



AREA SERVIZI TERRITORIALI METROPOLITANI  
Servizio Progettazione Costruzioni e Manutenzione Strade

INTERVENTO FINANZIATO NELL'AMBITO DEL PATTO PER BOLOGNA

VARIANTE ALLA S.P. 65 "DELLA FUTA"

NODO DI RASTIGNANO - 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO  
TRATTO COMPRESO TRA SVINCOLO DI RASTIGNANO E PONTE DELLE OCHE  
NEI COMUNI DI SAN LAZZARO DI SAVENA, BOLOGNA E PIANORO

## PROGETTO DEFINITIVO

### CORPO STRADALE

IDROLOGIA – IDRAULICA

SISTEMAZIONI IDRAULICHE TORRENTE SAVENA

PARATIA NEI PRESSI DEL PONTE STORICO – RELAZIONE DI CALCOLO

#### IL PROGETTISTA SPECIALISTICO

Ing. Marco Pietro D'Angelantonio  
Ord. Ingg. Milano N.20155

RESPONSABILE GEOTECNICA  
ALL'APERTO

#### IL RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

Ing. Raffaele Rinaldesi  
Ord. Ingg. Macerata N. A1068

#### IL DIRETTORE TECNICO

Ing. Orlando Mazza  
Ord. Ingg. Pavia N. 1496

PROGETTAZIONE NUOVE OPERE AUTOSTRADALI

#### CODICE IDENTIFICATIVO

CODICE IDENTIFICATIVO																	Ordinatore:														
RIFERIMENTO PROGETTO					RIFERIMENTO DIRETTORIO							RIFERIMENTO ELABORATO																			
Codice Commessa		Lotto, Cod.	Sub- Prog. Appalto	Fase	Capitolo	Paragrafo	WBS tipologia progressivo		PARTE D'OPERA			Tip.	Disciplina	Progressivo		Rev.															
1	1	1	4	4	4	0	0	0	1	P	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	A	P	E	0	0	5	1	—	—	SCALA: —



#### PROJECT MANAGER:

Ing. Raffaele Rinaldesi  
Ord. Ingg. Macerata N. A1068

#### REDATTO:

#### SUPPORTO SPECIALISTICO:



#### VERIFICATO:

#### REVISIONE

n.	data
0	FEBBRAIO 2018
1	—
2	—
3	—
4	—

#### VISTO DEL PROPRIETARIO DELLE OPERE



IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO  
Ing. Pietro Luminasi

#### VISTO DEL CONCEDENTE



Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti  
DIPARTIMENTO PER LE INFRASTRUTTURE, GLI AFFARI GENERALI ED IL PERSONALE  
STRUTTURA DI VIGILANZA SULLE CONCESSIONARIE AUTOSTRADALI

# **SPEA Engineering**

**VARIANTE ALLA SP65 “DELLA FUTA”**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI  
COMPLETAMENTO**

TRATTO COMPRESO TRA SVINCOLO DI RASTIGNANO E PONTE  
DELLE OCHE NEI COMUNI DI SAN LAZZARO DI SAVENA, BOLOGNA E  
PIANORO

**RELAZIONE ILLUSTRATIVA E DI CALCOLO  
DELLA PARATIA DI MICROPALI FRONTE ALVEO**



## INDICE

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>4</b>
<b>2. NORMATIVA E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO.....</b>	<b>5</b>
<b>3. QUALITÀ E CARATTERISTICHE DEI MATERIALI .....</b>	<b>6</b>
<b>4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI .....</b>	<b>7</b>
<b>5. RIFERIMENTI NORMATIVI .....</b>	<b>8</b>
<b>6. TIPOLOGIE COSTRUTTIVE UTILIZZATE.....</b>	<b>9</b>
<b>7. CONFIGURAZIONE TERRENO A TERGO PARATIA.....</b>	<b>10</b>
<b>8. STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO .....</b>	<b>11</b>
<b>9. METODO DI CALCOLO DELLE PARATIE MULTIANCORATE.....</b>	<b>13</b>
<b>9.1 DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI CALCOLO .....</b>	<b>13</b>
<b>9.2 PARAMETRI UTILIZZATI NEI CALCOLI – LATO SCAVO.....</b>	<b>18</b>
9.2.1 •SLU Combinazione 1 (A1+M1+R1) e SLE .....	18
9.2.2 SLU Combinazione 2 (A2+M2+R2): parametri del terreno fattorizzati .....	18
<b>9.3 PARAMETRI UTILIZZATI NEI CALCOLI – LATO TERRA.....</b>	<b>19</b>
9.3.1 •SLU Combinazione 1 (A1+M1+R1) e SLE .....	19
9.3.2 Combinazione 2 (A2+M2+R2): parametri del terreno fattorizzati .....	19
<b>9.4 ANALISI DEI CARICHI.....</b>	<b>20</b>
<b>9.5 VALUTAZIONE DELLE RIGIDEZZA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI.....</b>	<b>20</b>
<b>9.6 RISULTATI DELLE ELABORAZIONI – SLU .....</b>	<b>22</b>
9.6.1 Combinazione 1: A1+M1+R1(=1).....	22
9.6.2 Combinazione 2: A2+M2+R1(=1).....	22
<b>9.7 RISULTATI DELLE ELABORAZIONI – SLE COMBINAZIONE CARATTERISTICA .....</b>	<b>26</b>
<b>9.8 VERIFICHE GEOTECNICHE DELLA PARATIA .....</b>	<b>29</b>
<b>9.9 VERIFICHE MICROPALI.....</b>	<b>30</b>
9.9.1 Verifiche strutturali agli SLU - Sismica .....	30
<b>9.9 VERIFICHE TIRANTI .....</b>	<b>31</b>
9.9.2 Verifiche dell'armatura dei tiranti - Sisma .....	31
9.9.3 Verifiche della fondazione – Sisma .....	31

## FIGURE

Figura 1-1: Sezione tipo

4


	<p style="text-align: center;">VARIANTE ALLA SP65 “DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo</p> <p style="text-align: center;"><b>RELAZIONE ILLUSTRATIVA E DI CALCOLO DELLA PARATIA FRONTE ALVEO</b></p>
---	--

Figura 6-1: Sezione tipologica paratia 1P	9
Figura 7-1: Schema per la determinazione del profilo di calcolo della scarpata con banca (“Engineer Manual 1110-2-2502, 25 September 1989 – Retaining and flood walls”).	10
Figura 9-1: Relazioni costitutive per il terreno e per i contrasti.	16
Figura 9-2: Parametri di spinta attiva e passiva.	17
Figura 9-3: Andamento Momento flettente – Tipologia 1P – Combinazione 1 <b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>	
Figura 9-4: Andamento Taglio – Tipologia 1P – Combinazione 1 <b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>	
Figura 9-5: Andamento Momento flettente – Tipologia 1P – Combinazione 2 <b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>	
Figura 9-6: Andamento Taglio – Tipologia 1P – Combinazione 2 <b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>	
Figura 9-7: Andamento Momento flettente – Tipologia 1P – Combinazione SLE	27
Figura 9-8: Andamento Taglio – Tipologia 1P – Combinazione SLE	28
Figura 9-9: Andamento Deformata – Tipologia 1P – Combinazione SLE <b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>	
Figura 9-10: Combinazione SLU A2+M2 – Diagramma pressioni limiti e mobilitate.	29

## TABELLE

Tabella 3-1: Caratteristiche dei materiali impiegati.	6
Tabella 4-1: Parametri geotecnici caratteristici adottati nelle elaborazioni.	7
Tabella 8-1: Stratigrafia di calcolo	11
Tabella 8-2: Parametri geotecnici caratteristici.	11
Tabella 8-3: Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno.	11
Tabella 8-4: Parametri geotecnici di progetto M1.	11
Tabella 8-5: Stratigrafia di calcolo e Parametri geotecnici di progetto M2.	12
Tabella 9-1: Coefficienti parziali per la resistenza degli ancoraggi.	32

## 1. PREMESSA

Nell'ambito del progetto del II Lotto della Variante di Rastignano, si prevede la realizzazione di risezionamento dell'alveo fluviale del torrente Savena al fine di migliorare il deflusso delle acque. Le sponde arginali saranno localmente rivestite da scogliere in massi con una paratia di micropali al piede al fine di evitare lo scalzamento della scogliera e del rilevato stradale posto a tergo. La presente relazione riporta i calcoli geotecnici e strutturali della suddetta paratia di cui la figura seguente mostra la sezione tipica.

