



GeoMurus

Progettazione e Calcolo dei Muri di Sostegno

DOCUMENTAZIONE DI AFFIDABILITA'

**Basi Teoriche, Algoritmi Impiegati e
Casi Prova**

Ai sensi del:

DM 17/01/2018 cap. 10 - Norme Tecniche per le Costruzioni

ACCA software S.p.A.

Contrada Rosole 13 - 83043 BAGNOLI IRPINO (AV) - Italy

INDICE

BASI TEORICHE E ALGORITMI IMPIEGATI

1. PREMESSA.....	3
2. METODI DI CALCOLO UTILIZZATI.....	3
2.1. Calcolo della Spinta	3
2.1.1. Metodo di calcolo da LETTERATURA.....	3
2.1.2. Metodo implementato da GeoMurus.....	4
2.2. Calcolo Carico Limite	4
2.2.1. Metodo di calcolo.....	4

CASI PROVA

1 TEST DI VALIDAZIONE N.1 (Spinta Terreno Incoerente)	7
2 TEST DI VALIDAZIONE N.2 (Carico Limite Fondazione)	11
3 TEST DI VALIDAZIONE N.3 (Verifica a Ribaltamento)	16
4 TEST DI VALIDAZIONE N.4 (Verifica a Scorrimento).....	19
5 TEST DI VALIDAZIONE N.5 (Carico Limite Micropali)	21
6 TEST DI VALIDAZIONE N.6 (Carico Limite Pali)	27
7 TEST DI VALIDAZIONE N.7 (Calcolo Tiranti)	31
8 TEST DI VALIDAZIONE N.8 (Verifica di Stabilità)	58

BASI TEORICHE E ALGORITMI IMPIEGATI

1. PREMESSA

Il presente documento ha lo scopo di chiarire le modalità con cui vengono effettuati i calcoli eseguiti dal programma **GeoMurus** e di verificare l'affidabilità dei risultati.

GeoMurus è la soluzione ACCA per la progettazione e il calcolo dei muri di sostegno a **gravità**, a **mensola** e a **Gabbioni**. Tutte le verifiche previste e la metodologia di calcolo adottata sono state effettuate nel rispetto della Normativa Vigente.

Al fine di ottenere un riscontro sui risultati di calcolo e di verifica di **GeoMurus** si è fatto riferimento a vari testi di Letteratura Tecnica riportati in bibliografia.

Si riportano di seguito alcuni esempi di calcolo.

2. METODI DI CALCOLO UTILIZZATI

2.1. Calcolo della Spinta

2.1.1. Metodo di calcolo da LETTERATURA

Al **p. 9.3 del Cestelli-Guidi vol. 1**, il calcolo della spinta attiva è stato effettuato con il metodo di Coulomb, basato sullo studio dell'equilibrio limite globale tra il muro e il cuneo di terreno a monte.

Si pone:

- S_t = Spinta terreno;
- S_q = Spinta del sovraccarico a monte;
- H = Altezza Paramento;
- K_a = Coefficiente di spinta attiva;
- γ_t = Peso per unità di volume del terreno;
- φ = Angolo di attrito terreno;
- β = Inclinazione paramento;
- δ = Angolo attrito Terra-Muro;
- ε = Angolo inclinazione piano campagna.

Dove:

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

$$S_t = \frac{1}{2} \cdot \gamma_t \cdot K_a \cdot H^2;$$

$$S_q = q_m \cdot K_a \cdot H.$$

Sotto l'azione sismica il coefficiente di spinta diventa:

$$K = \frac{\cos^2(\varphi - \beta - \theta)}{\cos \theta \cdot \cos^2 \beta \cdot \cos(\beta + \delta + \vartheta) \cdot \left[1 + \frac{\sin(\delta + \varphi) \cdot \sin(\varphi - \varepsilon - \vartheta)}{\cos(\beta + \delta + \vartheta) \cdot \cos(\beta - \varepsilon)} \right]^2}.$$

La corrispondente spinta sismica sarà data da:

$$S_d = \frac{1}{2} \cdot \gamma_t \cdot (1 \mp K_v) \cdot K \cdot H^2.$$

Il sovraccarico induce un incremento di spinta costante lungo il paramento e la corrispondente spinta è fornita dalla seguente relazione:

$$S_{dq} = q_m \cdot (1 \mp K_v) \cdot K \cdot H.$$

I valori di K_h e K_v sono dati dalle relazioni (p. 7.11.6.2.1 - NTC 2018):

$$K_h = \beta_m \cdot \frac{a_{\max}}{g};$$

$$K_v = \pm 0.5 \cdot K_h.$$

dove:

$a_{\max}$ = accelerazione orizzontale massima attesa al sito.

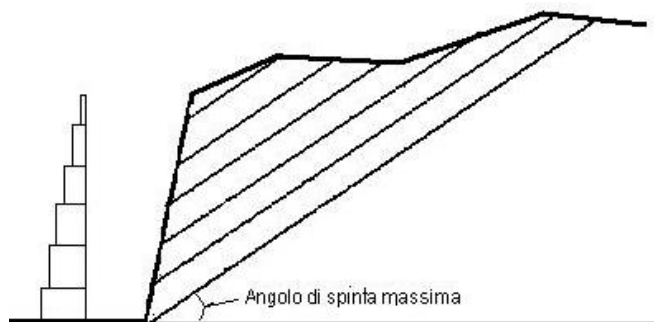
g = accelerazione di gravità.

β_m = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito (assunto pari a 0,38).

2.1.2. Metodo implementato da GeoMurus

Per ottenere la distribuzione delle pressioni lungo l'altezza della parete ed il punto di applicazione della spinta, immaginando di trovarsi sempre in un caso generale e non nello specifico di Coulomb, si opera col metodo di Huntington, che consiste nel:

- 1) considerare tante ipotetiche linee di frattura lungo l'altezza, parallele a quella di massima spinta individuata con Culmann;
- 2) per ognuna di esse calcolare la spinta;
- 3) calcolare la differenza di spinta tra due valori successivi che rappresenta la pressione sul muro in quel punto con cui costruire il diagramma delle pressioni sul muro;
- 4) trovare il punto di applicazione della spinta (baricentro del diagramma delle pressioni).



Questo procedimento viene applicato:

- sul cuneo che parte dal vertice in basso a monte del paramento e ciò al fine di ottenere le azioni con cui si andranno a verificare le sezioni del paramento stesso;
- sul cuneo che parte dal vertice in basso della fondazione a monte e ciò al fine di ottenere le azioni massime necessarie per le verifiche allo scorrimento e al carico limite sulla fondazione stessa.

2.2. Calcolo Carico Limite

2.2.1. Metodo di calcolo

Nella pratica, per il calcolo della capacità portante di una fondazione superficiale si adotta la classica formula suggerita da Vesic (*equazione generale di capacità portante di fondazioni superficiali*):

$$q_{\lim} = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot b_c \cdot g_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot b_q \cdot g_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot g_\gamma$$

Le equazioni più usate per la stima dei **fattori di capacità portante** sono:

Fattori di capacità portante

N_q	N_c	N_γ
$N_q = e^{\pi \tan \phi} \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$	$N_c = (N_q - 1) \cdot \tan \phi$	$N_\gamma = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan \phi$

Inoltre, si è indicato con:

s_c, s_q, s_γ = Fattori di forma;

d_c, d_q, d_γ = Fattori di profondità;

i_c, i_q, i_γ = Fattori di inclinazione del carico;

b_c, b_q, b_γ = Fattori di inclinazione del piano di posa;

g_c, g_q, g_γ = Fattori di inclinazione del piano campagna.

Capita spesso che le fondazioni superficiali devono sopportare carichi eccentrici oppure inclinati che comportano una riduzione della capacità portante dovuta proprio all'eccentricità del carico, riducendo l'area resistente a rottura.

In genere per una fondazione di dimensioni $B \cdot L$ con eccentricità e_B ed e_L , dei carichi lungo il lato B ed L , si terrà conto di una fondazione con area ridotta pari a $B' \cdot L'$, dove:

$$B' = B - 2 \cdot e_B$$

$$L' = L - 2 \cdot e_L$$

Vengono riportate di seguito le tabelle per il calcolo dei fattori.

Fattori di forma

Fattori di forma

Forma della fondazione	s_c	s_q	s_γ
Rettangolare	$1 + \frac{B'}{L'} \cdot \frac{N_q}{N_c}$	$1 + \frac{B'}{L'} \cdot \tan \phi$	$1 - 0.4 \cdot \frac{B'}{L'}$
Circolare o quadrata	$1 + \frac{N_q}{N_c}$	$1 + \tan \phi$	0.6

Fattori di Profondità

Si pone:

D = Profondità piano di posa.

B' = Larghezza fondazione ridotta.

Fattori di Profondità

Valore di ϕ	d_c	d_q	d_γ
$\phi = 0$ argilla satura in condizioni non drenate	$\frac{D}{B'} \leq 1$ $1 + 0.4 \cdot \frac{D}{B'}$ $\frac{D}{B'} > 1$ $1 + 0.4 \cdot \arctan\left(\frac{D}{B'}\right)$	1	1
$\phi > 0$ sabbia e argilla in condizioni drenate	$d_q - \frac{1 - d_q}{N_c \cdot \tan \phi}$	$\frac{D}{B'} \leq 1$ $1 + 2 \cdot \tan \phi \cdot (1 - \sin \phi)^2 \cdot \frac{D}{B'}$ $\frac{D}{B'} > 1$ $1 + 2 \cdot \tan \phi \cdot (1 - \sin \phi)^2 \cdot \arctan\left(\frac{D}{B'}\right)$	1

Fattori di inclinazione del carico

Si pone:

H = Risultante delle forze orizzontali.

V = Risultante delle forze verticali.

Fattori di inclinazione del carico

Terreno	i_c	i_q	i_γ
$\phi = 0$ argilla satura in condizioni non drenate	$1 - \frac{m \cdot H}{B \cdot L \cdot c_u \cdot N_c}$	1	1
$c > 0, \phi > 0$ argilla in condizioni drenate	$i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \cdot \tan \phi}$	$\left[1 - \frac{H}{V + B \cdot L \cdot c' \cdot \text{ctg} \phi'}\right]^m$	$\left[1 - \frac{H}{V + B \cdot L \cdot c' \cdot \text{ctg} \phi'}\right]^{m+1}$
$c = 0$ sabbia	-	$\left(1 - \frac{H}{V}\right)^m$	$\left(1 - \frac{H}{V}\right)^{m+1}$

$$m = m_L \cdot \cos^2 \vartheta + m_B \cdot \sin^2 \vartheta$$

$$m_B = \frac{2 + \frac{B}{L}}{1 + \frac{B}{L}}$$

$$m_L = \frac{2 + \frac{L}{B}}{1 + \frac{L}{B}}$$

ϑ è l'angolo fra la direzione del carico proiettata sul piano di fondazione e la direzione di L

Fattori inclinazione del piano di posa

Si pone:

ε = Inclinazione del piano di posa.

Fattori inclinazione del piano di posa

b_c	b_q	b_r
$b_q - \frac{1 - b_q}{N_c \cdot \tan \phi}$	$(1 - \varepsilon \cdot \tan \phi)^2$	$(1 - \varepsilon \cdot \tan \phi)^2$

Fattori di inclinazione del piano di campagna

Si pone:

ω = Inclinazione del piano di campagna.

Fattori di inclinazione del piano di campagna

g_c	g_q	g_r
$g_q - \frac{1 - g_q}{N_c \cdot \tan \phi}$	$(1 - \tan \omega)^2 \cdot \cos \omega$	$\frac{g_q}{\cos \omega}$

CASI PROVA

1 TEST DI VALIDAZIONE N.1 (Spinta Terreno Incoerente)

Il file di GeoMurus è: **T1 - Validazione_Incoerente.GMS**.

Allo scopo di ottenere dei risultati facilmente confrontabili si è considerata un'opera semplice dal punto di vista geometrico e un calcolo senza SISMA.

Descrizione dell'opera

Il muro in esame è a mensola con le seguenti caratteristiche (*fig. 1*):

- paramento verticale ($\beta = 0$);
- altezza (H) pari a 5,00 m;
- spessore (S_{pm}) pari a 0,40m;
- larghezza della fondazione (B) pari a 2,50 m;
- altezza della fondazione (H_{fm}) pari a 0,50 m;
- larghezza della ciabatta di fondazione a valle (L_{fv}) pari a 0,40 m;
- larghezza della ciabatta di fondazione a monte (L_{fm}) pari a 1,70 m;
- lunghezza del muro (L) pari a 10,0 m;
- Materiale "C20/25-B450C" ($\gamma_t = 25000 \text{ N/m}^3$).

Il terreno considerato [*T1-Sabbia compatta (asciutta)*] presenta le seguenti caratteristiche (*fig. 2*):

- peso per unità di volume (γ_t) pari a $20\,000 \text{ N/m}^3$.
- angolo di attrito (φ) pari a 34° .
- coesione drenata (c') e non drenata (c_u) pari a 0 N/mm^2 .
- profilo a monte lo si considera orizzontale ($\varepsilon = 0$) con un'altezza pari a quella del paramento (*fig. 3*).
- profilo a valle 20 cm al di sopra della ciabatta di fondazione (*fig. 3*).

NON viene considerata la presenza della falda e si è considerato un angolo di attrito terreno-muro (δ) pari a $22,66^\circ$ ($2\varphi/3$).

Infine, a monte si è considerato (*fig. 4*) un sovraccarico (q) pari a:

- $10\,000 \text{ N/m}^2$ come condizione di carico *Permanente*;
- $5\,000 \text{ N/m}^2$ come condizione di carico Variabile -> *Abitazione*.

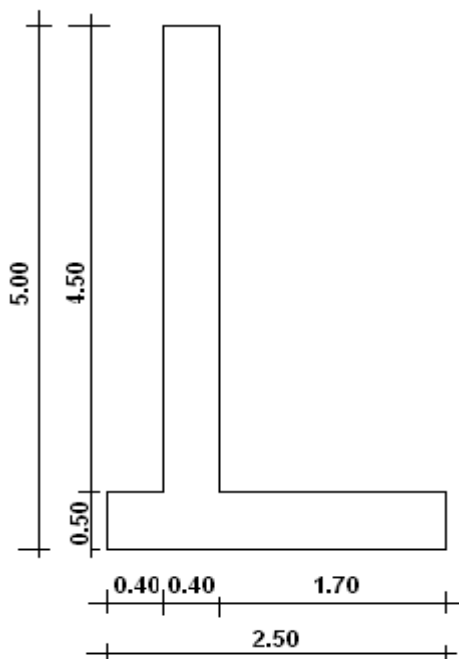
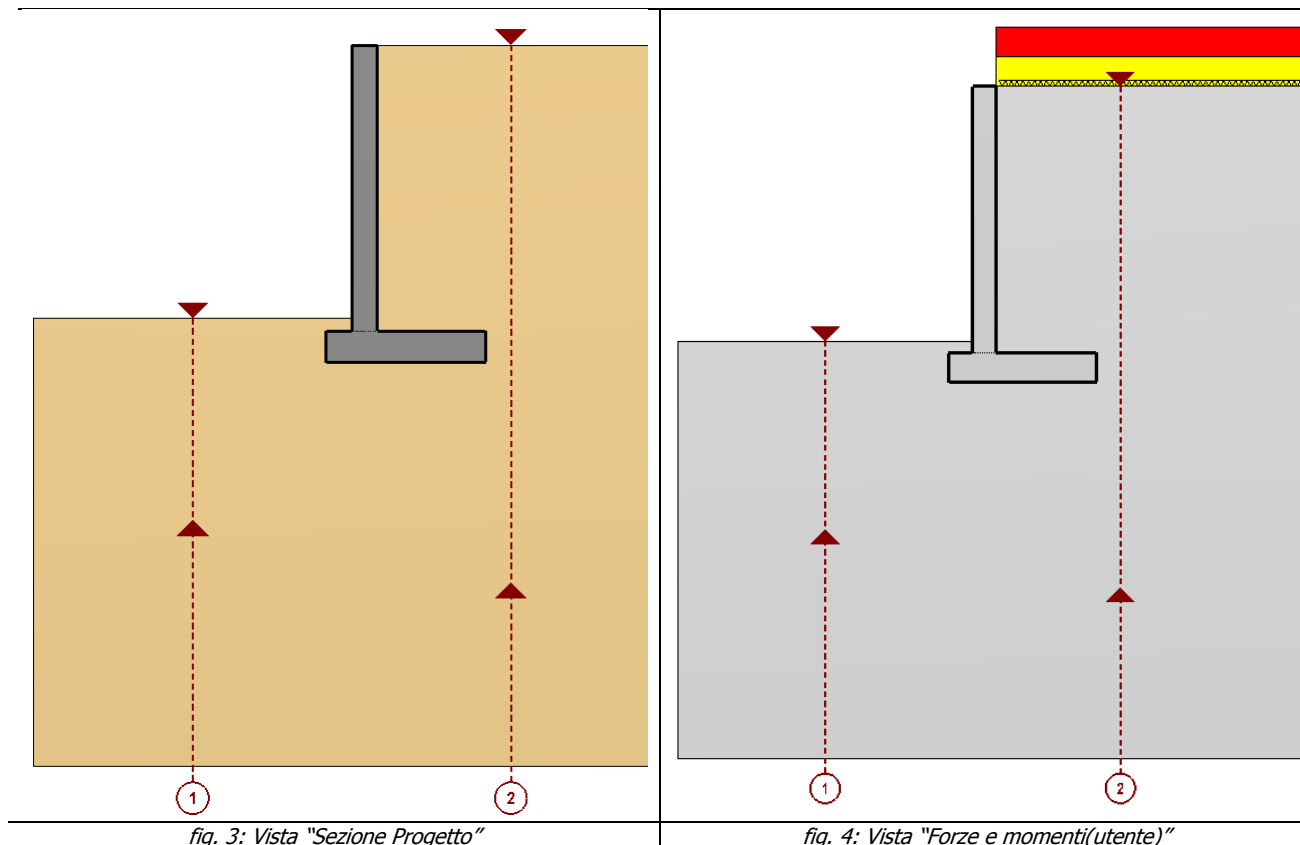


fig. 1. Geometria Muro

fig. 2: Terreno



Parametri di calcolo

In funzione dell'Approccio 2 utilizzato (A1 + M1 + R3) i parametri fondamentali per calcolare la spinta sono:

COND.	φ [°]	δ [°]	ε	β	K_A
A1 + M1 + R3	34,00°	22,66°	0	0	0,2542

Si riportano nelle successive tabelle i coefficienti parziali di sicurezza relativi alle azioni e al terreno.

Tab. 6.2.I - Coefficienti parziali per le azioni

Azione	Effetto	Coeff. Parziale γ_r (o γ_e)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,90	1,00	1,00
	Sfavorevole		1,10	1,30	1,00
Carichi permanenti G_2	Favorevole	γ_{G2}	0,80	0,80	0,80
	Sfavorevole		1,50	1,50	1,30
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_Q	0,00	0,00	0,00
	Sfavorevole		1,50	1,50	1,30

Tab. 6.2.II - Coefficienti parziali per parametri geotecnici del terreno

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	M2
Tangente dell'angolo di resistenza a taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,00	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,00	1,25
Resistenza non drenata	$c_{u'k}$	γ_{c_u}	1,00	1,40
Peso unità di volume	γ_r	γ_r	1,00	1,00

Azioni

Indichiamo con:

X_g = Ascissa baricentro rispetto al punto estremo a valle.
 Y_g = Ordinata baricentro rispetto alla base della fondazione.
 B = Larghezza Fondazione.
 L = Lunghezza Fondazione.
 P_{mp} = Peso Paramento.
 P_{mf} = Peso Fondazione.

P_m = Peso complessivo del Muro.
 P_{tm} = Peso terreno a monte.
 P_{tv} = Peso terreno a valle.
 P_{qp} = Sovraccarico permanente a monte.
 P_{qv} = Sovraccarico variabile a monte.

Le coordinate del baricentro sono:

X_g [m]	Y_g [m]
0,88	1,48

Le azioni a cui è soggetta l'opera sono:

P_{mp}	=	0,40-4,50-25,00	=	45,00	kN
P_{mf}	=	2,50-0,50-25,00	=	31,25	kN
P_m	=	$P_{mp} + P_{mf} = 45,00+31,25$	=	76,25	kN
P_{tm}	=	1,70-4,50-20,00	=	153,00	kN
P_{tv}	=	0,40-0,20-20,00	=	1,60	kN
P_{qp}	=	10,00-1,70	=	17,00	kN
P_{qv}	=	5,00-1,70	=	8,50	kN

Risultati di calcolo

Si riportano nelle tabelle seguenti i valori calcolati nella condizione (A1 + M1 + R3).

Indichiamo con:

φ	[gradi]	= Angolo di attrito terreno.	S_{qv}	[kN]	= Spinta carico variabile.
δ	[gradi]	= Angolo di attrito Terreno-Muro.	$S_{H,qp}$	[kN]	= Spinta orizzontale carico permanente.
S_t	[kN]	= Spinta Risultante terreno sul cuneo .	$S_{V,qp}$	[kN]	= Spinta verticale carico permanente.
S_{Ht}	[kN]	= Spinta orizzontale terreno sul cuneo .	$S_{H,qv}$	[kN]	= Spinta orizzontale carico variabile.
S_{Ht}	[kN]	= Spinta verticale terreno sul cuneo .	$S_{V,qv}$	[kN]	= Spinta verticale carico variabile.
S_{qp}	[kN]	= Spinta carico permanente.			

- Risultati LETTERATURA -

Di seguito si riportano i valori "caratteristici" delle tre spinte (sul cuneo -> altezza paramento + fondazione) della letteratura:

Spinta del terreno (sul cuneo)

COND.	φ [°]	δ [°]	S_t [kN]	S_{Ht} [kN]	S_{Vt} [kN]
A1 + M1 + R3	34,00	22,66	63,56	58,65	24,49

Spinta del sovraccarico permanente a monte (sul cuneo)

COND.	φ [°]	δ [°]	S_{ap} [kN]	$S_{H,ap}$ [kN]	$S_{V,ap}$ [kN]
A1 + M1 + R3	34,00	22,66	12,71	11,73	4,89

Spinta del sovraccarico variabile a monte (sul cuneo)

COND.	φ [°]	δ [°]	S_{qv} [kN]	$S_{H,qv}$ [kN]	$S_{V,qv}$ [kN]
A1 + M1 + R3	34,00	22,66	6,35	5,86	2,44

Le combinazioni generate per l'Approccio 2 sono:

COMB.	CC 01 Carico permanente	CC 02 Carico Verticale (Abitazioni)
Approccio 2 - Rimanenti verifiche (A1+M1+R3)		
01	1,0	0,0
02	1,0	1,5
03	1,3	0,0
04	1,3	1,5

Per cui, considerando le precedenti combinazioni, le spinte diventano:

COMB	CC 01 Carico permanente [kN]	CC 02 Carico Verticale (Abitazioni) [kN]	Spinta Risultante [kN]
01	$1,0 \cdot (63,56 + 12,71) = 76,27$	$0,0 \cdot (6,35) = 0$	76,270
02	$1,0 \cdot (63,56 + 12,71) = 76,27$	$1,5 \cdot (6,35) = 9,525$	85,795
03	$1,3 \cdot (63,56 + 12,71) = 99,151$	$0,0 \cdot (6,35) = 0$	99,151
04	$1,3 \cdot (63,56 + 12,71) = 99,151$	$1,5 \cdot (6,35) = 9,525$	108,676

Decomponendo la spinta lungo X e Z si ha:

COMB	Spinta Lungo X [kN]	Spinta Lungo Z [kN]
01	$76,270 \cdot \cos(22,66) = 70,383$	$76,270 \cdot \sin(22,66) = 29,384$
02	$85,795 \cdot \cos(22,66) = 79,172$	$85,795 \cdot \sin(22,66) = 33,054$
03	$99,151 \cdot \cos(22,66) = 91,762$	$99,151 \cdot \sin(22,66) = 38,199$
04	$108,676 \cdot \cos(22,66) = 100,287$	$108,676 \cdot \sin(22,66) = 41,869$

- Risultati GEOMURUS -

Di seguito si riporta un estratto del tabulato con le stesse spinte calcolate da GeoMurus:

SPINTE SUL CUNEO ALLO SLU - Approccio 2, Combinazione (A1+M1+R3)						
Stato limite	Sisma	Fx	Fz	Angolo	PtApp	
		[N]	[N]	[gradi]	[m]	
Sezione 1						
	SLU	NO	68.266	28.668	58	X: 2,10; Z: 1,38
	SLU	NO	75.512	31.711	58	X: 2,10; Z: 1,38
	SLU	NO	88.745	37.269	58	X: 2,10; Z: 1,38
	SLU	NO	95.991	40.312	58	X: 2,10; Z: 1,38

LEGENDA Spinte sul cuneo allo SLU

Stato limite	Tipo di Stato Limite.
Sisma	Sisma agente nella Combinazione.
Fx	Spinta Orizzontale [N].
Fz	Spinta Verticale [N].
Angolo	Angolo della retta delimitante il cuneo di Spinta [gradi].
PtApp	Punto di applicazione della Spinta [m].

- Confronto -

Nella successiva tabella si riporta il confronto tra i due calcoli.

COMB	TIPO CALCOLO	Spinta Risultante [kN]	Spinta Lungo X [kN]	Spinta Lungo Z [kN]
01	Letteratura	76,270	70,383	29,384
	GeoMurus	74,041	68,266	28,668
	Scarto Percentuale	2,92%	3,10%	2,50%
02	Letteratura	85,795	79,172*	33,054
	GeoMurus	81,900	75,512	31,711
	Scarto Percentuale	4,54%	4,62%	4,06%
03	Letteratura	99,151	91,762	38,199
	GeoMurus	96,253	88,745	37,269
	Scarto Percentuale	2,92%	3,29%	2,43%
04	Letteratura	108,676	100,287	41,869
	GeoMurus	104,112	95,991	40,312
	Scarto Percentuale	4,20%	4,28%	3,72%

2 TEST DI VALIDAZIONE N.2 (Carico Limite Fondazione)

Il file di GeoMurus è: **T2 - Validazione_Qlim.GMS**.

Si è considerato l'esempio del "TEST DI VALIDAZIONE N.1" senza i carichi sul pendio.

Descrizione dell'opera

Vedi "TEST DI VALIDAZIONE N.1".

Calcolo Manuale Azioni

La verifica viene eseguita con "**Approccio 2**" (combinazione A1+M1+R3).

Si procede al calcolo, a meno dei coefficienti "**A1**" (Tab. 6.2.I - NTC 2018), delle seguenti azioni risultanti agenti sulla fondazione:

- forze verticali [**N**];
- forze orizzontali [**P**];
- momenti [**M**]. Per il calcolo dei momenti si prende come punto di rotazione il centro della fondazione (della base di impronta sul terreno - *fig. 1*).

Per convenzione si assumono positivi:

- le forze verticali dirette verso il basso;
- i momenti che inducono una rotazione oraria.

Si indicano a tale scopo le seguenti variabili:

P_{tm}	[kN]	= Peso del terreno a monte insistente sulla ciabatta di fondazione.
H_{tm}	[m]	= Altezza del terreno a monte insistente sulla ciabatta di fondazione.
H_{pm}	[m]	= Altezza del paramento del muro.
L_{tm}	[m]	= Larghezza del terreno a monte insistente sulla ciabatta di fondazione.
L_{fm}	[m]	= Larghezza della ciabatta di fondazione a monte.
L₁	[m]	= striscia unitaria (1 m) di muro.
P_{tv}	[kN]	= Peso del terreno a valle insistente sulla ciabatta di fondazione.
H_{tv}	[m]	= Altezza del terreno a valle insistente sulla ciabatta di fondazione.
L_{tv}	[m]	= Larghezza del terreno a valle insistente sulla ciabatta di fondazione.
L_{fv}	[m]	= Larghezza della ciabatta di fondazione a valle .
P_m	[kN]	= Peso complessivo del muro (paramento + fondazione).
P_{mp}	[kN]	= Peso del paramento del muro.
S_{pm}	[m]	= Spessore del paramento del muro.
P_{mf}	[kN]	= Peso della fondazione del muro.
H_{fm}	[m]	= Altezza della fondazione del muro.
B	[m]	= Larghezza complessiva della fondazione.
S_t	[kN]	= Spinta Risultante terreno sul cuneo .
S_{Ht}	[kN]	= Spinta orizzontale terreno sul cuneo .
S_{Vt}	[kN]	= Spinta verticale terreno sul cuneo .
M_{tm}	[kNm]	= Momento dovuto al peso del terreno a monte insistente sulla ciabatta di fondazione.
d_{tmG}	[m]	= Distanza (dal punto di rotazione) del peso terreno a valle.
M_{tv}	[kNm]	= Momento dovuto al peso del terreno a valle insistente sulla ciabatta di fondazione.
d_{tvG}	[m]	= Distanza (dal punto di rotazione) del peso terreno a valle.
M_{tv}	[kNm]	= Momento dovuto al peso del muro.
d_{pmpG}	[m]	= Distanza (dal punto di rotazione) del peso del paramento.
d_{pmfG}	[m]	= Distanza (dal punto di rotazione) del peso della fondazione.
M_{stv}	[kNm]	= Momento dovuto alla componente verticale della spinta del terreno.
d_{vt}	[m]	= Distanza (dal punto di rotazione) della spinta verticale.
M_{sth}	[kNm]	= Momento dovuto alla componente orizzontale della spinta del terreno.
d_{Ht}	[m]	= Distanza (dal punto di rotazione) della spinta orizzontale.

