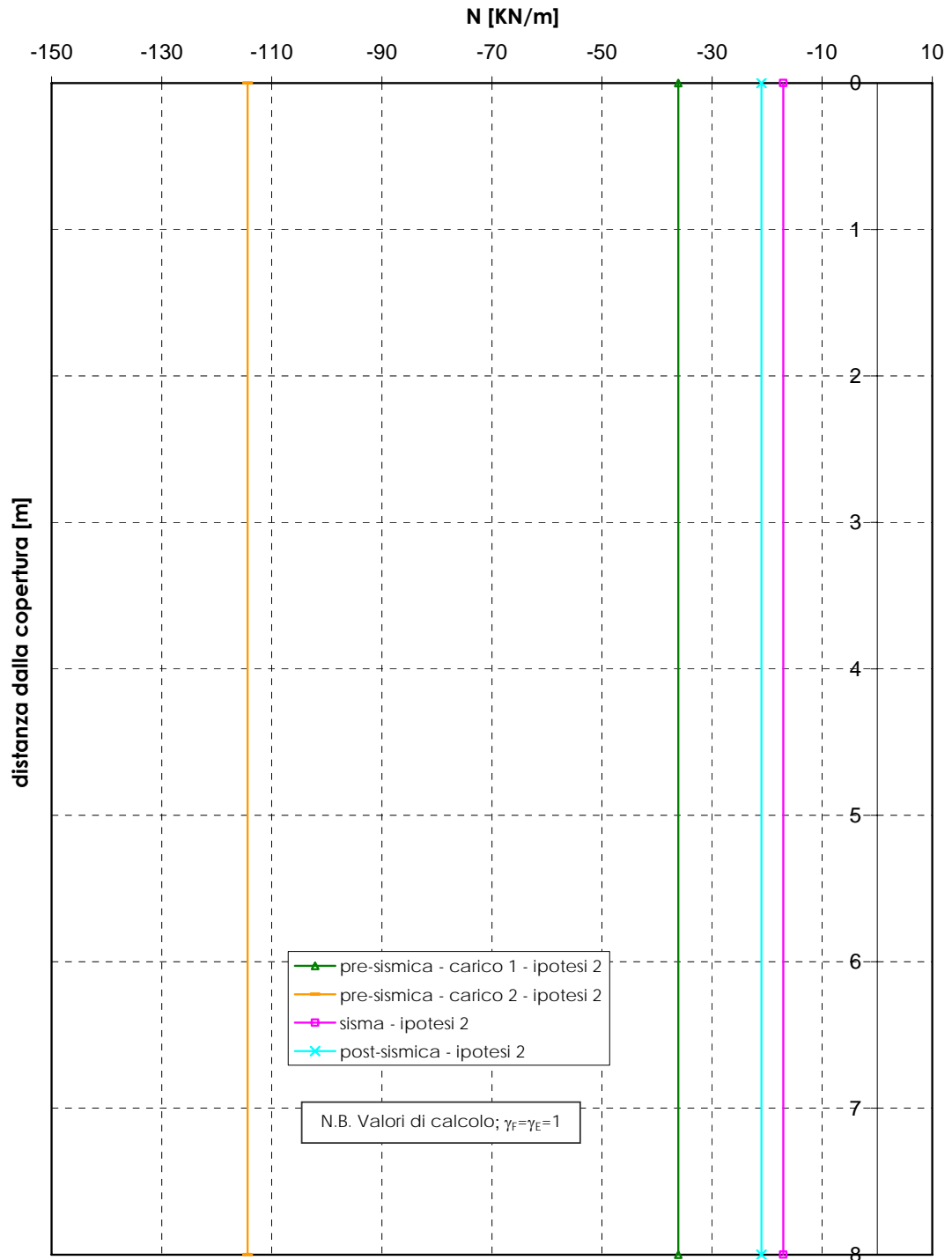


Figura 4.35a₂

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Andamento delle azioni assiali nelle varie fasi nel ritto di destra dello scatolare

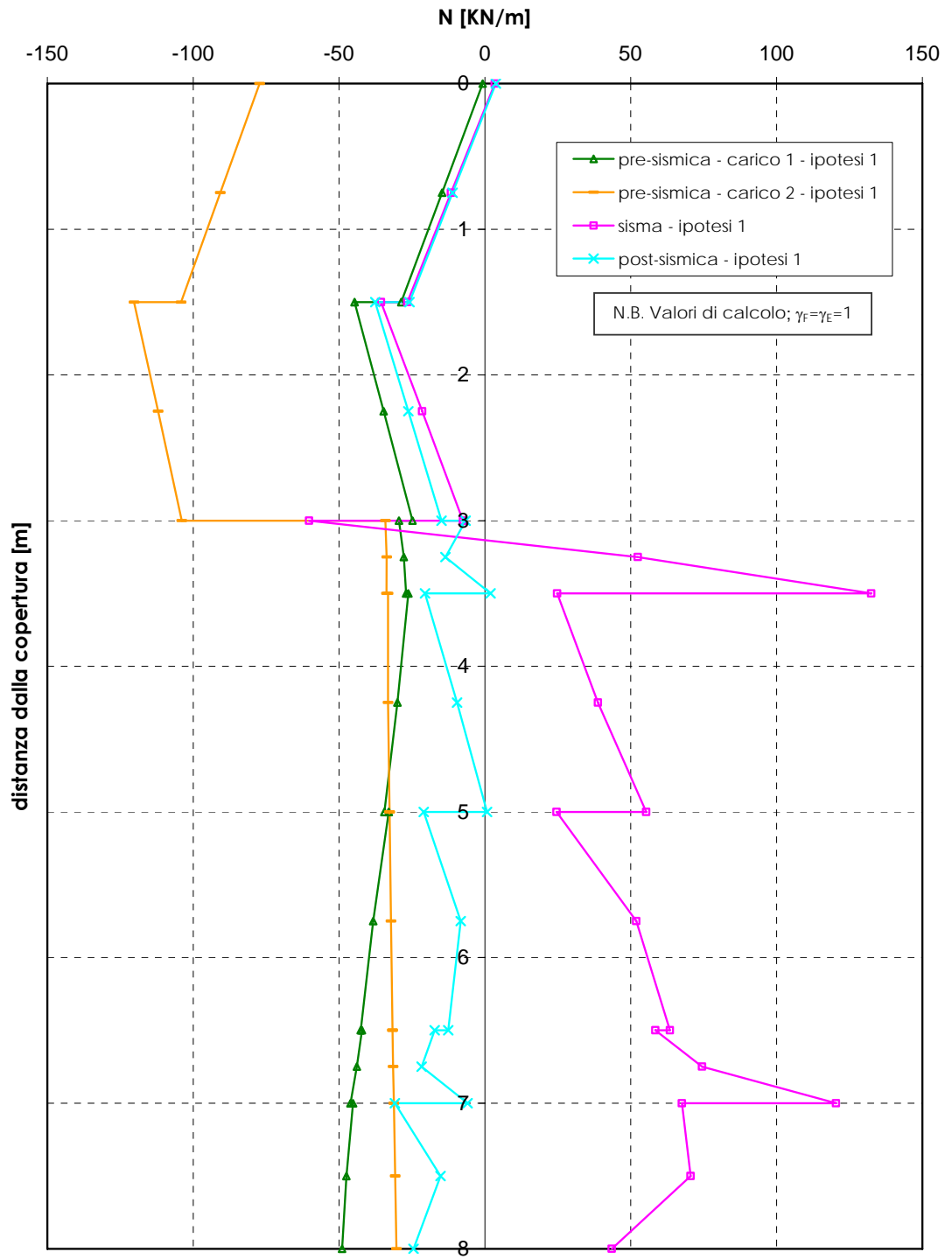
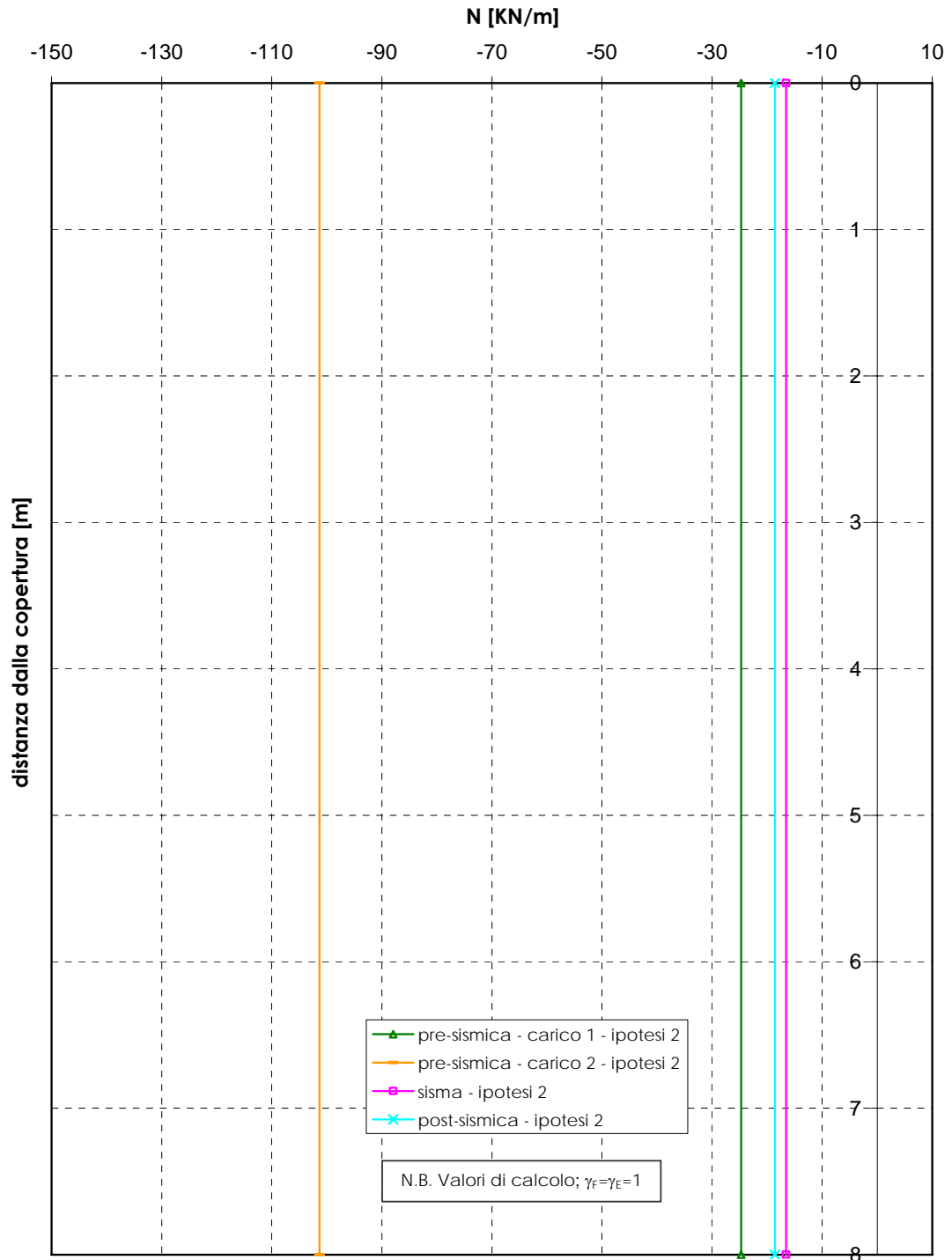


Figura 4.35b₁

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpodereale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
 Andamento delle azioni assiali nelle varie fasi nel ritto di destra dello scatolare

Figura 4.35b₂

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 2 (A2+M2+R1)
Andamento delle azioni assiali nelle varie fasi nella copertura dello scatolare

