

Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38
dal Km 18+200 al Km 68+300

PROGETTO DEFINITIVO

COD. SIL NOMSMI01070

PROGETTISTA



I PROGETTISTI:

Ing. Andrea Polli
Ordine Ingegneri della Provincia di Roma n.19540

IL RESPONSABILE DEL S.I.A.:

IL GEOLOGO

Dott. Geol. Giampiero Carrieri
Ordine dei Geologi del Piemonte n.274

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

Dott. Geol. Giampiero Carrieri
Ordine dei Geologi del Piemonte n.274

VISTO:

IL RESP. DEL PROCEDIMENTO: Ing. Pietro Gualandi
IL DIRETTORE DELL'ESECUZIONE DEL CONTRATTO: Ing. Emanuele Fiorenza

PROTOCOLLO

DATA

OPERE D'ARTE MINORI
Relazione dimensionamento opere provvisorie

CODICE PROGETTO

PROGETTO: M S M I O 9
LIV. PROG.: D
N. PROG.: 2 1 0 1

NOME FILE
T00OM00STRDC01_A.docx

CODICE ELAB.: T 0 0 O M 0 0 S T R R E 0 1

REVISIONE

PAG.

A

1 di 27

D					
C					
B					
A	Emissione Progetto Definitivo	Febbraio 2023	A.Manzo	M.Del Fedele	A.Polli
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38</p> <p>dal Km 18+200 al Km 68+300</p> <p>Relazione dimensionamento opere provvisorie</p>	<p>File: T00OM00STRRE01_A</p> <p>Data: Febbraio 2023</p> <p>Pag. 2 di 27</p>
---	--

1	PREMESSA	3
1.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	3
1.2	BIBLIOGRAFIA	3
1.3	SOFTWARE DI CALCOLO	4
2	MATERIALI	5
3	INQUADRAMENTO GEOTECNICO	6
4	DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO	7
5	CRITERI DI PROGETTAZIONE E VERIFICA SECONDO NORMATIVA	8
5.1	VERIFICHE NEI CONFRONTI DEGLI STATI LIMITE ULTIMI (SLU)	8
5.2	VERIFICHE NEI CONFRONTI DEGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO (SLE)	9
5.3	VERIFICHE STRUTTURALI DI SICUREZZA PER LE PARATIE	10
6	METODI DI ANALISI E DI CALCOLO	11
6.1	DESCRIZIONE DEL PROGRAMMA DI CALCOLO	11
6.2	SPINTE DELLA TERRA – EFFETTO DELL'ATTRITO TERRENO/STRUTTURA	12
6.3	MODELLO DI CALCOLO DELLA PALANCOLA	13
7	CARICHI	14
8	FASI DI CALCOLO	15
9	RISULTATI DI CALCOLO	17
9.1	SPINTE DEL TERRENO	17
9.2	SOLLECITAZIONI NELLA PALANCOLA	19
9.3	CONFIGURAZIONE DEFORMATA	21
10	VERIFICHE GEOTECNICHE E STRUTTURALI	22
10.1	VERIFICA DI STABILITA' DELL'OPERA (RESISTENZA DEL TERRENO A VALLE)	22
10.2	VERIFICA DI SIFONAMENTO	22
10.3	VERIFICHE DELLA RESISTENZA STRUTTURALE DELL'OPERA	24
10.4	VERIFICHE ALLO SLE	26
11	AFFIDABILITA' DEI RISULTATI DEL SOFTWARE DI CALCOLO	27

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38</p> <p>dal Km 18+200 al Km 68+300</p> <p>Relazione dimensionamento opere provvisorie</p>	<p>File: T00OM00STRRE01_A</p> <p>Data: Febbraio 2023</p> <p>Pag. 3 di 27</p>
---	--

1 PREMESSA

La presente relazione tratta le verifiche geotecniche e strutturali delle opere provvisorie necessarie all'adeguamento della sezione stradale esistente alla sezione C1. La SS38 è affiancata dalla linea ferroviaria Milano-Sondrio-Tirano lungo la corsia destra in direzione est (progressive crescenti), con conseguente possibilità di effettuare l'allargamento prevalentemente lungo il lato sinistro (in direzione ovest), dove è presente il fosso di raccolta delle acque meteoriche.

Il dimensionamento e le verifiche sono condotti in accordo al metodo degli stati limite, ai sensi del quadro normativo vigente.

Per la descrizione di dettaglio delle opere si fa riferimento agli elaborati di progetto.

1.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Le verifiche presentate nel seguito sono state condotte secondo il metodo semi-probabilistico agli Stati Limite in accordo alle disposizioni normative previste dalla vigente normativa italiana e da quella europea (Eurocodici). In dettaglio si sono presi in esame quindi i seguenti documenti, che di volta in volta verranno opportunamente richiamati:

- [1] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni"
- [2] Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP.: Istruzioni per l'applicazione dell' «Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018
- [3] UNI EN 1993-1-1 – "Progettazione delle strutture in acciaio – Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici"
- [4] UNI EN 1993-5 – "Progettazione delle strutture in acciaio – Parte 5: Pali e palancole"
- [5] UNI EN 1997-1 – "Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali"
- [6] UNI EN 10248-1 – Palancole laminate a caldo di acciai non legati – Condizioni tecniche di fornitura
- [7] UNI EN 10248-2 – Palancole laminate a caldo di acciai non legati – Tolleranze dimensionali e di forma
- [8] UNI EN 10249-1 – Palancole profilate a freddo di acciai non legati – Condizioni tecniche di fornitura
- [9] UNI EN 10249-2 – Palancole profilate a freddo di acciai non legati – Tolleranze dimensionali e di forma

1.2 BIBLIOGRAFIA

- [1] Lancellotta R. (1991), "Geotecnica", Edizioni Zanichelli.

<p style="text-align: center;">ANAS S.p.A. Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38 dal Km 18+200 al Km 68+300 Relazione dimensionamento opere provvisorie</p>	<p>File: T00OM00STRRE01_A Data: Febbraio 2023 Pag. 4 di 27</p>
--	--

1.3 SOFTWARE DI CALCOLO

Le verifiche geotecniche e strutturali sono state svolte con l'ausilio dei seguenti programmi di calcolo:

- [1] Paratie Plus vers. 23.0 prodotto da Harpaceas s.r.l.
- [2] Foglio Excel per quanto riguarda le verifiche di resistenza della palancola in acciaio

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38</p> <p>dal Km 18+200 al Km 68+300</p> <p>Relazione dimensionamento opere provvisorie</p>	<p>File: T00OM00STRRE01_A</p> <p>Data: Febbraio 2023</p> <p>Pag. 5 di 27</p>
---	--

2 MATERIALI

Per la sezione profilata a freddo della palancola in acciaio, oggetto della presente relazione, si è scelto un grado dell'acciaio S355, in conformità alla norma UNI EN 10249-1:

Grado	Carico di rottura a trazione N/mm ²	Limite di snervamento N/mm ²	Allungamento minimo %
S 235 JRC	340 to 470	235	26
S 275 JRC	410 to 560	275	22
S 355 JOC	490 to 630	355	22

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38</p> <p>dal Km 18+200 al Km 68+300</p> <p>Relazione dimensionamento opere provvisorie</p>	<p>File: T00OM00STRRE01_A</p> <p>Data: Febbraio 2023</p> <p>Pag. 6 di 27</p>
---	--

3 INQUADRAMENTO GEOTECNICO

Sulla base delle informazioni stratigrafiche e dei dati di prova da sondaggi geognostici, sono state identificate le seguenti due unità geotecniche (UG):

- UG1: terreni fini con granulometrie costituite in modo variabile e prevalente da sabbie limose, limi, argille e torba;
- UG2: terreni grossolani con granulometrie costituite in modo variabile e prevalente da ciottoli, ghiaie e sabbie.

Si riporta la caratterizzazione delle Unità Geotecniche identificate:

Unità geotecnica	Peso / volume	Densità relativa	Modulo di Young	Resistenza al taglio	
	γ_{nat} [kN/m ³]	Dr [%]	E [MPa]	φ [°]	c [kPa]
UG1	19.8	⁽⁷⁾ 24 (21 - 34)	⁽¹⁾ 11 (10 - 12)	⁽³⁾ 27 (25 - 29)	⁽⁴⁾ 19 (17 - 21)
UG2	20.5	⁽⁷⁾ 46 (37 - 64)	⁽²⁾ 57 (49 - 77)	⁽⁶⁾ 39 (49 - 77)	⁽⁵⁾ 5 (4 - 6)

Figura 1 – Caratterizzazione geotecnica

Dal profilo geotecnico di tratta 2 si evidenzia la presenza dell'unità UG1 fino ad una profondità pari a circa 4 m dal p.c., dopodiché è presente l'unità UG2.

Pertanto, considerando che la palancola avrà una profondità di infissione di 11 m da p.c., nell'analisi strutturale dell'opera, in via cautelativa, sono state considerate le seguenti caratteristiche del terreno:

$\gamma_{terreno}$ [kN/m ³]	$E_{terreno}$ [MPa]	φ [°]	c' [kPa]
20	30	27	10

Tabella 1 – Parametri geotecnici considerati nelle analisi

Si è considerata la presenza della falda ad una profondità di circa 2,5 m dal p.c a monte dell'opera, mentre a valle si è considerata a livello del p.c.