Forze verticali (N)	Forze orizzontali (T)	Momenti (M)
Peso terreno a Monte (fig. 2) $P_{tm} = L_{tm} \cdot H_{tm} \cdot L_1 \cdot \gamma_t =$ $= 1,7 \cdot 4,5 \cdot 1,0 \cdot 20000 =$ $= 153,000 \cdot N =$ $= \mathbf{153,000 \text{ kN.}}$ $L_{tm} = L_{fm} = 1,7 \text{ m};$ $H_{tm} = H_{pm} = 4,5 \text{ m};$ $L_1 = 1,0 \text{ m};$ $\gamma_t = 20000 \text{ N/m}^3.$	Spinta Orizzontale Terreno (fig. 3) $S_{Ht} = S_t \cdot \cos(\delta) =$ $= 63,562 \cdot \cos(22,67^\circ) =$ $= \mathbf{58,604 \text{ kN.}}$ $S_t = (k_A \cdot \gamma_t \cdot H^2 / 2) = 63\,562 \text{ N} =$ $= 63,562 \text{ kN};$ $k_A = 0,2542;$ $\gamma_t = 2\,000 \text{ N/m}^3.$	Peso terreno a Monte (fig. 2) $M_{tm} = P_{tm} \cdot d_{tmG} = 153,000 \cdot 0,40 =$ $= \mathbf{61,200 \text{ kNm.}}$ $P_{tm} = 153,000 \text{ kN};$ $d_{tmG} = 0,40 \text{ m.}$
Peso terreno a valle (fig. 2) $P_{tv} = L_{tv} \cdot H_{tv} \cdot L_1 \cdot \gamma_t =$ $= 0,4 \cdot 0,2 \cdot 1,0 \cdot 20000 =$ $= 1600 \cdot N =$ $= \mathbf{1,600 \text{ kN.}}$ $L_{tv} = L_{fv} = 0,4 \text{ m};$ $H_{tv} = 0,2 \text{ m};$ $L_1 = 1,0 \text{ m};$ $\gamma_t = 20000 \text{ N/m}^3.$		Peso terreno a Valle (fig. 2) $M_{tv} = -P_{tv} \cdot d_{tvG} = -1,600 \cdot 1,05 =$ $= \mathbf{-1,680 \text{ kNm.}}$ $P_{tv} = 1\,600 \text{ N} = 1,600 \text{ kN};$ $d_{tvG} = 1,05 \text{ m.}$
Peso Muro (fig. 1) $P_m = P_{mp} + P_{mf} =$ $= 45,00 + 31,25 =$ $= \mathbf{76,250 \text{ kN.}}$ $P_{mp} = S_{pm} \cdot h_{pm} \cdot L_1 \cdot \gamma_{cls} =$ $= (0,4 \cdot 4,5 \cdot 1,0) \cdot 25000 = 45\,000 \text{ N} =$ $= 45,00 \text{ kN};$ $S_{pm} = 0,40 \text{ m};$ $H_{pm} = 4,50 \text{ m};$ $\gamma_{cls} = 25000 \text{ N/m}^3.$ $P_{mf} = H_{fm} \cdot L_{fm} \cdot L_1 \cdot \gamma_{cls} =$ $= (0,5 \cdot 2,5 \cdot 1,0) \cdot 25000 = 31\,250 \text{ N} =$ $= 31,25 \text{ kN.}$ $H_{fm} = 0,50 \text{ m};$ $B = 2,5 \text{ m.}$		Peso Muro (fig. 3) $M_{pm} = -P_{mp} \cdot d_{pmpG} + P_{mf} \cdot d_{pmfG} =$ $= -45,00 \cdot 0,65 + 31,25 \cdot 0 =$ $= \mathbf{-29,250 \text{ kNm.}}$ $P_{mp} = 45\,000 \text{ N} = 45,00 \text{ kN};$ $P_{mf} = 31\,250 \text{ N} = 31,25 \text{ kN};$ $d_{pmpG} = 0,65 \text{ m};$ $d_{pmfG} = 0 \text{ m.}$
Spinta Verticale Terreno (fig. 3) $S_{Vt} = S_t \cdot \sin(\delta) =$ $= 63,562 \cdot \sin(22,67^\circ) =$ $= \mathbf{24,611 \text{ kN.}}$ $S_t = (k_A \cdot \gamma_t \cdot H^2 / 2) = 63\,562 \text{ N} =$ $= 63,562 \text{ kN};$ $k_A = 0,2542;$ $\gamma_t = 2\,000 \text{ N/m}^3;$ $H = 5,00 \text{ m};$ $\delta = 2\phi/3 = 2 \cdot 34/3 = 22,67^\circ;$ $\phi = 34^\circ.$		Spinta Verticale Terreno (fig. 3) $M_{stV} = S_{Vt} \cdot d_{Vt} = 24,611 \cdot 1,25 =$ $= \mathbf{30,763 \text{ kNm.}}$ $S_{Vt} = S_t \cdot \sin(22,66^\circ) = 24\,611 \text{ N} =$ $= 24,611 \text{ kN};$ $S_t = 63,562 \text{ kN};$ $d_{Vt} = 1,25 \text{ m.}$
		Spinta Orizzontale Terreno (fig. 3) $M_{stH} = -S_{Ht} \cdot d_{Ht} = -58,604 \cdot 1,67 =$ $= \mathbf{-97,673 \text{ kNm.}}$ $S_{Ht} = S_t \cdot \cos(22,66^\circ) = 24\,611 \text{ N} =$ $= 24,611 \text{ kN};$ $S_t = 63,562 \text{ kN};$ $d_{Ht} = H/3 = 1,67 \text{ m.}$
Quindi, la risultante (N) dei carichi verticali vale: $N = P_{tm} + P_{tv} + P_m + S_{Vt} =$ $= 153,000 + 1,600 + 76,250 +$ $+ 24,611 = \mathbf{255,461 \text{ kN.}}$	Quindi, la risultante (T) dei carichi orizzontali vale: $T = S_{tH} = \mathbf{58,604 \text{ kN.}}$	Quindi, la risultante (M) dei momenti vale: $M = M_{tm} + M_{tv} + M_{pm} + M_{stV} + M_{stH} =$ $= 61,200 - 1,680 - 29,250 +$ $+ 30,763 - 97,673 =$ $= \mathbf{-36,639 \text{ kN.}}$

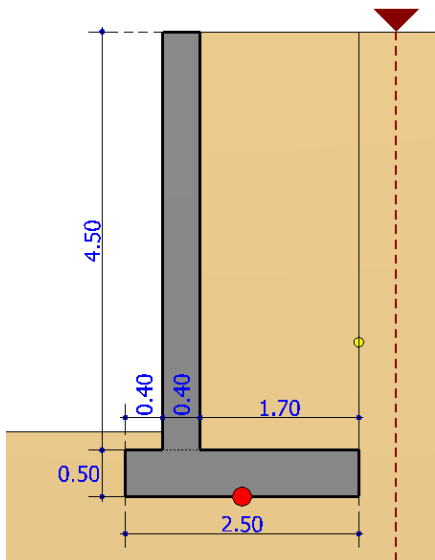


fig. 1. Punto di rotazione e Geometria Muro

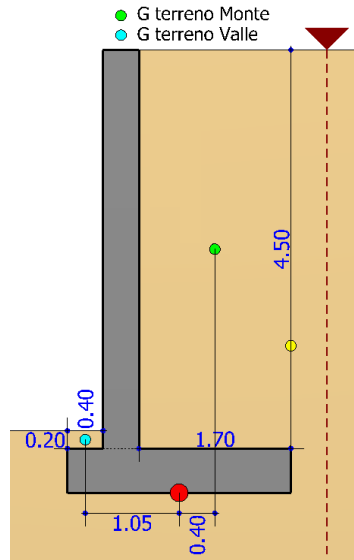


fig. 2. Dati terreno a Monte/Valle

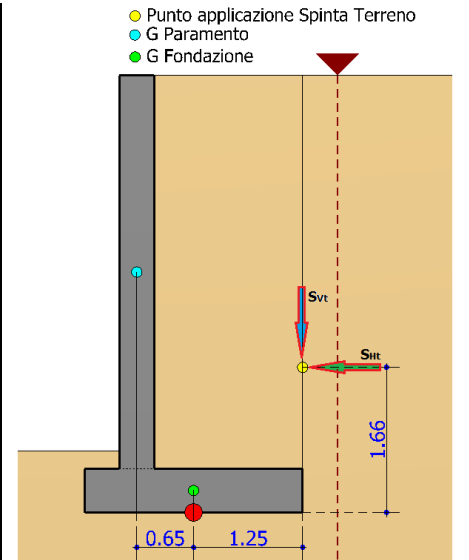


fig. 3. Dati Pesì muro e Spinte terreno (orizzontale e verticale)

Calcolate le sollecitazioni possiamo calcolare l'eccentricità **e**, e quindi la dimensione ridotta **B'** della larghezza della fondazione.

Per quanto riguarda **L** rimane inalterato non essendoci eccentricità lungo la lunghezza/profondità del muro ($L = L' = 10$ m).

Quindi:

$$e = M/N = 36,639/255,461 = 0,14 \text{ m.}$$

$$B' = (B - 2 \cdot e) = 2,5 - 2 \cdot 0,14 = 2,21 \text{ m.}$$

Calcolo Coefficienti Correttivi

Si passa ora al calcolo dei fattori di capacità portante e dei coefficienti correttivi.

Essendo il terreno in oggetto non coesivo (**c = 0**) si trascurano i fattori/coefficienti che fanno riferimento alla coesione (N_c , S_c , d_c etc).

Fattori di capacità portante

$$N_q = e^{\pi \cdot \tan \phi} \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) = 29,44$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan \phi = 41,06$$

Coefficienti correttivi

Fattori di forma

$$S_q = 1 + \frac{B'}{L'} \cdot \tan \phi = 1 + \frac{2,20}{10} \cdot \tan(34) = 1,15$$

$$S_\gamma = 1 - 0,4 \cdot \frac{B'}{L'} = 1 - 0,4 \cdot \frac{2,20}{10} = 0,91$$

Fattori di profondità

Si considera un piano di posa della fondazione pari a $D = 0,7$ m.

$$d_q = 1 + 2 \cdot \tan \phi \cdot (1 - \sin \phi)^2 \cdot \frac{D}{B'} = 1,11$$

$$d_\gamma = 1,00$$

Fattori di inclinazione del carico

Essendo:

$$T (58,604) < N \cdot \tan \phi + A \cdot c' (172,310);$$

si può procedere al calcolo di tali coefficienti.

$m = \frac{2 + \frac{B'}{L}}{1 + \frac{B'}{L}} = 1,82$	$i_q = \left[1 - \frac{T}{N + B \cdot L \cdot c' \cdot \cot g\phi} \right]^m =$ $= \left[1 - \frac{T}{N} \right]^m = \left[1 - \frac{58,604}{255,461} \right]^{1,82} = 0,63$	$i_\gamma = \left[1 - \frac{T}{N + B \cdot L \cdot c' \cdot \cot g\phi} \right]^{m+1} =$ $= \left[1 - \frac{T}{N} \right]^{m+1} = \left[1 - \frac{58,604}{255,461} \right]^{2,82} = 0,48$
--	---	--

Fattori di inclinazione del piano di campagna

Essendo il piano di campagna orizzontale si ha $\omega = 0$.

Quindi:

$$b_q = (1 - \tan \omega)^2 \cdot \cos \omega = 1,00$$

$$b_\gamma = \frac{b_q}{\cos \omega} = 1,00$$

Fattori di inclinazione del piano di posa

Essendo il piano di posa della fondazione orizzontale si ha $\varepsilon = 0$.

Quindi:

$$g_q = (1 - \varepsilon \cdot \tan \phi)^2 = 1,00$$

$$g_\gamma = (1 - \varepsilon \cdot \tan \phi)^2 = 1,00$$

Fattori di riduzione per rottura a punzonamento

Procediamo al calcolo dell'indice di rigidezza (I_r) e dell'indice di rigidezza critico ($I_{r,crit}$).

Quindi:

Indice di rigidezza (I_r)	Indice di rigidezza critico ($I_{r,crit}$)
$I_r = \frac{G}{c + \sigma \cdot \tan \phi} = \frac{26,67}{0 + 0,0321 \cdot \tan 34} = \mathbf{1\,230}.$ Dove: $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{80}{2 \cdot (1 + 0,5)} = 26,67 \text{ N/mm}^2$ (modulo di elasticità tangenziale del terreno); $E = 80 \text{ N/mm}^2$ (modulo edometrico del terreno); $\nu = 0,5$ (coefficiente di poisson); $c = 0$ (coesione); $\sigma = \gamma_t \cdot (D + B'/2) = 20000 \cdot (0,5 + 2,21/2) =$ $= 32100 \text{ N/m}^2 = 0,0321 \text{ N/mm}^2$ (tensione litostatica alla profondità $D + B'/2$). $\gamma_t = 2000 \text{ N/m}^3$ (peso specifico del terreno); $D = 0,5 \text{ m}$ (profondità del piano di posa della fondazione); $B' = 2,21 \text{ m}$ (base ridotta della fondazione). $\phi = 34$ (angolo di attrito del terreno).	$I_{r,crit} = \frac{1}{2} \cdot e^{\left\{ \left(3,3 - 0,45 \cdot \frac{B'}{L} \right) \cdot \cot \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \right\}} =$ $= \frac{1}{2} \cdot e^{\left\{ \left(3,3 - 0,45 \cdot \frac{2,21}{10,00} \right) \cdot \cot \left(45 - \frac{34}{2} \right) \right\}} = \mathbf{205,60}.$ Con: $L' = 10,00 \text{ m}$ (lunghezza del muro).

Quindi, essendo $I_r > I_{r,crit}$ tali coefficienti sono unitari.

$$\psi_q = 1,00$$

$$\psi_\gamma = 1,00$$

Calcolo Carico Limite

Si utilizza, a tale scopo, la seguente formula di Vesic:

$$q_{lim} = c' \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot g_c \cdot b_c \cdot \Psi_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot g_q \cdot b_q \cdot \Psi_q + \frac{1}{2} \cdot B' \cdot \gamma_t \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot g_\gamma \cdot b_\gamma \cdot \Psi_\gamma$$

Nella successiva tabella riassumiamo i termini, calcolati in precedenza, utili per il calcolo del carico limite (essendo $c' = 0$ si trascurano i valori del I termine).

Riepilogo dati dei termini (*I, II, III*) della formula trinomia per il calcolo di q_{lim}

(*)	N [-]	s [-]	d [-]	i [-]	b [-]	g [-]	Ψ [-]	c' [N/mm ²]	q [N/mm ²]	B/2 [mm]	γ_t [N/mm ³]	q_i^* [N/mm ²]
I	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	0,000
II	29,44	1,15	1,11	0,62	1,00	1,00	1,00	-	0,014	-	-	0,326
III	41,06	0,91	1,00	0,48	1,00	1,00	1,00	-	-	1107	0,00002	0,397
(*) Termini della formula trinomia utilizzata per il calcolo del q_{lim}											q_{lim}	0,724

Essendo $q = \gamma_t \cdot D = 20000 \cdot 0,70 = 14000 \text{ N/m}^2 = 0,014 \text{ N/mm}^2$, risulta:

$$q_{lim}^* = q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot b_q \cdot g_q \cdot \Psi_q + \frac{1}{2} \cdot B' \cdot \gamma_t \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot b_\gamma \cdot g_\gamma \cdot \Psi_\gamma ;$$

$$q_{lim}^* = 0,014 \cdot 29,44 \cdot 1,15 \cdot 1,11 \cdot 0,62 \cdot 1,00 \cdot 1,00 + \frac{1}{2} \cdot 2,21 \cdot 0,00002 \cdot 41,06 \cdot 0,91 \cdot 1,00 \cdot 0,48 \cdot 1,00 \cdot 1,00 =$$

$$= 0,326 + 0,397 = \mathbf{0,72384 \text{ N/mm}^2} = \mathbf{723,840 \text{ kN/m}^2}.$$

A tale valore (resistenza) va applicato il coefficiente $\gamma_R = 1,40$ della colonna "R3" (Tab. 6.5.I - NTC 2018).
Per cui il precedente valore diventa:

$$q_{lim} = q_{lim}^* / \gamma_R = 0,72384 / 1,4 = \mathbf{0,51703 \text{ N/mm}^2} = \mathbf{517,028 \text{ kN/m}^2}.$$

- Risultati GEOMURUS -

Di seguito, si riporta un estratto del tabulato della "VERIFICHE A CARICO LIMITE" eseguita da GeoMurus:

VERIFICHE A CARICO LIMITE - Approccio 2, Combinazione (A1+M1+R3)				
Stato limite	Sisma	CS	QMedP [N/mm ²]	QLim [N/mm ²]
Sezione 1				
Verifica 1				
SLU	NO	3,80	0,13	0,51
Verifica 2				
SLU	NO	4,94	0,10	0,51

LEGENDA Verifiche a Carico Limite

Stato limite	Tipo di Stato Limite.
Sisma	Sisma agente nella Combinazione.
CS	Coefficiente di sicurezza.
QMedP	Tensione media di Progetto [N/mm ²].
QLim	Carico Limite [N/mm ²].

- Confronto -

Nella successiva tabella si riporta il confronto tra i due calcoli.

TIPO CALCOLO	Carico Limite (QLim) [N/mm ²]
Manuale	0,51703
GeoMurus	0,51
Scarto Percentuale	1,36%

3 TEST DI VALIDAZIONE N.3 (Verifica a Ribaltamento)

Il file di GeoMurus è: **T2 - Validazione_Qlim.GMS**.

Si è considerato l'esempio del "TEST DI VALIDAZIONE N.1" senza i carichi sul pendio.

Descrizione dell'opera

Vedi "TEST DI VALIDAZIONE N.1".

Calcolo Manuale Azioni

Per il calcolo dei momenti si prende come punto di rotazione il vertice in basso a valle della fondazione (*fig. 1*), e le distanze, riportate di seguito, fanno riferimento a tale punto.

Si indicano a tale scopo le seguenti variabili:

M_{tm}	[kNm]	= Momento dovuto al peso del terreno a monte insistente sulla ciabatta di fondazione.
P_{tm}	[kN]	= Peso del terreno a monte insistente sulla ciabatta di fondazione.
d_{tm}	[m]	= Distanza peso terreno a monte.
M_{tv}	[kNm]	= Momento dovuto al peso del terreno a valle insistente sulla ciabatta di fondazione.
P_{tv}	[kN]	= Peso del terreno a valle insistente sulla ciabatta di fondazione.
d_{tv}	[m]	= Distanza peso terreno a valle.
M_{pm}	[kNm]	= Momento dovuto al peso totale del muro.
P_{mp}	[kN]	= Peso del paramento del muro.
d_{pmp}	[m]	= Distanza peso del paramento.
P_{mf}	[kN]	= Peso della fondazione del muro.
d_{pmf}	[m]	= Distanza peso della fondazione.
M_{sth}	[kNm]	= Momento dovuto alla spinta orizzontale del terreno.
S_{Ht}	[kN]	= Spinta orizzontale terreno sul cuneo .
d_{Ht}	[m]	= Distanza della spinta orizzontale.
M_{stv}	[kNm]	= Momento dovuto alla spinta verticale del terreno.
S_{Vt}	[kN]	= Spinta verticale terreno sul cuneo .
d_{Vt}	[m]	= Distanza della spinta verticale.
M_s	[kNm]	= Momento stabilizzante.
M_r	[kNm]	= Momento ribaltante.
CS		= Coefficiente di Sicurezza.

La verifica viene eseguita con "**Approccio 2**" (combinazione A1+M1+R3).

Di seguito, si calcolano i vari contributi (per 1 metro di muro) che generano il momento stabilizzante (M_s) e ribaltante (M_r) a meno dei coefficienti "**A1**" (Tab. 6.2.I - NTC 2018):

Momento Stabilizzante (M _s)	Momento Ribaltante (M _r)
Contributo del peso del terreno a monte (<i>fig. 2</i>) M_{tm} = P_{tm}·d_{tm} = 153,000·1,65 = 252,450 kNm. P_{tm} = 1,7·4,5·1,0·20000 = 153 000 N = 153,000 kN; γ_{Rid} = γ_t = 20000 N/m³ (Tab. 6.2.II - M1 - NTC 2018); φ_{Rid} = φ = 34° (Tab. 6.2.II - M1 - NTC 2018); d_{tm} = 0,8+0,85 = 1,65m.	Contributo della spinta orizzontale terreno (<i>fig. 3</i>) M_{sth} = S_{Ht}·d_{Ht} = 58,604·1,67 = 97,673 kNm. S_{Ht} = (k_A·γ_t·H²/2)·cos(22,66°) = 58 604 N = 58,604 kN; k_A = 0,2542; γ_t = 2 000 N/m³; H = 5,00 m; d_{Ht} = H/3 = 1,67 m.
Contributo del peso del terreno a valle (<i>fig. 2</i>) M_{tv} = P_{tv}·d_{tv} = 1,600·0,20 = 0,320 kNm. P_{tv} = 0,2·0,4·1,0·20000 = 1 600 N = 1,600 kN; d_{tv} = 0,2 m.	
Contributo del peso complessivo del muro (<i>fig. 3</i>) M_{pm} = P_{mp}·d_{pmp} + P_{mf}·d_{pmf} = = 45,00·0,60 + 31,25·1,25 = 66,063 kNm. P_{mp} = (0,4·4,5·1,0)·25000 = 45 000 N = 45,00 kN; P_{mf} = (0,5·2,5·1,0)·25000 = 31 250 N = 31,25 kN; d_{pmp} = 0,60 m; d_{pmf} = 1,25 m.	

Contributo della spinta verticale terreno (fig. 3)

$$M_{stV} = S_{vt} \cdot d_{vt} = 24,611 \cdot 2,50 = \mathbf{61,527 \text{ kNm.}}$$

$$S_{vt} = (k_A \cdot \gamma_t \cdot H^2 / 2) \cdot \sin(22,66^\circ) = 24 \text{ 611 N} = 24,611 \text{ kN;}$$

$$k_A = 0,2542;$$

$$\gamma_t = 2 \text{ 000 N/m}^3;$$

$$H = 5,00 \text{ m;}$$

$$d_{vt} = 2,50 \text{ m.}$$

Pertanto, il momento stabilizzante (M_s) è dato da:

$$M_s = M_{tm} + M_{tv} + M_{pm} + M_{stV} =$$

$$= 252,450 + 0,320 + 66,063 + 61,527 =$$

$$= \mathbf{380,359 \text{ kNm.}}$$

A tale valore (resistenza) va applicato il coefficiente $\gamma_R = 1,15$ della colonna "R3" (Tab. 6.5.I - NTC 2018).

Per cui il precedente valore diventa:

$$M_s = M_s^* / \gamma_R = 380,359 / 1,15 = \mathbf{330,747 \text{ kNm.}}$$

Pertanto, il momento ribaltante (M_r) è dato da:

$$M_r = M_{stH} = \mathbf{97,673 \text{ kNm.}}$$

La verifica deve essere effettuata secondo l'approccio 2 con la combinazione (A1 + M1 + R3).

Per cui, le precedenti azioni (momenti) secondo quanto previsto nelle NTC 2018 - Tab. 6.2.I - ("Carichi permanenti" - colonna "A1") diventano:

COMB	Momento Stabilizzante (M_s) [kNm]	Momento Ribaltante (M_r) [kNm]	CS [-]
01	1,3-330,747 = 429,971	1,3-97,673 = 126,975	429,971/126,975 = 2,67
02	1,0-330,747 = 330,747	1,0-97,673 = 97,673	330,747/97,673 = 2,67

Risultati GeoMurus

Di seguito, si riporta un estratto del tabulato della "VERIFICHE A RIBALTAMENTO" eseguita da GeoMurus:

VERIFICHE A RIBALTAMENTO - Approccio 2, Combinazione (A1+M1+R3)				
Stato limite	Sisma	CS	Mrblt [Nm]	Mstbl [Nm]
Sezione 1				
Verifica 1				
SLU	NO	3,39	127.001	429.971
Verifica 2				
SLU	NO	3,39	97.693	330.747

LEGENDA Verifiche a ribaltamento

Stato limite Tipo di Stato Limite.
Sisma Sisma agente nella Combinazione.
CS Coefficiente di sicurezza.
Mrblt Momento ribaltante di Progetto [Nm].
Mstbl Momento Stabilizzante [Nm].

Confronto

Nella successiva tabella si riporta il confronto tra i due calcoli.

COMB	TIPO CALCOLO	Momento Stabilizzante (M_s) [kNm]	Momento Ribaltante (M_r) [kNm]	CS [-]
01	Manuale	429,971	126,975	3,3863
	GeoMurus	429,971	127,001	3,3856
	Scarto Percentuale	0,00%	0,02%	0,02%
02	Manuale	330,747	97,673	3,3863
	GeoMurus	330,747	97,693	3,3856
	Scarto Percentuale	0,00%	0,02%	0,02%

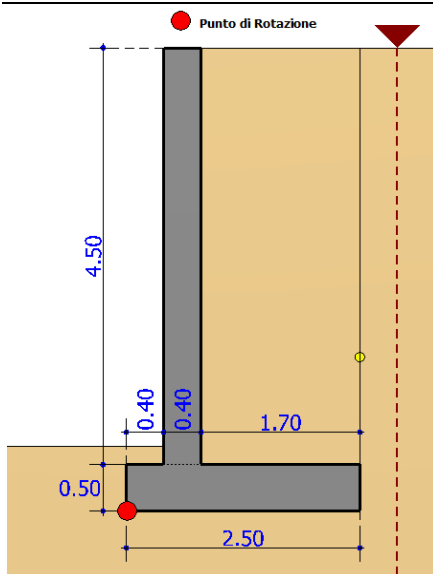


fig. 1. Punto di rotazione e Geometria Muro

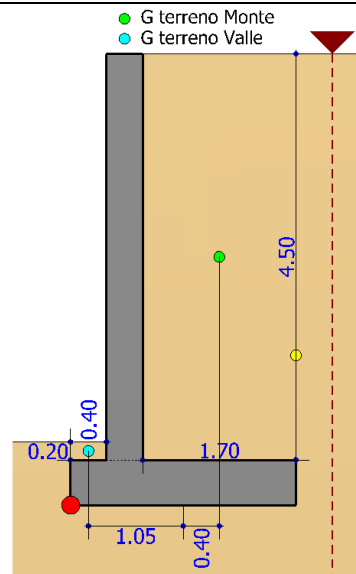


fig. 2. Dati terreno a Monte/Valle

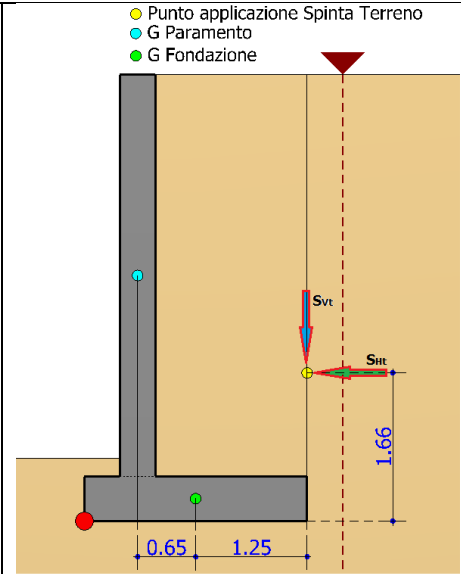


fig. 3. Dati Pesi muro e Spinte terreno (orizzontale e verticale)

4 TEST DI VALIDAZIONE N.4 (Verifica a Scorrimento)

Il file di GeoMurus è: **T2 - Validazione_Qlim.GMS**.

Si è considerato l'esempio del "TEST DI VALIDAZIONE N.1" senza i carichi sul pendio.

Descrizione dell'opera

Vedi "TEST DI VALIDAZIONE N.1".

Le figure menzionate di seguito fanno riferimento a quelle del "TEST DI VALIDAZIONE N.3".

Calcolo Manuale Azioni

Si indicano a tale scopo le seguenti variabili:

F_{sPtm}	[kN]	= Forza stabilizzante dovuta al peso del terreno a monte.
P_{tm}	[kN]	= Peso del terreno a monte insistente sulla ciabatta di fondazione.
F_{sPtv}	[kN]	= Forza stabilizzante dovuta al peso del terreno a valle.
P_{tv}	[kN]	= Peso del terreno a valle insistente sulla ciabatta di fondazione.
F_{sPm}	[kN]	= Forza stabilizzante dovuta al peso del muro.
P_{mp}	[kN]	= Peso del paramento del muro.
P_{mf}	[kN]	= Peso della fondazione del muro.
F_{sStv}	[kN]	= Forza stabilizzante dovuta alla spinta verticale.
S_{vt}	[kN]	= Spinta verticale terreno.
F_{stb}*	[kN]	= Totale forza stabilizzante (a meno di γ_R).
F_{stb}	[kN]	= Totale forza stabilizzante.
F_{sStH}	[kN]	= Forza di scorrimento dovuta alla spinta orizzontale.
S_{Ht}	[kN]	= Spinta orizzontale terreno.
F_{scr}	[kN]	= Totale forza di scorrimento.
CS		= Coefficiente di Sicurezza.

La verifica viene eseguita con "**Approccio 2'**" (combinazione A1+M1+R3).

Di seguito, si calcolano i vari contributi (per 1 metro di muro) che generano la forza stabilizzante (F_{stb}) e la forza di scorrimento (F_{scr}) a meno dei coefficienti "**A1**" (Tab. 6.2.I - NTC 2018):

Forza Stabilizzante (F_{stb})	Forza di Scorrimento (F_{scr})
Contributo del peso del terreno a monte (<i>fig. 2</i>). $F_{sPtm} = P_{tm} \cdot \tan \phi = 153,000 \cdot 0,675 = \mathbf{103,200 \text{ kN}}$. $P_{tm} = 1,7 \cdot 4,5 \cdot 1,0 \cdot 20000 = 153\,000 \text{ N} = 153,000 \text{ kN}$; $\gamma_{Rid} = \gamma_t = 20000 \text{ N/m}^3$ (Tab. 6.2.II - M1 - NTC 2018); $\phi_{Rid} = \phi = 34^\circ$ (Tab. 6.2.II - M1 - NTC 2018); $\tan \phi = 0,675$. Contributo del peso del terreno a valle (<i>fig. 3</i>). $F_{sPtv} = P_{tv} \cdot \tan \phi = 1,600 \cdot 0,675 = \mathbf{1,079 \text{ kN}}$. $P_{tv} = 0,2 \cdot 0,4 \cdot 1,0 \cdot 20000 = 1\,600 \text{ N} = 1,600 \text{ kN}$; Contributo del peso complessivo del muro (<i>fig. 4</i>). $F_{sPm} = (P_{mp} + P_{mf}) \cdot \tan \phi = 76,250 \cdot 0,675 = \mathbf{51,431 \text{ kN}}$. $P_{mp} = 0,4 \cdot 4,5 \cdot 1,0 \cdot 25000 = 45\,000 \text{ N} = 45,00 \text{ kN}$; $P_{mf} = 0,5 \cdot 2,5 \cdot 1,0 \cdot 25000 = 31\,250 \text{ N} = 31,25 \text{ kN}$. Contributo della spinta verticale terreno (<i>fig. 5</i>). $F_{sStv} = S_{vt} \cdot \tan \phi = 24,611 \cdot 0,675 = \mathbf{16,600 \text{ kN}}$. $S_{vt} = (k_A \cdot \gamma_t \cdot H^2 / 2) \cdot \sin(22,66^\circ) = 24\,611 \text{ N} = 24,611 \text{ kN}$; $k_A = 0,2542$; $\gamma_{Rid} = \gamma_t = 20000 \text{ N/m}^3$; $H = 5,00 \text{ m}$.	Contributo della spinta orizzontale terreno (<i>fig. 5</i>). $F_{sStH} = S_{Ht} = \mathbf{58,604 \text{ kN}}$ (<i>fig. 5</i>). $S_{Ht} = (k_A \cdot \gamma_t \cdot H^2 / 2) \cdot \cos(22,66^\circ) = 58\,604 \text{ N} = 58,604 \text{ kN}$; $k_A = 0,2542$; $\gamma_{Rid} = \gamma_t = 20000 \text{ N/m}^3$; $H = 5,00 \text{ m}$.

Pertanto, la Forza stabilizzante (F_{stb}) è data da:

$$F_{stb}^* = F_{sPtm} + F_{sPtv} + F_{sPm} + F_{sStV} = \\ = 103,200 + 1,079 + 51,431 + 16,600 = \\ = \mathbf{172,310 \text{ kN.}}$$

A tale valore (resistenza) va applicato il coefficiente $\gamma_R = 1,1$ della colonna "R3" (Tab. 6.5.I - NTC 2018).

Per cui il precedente valore diventa:

$$F_{stb} = F_{stb}^* / \gamma_R = 172,310 / 1,1 = \mathbf{156,646 \text{ kN.}}$$

Pertanto, la Forza di scorrimento (F_{scr}) è data da:

$$F_{scr} = F_{sth} = \mathbf{58,604 \text{ kN.}}$$

Applicando i coefficienti della colonna "A1", le precedenti azioni (Forze) secondo quanto previsto nelle NTC 2018 - Tab. 6.2.I - ("Carichi permanenti" - colonna "A1") diventano:

COMB	Forza Stabilizzante (F_{stb}) [kN]	Forza di Scorrimento (F_{scr}) [kN]	CS [-]
01	1,3·156,646= 203,640	1,3·58,604= 76,185	203,640/76,185 = 2,67
02	1,0·156,646= 156,646	1,0·58,604= 58,604	156,646/58,604 = 2,67

Risultati GeoMurus

Di seguito, si riporta un estratto del tabulato della "VERIFICHE A SCORRIMENTO" eseguita da GeoMurus:

VERIFICHE A SCORRIMENTO - Approccio 2, Combinazione (A1+M1+R3)				
Stato limite	Sisma	CS	FrzP [N]	FrzR [N]
Sezione 1				
Verifica 1				
SLU	NO	2,67	76.185	203.639
Verifica 2				
SLU	NO	2,67	58.604	156.645

LEGENDA Verifiche a scorrimento

Stato limite

Tipo di Stato Limite.

Sisma

Sisma agente nella Combinazione.

CS

Coefficiente di sicurezza.

FrzP

Forza di scorrimento di Progetto [N].

FrzR

Forza Resistente a scorrimento [N].

Confronto

Nella successiva tabella si riporta il confronto tra i due calcoli.

COMB	TIPO CALCOLO	Forza Stabilizzante (F_{stb}) [kN]	Forza di Scorrimento (F_{scr}) [kN]	CS [-]
01	Manuale	203,640	76,185	2,67
	GeoMurus	203,639	76,185	2,67
	Scarto Percentuale	0,00%	0,00%	0,00%
02	Manuale	156,646	58,604	2,67
	GeoMurus	156,645	58,604	2,67
	Scarto Percentuale	0,00%	0,00%	0,00%

5 TEST DI VALIDAZIONE N.5 (Carico Limite Micropali)

Calcolo del carico limite (cenni teorici)

- Carico limite VERTICALE**

Il carico limite verticale dei micropali può scriversi:

$$Q_{lim} = P + S = P + \pi \cdot d_s \cdot L_s \cdot s$$

P = resistenza alla punta;

S = resistenza laterale, che si esplicita coi fattori:

d_s = diametro iniettato;

L_s = lunghezza della zona iniettata;

s = resistenza tangenziale unitaria.

Il diametro iniettato (d_s) è funzione della tecnologia di esecuzione e del terreno attraversato: in GeoMurus si trattano sia i micropali a getto in un'unica soluzione (**IGU** – *injection globale unique* - tipico dei pali Radice), che quelli ad iniezioni ripetute (**IRS** – *injection répétitive et sélective* - tipico dei Tubfix).

In particolare:

$$d_s = \alpha \cdot d,$$

col coefficiente α estratto dalla seguente tabella:

Tab. 1: Valori del coefficiente α .

Terreno	Valori di α	
	IRS	IGU
Ghiaia	1,8	1,3 – 1,4
Ghiaia Sabbiosa	1,6 – 1,8	1,2 – 1,4
Ghiaia Ghiaiosa	1,5 – 1,6	1,2 – 1,3
Sabbia Grossa	1,4 – 1,5	1,1 – 1,2
Sabbia Media	1,4 – 1,5	1,1 – 1,2
Sabbia Fine	1,4 – 1,5	1,1 – 1,2
Sabbia Limosa	1,4 – 1,5	1,1 – 1,2
Limo	1,4 – 1,6	1,1 – 1,2
Argilla	1,8 – 2,0	1,2
Marne	1,8	1,1 – 1,2
Calcari Marnosi	1,8	1,1 – 1,2
Calcari Alterati o fratturati	1,8	1,1 – 1,2
Roccia Alterata e/o fratturata	1,2	1,1

I valori della resistenza tangenziale (s) sono invece tabellati in abachi, funzione anch'essi della tipologia del micropalo e del terreno attraversato.