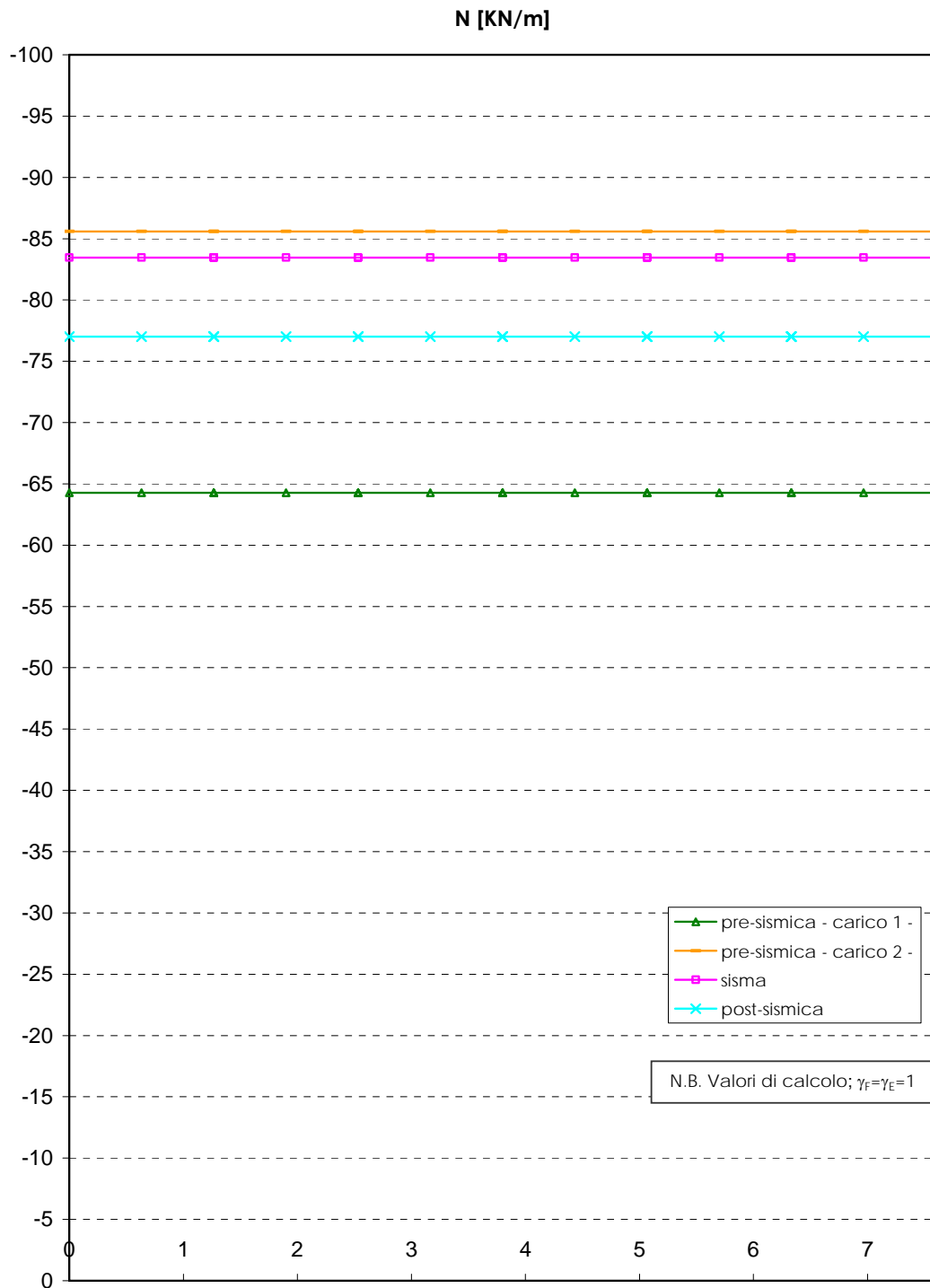


Figura 4.35c

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Involuppo dei momenti flettenti nei setti di diaframma delle paratie di sx e di dx (pari a quelli di analisi per 2.5m)

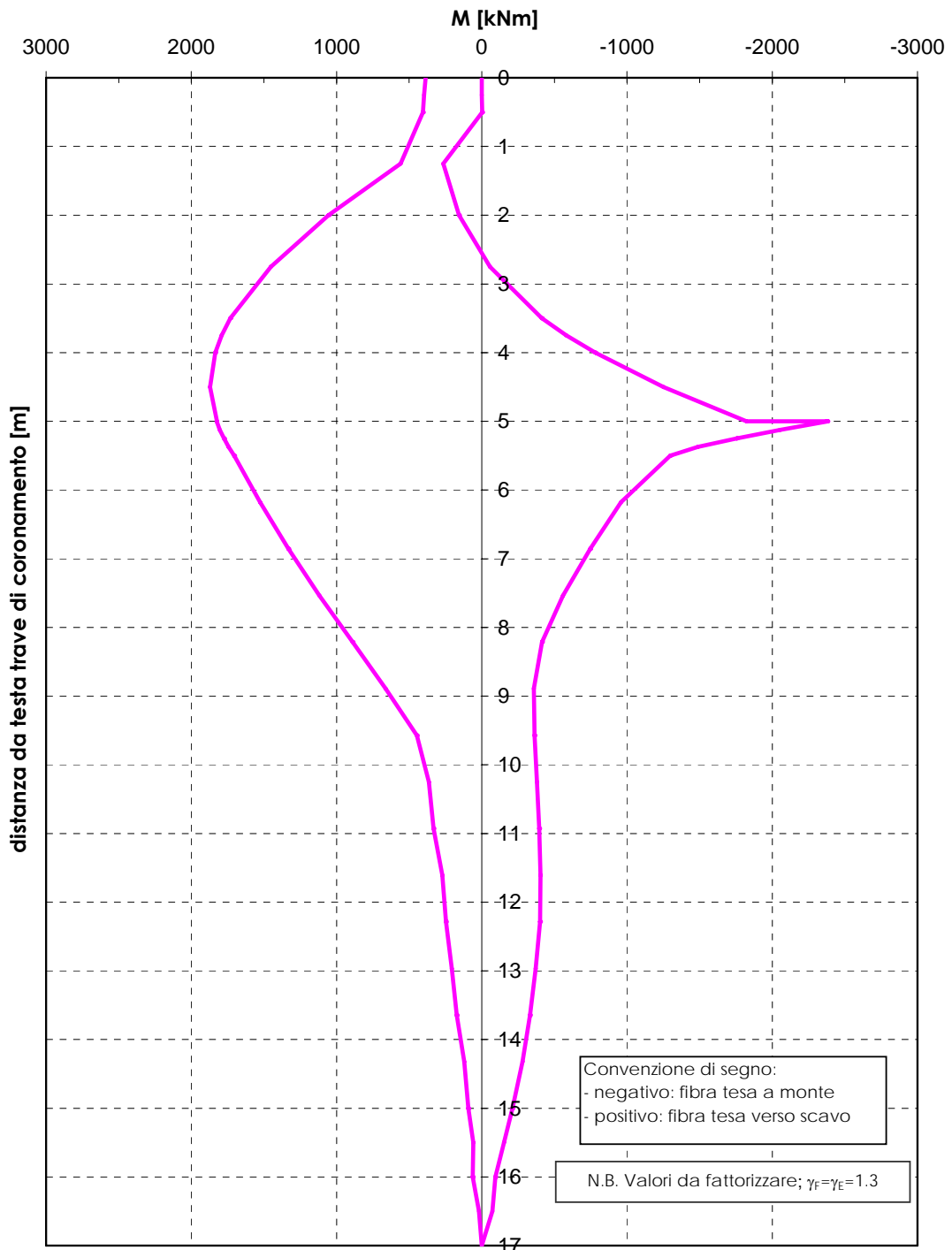


Figura 4.36

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
Involuppo dei tagli nei setti di diaframma delle paratie di sx e di dx (pari a quelli di analisi per 2.5m)

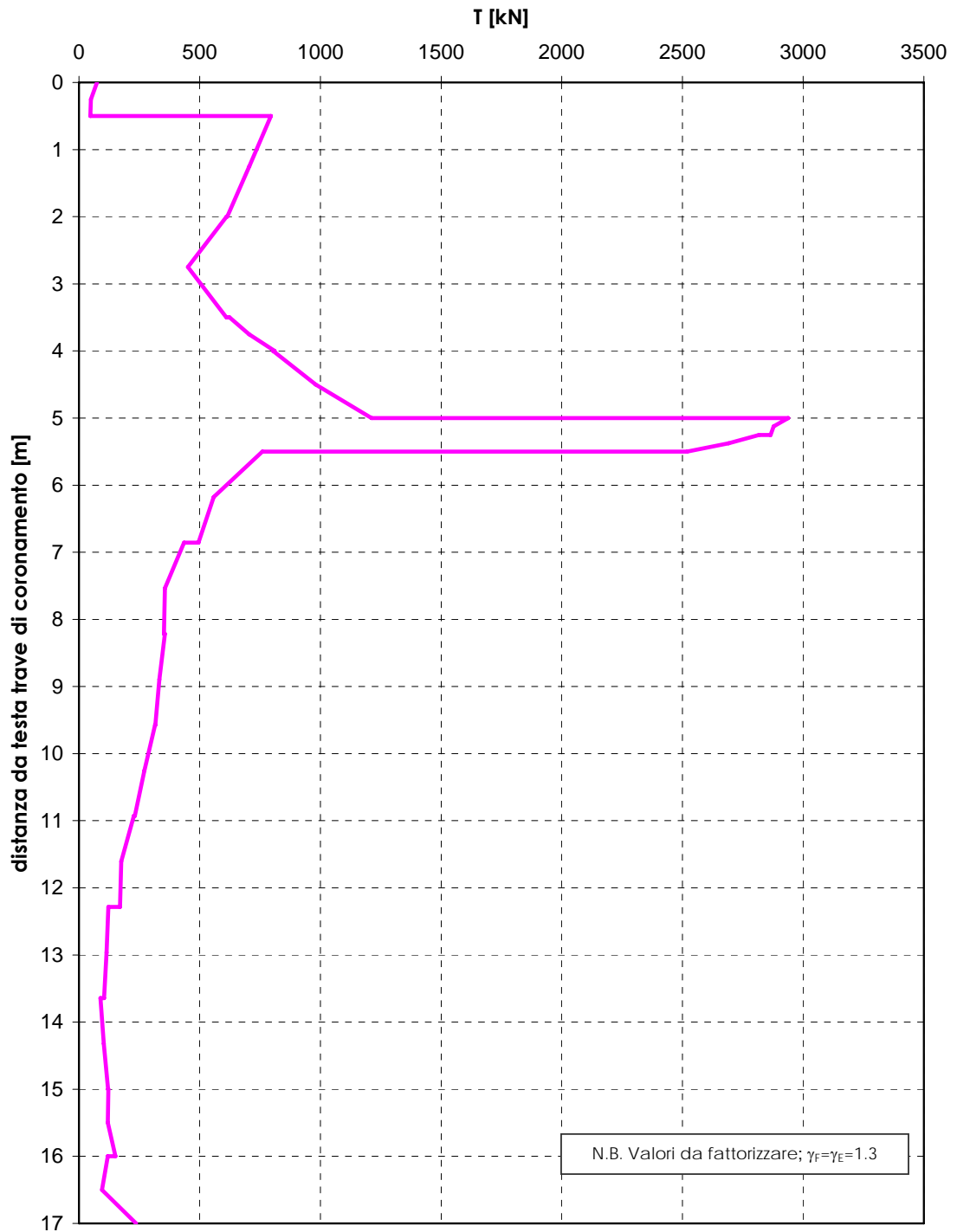


Figura 4.37

**Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare -
 Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Andamento dei momenti flettenti nella soletta di base definitiva**