Dai risultati delle indagini sismiche MASW, è stata definita una categoria di sottosuolo C.

Per ulteriori informazioni sulla caratterizzazione geotecnica/geologica dell'area si rimanda alla relazione geologica e geotecnica.

4 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

L'opera provvisoria è costituita da una palancola in acciaio a sostegno dello scavo da realizzare per l'allargamento della sede stradale attuale della SS38.

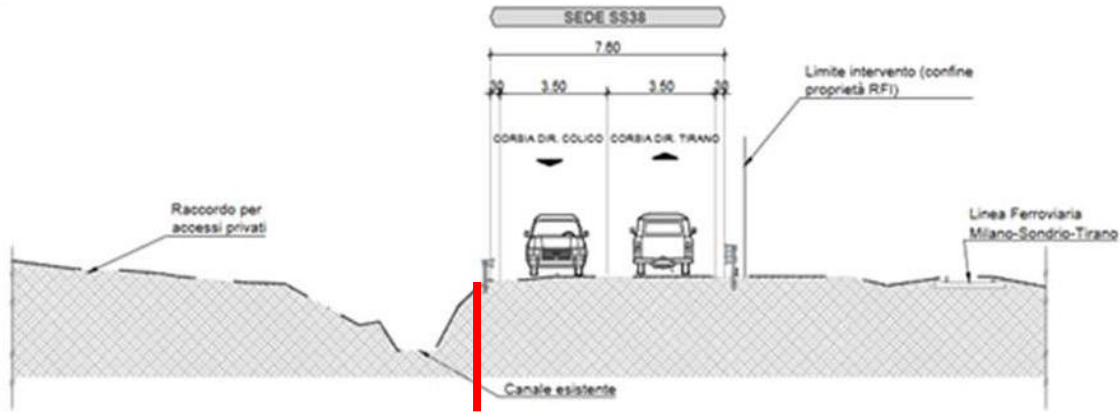


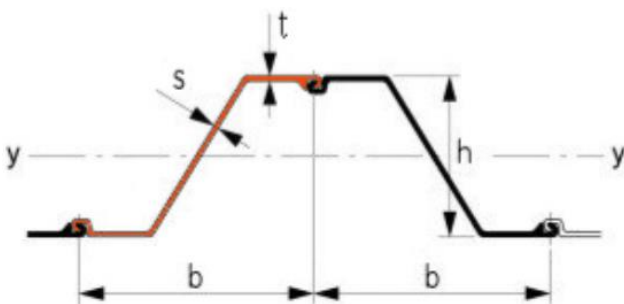
Figura 2 – Inquadramento dell'intervento

La paratia è di tipo provvisoria con una durata inferiore ai 2 anni, pertanto la verifica sismica non verrà effettuata in accordo con le NTC 2018. La paratia è realizzata mediante una palancola in acciaio.

L'altezza massima di scavo è stata ipotizzata pari a 4 m. La profondità di infissione nel terreno è considerata pari a 7 m.

Si è dimensionata la sezione della palancola utilizzando profili a Z. Le caratteristiche principali delle palancole con profili a Z sono la forma continua dell'anima e la posizione specifica dell'interblocco posto simmetricamente su entrambi i lati dell'asse neutro. Entrambi questi aspetti hanno un'influenza positiva sul modulo della sezione.

Si riportano nel seguito le principali caratteristiche del profilo **AZ 18-700** di Arcelor Mittal, scelto per le verifiche dell'opera:



Palancole			
Profilo	AZ 18-700	Catalogo Palancole	
Materiale	S235	AZ 18-700	
Tipo	Z	β_s	1
Peso per superficie unitaria di parete	1.0719 kN/m ²	β_D	1
B	0.7 m	I_x	0.0004 m ⁴ /m
H	0.42 m	W_{el}	0.0018 m ³ /m

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38</p> <p>dal Km 18+200 al Km 68+300</p> <p>Relazione dimensionamento opere provvisorie</p>	<p>File: T00OM00STRRE01_A</p> <p>Data: Febbraio 2023</p> <p>Pag. 8 di 27</p>
---	--

5 CRITERI DI PROGETTAZIONE E VERIFICA SECONDO NORMATIVA

Le verifiche geotecniche e strutturali dell'opera sono sviluppate in accordo alle NTC2018.

Le verifiche sono state eseguite nei confronti degli stati limiti ultimi (SLU) e degli stati limite di esercizio (SLE). I primi sono riferiti allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali, i secondi si riferiscono alle verifiche della compatibilità dei requisiti prestazionali dell'opera, degli spostamenti e delle distorsioni previste.

5.1 Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi (SLU)

Per ogni stato limite ultimo che prevede il raggiungimento della resistenza di un elemento strutturale (STR) o del terreno (GEO), deve essere rispettata la condizione:

$$E_d \leq R_d \quad (\text{eq. 6.2.1 NTC 2018})$$

dove

E_d valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione;

R_d valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico.

Effetto delle azioni e resistenza di progetto sono espresse rispettivamente in funzione delle azioni di progetto $\gamma_F F_k$, dei parametri geotecnici di progetto X_k/γ_M e dei parametri geometrici di progetto a_d . Il coefficiente parziale di sicurezza γ_R opera direttamente sulla resistenza del sistema.

In accordo a quanto stabilito al par. 2.6.1 delle NTC 2018, la verifica suddetta deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A1 e A2), per i parametri geotecnici (M1 e M2) e per le resistenze (R1, R2 e R3).

I diversi gruppi di coefficienti di sicurezza parziali sono scelti nell'ambito di due approcci progettuali distinti e alternativi.

Approccio 1: Combinazione 1: A1 + M1 + R1

Approccio 1: Combinazione 2: A2 + M2 + R2

Approccio 2: Combinazione: A1 + M1 + R3

Nella Tabella 2 e Tabella 3 si riportano i coefficienti parziali estratti dalle NTC18.

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38</p> <p>dal Km 18+200 al Km 68+300</p> <p>Relazione dimensionamento opere provvisorie</p>	<p>File: T00OM00STRRE01_A</p> <p>Data: Febbraio 2023</p> <p>Pag. 9 di 27</p>
---	--

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente parziale γ_F (o γ_E)	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	γ_{G1}	1.0	1.0
	Sfavorevole		1.3	1.0
Permanenti non strutturali (1)	Favorevole	γ_{G2}	0.8	0.8
	Sfavorevole		1.5	1.3
Variabili	Favorevole	γ_{Qi}	0.0	0.0
	Sfavorevole		1.5	1.3

(1) = Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. i carichi permanenti portati) siano completamente definiti, si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

Tabella 2 - Coefficienti parziali sulle azioni

Parametro	Coefficiente parziale	M1 ⁽²⁾	M2
Tangente angolo di resistenza al taglio	γ_ϕ	1.0	1.25
Coesione efficace	$\gamma_{c'}$	1.0	1.25
Coesione non drenata	γ_{cu}	1.0	1.4
Peso di unità di volume	γ_γ	1.0	1.0

(2) – Coefficienti da adottarsi per valutare l'effetto dell'attrito negativo sui pali.

Tabella 3 - Coefficienti parziali sulle caratteristiche meccaniche dei terreni

5.2 Verifiche nei confronti degli stati limite di esercizio (SLE)

Le opere e i sistemi geotecnici devono essere verificati nei confronti degli stati limite di esercizio. A tale scopo, il progetto deve esplicitare le prescrizioni relative agli spostamenti compatibili e le prestazioni attese per l'opera stessa.

Per ciascun stato limite di esercizio deve essere rispettata la condizione

$$E_d \leq C_d$$

dove

E_d è il valore di progetto dell'effetto dell'azione,

C_d è il valore limite prescritto dell'effetto delle azioni (definito dal progettista strutturale).

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38</p> <p>dal Km 18+200 al Km 68+300</p> <p>Relazione dimensionamento opere provvisorie</p>	<p>File: T00OM00STRRE01_A</p> <p>Data: Febbraio 2023</p> <p>Pag. 10 di 27</p>
---	---

La verifica della condizione $E_d \leq C_d$ deve essere effettuata impiegando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici dei materiali (Par. 6.5.3.2 NTC18) e deve garantire che gli spostamenti dell'opera in esame e del terreno circostante siano compatibili con la funzionalità della struttura.

All'interno del progetto devono pertanto essere definite le prescrizioni riguardanti gli spostamenti compatibili per l'opera e le prestazioni attese.

Al fine di valutare la compatibilità degli spostamenti delle opere di sostegno e del terreno circostante è stata condotta l'analisi secondo gli Stati Limite d'Esercizio, in cui sono stati posti pari all'unità tutti i coefficienti parziali di cui sopra. L'analisi pertanto è stata condotta adottando per le strutture e per i terreni i parametri caratteristici.

Per valutare la compatibilità degli spostamenti delle opere di sostegno ed il terreno circostante con i limiti prestazionali del progetto, considerata la natura provvisoria dell'opera, si verifica il limite massimo assunto pari a 5,0 cm.