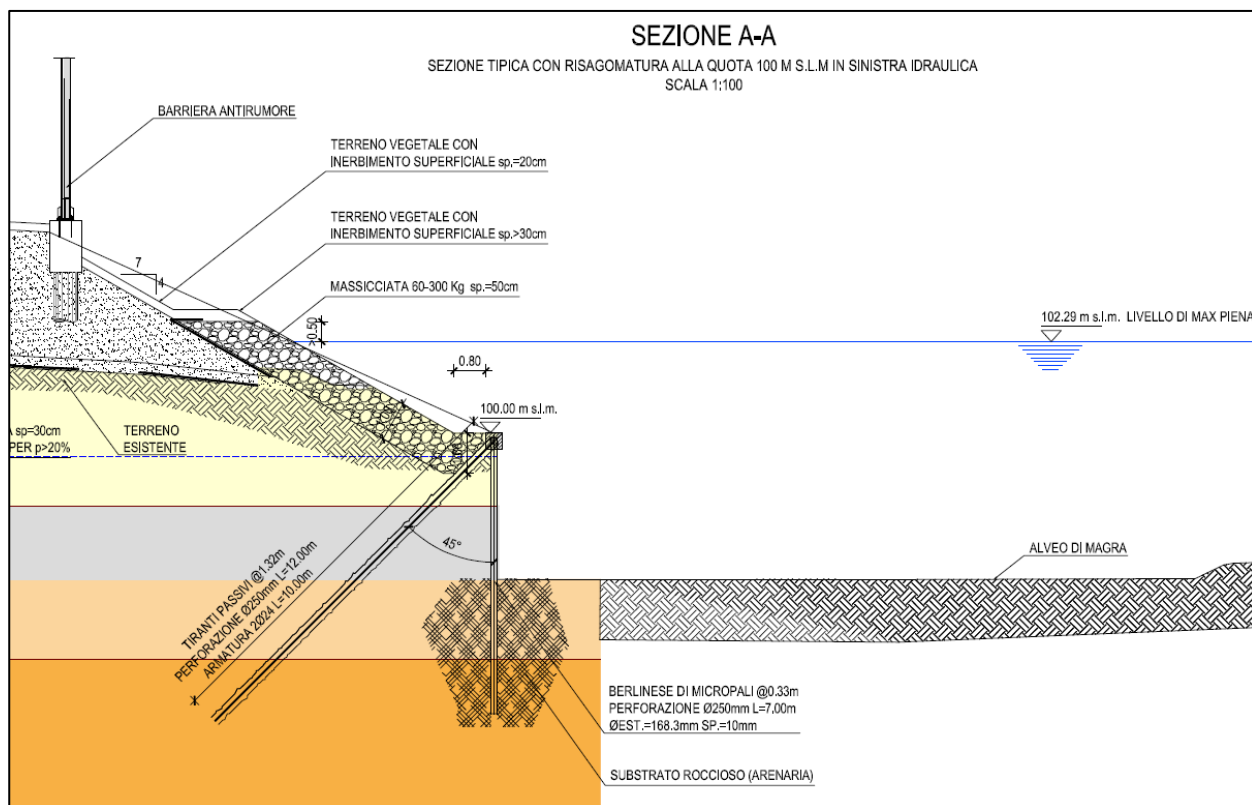



Figura 1-1: Sezione tipo

 gruppo Atlantia	<b>VARIANTE ALLA SP65 “DELLA FUTA</b> <b>NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO</b> Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro <b>Progetto Definitivo</b> <b>RELAZIONE ILLUSTRATIVA E DI CALCOLO DELLA PARATIA FRONTE ALVEO</b>
--	--

## 2. NORMATIVA E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

- **Decreto Min. Infrastrutture e Trasporti 14 Gennaio 2008** *“Norme tecniche per le costruzioni”*.
- **Circolare 2 febbraio 2009, n. 617** - *Istruzioni per l’applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008.*
- **UNI EN 1997-1:2005** *“Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 1: Regole generali”*.
- **UNI EN 1992-1-1:2005** *“Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici”*.
- **UNI EN 206-1:2006** *“Calcestruzzo Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità”*
- **EN 1537:2002** *“Esecuzione di lavori geotecnici speciali – tiranti di ancoraggio”*
- **AICAP**, *“Ancoraggi nei terreni e nelle rocce”*, raccomandazioni, maggio 1993.
- **M. Bustamante, B. Doix**, *“Une methode pour le calcul des tirants et des micropieux injectes”*.

### 3. QUALITÀ E CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Si adotteranno materiali uniformi a quanto prescritto dal CSA ed ai paragrafi 11.2 e 11.3 delle "Norme tecniche per le costruzioni". In particolare per le opere in oggetto si prevedono i conglomerati cementizi e l'acciaio le cui caratteristiche sono descritte in Tabella 3-1.

*Tabella 3-1: Caratteristiche dei materiali impiegati.*

CALCESTRUZZO	
Impiego	Travi - Micropali
Classe di resistenza	C25/30
Resistenza caratteristica cubica a compressione $R_{ck}$	30 MPa
Resistenza caratteristica cilindrica a compressione $f_{ck} = 0.83 \cdot R_{ck}$	25 MPa
Valor medio della resistenza a trazione semplice $f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{ck}^{2/3}$	2.56 MPa
Valor medio della resistenza cilindrica $f_{cm} = f_{ck} + 8$	33 MPa
Valor medio della resistenza a trazione per flessione $f_{ctm} = 1.2 \cdot f_{ctm}$	3.07 MPa
Modulo elastico $E_{cm}$	31476 MPa
ACCIAIO PER CEMENTO ARMATO	
Tipo	B450C
Tensione caratteristica di snervamento $f_{y\ nom}$	450 N/mm <sup>2</sup>
Tensione caratteristica di rottura $f_{t\ nom}$	540 N/mm <sup>2</sup>
ACCIAIO PER MICROPALI	
Tipo	S275H
Tensione caratteristica di snervamento $f_{yk}$	275 N/mm <sup>2</sup>
Tensione caratteristica di rottura $f_{tk}$	430 N/mm <sup>2</sup>
ACCIAIO PER TRAVI DI RIPARTIZIONE	
Tipo	S275
Tensione caratteristica di snervamento $f_{yk}$	275 N/mm <sup>2</sup>
Tensione caratteristica di rottura $f_{tk}$	430 N/mm <sup>2</sup>

#### 4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI

Facendo riferimento alla relazione geologico-geotecnica di progetto e alla caratterizzazione geotecnica risulta che, in corrispondenza delle opere in esame, lo spessore del terreno naturale significativo ai fini geotecnici è costituito da quattro unità stratigrafiche ovvero:

- DAS (Depositi alluvionali)
- DAG (Depositi alluvionali prevalentemente incoerenti);
- PAT alt (Substrato di Arenarie di Pantano alterato);
- PAT (Substrato di Pantano intatto).


Di conseguenza i parametri geotecnici caratteristici delle unità stratigrafiche considerate adottati nei calcoli sono indicati in Tabella 4-1.

*Tabella 4-1: Parametri geotecnici caratteristici adottati nelle elaborazioni.*

UNITÀ STRATIGRAFICA	DAS	DAG	PAT alt	PAT
Peso specifico $\gamma$ [ kN/m <sup>3</sup> ]	20.0	20.0	22	22
Coesione $c'$ [kPa]	0.0	0.0	22	55
Angolo d'attrito $\phi'$ [°]	34	37	25	33

Il livello di falda è stato assunto alla quota + 99.40 m s.l.m..



 gruppo Atlantia	<b>VARIANTE ALLA SP65 “DELLA FUTA</b> <b>NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO</b> Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo <b>RELAZIONE ILLUSTRATIVA E DI CALCOLO DELLA PARATIA FRONTE ALVEO</b>
--	---

## 5. RIFERIMENTI NORMATIVI

Conformemente a quanto previsto dal D.M. 14/01/2008 “Norme Tecniche per le Costruzioni” al Par. 6.5.3.1.2 le paratie sono calcolate agli SLU secondo le seguenti combinazioni di coefficienti:

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

dove i coefficienti parziali sono riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.5.I ( $R1=1$ ) della stessa Norma. Per le verifiche agli SLE si fa riferimento al Par. 6.5.3.2 della Norma.

Le verifiche geotecniche dei tiranti di ancoraggio sono condotte secondo il paragrafo 6.6.

Si fa inoltre riferimento per le verifiche agli SLU e agli SLE ai paragrafi 4.1 e 4.2 della Norma.

## 6. TIPOLOGIE COSTRUTTIVE UTILIZZATE

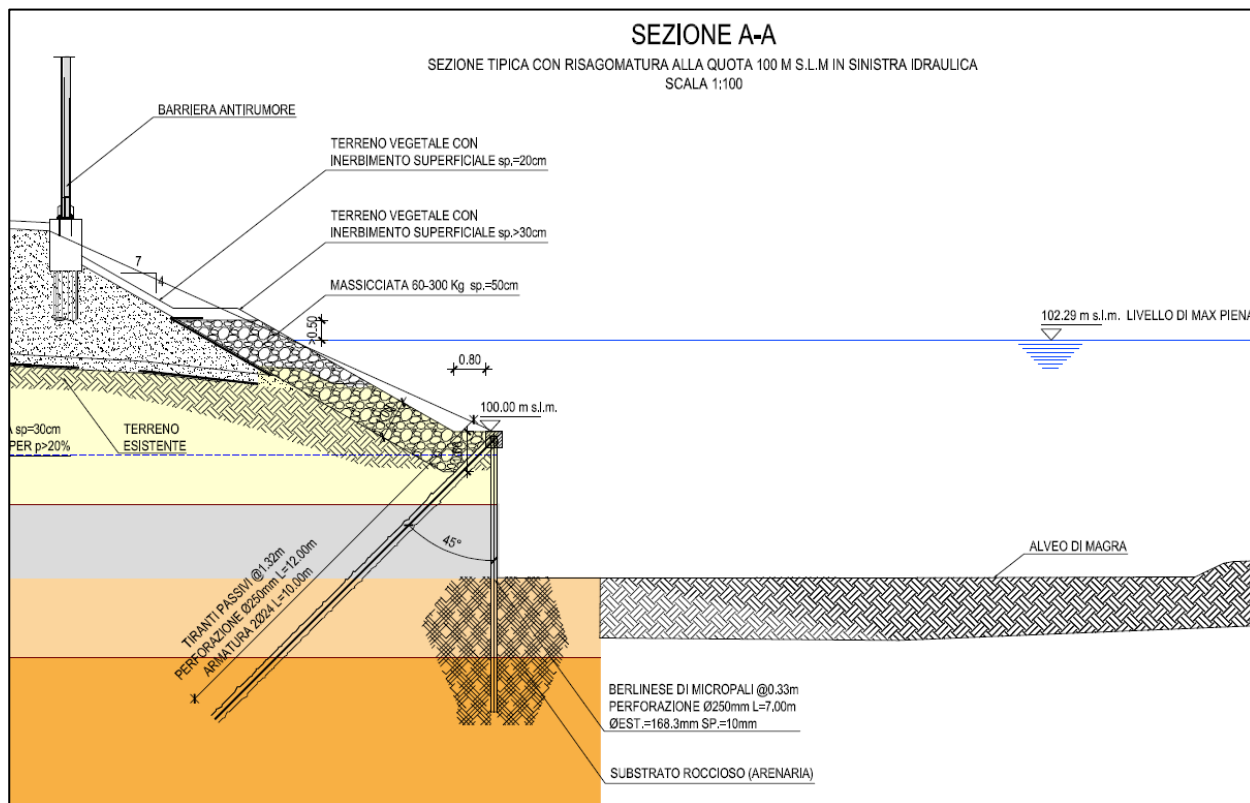


Figura 6-1: Sezione tipologica paratia 1P

- Micropali:
  - tubi Ø168.3 mm e spessore 10 mm;
  - diametro di perforazione = 240 mm;
  - lunghezza micropali h: 7.0 m;
  - interasse 0.33 m.
- Tiranti posti in sommità della paratia:
  - diametro di perforazione = 240 mm;
  - n°2 barre da 24mm di diametro per tirante;
  - inclinazione rispetto all'orizzontale 45°;
  - lunghezza di ancoraggio = 10.0;
  - interasse pari a 1.32 m.