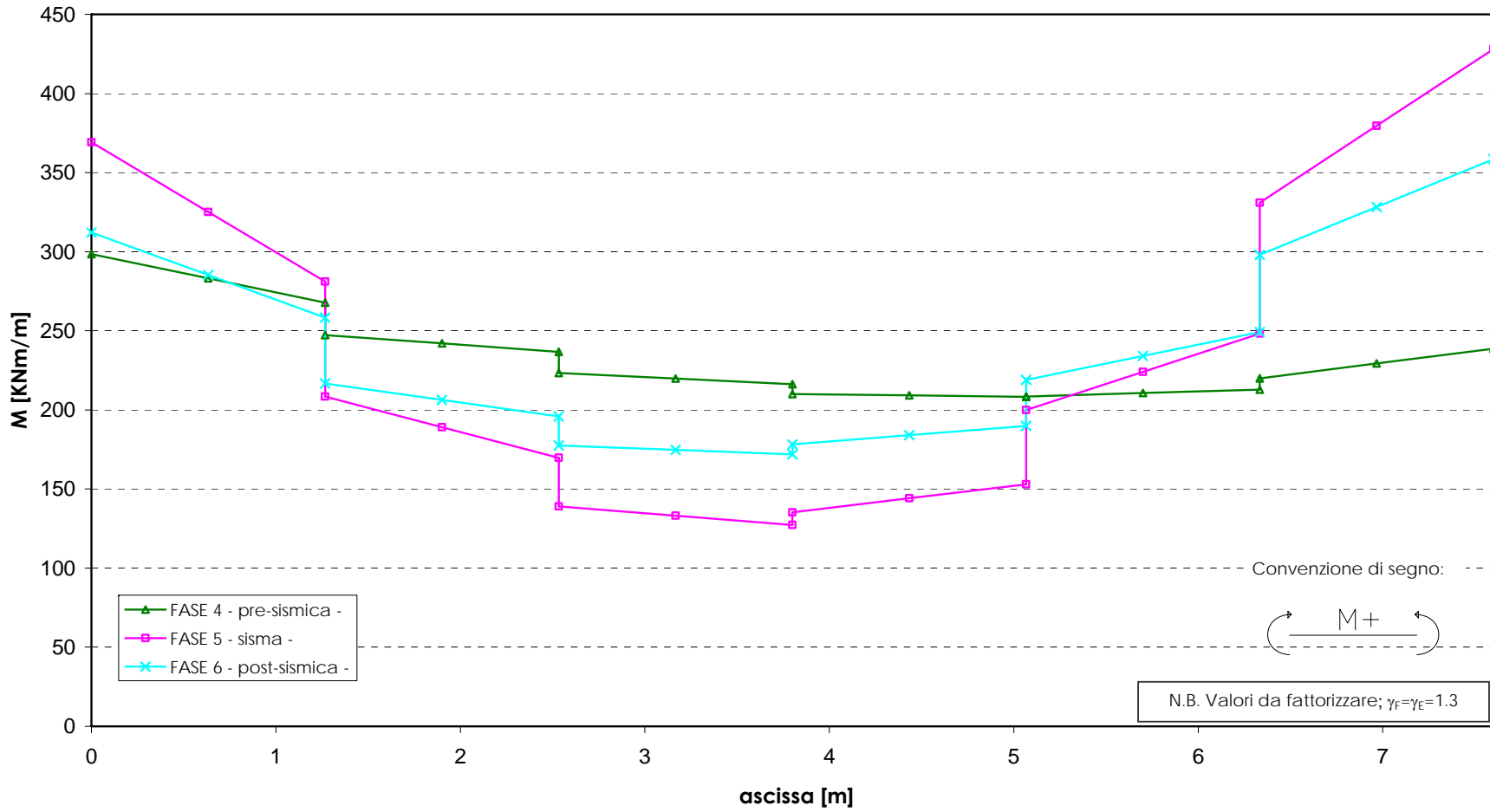


Figura 4.38

**Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare -
 Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)**
 Andamento delle azioni assiali nella soletta di base definitiva

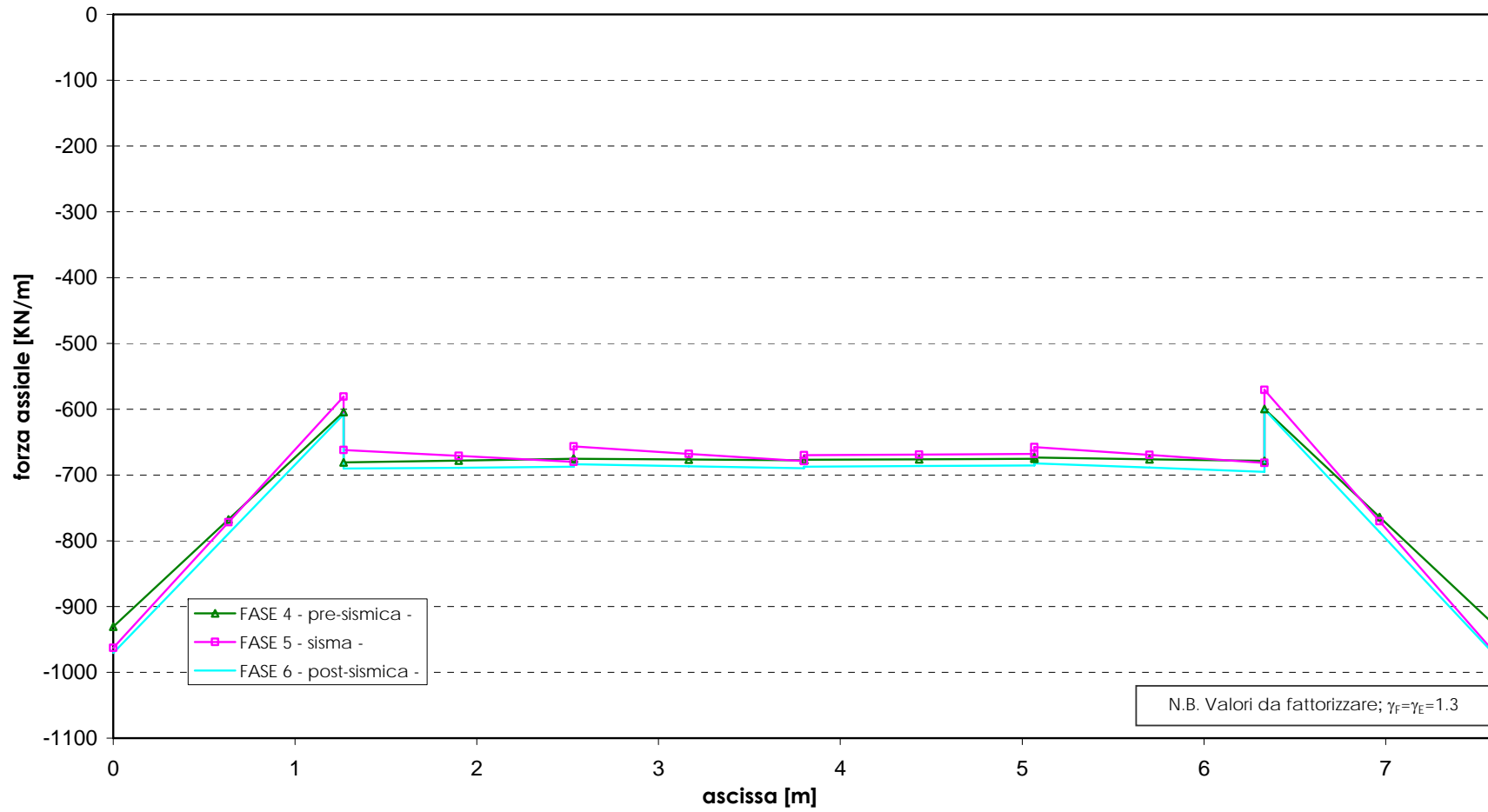


Figura 4.39

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpodereale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)

Andamento dei momenti flettenti nelle varie fasi nel ritto di sinistra dello scatolare

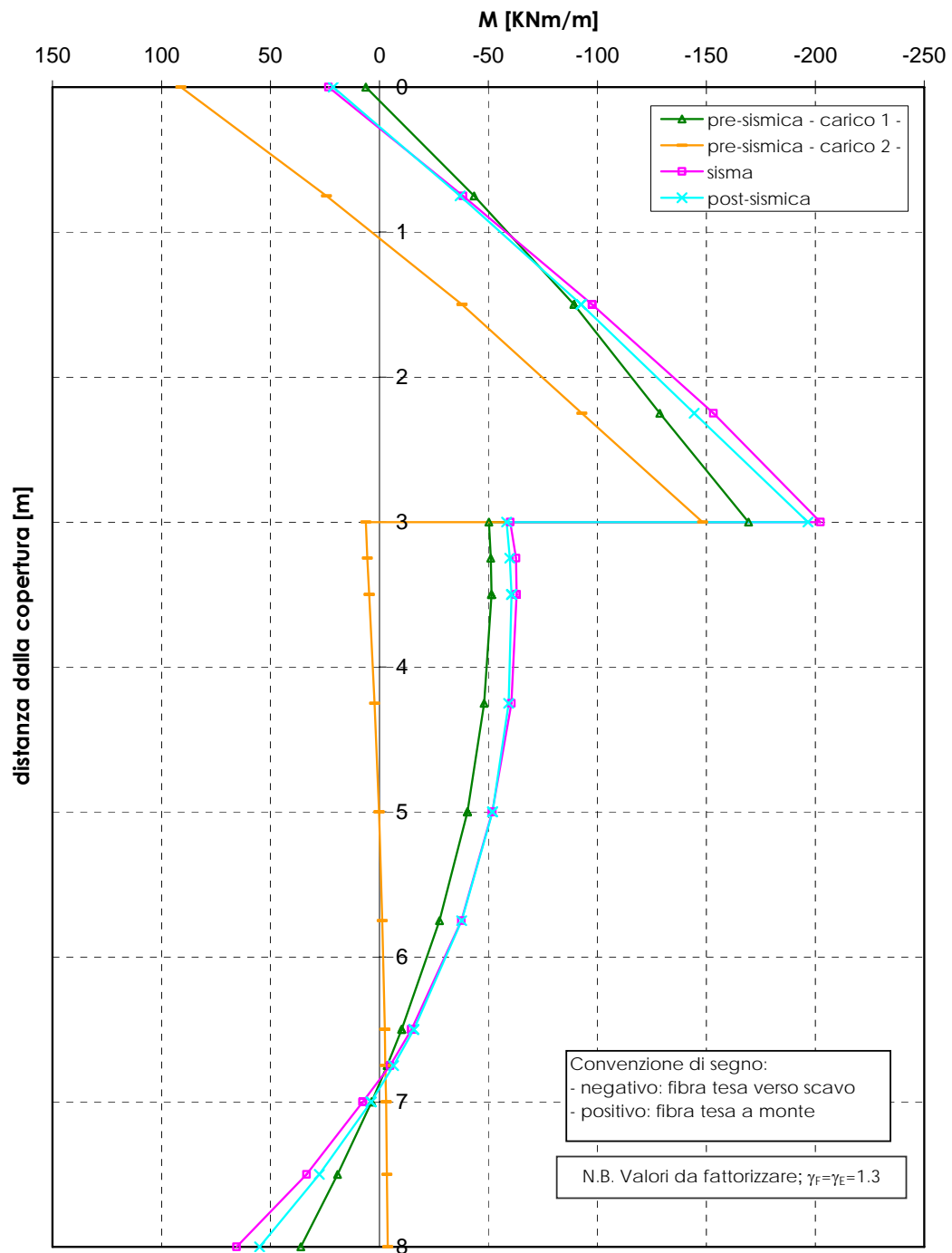


Figura 4.40a

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)

Andamento dei momenti flettenti nelle varie fasi nel ritto di destra dello scatolare