5.3 Verifiche strutturali di sicurezza per le paratie

La verifica a flessione viene eseguita verificando che il momento flettente di calcolo M_{Ed} rispetti la seguente condizione:

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd}$$

dove la resistenza di progetto a flessione per sezioni di classe 3 vale:

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} \cdot \beta_B$$

β_B è un coefficiente riduttivo della resistenza a flessione, pari a 1 per profili a Z.

Se il taglio di calcolo V_{Ed} associato al momento flettente di calcolo M_{Ed} è inferiore a metà della resistenza di calcolo a taglio $V_{c,Rd}$ (ovvero $V_{Ed} \leq 0,5V_{c,Rd}$) si può trascurare l'influenza del taglio sulla resistenza a flessione.

La verifica a taglio viene eseguita verificando che il taglio di calcolo V_{Ed} rispetti la seguente condizione:

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

dove A_v è l'area resistente a taglio:

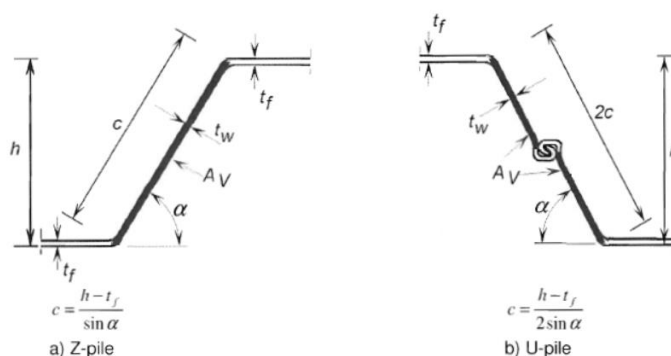


Figure 5-1: Definition of the shear area

Figura 3 – Definizione dell'area resistente a taglio (EC3 parte 5)

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38</p> <p>dal Km 18+200 al Km 68+300</p> <p>Relazione dimensionamento opere provvisorie</p>	<p>File: T00OM00STRRE01_A</p> <p>Data: Febbraio 2023</p> <p>Pag. 11 di 27</p>
---	---

6 METODI DI ANALISI E DI CALCOLO

Il dimensionamento e la verifica della paratia vengono condotte valutando gli effetti delle spinte del terreno sia durante le fasi costruttive che nella configurazione finale di progetto mediante l'ausilio del programma di calcolo **PARATIE PLUS vers. 23.0** (Harpaceas s.r.l., Milano)

6.1 Descrizione del programma di calcolo

Lo scopo principale di Paratie è analizzare l'interazione terreno-struttura durante le fasi realizzative dell'opera, valutando le deformazioni laterali subite dal diaframma durante le varie fasi di scavo e di conseguenza la variazione delle pressioni orizzontali nel terreno. La simulazione numerica del problema reale è condotta con il metodo degli elementi finiti; in dettaglio:

- si analizza un problema piano (i gradi di libertà nodali attivi sono lo spostamento laterale e la rotazione fuori piano);
- la schematizzazione del fenomeno fisico è del tipo 'trave su suolo elastico - alla Winkler': la parete di sostegno è schematizzata da una serie di elementi finiti verticali il cui comportamento flessionale è definito dalla rigidezza flessionale EJ; il terreno è simulato da elementi finiti monodimensionali (molle) con legge costitutiva di tipo elasto-plastico; gli altri elementi strutturali (tiranti, solette, puntoni...) sono schematizzati tramite molle puntuali convergenti in alcuni nodi della parete;
- l'analisi svolta è un'analisi statica incrementale di tipo elasto-plastico: ogni configurazione, quindi, dipende in generale dalle configurazioni precedenti e lo sviluppo di deformazioni plastiche ad un certo step di carico condiziona la risposta della struttura negli step successivi.

Il programma calcola l'energia potenziale del modello così concepito e ne impone la stazionarietà, ottenendo un sistema di equazioni che risolvono il problema. Tali equazioni hanno il significato fisico di equazioni di equilibrio ai nodi: la matrice dei coefficienti del sistema è una matrice di rigidezza, mentre i termini noti assumono il significato di forze applicate ai nodi. In quest'ottica, il metodo porta ad un modello matematico identico a quello ottenuto dal *metodo degli spostamenti*, approccio usuale nello studio delle strutture a telaio.

La legge costitutiva, rappresentativa del comportamento elasto-plastico del terreno, è identificata dai parametri di spinta/reazione e di deformabilità del terreno, e prevede cicli di scarico e ricarica.

I parametri di spinta/reazione del terreno sono:

- il coefficiente di spinta riposo K_0 , (corrispondente alla condizione iniziale indeformata)
- i coefficienti di spinta attiva K_A e passiva K_P (corrispondenti alle condizioni di equilibrio limite inferiore e superiore).

I parametri di deformabilità del terreno compaiono nella definizione della rigidezza delle molle. In particolare tale rigidezza viene definita come:

$$K = \frac{E \cdot \Delta}{L}$$

dove E è il modulo elastico del terreno, Δ il passo di discretizzazione della struttura ed L una grandezza geometrica caratteristica, diversa tra monte (L_A) e valle (L_P) in quanto diversa è la dimensione del cuneo di terreno coinvolto nel movimento.

Il programma valuta automaticamente la grandezza L attraverso le seguenti relazioni:

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38</p> <p>dal Km 18+200 al Km 68+300</p> <p>Relazione dimensionamento opere provvisorie</p>	<p>File: T00OM00STRRE01_A</p> <p>Data: Febbraio 2023</p> <p>Pag. 12 di 27</p>
---	---

$$L_A = \frac{2}{3} l_A \tan\left(45^\circ - \frac{\phi'}{2}\right) \quad \text{in zona attiva}$$

$$L_P = \frac{2}{3} l_P \tan\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right) \quad \text{in zona passiva}$$

dove l_A ed l_P sono rispettivamente:

$$l_A = \min\{l, 2H\}$$

$$l_P = \min\{l - H, H\}$$

Con:

l = lunghezza totale della paratia,

H = profondità corrente dello scavo.

6.2 Spinte della terra – Effetto dell'attrito terreno/struttura

Nella valutazione dei coefficienti di spinta (attiva e passiva) è necessario tenere in conto che l'angolo di attrito tra manufatto e terreno (δ) risulta inferiore all'angolo di attrito interno del terreno. Nel caso in studio si assume quanto segue:

$$\delta/\phi = 0.5 \quad \text{Spinta attiva e passiva - Analisi statiche e sismiche}$$

Per piano campagna orizzontale si fa riferimento alla seguente correlazione per il calcolo del coefficiente di spinta a riposo:

$$k_0 = 1 - \sin(\phi')$$

Il coefficiente di spinta attiva (K_a) viene valutato ricorrendo alla correlazione generale di Mueller-Breslau basata sulla teoria di Coulomb e riferita a superfici di rottura piane:

$$K_a = \frac{\sin^2(\alpha + \varphi)}{\sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha - \delta) \left[1 + \frac{\sqrt{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}}{\sqrt{\sin(\alpha - \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2}$$

dove:

φ = angolo d'attrito del terreno

α = angolo che la parete forma con l'orizzontale ($\alpha = 90^\circ$ per parete verticale)

δ = angolo d'attrito terreno-parete

β = inclinazione del terreno a monte rispetto all'orizzontale

Per il calcolo del coefficiente di spinta passiva si fa riferimento a superfici di rottura di tipo complesso (spirale logaritmica) come suggerito da Caquot & Kerisel (1948).

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38</p> <p>dal Km 18+200 al Km 68+300</p> <p>Relazione dimensionamento opere provvisorie</p>	<p>File: T00OM00STRRE01_A</p> <p>Data: Febbraio 2023</p> <p>Pag. 13 di 27</p>
---	---

Si riassumono nella tabella seguente i parametri caratteristici del terreno utilizzati nel calcolo in PARATIE:

da	a	Formazione	γ	c'	φ	E	K_0	K_a	K_p
(m)	(m)	(-)	(kN/m ³)	(kPa)	(°)	(MPa)	(-)	(-)	(-)
0	-11	Ghiaia e localmente ghiaie sabbiose	20	10	27	30	0,398	0,249	4,023
Profondità falda = 2,5 m monte									
Profondità falda = 4 m valle									

6.3 Modello di calcolo della palanca

L'opera provvisoria di progetto viene modellata in Paratie Plus mediante elementi finiti trave con legame costitutivo elastico-lineare. Ad essi saranno attribuite le rigidzze flessionali proprie della sezione in acciaio.

Le caratteristiche strutturali della sezione **AZ 18-700** considerata nelle analisi e nelle verifiche sono riportate nella figura seguente.