Gli abachi sono raggruppati per le quattro tipologie litologiche seguenti:

Tab. 2: Indicazioni per la scelta del valore di s .

Terreno	Tipo Iniezione	
	IRS	IGU
Da Ghiaia a Sabbia Limosa	SG1	SG2
Limo e Argilla	AL1	AL2
Marna, Calcare marnoso, calcare tenero fratturato	MC1	MC2
Roccia alterata e/o fratturata	$\geq R1$	$\geq R2$

Si entra in tali abachi tramite la pressione limite p_1 [Mpa] del pressimetro Ménard oppure col numero di colpi N_{SPT} di una prova SPT (in tali abachi i due valori sono correlati fra loro) ottenendo la s di competenza.

Per un terreno stratificato la resistenza laterale sarà la somma delle resistenze dei singoli strati.

$$S = \pi \cdot \sum_i d_s(i) \cdot L_s(i) \cdot s(i) .$$

La resistenza alla punta (**P**) si assume pari all'area alla punta (**A_p**) moltiplicata per un coefficiente **k_p**, che dipende dalla litologia, per la pressione limite alla punta (**p₁**) misurata col pressiometro Menard.

$$P = A_p \cdot k_p \cdot p_1 = \frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \cdot k_p \cdot p_1 .$$

k_p è tabellato e vale:

Tab. 3: Valori di **k_p**.

Terreno	k _p
Sabbie e ghiaie	1,2
Argille	1,6
Argille dure e marne	1,8
Rocce alterate e/o fratturate	1,5

• Carico limite ORIZZONTALE

Si adopera la formulazione di **BROMS**.

Esempio

File: **T5 - Validazione_Micropali.GMS**

Verifica con "**Approccio 2'**" (combinazione A1+M1+R3).

- Verifica a Carico limite VERTICALE -

Terreno:

- sabbia compatta (asciutta) -> tipologia "Sabbia media";
- altre caratteristiche in figura 1.

Micropali:

- realizzati con tecnologia **IGU** (in unica soluzione);
- diametro (**d**) = 0,25 m = 250 mm;
- lunghezza iniettata (**L_s**) è pari alla lunghezza del palo = 4,00 m = 4000 mm.

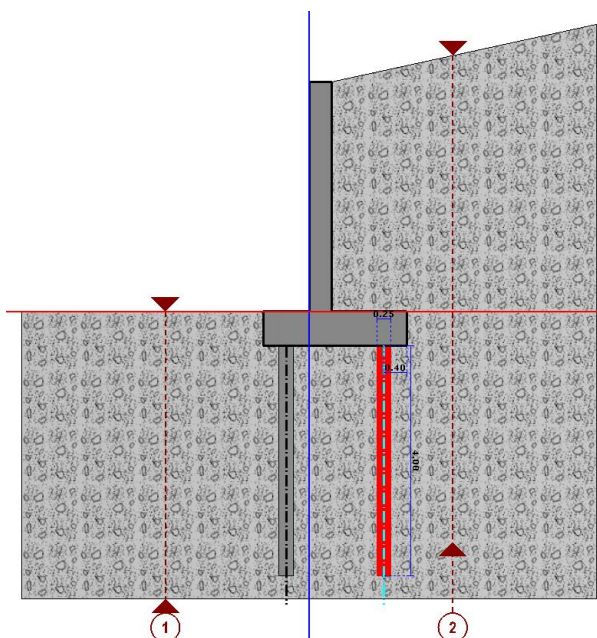


fig. 1. Sezione Muro

Caratteristiche Grafica

Caratteristiche Terreno

Descrizione:

Caratterizzazione Geotecnica per Micropali:

Peso unità di volume	[N/m³]	18'000
Peso specifico saturo	[N/m³]	22'000
Costante di sottofondo in direzione X	[N/cm³]	30
Costante di sottofondo in direzione Y	[N/cm³]	30
Costante di sottofondo in direzione Z	[N/cm³]	90
Angolo di attrito del terreno	[gradi sessadecimali]	37
Coesione non drenata	[N/mm²]	0.000
Coesione Efficace	[N/mm²]	0.000
Modulo edometrico	[N/mm²]	80

fig. 2. Caratteristiche Terreno

Il coefficiente α maggiorativo del diametro è assunto pari ad 1,2, per cui:

$$d_s = \alpha \cdot d = 1,2 \cdot 0,25 = \mathbf{0,30 \text{ m} = 300 \text{ mm.}}$$

Per il tipo di terreno in esame si è assunto $N_{SPT} = 24$, che equivale (*retta SG2*) a:

$$\begin{aligned} p_1 &= 1,20 \text{ Mpa} = 1,20 \text{ N/mm}^2; \\ s &= 0,12 \text{ Mpa} = 0,12 \text{ N/mm}^2. \end{aligned}$$

Quindi, la resistenza **LATERALE (S)** è pari a:

$$S = \pi \cdot d_s \cdot L_s \cdot s = \pi \cdot 0,30 \cdot 4,00 \cdot 0,12 = \mathbf{452 \ 389 \text{ N.}}$$

Mentre, la resistenza alla **PUNTA (P)** si calcola assumendo:

$$\begin{aligned} K_p &= 1,20 \text{ (terreno tipo "Sabbie e ghiaie");} \\ p_1 &= 1,20 \text{ N/mm}^2 \text{ (pressione Menard).} \end{aligned} \Rightarrow P = \frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \cdot K_p \cdot p_1 = \frac{\pi \cdot 300^2}{4} \cdot 1,20 \cdot 1,20 = \mathbf{101 \ 787 \text{ N.}}$$

Tali valori vanno divisi per:

- i coefficienti di sicurezza parziali γ_R (NTC 2018 - Tab. 6.4.II - pali trivellati - colonna R3). Nel caso in esame 1,15 per resistenza laterale (S) e 1,35 per quella alla punta (P).
- il coefficiente di riduzione funzione del numero di indagini eseguite ξ_3 (NTC 2018 - Tab. 6.4.IV). Nel caso in esame essendo il numero di indagini pari 3 $\rightarrow \xi_3 = 1,6$.

Resistenza Laterale (S)	Resistenza alla punta (P)
$S = \frac{452389}{1,15 \cdot 1,60} = \mathbf{245 \ 863 \text{ N}}$	$P = \frac{101787}{1,35 \cdot 1,60} = \mathbf{47 \ 124 \text{ N}}$

- Verifica a Carico limite ORIZZONTALE (Broms) -

Si è posto che il Momento Ultimo (M_u) del Palo sia noto e pari a:

$$M_u = 70 \ 000 \text{ Nm.}$$

Applicando l'approccio 2 con la combinazione (A1 + **M1** + R3), l'angolo di attrito del substrato $\phi = 37^\circ$ viene ridotto tramite il coefficiente $\gamma_\phi = 1,00$ (NTC 2018 - Tab. 6.2.II - colonna "M1"):

$$\phi_{Rid} = \arctg\left[\frac{\tan(37^\circ)}{1,00}\right] = 37,00^\circ.$$

Quindi:

Coefficiente di spinta passiva	Peso dell'unità di volume	Diametro	Lunghezza
$K_p = \tan\left(45^\circ + \frac{\phi_{Rid}}{2}\right)^2 = 4,023$	$\gamma_t = 18000 \text{ N/m}^3$	$D = 0,25 \text{ m}$	$L = 4,00 \text{ m}$

Ipotesi 1

Inizialmente, si ipotizza, il comportamento di Palo **CORTO** (*no cerniere plastiche*).

Il massimo momento sollecitante in tal caso è:

$$M_s = K_p \cdot \gamma_t \cdot D \cdot L^3 = 4,023 \cdot 18000 \cdot 0,25 \cdot 4^3 = \mathbf{1 \ 158 \ 564 \text{ Nm}} (> M_u = 70 \ 000 \text{ Nm}).$$

Essendo M_s maggiore di M_u provoca almeno una cerniera plastica (*comportamento a Palo Medio o Lungo*).

Ipotesi 2

Nell'ipotesi di Palo **LUNGO** il carico limite orizzontale vale:

$$Q_{lim,Orizz} = K_p \cdot \gamma_t \cdot D^3 \cdot \sqrt[3]{\left(3,676 \cdot \frac{M_u}{K_p \cdot \gamma_t \cdot D^4}\right)^2} = \sqrt[3]{K_p \cdot \gamma_t \cdot D \cdot (3,676 \cdot M_u)^2} = 106 \ 226 \text{ N.}$$

Anch'esso va diviso per $\gamma_R = 1,3$ (NTC 2018 - Tab. 6.4.VI) e $\xi_3 = 1,6$ (NTC 2018 - Tab. 6.4.IV), ottenendo:

$$Q_{limOrz,Ed} = \frac{106226}{1,3 \cdot 1,6} = \mathbf{51\ 070\ N.}$$

La profondità della cerniera plastica vale:

$$f = \frac{3 \cdot M_u}{Q_{lim,Orizz}} = \frac{3 \cdot 70000}{106226} = \mathbf{1,977\ m.}$$

Essendo $f < 4,00\ m \rightarrow$ si ha la conferma che il comportamento è effettivamente a Palo **LUNGO**.

- Confronto -

Di seguito, si riporta il confronto tra il calcolo manuale e quello di GeoMurus:

Resistenza **LATERALE**:

$$S = Q_{limVLtrl} = \mathbf{245\ 863\ N.}$$

Resistenza alla **PUNTA**:

$$P = Q_{limVPnt} = \mathbf{47\ 124\ N.}$$

Carico limite **VERTICALE**:

$$Q_{lim,Vert} = Q_{limVrt} = S + P = \mathbf{292\ 987\ N.}$$

Carico limite **ORIZZONTALE**:

$$Q_{limOrz,Ed} = Q_{limOrz} = \mathbf{51\ 070\ N};$$

Tipo Rottura $\rightarrow$ **Palo Lungo**;
 $f = \text{Prof Cern} = \mathbf{1,98\ m.}$

MICROPALI - VERIFICHE A CARICO LIMITE VERTICALE E ORIZZONTALE

Fila di micropali n.1	
Tipo Getto	IGU
Lung. Iniez.	4,00
Alfa	-
Kp	-
QMaxVrt	152 378
QMaxOrz	33 084
QLimVrt	292 988
QLimVPnt	47 124
QLimVLtrl	245 864
QLimOrz	51 070
Tipo Rottura	Palo Lungo
Prof Cern	1,98
CS Vert	1,92
CS Oriz	1,54
CoeffZita	1,60

fig. 3. Risultati GeoMurus

Verifica di resistenza a Compressione/Instabilità

Tale verifica viene condotta valutando la:

- resistenza a compressione ($R_{d,compr}$) della sezione (*si trascura l'effetto dei momenti a causa delle dimensioni esigue*);
- resistenza all'instabilità ($R_{d,inst}$) del micropalo immerso in un semispazio elastico.

L'azione massima di progetto deve, evidentemente, essere inferiore ad ambedue tali valori.

I materiali sono:

- calcestruzzo C25/30 ($E = 31447000000\ N/m^2$);
- acciaio B450C;
- armature $\rightarrow$ 8 barre $\phi 16$ ($A_f = 0,001608\ m^2$).

- Resistenze di calcolo -

Acciaio B450C	Calcestruzzo C25/30
$f_{yd} = \frac{450000000\ N/m^2}{1,15} = 391304347\ N/m^2$	$R_{ck} = 30000000\ N/m^2$ $f_{cd} = \frac{0,85 \cdot 0,83 \cdot 30000000\ N/m^2}{1,5} = 14110000\ N/m^2$

- Resistenze a compressione -

La resistenza a compressione ($R_{d,compr}$) vale:

$$R_{d,compr} = \frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \cdot f_{cd} + A_f \cdot f_{yd} = \frac{\pi \cdot 0,25^2}{4} \cdot 14110000 + 0,001608 \cdot 391304347 = \mathbf{1\ 322\ 034\ N.}$$

- Resistenze per instabilità -

La resistenza per instabilità ($R_{d,inst}$) viene calcolata con la seguente formulazione, valida per corpi caricati assialmente e vincolati lateralmente (*Timoshenko*).

$$R_{d,inst} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{L^2} \cdot \left(m^2 + \frac{\beta \cdot L^4}{\pi^4 \cdot m^2 \cdot E \cdot J} \right);$$

dove:

E = modulo elastico della malta di riempimento (nel caso in esame E = 31447000000 N/m²);

J = inerzia della sezione del palo (nel caso in esame $J = \frac{\pi \cdot d_s^4}{64} = 0,00019174 \text{ m}^2$);

L = lunghezza del palo (nel caso in esame L = 4,00 m);

m = numero (intero) di semionde della deformata da carico di punta;

β = reazione laterale unitaria del terreno [nel caso in esame $\beta = K_x = K_y = 30 \text{ N/cm}^2 = 30000000 \text{ N/m}^2$ (costante di Winkler per unità di spostamento laterale)].

Il valore minimo del carico critico ($R_{d,inst}$) si ottiene derivando l'espressione precedente rispetto al numero di semionde m, ricavando l'espressione:

$$R_{d,inst} = 2 \cdot \sqrt{\beta \cdot E \cdot J}.$$

Nel caso in esame:

$$R_{d,inst} = 2 \cdot \sqrt{30000000 \cdot 31447000000 \cdot 0,00019174} = \mathbf{26\ 899\ 561\ N}.$$

- Confronto -

Di seguito, si riporta il confronto tra il calcolo manuale e quello di GeoMurus:

Resistenza a **COMPRESSIONE**:

$$R_{d,compr} = NcRd = \mathbf{1\ 322\ 034\ N}.$$

Resistenza per **INSTABILITÀ**:

$$R_{d,inst} = NInst = \mathbf{26\ 899\ 561\ N}.$$

MICROPALI - VERIFICHE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE

Fila di micropali n.1	
NTndn	8
Dmtr	16
AreaTblr	-
Nd	151 003
NcRd	1 322 034
NInst	26 899 561
CS	8,76
CSInst	NS

fig. 4. Risultati GeoMurus

Verifica a Tranciamento

La resistenza a tranciamento è la somma di due seguenti termini:

- la resistenza a tranciamento delle armature ($R_{d,t,s}$);
- la resistenza a scorrimento del calcestruzzo ($R_{d,t,c}$), funzione anche dello sforzo normale (N = 150703 N) agente in ragione del 40%.

La resistenza a scorrimento del calcestruzzo (in assenza di sforzo normale) viene posta uguale alla resistenza a trazione al frattile 5%: $f_{ctk} = 0,7 \cdot f_{ctm} = 0,7 \cdot (0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}) = 1\ 790\ 684 \text{ N}$.

Dove:

$$R_{d,t,s} = A_f \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} = 0,001608 \cdot \frac{391304347}{\sqrt{3}} = \mathbf{363\ 391\ N};$$

$$R_{d,t,c} = A_{sez} \cdot \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} + 0,40 \cdot N = \frac{\pi \cdot 0,25^2}{4} \cdot \frac{1790684}{1,5} + 0,40 \cdot 150703 = 39067 + 60281 = \mathbf{118\ 881\ N}.$$

- Confronto -

Di seguito, si riporta il confronto tra il calcolo manuale e quello di GeoMurus:

Resistenza a tranciamento **ARMATURE**:

$$Rd_{t,s} = 363\,391\,N.$$

Resistenza a scorrimento **CLS**:

$$Rd_{t,c} = 118\,881\,N.$$

Resistenza a **TRANCIAMENTO**:

$$TRd = Rd_{t,s} + Rd_{t,c} = 363\,391\,N + 118\,881\,N = 482\,272\,N.$$

MICROPALI - VERIFICHE DI RESISTENZA A TRANCIAMENTO

Fila di micropali n.1	
Nd	151003
Td	33084
TRd	482 392
CS	14,58

fig. 5. Risultati GeoMurus

Verifica di resistenza a Trazione

La resistenza a trazione (della sola armatura metallica), vale:

$$Rd_{tr,z,s} = A_f \cdot f_{yd} = 0,001608 \cdot 391304347 = 629\,411\,N.$$

MICROPALI - VERIFICHE DI RESISTENZA A TRAZIONE

Fila di micropali n.1	
Nd	0
NtRd	629 411
CS	-

fig. 6. Risultati GeoMurus

6 TEST DI VALIDAZIONE N.6 (Carico Limite Pali)

Calcolo del carico limite (cenni teorici)

• Carico limite VERTICALE

Il calcolo del carico limite verticale viene eseguito con la formulazione statica di Berezantzev:

$$Q_{lim} = P + S = p \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} + \pi \cdot d \cdot \int_0^L s \cdot dz ;$$

dove

$p = N_q \cdot \sigma_v + N_c \cdot c$ = resistenza unitaria alla punta, con:

N_q, N_c = coefficienti di carico limite;

σ_v = pressione litostatica alla punta del palo;

c = coesione.

$s = a + \mu \cdot \sigma_h$ = resistenza unitaria allo scorrimento, con:

a = termine di adesione per terreni coesivi ($= 0$ in condizioni drenate);

μ = coefficiente di attrito dipendente dalla rugosità dell'interfaccia palo/terreno;

$\sigma_h = k \cdot \sigma'_v$ = tensione normale orizzontale agente alla generica profondità, pari ad un'aliquota k della pressione litostatica verticale effettiva σ'_v , funzione della tipologia del palo (*battuto/trivellato*). Quest'ultima, in genere, è variabile lungo il fusto del palo.

• Carico limite ORIZZONTALE

Si adopera la formulazione di **BROMS**.

Esempio

File: **T6 - Validazione_Pali.GMS**

Verifica con "**Approccio 2'**" (combinazione A1+M1+R3).

- Verifica a Carico limite VERTICALE -

Terreno:

- sabbia compatta (asciutta) -> caratteristiche in figura 1;
- addensamento strato -> **Sciolto**;
- condizioni di calcolo "**Drenate**".

Pali:

- tipo "**Trivellato**";
- realizzati con tecnologia "**In Opera**";
- diametro (**d**) = 0,40 m = 400 mm;
- lunghezza = 6,00 m = 6000 mm;
- μ = coefficiente di attrito = $A \cdot \tan \varphi$ ($A = 0,80$);
- $k = 0,5$ (*in GeoMurus vedi sezione "Preferenze" -> "Pali" -> "Coeff. di trasformaz. della Pressione sui PALI da Verticale in Orizzontale"*).

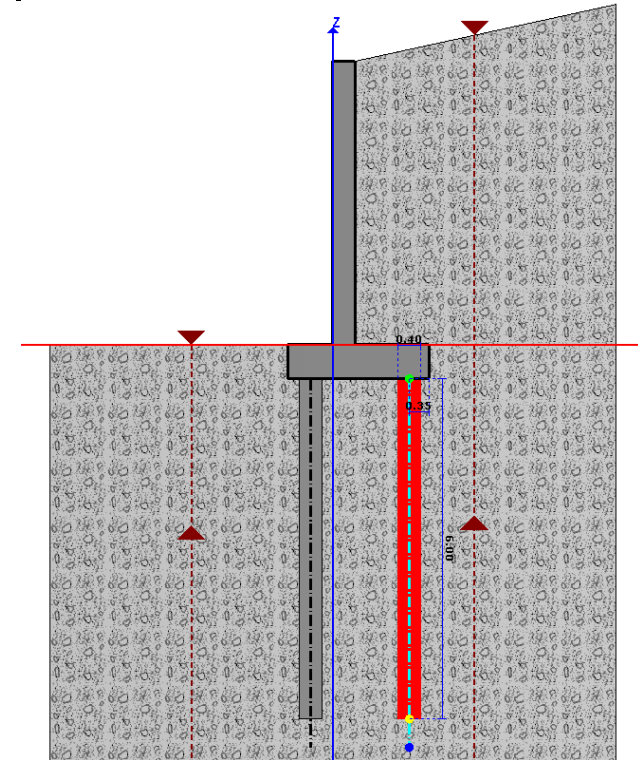


fig. 1. Sezione Muro

Caratteristiche		Grafica
Caratteristiche Terreno		
Descrizione: Sabbia compatta (asciutta)		
Caratterizzazione Geotecnica per Micropali: Sabbia media		
Peso unità di volume	[N/m³]	18'000
Peso specifico saturo	[N/m³]	22'000
Costante di sottofondo in direzione X	[N/cm²]	30
Costante di sottofondo in direzione Y	[N/cm²]	30
Costante di sottofondo in direzione Z	[N/cm²]	90
Angolo di attrito del terreno	[gradi sessadecimali]	37
Coesione non drenata	[N/mm²]	0.000
Coesione Efficace	[N/mm²]	0.000
Modulo edometrico	[N/mm²]	80

fig. 2. Caratteristiche Terreno

Applicando l'approccio 2 con la combinazione (A1 + **M1** + R3), l'angolo di attrito del substrato $\varphi = 37^\circ$ viene ridotto tramite il coefficiente $\gamma_\varphi = 1,00$ (NTC 2018 - Tab. 6.2.II - colonna "M1"):

$$\varphi_{Rid} = \arctg \left[\frac{\tan(37^\circ)}{1,00} \right] = 37,00^\circ.$$

Calcolo della pressione litostatica media (σ'_v) lungo il fusto:

il palo ha la testa a $Z_{iniz} = t_{fond} = -0,60$ m (*spessore fondazione*) ed è lungo 6,00 m; la pressione agente, linearmente variabile, è quella agente al centro del palo.

$$\sigma'_v = \gamma_t \cdot \left(Z_{iniz} + \frac{L}{2} \right) = 18000 \cdot \left(0,60 + \frac{6,00}{2} \right) = 64\,800 \text{ N/m}^2.$$

Quindi, la resistenza **LATERALE (S)** è pari a:

$$S = \pi \cdot d \cdot \int_0^L s \cdot dz = \pi \cdot d \cdot L \cdot (a + \mu \cdot \sigma'_h) = \pi \cdot d \cdot L \cdot (0 + A \cdot \tan \varphi_{Rid}) \cdot (k \cdot \sigma'_v) = \\ = \pi \cdot 0,40 \cdot 6,00 \cdot 0,80 \cdot \tan(37,00^\circ) \cdot 0,5 \cdot 64800 = \mathbf{147\,269 \text{ N}}.$$

Mentre, la resistenza alla **PUNTA (P)** vale:

$$P = (N_q \cdot \sigma'_v + N_c \cdot c) \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = (N_q \cdot \sigma'_v + N_c \cdot 0) \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = (N_q \cdot \sigma'_v) \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = N_q \cdot \gamma_t \cdot (h_{fond} + L) \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

Essendo:

$$L/D = 6,00 \text{ m} / 0,4 \text{ m} = 15;$$

$$\varphi = \varphi_{rid} = 37^\circ;$$

Entrando sul grafico di Berezantzev si ottiene $N_q = 92,50$.

Quindi:

$$P = 92,50 \cdot 18000 \cdot (0,60 + 6,00) \cdot \frac{\pi \cdot 0,40^2}{4} = \mathbf{1\,380\,918 \text{ N}}.$$

Tali valori vanno divisi per:

- i coefficienti di sicurezza parziali γ_R (NTC 2018 - Tab. 6.4.II - pali trivellati - colonna R3). Nel caso in esame 1,15 per resistenza laterale (S) e 1,35 per quella alla punta (P).

- il coefficiente di riduzione funzione del numero di indagini eseguite ξ_3 (NTC 2018 - Tab. 6.4.IV). Nel caso in esame essendo il numero di indagini pari 3 $\rightarrow \xi_3 = 1,6$.

Resistenza Laterale (S)	Resistenza alla punta (P)
$S = \frac{147269}{1,15 \cdot 1,60} = \mathbf{80\ 037\ N}$	$P = \frac{1380918}{1,35 \cdot 1,60} = \mathbf{639\ 314\ N}$

- Verifica a Carico limite ORIZZONTALE (Broms) -

Il Momento Ultimo (M_u) del Palo (armato con 12 $\phi 14$) risulta:

$$M_u = 124\ 732\ \text{Nm}.$$

L'angolo di attrito del substrato $\varphi = 37^\circ$ ridotto tramite il coefficiente $\gamma_\varphi = 1,00$ diventa:

$$\varphi_{\text{Rid}} = \arctg\left[\frac{\tan(37^\circ)}{1,00}\right] = 37,00^\circ.$$

Quindi:

Coefficiente di spinta passiva	Peso dell'unità di volume	Diametro	Lunghezza
$K_p = \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi_{\text{Rid}}}{2}\right)^2 = 4,023$	$\gamma_t = 18000\ \text{N/m}^3$	$D = 0,40\ \text{m}$	$L = 6,00\ \text{m}$

Ipotesi 1

Inizialmente, si ipotizza, il comportamento di Palo **CORTO** (no cerniere plastiche).
Il massimo momento sollecitante in tal caso è:

$$M_s = K_p \cdot \gamma_t \cdot D \cdot L^3 = 4,023 \cdot 18000 \cdot 0,40 \cdot 6,00^3 = \mathbf{6\ 256\ 245\ \text{Nm}}.$$

Essendo M_s maggiore di M_u provoca almeno una cerniera plastica (*comportamento a Palo Medio o Lungo*).

Ipotesi 2

Nell'ipotesi di Palo **LUNGO** il carico limite orizzontale vale:

$$Q_{\text{lim,Orizz}} = K_p \cdot \gamma_t \cdot D^3 \cdot \sqrt[3]{\left(3,676 \cdot \frac{M_u}{K_p \cdot \gamma_t \cdot D^4}\right)^2} = \sqrt[3]{K_p \cdot \gamma_t \cdot D \cdot (3,676 \cdot M_u)^2} = 182\ 609\ \text{N}.$$

Anch'esso va diviso per $\gamma_R = 1,3$ (NTC 2018 - Tab. 6.4.VI) e $\xi_3 = 1,6$ (NTC 2018 - Tab. 6.4.IV), ottenendo:

$$Q_{\text{limOrz,Ed}} = \frac{182609}{1,3 \cdot 1,6} = \mathbf{87\ 793\ N}.$$

La profondità della cerniera plastica vale:

$$f = \frac{3 \cdot M_u}{Q_{\text{lim,Orizz}}} = \frac{3 \cdot 124732}{182609} = \mathbf{2,05\ m}.$$

Essendo $f < 6,00\ \text{m} \rightarrow$ si ha la conferma che il comportamento è effettivamente a Palo **LUNGO**.

- Confronto -

Di seguito, si riporta il confronto tra il calcolo manuale e quello di GeoMurus:

Resistenza **LATERALE**:

$$S = Q_{limVLtrl} = 80\,037\,N.$$

Resistenza alla **PUNTA**:

$$P = Q_{limVPnt} = 639\,314\,N.$$

Carico limite **VERTICALE**:

$$Q_{lim,Vert} = Q_{limVrt} = S + P = 719\,351\,N.$$

Carico limite **ORIZZONTALE**:

$$Q_{limOriz,Ed} = Q_{limOrz} = 87\,793\,N;$$

Tipo Rottura -> **Palo Lungo**;

$$f = Prof\,Cern = 2,05\,m.$$

PALI - VERIFICHE A CARICO LIMITE VERTICALE E ORIZZONTALE

Fila di pali n.2	
QMaxVrt	146 656
QMaxOrz	48 726
QLimVrt	719 351
QLimVPnt	639 314
QLimVLtrl	80 037
QLimOrz	87 793
Tipo Rottura	Palo Lungo
Prof Cern	2,05
CS Vert	4,91
CS Oriz	1,80
CoeffZita	1,60

fig. 3. Risultati GeoMurus

7 TEST DI VALIDAZIONE N.7 (Calcolo Tiranti)

Tiranti di ancoraggio (cenni teorici)

Nel caso di muri soggetti a spinte notevoli si può ricorrere all'uso di tiranti e di ancoraggi (tiranti passivi). Sia gli uni che gli altri vengono realizzati tramite perforazione e iniezione del foro con malta in pressione previa sistemazione delle armature opportune. La testata del tirante viene annegata nel calcestruzzo del paramento del muro. Sarà opportuno disporre delle armature particolari per assorbire gli sforzi localizzati in corrispondenza della testata.

L'armatura dei tiranti attivi è costituita da trefoli ad alta resistenza (trefoli per c.a.p.); viceversa i tiranti passivi possono essere armati con tondini o, in alcuni casi, con profilati tubolari.

- Calcolo dello sforzo nei tiranti -

I tiranti attivi, contrariamente ai tiranti passivi, vengono sottoposti ad uno sforzo di pretensione. Quindi, nei tiranti attivi, lo sforzo è un dato del problema mentre nei tiranti passivi lo sforzo viene calcolato in base ai cedimenti del muro (e quindi dal valore della spinta del terreno) e dalla rigidità stessa del tirante. L'efficienza dei tiranti attivi risulta, naturalmente, molto superiore a quella dei tiranti passivi.

Distinguiamo, a proposito dei tiranti passivi, i seguenti due casi.

-- Muro con tiranti passivi con fondazione superficiale --

La trazione (incognita) che si esplica nel tirante è funzione degli spostamenti orizzontali del muro (in corrispondenza della fila di tiranti).

Per semplificare il problema si schematizza tutto il sistema composto da tirante, muro, e fondazione come quello rappresentato nella *fig. 1*, dove il muro è stato schematizzato come un corpo rigido soggetto alla spinta del terreno e poggiato su un letto di molle di determinata rigidità (costante di Winkler del terreno di fondazione) e vincolato sul paramento da molle che schematizzano i tiranti.

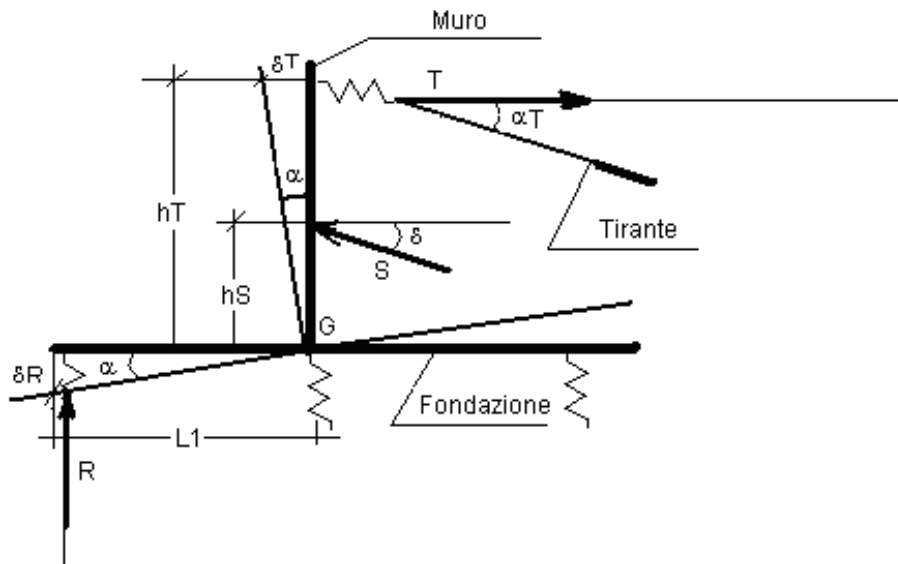


fig. 1. schematizzazione sistema tirante, muro e fondazione

Si tratta quindi di un classico problema non lineare, dovuto al fatto che i tiranti non reagiscono a compressione, che si risolve mediante un processo iterativo. I tiranti vengono considerati come molle avente rigidità EA/L dove E è il modulo elastico dell'acciaio, A è l'area dell'armatura ed L è la lunghezza di franco. Come primo tentativo si determina lo spostamento del muro in corrispondenza della fila di tiranti (prodotto della rotazione di base della fondazione per la quota della fila) senza la presenza del tirante. Una volta calcolato lo spostamento si calcola lo sforzo nei tiranti (calcolato in funzione della sua rigidità). A questo punto lo sforzo dei tiranti viene messo in conto nell'equilibrio del muro. Si ricalcola una nuova distribuzione delle tensioni sul terreno che equilibrano in questo caso sia la spinta che lo sforzo nei tiranti. Questo processo viene iterato fino a soddisfare l'equilibrio e la congruenza, ciò fino a quando la differenza tra lo sforzo messo in conto per l'equilibrio e quello calcolato in funzione dello spostamento si annulla.

Calcolato lo sforzo N , in questa prima fase (che si chiamerà fase di esercizio) si determinano i coefficienti di sicurezza a scorrimento ed a ribaltamento tenendo conto dello sforzo nei tiranti.

Se il coefficiente di sicurezza a ribaltamento risulta inferiore al valore desiderato, si considera un

cinematismo in cui il muro viene messo in condizione limite di ribaltamento. In questo modo si calcola la trazione nei tiranti che garantisce la verifica a ribaltamento. Si indica con **Nr** il tiro nei tiranti calcolato in questa fase.