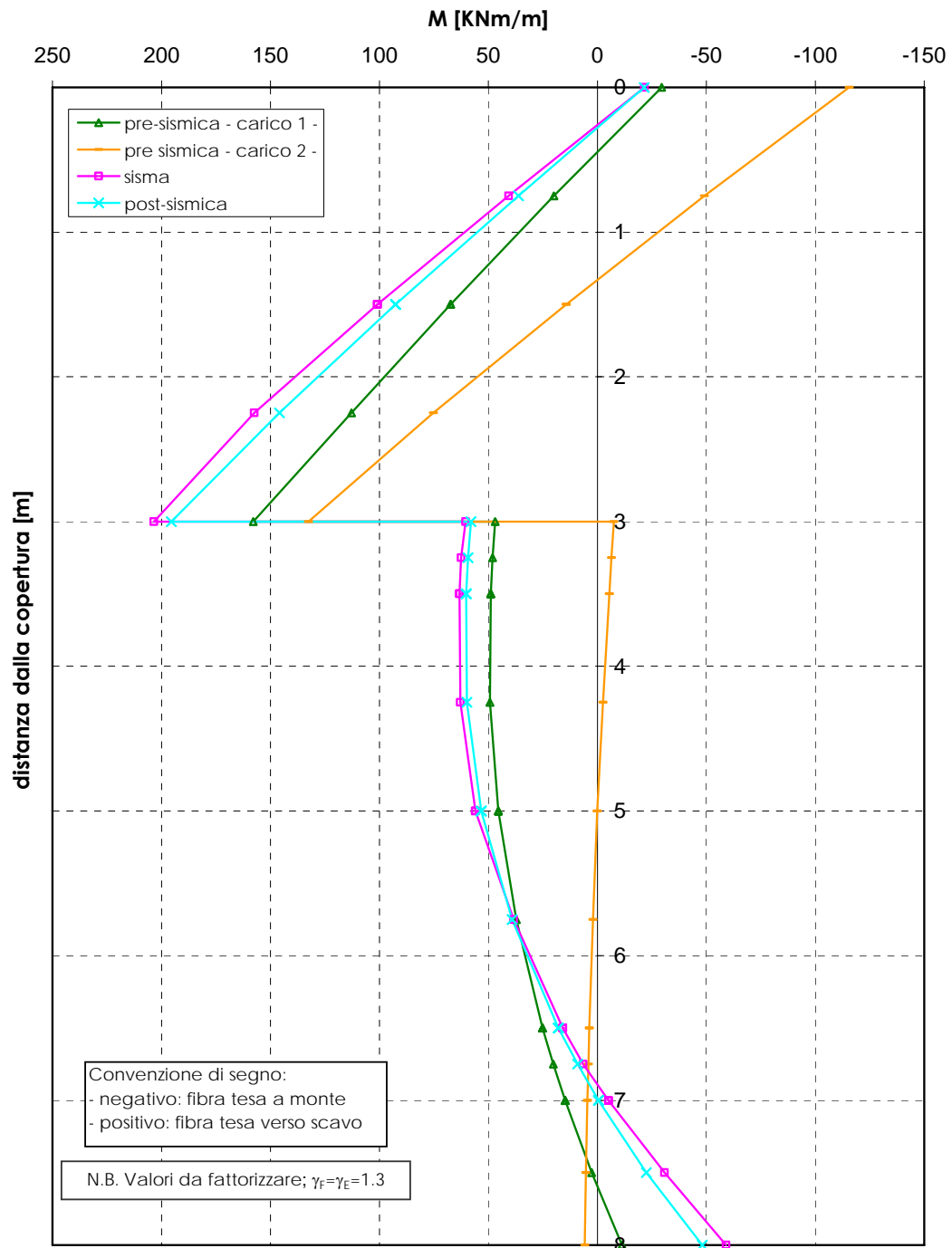


Figura 4.40b

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Andamento dei momenti flettenti nelle varie fasi nella copertura dello scatolare

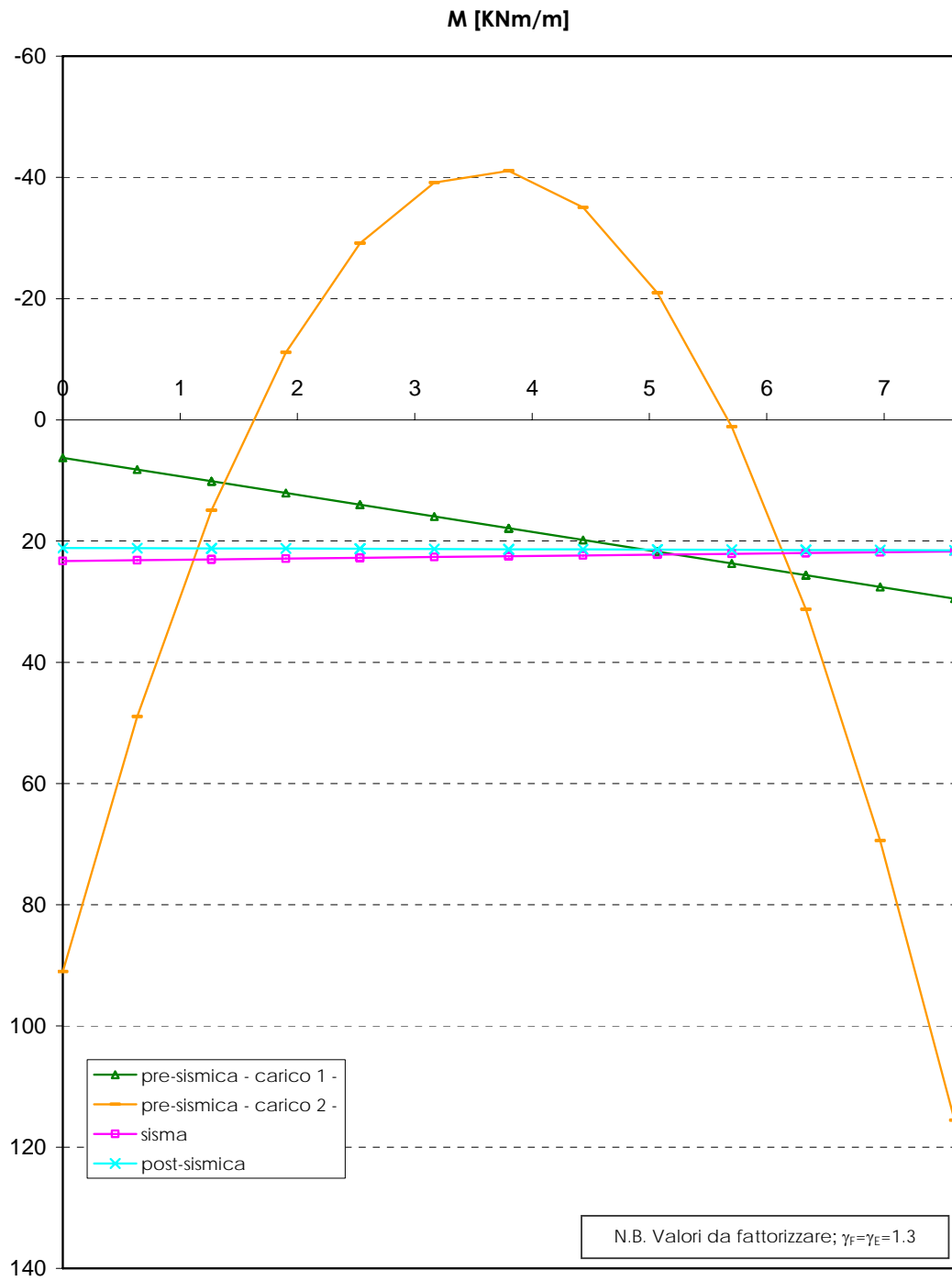


Figura 4.40c

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Andamento dei tagli nelle varie fasi nel ritto di sinistra dello scatolare

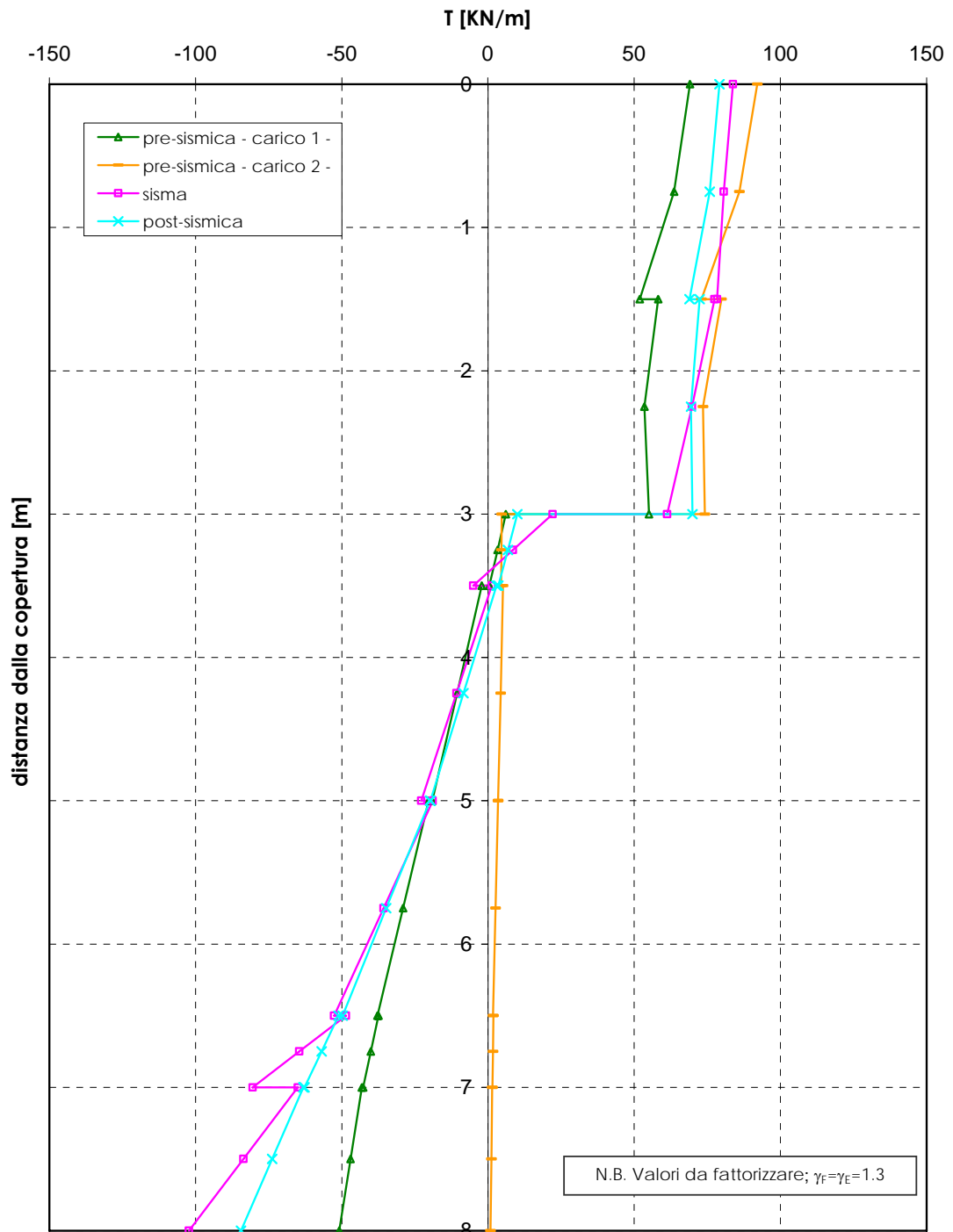


Figura 4.41a

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpodereale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Andamento dei tagli nelle varie fasi nel ritto di destra dello scatolare

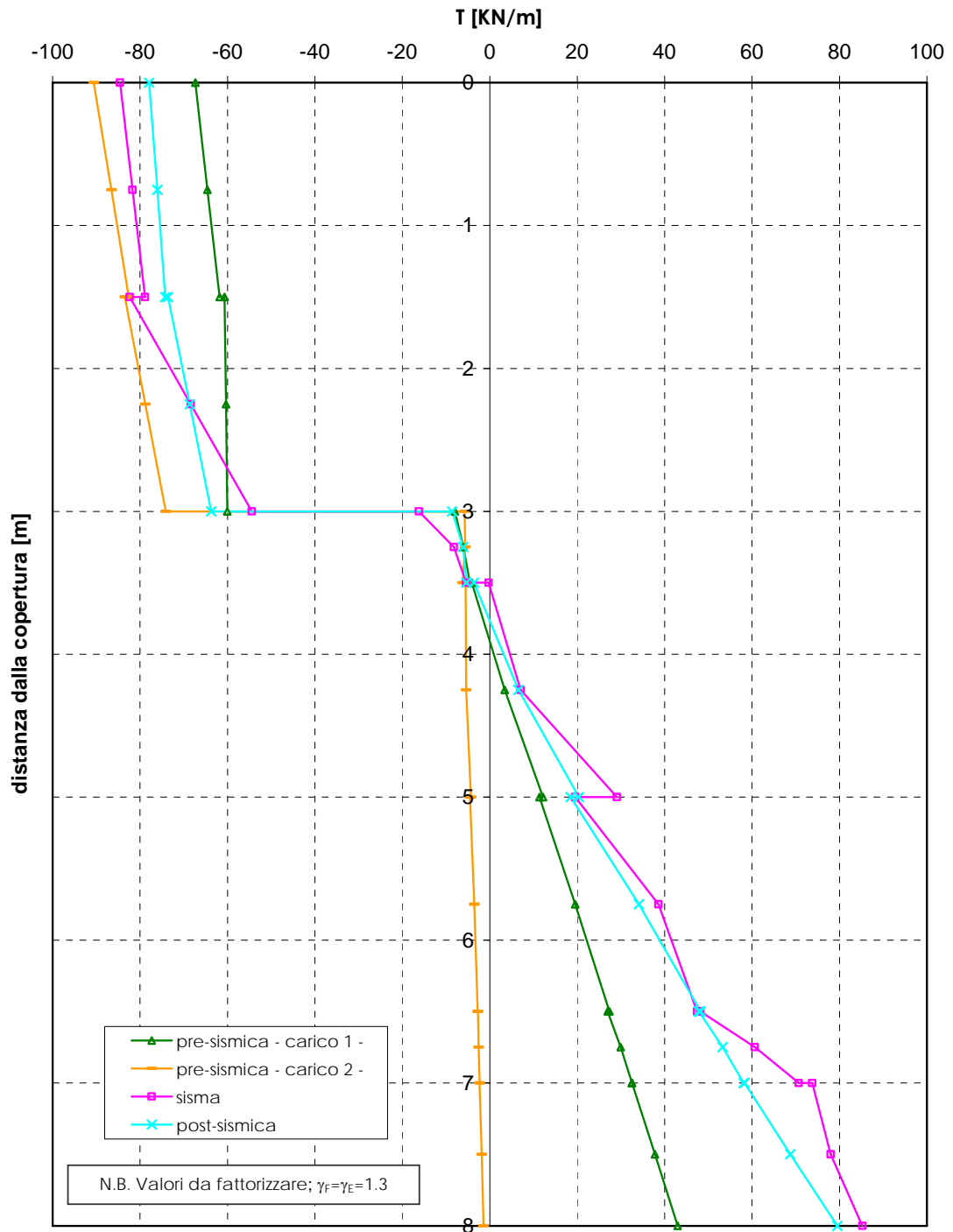


Figura 4.41b

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpodereale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Andamento dei tagli nelle varie fasi nella copertura dello scatolare