L'estradosso del cordolo della paratia è previsto alla quota +100.0m.

## 7. CONFIGURAZIONE TERRENO A TERGO PARATIA

Il terreno a tergo della paratia è conformato a scarpata, ovvero con tratto inclinato e tratto orizzontale.

Con riferimento al "Engineer Manual 1110-2-2502, 25 September 1989 – Retaining and flood walls" del "Department of the Army – U.S. Army Corps of Engineers", tale configurazione di terreno è stata assimilata ad un pendio indefinito il cui angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale  $\beta_{avg}$  è stata determinata secondo i criteri indicati nella figura seguente.

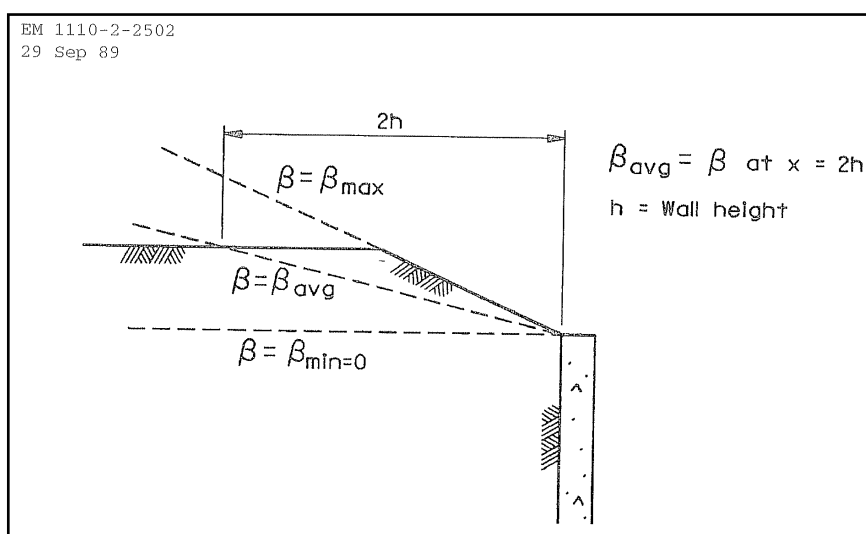


Figura 7-1: Schema per la determinazione del profilo di calcolo della scarpata con banca ("Engineer Manual 1110-2-2502, 25 September 1989 – Retaining and flood walls").

Per il caso in esame è stato assunto un pendio indefinito di  $30^\circ$

## 8. STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

Nelle tabelle seguenti sono riportate la stratigrafia di calcolo ed i parametri.

Tabella 8-1: Stratigrafia di calcolo

Profondità [m] (*)	Unità
da 0.00 a 1.80	DAS
da 1.80 a 3.65	DAG
da 3.65 a 5.65	PAT alt
da 5.65 in poi	PAT

Tabella 8-2: Parametri geotecnici caratteristici.

UNITÀ STRATIGRAFICA	DAS	DAG	PAT alt	PAT
Peso specifico $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	20.0	20.0	22	22
Coesione $c'$ [kPa]	0.0	0.0	22	55
Angolo d'attrito $\phi'$ [°]	34	37	25	33

Tabella 8-3: Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno.

	$\tan(\phi')$ [ $\gamma_\phi$ ]	$c'$ , [ $\gamma_c$ ]	$\gamma$ [ $\gamma_\gamma$ ]
<b>M1</b>	1.00	1.00	1.00
<b>M2</b>	1.25	1.25	1.00

Tabella 8-4: Parametri geotecnici di progetto M1.

Unità	$\gamma_k$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi'_k$ [°]	$c'_k$ [kPa]
DAS	20.0	34	0.0
DAG	20.0	37	0.0
PAT alt	22.0	25	22.0
PAT	22.0	33	55.0

Tabella 8-5: Stratigrafia di calcolo e Parametri geotecnici di progetto M2.

Unità	$\gamma_k$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi'_k$ [°]	$c'_k$ [kPa]
DAS	20.0	28.35	0.0
DAG	20.0	31.08	0.0
PAT alt	22.0	20.45	17.6
PAT	22.0	27.45	44.0

## 9. METODO DI CALCOLO DELLE PARATIE MULTIANCORATE

Al fine di rappresentare il comportamento dell'opera di sostegno durante le varie fasi di lavoro (scavo, inserimento contrasti e riempimenti) è opportuno l'impiego di un metodo di calcolo iterativo atto a simulare l'interazione in fase elasto-plastica terreno-paratia.

Tra i possibili modelli di comportamento, è assai adatto alla rappresentazione analitica, ed alla successiva organizzazione nell'ambito di un programma di calcolo automatico, quello suggerito da M. Bertero e R. Lancellotta "Metodi di calcolo basati sul comportamento elasto-plastico del terreno-Torino 1979"; J. Balay - F. Harfouche "Programme pour le calcul des suotenements par la methode des modules de reaction (Denebola)".

Lo studio del comportamento di un elemento di paratia inserito nel terreno viene effettuato tenendo conto della deformabilità dell'elemento stesso, considerato in regime elastico, e soggetto alle azioni derivanti dalla spinta dei terreni, dalle differenze di pressione idrostatiche, dalle spinte dovute ai sovraccarichi esterni e dalla presenza degli ancoraggi.

La paratia viene discretizzata con elementi finiti monodimensionali a due gradi di libertà per nodo (spostamento orizzontale e rotazione).

Il terreno viene schematizzato secondo un modello elasto-plastico; esso reagisce elasticamente, con modulo di reazione  $E_s$ , sino a valori limite dello spostamento, raggiunti i quali la reazione corrisponde, a seconda del segno dello stesso spostamento, ai valori limite della pressione attiva o passiva.

Nella Figura 9-1 si mostrano le relazioni costitutive per il terreno e per gli elementi di ancoraggio. Si intende che gli spostamenti vengono computati a partire dalla situazione di spinta "a riposo". Nella valutazione delle spinte si può tener conto dell'attrito terreno-paratia, o della coesione di adesione; non si prendono in considerazioni componenti di carico o di reazione verticali.

La relazione costitutiva è completa, cioè prevede cicli di carico e scarico, con variazioni dei parametri caratteristici, nel corso della esecuzione dell'opera.

Con tale metodo, si può quindi seguire analiticamente la successione delle fasi di costruzione, di carico e di ancoraggio consentendo, nei limiti della imperfetta conoscenza dei parametri, di fornire informazioni attendibili sull'entità delle deformazioni, e sugli effetti che esse inducono sul diagramma delle pressioni esercitate dal terreno sulla paratia.

L'impiego di tale approccio richiede la conoscenza, oltre che degli usuali parametri di spinta, anche di alcuni parametri caratteristici di tipo geotecnico definiti nel punto seguente.

### 9.1 DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI CALCOLO

In base ai parametri geotecnici delle varie unità stratigrafiche, in accordo al metodo di calcolo discusso al punto precedente, si possono determinare le grandezze indicate nel seguito.

- Pressione attiva:

$$P_a = \sigma'_v \cdot k_a - c' \cdot k_{ac} \quad [F \cdot L^{-2}]$$

$$\begin{array}{llll} \text{dove: } \sigma'_v & = & \text{tensione verticale efficace} & [F \cdot L^{-2}] \\ c' & = & \text{coesione} & [F \cdot L^{-2}] \end{array}$$

$k_a, k_{ac}$  = coefficienti di spinta attiva valutati tenendo conto di un angolo di attrito terreno paratia  $\delta_a = (2/3)\phi'$ . I coefficienti  $k_a$  sono valutati in condizioni di deformazione piana tenendo conto di superfici di rottura curvilinee (vedasi Figura 9-2 tratta da Caquot e Kerisel "Tables for the calculation of passive pressure, active pressure and bearing capacity of foundations" 1948 - NAVFAC DM 7.2 1971).

Il coefficiente  $k_{ac}$  (affidente ai termini coesivi) è valutato con l'espressione:

$$k_{ac} = 2\sqrt{k_a \cdot (1 + c_w/c')} = 2\sqrt{k_a}$$

Trascurando a favore di sicurezza il termine di adesione  $c_w/c' = 0$ .

- Pressioni orizzontali dovute ai carichi esterni:

$$P_q = q \cdot k_a \quad [F \cdot L-2]$$

dove:  $q$  = carico verticale uniformemente distribuito;

deve risultare:  $P_a + P_q \geq 0$ .

- Differenze di pressioni idrostatiche:

$$P_h = (Z_{wt} - Z_{ws}) \cdot \gamma_w; \quad [F \cdot L-2]$$

dove:  $Z_{wt}$  = quota falda a tergo della paratia,

$Z_{ws}$  = quota falda lato scavo,

$\gamma_w$  = peso specifico acqua  $\cong 10 \text{ kN/m}^3$ .