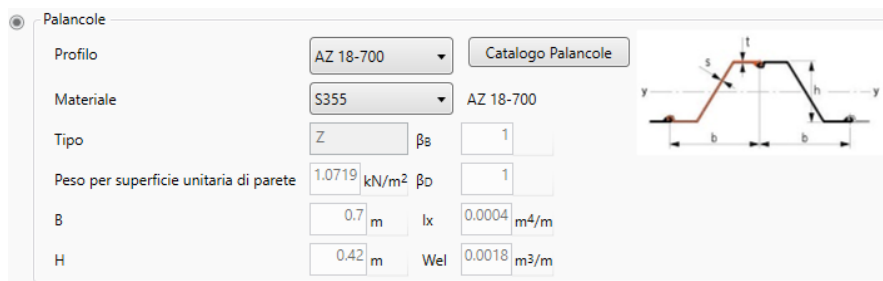


Figura 4 – caratteristiche strutturali della palanca in acciaio

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38</p> <p>dal Km 18+200 al Km 68+300</p> <p>Relazione dimensionamento opere provvisorie</p>	<p>File: T00OM00STRRE01_A</p> <p>Data: Febbraio 2023</p> <p>Pag. 14 di 27</p>
---	---

7 CARICHI

La valutazione delle azioni permanenti quali quelle derivate dal peso proprio del terreno e delle spinte delle terre viene effettuata automaticamente dal software numerico in base ai parametri geotecnici adottati.

Nelle analisi statiche sono stati considerati i seguenti sovraccarichi:

- Sovraccarico stradale distribuito pari a 20,00 kPa a tergo della paratia dovuto alla presenza della viabilità stradale a monte dell'opera.

Non è stato inserito alcun sovraccarico a valle in quanto non ritenuto significativo per il dimensionamento dell'opera.

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38</p> <p>dal Km 18+200 al Km 68+300</p> <p>Relazione dimensionamento opere provvisorie</p>	<p>File: T00OM00STRRE01_A</p> <p>Data: Febbraio 2023</p> <p>Pag. 15 di 27</p>
---	---

8 FASI DI CALCOLO

Le fasi di calcolo si articolano in 3 stage:

- Stage 1: Condizioni geostatiche. Condizione attuale con installazione paratia.
- Stage 2: Scavo a 4 m da testa dell'opera;
- Stage 3: Applicazione del sovraccarico a monte.

Nelle successive figure è riportata, per ognuna delle fasi di calcolo, una vista completa del modello con cui è stata svolta l'analisi su Paratie.

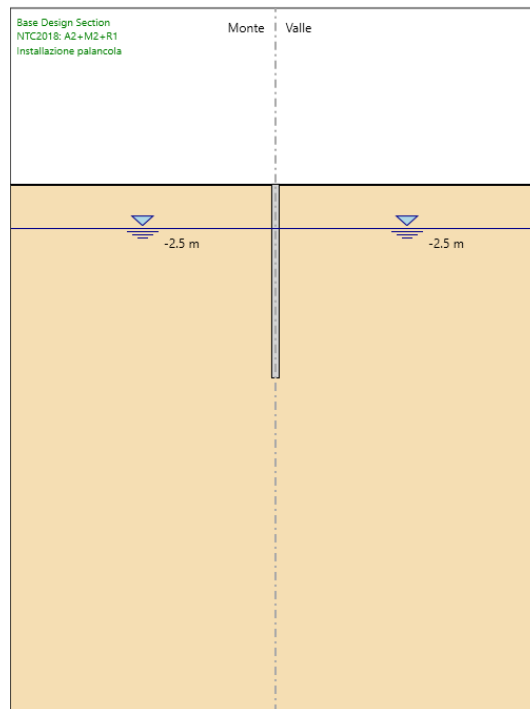


Figura 5 – Stage 1: Condizioni geostatiche – Installazione palanca

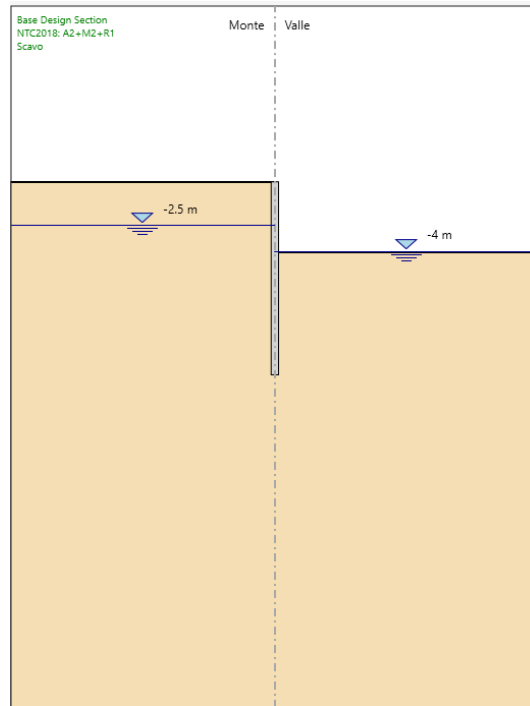


Figura 6 – Stage 2: Scavo fino a 4 m da p.c.

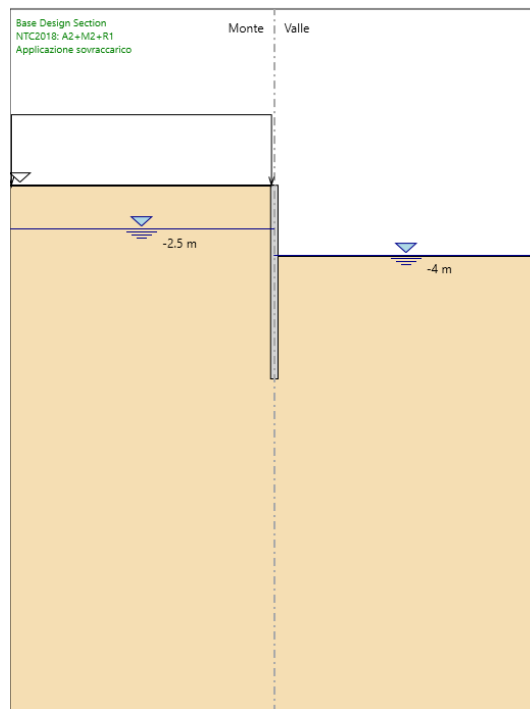


Figura 7 – Stage 3: Applicazione sovraccarico a monte dell'opera

9 RISULTATI DI CALCOLO

Si presentano nel seguito i risultati del calcolo per la fase 3 in termini di spinte, sollecitazioni di momento e di taglio sull'opera, configurazione deformata. I risultati sono dati per metro lineare.