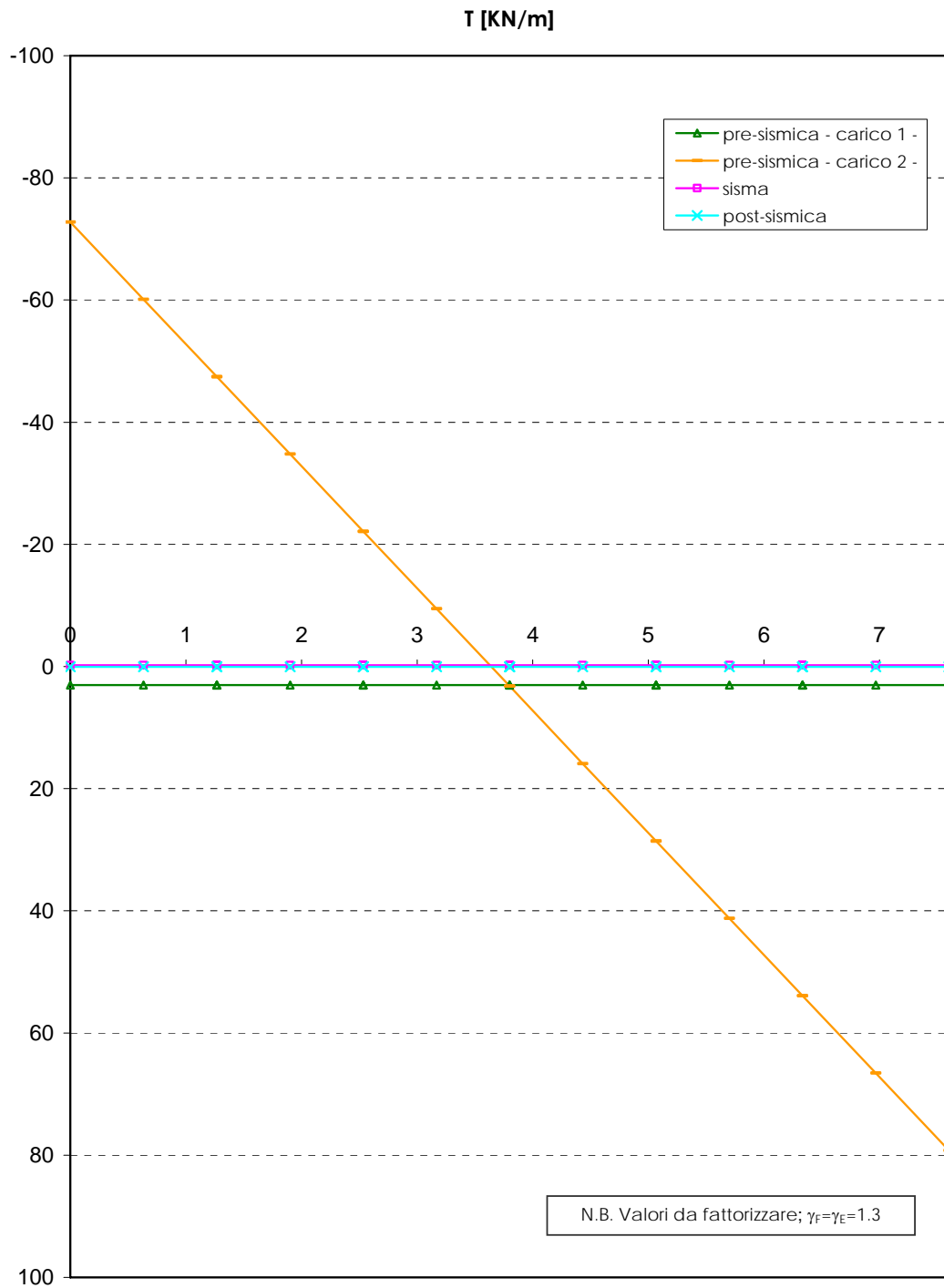


Figura 4.41c

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Andamento delle azioni assiali nelle varie fasi nel ritto di sinistra dello scatolare

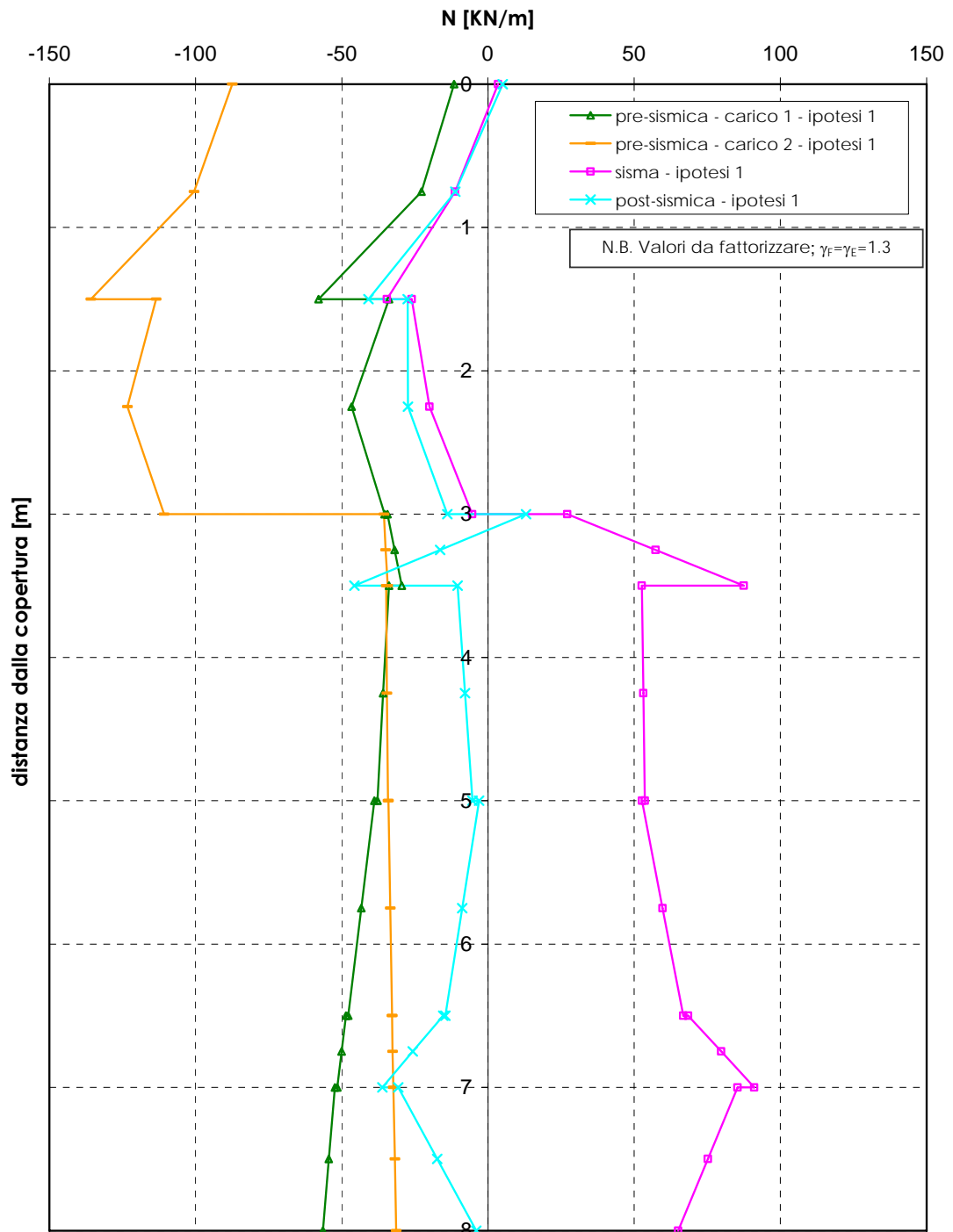


Figura 4.42a₁

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Andamento delle azioni assiali nelle varie fasi nel ritto di sinistra dello scatolare

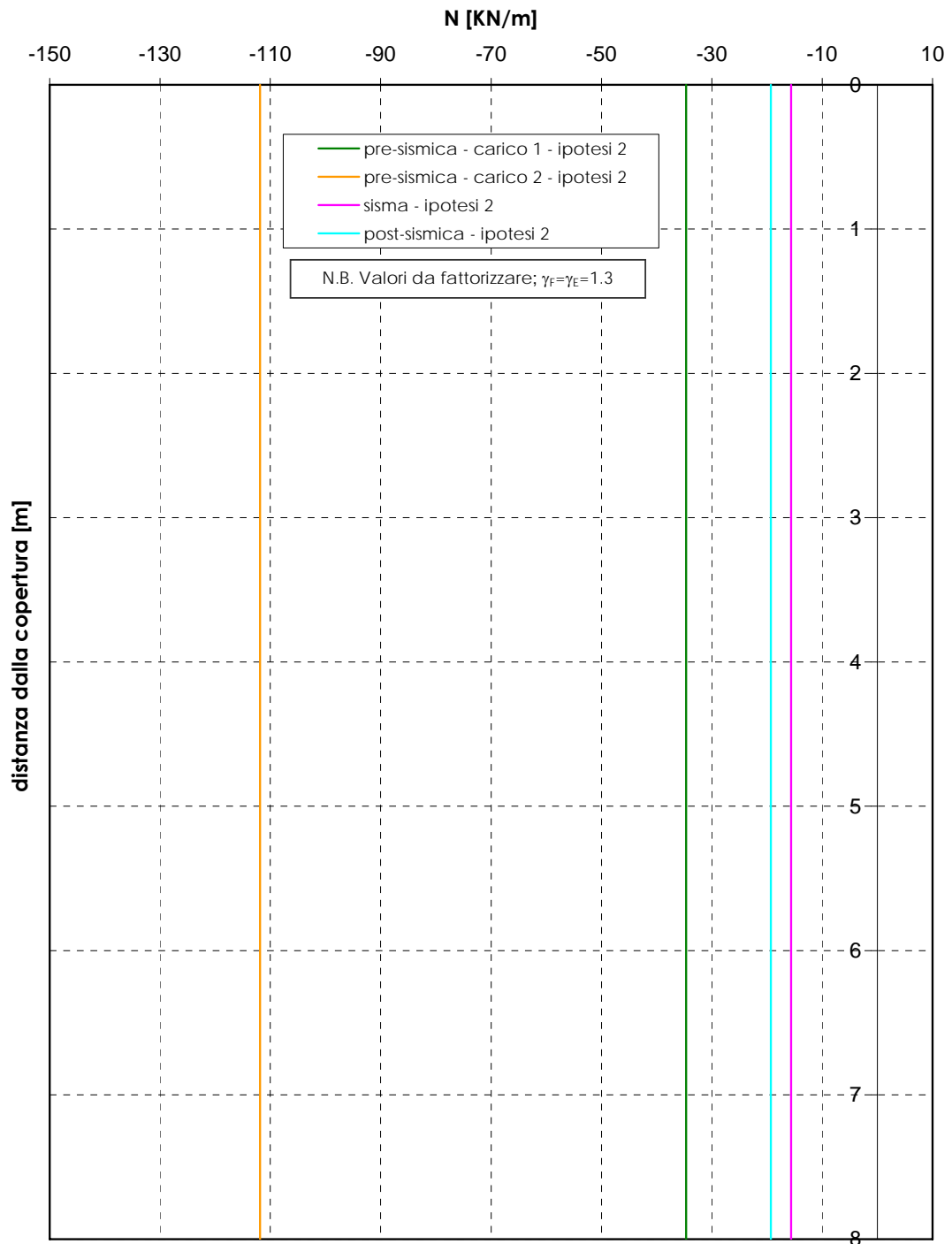


Figura 4.42a₂

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpodereale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Andamento delle azioni assiali nelle varie fasi nel ritto di destra dello scatolare