Se il coefficiente di sicurezza a scorrimento, calcolato nella fase di esercizio, risulta inferiore al valore imposto, si considera un cinematismo in cui il muro viene messo in condizione limite di scorrimento. In questo modo si calcola la trazione nei tiranti che garantisce la verifica a scorrimento.

Si indica con **Ns** il tiro nei tiranti calcolato in questa fase.

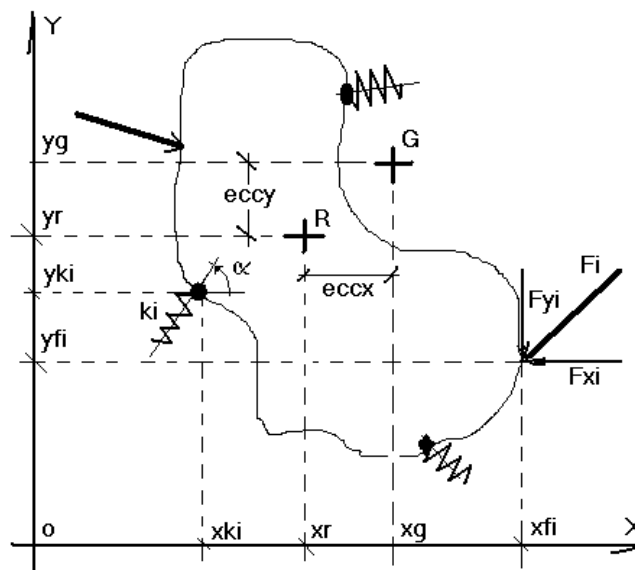
La lunghezza di ancoraggio del tirante verrà allora calcolata considerando il massimo fra:

- sforzo calcolato in fase di esercizio **N**;
- sforzo calcolato in fase di ribaltamento **Nr**;
- sforzo calcolato in fase di scorrimento **Ns**.

-- Muro con tiranti passivi in presenza di pali --

Per il calcolo delle sollecitazioni in testa ai pali e della trazione dei tiranti si considererà il paramento e la fondazione come un Corpo Rigido soggetto a un sistema di forze esterne (spinta, peso proprio, ecc.) non più poggiate su un letto di molle ma vincolato ai pali e ai tiranti con le rispettive rigidezze. Anche in questo caso ci si trova in presenza di un problema non lineare che si risolve ancora una volta mediante un processo iterativo.

Noto il Momento e lo Sforzo Normale risultante applicato al corpo rigido, si calcoleranno gli spostamenti in corrispondenza dei pali e dei tiranti. Conoscendo quindi le rigidezze delle molle si calcoleranno, infine, le reazioni dei pali e dei tiranti.



Per conoscere gli spostamenti incogniti, nell'ipotesi di un problema piano, si calcolano preliminarmente le seguenti grandezze:

1. baricentro delle forze esterne:

$$X_g = \frac{\sum_i F_{y,i} \cdot x_i + \sum_i M_i}{\sum_i F_{y,i}} \quad \Bigg| \quad Y_g = \frac{\sum_i F_{x,i} \cdot y_i + \sum_i M_i}{\sum_i F_{x,i}}$$

2. baricentro delle rigidezze:

$$X_r = \frac{\sum_i K_{y,i} \cdot x_i + \sum_i M_{r,i}}{\sum_i K_{y,i}} \quad \Bigg| \quad Y_r = \frac{\sum_i K_{x,i} \cdot y_i + \sum_i M_{r,i}}{\sum_i K_{x,i}}$$

dove:

$$K_{x,i} = K_i \cdot \cos \alpha \quad \Bigg| \quad K_{y,i} = K_i \cdot \sin \alpha$$

3. eccentricità fra baricentro delle forze e delle rigidezze:

$$E_X = X_g - X_r$$

$$E_Y = Y_g - Y_r$$

4. spostamento del baricentro delle forze:

$$\Delta X_g = \frac{\sum_i F_{x,i}}{\sum_i K_{x,i}} = \frac{R_X}{\sum_i K_{x,i}}$$

$$\Delta Y_g = \frac{\sum_i F_{y,i}}{\sum_i K_{y,i}} = \frac{R_Y}{\sum_i K_{y,i}}$$

5. rotazione del baricentro delle rigidezze:

$$\Phi = \frac{R_X \cdot E_Y + R_Y \cdot E_X}{\sum_i (K_{x,i} \cdot (y_i - Y_r)^2 + K_{y,i} \cdot (x_i - X_r)^2)} = \frac{M_R}{K_\Phi}$$

Una volta determinate le precedenti grandezze, gli spostamenti subiti dai punti di applicazione dei pali e dei tiranti si ottengono dalla relazione che permette di determinare lo spostamento rigido subito da un punto i -esimo del corpo:

$$\Delta X_i = \Delta X_g + \Phi \cdot (x_i - X_g)$$

$$\Delta Y_i = \Delta Y_g + \Phi \cdot (y_i - Y_g)$$

- Calcolo della Lunghezza di Ancoraggio -

Il comportamento degli ancoraggi risulta abbastanza complesso, in quanto entrano in gioco tre materiali di differente caratteristiche meccaniche come l'acciaio, la malta cementizia ed il terreno. La capacità di resistenza dei tiranti è legata all'attrito e all'aderenza fra la superficie del tirante e il terreno, per cui si può dire che la resistenza dell'ancoraggio dipende da:

- Resistenza allo sfilamento della connessione terreno-bulbo di estremità
- Resistenza allo sfilamento della connessione acciaio-malta cementizia
- Resistenza della malta.

Per soddisfare le precedenti condizioni bisogna determinare, supponendo nota la trazione T del tirante, le lunghezze di ancoraggio necessarie per ognuna delle tre condizioni.

Ovviamente come lunghezza di ancoraggio si assumerà la lunghezza maggiore fra le tre.

-- Resistenza allo sfilamento della connessione terreno-bulbo di estremità (formula di Bowles) --

La lunghezza di ancoraggio L_a necessaria alla verifica di resistenza per sfilamento della connessione terreno-bulbo è data dalla seguente relazione:

$$L_a = \frac{T}{\pi \cdot D_p \cdot \gamma \cdot Z \cdot k_a \cdot \tan \delta + \pi \cdot D_p \cdot c_a}$$

dove:

T = sforzo di trazione nel tirante;

D_p = diametro di perforazione;

$k_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$, coefficiente di spinta attiva;

ϕ = angolo di attrito del terreno nella zona di ancoraggio;

Z = profondità del punto medio del tratto ancorato;

γ = peso specifico del terreno;

c_a = aderenza tirante-terreno $[(0,7 \div 0,9) \cdot c]$;

δ = angolo di attrito terreno-bulbo $(2 \cdot \phi / 3)$.

In GeoMurus è stata apportata una correzione alla formula di Bowles.

In pratica al posto del termine $\gamma \cdot Z \cdot k_a$ si è utilizzata la tensione media σ_m pari a:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_v^* + \sigma_o}{2};$$

dove:

$$\sigma_v^* = \gamma \cdot Z \cdot [\cos(\alpha)^2 + k_0 \cdot \sin(\alpha)^2] \quad (N.B.1)$$

α = inclinazione del tirante;
 $k_0 = (1 - \sin\phi)$.
 $\sigma_o = \gamma \cdot Z \cdot K_o = \gamma \cdot Z \cdot (1 - \sin\phi)$;

N.B. 1

Con il simbolo σ_v^* si denota la risultante delle componenti verticali ($\sigma_v = \gamma \cdot Z$) ed orizzontali ($\sigma_o = \gamma \cdot Z \cdot k_0$) in direzione normale alle facce superiori ed inferiori del tirante. Tale espressione σ_v^* , quindi, varia in funzione dell'inclinazione del tirante (α) tra le seguenti due condizioni "estreme":

- $\alpha = 0^\circ \rightarrow$ tirante orizzontale $\rightarrow \sigma_v^* = \sigma_v = \gamma \cdot Z$;
- $\alpha = 90^\circ \rightarrow$ tirante verticale $\rightarrow \sigma_v^* = \gamma \cdot Z \cdot K_o$.

Si noti che, alla quota Z , le tensioni orizzontali σ_o agiscono anche sulle facce laterali del tirante, e restano costanti al variare dell'angolo di inclinazione (α). Invece, la tensione normale risultante agente sulle facce superiori ed inferiori del tirante, σ_v^* , varia con l'angolo di inclinazione (α), ed occorre considerare sia la componente normale della tensione verticale che la componente normale della tensione orizzontale.

La **resistenza terreno-bulbo** (R_{T-B}) è pari, pertanto, a:

$$R_{T-B} = \frac{T}{L_a} = \pi \cdot D_p (\sigma_m \cdot \tan\delta + c_a).$$

Va fatta però una considerazione legata alla tecnologia con cui vengono realizzati i tiranti. Se il getto della malta viene fatto pressione, si può pensare, in funzione del grado di addensamento dei terreni interessati, ad un ingrossamento della superficie laterale. Se si riesce a valutare in qualche modo l'entità di tale fenomeno si può pensare di introdurre un coefficiente di espansione laterale C_{esp} .

In questo caso la superficie laterale viene moltiplicata per questo fattore.

A vantaggio di sicurezza si può lasciare il valore di $C_{esp} = 1$.

$$R_{T-B} = \frac{T}{L_a} = \pi \cdot D_p (\sigma_m \cdot \tan\delta + c_a) \cdot (C_{esp})$$

In GeoMurus il coefficiente di espansione viene calcolato tramite la seguente relazione:

$$C_{esp} = \left(1 + \frac{E_{sp}}{100} \right)$$

dove E_{sp} è il valore che si setta nelle Preferenze dei Tiranti.

-- Resistenza allo sfilamento della connessione acciaio-malta cementizia --

La lunghezza di ancoraggio L_a necessaria alla verifica di aderenza fra acciaio e malta è data dalla seguente relazione:

$$L_a = \frac{T}{\pi \cdot d \cdot g \cdot s \cdot \tau_{cu}}$$

dove:

- T = sforzo di trazione nel tirante
- d = somma dei diametri dei trefoli o delle barre
- τ_{cu} = resistenza tangenziale limite della malta
- g = coefficiente correttivo funzione dell'aderenza delle armature (vedi Tab. 1)
- s = coefficiente correttivo dipendente dal numero di trefoli (vedi Tab. 2).

Tab. 1 - Coefficienti correttivi g

Tipo di armature	g
Fili lisci, barre lisce, trefoli compatti allo stato naturale	1,3
Trefolo normale o barre corrugate puliti allo stato naturale	2,0
Fili lisci, barre lisce, trefoli compatti verniciati o untati	0,75 ÷ 0,85
Fili lisci con ringrossi o compressione grips all'estremità profonda, barre lisce con dado e rondella all'estremità profonda	1,7
Trefoli normali con compressione grips all'estremità profonda	2,5

Tab. 2 - Coefficienti correttivi s

N.ro barre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
s	1	0,89	0,81	0,72	0,63	0,55	0,48	0,42	0,36	0,32	0,28	0,24

In alternativa all'uso della Tab. 2, per il coefficiente **s** può essere assunta una relazione dipendente dal numero di barre:

$$s = 1 - 0,075 \cdot (n_{\text{barre}} - 1)$$

-- Resistenza della malta --

La lunghezza di ancoraggio **L_a** necessaria alla verifica di aderenza fra la malta ed il terreno è data dalla seguente relazione:

$$L_a = \frac{T}{\pi \cdot D_p \cdot \tau_{\text{adr}} \cdot C_{\text{esp}}}$$

dove:

- T = sforzo di trazione nel tirante
- D_p = diametro di perforazione
- τ_{adr} = tensione tangenziale di aderenza malta-terreno
- C_{esp} = coefficiente di espansione laterale.

Alla lunghezza di ancoraggio determinata prendendo il massimo valore di **L_a**, si deve aggiungere una lunghezza di franco **L_f** che rappresenta la lunghezza del tratto che permette di superare la superficie critica desiderata (superficie di rottura o superficie inclinata dell'angolo d'attrito rispetto all'orizzontale o superficie imposta in base a considerazioni di carattere geotecnico).

La lunghezza totale del tirante sarà quindi data da:

$$L_t = L_a + L_f.$$

Esempio

File: **T7-Validazione_Tiranti_REV.GMS**

Viene eseguito un calcolo CON sisma (Tipo analisi sismica -> Orizzontale e Verticale).

Descrizione dell'opera

Il muro in esame è a mensola con la seguenti caratteristiche (*figura 2*):

- paramento verticale (non inclinato rispetto all'asse verticale);
- altezza (H) di 6,00 m;
- spessore paramento: alla base (S_{p,B}) 0,60 m in testa (S_{p,T}) 0,40 m;
- larghezza della fondazione (B) di 3,40 m (0,80 a valle; 2,00 a monte);
- spessore fondazione (H_f) di 0,50 m (costante);
- lunghezza del muro (L) pari a 10,0 m;
- materiale: Cls "C20/25-B450C".

Sul muro vengono posizionati dei tiranti che hanno le seguenti caratteristiche:

- armatura: 1 tondino con diametro (d_T) pari a φ 24;
- inclinato (α_T) di 10° rispetto all'orizzontale;
- distanza dalla base del paramento (h_T altezza da terra) pari a 4,50 m;
- interasse tiranti (s_T) pari a 1,00 m (allineamento centrato).

Inoltre, nei "Dati della Struttura" -> "Dati Generali" -> "Preferenze" -> "Tiranti" (*figura 3*) è stato settato:

- Numero indagini stratigrafiche significative: 1.
- Tipologia dei Tiranti: Passivo (lenti).
- Tecnologia dei tiranti: con Tondini.
- Tipo sup. di ancoraggio: Rottura [ciò significa che la resistenza del tirante inizia ad essere conteggiata dal punto franco (intersezione del suo asse col piano di scorrimento (cuneo) che parte dal piede del muro].
- Materiale tiranti: acciaio Acciaio B450C (f_{yk} = 450 N/mm²; γ_s = 1,15).
- Materiale del Bulbo di ancoraggio: Malta M30 (R_{ck} = 30 N/mm²; γ_s = 1,50).
- Attrito Terra-Tirante (δ): 0,67 (2/3 dell'angolo di attrito del terreno).
- Adesione Terra-Tirante (C_a): 0,50.
- Espansione laterale (Esp Ltr): 0.
- Coefficiente correttivo lunghezza di ancoraggio (g): 1,7 (Fili lisci con ringrossi o compressione grips

all'estremità profonda, barre lisce con dado e rondella all'estremità profonda).

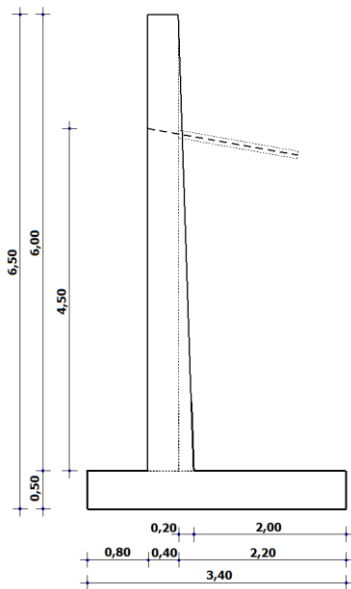


fig. 2. Geometria Muro

fig. 3. Preferenze - Tiranti

N.B. 2

Nei tiranti attivi la tensione di tiro è prestabilita dall'utente in funzione della tipologia.

Il muro interagisce con i seguenti terreni:

- TERRENO 1: *T1-Sabbia compatta (asciutta)* (terreno di colore grigio nella figura 5);
- TERRENO 2: *T2-Argilla sabbiosa* (terreno di colore verde nella figura 5);

le cui caratteristiche ed andamento sono riportate nella successive figure 4 e 5.

NON viene considerata la presenza della falda e si è considerato un angolo di attrito terreno-muro (δ) pari a $2 \cdot \phi / 3$.

I valori MINIMI vengono utilizzati SOLO nel calcolo con PALI e MICROPALI (relazione 6.4.3 - NTC18). In assenza di tali elementi strutturali vengono utilizzati esclusivamente i valori MEDI.

I valori MINIMI vengono utilizzati SOLO nel calcolo con PALI e MICROPALI (relazione 6.4.3 - NTC18). In assenza di tali elementi strutturali vengono utilizzati esclusivamente i valori MEDI.

fig. 4: Caratteristiche Terreni

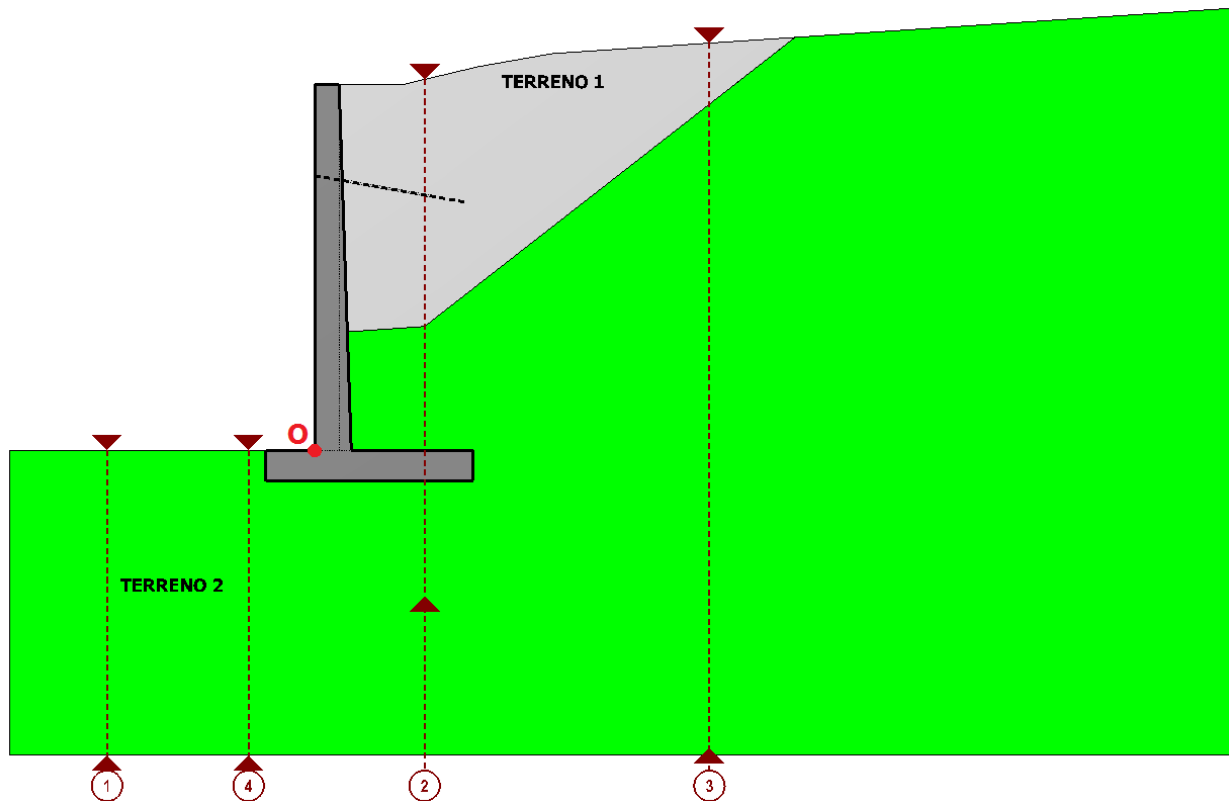


fig. 5: Vista "Sezione Progetto"

Distanza di Franco (d_F)

La superficie di scorrimento del cuneo di massima spinta risulta inclinata rispetto all'orizzontale di un angolo pari a 63° (Tab. 3), ed il punto di intersezione di tale superficie di scorrimento con l'asse del tirante (punto di "franco") risulta avere le seguenti coordinate (figura 6):

X_F [m]	Y_F [m]
4,7233	3,6672

Tab. 3: Spinte sul cuneo allo SLU (Risultati GeoMurus)

SPINTE SUL CUNEO ALLO SLU - Approccio 2, Combinazione (A1+M1+R3)					
Stato limite	Sisma	F_x [N]	F_z [N]	Angolo [gradi]	PtApp [m]
Sezione 1					
SLU	NO	54.720	21.105	63	X: 2,60; Z: 2,47
SLU	NO	42.092	16.235	63	X: 2,60; Z: 2,47
SLV	SI	42.092	16.235	63	X: 2,60; Z: 1,99
SLV	SI	38.815	15.332	63	X: 2,60; Z: 2,01

La parte di tirante (L_f = lunghezza di franco) non significativa (non resistente a trazione) ai fini della resistenza è quella che, a partire dal muro, si trova immersa nel cuneo di scorrimento (tratto di tirante fino alla superficie di scorrimento - figura 6).

Nel caso in esame si ha:

	X [m]	Y [m]
(X_T ; Y_T) coordinate della testa del tirante sul muro	0,0000	4,5000
(X_F ; Y_F) coordinate punto di "franco"	4,6989	3,6715

da cui:

$$L_f = \sqrt{(X_F - X_T)^2 + (Y_T - Y_F)^2} = \sqrt{(4,6989 - 0,00)^2 + (4,50 - 3,6715)^2} = \sqrt{(4,6989)^2 + (0,8285)^2} = \mathbf{4,7714 \text{ m.}}$$

N.B. 3

L'origine degli assi è sul punto inferiore a valle del paramento, sull'estradosso della fondazione (punto "O" nelle figure 5 e 6).

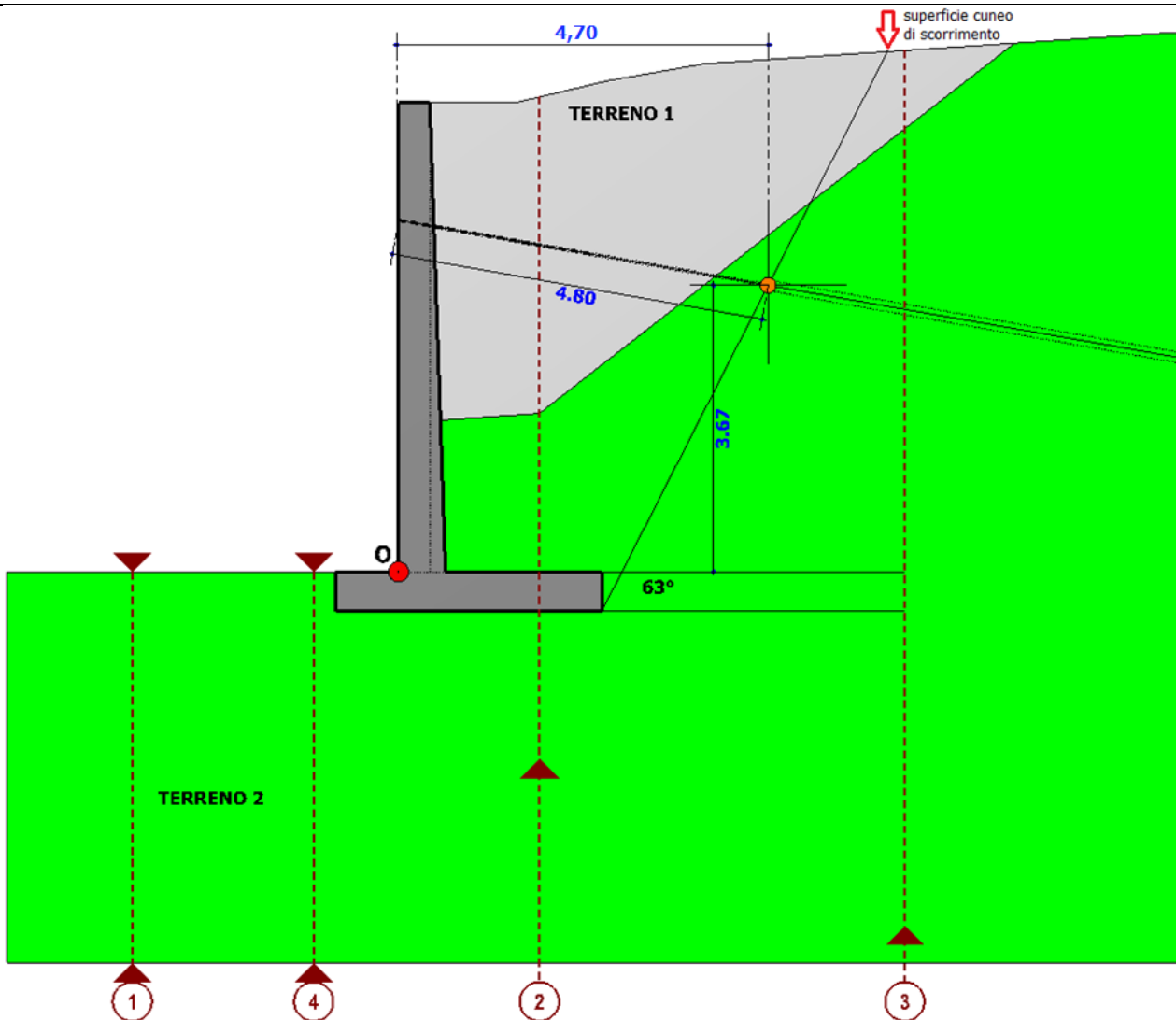


fig. 6: "Intersezione tirante-cuneo"

Azione sul Tirante ($T_{\max, \text{SLU}, 1\text{m}}$)

L'azione sul tirante passivo viene calcolata ipotizzando che il muro sia nel suo complesso un corpo rigido su cui agiscono il peso proprio, la spinta a monte, etc, e che risulta vincolato dal terreno di fondazione (schematizzato come letto di molle unidirezionali), dai tiranti (molla unidirezionale) e dal terreno a valle (controspinta unidirezionale sulla porzione immersa nel terreno).

Essendo il terreno di fondazione non reagente a trazione ed il tirante non reagente a compressione, il problema è di tipo **non-lineare** a tutto ciò si aggiungono le cadute di tiro.

Di conseguenza, la trazione nel tirante nell'unica configurazione equilibrata e congruente deve essere calcolata con un metodo iterativo, che fornisce uno sforzo massimo allo SLU di $T_{\max, \text{SLU}} = 9\,828\text{ N}$.

Poiché sull'intero muro, lungo 10 m, ci sono 9 tiranti (con interasse 1,00 m), sulla striscia di 1 metro di muro il numero di tiranti ($n_{T,1\text{m}}$) è dato da:

$$n_{T,1\text{m}} = (n_T/L) \cdot 1\text{m} = (9/10\text{m}) \cdot 1\text{m} = 0,90.$$

dove:

$n_T = 9$, numero di tiranti sulla lunghezza complessiva del muro;
 $L = 10\text{ m}$, lunghezza complessiva del muro.

Pertanto, lo sforzo calcolato per 1 metro di muro è:

$$T_{\max, \text{SLU}, 1\text{m}} = T_{\max, \text{SLU}} / n_{T,1\text{m}} = 9\,828 / 0,90 = \mathbf{10\,920\text{ N}}.$$

Lunghezza di Ancoraggio (L_a) e Resistenza (R_{Ed})

Come visto nei cenni teorici per calcolare la lunghezza di ancoraggio (oltre al franco) occorre determinare la resistenza del tirante.

Questa rappresenta la minore tra le seguenti resistenze:

- 1 - resistenza di attrito/adesione bulbo-terreno (R_{TrrBib});
- 2 - resistenza di aderenza tondino-malta (R_{AccMlt});
- 3 - resistenza di aderenza malta-foro ($R_{MltForo}$).

La determinazione della lunghezza di ancoraggio (L_a) e relativa resistenza del tirante (R_{Ed}) avviene mediante una procedura iterativa che si articola nelle seguenti Fasi:

Fase 1

A partire dal punto di "franco" si creano una serie di settori (strisce) verticali aventi come base il tirante. I settori sono creati ogni 50 cm e comunque ogni qualvolta che si incontra una singolarità nel profilo del pendio (ad es. il nodo di una spezzata del profilo o degli strati).

Fase 2

Per ogni settore siamo in grado di conoscere il peso ed i parametri geotecnici alla base di esso (sul tirante) e quindi siamo in grado di calcolare la resistenza offerta dal tirante [$R_{Rd,i}^* = R_{Min,i}/L_{b,i} = \min(R_{TrrBib,i}; R_{AccMlt,i}; R_{MltForo,i})/L_{b,i}$].

Fase 3

Quando la somma delle $R_{Rd,i}^*$ uguaglia il valore di $T_{max,SLU,1m}$ la procedura iterativa si arresta e quindi sono noti:

$$R_{Rd} = R_{Rd,i}^* / (\gamma_R \cdot \xi_{a4}) = \sum_i R_{Rd,i}^* / (\gamma_R \cdot \xi_{a4}) (\geq T_{max,SLU,1m});$$

$$L_a = \sum_i L_{a,i}.$$

Vediamo nel dettaglio le varie fasi per il caso in esame.

Fase 1

A partire dal punto di "franco" (da $X = X_F = 4,7233$ m) vengono tracciate 20 verticali ($V_1, \dots, V_{20}$) che generano 19 settori/strisce ($S_1, \dots, S_{19}$), di cui:

- S_7 , di larghezza pari a 0,1470 m, è determinato dall'intersezione della linea di strato del terreno "2" con il piano di campagna;
- tutti gli altri hanno una larghezza di 0,50 m ($S_1, \dots, S_6$ e $S_8, \dots, S_{19}$).

Nella successiva figura (7) e tabella (4) si riassumono le caratteristiche geometriche dei vari settori/strisce.

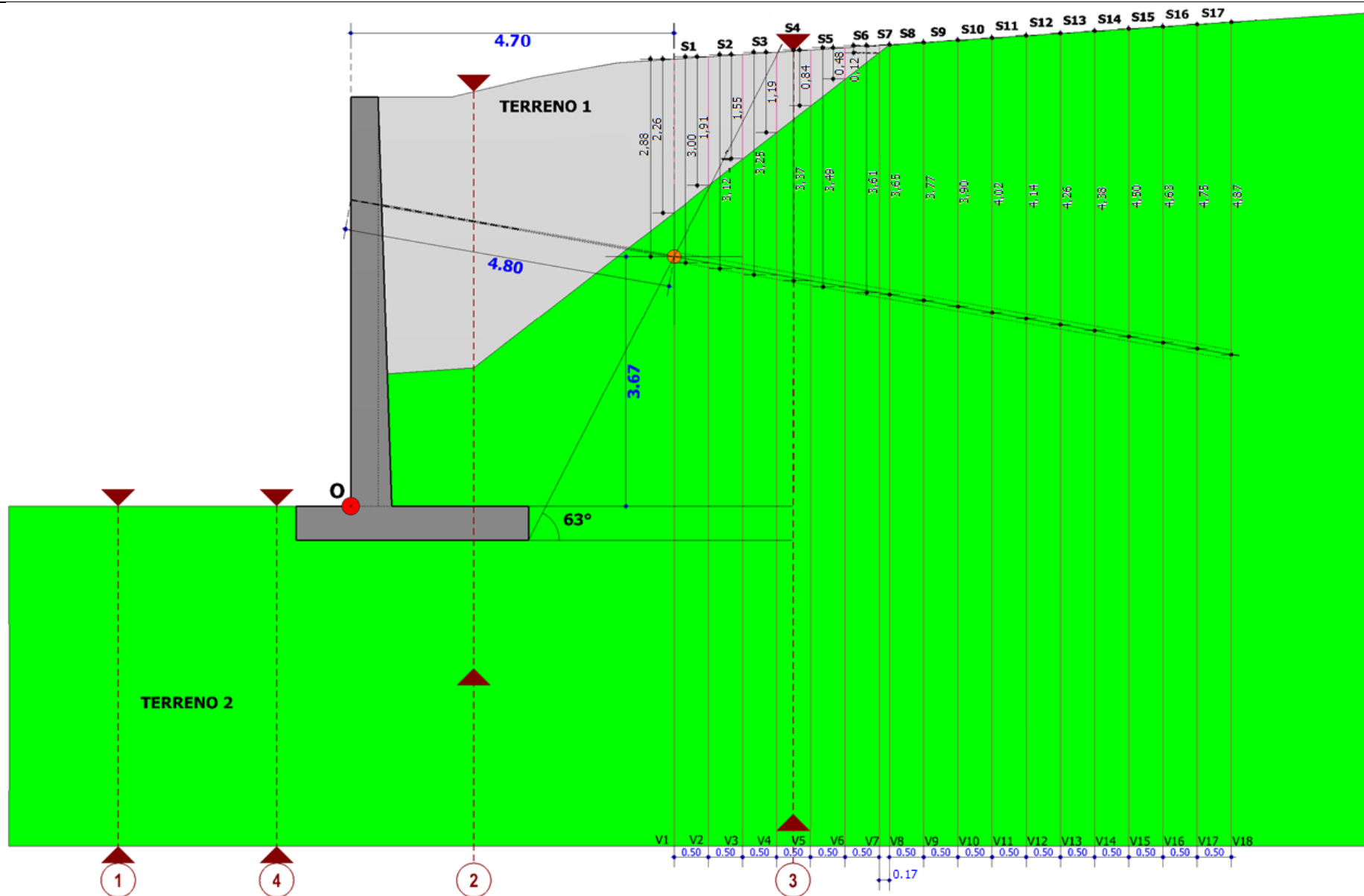


fig. 7: Discretizzazione del volume di terreno (verticali e settori/strisce) dell'iterazione finale

Tab. 4: Caratteristiche settori/strisce.