9.1 SPINTE DEL TERRENO

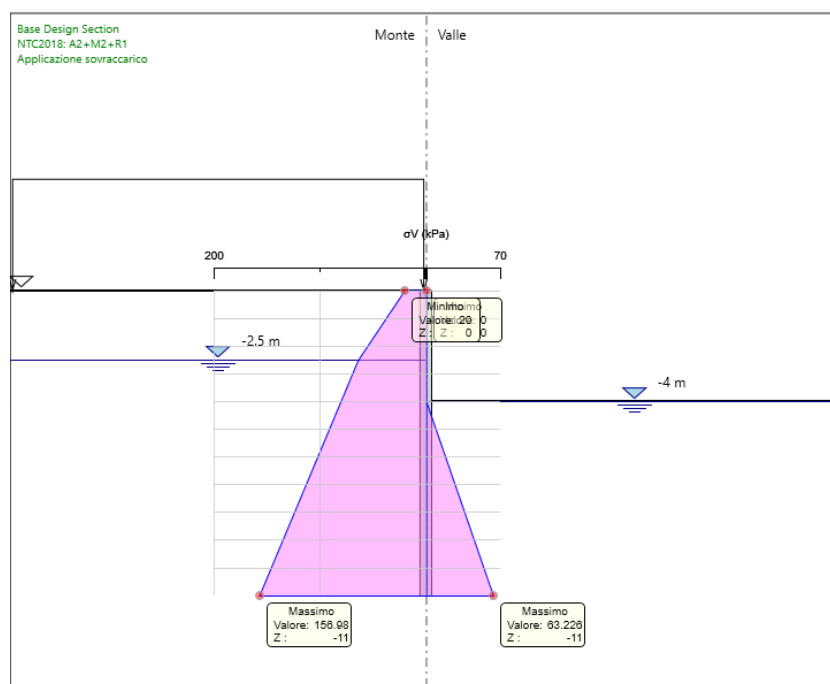


Figura 8 – Andamento delle tensioni verticali efficaci σ'_v

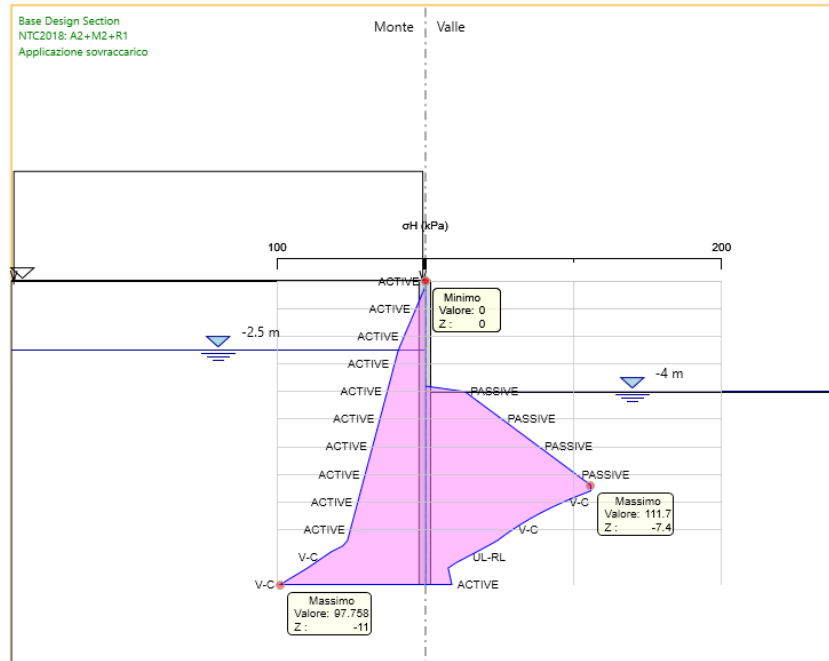


Figura 9 - Andamento delle tensioni orizzontali efficaci σ'_h

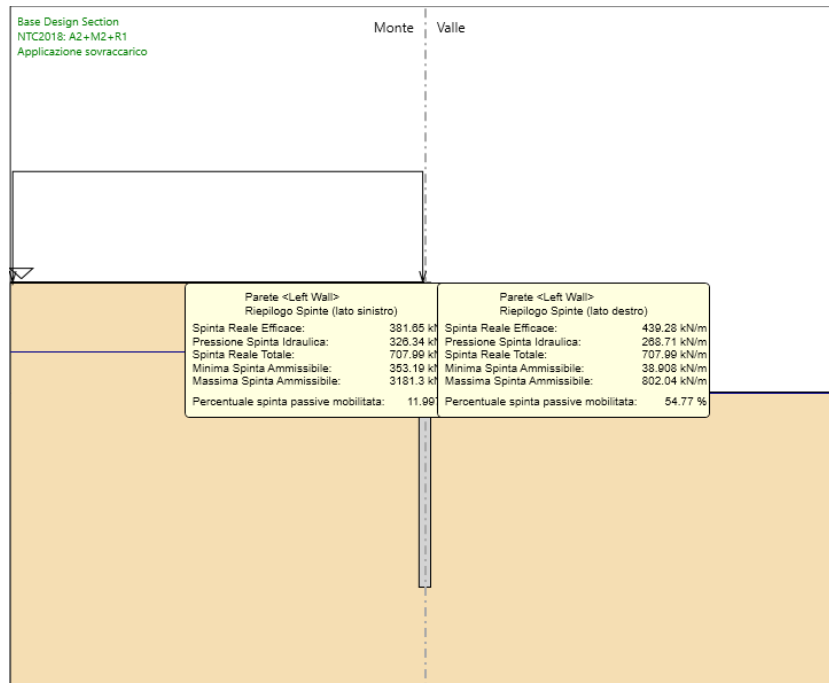


Figura 10 – Riepilogo delle spinte

9.2 SOLLECITAZIONI NELLA PALANCOLA

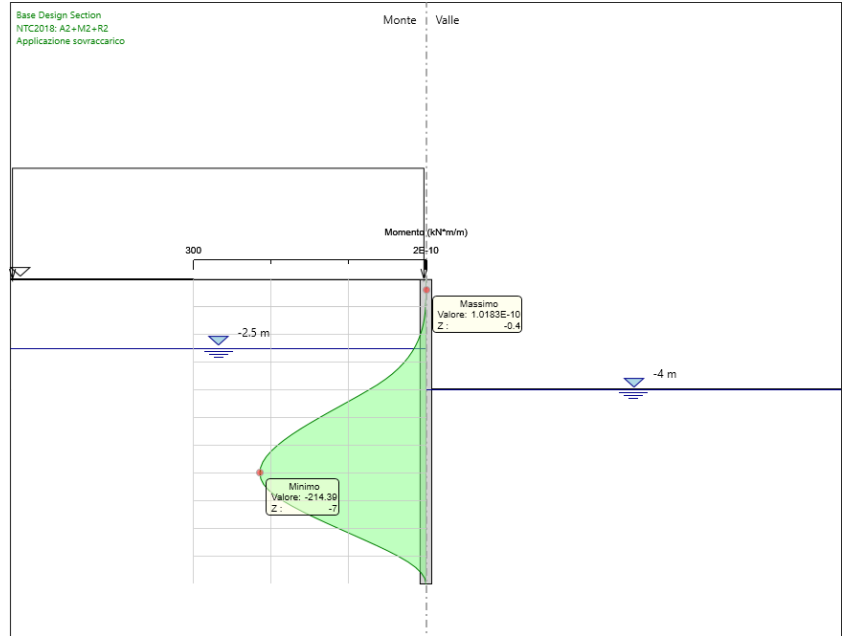


Figura 11 – Andamento del momento flettente nella palancola – combinazione A2+M2+R2

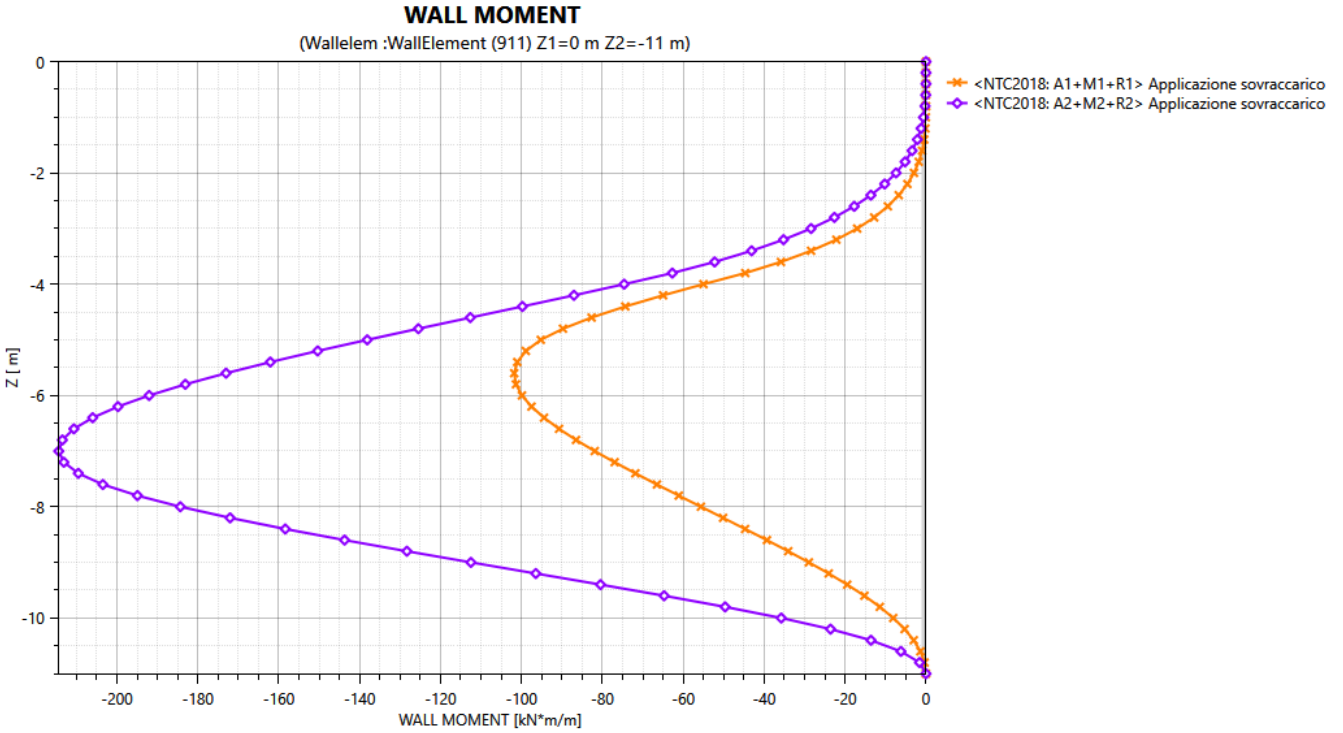


Figura 12 – Plot del momento flettente nella palancola – combinazioni A1+M1+R1 e A2+M2+R2