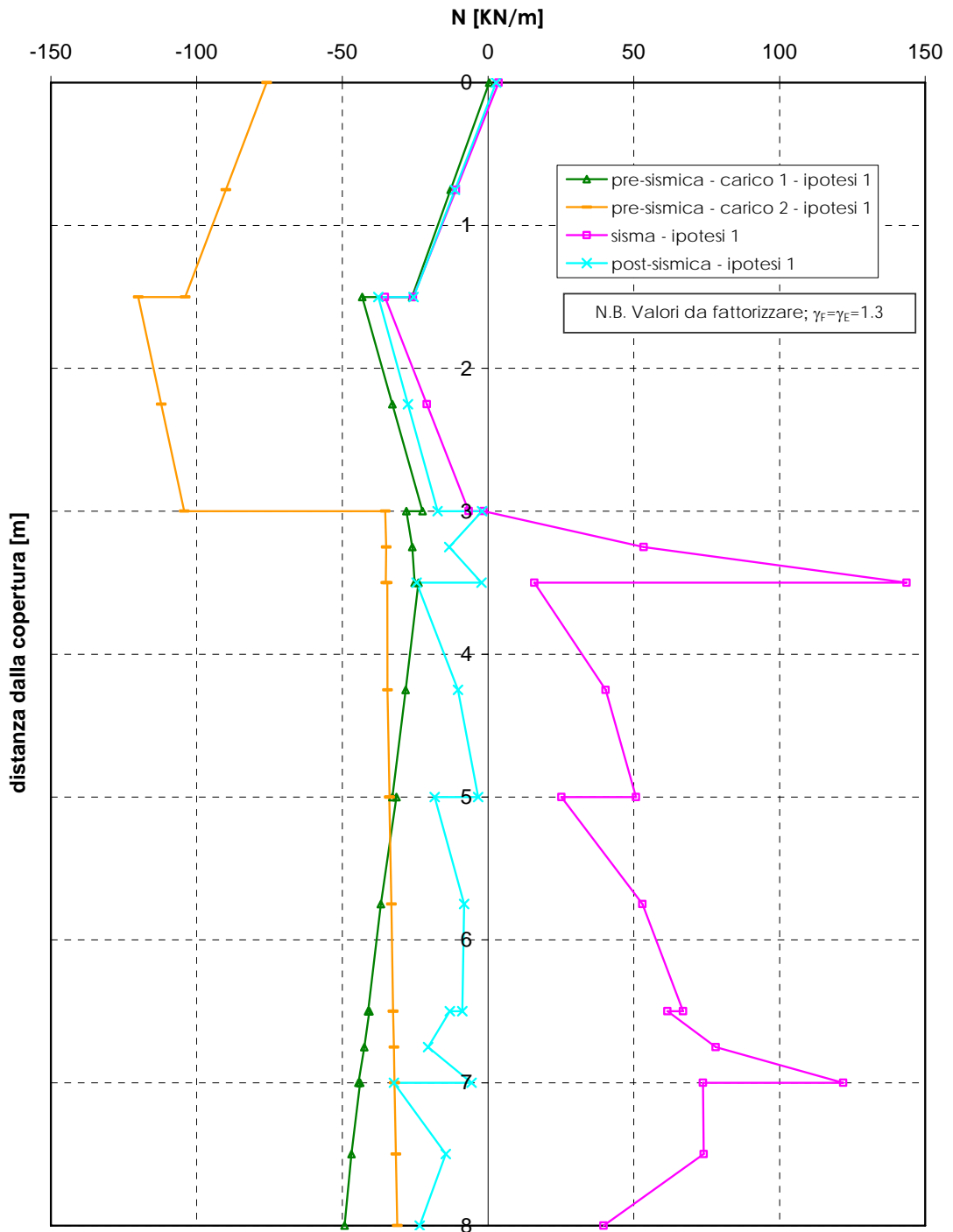


Figura 4.42b₁

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Andamento delle azioni assiali nelle varie fasi nel ritto di destra dello scatolare

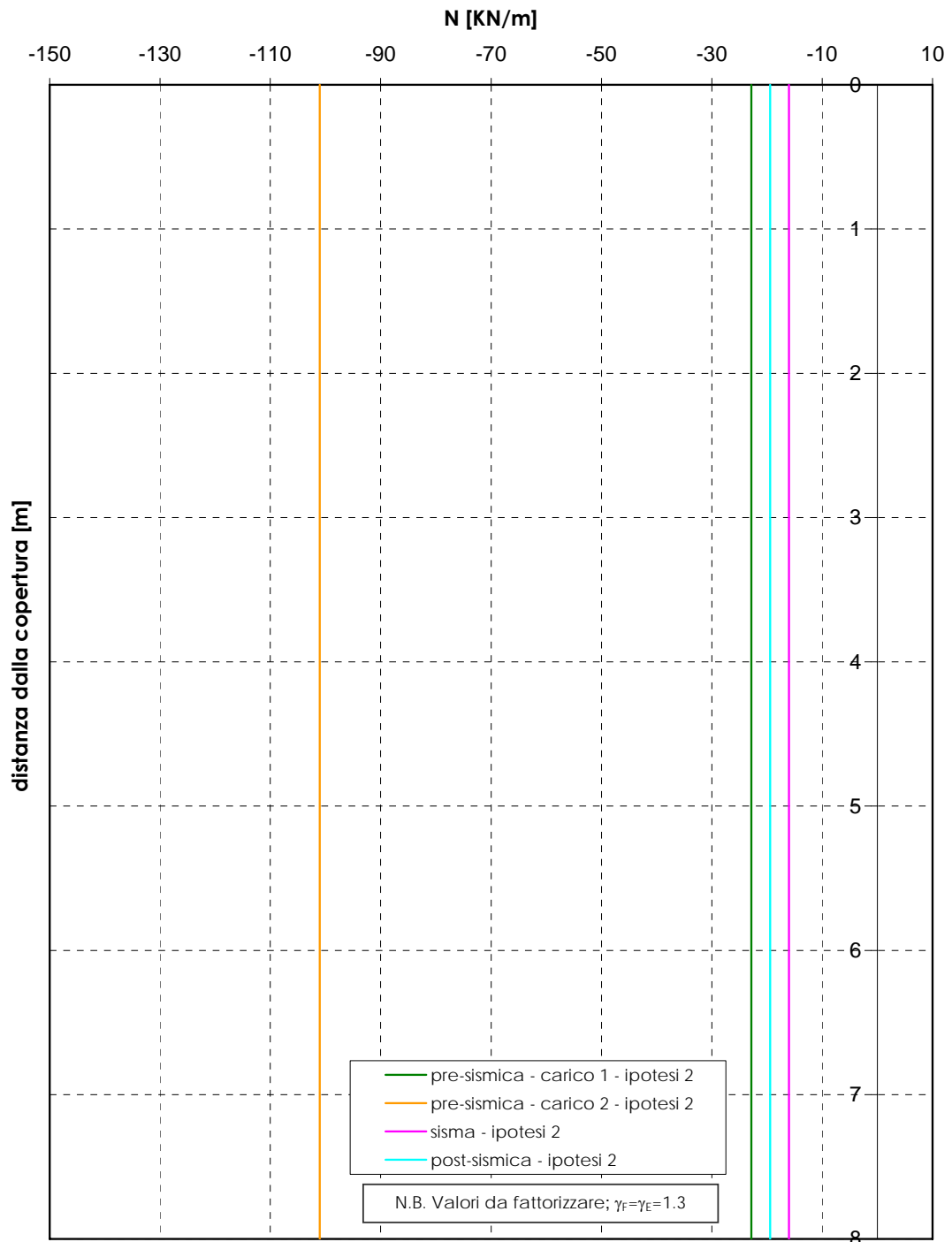


Figura 4.42b₂

Analisi PLAXIS - Opera di sostegno strada interpoderale - Tratto in scatolare - Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1)
 Andamento delle azioni assiali nelle varie fasi nella copertura dello scatolare

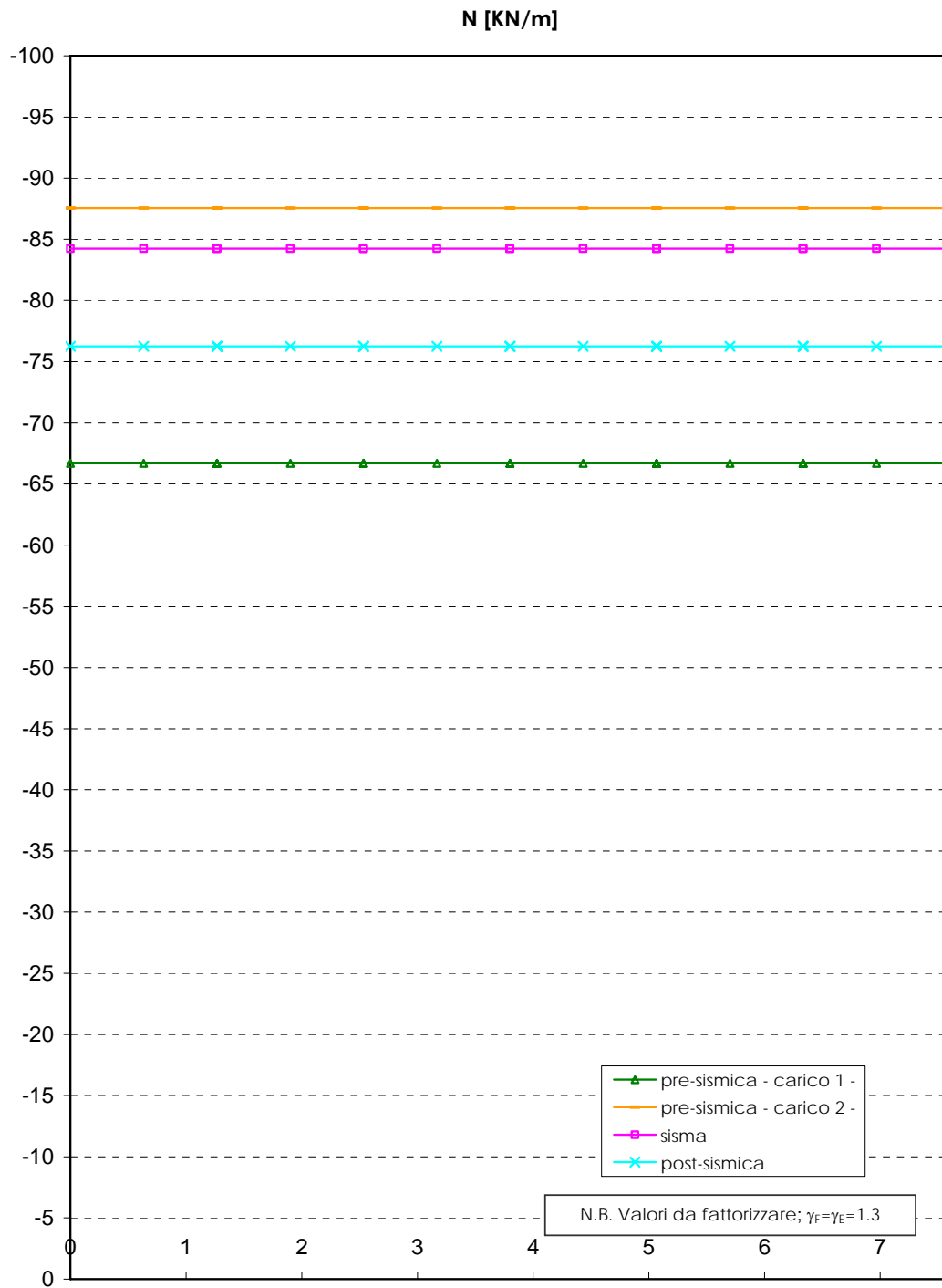


Figura 4.42c

APPENDICE 1

**Validazione del modello numerico PLAXIS ai fini della propagazione del segnale
nella fase che riproduce l'evento sismico**

Nella presente appendice vengono presentati i risultati di un'analisi di risposta sismica locale effettuata con il codice di calcolo [PLAXIS \(vers.8.6\)](#) adottando un modello numerico 2D simile a quelli utilizzati per l'analisi statica e dinamica delle opere di sostegno e di presidio della bretella autostradale.