- Pressione passiva:

$$P_p = \sigma'_v \cdot k_p + c' \cdot k_{pc} \quad [F \cdot L-2]$$

dove:  $k_p, k_{pc}$  = coefficienti di spinta passiva valutati tenendo conto di un angolo di attrito terreno paratia  $\delta_p = \phi'/2 \leq 15^\circ$ .

I coefficienti  $k_p$  sono valutati in condizioni di deformazione piana tenendo conto di superfici di rottura curvilinee (vedasi Figura 9-2 tratta da Caquot e Kerisel "Tables for the calculation of passive pressure, active pressure and bearing capacity of foundations" 1948 - NAVFAC DM 7.2 1971). Il coefficiente  $k_{pc}$  (affidente ai termini coesivi) è valutato con l'espressione:


$$k_{pc} = 2\sqrt{k_p \cdot (1 + c_w/c')} = 2\sqrt{k_p}$$

Trascurando a favore di sicurezza il termine di adesione  $c_w/c' = 0$ .

- Pressione a riposo:

$$P_0 = \sigma'_v \cdot k_0 \quad [F \cdot L-2]$$

dove:  $k_0$  = coefficiente di spinta a riposo.

	<p style="text-align: right;">VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo</p> <p style="text-align: center;">RELAZIONE ILLUSTRATIVA E DI CALCOLO DELLA PARATIA FRONTE ALVEO</p>
---	--

Gli effetti della sovraconsolidazione indotti dalle operazioni di scavo possono essere presi in considerazione facendo riferimento alla espressione seguente:

$$k_0(\text{post}) = k_0(\text{pre}) \cdot \text{OCR}^b$$

dove:

OCR = Over Consolidation Ratio.

- Moduli di reazione orizzontali del terreno:

Si può fare riferimento alla relazione proposta da Janbu (1972)

$$E_s = m \cdot P_r \cdot (P_0 / P_r)^\alpha \quad [\text{F-L-2}]$$

dove:

m = coefficiente dipendente dal tipo e dalla compressibilità del terreno;

P<sub>0</sub> = pressione a riposo;

P<sub>r</sub> = pressione di riferimento = 100 kPa;

α = esponente funzione del tipo di terreno.



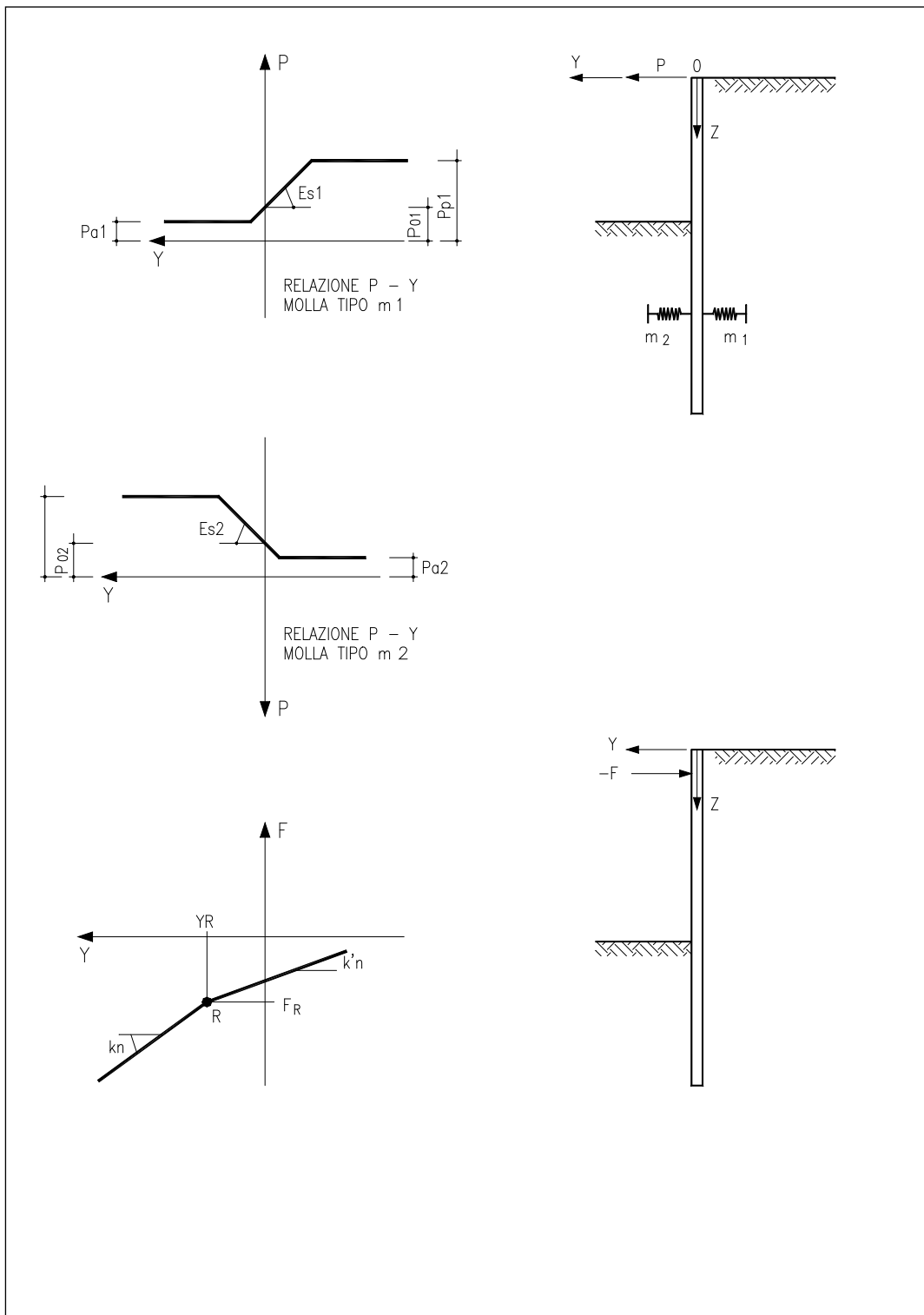


Figura 9-1: Relazioni costitutive per il terreno e per i contrasti.

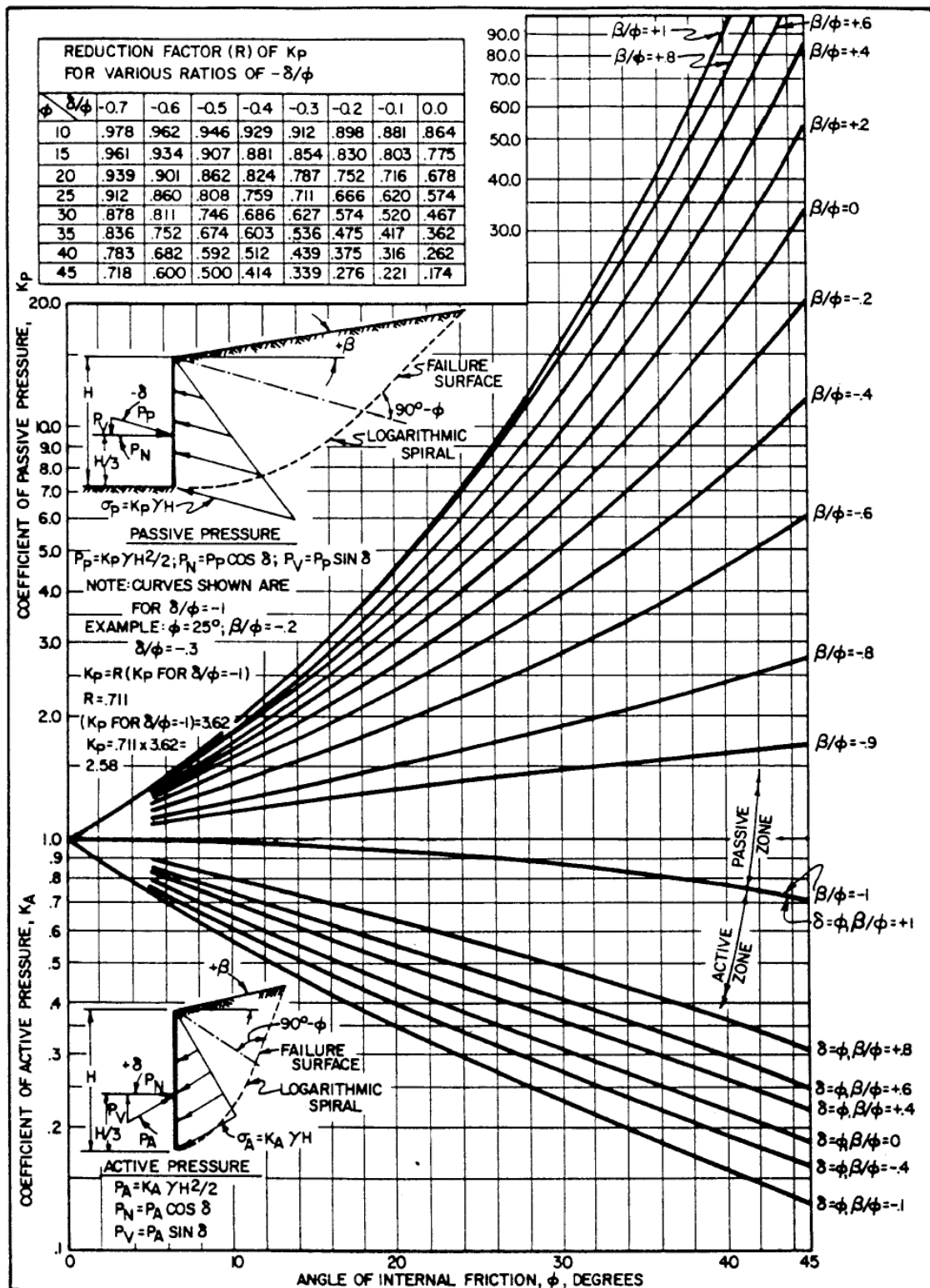


Figura 9-2: Parametri di spinta attiva e passiva.