	Settore/ Striscia	S ₁		S ₃		S ₅		S ₇		S ₉		S ₁₁		S ₁₃		S ₁₅		S ₁₇		
		-	S ₂	S ₄	S ₆	S ₈	S ₁₀	S ₁₂	S ₁₄	S ₁₆	-									
	Verticale	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇	V ₈	V ₉	V ₁₀	V ₁₁	V ₁₂	V ₁₃	V ₁₄	V ₁₅	V ₁₆	V ₁₇	V ₁₈	
	ΔV _i [m]	0,0000	0,5000	1,0000	1,5000	2,0000	2,5000	3,0000	3,1714	3,6714	4,17140	4,6714	5,1714	5,6714	6,1714	6,6714	7,1714	7,6717	8,1724	
	L _{i,x} [m]	0,5000		0,5000		0,5000		0,1714		0,5000		0,5000		0,5000		0,5000		0,5010		
		-	0,5000		0,5000		0,5000		0,5000		0,5000		0,5000		0,5000		0,5000		-	
	L _{i,b} [m]	0,5077		0,5077		0,5077		0,1740		0,5077		0,5077		0,5077		0,5077		0,5087		
		-	0,5077		0,5077		0,5077		0,5077		0,5077		0,5077		0,5077		0,5077		-	
	Z _{T1,j} [m]	2,2635	1,9066	1,5498	1,1929	0,8360	0,4792	0,1223	0,0000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	ΔZ _{T1,j} [m]	2,2635	1,9066	1,5498	1,1929	0,8360	0,4792	0,1223	0,0000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	A _{T1,i} [m ²]	1,0425		0,6857		0,3288		0,0105		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		
		-	0,8641		0,5072		0,1504		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		-	
Terreno 1	Z _{T2,j} [m]	2,8818	3,0033	3,1248	3,2463	3,3678	3,4893	3,6108	3,6524	3,7739	3,8954	4,0169	4,1384	4,2599	4,3814	4,5029	4,6244	4,7459	4,8650	
	ΔZ _{T2,j} [m]	0,6183	1,0967	1,5750	2,0534	2,5318	3,0101	3,4885	3,6524	3,7739	3,8954	4,0169	4,1384	4,2599	4,3814	4,5029	4,6244	4,7459	4,8650	
	A _{T2,i} [m ²]	0,4288		0,9071		1,3855		0,6120		1,9173		2,0388		2,1603		2,2818		2,4075		
		-	0,6679		1,1463		1,6247		1,8566		1,9781		2,0996		2,2211		2,3426		-	

LEGENDA

ΔV_j [m]	Distanza, in orizzontale, della j-esima verticale rispetto al punto di franco (j = 1, ..., 18).
L _{i,x} [m]	Larghezza, in orizzontale, del i-esimo settore/striscia (i = 1, ..., 17).
L _{i,b} [m]	Larghezza alla base (sul tirante) del i-esimo settore/striscia (i = 1, ..., 17); dato da $L_{i,x}/\cos(\alpha_T)$, con α_T = inclinazione del tirante.
Z _{Tk,j} [m]	Profondità dal piano campagna, sulla j-esima verticale, del k-esimo terreno.
$\Delta Z_{Tk,j}$ [m]	Altezza, sulla j-esima verticale, del k-esimo terreno.
A _{Tk,i} [m ²]	Area del k-esimo terreno nel i-esimo settore.

Fase 2

Per ogni settore/striscia andiamo a calcolare le seguenti resistenze:

1 - Resistenza di attrito/adesione bulbo-terreno ($R_{TrrBib,i}$)

Il calcolo della resistenza unitaria del bulbo ($R_{TrrBib,i}$) viene condotto mediante la relazione:

$$R_{TrrBib,i} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr} / 100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{t,i} \cdot Z_i \cdot \tan(\varphi_i^*) + c_a \cdot c_i] = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr} / 100) \cdot [\sigma_{T,m,i} \cdot \tan(\varphi_i^*) + c_a \cdot c_i];$$

dove:

$D_p = 34$ mm: diametro di perforazione;

$E_{sp} L_{tr} = 0$: coefficiente di espansione laterale (N.B. 4);

Il termine " $K_a \cdot \gamma_{t,i} \cdot Z_i$ " (vedi parte teorica) viene assunto pari alla tensione media ($\sigma_{T,m,i}$) alla base del settore (sul tirante) - (da determinare);

$\varphi_i^* = \delta \cdot \varphi_i$: angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore i-esimo (da determinare);

$\delta = 0,67$: attrito terra-tirante (N.B. 4);

φ_i : angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore i-esimo (da determinare).

$c_a = 0,50$: aderenza tirante-terreno (N.B. 4);

c_i : coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore i-esimo (da determinare).

N.B. 4

Il valore di δ (0,67) è stato definito andando in: DATI della STRUTTURA -> Dati Generali -> Preferenze -> Tiranti -> "Attrito Terra-Tirante".

Il valore di $c_a = 0,50$ è stato definito andando in: DATI della STRUTTURA -> Dati Generali -> Preferenze -> Tiranti -> "Adesione terra-Tirante".

Il valore di $E_{sp} L_{tr} = 0$ è stato definito andando in: DATI della STRUTTURA -> Dati Generali -> Preferenze -> Tiranti -> "Espansione laterale".

2 - Resistenza di aderenza tondino-malta ($R_{AccMlt,i}$)

Tale resistenza (unitaria) viene calcolata mediante la seguente relazione:

$$R_{AccMlt,i} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd};$$

dove:

$d_{T,Tot} = n_{barre} \cdot d_T = 1 \cdot 24 = 24$ mm = 0,024 m: somma dei diametri delle barre che costituiscono il tirante;

$n_{barre} = 1$: numero di tondini che costituiscono il tirante;

$d_T = 24$ mm = 0,024 m: somma dei diametri delle barre che costituiscono il tirante.

$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctk} = 2,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot f_{ctk} = 4\,029\,038$ N/m²: resistenza di aderenza malta-ondino;

$\eta_1 = 1$ (condizioni di buona aderenza);

$\eta_2 = 1$ (per barre di diametro minore 32 mm);

$f_{ctk} = 0,7 \cdot f_{ctm} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot (f_{ck})^{2/3} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot (0,83 \cdot R_{ck})^{2/3} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot (0,83 \cdot 30)^{2/3} = 1\,790\,684$ N/m²: resistenza a trazione della Malta M30;

$R_{ck} = 30$ N/mm²: resistenza caratteristica cubica.

$g = 1,7$: coefficiente correttivo fornito dalla Tab. 1 - vedi "cenni teorici" (N.B. 5);

$s = 1 - 0,075 (n_{barre} - 1) = 1 - 0,075 (1 - 1) = 1$ (vedi "cenni teorici").

$n_{barre} = 1$: numero di tondini che costituiscono il tirante.

Non avendo grandezze funzione dei settori si ha:

$$R_{AccMlt,i} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1 \cdot 4\,029\,038 = \mathbf{516\,430\,N/m}.$$

N.B. 5

Il valore di $g = 1,7$ è stato definito andando in: DATI della STRUTTURA -> Dati Generali -> Preferenze -> Tiranti -> "Coefficiente correttivo lunghezza di ancoraggio" -> scelto dalla tabella.

3 - Resistenza di aderenza malta-foro ($R_{MltForo,i}$)

Tale resistenza (unitaria) viene calcolata mediante la seguente relazione:

$$R_{MltForo,i} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr} / 100) \cdot f_{ctk};$$

dove:

$D_p = 34$ mm = 0,034 m: diametro di perforazione;

$E_{sp} L_{tr} = 0$: coefficiente di espansione laterale;

$f_{ctk} = 1\,790\,684 \text{ N/m}^2$: resistenza a trazione della Malta M30.

Non avendo grandezze funzione dei settori si ha:

$$R_{MltForo,i} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot 1790684 = \mathbf{191\,270 \text{ N/m}}$$

Di seguito riportiamo, per i vari settori, il calcolo delle suddette resistenze:

SETTORE 1 (Verticali V₁-V₂)

$$A_{T1,1} = (\Delta Z_{T1,1} + \Delta Z_{T1,2}) \cdot L_{1,x}/2 = (2,2635 + 1,9066) \cdot 0,50/2 = 1,0425 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 1)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{T1,1} &= 2,2635 \text{ m (altezza del terreno 1 sulla verticale 1);} \\ \Delta Z_{T1,2} &= 1,9066 \text{ m (altezza del terreno 1 sulla verticale 2);} \\ L_{1,x} &= 0,50 \text{ m (Larghezza, in orizzontale, del settore in esame).} \end{aligned}$$

$$A_{T2,1} = (\Delta Z_{T2,1} + \Delta Z_{T2,2}) \cdot L_{1,x}/2 = (0,6183 + 1,0967) \cdot 0,50/2 = 0,4288 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 2)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{T2,1} &= 0,6183 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 1);} \\ \Delta Z_{T2,2} &= 1,0967 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 2).} \end{aligned}$$

$$P_{T1} = P_{T1,1} + P_{T2,1} = A_{T1,1} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,1} \cdot \gamma_{T2} = 18765 + 8875 = 27340 \text{ N/m (peso del terreno alla base del settore)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} P_{T1,1} &= A_{T1,1} \cdot \gamma_{T1} = 1,0425 \cdot 18000 = 18765 \text{ N/m (peso del terreno 1 nel settore in esame);} \\ \gamma_{T1} &= 18000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 1);} \\ P_{T2,1} &= A_{T2,1} \cdot \gamma_{T2} = 0,4288 \cdot 20000 = 8875 \text{ N/m (peso del terreno 2 nel settore in esame);} \\ \gamma_{T2} &= 20000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 2).} \end{aligned}$$

$$\sigma_{T,V,1} = P_{T1} / L_{1,b} = 27340/0,5077 = \mathbf{53850 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione verticale alla base del settore)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} L_{1,b} &= L_{1,x} / \cos(\alpha_T) = 0,50 / \cos(10^\circ) = 0,5077 \text{ m (larghezza alla base del settore);} \\ \alpha_T &= 10^\circ \text{ (inclinazione del tirante);} \end{aligned}$$

$$\sigma_{T,V,1,INT} = \sigma_{T,V,1} \cdot [\cos(\alpha_T)^2 + k_0 \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 53850 \cdot [\cos(10^\circ)^2 + 0,6093 \cdot \sin(10^\circ)^2] = \mathbf{53216 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione verticale alla base del settore)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} k_0 &= 1 - \sin(\phi_1) = 0,6093; \\ \phi_1 &= 23^\circ \text{ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);} \end{aligned}$$

$$\sigma_{T,O,1} = \sigma_{T,V,1} \cdot k_0 = 53850 \cdot 0,6093 = \mathbf{32809 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione orizzontale alla base del settore)}.$$

$$\sigma_{T,m,1} = (\sigma_{T,V,1,INT} + \sigma_{T,O,1})/2 = (53216 + 32809)/2 = \mathbf{43012 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione media alla base del settore)}.$$

$$R_{TrrBib,1} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,1} \cdot Z_1 \cdot \tan(\phi_1) + c_a \cdot c_1] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot [43012 \cdot \tan(15,41^\circ) + 0,5 \cdot 20000] = \mathbf{2334 \text{ N/m}}$$

(Resistenza di attrito/adesione bulbo-terreno).

Con:

$$\begin{aligned} D_p &= 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);} \\ E_{sp} L_{tr} &= 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);} \\ K_a \cdot \gamma_{T,1} \cdot Z_1 &= \sigma_{N,1} = 43012 \text{ N/m}^2; \\ \phi_1^* &= \delta \cdot \phi_1 = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);} \\ \delta &= 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);} \\ \phi_1 &= 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).} \\ c_a &= 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);} \\ c_1 &= 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).} \end{aligned}$$

$$R_{AccMlt,1} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1 \cdot 4029038 = \mathbf{516430 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} d_{T,Tot} &= n_{barre} \cdot d_T = 1 \cdot 24 = 24 \text{ mm} = 0,024 \text{ m (somma dei diametri delle barre che costituiscono il tirante);} \\ n_{barre} &= 1 \text{ (numero di tondini che costituiscono il tirante);} \\ d_T &= 24 \text{ mm} = 0,024 \text{ m (diametro della singola barre presente nel tirante).} \\ f_{bd} &= 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctk} = 2,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot f_{ctk} = 4\,029\,038 \text{ N/m}^2 \text{ (resistenza di aderenza malta-ondino);} \\ \eta_1 &= 1 \text{ (condizioni di buona aderenza);} \\ \eta_2 &= 1 \text{ (per barre di diametro minore 32 mm);} \\ f_{ctk} &= 0,7 \cdot f_{ctm} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot (f_{ck})^{2/3} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot (0,83 \cdot R_{ck})^{2/3} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot (0,83 \cdot 30)^{2/3} = 1\,790\,684 \text{ N/m}^2 \text{ (resistenza a trazione della Malta M30);} \\ R_{ck} &= 30 \text{ N/mm}^2 \text{ (resistenza caratteristica cubica).} \\ g &= 1,7 \text{ (coefficiente correttivo della Tab. 1);} \\ s &= 1 - 0,075 (n_{barre} - 1) = 1 - 0,075 (1 - 1) = 1 \text{ (vedi "cenni teorici").} \end{aligned}$$

$$R_{MltForo,1} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot 1790684 = \mathbf{191270 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore).}$$

Con:

$$\begin{aligned} D_p &= 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);} \\ E_{sp} L_{tr} &= 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);} \\ f_{ctk} &= 1\,790\,684 \text{ N/m}^2 \text{ (resistenza a trazione della Malta M30).} \end{aligned}$$

$$R_{\text{Min},1} = \min(R_{\text{TrrBib},1}; R_{\text{AccMlt},1}; R_{\text{MltForo},1}) = \min(2334; 516430; 191270) = \mathbf{2334 \text{ N/m}}$$
 (Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).

$$R_{\text{Ed},1}^* = R_{\text{Min},1} \cdot L_{1,b} = 2334 \cdot 0,5077 = \mathbf{1185 \text{ N}}$$
 (Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza $\gamma_R \cdot e \cdot \xi_{a4}$).

SETTORE 2 (Verticali V₂-V₃)

$$A_{T1,2} = (\Delta Z_{T1,2} + \Delta Z_{T1,3}) \cdot L_{2,x} / 2 = (1,9066 + 1,5498) \cdot 0,50 / 2 = 0,8641 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 1)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{T1,2} &= 1,9066 \text{ m (altezza del terreno 1 sulla verticale 2);} \\ \Delta Z_{T1,3} &= 1,5498 \text{ m (altezza del terreno 1 sulla verticale 3);} \\ L_{2,x} &= 0,50 \text{ m (Larghezza, in orizzontale, del settore in esame).} \end{aligned}$$

$$A_{T2,2} = (\Delta Z_{T2,2} + \Delta Z_{T2,3}) \cdot L_{2,x} / 2 = (1,0967 + 1,5750) \cdot 0,50 / 2 = 0,6679 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 2)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{T2,2} &= 1,0967 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 2);} \\ \Delta Z_{T2,3} &= 1,5750 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 3).} \end{aligned}$$

$$P_{T2} = P_{T1,2} + P_{T2,2} = A_{T1,2} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,2} \cdot \gamma_{T2} = 15554 + 13359 = 28912 \text{ N/m (peso del terreno alla base del settore)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} P_{T1,2} &= A_{T1,2} \cdot \gamma_{T1} = 0,8641 \cdot 18000 = 15554 \text{ N/m (peso del terreno 1 nel settore in esame);} \\ \gamma_{T1} &= 18000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 1);} \\ P_{T2,2} &= A_{T2,2} \cdot \gamma_{T2} = 0,6679 \cdot 20000 = 13359 \text{ N/m (peso del terreno 2 nel settore in esame);} \\ \gamma_{T2} &= 20000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 2).} \end{aligned}$$

$$\sigma_{T,V,2} = P_{T2} / L_{2,b} = 28912 / 0,5077 = \mathbf{56946 \text{ N/m}^2}$$
 (pressione verticale alla base del settore).

Con:

$$\begin{aligned} L_{2,b} &= L_{2,x} / \cos(\alpha_T) = 0,50 / \cos(10^\circ) = 0,5077 \text{ m (larghezza alla base del settore);} \\ \alpha_T &= 10^\circ \text{ (inclinazione del tirante);} \end{aligned}$$

$$\sigma_{T,V,2,INT} = \sigma_{T,V,2} \cdot [\cos(\alpha_T)^2 + k_0 \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 56946 \cdot [\cos(10^\circ)^2 + 0,6093 \cdot \sin(10^\circ)^2] = \mathbf{56275 \text{ N/m}^2}$$
 (pressione verticale alla base del settore).

Con:

$$\begin{aligned} k_0 &= 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093; \\ \varphi_1 &= 23^\circ \text{ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);} \end{aligned}$$

$$\sigma_{T,O,2} = \sigma_{T,V,2} \cdot k_0 = 56946 \cdot 0,6093 = \mathbf{34695 \text{ N/m}^2}$$
 (pressione orizzontale alla base del settore).

$$\sigma_{T,m,2} = (\sigma_{T,V,2,INT} + \sigma_{T,O,2}) / 2 = (56275 + 34695) / 2 = \mathbf{45485 \text{ N/m}^2}$$
 (pressione media alla base del settore).

$$R_{\text{TrrBib},2} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{\text{sp}} L_{\text{tr}} / 100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,2} \cdot Z_2 \cdot \tan(\varphi_2^*) + c_a \cdot c_2] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0 / 100) \cdot [45485 \cdot \tan(15,41^\circ) + 0,5 \cdot 20000] = \mathbf{2407 \text{ N/m}}$$
 (Resistenza di attrito/adeseione bulbo-terreno).

Con:

$$\begin{aligned} D_p &= 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);} \\ E_{\text{sp}} L_{\text{tr}} &= 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);} \\ K_a \cdot \gamma_{T,2} \cdot Z_2 &= \sigma_{T,m,2} = 45485 \text{ N/m}^2; \\ \varphi_2^* &= \delta \cdot \varphi_2 = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);} \\ \delta &= 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);} \\ \varphi_2 &= 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).} \\ c_a &= 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);} \\ c_2 &= 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).} \end{aligned}$$

$$R_{\text{AccMlt},2} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1 \cdot 4029038 = \mathbf{516430 \text{ N/m}}$$
 (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).

$$R_{\text{MltForo},2} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{\text{sp}} L_{\text{tr}} / 100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0 / 100) \cdot 1790684 = \mathbf{191270 \text{ N/m}}$$
 (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).

$$R_{\text{Min},2} = \min(R_{\text{TrrBib},2}; R_{\text{AccMlt},2}; R_{\text{MltForo},2}) = \min(2407; 516430; 191270) = \mathbf{2407 \text{ N/m}}$$
 (Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).

$$R_{\text{Ed},2}^* = R_{\text{Min},2} \cdot L_{2,b} = 2407 \cdot 0,5077 = \mathbf{1222 \text{ N}}$$
 (Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza $\gamma_R \cdot e \cdot \xi_{a4}$).

SETTORE 3 (Verticali V₃-V₄)

$$A_{T1,3} = (\Delta Z_{T1,3} + \Delta Z_{T1,4}) \cdot L_{3,x} / 2 = (1,5498 + 1,1929) \cdot 0,50 / 2 = 0,6857 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 1)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{T1,3} &= 1,5498 \text{ m (altezza del terreno 1 sulla verticale 3);} \\ \Delta Z_{T1,4} &= 1,1929 \text{ m (altezza del terreno 1 sulla verticale 4);} \\ L_{3,x} &= 0,50 \text{ m (Larghezza, in orizzontale, del settore in esame).} \end{aligned}$$

$$A_{T2,3} = (\Delta Z_{T2,3} + \Delta Z_{T2,4}) \cdot L_{3,x} / 2 = (1,5750 + 2,0534) \cdot 0,50 / 2 = 0,9071 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 2)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{T2,3} &= 1,5750 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 3);} \\ \Delta Z_{T2,4} &= 2,0534 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 4).} \end{aligned}$$

$$P_{T3} = P_{T1,3} + P_{T2,3} = A_{T1,3} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,3} \cdot \gamma_{T2} = 12342 + 18142 = 30484 \text{ N/m (peso del terreno alla base del settore)}.$$

Con:

$$P_{T1,3} = A_{T1,3} \cdot \gamma_{T1} = 0,6857 \cdot 18000 = 12342 \text{ N/m (peso del terreno 1 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T1} = 18000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 1);}$$

$$P_{T2,3} = A_{T2,3} \cdot \gamma_{T2} = 0,9071 \cdot 20000 = 18142 \text{ N/m (peso del terreno 2 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T2} = 20000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 2).}$$

$$\sigma_{T,V,3} = P_{T3} / L_{3,b} = 30484 / 0,5077 = 60042 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$L_{3,b} = L_{3,x} / \cos(\alpha_T) = 0,50 / \cos 10^\circ = 0,5077 \text{ m (larghezza alla base del settore);}$$

$$\alpha_T = 10^\circ \text{ (inclinazione del tirante);}$$

$$\sigma_{T,V,3,INT} = \sigma_{T,V,3} \cdot [\cos(\alpha_T)^2 + k_o \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 60042 \cdot [\cos(10^\circ)^2 + 0,6093 \cdot \sin(10^\circ)^2] = 59335 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$k_o = 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093;$$

$$\varphi_1 = 23^\circ \text{ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);}$$

$$\sigma_{T,O,3} = \sigma_{T,V,3} \cdot k_o = 60042 \cdot 0,6093 = 36582 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione orizzontale alla base del settore).}$$

$$\sigma_{T,m,3} = (\sigma_{T,V,3,INT} + \sigma_{T,O,3}) / 2 = (59335 + 36582) / 2 = 47958 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione media alla base del settore).}$$

$$R_{TrrBib,3} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr} / 100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,3} \cdot Z_3 \cdot \tan(\varphi_3^*) + c_a \cdot c_3] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0 / 100) \cdot [47958 \cdot \tan(15,41^\circ) + 0,5 \cdot 20000] = 2480 \text{ N/m}$$

(Resistenza di attrito/adesione bulbo-terreno).

Con:

$$D_p = 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);}$$

$$E_{sp} L_{tr} = 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);}$$

$$K_a \cdot \gamma_{T,3} \cdot Z_3 = \sigma_{T,m,3} = 47958 \text{ N/m}^2;$$

$$\varphi_3^* = \delta \cdot \varphi_3 = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);}$$

$$\delta = 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);}$$

$$\varphi_3 = 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$c_a = 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);}$$

$$c_3 = 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{AccMlt,3} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1 \cdot 4029038 = 516430 \text{ N/m (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).}$$

$$R_{MltForo,3} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr} / 100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0 / 100) \cdot 1790684 = 191270 \text{ N/m (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).}$$

$$R_{Min,3} = \min(R_{TrrBib,3}; R_{AccMlt,3}; R_{MltForo,3}) = \min(2480; 516430; 191270) = 2480 \text{ N/m (Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{Ed,3}^* = R_{Min,3} \cdot L_{3,b} = 2480 \cdot 0,5077 = 1259 \text{ N (Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza } \gamma_R \text{ e } \xi_{s4}).$$

SETTORE 4 (Verticali V₄-V₅)

$$A_{T1,4} = (\Delta Z_{T1,4} + \Delta Z_{T1,5}) \cdot L_{4,x} / 2 = (1,1929 + 0,8360) \cdot 0,50 / 2 = 0,5072 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 1).}$$

Con:

$$\Delta Z_{T1,4} = 1,1929 \text{ m (altezza del terreno 1 sulla verticale 4);}$$

$$\Delta Z_{T1,5} = 0,8360 \text{ m (altezza del terreno 1 sulla verticale 5);}$$

$$L_{4,x} = 0,50 \text{ m (Larghezza, in orizzontale, del settore in esame).}$$

$$A_{T2,4} = (\Delta Z_{T2,4} + \Delta Z_{T2,5}) \cdot L_{4,x} / 2 = (2,0534 + 2,5318) \cdot 0,50 / 2 = 1,1463 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 2).}$$

Con:

$$\Delta Z_{T2,4} = 2,0534 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 4);}$$

$$\Delta Z_{T2,5} = 2,5318 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 5).}$$

$$P_{T4} = P_{T1,4} + P_{T2,4} = A_{T1,4} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,4} \cdot \gamma_{T2} = 9130 + 22926 = 32056 \text{ N/m (peso del terreno alla base del settore).}$$

Con:

$$P_{T1,4} = A_{T1,4} \cdot \gamma_{T1} = 0,5072 \cdot 18000 = 9130 \text{ N/m (peso del terreno 1 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T1} = 18000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 1);}$$

$$P_{T2,4} = A_{T2,4} \cdot \gamma_{T2} = 1,1463 \cdot 20000 = 22926 \text{ N/m (peso del terreno 2 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T2} = 20000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 2).}$$

$$\sigma_{T,V,4} = P_{T4} / L_{4,b} = 32056 / 0,5077 = 62138 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$L_{4,b} = L_{4,x} / \cos(\alpha_T) = 0,50 / \cos 10^\circ = 0,5077 \text{ m (larghezza alla base del settore);}$$

$$\alpha_T = 10^\circ \text{ (inclinazione del tirante);}$$

$$\sigma_{T,V,4,INT} = \sigma_{T,V,4} \cdot [\cos(\alpha_T)^2 + k_o \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 62138 \cdot [\cos(10^\circ)^2 + 0,6093 \cdot \sin(10^\circ)^2] = 62394 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$k_o = 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093;$$

$$\varphi_1 = 23^\circ \text{ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);}$$

$$\sigma_{T,O,4} = \sigma_{T,V,4} \cdot k_o = 62138 \cdot 0,6093 = 38468 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione orizzontale alla base del settore).}$$

$$\sigma_{T,m,4} = (\sigma_{T,V,4,INT} + \sigma_{T,O,4}) / 2 = (62394 + 38468) / 2 = 50431 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione media alla base del settore).}$$

$$R_{TrBib,4} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr} / 100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,4} \cdot Z_4 \cdot \tan(\varphi_4^*) + c_a \cdot c_4] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot [50431 \cdot \tan(15,41) + 0,5 \cdot 20000] = \mathbf{2553 \text{ N/m}}$$

(Resistenza di attrito/adeseione bulbo-terreno).

Con:

$$D_p = 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);}$$

$$E_{sp} L_{tr} = 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);}$$

$$K_a \cdot \gamma_{T,4} \cdot Z_4 = \sigma_{T,m,4} = 50431 \text{ N/m}^2;$$

$$\varphi_4^* = \delta \cdot \varphi_4 = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);}$$

$$\delta = 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);}$$

$$\varphi_4 = 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$c_a = 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);}$$

$$c_4 = 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{AccMlt,4} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1 \cdot 4029038 = \mathbf{516430 \text{ N/m}}$$
 (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).

$$R_{MltForo,4} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr} / 100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot 1790684 = \mathbf{191270 \text{ N/m}}$$
 (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).

$$R_{Min,4} = \min(R_{TrBib,4}; R_{AccMlt,4}; R_{MltForo,4}) = \min(2553; 516430; 191270) = \mathbf{2330 \text{ N/m}}$$
 (Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).

$$R_{Ed,4}^* = R_{Min,4} \cdot L_{4,b} = 2553 \cdot 0,5077 = \mathbf{1296 \text{ N}}$$
 (Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza $\gamma_R \cdot e \cdot \xi_{a4}$).

SETTORE 5 (Verticali V₅-V₆)

$$A_{T1,5} = (\Delta Z_{T1,5} + \Delta Z_{T1,6}) \cdot L_{5,X} / 2 = (0,8360 + 0,4792) \cdot 0,50 / 2 = 0,3288 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 1).}$$

Con:

$$\Delta Z_{T1,5} = 0,8360 \text{ m (altezza del terreno 1 sulla verticale 5);}$$

$$\Delta Z_{T1,6} = 0,4792 \text{ m (altezza del terreno 1 sulla verticale 6);}$$

$$L_{5,X} = 0,50 \text{ m (Larghezza, in orizzontale, del settore in esame).}$$

$$A_{T2,5} = (\Delta Z_{T2,5} + \Delta Z_{T2,6}) \cdot L_{5,X} / 2 = (2,5550 + 3,0101) \cdot 0,50 / 2 = 1,3855 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 2).}$$

Con:

$$\Delta Z_{T2,5} = 2,5550 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 5);}$$

$$\Delta Z_{T2,6} = 3,0101 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 6).}$$

$$P_{T5} = P_{T1,5} + P_{T2,5} = A_{T1,5} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,5} \cdot \gamma_{T2} = 5918 + 27710 = 33628 \text{ N/m (peso del terreno alla base del settore).}$$

Con:

$$P_{T1,5} = A_{T1,5} \cdot \gamma_{T1} = 0,3288 \cdot 18000 = 5918 \text{ N/m (peso del terreno 1 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T1} = 18000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 1);}$$

$$P_{T2,5} = A_{T2,5} \cdot \gamma_{T2} = 1,3855 \cdot 20000 = 27710 \text{ N/m (peso del terreno 2 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T2} = 20000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 2).}$$

$$\sigma_{T,V,5} = P_{T5} / L_{5,b} = 33628 / 0,5077 = \mathbf{66234 \text{ N/m}^2}$$
 (pressione verticale alla base del settore).

Con:

$$L_{5,b} = L_{5,X} / \cos(\alpha_T) = 0,50 / \cos 10^\circ = 0,5077 \text{ m (larghezza alla base del settore);}$$

$$\alpha_T = 10^\circ \text{ (inclinazione del tirante);}$$

$$\sigma_{T,V,4,INT} = \sigma_{T,V,4} \cdot [\cos(\alpha_T) + k_0 \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 62394 \cdot [\cos(10) + 0,6093 \cdot \sin(10)^2] = \mathbf{62394 \text{ N/m}^2}$$
 (pressione verticale alla base del settore).

Con:

$$k_0 = 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093;$$

$$\varphi_1 = 23^\circ \text{ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);}$$

$$\sigma_{T,O,5} = \sigma_{T,V,5} \cdot k_0 = 66234 \cdot 0,6093 = \mathbf{40354 \text{ N/m}^2}$$
 (pressione orizzontale alla base del settore).

$$\sigma_{T,m,5} = (\sigma_{T,V,5,INT} + \sigma_{T,O,5}) / 2 = (62394 + 40354) / 2 = \mathbf{52904 \text{ N/m}^2}$$
 (pressione media alla base del settore).

$$R_{TrBib,5} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr} / 100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,5} \cdot Z_5 \cdot \tan(\varphi_5^*) + c_a \cdot c_5] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot [52904 \cdot \tan(15,41) + 0,5 \cdot 20000] = \mathbf{2626 \text{ N/m}}$$

(Resistenza di attrito/adeseione bulbo-terreno).

Con:

$$D_p = 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);}$$

$$E_{sp} L_{tr} = 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);}$$

$$K_a \cdot \gamma_{T,5} \cdot Z_5 = \sigma_{T,m,5} = 52904 \text{ N/m}^2;$$

$$\varphi_5^* = \delta \cdot \varphi_5 = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);}$$

$$\delta = 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);}$$

$$\varphi_5 = 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$c_a = 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);}$$

$$c_5 = 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{AccMlt,5} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1 \cdot 4029038 = \mathbf{516430 \text{ N/m}}$$
 (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).

$$R_{MltForo,5} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr} / 100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot 1790684 = \mathbf{191270 \text{ N/m}}$$
 (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).

$$R_{Min,5} = \min(R_{TrBib,5}; R_{AccMlt,5}; R_{MltForo,5}) = \min(2626; 516430; 191270) = \mathbf{2626 \text{ N/m}}$$
 (Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in

$$R_{Ed,5} = R_{Min,5} \cdot L_{5,b} = 2626 \cdot 0,5077 = \mathbf{1333 \text{ N}}$$
 (Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza $\gamma_R \cdot e_{\xi_{a4}}$).

SETTORE 6 (Verticali V₆-V₇)

$$A_{T1,6} = (\Delta Z_{T1,6} + \Delta Z_{T1,7}) \cdot L_{6,X} / 2 = (0,4792 + 0,1223) \cdot 0,50 / 2 = 0,1504 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 1)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{T1,6} &= 0,4792 \text{ m (altezza del terreno 1 sulla verticale 6);} \\ \Delta Z_{T1,7} &= 0,1223 \text{ m (altezza del terreno 1 sulla verticale 7);} \\ L_{6,X} &= 0,50 \text{ m (Larghezza, in orizzontale, del settore in esame).} \end{aligned}$$

$$A_{T2,6} = (\Delta Z_{T2,6} + \Delta Z_{T2,7}) \cdot L_{6,X} / 2 = (3,0101 + 3,4885) \cdot 0,50 / 2 = 1,6247 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 2)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{T2,5} &= 3,0101 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 6);} \\ \Delta Z_{T2,6} &= 3,4885 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 7).} \end{aligned}$$

$$P_{T6} = P_{T1,6} + P_{T2,6} = A_{T1,6} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,6} \cdot \gamma_{T2} = 2707 + 32493 = 35200 \text{ N/m (peso del terreno alla base del settore)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} P_{T1,6} &= A_{T1,6} \cdot \gamma_{T1} = 0,1504 \cdot 18000 = 2707 \text{ N/m (peso del terreno 1 nel settore in esame);} \\ \gamma_{T1} &= 18000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 1);} \\ P_{T2,6} &= A_{T2,6} \cdot \gamma_{T2} = 1,6247 \cdot 20000 = 32493 \text{ N/m (peso del terreno 2 nel settore in esame);} \\ \gamma_{T2} &= 20000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 2).} \end{aligned}$$

$$\sigma_{T,V,6} = P_{T6} / L_{6,b} = 35200 / 0,5077 = \mathbf{69330 \text{ N/m}^2}$$
 (pressione verticale alla base del settore).