Scopo dell'analisi è verificare che il segnale (accelerogramma) imposto alla base del modello numerico si propaghi verso l'alto correttamente, ovvero in accordo a quanto ricavabile in un'analisi "rigorosa" 1D con il codice di calcolo EERA.

Nella **Figura A1.1** viene riportata la griglia di calcolo utilizzata per la verifica di cui sopra con le relative dimensioni.

Alla base del modello numerico [PLAXIS \(vers.8.6\)](#), a profondità di 100 m dal p.c., viene imposto un accelerogramma (**Figura A1.2**) che deriva dall'analisi di risposta sismica locale con il codice di calcolo EERA, partendo da un accelerogramma su suolo rigido in superficie tipo quello del Friuli, Stazione di Tolmezzo (si veda il [Doc. Rif. \[15\]](#)).

La risposta del modello numerico in superficie è riportata nella **Figura A1.3** e nella **Figura A1.4**.

La **Figura A1.3** mette a confronto l'accelerogramma ottenuto in superficie con [PLAXIS, in mezzeria del modello numerico](#), con l'accelerogramma ottenuto in superficie con EERA; il confronto appare del tutto soddisfacente-

La **Figura A1.4** mette a confronto gli accelerogrammi ottenuti in superficie con [PLAXIS, in mezzeria e ai bordi del modello numerico](#); anche in questo caso il confronto è soddisfacente.

Entrambi i confronti indicano che la risposta del modello numerico [PLAXIS](#) in termini di accelerogramma in superficie non risente di effetti indotti dai confini del modello.

La **Figura A1.5** riporta il confronto tra l'andamento dei moduli di taglio iniziali di input per l'analisi con il codice di calcolo [PLAXIS](#) (modello costitutivo di [Al Tabbaa & Wood, 1989](#), si veda il [Doc.Rif.\[14\]](#)) e quello derivante dall'analisi con il codice di calcolo EERA (modello costitutivo non lineare ed isteretico con approssimazione lineare-equivalente, si veda il [Doc.Rif.\[15\]](#)); nella stessa figura è riportato l'andamento del modulo di taglio iniziale G_0 riportato nel [Doc.Rif.\[14\]](#)). I tre andamenti del modulo sono fra loro compatibili.