## 9.2 PARAMETRI UTILIZZATI NEI CALCOLI – LATO SCAVO

Per le unità stratigrafiche individuate al paragrafo 8, si possono assumere i seguenti valori dei parametri di calcolo **lato scavo**, determinati considerando l'estradosso del terreno **piano**.

### 9.2.1 •SLU Combinazione 1 (A1+M1+R1) e SLE

#### • Strato 1: DAS

$k_0$	= 0.440	$\alpha$	= 0.50	$b$	= 0.40	$m$	= 250
$k_a$	= 0.254	$k_{ac}$	= 1.01				
$k_p$	= 5.65	$k_{pc}$	= 4.75				

#### • Strato 2: DAG

$k_0$	= 0.398	$\alpha$	= 0.50	$b$	= 0.40	$m$	= 340
$k_a$	= 0.224	$k_{ac}$	= 0.95				
$k_p$	= 6.61	$k_{pc}$	= 5.14				

#### • Strato 3: PAT alt

$k_0$	= 0.577	$\alpha$	= 0.00	$b$	= 0.00	$m$	= 325
$k_a$	= 0.366	$k_{ac}$	= 1.21				
$k_p$	= 3.43	$k_{pc}$	= 3.70				

#### • Strato 4: PAT

$k_0$	= 0.455	$\alpha$	= 0.00	$b$	= 0.00	$m$	= 1250
$k_a$	= 0.263	$k_{ac}$	= 1.03				
$k_p$	= 5.36	$k_{pc}$	= 4.63				

### 9.2.2 SLU Combinazione 2 (A2+M2+R2): parametri del terreno fattorizzati

#### • Strato 1: DAS

$k_0$	= 0.525	$\alpha$	= 0.50	$b$	= 0.40	$m$	= 250
$k_a$	= 0.318	$k_{ac}$	= 1.13				
$k_p$	= 4.13	$k_{pc}$	= 4.07				

#### • Strato 2: DAG

$k_0$	= 0.483	$\alpha$	= 0.50	$b$	= 0.40	$m$	= 340
$k_a$	= 0.284	$k_{ac}$	= 1.07				
$k_p$	= 4.88	$k_{pc}$	= 4.42				

#### • Strato 3: PAT alt

$k_0$	= 0.650	$\alpha$	= 0.00	$b$	= 0.00	$m$	= 325
$k_a$	= 0.440	$k_{ac}$	= 1.33				
$k_p$	= 2.63	$k_{pc}$	= 3.24				

• **Strato 4: PAT**

$k_0$	= 0.539	$\alpha$	= 0.00	$b$	= 0.00	$m$	= 1250
$k_a$	= 0.33	$k_{ac}$	= 1.15				
$k_p$	= 3.93	$k_{pc}$	= 3.97				

### 9.3 PARAMETRI UTILIZZATI NEI CALCOLI – LATO TERRA

Per le unità stratigrafiche individuate al paragrafo 8, si possono assumere i seguenti valori dei parametri di calcolo **lato terra**, determinati considerando l'estradosso del terreno con inclinazione indefinita  $i = \beta_{avg} = 30^\circ$ .

#### 9.3.1 •SLU Combinazione 1 (A1+M1+R1) e SLE

• **Strato 1: DAS**

$k_0$	= 0.661	$\alpha$	= 0.50	$b$	= 0.40	$m$	= 250
$k_a$	= 0.438	$k_{ac}$	= 1.32				
$k_p$	= 17.18	$k_{pc}$	= 8.29				

• **Strato 2: DAG**

$k_0$	= 0.597	$\alpha$	= 0.50	$b$	= 0.40	$m$	= 340
$k_a$	= 0.370	$k_{ac}$	= 1.22				
$k_p$	= 22.22	$k_{pc}$	= 9.43				

• **Strato 3: PAT alt**

$k_0$	= 0.866	$\alpha$	= 0.00	$b$	= 0.00	$m$	= 325
$k_a$	= 0.637	$k_{ac}$	= 1.60				
$k_p$	= 6.63	$k_{pc}$	= 5.15				

• **Strato 4: PAT**

$k_0$	= 0.682	$\alpha$	= 0.00	$b$	= 0.00	$m$	= 1250
$k_a$	= 0.462	$k_{ac}$	= 1.36				
$k_p$	= 15.56	$k_{pc}$	= 7.89				

#### 9.3.2 Combinazione 2 (A2+M2+R2): parametri del terreno fattorizzati

• **Strato 1: DAS**

$k_0$	= 0.787	$\alpha$	= 0.50	$b$	= 0.40	$m$	= 250
$k_a$	= 0.553	$k_{ac}$	= 1.39				
$k_p$	= 8.52	$k_{pc}$	= 5.84				

• **Strato 2: DAG**

$k_0$	= 0.725	$\alpha$	= 0.50	$b$	= 0.40	$m$	= 340
$k_a$	= 0.519	$k_{ac}$	= 1.44				
$k_p$	= 12.72	$k_{pc}$	= 7.13				

- **Strato 3: PAT alt**

$k_0$	= 0.976	$\alpha$	= 0.00	$b$	= 0.00	$m$	= 325
$k_a$	= 1.18	$k_{ac}$	= 2.17				
$k_p$	= 0.43	$k_{pc}$	= 1.30				

- **Strato 4: PAT**

$k_0$	= 0.808	$\alpha$	= 0.00	$b$	= 0.00	$m$	= 1250
$k_a$	= 0.553	$k_{ac}$	= 1.39				
$k_p$	= 8.52	$k_{pc}$	= 5.84				

## 9.4 ANALISI DEI CARICHI

La berlinese è stata dimensionata per resistere:

- alla spinta del terreno in fase statica con inclinazione involupata a 30°;
- alla spinta dovuta alla presenza di sovraccarichi accidentali a tergo della paratia assunti pari a 10kPa (eventuali mezzi d'opera).

Dato il carattere discontinuo della paratia, non è necessario considerare la spinta idrostatica a tergo della stessa. Il sovraccarico accidentale è stato considerato con valore caratteristico  $Q_k = 10$  kPa ed indefinito a tergo della paratia.

I valori di progetto per entrambi gli SLU (combinazioni A1 e A2), basati su fattori parziali per carichi variabili definiti dalla Norma (Tab. 2.6.I), considerando che il programma di calcolo utilizzato e descritto nel seguito non fa distinzione tra carichi accidentali e permanenti, sono esposti nel seguito:

- nel caso A1:  $Q = (1.50/1.30) \times 10 = 11.5$  kPa;
- nel caso A2:  $Q = (1.30/1.00) \times 10 = 13.0$  kPa.

Ai risultati in termini di sollecitazioni ottenuti dal programma, si applicherà poi a posteriori un coefficiente moltiplicativo pari a 1.30 nel caso A1 e pari a 1.00 nel caso A2.

Dato il carattere definitivo dell'opera si effettua anche il calcolo sismico, attraverso la trattazione di Mononobe Okabe raccomandata dalla norma EN 1998-5:2004.

$$K_h = 0.2808$$


$$K_v = 0.1404$$

## 9.5 VALUTAZIONE DELLE RIGIDEZZA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI

- Rigidezza flessionale dei micropali.

Con riferimento al modulo elastico assunto per l'acciaio di armatura dei micropali:

$E = 210000000$  kPa, si ottiene (interasse micropali  $i = 0.33$  m):

 gruppo Atlantia	VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo RELAZIONE ILLUSTRATIVA E DI CALCOLO DELLA PARATIA FRONTE ALVEO
--	--

$$EJ/i = 2100000000 \cdot 0.00001868 / 0.33 = 11880 \text{ kNm}^2/\text{m}.$$

- Rigidità traslazionale dei tiranti e pretensione.

I tiranti sono stati schematizzati secondo quanto indicato nella **Errore. L'origine r**  
**iferimento non è stata trovata.**, dalla quale si può determinare la seguente costante elastica di  
 tirante nonché il valore della forza di pretensione.

$$k_{\text{tir}} = \frac{E \cdot A \cdot n \cdot \cos \alpha \cdot \cos \alpha}{(L_p + L_a / 2) \cdot i}$$

dove:

- $k_{\text{tir}}$  = costante di rigidità del tirante in direzione orizzontale;  
 $E$  = modulo elastico dell'acciaio = 200000000 kPa;  
 $A$  = area della singola barra = 452 mm<sup>2</sup>;  
 $n$  = numero di barre per singolo tirante = 2;  
 $\alpha$  = angolo di inclinaz. del tirante rispetto all'orizzontale = 30°;  
 $L_p$  = lungh. del tirante nel tratto passivo (lungh. libera);  
 $L_a$  = lungh. del tirante nel tratto attivo (lungh. ancoraggio);  
 $i$  = interasse orizzontale dei tiranti.

$$K_{\text{tir, h}} = 200000 \cdot 2 \cdot 452 \cdot 10^{-6} \cdot \cos^2(45) / 5 / 1.32 / 1000 = 11414 \text{ kN/m/m}$$

## 9.6 RISULTATI DELLE ELABORAZIONI – SLU

### 9.6.1 Combinazione 1: $A1+M1+R1(=1)$

I risultati, riferiti ad una striscia di larghezza unitaria, sono riassunti nella tabella e nelle figure seguenti. I risultati riportati in tabella vanno moltiplicati per il fattore 1.3 (vedi paragrafo 9.4).