Con:

$$\begin{aligned} L_{6,b} &= L_{6,X} / \cos(\alpha_T) = 0,50 / \cos 10^\circ = 0,5077 \text{ m (larghezza alla base del settore);} \\ \alpha_T &= 10^\circ \text{ (inclinazione del tirante);} \end{aligned}$$

$$\sigma_{T,V,6,INT} = \sigma_{T,V,6} \cdot [\cos(\alpha_T) + k_0 \cdot \sin(\alpha_T)] = 69330 \cdot [\cos(10^\circ) + 0,6093 \cdot \sin(10^\circ)] = \mathbf{68513 \text{ N/m}^2}$$
 (pressione verticale alla base del settore).

Con:

$$\begin{aligned} k_0 &= 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093; \\ \varphi_1 &= 23^\circ \text{ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);} \end{aligned}$$

$$\sigma_{T,O,6} = \sigma_{T,V,6} \cdot k_0 = 69330 \cdot 0,6093 = \mathbf{42241 \text{ N/m}^2}$$
 (pressione orizzontale alla base del settore).

$$\sigma_{T,m,6} = (\sigma_{T,V,6,INT} + \sigma_{T,O,6}) / 2 = (68513 + 42241) / 2 = \mathbf{55377 \text{ N/m}^2}$$
 (pressione media alla base del settore).

$$R_{TrrBib,6} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr} / 100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,6} \cdot Z_6 \cdot \tan(\varphi_6^*) + c_a \cdot c_6] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0 / 100) \cdot [55377 \cdot \tan(15,41^\circ) + 0,5 \cdot 20000] = \mathbf{2699 \text{ N/m}}$$
 (Resistenza di attrito/adesione bulbo-terreno).

Con:

$$\begin{aligned} D_p &= 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);} \\ E_{sp} L_{tr} &= 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);} \\ K_a \cdot \gamma_{T,6} \cdot Z_6 &= \sigma_{T,m,6} = 55377 \text{ N/m}^2; \\ \varphi_6^* &= \delta \cdot \varphi_6 = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);} \\ \delta &= 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);} \\ \varphi_6 &= 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).} \\ c_a &= 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);} \\ c_6 &= 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).} \end{aligned}$$

$$R_{AccMlt,6} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1 \cdot 4029038 = \mathbf{516430 \text{ N/m}}$$
 (Resistenza di aderenza tondino-malta; *non è funzione del settore - vedi settore 1*).

$$R_{MltForo,6} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr} / 100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0 / 100) \cdot 1790684 = \mathbf{191270 \text{ N/m}}$$
 (Resistenza di aderenza tondino-malta; *non è funzione del settore - vedi settore 1*).

$$R_{Min,6} = \min(R_{TrrBib,6}; R_{AccMlt,6}; R_{MltForo,6}) = \min(2699; 516430; 191270) = \mathbf{2699 \text{ N/m}}$$
 (Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).

$$R_{Ed,6} = R_{Min,6} \cdot L_{6,b} = 2699 \cdot 0,5077 = \mathbf{1370 \text{ N}}$$
 (Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza $\gamma_R \cdot e_{\xi_{a4}}$).

SETTORE 7 (Verticali V₇-V₈)

$$A_{T1,7} = (\Delta Z_{T1,7} + \Delta Z_{T1,8}) \cdot L_{7,X} / 2 = (0,1223 + 0,0000) \cdot 0,1470 / 2 = 0,0105 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 1)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{T1,7} &= 0,1223 \text{ m (altezza del terreno 1 sulla verticale 7);} \\ \Delta Z_{T1,8} &= 0,0000 \text{ m (altezza del terreno 1 sulla verticale 8);} \\ L_{7,X} &= 0,1470 \text{ m (Larghezza, in orizzontale, del settore in esame).} \end{aligned}$$

$$A_{T2,7} = (\Delta Z_{T2,7} + \Delta Z_{T2,8}) \cdot L_{7,X} / 2 = (3,4885 + 3,6524) \cdot 0,1714 / 2 = 0,6120 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 2)}.$$

Con:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{T2,7} &= 3,4885 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 7);} \\ \Delta Z_{T2,8} &= 3,6524 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 8).} \end{aligned}$$

$$P_{T7} = P_{T1,7} + P_{T2,7} = A_{T1,7} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,7} \cdot \gamma_{T2} = 189 + 12240 = 12428 \text{ N/m (peso del terreno alla base del settore)}.$$

Con:

$$P_{T1,7} = A_{T1,7} \cdot \gamma_{T1} = 0,0105 \cdot 18000 = 189 \text{ N/m (peso del terreno 1 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T1} = 18000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 1);}$$

$$P_{T2,7} = A_{T2,7} \cdot \gamma_{T2} = 0,6120 \cdot 20000 = 12240 \text{ N/m (peso del terreno 2 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T2} = 20000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 2).}$$

$$\sigma_{T,V,7} = P_{T7}/L_{7,b} = 12428/0,1740 = \mathbf{71408 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$L_{7,b} = L_{7,x}/\cos(\alpha_T) = 0,1714/\cos 10^\circ = 0,1740 \text{ m (larghezza alla base del settore);}$$

$$\alpha_T = 10^\circ \text{ (inclinazione del tirante);}$$

$$\sigma_{T,V,7,INT} = \sigma_{T,V,7} \cdot [\cos(\alpha_T)^2 + k_0 \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 71408 \cdot [\cos(10)^\circ)^2 + 0,6093 \cdot \sin(10)^\circ)^2] = \mathbf{70567 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$k_0 = 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093;$$

$$\varphi_1 = 23^\circ \text{ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);}$$

$$\sigma_{T,O,7} = \sigma_{T,V,7} \cdot k_0 = 71408 \cdot 0,6093 = \mathbf{43507 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione orizzontale alla base del settore).}$$

$$\sigma_{T,m,7} = (\sigma_{T,V,7,INT} + \sigma_{T,O,7})/2 = (70567 + 43507)/2 = \mathbf{57037 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione media alla base del settore).}$$

$$R_{Tribl,7} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,7} \cdot Z_7 \cdot \tan(\varphi_7^*) + c_a \cdot c_7] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot [57037 \cdot \tan(15,41) + 0,5 \cdot 20000] = \mathbf{2747 \text{ N/m}}$$

(Resistenza di attrito/adeseione bulbo-terreno).

Con:

$$D_p = 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);}$$

$$E_{sp} L_{tr} = 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);}$$

$$K_a \cdot \gamma_{T,7} \cdot Z_7 = \sigma_{T,m,7} = 57037 \text{ N/m}^2;$$

$$\varphi_7^* = \delta \cdot \varphi_7 = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);}$$

$$\delta = 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);}$$

$$\varphi_7 = 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$c_a = 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);}$$

$$c_7 = 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{AccMlt,7} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1 \cdot 4029038 = \mathbf{516430 \text{ N/m}}$$

(Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).

$$R_{MltForo,7} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot 1790684 = \mathbf{191270 \text{ N/m}}$$

(Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).

$$R_{Min,7} = \min(R_{Tribl,7}; R_{AccMlt,7}; R_{MltForo,7}) = \min(2747; 516430; 191270) = \mathbf{2747 \text{ N/m}}$$

(Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).

$$R_{Ed,7}^* = R_{Min,7} \cdot L_{7,b} = 2747 \cdot 0,1493 = \mathbf{478 \text{ N}}$$

(Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza γ_R e ξ_{a4}).

SETTORE 8 (Verticali V₈-V₉)

$$A_{T1,8} = 0,0000 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 1).}$$

$$A_{T2,8} = (\Delta Z_{T2,8} + \Delta Z_{T2,9}) \cdot L_{8,x}/2 = (3,6524 + 3,7739) \cdot 0,50/2 = 1,8566 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 2).}$$

Con:

$$\Delta Z_{T2,8} = 3,6524 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 8);}$$

$$\Delta Z_{T2,9} = 3,7739 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 9).}$$

$$P_{T8} = P_{T1,8} + P_{T2,8} = A_{T1,8} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,8} \cdot \gamma_{T2} = 0 + 37132 = 37132 \text{ N/m (peso del terreno alla base del settore).}$$

Con:

$$P_{T1,8} = A_{T1,8} \cdot \gamma_{T1} = 0,0000 \cdot 18000 = 0 \text{ N/m (peso del terreno 1 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T1} = 18000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 1);}$$

$$P_{T2,8} = A_{T2,8} \cdot \gamma_{T2} = 1,8566 \cdot 20000 = 37132 \text{ N/m (peso del terreno 2 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T2} = 20000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 2).}$$

$$\sigma_{T,V,8} = P_{T8}/L_{8,b} = 37132/0,5077 = \mathbf{73135 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$L_{8,b} = L_{8,x}/\cos(\alpha_T) = 0,50/\cos 10^\circ = 0,5077 \text{ m (larghezza alla base del settore);}$$

$$\alpha_T = 10^\circ \text{ (inclinazione del tirante);}$$

$$\sigma_{T,V,8,INT} = \sigma_{T,V,8} \cdot [\cos(\alpha_T)^2 + k_0 \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 73135 \cdot [\cos(10)^\circ)^2 + 0,6093 \cdot \sin(10)^\circ)^2] = \mathbf{72273 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$k_0 = 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093;$$

$$\varphi_1 = 23^\circ \text{ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);}$$

$$\sigma_{T,O,8} = \sigma_{T,V,8} \cdot k_0 = 73135 \cdot 0,6093 = \mathbf{44559 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione orizzontale alla base del settore).}$$

$$\sigma_{T,m,8} = (\sigma_{T,V,8,INT} + \sigma_{T,O,8})/2 = (73135 + 44559)/2 = \mathbf{58416 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione media alla base del settore).}$$

$$R_{Tribl,8} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,8} \cdot Z_8 \cdot \tan(\varphi_8^*) + c_a \cdot c_8] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot [58416 \cdot \tan(15,41) + 0,5 \cdot 20000] = \mathbf{2788 \text{ N/m}}$$

(Resistenza di attrito/adeseione bulbo-terreno).

Con:

$$D_p = 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);}$$

$$E_{sp} L_{tr} = 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);}$$

$$K_a \cdot \gamma_{T,8} \cdot Z_8 = \sigma_{T,m,8} = 58416 \text{ N/m}^2;$$

$$\varphi_8^* = \delta \cdot \varphi_8 = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);}$$

$$\delta = 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);}$$

$$\varphi_8 = 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$c_a = 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);}$$

$$c_8 = 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{AccMlt,8} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1 \cdot 4029038 = \mathbf{516430 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).}$$

$$R_{MltForo,8} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot 1790684 = \mathbf{191270 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).}$$

$$R_{Min,8} = \min(R_{TrrBib,8}; R_{AccMlt,8}; R_{MltForo,8}) = \min(2788; 516430; 191270) = \mathbf{2788 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{Ed,8}^* = R_{Min,8} \cdot L_{8,b} = 2788 \cdot 0,5077 = \mathbf{1416 \text{ N}} \text{ (Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza } \gamma_R \cdot e \cdot \xi_{a4}).$$

SETTORE 9 (Verticali V₉-V₁₀)

$$A_{T1,9} = 0,0000 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 1).}$$

$$A_{T2,9} = (\Delta Z_{T2,9} + \Delta Z_{T2,10}) \cdot L_{9,x}/2 = (3,7739 + 3,8954) \cdot 0,50/2 = 1,9173 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 2).}$$

Con:

$$\Delta Z_{T2,9} = 3,7739 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 9);}$$

$$\Delta Z_{T2,10} = 3,8954 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 10).}$$

$$P_{T9} = P_{T1,9} + P_{T2,9} = A_{T1,9} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,9} \cdot \gamma_{T2} = 0 + 38347 = 38347 \text{ N/m (peso del terreno alla base del settore).}$$

Con:

$$P_{T1,9} = A_{T1,9} \cdot \gamma_{T1} = 0,0000 \cdot 18000 = 0 \text{ N/m (peso del terreno 1 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T1} = 18000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 1);}$$

$$P_{T2,9} = A_{T2,9} \cdot \gamma_{T2} = 1,9173 \cdot 20000 = 38347 \text{ N/m (peso del terreno 2 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T2} = 20000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 2).}$$

$$\sigma_{T,V,9} = P_{T9}/L_{9,b} = 38347/0,5077 = \mathbf{75528 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$L_{9,b} = L_{9,x}/\cos(\alpha_T) = 0,50/\cos(10^\circ) = 0,5077 \text{ m (larghezza alla base del settore);}$$

$$\alpha_T = 10^\circ \text{ (inclinazione del tirante);}$$

$$\sigma_{T,V,9,INT} = \sigma_{T,V,9} \cdot [\cos(\alpha_T)^2 + k_0 \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 75528 \cdot [\cos(10^\circ)^2 + 0,6093 \cdot \sin(10^\circ)^2] = \mathbf{74638 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$k_0 = 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093;$$

$$\varphi_1 = 23^\circ \text{ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);}$$

$$\sigma_{T,O,9} = \sigma_{T,V,9} \cdot k_0 = 75528 \cdot 0,6093 = \mathbf{46017 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione orizzontale alla base del settore).}$$

$$\sigma_{T,m,9} = (\sigma_{T,V,9,INT} + \sigma_{T,O,9})/2 = (74638 + 46017)/2 = \mathbf{60327 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione media alla base del settore).}$$

$$R_{TrrBib,9} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,9} \cdot Z_9 \cdot \tan(\varphi_9^*) + c_a \cdot c_9] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot [60327 \cdot \tan(15,41^\circ) + 0,5 \cdot 20000] = \mathbf{2844 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza di attrito/adessione bulbo-terreno).}$$

Con:

$$D_p = 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);}$$

$$E_{sp} L_{tr} = 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);}$$

$$K_a \cdot \gamma_{T,9} \cdot Z_9 = \sigma_{T,m,9} = 60327 \text{ N/m}^2;$$

$$\varphi_9^* = \delta \cdot \varphi_9 = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);}$$

$$\delta = 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);}$$

$$\varphi_9 = 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$c_a = 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);}$$

$$c_9 = 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{AccMlt,9} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1 \cdot 4029038 = \mathbf{516430 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).}$$

$$R_{MltForo,9} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot 1790684 = \mathbf{191270 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).}$$

$$R_{Min,9} = \min(R_{TrrBib,9}; R_{AccMlt,9}; R_{MltForo,9}) = \min(2844; 516430; 191270) = \mathbf{2844 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{Ed,9}^* = R_{Min,9} \cdot L_{9,b} = 2844 \cdot 0,5077 = \mathbf{1444 \text{ N}} \text{ (Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza } \gamma_R \cdot e \cdot \xi_{a4}).$$

SETTORE 10 (Verticali V₁₀-V₁₁)

$$A_{T1,10} = 0,0000 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 1).}$$

$$A_{T2,11} = (\Delta Z_{T2,10} + \Delta Z_{T2,11}) \cdot L_{10,x}/2 = (3,8954 + 4,0169) \cdot 0,50/2 = 1,9781 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 2).}$$

Con:

$$\Delta Z_{T2,10} = 3,8954 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 10);}$$

$$\Delta Z_{T2,10} = 4,0169 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 11)}.$$

$$P_{T10} = P_{T1,10} + P_{T2,10} = A_{T1,10} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,10} \cdot \gamma_{T2} = 0 + 39562 = 39562 \text{ N/m (peso del terreno alla base del settore)}.$$

Con:

$$P_{T1,10} = A_{T1,10} \cdot \gamma_{T1} = 0,0000 \cdot 18000 = 0 \text{ N/m (peso del terreno 1 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T1} = 18000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 1);}$$

$$P_{T2,10} = A_{T2,10} \cdot \gamma_{T2} = 1,9781 \cdot 20000 = 39562 \text{ N/m (peso del terreno 2 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T2} = 20000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 2).}$$

$$\sigma_{T,V,10} = P_{T10}/L_{10,b} = 39562/0,5077 = 77921 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione verticale alla base del settore)}.$$

Con:

$$L_{10,b} = L_{10,x}/\cos(\alpha_T) = 0,50/\cos 10^\circ = 0,5077 \text{ m (larghezza alla base del settore);}$$

$$\alpha_T = 10^\circ \text{ (inclinazione del tirante);}$$

$$\sigma_{T,V,10,INT} = \sigma_{T,V,10} [\cos(\alpha_T)^2 + k_0 \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 77921 \cdot [\cos(10)^\circ)^2 + 0,6093 \cdot \sin(10)^\circ)^2] = 77003 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione verticale alla base del settore)}.$$

Con:

$$k_0 = 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093;$$

$$\varphi_1 = 23^\circ \text{ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);}$$

$$\sigma_{T,O,10} = \sigma_{T,V,10} \cdot k_0 = 77921 \cdot 0,6093 = 47475 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione orizzontale alla base del settore)}.$$

$$\sigma_{T,m,10} = (\sigma_{T,V,10,INT} + \sigma_{T,O,10})/2 = (77003 + 47475)/2 = 62239 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione media alla base del settore)}.$$

$$R_{TrBib,10} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,10} \cdot Z_{10} \cdot \tan(\varphi_{10}^*) + c_a \cdot c_{10}] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot [62239 \cdot \tan(15,41) + 0,5 \cdot 20000] = 2901 \text{ N/m}$$

(Resistenza di attrito/adeseione bulbo-terreno).

Con:

$$D_p = 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);}$$

$$E_{sp} L_{tr} = 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);}$$

$$K_a \cdot \gamma_{T,10} \cdot Z_{10} = \sigma_{T,m,10} = 62239 \text{ N/m}^2;$$

$$\varphi_{10}^* = \delta \cdot \varphi_{10} = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);}$$

$$\delta = 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);}$$

$$\varphi_{10} = 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$c_a = 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);}$$

$$c_{10} = 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{AccMlt,10} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1,4029038 = 516430 \text{ N/m (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).}$$

$$R_{MltForo,10} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot 1790684 = 191270 \text{ N/m (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).}$$

$$R_{Min,10} = \min(R_{TrBib,10}; R_{AccMlt,10}; R_{MltForo,10}) = \min(2901; 516430; 191270) = 2901 \text{ N/m (Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{Ed,10}^* = R_{Min,10} \cdot L_{10,b} = 2901 \cdot 0,5077 = 1473 \text{ N (Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza } \gamma_R \text{ e } \xi_{a4}).$$

SETTORE 11 (Verticali V₁₁-V₁₂)

$$A_{T1,11} = 0,0000 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 1).}$$

$$A_{T2,11} = (\Delta Z_{T2,11} + \Delta Z_{T2,12}) \cdot L_{11,x}/2 = (4,0169 + 4,1384) \cdot 0,50/2 = 2,0388 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 2).}$$

Con:

$$\Delta Z_{T2,11} = 4,0169 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 11);}$$

$$\Delta Z_{T2,12} = 4,1384 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 12).}$$

$$P_{T11} = P_{T1,11} + P_{T2,11} = A_{T1,11} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,11} \cdot \gamma_{T2} = 0 + 40777 = 40777 \text{ N/m (peso del terreno alla base del settore)}.$$

Con:

$$P_{T1,11} = A_{T1,11} \cdot \gamma_{T1} = 0,0000 \cdot 18000 = 0 \text{ N/m (peso del terreno 1 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T1} = 18000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 1);}$$

$$P_{T2,11} = A_{T2,11} \cdot \gamma_{T2} = 2,0388 \cdot 20000 = 40777 \text{ N/m (peso del terreno 2 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T2} = 20000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 2).}$$

$$\sigma_{T,V,11} = P_{T11}/L_{11,b} = 40777/0,5077 = 80314 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione verticale alla base del settore)}.$$

Con:

$$L_{11,b} = L_{11,x}/\cos(\alpha_T) = 0,50/\cos 10^\circ = 0,5077 \text{ m (larghezza alla base del settore);}$$

$$\alpha_T = 10^\circ \text{ (inclinazione del tirante);}$$

$$\sigma_{T,V,11,INT} = \sigma_{T,V,11} [\cos(\alpha_T)^2 + k_0 \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 80314 \cdot [\cos(10)^\circ)^2 + 0,6093 \cdot \sin(10)^\circ)^2] = 79368 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione verticale alla base del settore)}.$$

Con:

$$k_0 = 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093;$$

$$\varphi_1 = 23^\circ \text{ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);}$$

$$\sigma_{T,O,11} = \sigma_{T,V,11} \cdot k_0 = 80314 \cdot 0,6093 = 48933 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione orizzontale alla base del settore)}.$$

$$\sigma_{T,m,11} = (\sigma_{T,V,11,INT} + \sigma_{T,O,11})/2 = (79368 + 48933)/2 = 64150 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione media alla base del settore)}.$$

$$R_{TrBib,11} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,11} \cdot Z_{11} \cdot \tan(\varphi_{11}^*) + c_a \cdot c_{11}] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot [64150 \cdot \tan(15,41) + 0,5 \cdot 20000] = 2957 \text{ N/m}$$

(Resistenza di attrito/adeseione bulbo-terreno).

Con:

$$D_p = 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);}$$

$$E_{spL_{tr}} = 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);}$$

$$K_a \cdot \gamma_{T,11} \cdot Z_{11} = \sigma_{T,m,11} = 57203 \text{ N/m}^2;$$

$$\varphi_{11}^* = \delta \cdot \varphi_{11} = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);}$$

$$\delta = 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);}$$

$$\varphi_{11} = 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$c_a = 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);}$$

$$c_{11} = 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{AccMlt,11} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1,4029038 = \mathbf{516430 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).}$$

$$R_{MltForo,11} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{spL_{tr}}/100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot 1790684 = \mathbf{191270 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).}$$

$$R_{Min,11} = \min(R_{TrBib,11}; R_{AccMlt,11}; R_{MltForo,11}) = \min(2957; 516430; 191270) = \mathbf{2957 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{Ed,11}^* = R_{Min,11} \cdot L_{11,b} = 2957 \cdot 0,5077 = \mathbf{1501 \text{ N}} \text{ (Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza } \gamma_R \text{ e } \xi_{a4}).$$

SETTORE 12 (Verticali V₁₂-V₁₃)

$$A_{T1,12} = 0,0000 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 1).}$$

$$A_{T2,12} = (\Delta Z_{T2,12} + \Delta Z_{T2,13}) \cdot L_{12,x}/2 = (4,1384 + 4,2599) \cdot 0,50/2 = 2,0996 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 2).}$$

Con:

$$\Delta Z_{T2,12} = 4,1384 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 12);}$$

$$\Delta Z_{T2,13} = 4,2599 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 13).}$$

$$P_{T12} = P_{T1,12} + P_{T2,12} = A_{T1,12} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,12} \cdot \gamma_{T2} = 0 + 41992 = 41992 \text{ N/m (peso del terreno alla base del settore).}$$

Con:

$$P_{T1,12} = A_{T1,12} \cdot \gamma_{T1} = 0,0000 \cdot 18000 = 0 \text{ N/m (peso del terreno 1 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T1} = 18000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 1);}$$

$$P_{T2,12} = A_{T2,12} \cdot \gamma_{T2} = 2,0996 \cdot 20000 = 41992 \text{ N/m (peso del terreno 2 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T2} = 20000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 2).}$$

$$\sigma_{T,V,12} = P_{T12}/L_{12,b} = 41992/0,5077 = \mathbf{82707 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$L_{12,b} = L_{12,x}/\cos(\alpha_T) = 0,50/\cos(10^\circ) = 0,5077 \text{ m (larghezza alla base del settore);}$$

$$\alpha_T = 10^\circ \text{ (inclinazione del tirante);}$$

$$\sigma_{T,V,12,INT} = \sigma_{T,V,12} \cdot [\cos(\alpha_T)^2 + k_o \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 82707 \cdot [\cos(10^\circ)^2 + 0,6093 \cdot \sin(10^\circ)^2] = \mathbf{81733 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$k_o = 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093;$$

$$\varphi_1 = 23^\circ \text{ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);}$$

$$\sigma_{T,O,12} = \sigma_{T,V,12} \cdot k_o = 82707 \cdot 0,6093 = \mathbf{50391 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione orizzontale alla base del settore).}$$

$$\sigma_{T,m,12} = (\sigma_{T,V,12,INT} + \sigma_{T,O,12})/2 = (81733 + 50391)/2 = \mathbf{66062 \text{ N/m}^2} \text{ (pressione media alla base del settore).}$$

$$R_{TrBib,12} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{spL_{tr}}/100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,12} \cdot Z_{12} \cdot \tan(\varphi_{12}^*) + c_a \cdot c_{12}] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot [66062 \cdot \tan(15,41) + 0,5 \cdot 20000] = \mathbf{3013 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza di attrito/adesione bulbo-terreno).}$$

Con:

$$D_p = 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);}$$

$$E_{spL_{tr}} = 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);}$$

$$K_a \cdot \gamma_{T,12} \cdot Z_{12} = \sigma_{T,m,12} = 58907 \text{ N/m}^2;$$

$$\varphi_{12}^* = \delta \cdot \varphi_{12} = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);}$$

$$\delta = 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);}$$

$$\varphi_{12} = 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$c_a = 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);}$$

$$c_{12} = 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{AccMlt,12} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1,4029038 = \mathbf{516430 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).}$$

$$R_{MltForo,12} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{spL_{tr}}/100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot 1790684 = \mathbf{191270 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).}$$

$$R_{Min,12} = \min(R_{TrBib,12}; R_{AccMlt,12}; R_{MltForo,12}) = \min(3013; 516430; 191270) = \mathbf{3013 \text{ N/m}} \text{ (Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{Ed,12}^* = R_{Min,12} \cdot L_{12,b} = 3013 \cdot 0,5077 = \mathbf{1530 \text{ N}} \text{ (Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza } \gamma_R \text{ e } \xi_{a4}).$$

SETTORE 13 (Verticali V₁₃-V₁₄)

$$A_{T1,13} = 0,0000 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 1).}$$

$$A_{T2,13} = (\Delta Z_{T2,13} + \Delta Z_{T2,14}) \cdot L_{13,x} / 2 = (4,2599 + 4,3814) \cdot 0,50 / 2 = 2,1603 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 2).}$$

Con:

$$\Delta Z_{T2,13} = 4,2599 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 13);}$$

$$\Delta Z_{T2,14} = 4,3814 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 14).}$$

$$P_{T13} = P_{T1,13} + P_{T2,13} = A_{T1,13} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,13} \cdot \gamma_{T2} = 0 + 43207 = 43207 \text{ N/m (peso del terreno alla base del settore).}$$

Con:

$$P_{T1,13} = A_{T1,13} \cdot \gamma_{T1} = 0,0000 \cdot 18000 = 0 \text{ N/m (peso del terreno 1 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T1} = 18000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 1);}$$

$$P_{T2,13} = A_{T2,13} \cdot \gamma_{T2} = 2,1603 \cdot 20000 = 43207 \text{ N/m (peso del terreno 2 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T2} = 20000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 2).}$$

$$\sigma_{T,V,13} = P_{T13} / L_{13,b} = 43207 / 0,5077 = 85100 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$L_{13,b} = L_{13,x} / \cos(\alpha_T) = 0,50 / \cos 10^\circ = 0,5077 \text{ m (larghezza alla base del settore);}$$

$$\alpha_T = 10^\circ \text{ (inclinazione del tirante);}$$

$$\sigma_{T,V,13,INT} = \sigma_{T,V,13} \cdot [\cos(\alpha_T)^2 + k_o \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 85100 \cdot [\cos(10^\circ)^2 + 0,6093 \cdot \sin(10^\circ)^2] = 84098 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$k_o = 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093;$$

$$\varphi_1 = 23^\circ \text{ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);}$$

$$\sigma_{T,O,13} = \sigma_{T,V,13} \cdot k_o = 85100 \cdot 0,6093 = 51849 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione orizzontale alla base del settore).}$$

$$\sigma_{T,m,13} = (\sigma_{T,V,13,INT} + \sigma_{T,O,13}) / 2 = (84098 + 51849) / 2 = 67973 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione media alla base del settore).}$$

$$R_{Tribl,13} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr} / 100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,13} \cdot Z_{13} \cdot \tan(\varphi_{13}^*) + c_a \cdot c_{13}] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0 / 100) \cdot [67973 \cdot \tan(15,41^\circ) + 0,5 \cdot 20000] = 3069 \text{ N/m}$$

(Resistenza di attrito/adeseione bulbo-terreno).

Con:

$$D_p = 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);}$$

$$E_{sp} L_{tr} = 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);}$$

$$K_a \cdot \gamma_{T,13} \cdot Z_{13} = \sigma_{T,m,13} = 67973 \text{ N/m}^2;$$

$$\varphi_{13}^* = \delta \cdot \varphi_{13} = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);}$$

$$\delta = 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);}$$

$$\varphi_{13} = 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$c_a = 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);}$$

$$c_{13} = 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{AccMlt,13} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1,4029038 = 516430 \text{ N/m (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).}$$

$$R_{MltForo,13} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr} / 100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0 / 100) \cdot 1790684 = 191270 \text{ N/m (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).}$$

$$R_{Min,13} = \min(R_{Tribl,13}; R_{AccMlt,13}; R_{MltForo,13}) = \min(3069; 516430; 191270) = 3069 \text{ N/m (Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{Ed,13}^* = R_{Min,13} \cdot L_{13,b} = 3069 \cdot 0,5077 = 1558 \text{ N (Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza } \gamma_R \text{ e } \xi_{s4}).$$

SETTORE 14 (Verticali V₁₄-V₁₅)

$$A_{T1,14} = 0,0000 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 1).}$$

$$A_{T2,14} = (\Delta Z_{T2,14} + \Delta Z_{T2,15}) \cdot L_{14,x} / 2 = (4,3814 + 4,5029) \cdot 0,50 / 2 = 2,2211 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 2).}$$

Con:

$$\Delta Z_{T2,14} = 4,3814 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 14);}$$

$$\Delta Z_{T2,15} = 4,5029 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 15).}$$

$$P_{T14} = P_{T1,14} + P_{T2,14} = A_{T1,14} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,14} \cdot \gamma_{T2} = 0 + 44422 = 44422 \text{ N/m (peso del terreno alla base del settore).}$$

Con:

$$P_{T1,14} = A_{T1,14} \cdot \gamma_{T1} = 0,0000 \cdot 18000 = 0 \text{ N/m (peso del terreno 1 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T1} = 18000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 1);}$$

$$P_{T2,14} = A_{T2,14} \cdot \gamma_{T2} = 2,2211 \cdot 20000 = 44422 \text{ N/m (peso del terreno 2 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T2} = 20000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 2).}$$

$$\sigma_{T,V,14} = P_{T14} / L_{14,b} = 44422 / 0,5077 = 87493 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$L_{14,b} = L_{14,x} / \cos(\alpha_T) = 0,50 / \cos 10^\circ = 0,5077 \text{ m (larghezza alla base del settore);}$$

$$\alpha_T = 10^\circ \text{ (inclinazione del tirante);}$$

$$\sigma_{T,V,14,INT} = \sigma_{T,V,14} \cdot [\cos(\alpha_T)^2 + k_o \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 87493 \cdot [\cos(10^\circ)^2 + 0,6093 \cdot \sin(10^\circ)^2] = 86462 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$k_o = 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093;$$

$$\varphi_1 = 23^\circ \text{ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);}$$

$$\sigma_{T,O,14} = \sigma_{T,V,14} \cdot k_o = 87493 \cdot 0,6093 = 53307 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione orizzontale alla base del settore).}$$

$$\sigma_{T,m,14} = (\sigma_{T,V,14,INT} + \sigma_{T,O,14})/2 = (86462 + 53307)/2 = 69885 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione media alla base del settore).}$$

$$R_{TrBib,14} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,14} \cdot Z_{14} \cdot \tan(\varphi_{14}^*) + c_a \cdot c_{14}] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot [69885 \cdot \tan(15,41) + 0,5 \cdot 20000] = 3126 \text{ N/m}$$

(Resistenza di attrito/adeseione bulbo-terreno).