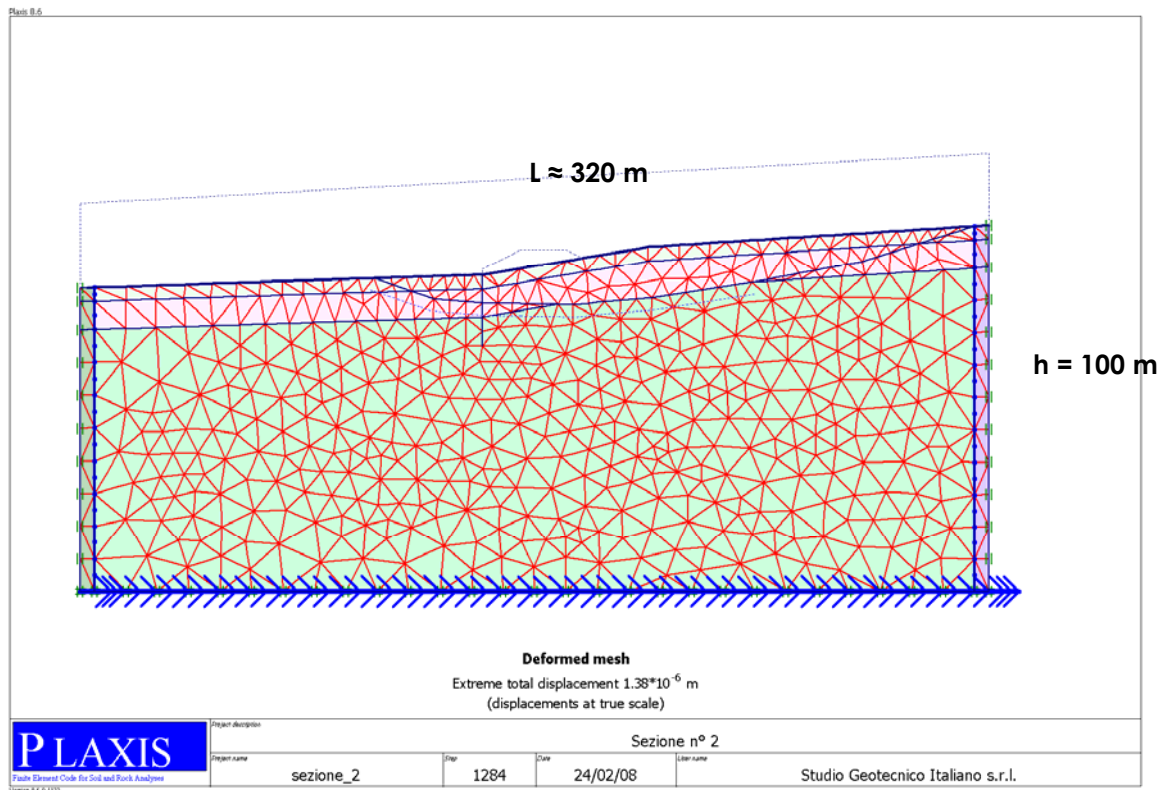


Figura A1.1

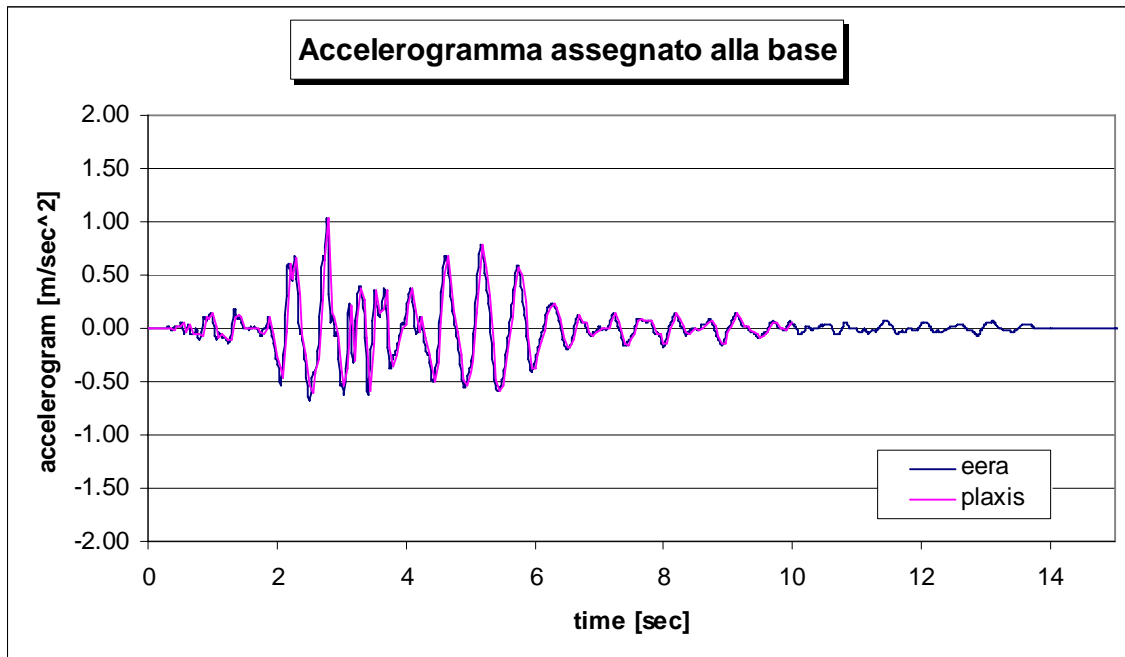


Figura A1.2

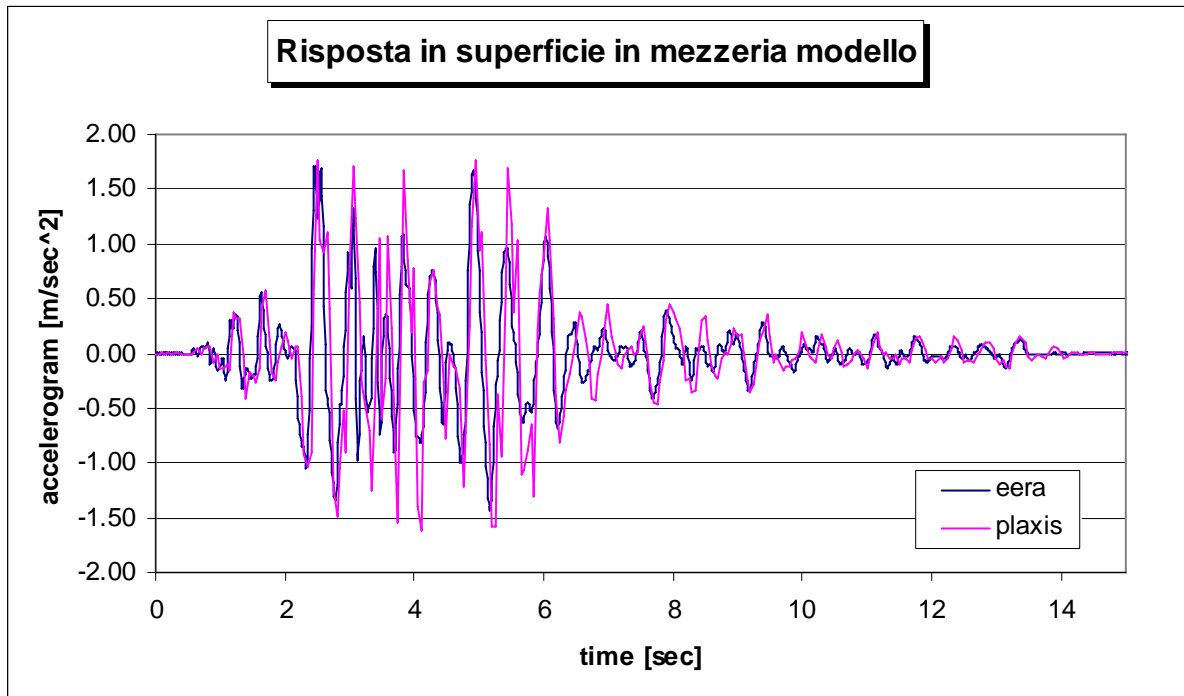


Figura A1.3

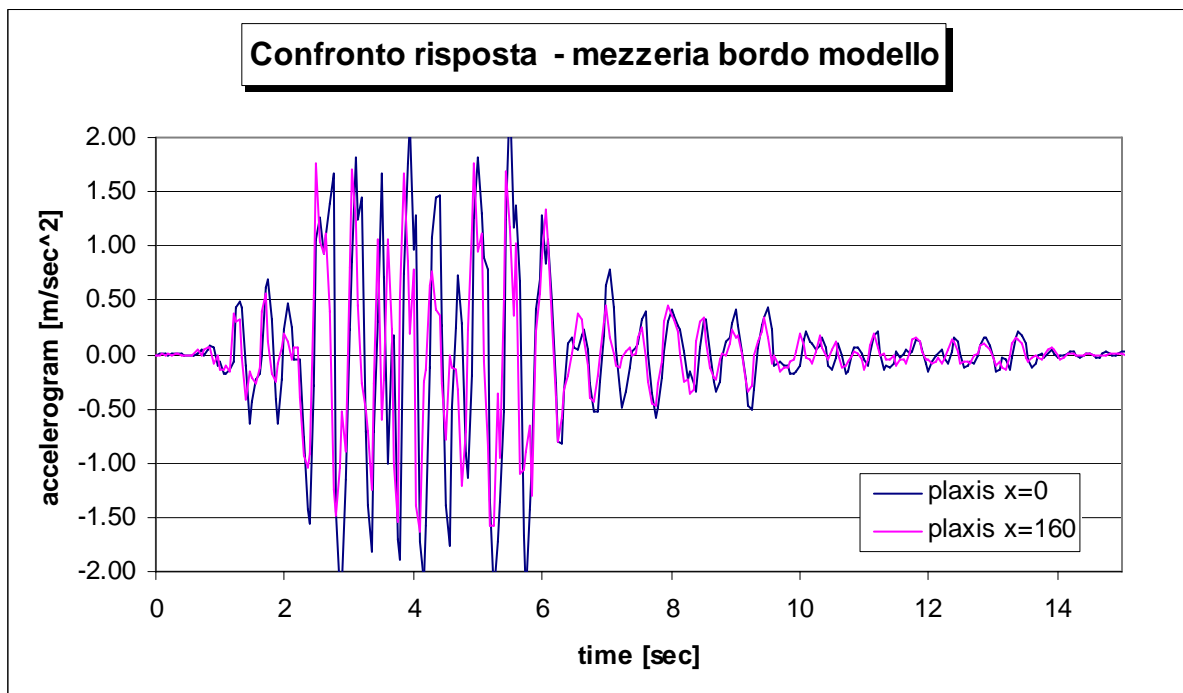


Figura A1.4

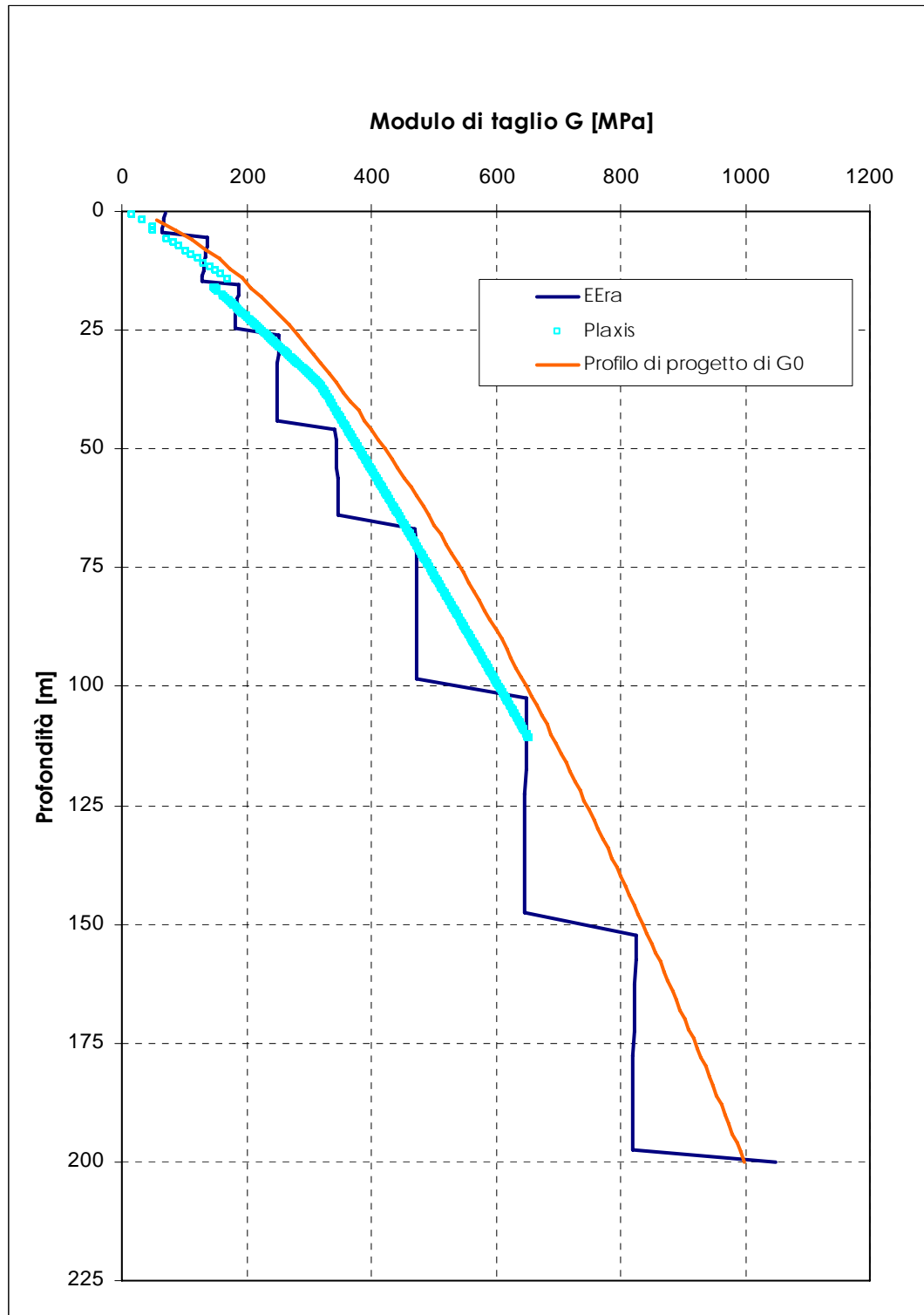


Figura A1.5

APPENDICE 2

Metodo statico equivalente – Valutazione degli effetti prodotti dal terremoto in termini di regimi di spinta sull'opera di sostegno

Nel caso di geometrie del piano campagna regolari, la spinta delle terre in condizioni sismiche può essere calcolata ricorrendo al metodo statico-equivalente (o pseudostatico) e alla formulazione di Mononobe-Okabe (si vedano anche le Norme Tecniche per le Costruzioni, 14 Gennaio 2008); in accordo a tale formulazione, vale quanto segue:

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \gamma^* \cdot K \cdot H^2 \quad [5.1]$$

dove P_d è la spinta delle terre, comprendente sia la componente di pressione statica sia la componente di pressione dinamica, H è l'altezza dell'opera di sostegno, e γ^* è il peso di volume del terreno, definito nel seguito in relazione alla posizione della falda. Infine K è il coefficiente di spinta delle terre (statico + dinamico) ed è fornito dalle seguenti relazioni:

Stato di Equilibrio Limite Attivo:

$$\beta \leq \phi - \vartheta: \quad K = \frac{\sin^2(\psi + \phi - \vartheta)}{\cos(\vartheta) \cdot \sin^2(\psi) \cdot \sin(\psi - \vartheta - \delta) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \beta - \vartheta)}{\sin(\psi - \vartheta - \delta) \cdot \sin(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

$$\beta > \phi - \vartheta: \quad K = \frac{\sin^2(\psi + \phi - \vartheta)}{\cos(\vartheta) \cdot \sin^2(\psi) \cdot \sin(\psi - \vartheta - \delta)}$$

Stato di Equilibrio Limite Passivo (si assume nullo l'angolo di attrito terreno-muro di sostegno):

$$K = \frac{\sin^2(\psi - \phi + \vartheta)}{\cos(\vartheta) \cdot \sin^2(\psi) \cdot \sin(\psi + \vartheta) \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi) \cdot \sin(\phi + \beta - \vartheta)}{\sin(\psi + \beta) \cdot \sin(\psi + \vartheta)}} \right]^2}$$

dove ϕ e δ sono rispettivamente l'angolo di resistenza al taglio del terreno, e l'angolo di attrito terreno-opera di sostegno, mentre il significato degli angoli ψ e β è illustrato nella **Figura A2.1**.

L'angolo ϑ che appare nelle equazioni sopra riportate è funzione del coefficiente sismico k_h e della posizione della falda.

Nei casi, quali quello in esame, di terreni impermeabili e sovraconsolidati, in cui possano essere considerate trascurabili le sovrappressioni interstiziali indotte dal terremoto, il regime di spinta delle terre e dell'acqua sull'opera di sostegno può essere stimato come segue.

- Spinta delle terre: il calcolo della spinta viene condotto secondo le formule di Mononobe-Okabe, utilizzando per il peso di volume γ^* del terreno e per l'angolo ϑ i seguenti valori:

$$\gamma^* = \gamma - \gamma_w \quad [5.4a]$$

$$\tan(\vartheta) = \frac{\gamma}{\gamma - \gamma_w} \cdot k_h \quad [5.4b]$$

dove γ e γ_w sono il peso di volume saturo del terreno e dell'acqua rispettivamente.

- Spinta idrodinamica: non esiste componente dinamica P_{wd} della spinta dell'acqua interstiziale. Pertanto alla spinta delle terre sopra definita occorre aggiungere solo la pressione idrostatica P_{ws} .

Nell'applicazione del metodo sopra descritto valgono le seguenti precisazioni:

- Le formule di Mononobe-Okabe sono state ottenute mediante una procedura che può considerarsi una diretta estensione al caso pseudo-statico della teoria del cuneo di spinta di Coulomb valida in campo statico; esse sono soggette pertanto alle limitazioni della teoria di Coulomb, tra le quali particolarmente

importante è la sovrastima della spinta passiva a causa dell'assunzione di una superficie di scorrimento piana.

Per tale motivo nella valutazione della spinta passiva si assume nullo il valore dell'angolo δ di attrito terreno-opera di sostegno.

Per il calcolo della spinta attiva mediante l'equazione si adotta invece un angolo δ pari a $(2/3)\phi$.

- Per quel che concerne il punto di applicazione della spinta attiva, la teoria di Mononobe-Okabe non fornisce indicazioni esplicite in merito; in accordo alle Norme Tecniche per le Costruzioni del 14 Gennaio 2008, si assume che la componente dinamica della spinta (ottenuta come differenza tra la spinta calcolata con la formula di Mononobe-Okabe e la spinta in condizioni statiche) agisca a 1/3 dell'altezza complessiva dell'opera di sostegno. Nell'analisi con il codice di calcolo [PARATIE](#) tale componente dinamica viene introdotta come pressione esterna ad andamento triangolare, con base in corrispondenza della testa della paratia.
- Relativamente al coefficiente sismico k_h , in accordo alle Norme Tecniche per le Costruzioni del 14 Gennaio 2008, vale la seguente relazione:

$$k_h = \frac{a_{\max}}{g} \cdot \alpha \cdot \beta$$

dove a_{\max} è l'accelerazione massima in superficie ottenuta dall'analisi di risposta sismica locale (si veda il [Doc.Rif.\[15\]](#)) e il termine $\alpha \cdot \beta$ dipende dall'altezza complessiva della paratia, dalla categoria di sottosuolo e dal tipo di struttura, con particolare riferimento all'entità dello spostamento massimo che può essere tollerato; tale termine deve essere comunque superiore a 0.2.

- In accordo alle Norme Tecniche per le costruzioni del 14 Gennaio 2008, nel caso delle paratie il coefficiente sismico k_v può essere considerato pari a 0.

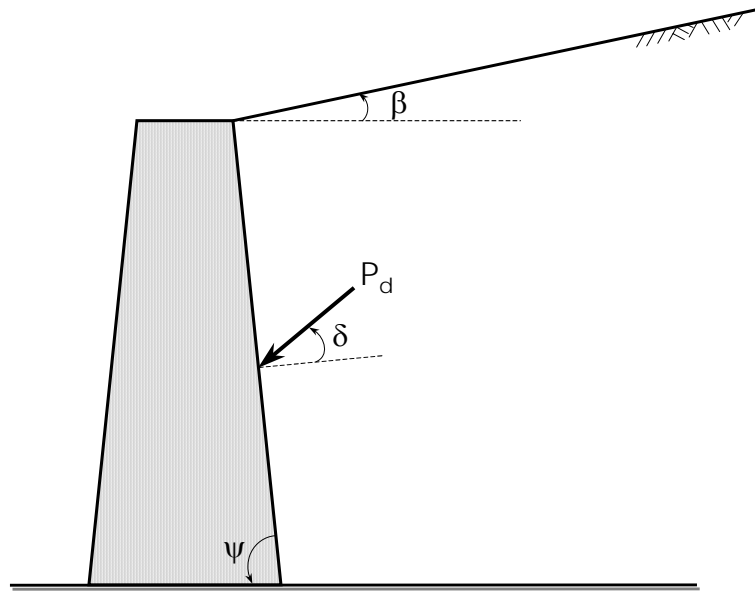


Figura A2.1: Simbologia della formula di Mononobe-Okabe