TABELLA RIASSUNTIVA DEFORMAZIONI E SOLLECITAZIONI

Fase	d.max cm	M+max kN*m/m	M-max kN*m/m	Tmax kN/m
1	.5 ( 2.03)	22.5 ( 2.03)	-14.7 ( 4.46)	-27.2 ( 3.65)

NOTE: - d.max = spostamento orizzontale massimo  
- M+max = momento flettente positivo massimo  
fibre tese lato scavo  
- M-max = momento flettente negativo massimo  
fibre tese lato terra  
- Tmax = sforzo di taglio massimo  
- in parentesi sono riportate le quote dalla  
sommata' della paratia

### 9.6.2 Combinazione 2: $A2+M2+R1(=1)$

I risultati, riferiti ad una striscia di larghezza unitaria, sono riassunti nella tabella e nelle figure seguenti.

TABELLA RIASSUNTIVA DEFORMAZIONI E SOLLECITAZIONI

Fase	d.max cm	M+max kN*m/m	M-max kN*m/m	Tmax kN/m
1	.8 ( 2.03)	35.6 ( 2.03)	-20.8 ( 4.86)	-36.3 ( 3.65)

NOTE: - d.max = spostamento orizzontale massimo  
- M+max = momento flettente positivo massimo  
fibre tese lato scavo  
- M-max = momento flettente negativo massimo  
fibre tese lato terra  
- Tmax = sforzo di taglio massimo  
- in parentesi sono riportate le quote dalla  
sommata' della paratia

### 9.6.3 Combinazione Sismica

I risultati, riferiti ad una striscia di larghezza unitaria, sono riassunti nella tabella e nelle figure seguenti.

TABELLA RIASSUNTIVA DEFORMAZIONI E SOLLECITAZIONI

Fase	d.max cm	M+max kN*m/m	M-max kN*m/m	Tmax kN/m
1	3.1 ( 2.43)	112.6 ( 2.43)	-88.5 ( 5.67)	-83.3 ( 4.05)

NOTE: - d.max = spostamento orizzontale massimo  
 - M+max = momento flettente positivo massimo  
 fibre tese lato scavo  
 - M-max = momento flettente negativo massimo  
 fibre tese lato terra  
 - Tmax = sforzo di taglio massimo  
 - in parentesi sono riportate le quote dalla  
 sommità della paratia



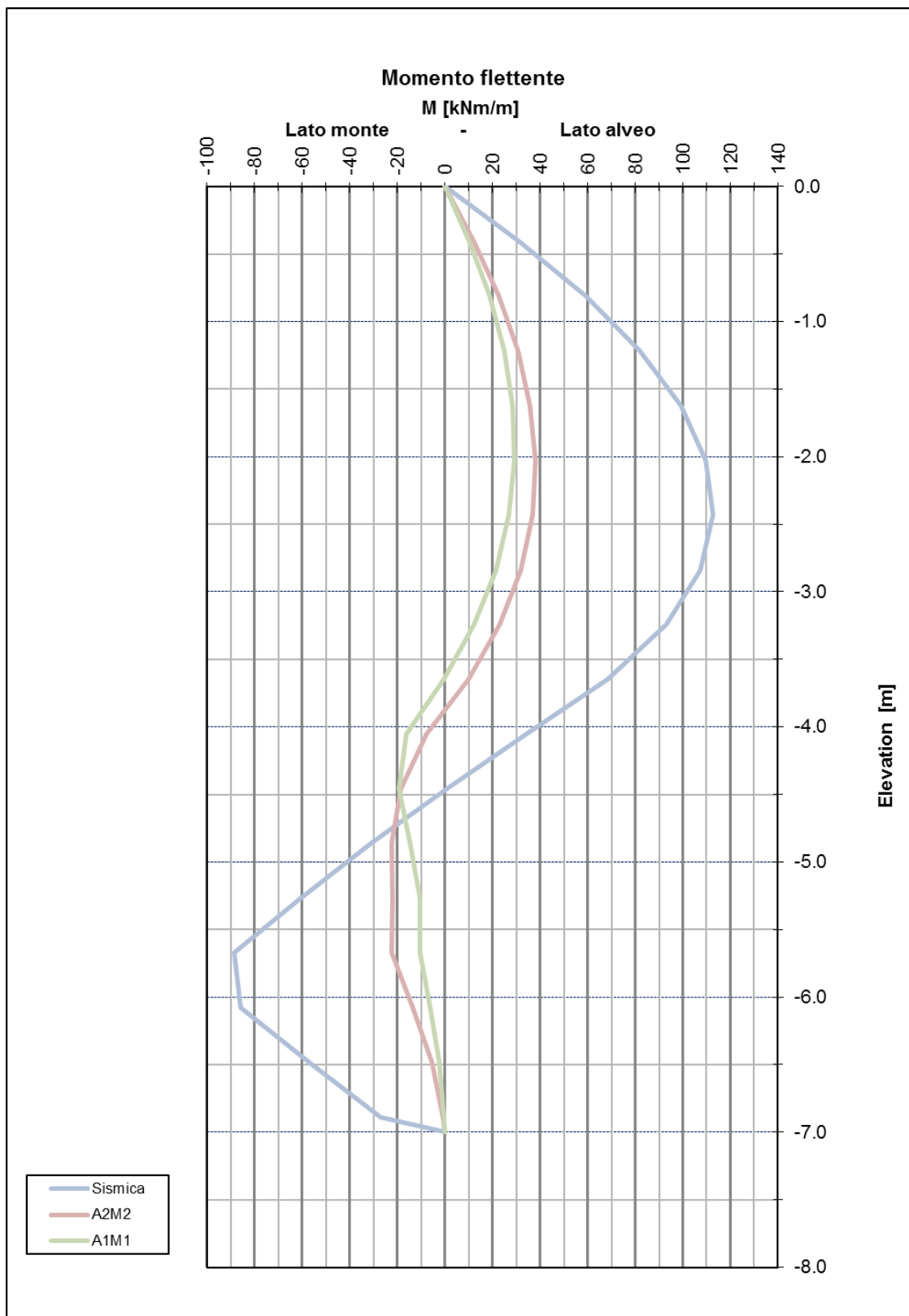


Figura 9-3: Andamento Momento flettente – SLU – Combo 1, Combo 2, Combinazione sismica

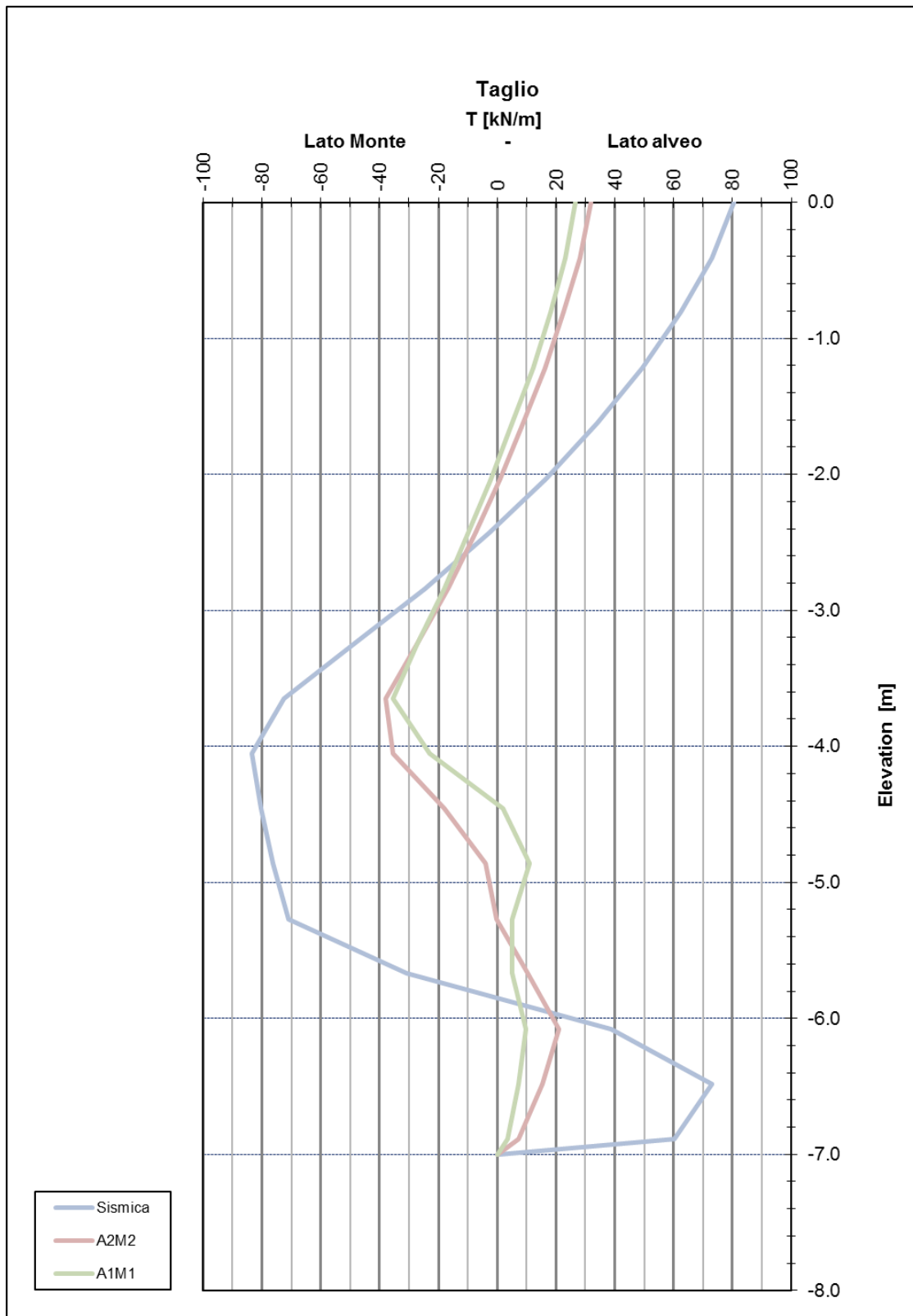


Figura 9-4: Andamento Taglio – SLU – Combo 1, Combo 2, Combinazione sismica

## 9.7 RISULTATI DELLE ELABORAZIONI – SLE COMBINAZIONE CARATTERISTICA

I risultati, riferiti ad una striscia di larghezza unitaria, sono riassunti nella tabella e nelle figure seguenti.