Con:

$$D_p = 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);}$$

$$E_{sp} L_{tr} = 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);}$$

$$K_a \cdot \gamma_{T,14} \cdot Z_{14} = \sigma_{T,m,14} = 62316 \text{ N/m}^2;$$

$$\varphi_{14}^* = \delta \cdot \varphi_{14} = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);}$$

$$\delta = 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);}$$

$$\varphi_{14} = 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$c_a = 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);}$$

$$c_{14} = 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{AccMlt,14} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1 \cdot 4029038 = 516430 \text{ N/m}$$

(Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).

$$R_{MltForo,14} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot 1790684 = 191270 \text{ N/m}$$

(Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).

$$R_{Min,14} = \min(R_{TrBib,14}; R_{AccMlt,14}; R_{MltForo,14}) = \min(3126; 516430; 191270) = 3126 \text{ N/m}$$

(Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).

$$R_{Ed,14}^* = R_{Min,14} \cdot L_{14,b} = 3126 \cdot 0,5077 = 1587 \text{ N}$$

(Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza γ_R e ξ_{a4}).

SETTORE 15 (Verticali V₁₅-V₁₆)

$$A_{T1,15} = 0,0000 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 1).}$$

$$A_{T2,15} = (\Delta Z_{T2,15} + \Delta Z_{T2,16}) \cdot L_{15,x}/2 = (4,5029 + 4,6244) \cdot 0,50/2 = 2,2818 \text{ m}^2 \text{ (area del terreno 2).}$$

Con:

$$\Delta Z_{T2,15} = 4,5029 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 15);}$$

$$\Delta Z_{T2,16} = 4,6244 \text{ m (altezza del terreno 2 sulla verticale 16).}$$

$$P_{T15} = P_{T1,15} + P_{T2,15} = A_{T1,15} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,15} \cdot \gamma_{T2} = 0 + 45637 = 45637 \text{ N/m (peso del terreno alla base del settore).}$$

Con:

$$P_{T1,15} = A_{T1,15} \cdot \gamma_{T1} = 0,0000 \cdot 18000 = 0 \text{ N/m (peso del terreno 1 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T1} = 18000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 1);}$$

$$P_{T2,15} = A_{T2,15} \cdot \gamma_{T2} = 2,2818 \cdot 20000 = 45637 \text{ N/m (peso del terreno 2 nel settore in esame);}$$

$$\gamma_{T2} = 20000 \text{ N/m}^3 \text{ (peso specifico del terreno 2).}$$

$$\sigma_{T,V,15} = P_{T15}/L_{15,b} = 45637/0,5077 = 89886 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$L_{15,b} = L_{15,x}/\cos(\alpha_T) = 0,50/\cos(10^\circ) = 0,5077 \text{ m (larghezza alla base del settore);}$$

$$\alpha_T = 10^\circ \text{ (inclinazione del tirante);}$$

$$\sigma_{T,V,15,INT} = \sigma_{T,V,15} \cdot [\cos(\alpha_T)^2 + k_o \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 89886 \cdot [\cos(10^\circ)^2 + 0,6093 \cdot \sin(10^\circ)^2] = 88827 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione verticale alla base del settore).}$$

Con:

$$k_o = 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093;$$

$$\varphi_1 = 23^\circ \text{ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);}$$

$$\sigma_{T,O,15} = \sigma_{T,V,15} \cdot k_o = 89886 \cdot 0,6093 = 54765 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione orizzontale alla base del settore).}$$

$$\sigma_{T,m,15} = (\sigma_{T,V,15} + \sigma_{T,O,15})/2 = (88827 + 54765)/2 = 71796 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione media alla base del settore).}$$

$$R_{TrBib,15} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,15} \cdot Z_{15} \cdot \tan(\varphi_{15}^*) + c_a \cdot c_{15}] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot [71796 \cdot \tan(15,41) + 0,5 \cdot 20000] = 3182 \text{ N/m}$$

(Resistenza di attrito/adeseione bulbo-terreno).

Con:

$$D_p = 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);}$$

$$E_{sp} L_{tr} = 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);}$$

$$K_a \cdot \gamma_{T,15} \cdot Z_{15} = \sigma_{T,m,15} = 71796 \text{ N/m}^2;$$

$$\varphi_{15}^* = \delta \cdot \varphi_{15} = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);}$$

$$\delta = 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);}$$

$$\varphi_{15} = 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$c_a = 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);}$$

$$c_{15} = 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{AccMlt,15} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1 \cdot 4029038 = 516430 \text{ N/m}$$

(Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).

$$R_{MltForo,15} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot 1790684 = 191270 \text{ N/m}$$

(Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).

$$R_{Min,15} = \min(R_{TrBib,15}; R_{AccMlt,15}; R_{MltForo,15}) = \min(3182; 516430; 191270) = 3182 \text{ N/m}$$

(Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).

$$R_{Ed,15}^* = R_{Min,15} \cdot L_{15,b} = 3182 \cdot 0,5077 = 1616 \text{ N}$$

(Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza γ_R e ξ_{a4}).

SETTORE 16 (Verticali V₁₆-V₁₇)

$A_{T1,16} = 0,0000 \text{ m}^2$ (area del terreno 1).

$A_{T2,16} = (\Delta Z_{T2,16} + \Delta Z_{T2,17}) \cdot L_{16,x} / 2 = (4,6244 + 4,7459) \cdot 0,50 / 2 = 2,3426 \text{ m}^2$ (area del terreno 2).

Con:

$\Delta Z_{T2,16} = 4,6244 \text{ m}$ (altezza del terreno 2 sulla verticale 16);

$\Delta Z_{T2,17} = 4,7459 \text{ m}$ (altezza del terreno 2 sulla verticale 17).

$P_{T16} = P_{T1,16} + P_{T2,16} = A_{T1,16} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,16} \cdot \gamma_{T2} = 0 + 46852 = 46852 \text{ N/m}$ (peso del terreno alla base del settore).

Con:

$P_{T1,16} = A_{T1,16} \cdot \gamma_{T1} = 0,0000 \cdot 18000 = 0 \text{ N/m}$ (peso del terreno 1 nel settore in esame);

$\gamma_{T1} = 18000 \text{ N/m}^3$ (peso specifico del terreno 1);

$P_{T2,16} = A_{T2,16} \cdot \gamma_{T2} = 2,3426 \cdot 20000 = 46852 \text{ N/m}$ (peso del terreno 2 nel settore in esame);

$\gamma_{T2} = 20000 \text{ N/m}^3$ (peso specifico del terreno 2).

$\sigma_{T,V,16} = P_{T16} / L_{16,b} = 46852 / 0,5077 = 92279 \text{ N/m}^2$ (pressione verticale alla base del settore).

Con:

$L_{16,b} = L_{16,x} / \cos(\alpha_T) = 0,50 / \cos 10^\circ = 0,5077 \text{ m}$ (larghezza alla base del settore);

$\alpha_T = 10^\circ$ (inclinazione del tirante);

$\sigma_{T,V,16,INT} = \sigma_{T,V,16} \cdot [\cos(\alpha_T)^2 + k_o \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 92279 \cdot [\cos(10^\circ)^2 + 0,6093 \cdot \sin(10^\circ)^2] = 91192 \text{ N/m}^2$ (pressione verticale alla base del settore).

Con:

$k_o = 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093$;

$\varphi_1 = 23^\circ$ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);

$\sigma_{T,O,16} = \sigma_{T,V,16} \cdot k_o = 92279 \cdot 0,6093 = 56223 \text{ N/m}^2$ (pressione orizzontale alla base del settore).

$\sigma_{T,m,16} = (\sigma_{T,V,16,INT} + \sigma_{T,O,16}) / 2 = (91192 + 56223) / 2 = 73708 \text{ N/m}^2$ (pressione media alla base del settore).

$R_{TnBib,16} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr} / 100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,16} \cdot Z_{16} \cdot \tan(\varphi_{16}^*) + c_a \cdot c_{16}] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0 / 100) \cdot [73708 \cdot \tan(15,41^\circ) + 0,5 \cdot 20000] = 3238 \text{ N/m}$
(Resistenza di attrito/adeseione bulbo-terreno).

Con:

$D_p = 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m}$ (diametro di perforazione);

$E_{sp} L_{tr} = 0$ (coefficiente di espansione laterale);

$K_a \cdot \gamma_{T,16} \cdot Z_{16} = \sigma_{T,m,16} = 73708 \text{ N/m}^2$;

$\varphi_{16}^* = \delta \cdot \varphi_{16} = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ$ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);

$\delta = 0,67$ (fattore di attrito terra-tirante);

$\varphi_{16} = 23^\circ$ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).

$c_a = 0,50$ (fattore di aderenza tirante-terreno);

$c_{16} = 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2$ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).

$R_{AccMlt,16} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1,4029038 = 516430 \text{ N/m}$ (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).

$R_{MltForo,16} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr} / 100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0 / 100) \cdot 1790684 = 191270 \text{ N/m}$ (Resistenza di aderenza tondino-malta; non è funzione del settore - vedi settore 1).

$R_{Min,16} = \min(R_{TnBib,16}; R_{AccMlt,16}; R_{MltForo,16}) = \min(3238; 516430; 191270) = 3238 \text{ N/m}$ (Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).

$R_{Ed,16}^* = R_{Min,16} \cdot L_{16,b} = 3238 \cdot 0,5077 = 1644 \text{ N}$ (Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza γ_R e ξ_{a4}).

SETTORE 17 (Verticali V₁₇-V₁₈)

$A_{T1,17} = 0,0000 \text{ m}^2$ (area del terreno 1).

$A_{T2,17} = (\Delta Z_{T2,17} + \Delta Z_{T2,18}) \cdot L_{17,x} / 2 = (4,7459 + 4,8650) \cdot 0,501 / 2 = 2,4075 \text{ m}^2$ (area del terreno 2).

Con:

$\Delta Z_{T2,17} = 4,7459 \text{ m}$ (altezza del terreno 2 sulla verticale 17);

$\Delta Z_{T2,18} = 4,8650 \text{ m}$ (altezza del terreno 2 sulla verticale 18).

$P_{T17} = P_{T1,17} + P_{T2,17} = A_{T1,17} \cdot \gamma_{T1} + A_{T2,17} \cdot \gamma_{T2} = 0 + 48067 = 48067 \text{ N/m}$ (peso del terreno alla base del settore).

Con:

$P_{T1,17} = A_{T1,17} \cdot \gamma_{T1} = 0,0000 \cdot 18000 = 0 \text{ N/m}$ (peso del terreno 1 nel settore in esame);

$\gamma_{T1} = 18000 \text{ N/m}^3$ (peso specifico del terreno 1);

$P_{T2,17} = A_{T2,17} \cdot \gamma_{T2} = 2,4075 \cdot 20000 = 48151 \text{ N/m}$ (peso del terreno 2 nel settore in esame);

$\gamma_{T2} = 20000 \text{ N/m}^3$ (peso specifico del terreno 2).

$\sigma_{T,V,17} = P_{T17} / L_{17,b} = 48151 / 0,5077 = 94649 \text{ N/m}^2$ (pressione verticale alla base del settore).

Con:

$L_{17,b} = L_{17,x} / \cos(\alpha_T) = 0,501 / \cos 10^\circ = 0,5087 \text{ m}$ (larghezza alla base del settore);

$\alpha_T = 10^\circ$ (inclinazione del tirante);

$\sigma_{T,V,17,INT} = \sigma_{T,V,17} \cdot [\cos(\alpha_T)^2 + k_o \cdot \sin(\alpha_T)^2] = 94649 \cdot [\cos(10^\circ)^2 + 0,6093 \cdot \sin(10^\circ)^2] = 93534 \text{ N/m}^2$ (pressione verticale alla base del settore).

Con:

$$k_0 = 1 - \sin(\varphi_1) = 0,6093;$$

$\varphi_1 = 23^\circ$ (angolo di attrito del terreno a contatto del tirante nel settore in esame);

$$\sigma_{T,O,17} = \sigma_{T,V,17} \cdot k_0 = 94649 \cdot 0,6093 = 57667 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione orizzontale alla base del settore).}$$

$$\sigma_{T,m,17} = (\sigma_{T,V,17,INT} + \sigma_{T,O,17})/2 = (93534 + 57667)/2 = 75600 \text{ N/m}^2 \text{ (pressione media alla base del settore).}$$

$$R_{TtrBib,17} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot [K_a \cdot \gamma_{T,17} \cdot Z_{17} \cdot \tan(\varphi_{17}^*) + c_a \cdot c_{17}] = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot [75600 \cdot \tan(15,41) + 0,5 \cdot 20000] = 3294 \text{ N/m}$$

(Resistenza di attrito/adesione bulbo-terreno).

Con:

$$D_p = 34 \text{ mm} = 0,034 \text{ m (diametro di perforazione);}$$

$$E_{sp} L_{tr} = 0 \text{ (coefficiente di espansione laterale);}$$

$$K_a \cdot \gamma_{T,17} \cdot Z_{17} = \sigma_{T,m,17} = 75600 \text{ N/m}^2;$$

$$\varphi_{17}^* = \delta \cdot \varphi_{17} = 0,67 \cdot 23^\circ = 15,41^\circ \text{ (angolo d'attrito terreno-tirante/bulbo nel settore in esame);}$$

$$\delta = 0,67 \text{ (fattore di attrito terra-tirante);}$$

$$\varphi_{17} = 23^\circ \text{ (angolo d'attrito del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$c_a = 0,50 \text{ (fattore di aderenza tirante-terreno);}$$

$$c_{17} = 0,02 \text{ N/mm}^2 = 20000 \text{ N/m}^2 \text{ (coesione efficace del terreno a contatto con il tirante nel settore in esame).}$$

$$R_{AccMlt,17} = \pi \cdot d_T \cdot g \cdot s \cdot f_{bd} = \pi \cdot 0,024 \cdot 1,7 \cdot 1,4029038 = 516430 \text{ N/m}$$

(Resistenza di aderenza tondino-malta; *non è funzione del settore - vedi settore 1*).

$$R_{MltForo,17} = \pi \cdot D_p \cdot (1 + E_{sp} L_{tr}/100) \cdot f_{ctk} = \pi \cdot 0,034 \cdot (1 + 0/100) \cdot 1790684 = 191270 \text{ N/m}$$

(Resistenza di aderenza tondino-malta; *non è funzione del settore - vedi settore 1*).

$$R_{Min,17} = \min(R_{TtrBib,17}; R_{AccMlt,17}; R_{MltForo,17}) = \min(3294; 516430; 191270) = 3294 \text{ N/m}$$

(Resistenza a metro lineare del tirante nel settore in esame).

$$R_{Ed,17}^* = R_{Min,17} \cdot L_{17,b} = 3294 \cdot 0,5077 = 1676 \text{ N}$$

(Resistenza del tirante nel settore in esame - a meno dei coefficienti di sicurezza γ_R e ξ_{a4}).

Nella successiva tabella (5) si riportano le grandezze utilizzate per il calcolo della resistenza del tirante ($R_{Ed,i}^*$) nei singoli settori.

Tab. 5: Calcolo resistenza tirante (R_{Rd}^*).

Settore	Terreno	A _{Tk,i} [m ²]	P _{Tk,i} [N]	P _{Ti} [N]	σ _{T,V,i} [N/m ²]	σ _{T,V,INT,i} [N/m ²]	Φ _i [°]	σ _{T,θ,i} [N/m ²]	σ _{T,m} [N/m ²]	c' _i [N/mm ²]	R _{TrrBib,i} [N/m]	R _{AccMit,i} [N/m]	R _{MitForo,i} [N/m]	R _{Min,i} [N/m]	L _{i,b} [m]	R* _{Rd,i} = R _{Min,i} ·L _{i,b} [N]
S ₁	1	1,0425	18.765	27.340	53.850	53.216	-	32.809	43.012	-	2.334	516.430	191.270	2.334	0,5077	1.185
	2	0,4288	8.575				23			0,02						
S ₂	1	0,8641	15.554	28.912	56.946	56.275	-	34.695	45.485	-	2.407	516.430	191.270	2.407	0,5077	1.222
	2	0,6679	13.359				23			0,02						
S ₃	1	0,6587	12.342	30.484	60.042	59.335	-	36.582	47.958	-	2.480	516.430	191.270	2.480	0,5077	1.259
	2	0,9071	18.142				23			0,02						
S ₄	1	0,5072	9.130	32.056	63.138	62.394	-	38.468	50.431	-	2.553	516.430	191.270	2.553	0,5077	1.296
	2	1,1463	22.926				23			0,02						
S ₅	1	0,3288	5.918	33.628	66.234	65.454	-	40.354	52.904	-	2.626	516.430	191.270	2.626	0,5077	1.333
	2	1,3855	27.710				23			0,02						
S ₆	1	0,1504	2.707	35.200	69.330	68.513	-	42.241	55.377	-	2.699	516.430	191.270	2.699	0,5077	1.370
	2	1,6247	32.493				23			0,02						
S ₇	1	0,0105	189	12.428	71.408	70.567	-	43.507	57.037	-	2.747	516.430	191.270	2.747	0,1714	478
	2	0,6120	12.240				23			0,02						
S ₈	1	0,0000	0	37.132	73.135	72.273	-	44.559	58.416	-	2.788	516.430	191.270	2.788	0,5077	1.416
	2	1,8566	37.132				23			0,02						
S ₉	1	0,0000	0	38.347	75.528	74.634	-	46.017	60.327	-	2.844	516.430	191.270	2.844	0,5077	1.444
	2	1,9173	38.347				23			0,02						
S ₁₀	1	0,0000	0	39.562	77.921	77.003	-	47.475	62.239	-	2.901	516.430	191.270	2.901	0,5077	1.473
	2	1,9781	39.562				23			0,02						
S ₁₁	1	0,0000	0	40.777	80.314	79.368	-	48.993	64.150	-	2.957	516.430	191.270	2.957	0,5077	1.501
	2	2,0388	40.777				23			0,02						
S ₁₂	1	0,0000	0	41.992	82.707	81.733	-	50.391	66.062	-	3.013	516.430	191.270	3.013	0,5077	1.530
	2	2,0996	41.992				23			0,02						
S ₁₃	1	0,0000	0	43.207	85.100	84.098	-	51.849	67.973	-	3.069	516.430	191.270	3.069	0,5077	1.558
	2	2,1603	43.207				23			0,02						
S ₁₄	1	0,0000	0	44.422	87.493	86.462	-	53.307	69.885	-	3.126	516.430	191.270	3.126	0,5077	1.587
	2	2,2211	44.422				23			0,02						
S ₁₅	1	0,0000	0	45.637	89.886	88.827	-	54.765	71.796	-	3.182	516.430	191.270	3.182	0,5077	1.616
	2	2,2818	45.637				23			0,02						
S ₁₆	1	0,0000	0	46.852	92.279	91.192	-	56.223	73.708	-	3.238	516.430	191.270	3.238	0,5077	1.644
	2	2,3426	46.852				23			0,02						
S ₁₇	1	0,0000	0	48.151	94.649	93.534	-	57.667	75.600	-	3.294	516.430	191.270	3.294	0,5087	1.676
	2	2,4075	48.151				23			0,02						
TOTALE															8,2985	23.588

LEGENDA

$A_{Tk,i}$ [m ²]	Area, nel i-esimo settore, del k-esimo terreno.
$P_{Tk,i}$ [N]	Peso, nel i-esimo settore, del k-esimo terreno.
P_{Ti} [N]	Peso totale del terreno nel i-esimo settore (i = 1, ..., 17).
$\sigma_{T,V,i}$ [N/m ²]	Pressione verticale alla base del i-esimo settore (i = 1, ..., 17).
$\sigma_{T,V,INT,i}$ [N/m ²]	Pressione verticale "interpolata" alla base del i-esimo settore (i = 1, ..., 17).
ϕ_i [°]	Angolo di attrito del terreno a contatto con il tirante.
$\sigma_{T,O,i}$ [N/m ²]	Pressione orizzontale alla base del i-esimo settore (i = 1, ..., 17).
$\sigma_{T,m,i}$ [N/m ²]	Pressione media alla base del i-esimo settore (i = 1, ..., 17).
c'_i [N/mm ²]	Coesione efficace del terreno a contatto con il tirante.
$R_{TrrBib,i}$ [N/m]	Resistenza (a metro lineare) di attrito/adesione bulbo-terreno del tirante, nel i-esimo settore (i = 1, ..., 17).
$R_{AccMit,i}$ [N/m]	Resistenza (a metro lineare) di aderenza tondino-malta del tirante, nel i-esimo settore (i = 1, ..., 17).
$R_{MitForo,i}$ [N/m]	Resistenza (a metro lineare) di aderenza malta-foro, nel i-esimo settore (i = 1, ..., 17).
$R_{Min,i}$ [N/m]	Resistenza minima (a metro lineare) del tirante, nel i-esimo settore (i = 1, ..., 17).
$L_{i,b}$ [N/m]	Larghezza alla base del i-esimo settore/striscia (i = 1, ..., 17); dato da $L_{i,x}/\cos(\alpha_T)$, con α_T = inclinazione del tirante.
$R_{Rd,i}^*$ [N]	= $R_{Min,i} \cdot L_{i,b}$. Resistenza minima del tirante, nel i-esimo settore (i = 1, ..., 17).

Quindi, dalla tabella 5 otteniamo:

$$L_a = \sum_i L_{i,b} = \mathbf{8,2985\ m} \rightarrow \text{lunghezza di ancoraggio};$$

$$R_{Rd}^* = \sum_i R_{Rd,i}^* = \mathbf{23\ 588\ N} \rightarrow \text{resistenza complessiva del tirante (a meno dei coefficienti di sicurezza)}.$$

Da cui:

- **Lunghezza complessiva tirante (L_t)**

La lunghezza TOTALE del tirante è pari a:

$$L_t = L_f + L_a = 4,7714 + 8,2985 = \mathbf{13,0699\ m}.$$

$$L_f = 4,7714 \text{ (lunghezza franco)}$$

$$L_a = 8,2985 \text{ m (lunghezza di ancoraggio)}$$

- **Resistenza Tirante (R_{Rd})**

Il valore della resistenza (R_{Rd}^*) precedentemente determinato va diviso per:

- 1) i coefficienti di sicurezza parziali γ_R (NTC 2018 - Tab. 6.6.I - Permanenti). Nel caso in esame 1,2.
- 2) il coefficiente di riduzione funzione del numero di indagini eseguite ξ_3 (NTC 2018 - Tab. 6.6.III - ξ_{a4}). Nel caso in esame essendo il numero di indagini pari 1 $\rightarrow \xi_{a4} = 1,80$.

Quindi:

$$R_{Rd} = R_{Rd}^* / (\gamma_R \cdot \xi_{a4}) = 23588 / (1,2 \cdot 1,8) = \mathbf{10\ 920\ N}.$$

Confronto

Di seguito, si riporta il confronto tra il calcolo manuale e quello di GeoMurus:

Geometria

Lunghezza di Franco:

$$L_f = \mathbf{4,7714\ m}.$$

Lunghezza di ancoraggio:

$$L_a = \mathbf{8,2985\ m}.$$

Verifica strutturali allo SLU

$$T_{\max,SLU,1m} = \mathbf{SfMax_{SLU} = 10\ 920\ N}.$$

$$R_{Ed} = \mathbf{SfRes_{SLU} = 10\ 920\ N}.$$

$$CS = \mathbf{CS_{SLU} = R_{Ed} / T_{\max,SLU} = 10920 / 10920 = 1,00}.$$

Proprietà	
Fila di Tiranti	
Proprietà	Risultati
Filtro per entità	Fila di Tiranti(1)
Geometria	
Altezza [m]	4.50
Lung. di Franco [m]	4.77
Lung. di Anc. [m]	8.29
Diam. Tond./Tref. [mm]	24.0
Num. Tond./Tref.	1
Diam. Perf. [mm]	34
Inclinazione [gradi]	-10.00
Allineamento	Centrati
Interasse [m]	1.00
Franco lat. [m]	0.00
Piastra	
Tipo	Rettangolare
Spessore [cm]	5.00
Larghezza [cm]	32.00
Altezza [cm]	32.00

Fila di Tiranti n.1	
Verifica n.1	
Verifica allo Scorrimento	
CS _{SLU}	-
SfMax _{SLU}	-
SfRes _{SLU}	-
Verifica al Ribaltamento	
CS _{SLU}	-
SfMax _{SLU}	-
SfRes _{SLU}	-
Verifica strutturali allo SLU	
CS _{SLU}	1,01
SfMax _{SLU}	10.920
SfRes _{SLU}	11.008
Verifica strutturali allo SLE (Rare)	
CS _{SLE}	-
SfMax _{SLE}	-
SfRes _{SLE}	-
Verifica strutturali allo SLE Frequenti)	
CS _{SLE}	-
SfMax _{SLE}	-
SfRes _{SLE}	-
Verifica strutturali allo SLE (Permanenti)	
CS _{SLE}	-
SfMax _{SLE}	-
SfRes _{SLE}	-

Risultati Manuali

Risultati GeoMurus

8 TEST DI VALIDAZIONE N.8 (Verifica di Stabilità)

Cenni teorici

Per la verifica di stabilità globale viene assimilato tutto il complesso muro-terreno ad un pendio.

Esso deve essere al sicuro da fenomeni d'instabilità che in genere si sviluppano su superfici di scorrimento assimilabili a circonferenze. Vengono ipotizzate varie superfici di scorrimento in modo da interessare tutta la parte di terreno potenzialmente soggetta ad instabilità. Vengono escluse le superfici che intercettano il muro, i pali e i tiranti. Per ognuna di esse vengono calcolate le forze motrici (F_{Sol}) e le forze resistenti (F_{Res}).

Il calcolo viene effettuato secondo le teorie di **Fellenius** o di **Bishop**, suddividendo il complesso terreno-muro, incluso nel cerchio in esame, in settori/strisce verticali sufficientemente piccoli, e calcolando le forze resistenti per attrito e coesione alla base, che si oppongono alla forza di scorrimento del settore.

Il coefficiente di sicurezza in condizioni statiche (NON sismiche) è dato dal rapporto fra le forze resistenti e quelle motrici. Tale valore è stato calcolato per tutte le combinazioni di carico previste dall'approccio 1 Combinazione 2 (A2+M2+R2), tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I e 6.2.II per le azioni e i parametri geotecnici e nella Tab. 6.8.I per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e fronti di scavo. Nelle verifiche di sicurezza per effetto delle azioni sismiche, invece, si controlla che la resistenza del sistema sia maggiore delle azioni (condizione [6.2.1]), ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici (§ 7.11.1) e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a $\gamma_R = 1,20$.

L'azione sismica viene valutata come previsto al § 7.11.3.5.2 delle NTC18.

Esempio

File: **T8 - Val_Stabilità_Pendio.GMS**

Descrizione dell'opera

Il muro in esame presenta le seguenti caratteristiche:

- a Mensola;
- Lunghezza = 10 m;
- Materiale "Cls C25/30-B450C".

Paramento (fig. 1)

- verticale ($\beta = 0$);
- altezza (H_p) = 6,50 m;
- spessore (S_p) = 0,60 m.

Fondazione (fig. 1)

- larghezza complessiva (B) = 4,00 m;
- larghezza a Valle (B_v) = 2,40 m;
- larghezza a Monte (B_m) = 1,00 m;
- altezza (S_f) = 0,60 m.

Carichi "Aggiunti"

Sulla mezzeria della mensola di fondazione di valle viene applicata una forza concentrata verticale (F_z) pari a 35000 N e come condizione di carico *Permanente* (fig. 2).

Terreno

Il terreno considerato [T1-Sabbia compatta (asciutta)] presenta le seguenti caratteristiche (fig. 3):

- peso per unità di volume (γ_t) pari a 18 000 N/m³;
- angolo di attrito (ϕ) pari a 37°;
- coesione drenata (c') e non drenata (c_u) pari a 0 N/mm²;
- indagato 15 m a monte, 10 m a valle e 10 m in profondità;
- profilo a monte inclinato di 30° ($\varepsilon = 30^\circ$) con un'altezza iniziale pari a quella del paramento (fig. 4).
- profilo a valle orizzontale, 20 cm più in alto rispetto all'estradosso della fondazione (fig. 4).

NON viene considerata la presenza della falda e si è considerato un angolo di attrito terreno-muro (δ) pari a 24,67° ($2 \cdot \phi / 3$).

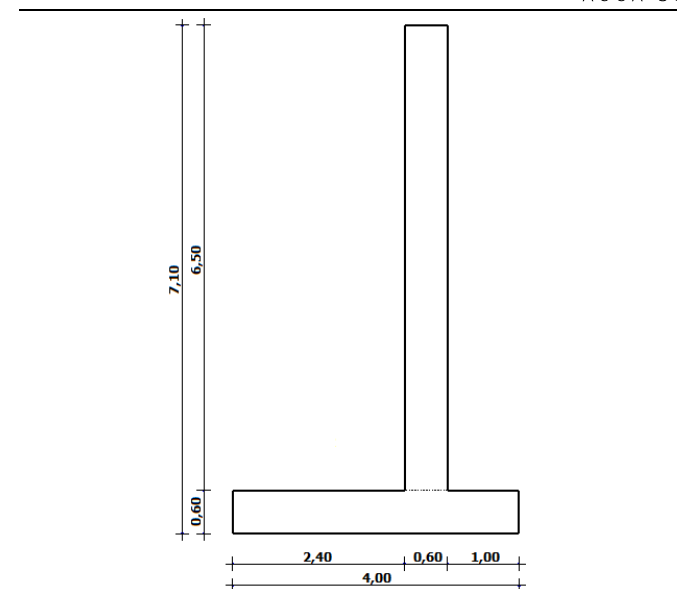


fig. 1: geometria Muro

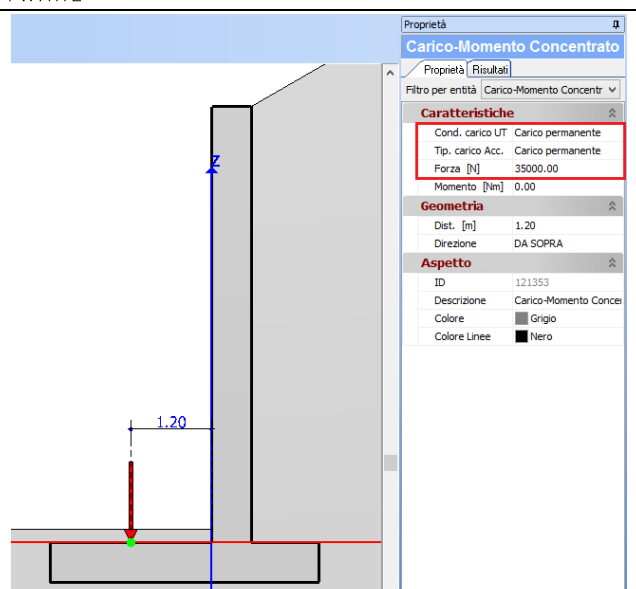


fig. 2: vista - Forze e momenti (utente)

Caratteristiche Grafica

Caratteristiche Terreno

Descrizione: T1-Sabbia compatta (asciutta)

Caratterizzazione Geotecnica per Micropali: Sabbia media

Peso unità di volume	[N/m³]	18'000
Peso specifico saturo	[N/m³]	22'000
Costante di sottofondo in direzione X	[N/cm²]	30
Costante di sottofondo in direzione Y	[N/cm²]	30
Costante di sottofondo in direzione Z	[N/cm²]	90
Angolo di attrito del terreno	[gradi sessadecimali]	37
Coesione non drenata	[N/mm²]	0.000
Coesione Efficace	[N/mm²]	0.000
Modulo edometrico	[N/mm²]	80

fig. 3: caratteristiche Terreno

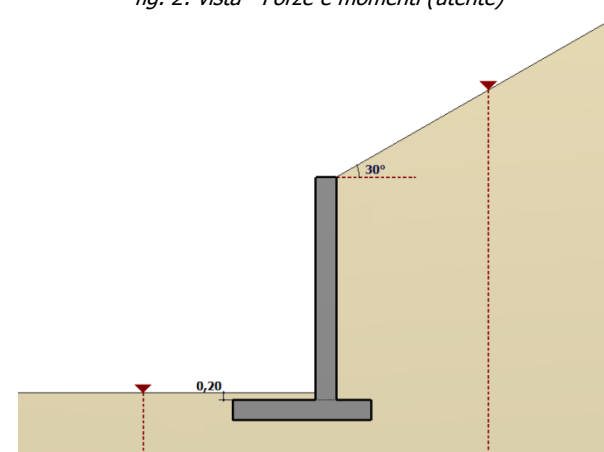


fig. 4: profilo Terreno

Dati Calcolo

Viene eseguito un calcolo **SENZA** sisma (Tipo analisi sismica -> Nessuna).

La verifica deve essere effettuata secondo la Combinazione 2 (A2+M2+R2) dell'Approccio 1 (§ 6.4.3.1 NTC18), per cui avendo solo la condizioni di carico "Permanente", con riferimento alla colonna "A2" della Tab. 6.2.I, si generano le seguenti combinazioni:

COMB	Effetto	G_1
01	Favorevole	1,0
02	Sfavorevole	1,0

Nel caso in esame le due combinazioni sono identiche.

Ipotesi calcolo Manuale

Per il file in esame andremo a verificare i risultati della teoria di **Fellenius**, teoria più semplice rispetto a quella di Bishop.

Pertanto, nella vista "Verifica a Stabilità" si considerano 4 ipotetiche superfici di scorrimento (maglia 2x2, Passo 1 m e Num. Raggi 1) e di queste andremo ad esaminare quella con centro nel punto (-3,00 m; 12,00 m) e raggio pari a 13,4134 m (fig. 5) che in GeoMurus fornisce il minimo coefficiente di sicurezza (**0,94**).