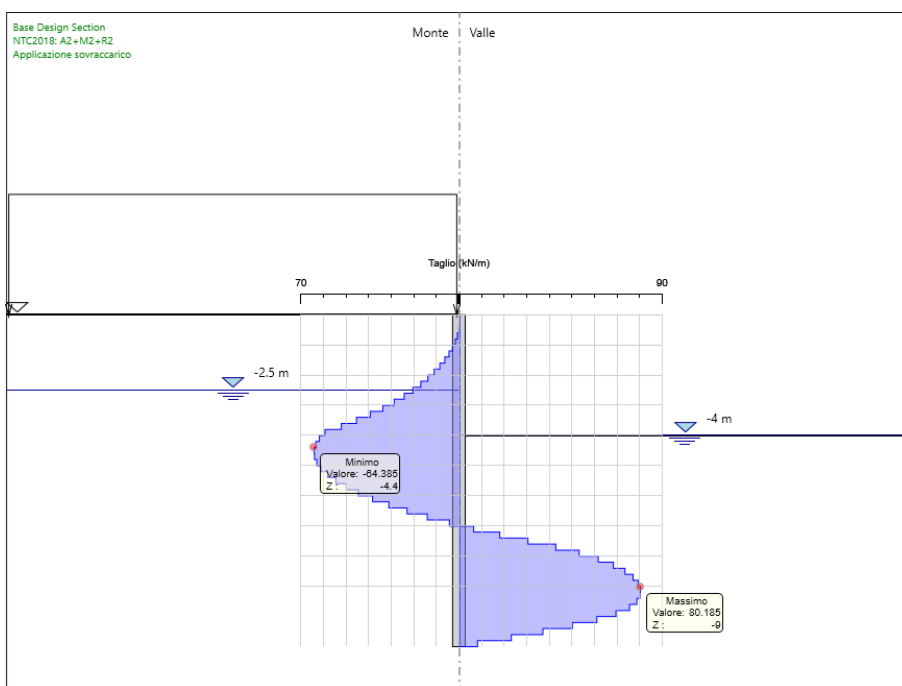


Figura 13 -- Andamento del taglio nella palancola – combinazione A2+M2+R2

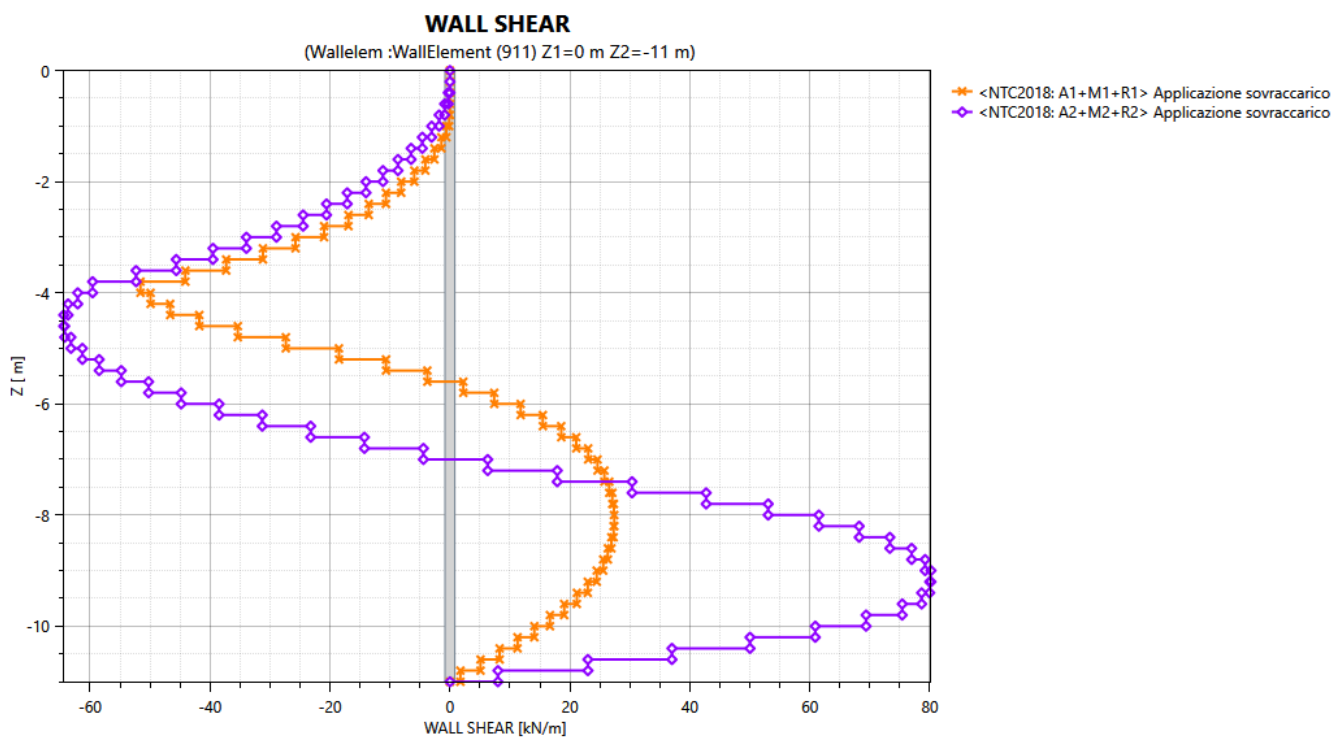


Figura 14 - Plot del taglio nella palancola – combinazioni A1+M1+R1 e A2+M2+R2

9.3 CONFIGURAZIONE DEFORMATA

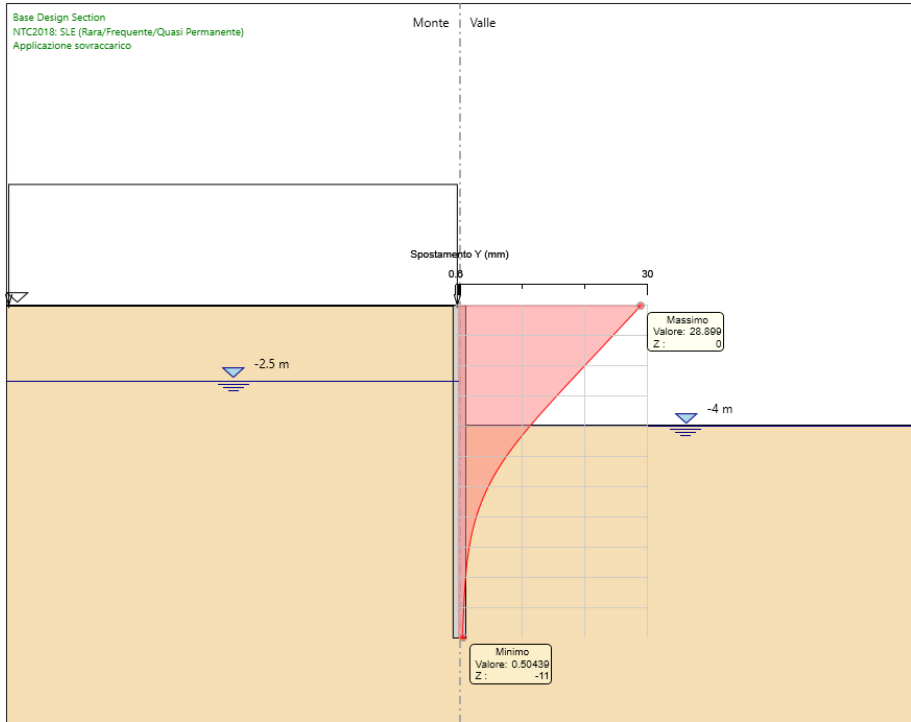


Figura 15 – Configurazione deformata nella combinazione allo SLE

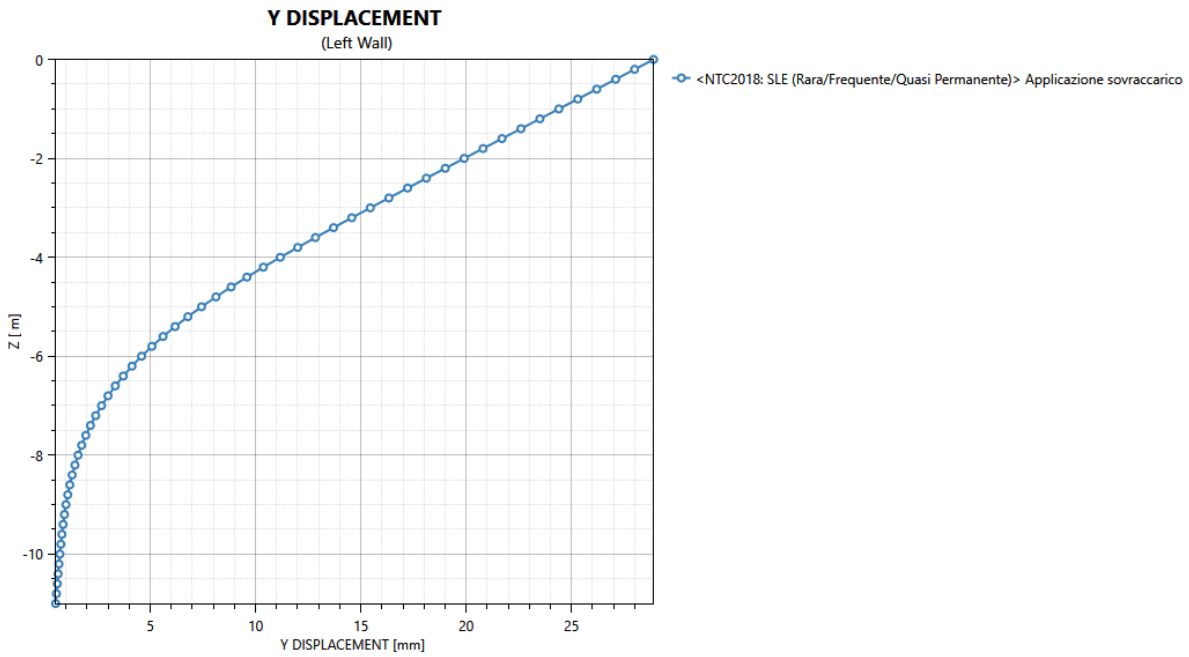


Figura 16 – Plot degli spostamenti nella combinazione allo SLE

10 VERIFICHE GEOTECNICHE E STRUTTURALI

10.1 VERIFICA DI STABILITA' DELL'OPERA (RESISTENZA DEL TERRENO A VALLE)

La verifica della stabilità dell'opera è stata condotta verificando che il massimo rapporto fra la spinta mobilitata e la spinta passiva disponibile sia inferiore a 1, in accordo alla normativa (NTC 2018 par. 6.5.3.1.2), secondo l'Approccio 1:

- Combinazione 1, ovvero: A1 + M1 + R1: 30,6 % in fase 3
- Combinazione 2, ovvero: A2 + M2 + R2: 54,8 % in fase 3

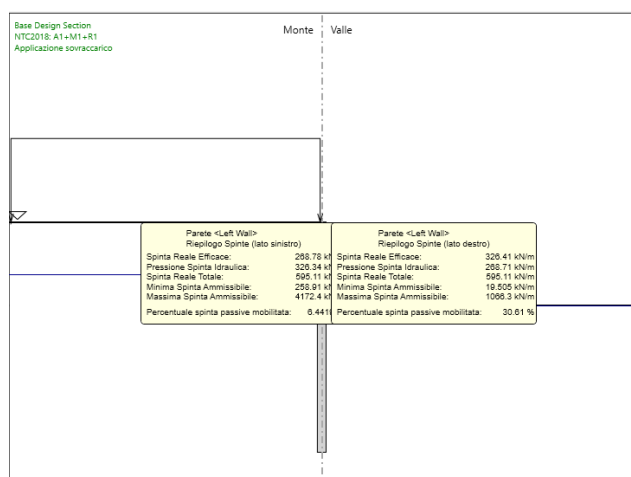


Figura 17 – riepilogo spinte combinazione A1+M1+R1

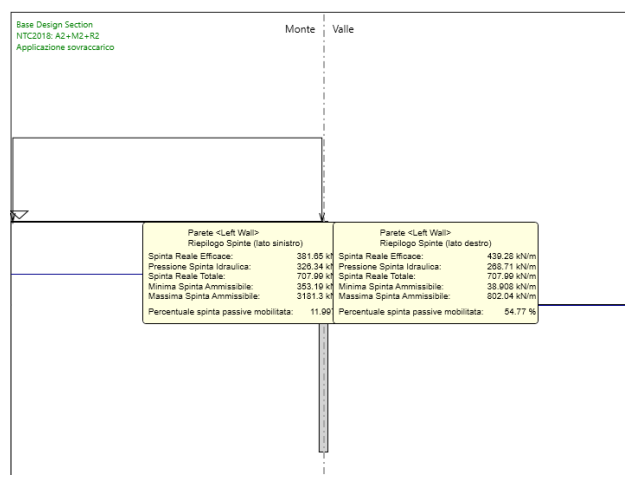


Figura 18 – riepilogo spinte combinazione A2+M2+R2

Nel caso in esame, in campo statico, la massima percentuale di spinta passiva di progetto mobilitata a valle risulta pari al 54,8 % della spinta possibile:

$$\frac{\text{spinta reale efficace}}{\text{massima spinta ammissibile}} = \frac{439,3 \text{ kN/m}}{802,0 \text{ kN/m}} = 0,5477$$

La verifica di stabilità risulta quindi **soddisfatta**.

10.2 VERIFICA DI SIFONAMENTO

Il fenomeno del sifonamento può insorgere a causa del dislivello del piano di falda tra monte e valle, che può portare all'instaurarsi di un fenomeno di filtrazione dell'acqua. Il sifonamento si verifica se il flusso dell'acqua è tale da annullare la resistenza del terreno, con conseguente collasso progressivo dell'opera di sostegno.

Tale fenomeno si verifica se il gradiente idraulico i eguaglia il valore del gradiente idraulico critico i_c definito come:

$$i \leq i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

Con γ' peso efficace dell'unità di volume del terreno e γ_w peso specifico dell'acqua.

La verifica idraulica secondo il par. 6.2.4.2 delle NTC 2018 prevede che il gradiente idraulico sia, al più, pari al gradiente idraulico critico opportunamente diviso per un coefficiente parziale γ_R pari a 3 se la verifica è condotta utilizzando il valore del gradiente idraulico medio.

Nella figura seguente si riporta il valore del gradiente idraulico i ricavato dal programma di calcolo.

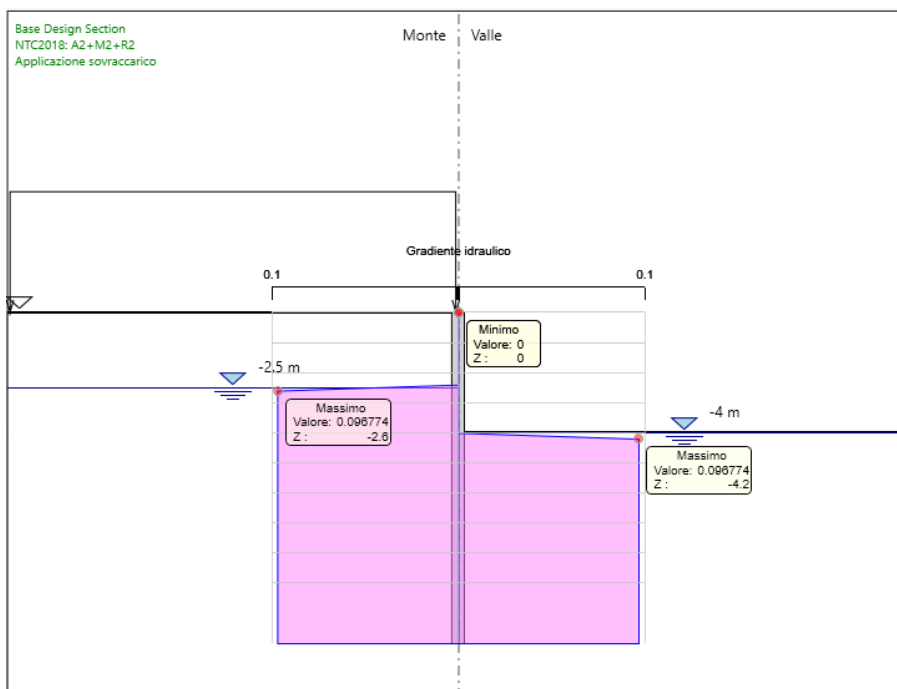


Figura 19 – Gradiente idraulico i

Il gradiente idraulico i è pari a 0,096 pertanto:

$$i \cdot \gamma_R \leq i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

$$0,096 \cdot 3 = 0,29 \leq i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{20 - 10}{10} = 1$$

La verifica a sifonamento è ampiamente **soddisfatta**.

10.3 VERIFICHE DELLA RESISTENZA STRUTTURALE DELL'OPERA

A favore di sicurezza le verifiche si riferiscono alla fase di calcolo più gravosa, quindi la fase 3 con applicazione del sovraccarico a monte dell'opera.

Si riportano nel seguito i diagrammi di sfruttamento a momento e a taglio nella combinazione più gravosa A2+M2+R2.