TABELLA RIASSUNTIVA DEFORMAZIONI E SOLLECITAZIONI

Fase	d.max cm	M+max kN*m/m	M-max kN*m/m	Tmax kN/m
1	.5 ( 2.03)	21.8 ( 2.03)	-14.3 ( 4.46)	-26.7 ( 3.65)

NOTE: - d.max = spostamento orizzontale massimo  
 - M+max = momento flettente positivo massimo  
           fibre tese lato scavo  
 - M-max = momento flettente negativo massimo  
           fibre tese lato terra  
 - Tmax = sforzo di taglio massimo  
 - in parentesi sono riportate le quote dalla  
 sommità della paratia

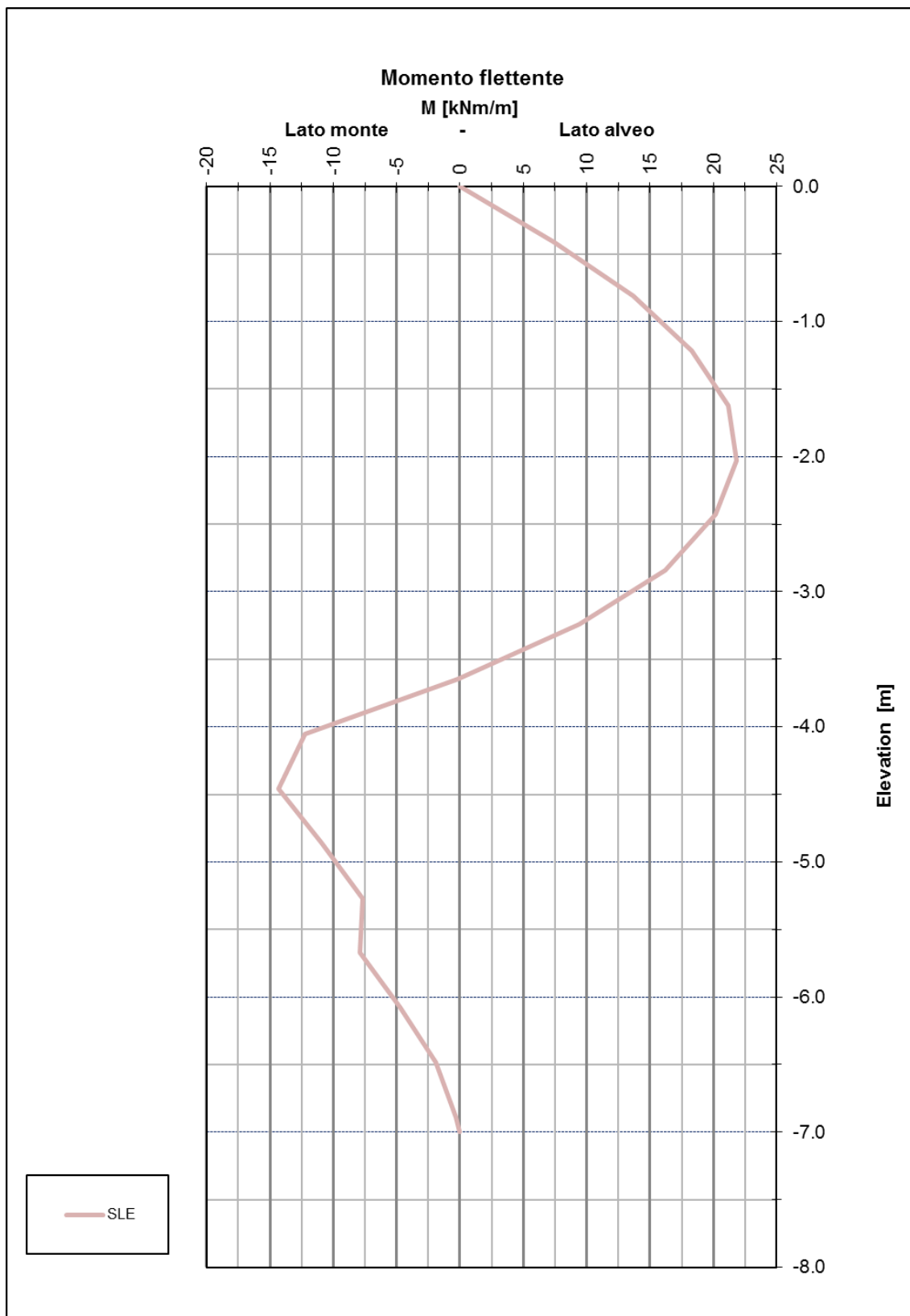


Figura 9-5: Andamento Momento flettente – SLE – Combinazione caratteristica

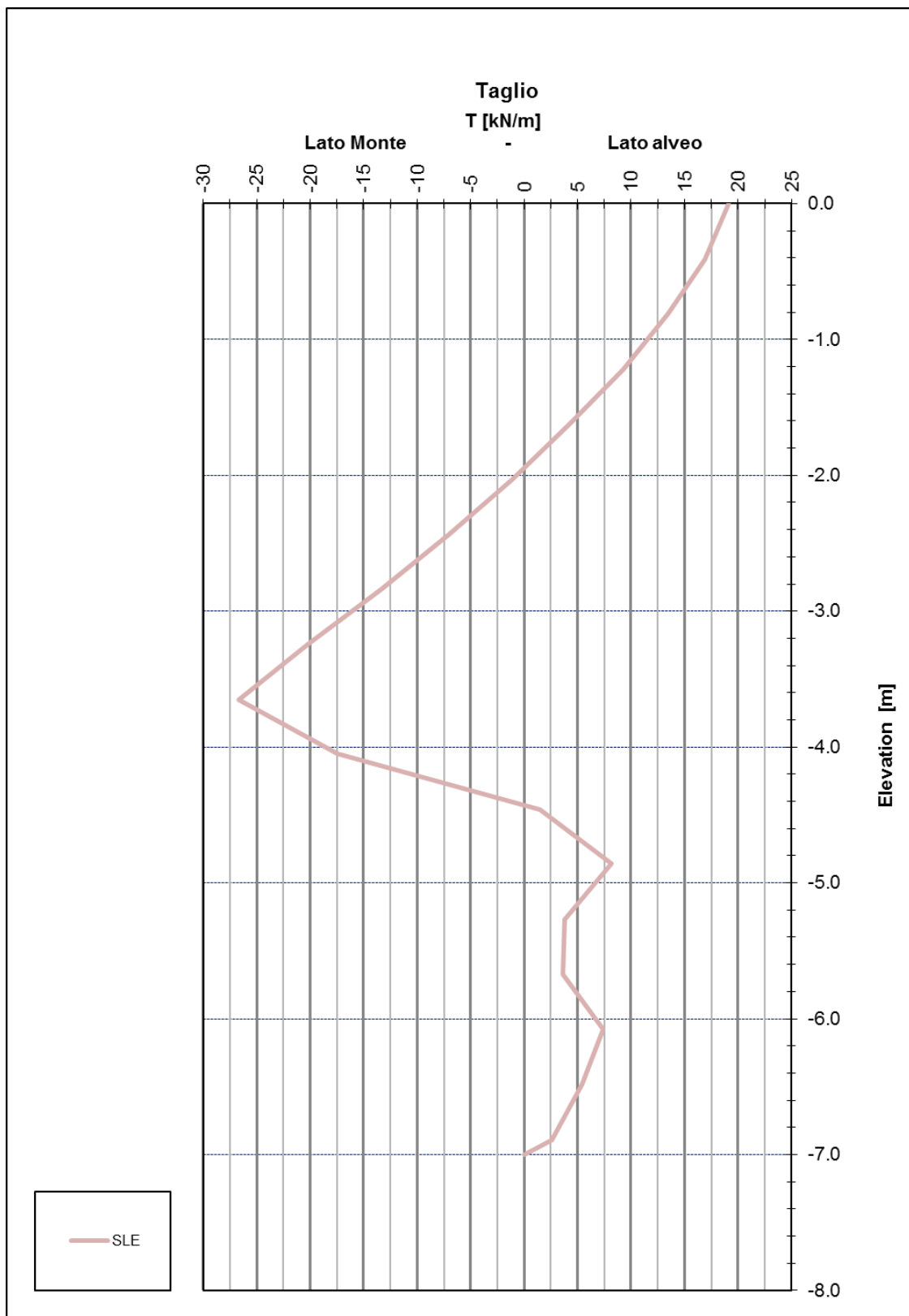


Figura 9-6: Andamento Taglio – SLE – Combinazione caratteristica

## 9.8 VERIFICHE GEOTECNICHE DELLA PARATIA

Non si evidenziano problematiche di natura geotecnica per quanto concerne il coefficiente di sicurezza globale della paratia ottenuto dal rapporto fra la spinta mobilitata lato scavo e la spinta passiva lato scavo (vedi figura seguente)

- in SLU Combinazione 2,  $FS = 7.19$
- in SLU Combinazione sismica,  $FS = 1.57$

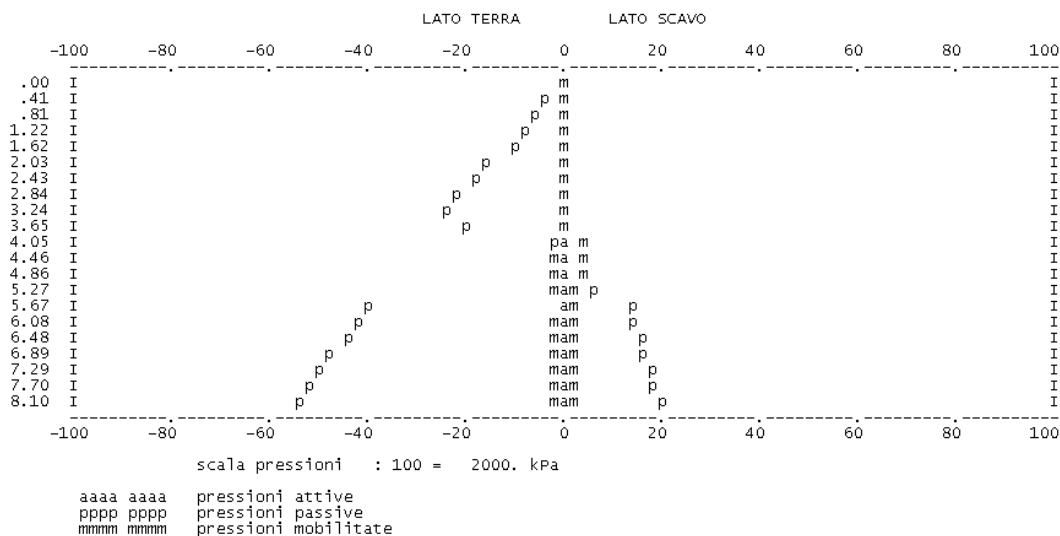


Figura 9-7: Combinazione SLU A2+M2 – Diagramma pressioni limiti e mobilitate.