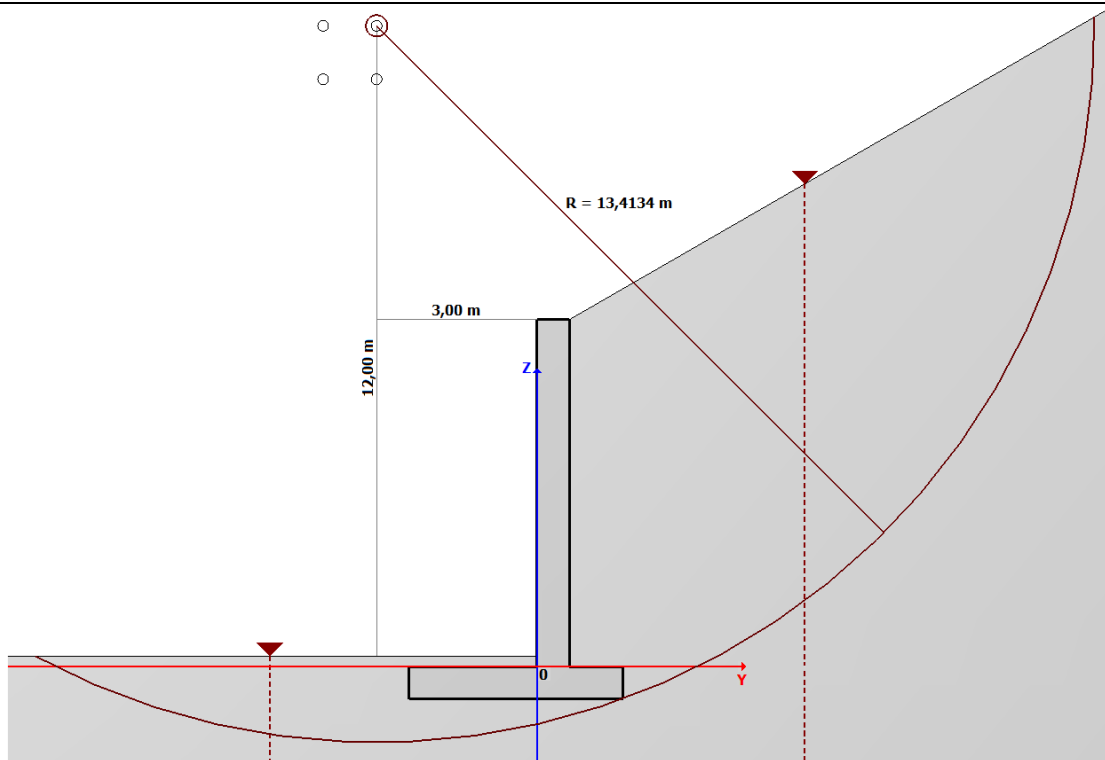


fig. 5: individuazione superficie di scorrimento

N.B. 1

L'origine degli assi è sul punto inferiore a valle del paramento, sull'estradosso della fondazione (fig. 5).

La superficie di scorrimento in esame viene suddivisa in **21** strisce (settori) distribuite come riportato in fig. 6:

- 10 a valle del paramento (1,..., 10);
- 10 a monte del paramento (12,..., 21);
- 1 sotto il paramento (11).

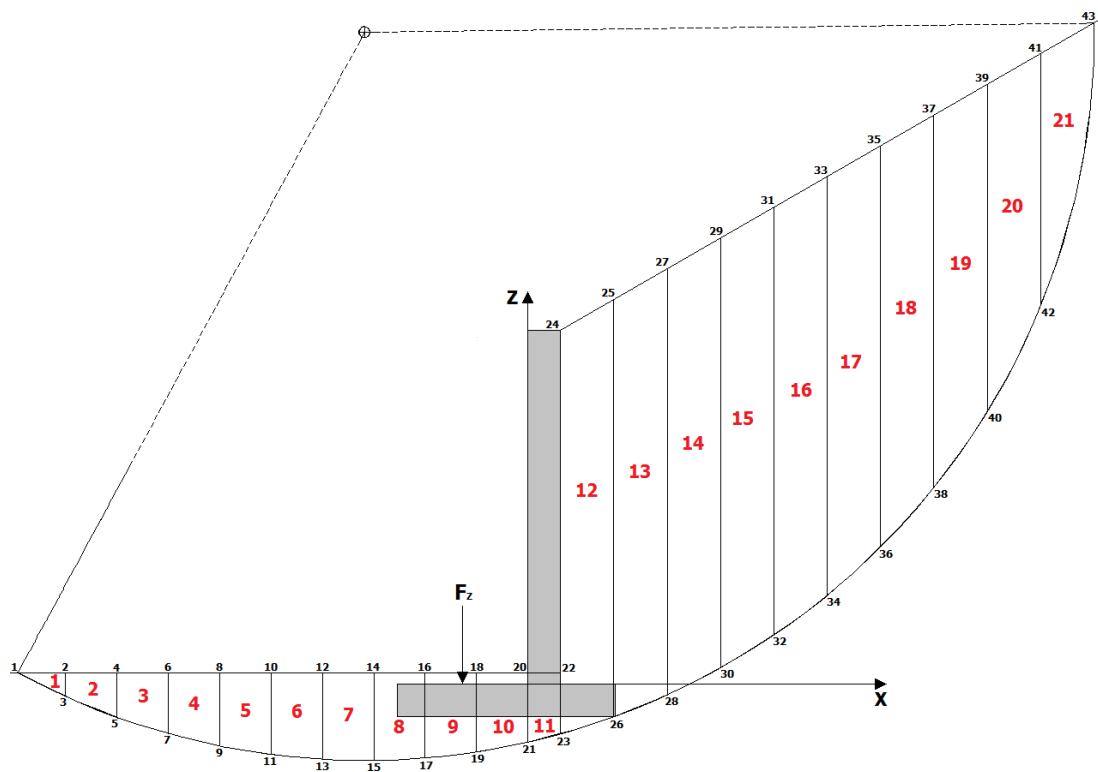


fig. 6: individuazione strisce

N.B. 2

In GeoMurus il volume di terreno individuato dalla superficie di scorrimento viene suddiviso in **39** strisce.

Una volta individuate le strisce si procede nelle seguenti fasi:

1. calcolo pesi (muro, terreno e azioni esterne);
2. calcolo angolo con l'orizzontale dell'ipotetico tratto di scorrimento della striscia;
3. calcolo Forza Motrice/Sollecitante dovute alle azioni in gioco;
4. calcolo Forza Resistente dovuta alle azioni in gioco.

Prima di procedere ad esporre le precedenti fasi riportiamo:

- le coordinate dei punti che delimitano le varie strisce.

Punti	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$X_i [m]$	-9,3781	-8,4403	-8,4403	-7,5025	-7,5025	-6,5647	-6,5647	-5,6269	-5,6269	-4,6890
$Z_i [m]$	0,2000	0,2000	-0,2606	0,2000	-0,6352	0,2000	-0,9311	0,2000	-1,1537	0,2000

Punti	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$X_i [m]$	-4,6890	-3,7512	-3,7512	-2,8134	-2,8134	-1,8756	-1,8756	-0,9378	-0,9378	0,0000
$Z_i [m]$	-1,3067	0,2000	-1,3924	0,2000	-1,4121	0,2000	-1,3662	0,2000	-1,2540	0,2000

Punti	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$X_i [m]$	0,0000	0,6000	0,6000	0,6000	1,5812	1,5812	2,5625	2,5625	3,5437	3,5437
$Z_i [m]$	-1,0736	0,2000	-0,9292	6,5000	7,0665	-0,6068	7,6330	-0,2057	8,1996	0,2910

Punti	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$X_i [m]$	4,5250	4,5250	5,5062	5,5062	6,4874	6,4874	7,4687	7,4687	8,4499	8,4499
$Z_i [m]$	8,7661	0,8962	9,3326	1,6287	9,8991	2,5180	10,4656	3,6139	11,0322	5,0129

Punti	41	42	43
$X_i [m]$	9,4312	9,4312	10,4124
$Z_i [m]$	11,5987	6,9615	12,1652

- l'individuazione delle strisce (poligonali per 3 o 4 punti) con i relativi punti.

Striscia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Punti	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	25
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	25	27
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	26	28
	-	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	26

Striscia	14	15	16	17	18	19	20	21
Punti	27	29	31	33	35	37	39	41
	29	31	33	35	37	39	41	43
	30	32	34	36	38	40	42	42
	28	30	32	34	36	38	40	-

Calcolo Pesi

I pesi in gioco all'interno del "volume" di scorrimento sono rappresentati:

- dal Terreno (peso delle singole strisce);
- dal Muro (solo paramento);
- dalle Azioni Esterne.

- Peso Terreno/Strisce -

Per conoscere questo occorre calcolare il peso delle singole strisce (poligonali per 3 o 4 punti) con cui è stato suddiviso il terreno.

Ciò viene riportato nella successiva tabella:

Striscia	h_1 [m]	h_2 [m]	b [m]	γ_T [N/m ³]	P_{π} [N]
1*)	$ Z_3 +Z_2 =$ $ -0,2606 +0,2000 = 0,4606$	-	$ X_1 - X_2 =$ $ -9,3781 - -8,4403 = 0,9378$	18000	$h_1 \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 3887,56$
2*)	$ Z_3 +Z_2 =$ $ -0,2606 +0,2000 = 0,4606$	$ Z_5 +Z_4 =$ $ -0,6352 +0,2000 = 0,8352$	$ X_2 - X_4 =$ $ -8,4403 - -7,5025 = 0,9378$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 10936,81$
3*)	$ Z_5 +Z_4 =$ $ -0,6352 +0,2000 = 0,8352$	$ Z_7 +Z_6 =$ $ -0,9311 +0,2000 = 1,1311$	$ X_4 - X_6 =$ $ -7,5025 - -6,5647 = 0,9378$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 16595,97$
4*)	$ Z_7 +Z_6 =$ $ -0,9311 +0,2000 = 1,1311$	$ Z_9 +Z_8 =$ $ -1,1537 +0,2000 = 1,3537$	$ X_6 - X_8 =$ $ -6,5647 - -5,6269 = 0,9378$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 20972,21$
5*)	$ Z_9 +Z_8 =$ $ -1,1537 +0,2000 = 1,3537$	$ Z_{11} +Z_{10} =$ $ -1,3067 +0,2000 = 1,5067$	$ X_8 - X_{10} =$ $ -5,6269 - -4,6890 = 0,9379$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 24144,92$
6*)	$ Z_{11} +Z_{10} =$ $ -1,3067 +0,2000 = 1,5067$	$ Z_{13} +Z_{12} =$ $ -1,3924 +0,2000 = 1,5924$	$ X_{10} + X_{12} =$ $ -4,6890 - -3,7512 = 0,9378$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 26157,02$
7*)	$ Z_{13} +Z_{12} =$ $ -1,3924 +0,2000 = 1,5924$	$ Z_{15} +Z_{14} =$ $ -1,4121 +0,2000 = 1,6121$	$ X_{12} + X_{14} =$ $ -3,7512 - -2,8134 = 0,9378$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 27046,62$
8*)	$ Z_{15} +Z_{14} =$ $ -1,4121 +0,2000 = 1,6121$	$ Z_{17} +Z_{16} =$ $ -1,3662 +0,2000 = 1,5662$	$ X_{14} + X_{16} =$ $ -2,8134 - -1,8756 = 0,9378$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 26825,49$
9 ¹⁾	$ Z_{17} +Z_{16} =$ $ -1,3662 +0,2000 = 1,5662$	$ Z_{19} +Z_{18} =$ $ -1,2540 +0,2000 = 1,4540$	$ X_{16} + X_{18} =$ $ -1,8756 - -0,9378 = 0,9378$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 25491,09$
10*)	$ Z_{19} +Z_{18} =$ $ -1,2540 +0,2000 = 1,4540$	$ Z_{21} +Z_{20} =$ $ -1,0736 +0,2000 = 1,2736$	$ X_{18} + X_{20} =$ $ -0,9378 - 0,0000 = 0,9378$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 23021,49$
11 ^{II)}	$ Z_{21} +Z_{20} =$ $ -1,0736 +0,2000 = 1,2736$	$ Z_{23} +Z_{22} =$ $ -0,9292 +0,2000 = 1,1292$	$X_{22}-X_{20} =$ $0,6000-0,0000 = 0,6000$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 12975,12$
12 ^{**)}	$ Z_{23} +Z_{24} =$ $ -0,9292 +6,5000 = 7,4292$	$ Z_{26} +Z_{25} =$ $ -0,6068 +7,0665 = 7,6733$	$X_{25}-X_{24} =$ $1,5812-0,6000 = 0,9812$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 133367,16$
13 ^{**)}	$ Z_{26} +Z_{25} =$ $ -0,6068 +7,0665 = 7,6733$	$ Z_{28} +Z_{27} =$ $ -0,2057 +7,6330 = 7,8387$	$X_{27}-X_{25} =$ $2,5625-1,5812 = 0,9813$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 136997,33$
14 ^{**)}	$ Z_{28} +Z_{27} =$ $ -0,2057 +7,6330 = 7,8387$	$Z_{29}-Z_{30} =$ $8,1996-0,2910 = 7,9086$	$X_{29}-X_{27} =$ $3,5437-2,5625 = 0,9812$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 139061,26$
15 ^{**)}	$Z_{29}-Z_{30} =$ $8,1996-0,2910 = 7,9086$	$Z_{31}-Z_{32} =$ $8,7661-0,8962 = 7,8699$	$X_{31}-X_{29} =$ $4,5250-3,5437 = 0,9813$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 139350,98$
16 ^{**)}	$Z_{31}-Z_{32} =$ $8,7661-0,8962 = 7,8699$	$Z_{33}-Z_{34} =$ $9,3326-1,6287 = 7,7039$	$X_{33}-X_{31} =$ $5,5062-4,5250 = 0,9812$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 137529,11$
17 ^{**)}	$Z_{33}-Z_{34} =$ $9,3326-1,6287 = 7,7039$	$Z_{35}-Z_{36} =$ $9,8991-2,5180 = 7,3811$	$X_{35}-X_{33} =$ $6,4874-5,5062 = 0,9812$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 133212,62$
18 ^{**)}	$Z_{35}-Z_{36} =$ $9,8991-2,5180 = 7,3811$	$Z_{37}-Z_{38} =$ $10,4656-3,6139 = 6,8517$	$X_{37}-X_{35} =$ $7,4687-6,4874 = 0,9813$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 125699,82$
19 ^{**)}	$Z_{37}-Z_{38} =$ $10,4656-3,6139 = 6,8517$	$Z_{39}-Z_{40} =$ $11,0322-5,0129 = 6,0193$	$X_{39}-X_{37} =$ $8,4499-7,4687 = 0,9812$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 113661,23$
20 ^{**)}	$Z_{39}-Z_{40} =$ $11,0322-5,0129 = 6,0193$	$Z_{41}-Z_{42} =$ $11,5987-6,9615 = 4,6372$	$X_{41}-X_{39} =$ $9,4312-8,4499 = 0,9813$		$(h_1+h_2) \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 94115,01$
21 ^{**)}	$Z_{41}-Z_{42} =$ $11,5987-6,9615 = 4,6372$	-	$X_{43}-X_{41} =$ $10,4124-9,4312 = 0,9812$		$h_1 \cdot b \cdot 1 \cdot \gamma_T / 2 =$ $= 40950,19$

P_{T,Tot} 1 411 999

dove:

h_1 = per le strisce a 4 punti, altezza di destra della striscia;
 h_2 = per le strisce a 4 punti, altezza di sinistra della striscia;

B = larghezza della striscia;

γ_T = peso specifico del terreno;

*) strisce a valle;

**) strisce a monte;

¹⁾ striscia sotto la forza;

^{II)} striscia sotto al paramento.

- Peso Muro -

Il peso del paramento, per una striscia di profondità 1 m, è dato da:

$$P_p = H_p \cdot S_p \cdot 1m \cdot \gamma_{Clis} = 6,50 \text{ m} \cdot 0,60 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot 25000 \text{ N/m}^3 = \mathbf{97\ 500\ N.}$$

dove:

H_p = 6,50 m (altezza del paramento);

S_p = 0,60 m (spessore del paramento);

γ_{Clis} = 25000 N/m³ (peso specifico del Cls).

L'azione (peso) del muro è calcolata considerando la sola presenza del paramento; cioè si considera il volume occupato dalla fondazione come se fosse comunque occupato dal terreno.

- Peso Azioni Esterne -

Questo è rappresentato dalla forza concentrata (35 000 N - CC "Permanente") applicata sulla mensola di valle della fondazione.

Calcolo angolo superficie di scorrimento Strisce

Procediamo ora a calcolare l'angolo con l'orizzontale dell'ipotetico tratto di scorrimento delle singole strisce.

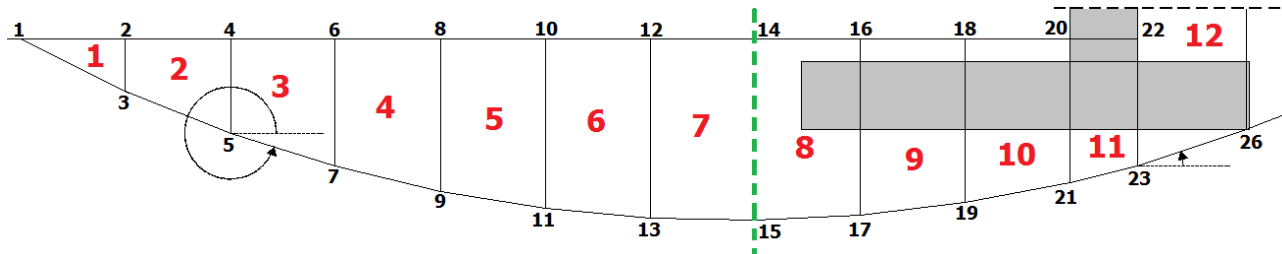


fig. 7: individuazione angolo delle ipotetiche superfici di scorrimento delle strisce

Striscia	h [m]	b [m]	α_i [°]
1*)	$ Z_3 + Z_2 =$ $ -0,2606 + 0,2000 = 0,4606$	$ X_1 - X_2 =$ $ -9,3781 - -8,4403 = 0,9378$	$\arctg(h/b) = 26,16$ $360 - 26,16 = 333,84$
2*)	$ Z_5 - Z_3 =$ $ -0,6352 - -0,2606 = 0,3746$	$ X_2 - X_4 =$ $ -8,4403 - -7,5025 = 0,9378$	$\arctg(h/b) = 21,77$ $360 - 21,77 = 338,23$
3*)	$ Z_7 - Z_5 =$ $ -0,9311 - -0,6352 = 0,2959$	$ X_4 - X_6 =$ $ -7,5025 - -6,5647 = 0,9378$	$\arctg(h/b) = 17,51$ $360 - 17,51 = 342,49$
4*)	$ Z_9 - Z_7 =$ $ -1,1537 - -0,9311 = 0,2226$	$ X_6 - X_8 =$ $ -6,5647 - -5,6269 = 0,9378$	$\arctg(h/b) = 13,35$ $360 - 13,35 = 346,65$
5*)	$ Z_{11} - Z_9 =$ $ -1,3067 - -1,1537 = 0,1530$	$ X_8 - X_{10} =$ $ -5,6269 - -4,6890 = 0,9379$	$\arctg(h/b) = 9,27$ $360 - 9,27 = 350,73$
6*)	$ Z_{13} - Z_{11} =$ $ -1,3924 - -1,3067 = 0,0857$	$ X_{10} - X_{12} =$ $ -4,6890 - -3,7512 = 0,9378$	$\arctg(h/b) = 5,22$ $360 - 5,22 = 354,78$
7*)	$ Z_{15} - Z_{13} =$ $ -1,4121 - -1,3924 = 0,0197$	$ X_{12} - X_{14} =$ $ -3,7512 - -2,8134 = 0,9378$	$\arctg(h/b) = 1,20$ $360 - 1,20 = 358,80$
8*)	$ Z_{15} - Z_{17} =$ $ -1,4121 - -1,3662 = 0,0459$	$ X_{14} - X_{16} =$ $ -2,8134 - -1,8756 = 0,9378$	$\arctg(h/b) = 2,80$
9 ¹⁾	$ Z_{17} - Z_{19} =$ $ -1,3662 - -1,2540 = 0,1122$	$ X_{16} - X_{18} =$ $ -1,8756 - -0,9378 = 0,9378$	$\arctg(h/b) = 6,82$
10*)	$ Z_{19} - Z_{21} =$ $ -1,2540 - -1,0736 = 0,1804$	$ X_{18} - X_{20} =$ $ -0,9378 - -0,0000 = 0,9378$	$\arctg(h/b) = 10,89$
11 ^{II)}	$ Z_{21} - Z_{23} =$ $ -1,0736 - -0,9292 = 0,1444$	$X_{22} - X_{20} =$ $0,6000 - 0,0000 = 0,6000$	$\arctg(h/b) = 13,53$
12 ^{**)}	$ Z_{23} - Z_{26} =$ $ -0,9292 - -0,6068 = 0,3224$	$X_{25} - X_{24} =$ $1,5812 - 0,6000 = 0,9812$	$\arctg(h/b) = 18,19$
13 ^{**)}	$ Z_{26} - Z_{28} =$ $ -0,6068 - -0,2057 = 0,4011$	$X_{27} - X_{25} =$ $2,5625 - 1,5812 = 0,9813$	$\arctg(h/b) = 22,23$
14 ^{**)}	$Z_{30} + Z_{28} =$ $0,2910 + -0,2057 = 0,4967$	$X_{29} - X_{27} =$ $3,5437 - 2,5625 = 0,9812$	$\arctg(h/b) = 26,85$
15 ^{**)}	$Z_{32} - Z_{30} =$ $0,8962 - 0,2910 = 0,6052$	$X_{31} - X_{29} =$ $4,5250 - 3,5437 = 0,9813$	$\arctg(h/b) = 31,66$
16 ^{**)}	$Z_{34} - Z_{32} =$ $1,6287 - 0,8962 = 0,7325$	$X_{33} - X_{31} =$ $5,5062 - 4,5250 = 0,9812$	$\arctg(h/b) = 36,74$
17 ^{**)}	$Z_{36} - Z_{34} =$ $2,5180 - 1,6287 = 0,8893$	$X_{35} - X_{33} =$ $6,4874 - 5,5062 = 0,9812$	$\arctg(h/b) = 42,19$
18 ^{**)}	$Z_{38} - Z_{36} =$ $3,6139 - 2,5180 = 1,0959$	$X_{37} - X_{35} =$ $7,4687 - 6,4874 = 0,9813$	$\arctg(h/b) = 48,16$
19 ^{**)}	$Z_{40} - Z_{38} =$ $5,0129 - 3,6139 = 1,3990$	$X_{39} - X_{37} =$ $8,4499 - 7,4687 = 0,9812$	$\arctg(h/b) = 54,96$
20 ^{**)}	$Z_{42} - Z_{40} =$ $6,9615 - 5,0129 = 1,9486$	$X_{41} - X_{39} =$ $9,4312 - 8,4499 = 0,9813$	$\arctg(h/b) = 63,27$
21 ^{**)}	$Z_{43} - Z_{42} =$ $12,1652 - 6,9615 = 5,2037$	$X_{43} - X_{41} =$ $10,4124 - 9,4312 = 0,9812$	$\arctg(h/b) = 79,32$

Calcolo Forze Sollecitanti

La forza Sollecitante (motrice) è data da:

$$F_{Sol} = \text{Peso} \cdot \sin(\alpha_i) \quad (\text{presa in valore e segno}).$$

dove:

Peso: peso delle varie azioni in gioco;

α_i : angolo dell'ipotetica superficie di scorrimento dell'i-esima striscia a cui appartiene l'azione in esame.

Di seguito si riporta tale contributo per le varie azioni in gioco.

- Terreno ($F_{Sol,T}$) -

Per le varie strisce risulta:

Striscia	P_{Ti} [N]	α_i [°]	$F_{Sol,Ti} = P_{Ti} \cdot \sin \alpha_i$ [N]
1 ^{*)}	3887,56	333,84	-1713,82
2 ^{*)}	10936,81	338,23	-4056,97
3 ^{*)}	16595,97	342,49	-4993,77
4 ^{*)}	20972,21	346,65	-4843,47
5 ^{*)}	24144,92	350,73	-3887,39
6 ^{*)}	26157,02	354,78	-2380,42
7 ^{*)}	27046,62	358,80	-568,03
8 ^{*)}	26825,49	2,80	1311,39
9 ^{*)}	25491,09	6,82	3028,20
10 ^{*)}	23021,49	10,89	4348,80
11 ^{II)}	12975,12	13,53	3035,99
12 ^{**)}	133367,16	18,19	41631,66
13 ^{**)}	136997,33	22,23	51833,95
14 ^{**)}	139061,26	26,85	62806,38
15 ^{**)}	139350,98	31,66	73149,45
16 ^{**)}	137529,11	36,74	82272,86
17 ^{**)}	133212,62	42,19	89459,69
18 ^{**)}	125699,82	48,16	93644,51
19 ^{**)}	113661,23	54,96	93055,49
20 ^{**)}	94115,01	63,27	84057,89
21 ^{**)}	40950,19	79,32	40241,06
$F_{Sol,Tot} =$			701 433,47

Quindi per il terreno si ha:

$$F_{Sol,T} = \mathbf{701\,433,47\,N}.$$

- Muro ($F_{Sol,M}$) -

Per l'azione del paramento si ha:

$$F_{Sol,M} = P_p \cdot \sin(\alpha_{11}) = 97500 \, \text{N} \cdot \sin(13,53^\circ) = \mathbf{22813,61 \, N}.$$

dove:

$P_p = 97500 \, \text{N}$ (peso del paramento);

$\alpha_{11} = 13,53^\circ$ (angolo della superficie di scorrimento della striscia 11 su cui "insiste" il paramento).

- Azioni Esterne ($F_{Sol,F}$) -

Per l'azione della forza esterna si ha:

$$F_{Sol,F} = F_Z \cdot \sin(\alpha_9) = 35000 \, \text{N} \cdot \sin(6,82^\circ) = \mathbf{4157,81 \, N}.$$

dove:

$F_Z = 35000 \, \text{N}$ (forza esterna);

$\alpha_9 = 6,82^\circ$ (angolo della superficie di scorrimento della striscia 9 a su cui "insiste" la forza esterna).

- Risultante (F_{Sol}) -

Pertanto, la forza sollecitante risultante è data da:

$$F_{Sol} = F_{Sol,T} + F_{Sol,M} + F_{Sol,F} = (701433,47 + 22813,61 + 4157,81) \, \text{N} = \mathbf{728404,89 \, N}.$$

Calcolo Forze Resistenti

La forza Resistente è data da:

$$F_{Res} = \text{Peso} \cdot \cos(\alpha_i) \cdot \tan(\phi_{rid}) \quad (\text{sempre positiva}).$$

dove:

Peso: peso delle varie azioni in gioco;

α_i : angolo dell'ipotetica superficie di scorrimento dell'i-esima striscia a cui appartiene l'azione in esame;

$\phi_{rid} = \arctg[(\tan\phi)/\gamma_\phi] = \arctg[(\tan 37^\circ)/1,25] = 31,08^\circ$ (angolo di attrito ridotto del terreno);

$\phi = 37^\circ$ (angolo di attrito del terreno);

$\gamma_\phi = 1,25$ [Tab. 6.2.I NTC18, coefficiente parziale per i parametri geotecnici - Combinazione 2 (A2+M2+R2) dell'Approccio 1].

Di seguito si riporta tale contributo per le varie azioni in gioco.

- Terreno ($F_{Res,T}$) -

Per le varie strisce risulta:

Striscia	P _{Ti} [N]	α _i [°]	φ _{rid} [°]	F _{Res,Ti} = P _{Ti} ·cos(α _i)·tan(φ _{rid}) [N]
1 ^{*)}	3887,56	333,84	31,08	2103,56
2 ^{*)}	10936,81	338,23		6122,79
3 ^{*)}	16595,97	342,49		9541,09
4 ^{*)}	20972,21	346,65		12301,17
5 ^{*)}	24144,92	350,73		14365,71
6 ^{*)}	26157,02	354,78		15703,15
7 ^{*)}	27046,62	358,80		16301,28
8 ^{*)}	26825,49	2,80		16152,23
9 ^{I)}	25491,09	6,82		15258,32
10 ^{*)}	23021,49	10,89		13628,48
11 ^{II)}	12975,12	13,53		7604,83
12 ^{**)}	133367,16	18,19		76381,94
13 ^{**)}	136997,33	22,23		76448,30
14 ^{**)}	139061,26	26,85		74794,83
15 ^{**)}	139350,98	31,66		71502,02
16 ^{**)}	137529,11	36,74		66437,14
17 ^{**)}	133212,62	42,19		59503,30
18 ^{**)}	125699,82	48,16		50549,58
19 ^{**)}	113661,23	54,96		39344,70
20 ^{**)}	94115,01	63,27		25518,90
21 ^{**)}	40950,19	79,32		4571,24
F _{Res,T} =				674 137,55

Quindi per il terreno si ha:

$$F_{Res,T} = \mathbf{674\ 137,55\ N}.$$

- Muro ($F_{Res,M}$) -

Per l'azione del paramento si ha:

$$F_{Res,M} = P_p \cdot \cos(\alpha_{11}) \tan(\phi_{rid}) = 97500\ N \cdot \cos(13,53^\circ) \cdot \tan(31,08^\circ) = \mathbf{57146,56\ N}.$$

dove:

$P_p = 97500\ N$ (peso del paramento);

$\alpha_{11} = 13,53^\circ$ (angolo dell'ipotetica superficie di scorrimento della striscia 11 su cui "insiste" il paramento);

$\phi_{rid} = 31,08^\circ$ (angolo di attrito del terreno ridotto).

- Azioni Esterne ($F_{Res,F}$) -

Per l'azione della forza esterna si ha:

$$F_{Res,F} = F_z \cdot \sin(\alpha_9) = 35000\ N \cdot \cos(6,82^\circ) \cdot \tan(31,08^\circ) = \mathbf{20950,10\ N}.$$

dove:

$F_z = 35000\ N$ (forza esterna);

$\alpha_9 = 6,82^\circ$ (angolo della superficie di scorrimento della striscia 9 su cui "insiste" la forza esterna);

$\phi_{rid} = 31,08^\circ$ (angolo di attrito ridotto del terreno).

- Risultante (F_{Res}) -

Pertanto, la forza sollecitante risultante è data da:

$$F_{Res}^* = F_{Res,T} + F_{Res,M} + F_{Res,F} = (674137,55 + 57146,56 + 20950,10) \text{ N} = \mathbf{752233,21 \text{ N}}$$

Ricordando che la verifica viene eseguita secondo la Combinazione 2 (A2+M2+**R2**) dell'Approccio 1, tale valore deve essere diviso per il coefficiente di sicurezza parziale $\gamma_R = 1,10$ (Tab. 6.8.1 - NTC 18).

Per cui si ha:

$$F_{Res} = F_{Res}^* / \gamma_R = 752233,21 \text{ N} / 1,10 = \mathbf{683848,28 \text{ N}}$$

Verifica

La verifica consiste nel controllare che:

$$F_{Res} \geq F_{Sol} \quad \rightarrow \quad (CS = F_{Res} / F_{Sol} \geq 1).$$

Per cui nel caso in esame, si ha:

COMB	Forza Sollecitante (F_{Sol}) [N]	Forza Resistente (F_{Res}) [N]	CS [-]
01	1,0·728.405 = 728.405	683.848	683.848/728.405 = 0,94
02	1,0·728.405 = 728.405		683.848/728.405 = 0,94

Confronto

Nella successiva tabella si riporta il confronto tra i due calcoli.

COMB	TIPO CALCOLO	FELLENIOUS				
		Forza Sollecitante (F_{Sol}) [N]	Forza di Resistente (F_{Res}) [N]	Centro [m]	Raggio [m]	CS [-]
01	Manuale	728.405	683.848	X: -3,00; Y: 12,00.	13,41	0,94
	GeoMurus	730.559	686.673			0,94
	Scarto Percentuale	0,30%	0,40%	-	-	0,00%
02	Manuale	728.404	683.848	X: -3,00; Y: 12,00.	13,41	0,94
	GeoMurus	730.559	686.673			0,94
	Scarto Percentuale	0,30%	0,40%	-	-	0,00%

BIBLIOGRAFIA

- ***Cestelli Guidi; Geotecnica e tecnica delle fondazioni vol. 1; - HOEPLI***
- ***Cestelli Guidi; Geotecnica e tecnica delle fondazioni vol. 2; - HOEPLI***
- ***De Simone P.; Fondazioni; - LIGUORI EDITORE***
- ***Pietro Colombo; Elementi di geotecnica; - ZANICHELLI Bologna***
- ***Carlo Viggiani; FONDAZIONI; - Hevelius Edizioni***
- ***Decreto Ministeriale 17 Gennaio 2018 - NTC 2018***