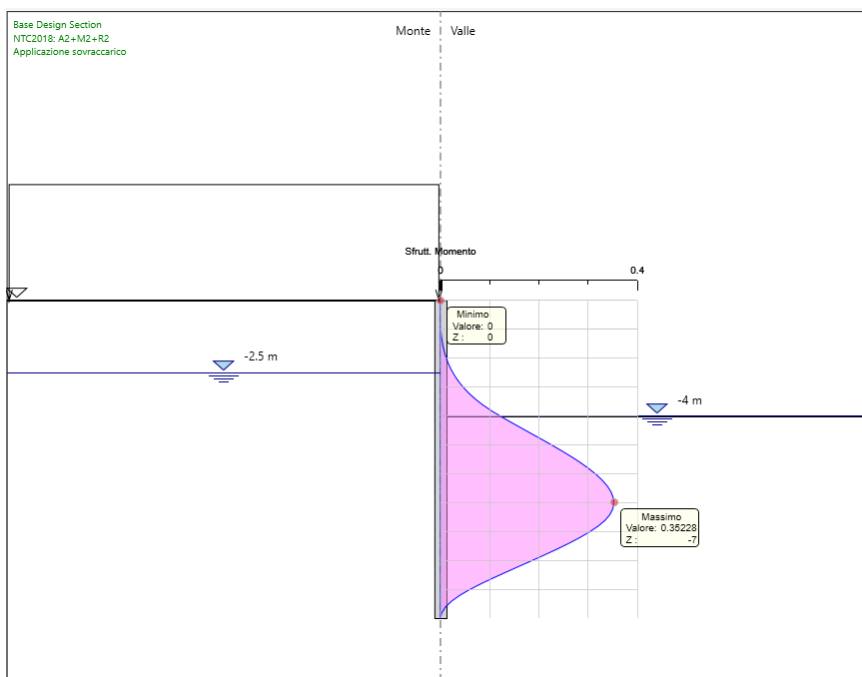


Figura 20 – Diagramma di sfruttamento momento flettente – combinazione A2+M2+R2

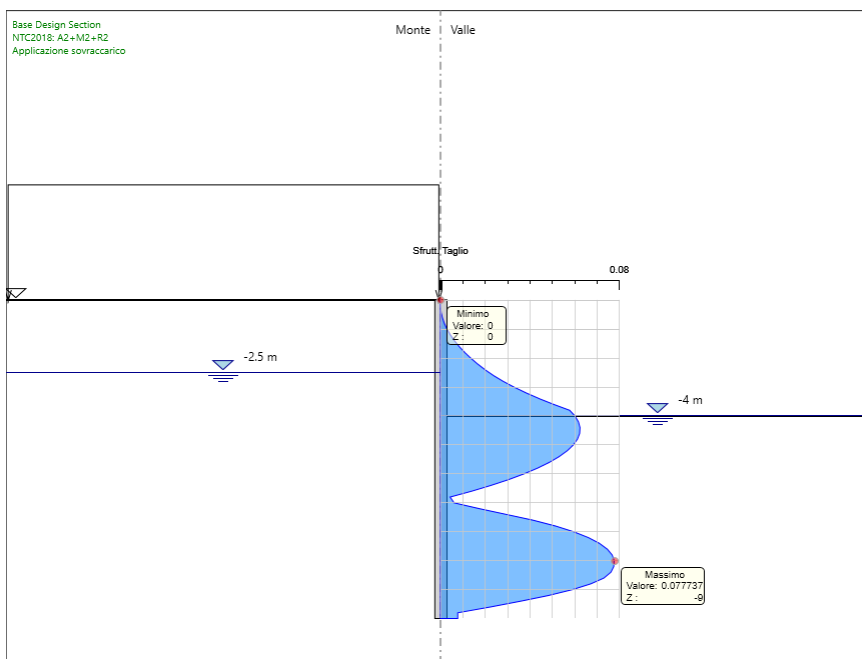


Figura 21 – Diagramma di sfruttamento taglio – combinazione A2+M2+R2

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38</p> <p>dal Km 18+200 al Km 68+300</p> <p>Relazione dimensionamento opere provvisorie</p>	<p>File: T00OM00STRRE01_A</p> <p>Data: Febbraio 2023</p> <p>Pag. 25 di 27</p>
---	---

Si riporta nel seguito il calcolo della resistenza a flessione e a taglio secondo EC3 parte 5 e il confronto con le massime sollecitazioni di momento e di taglio ricavate nella combinazione A2+M2+R2.

Tipologia Palancola		AZ 18-700
SEZIONE		
$W_{el,y}$	0,0018	m ³ /m
A	0,0146	m ² /m
A_v	0,0053	m ² /m
MATERIALE		
Classe acciaio	S355	
f_{yk}	355	MPa
γ_{MO}	1,05	[-]
AZIONI DI CALCOLO		
M_{Ed}	214,4	kNm/m
V_{Ed}	80,2	kN/m
RESISTENZE DI PROGETTO		
β_B	1	[-]
$V_{Ed}/V_{c,Rd}$	8%	[-]
ρ	0	[-]
M_{Rd}	608,6	kNm/m
$V_{c,Rd}$	1031,4	kN/m
VERIFICHE		
C.S. flessione	0,35	[-]
C.S. taglio	0,08	[-]

Le verifiche risultano **soddisfatte**.

10.4 VERIFICHE ALLO SLE

Gli spostamenti dell’opera sono stati valutati per verificarne la compatibilità con la funzionalità dell’opera e con la sicurezza e la funzionalità di manufatti adiacenti.

Al fine di valutare la compatibilità degli spostamenti dell’opera di sostegno e del terreno circostante è stata condotta l’analisi secondo gli Stati Limite d’Esercizio, in cui sono stati posti pari all’unità tutti i coefficienti parziali di sicurezza. L’analisi pertanto è stata condotta adottando per le strutture e per i terreni i parametri caratteristici.

Si considerano ammissibili spostamenti inferiori a 5 cm, il valore massimo rilevato allo SLE ammonta a 2,9 cm, pertanto la verifica risulta soddisfatta. Si riportano nella figura seguente i profili di spostamento lungo la paratia per tutte le 3 fasi di calcolo.

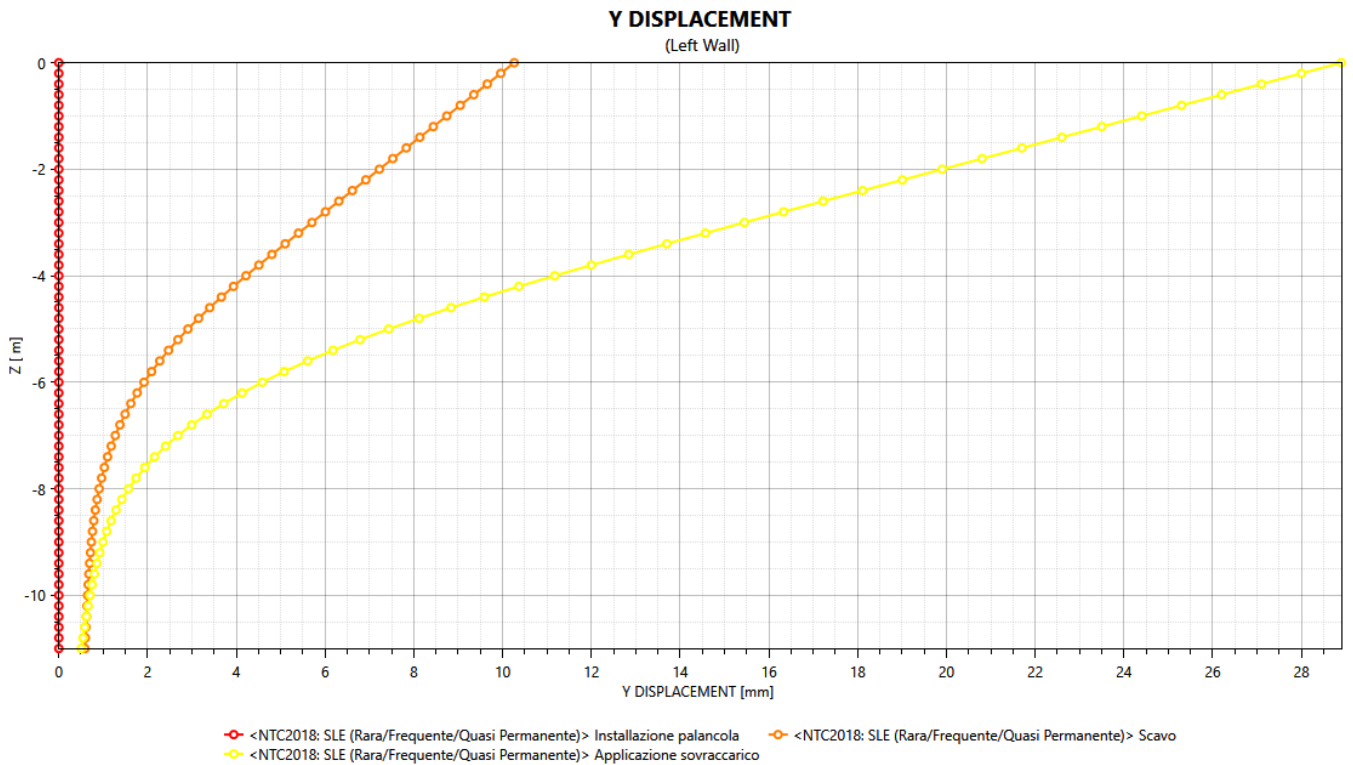


Figura 22 – Plot degli spostamenti della palancola nella combinazione di SLE per le 3 fasi di calcolo

<p>ANAS S.p.A.</p> <p>Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38</p> <p>dal Km 18+200 al Km 68+300</p> <p>Relazione dimensionamento opere provvisorie</p>	<p>File: T00OM00STRRE01_A</p> <p>Data: Febbraio 2023</p> <p>Pag. 27 di 27</p>
---	---

11 AFFIDABILITA' DEI RISULTATI DEL SOFTWARE DI CALCOLO

Dichiarazioni secondo NTC 2018 (par. 10.2)

Tipo di analisi svolta

Descrive in modo approfondito gli algoritmi numerici alla base della simulazione di un'opera di sostegno tramite il metodo delle molle non lineari.

Origine e caratteristiche dei codici di calcolo

Titolo	Paratie Plus
Versione	23.0.2
Produttore	Harpaceas s.r.l., Milano

Casi prova che consentano un riscontro dell'affidabilità

Per tutti gli algoritmi e le diverse opzioni di modellazione implementate, sono riportati casi prova commentati con il confronto tra i risultati forniti dal programma ed i valori di riferimento, disponibili in genere da esempi teorici risolvibili con altri metodi o tramite il confronto con valori in letteratura.

Tutti i file di input dei casi prova sono compresi nell'installazione del programma.

Stima parametri

Contiene una guida per la determinazione dei principali parametri geomeccanici di input, alla luce delle tecnologie sperimentali più diffuse, e secondo raccomandazioni accreditate in letteratura e da standard internazionali.

Verifiche strutturali

Descrive le assunzioni ingegneristiche alla base delle procedure di verifica degli elementi strutturali.