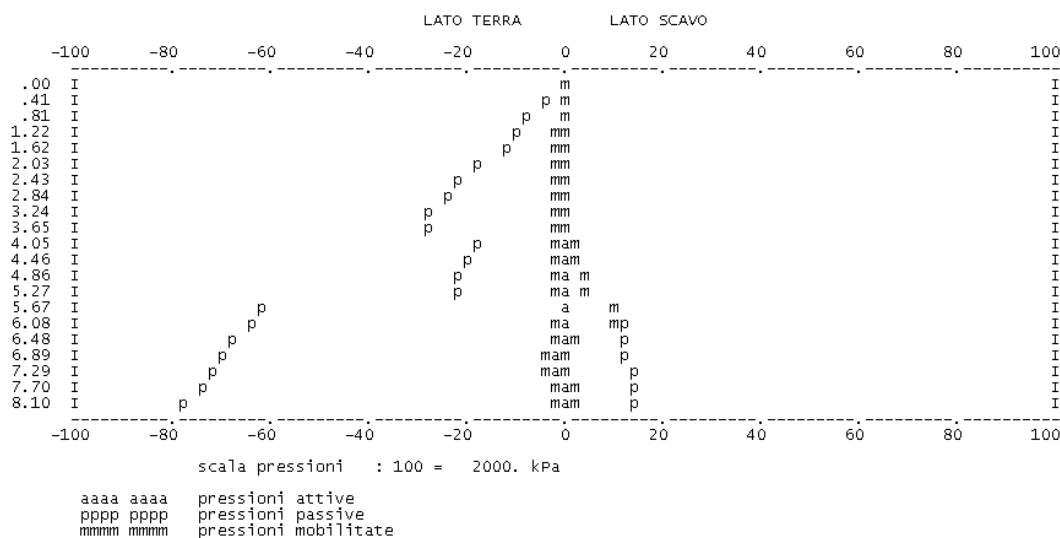


Figura 9-8: Combinazione SLU Sismica – Diagramma pressioni limiti e mobilitate.

## 9.9 VERIFICHE MICROPALI

Le verifiche sono condotte nella condizione largamente più gravosa, quella sismica.

### 9.9.1 Verifiche strutturali agli SLU - Sismica

Le sollecitazioni ottenute per i micropali di interesse per le verifiche strutturali (SLU – combinazione 1) con riferimento ad un metro lineare di sviluppo della paratia sono le seguenti (vedi paragrafo 9.6.1):

- momento flettente:  $M_{\max} = 112.6 \cdot 1.0 = 112.6 \text{ kNm/m}$ ;
- sforzo di taglio:  $V_{\max} = 83.3 \cdot 1.0 = 83.3 \text{ kN/m}$ .

Considerando l'interasse dei micropali, pari a 0.33 m, le sollecitazioni agenti sul singolo micropalo sono le seguenti:

- momento flettente:  $M_{\max} = 112.6 \cdot 0.33 = 38 \text{ kNm}$ ;
- sforzo di taglio:  $V_{\max} = 83.3 \cdot 0.33 = 28 \text{ kN}$ .

Si adottano micropali con tubolare di armatura con diametro 168.3 mm e spessore 10 mm (vedi paragrafo 6). Nelle verifiche di resistenza si trascura, a favore di sicurezza, il contributo del calcestruzzo, ovvero si considera resistente soltanto il tubolare in acciaio.

- Classificazione della sezione tubolare.

Sulla base delle caratteristiche geometriche suddette, la sezione del tubolare appartiene alla classe 1; pertanto il coefficiente di sicurezza per la resistenza delle membrane è:  $\gamma_{M0} = 1.05$ .

- Verifica a taglio.

La resistenza di calcolo a taglio è fornita dalla seguente espressione:

$$V_{c,Rd} = \frac{A_v \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

dove per le sezioni circolari cave si ha:

$$A_v = \frac{2 \cdot A}{\pi}$$

Per il caso in esame risulta pertanto:

$$V_{c,Rd} = \frac{31.6 \cdot 100 \cdot 275}{\sqrt{3} \cdot 1.05} \cdot \frac{1}{1000} = 477 \text{ kN} > V_{\max}$$

Essendo il taglio di calcolo inferiore alla metà della resistenza di calcolo a taglio, si può trascurare l'influenza del taglio sulla resistenza a flessione.

- Verifica a flessione.

Per le sezioni di classe 1 la resistenza di calcolo a flessione retta è fornita dalla seguente espressione:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_{yk}}{Y_{M0}}$$

Considerando, a favore di sicurezza, il modulo resistente elastico al posto di quello plastico, si ha:

$$M_{c,Rd} = \frac{186 \cdot 1000 \cdot 275}{1.05} \cdot \frac{1}{10^6} = 48.7 \text{ kNm} > M_{\max}$$

## 9.9 VERIFICHE TIRANTI

### 9.9.2 Verifiche dell'armatura dei tiranti - Sisma

Le sollecitazioni ottenute per i tiranti di interesse con riferimento ad un metro lineare di sviluppo della paratia sono le seguenti:

- sforzo sul tirante:  $F_{\text{SLU-orizz}} = 80.5 \cdot 1.0 = 80.5 \text{ kN/m}$  in direzione orizzontale.

Considerando l'interasse dei tiranti, pari a 1.32 m, e l'inclinazione degli stessi pari a 45°, la forza agente sul singolo tirante è la seguente:

$$F_{d,\text{Sism}} = \frac{F_{\text{SLU-orizz}} \cdot i}{\cos \alpha} = \frac{80.50 \cdot 1.32}{\cos 45^\circ} = 151 \text{ kN}$$

Si adottano tiranti a 2 barre: la singola barra presenta diametro 24 mm e sezione 452 mm<sup>2</sup>. La resistenza a trazione di calcolo della singola barra è assunta pari a:

$$R_{d,\text{tirante}} = 2 \cdot A \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 2 \cdot 452 \cdot \frac{450}{1.15 \cdot 1000} = 353.0 \text{ kN}$$

### 9.9.3 Verifiche della fondazione – Sisma

La verifica della fondazione del tirante viene effettuata con riferimento alla combinazione A1+M1+R3; pertanto lo sforzo massimo di progetto sui tiranti è  $F_{d,\text{Sism}} = 151 \text{ kN}$ .

La capacità portante ultima del tirante  $R_{a,c}$  viene valutata con la seguente formula:

$$R_{a,c} = \pi \cdot \varphi_p \cdot \alpha \cdot \sum (\tau_{ai} \cdot l_i)$$

dove:



$\phi_p$  = diametro di perforazione = 250 mm;

$\alpha$  = coefficiente di maggiorazione del diametro = 1.0;

$l_i$  = lunghezza della fondazione nei singoli strati

$\tau_{ai}$  = tensione tangenziale di aderenza palo-terreno nel singolo strato valutata come segue:

- unità PAT alt e PAT:

Si assume per il calcolo per entrambe le unità la minima coesione non drenata assegnata al substrato alterato, e si seguono le raccomandazioni AGI.

$$\tau = \alpha \cdot C_u = 0.4 \cdot 250 = 100 \text{ kPa}$$

A favore di sicurezza e visto il trascurabile contributo degli strati granulari a basse tensioni litostatiche la resistenza si calcola unicamente con il contributo resistente degli strati di substrato alterato e substrato.

La capacità portante ultima calcolata del tirante è pertanto pari a:

$$R_{a,c} = \pi \cdot 0.25 \cdot 1 \cdot (100.00 \cdot 5.00) = 392.00 \text{ kN}$$

La resistenza caratteristica allo sfilamento è pari a (par. 6.6.2 del DM 14/01/2008):

$$R_{ak} = \frac{R_{a,c}}{\xi} = \frac{392.00}{1.8} = 218.0 \text{ kN}$$

La resistenza di progetto  $R_{ad}$  si determina applicando alla resistenza caratteristica  $R_{ak}$  i fattori parziali R3 riportati nella tabella seguente, con riferimento ai tiranti permanenti.

Tabella 9-1: Coefficienti parziali per la resistenza degli ancoraggi.

	Simbolo	Coefficiente parziale
	$\gamma_R$	
Ancoraggi temporanei	$\gamma_{Ra,t}$	1.1
Ancoraggi permanenti	$\gamma_{Ra,p}$	1.2

Pertanto:

$$R_{ad} = \frac{R_{ak}}{\gamma_{Ra,t}} = \frac{218.0}{1.1} = 198 \text{ kN} > F_{SLU} = 151 \text{ kN}$$