Relazione di calcolo geotecnica

Opera	Validazione: Griffiths & Lane (1999), Esempio 1, con chiodi Sirive
Committente	
Località	
Progettista	Verifica del software
Data · revisione	13/11/2026 · rev. 0
Oggetto	Verifica di stabilità globale del pendio consolidato con barre autoperforanti Sirive® (chiodi passivi) con il metodo degli elementi finiti e riduzione dei parametri di resistenza; verifiche strutturali e geotecniche degli ancoraggi ai sensi del D.M. 17/01/2018.

1. Premessa

La presente relazione riporta le analisi di stabilità del pendio «Validazione - Griffiths & Lane (1999) Es.1 con chiodi» rinforzato con 3 file di barre cave autoperforanti Sirive® iniettate, con funzionamento passivo. Le analisi sono condotte con il codice agli elementi finiti Code_Aster (piattaforma Salome-Meca) in deformazione piana, con legge costitutiva elasto-plastica di Mohr-Coulomb in tensioni efficaci; il fattore di sicurezza globale è determinato con la tecnica di riduzione dei parametri di resistenza (Strength Reduction Method, SRM).

2. Normativa di riferimento

- D.M. 17 gennaio 2018 – Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» (NTC 2018), in particolare §2.6 (azioni e combinazioni), §6.2 (articolazione del progetto), §6.3 (stabilità dei pendii naturali), §6.6 (tiranti di ancoraggio), §6.8 (opere di materiali sciolti e fronti di scavo), §7.11 (opere e sistemi geotecnici in zona sismica).
- Circolare C.S.LL.PP. 21 gennaio 2019, n. 7 – Istruzioni per l'applicazione delle NTC 2018.
- C.S.LL.PP. – Linea guida per la certificazione degli ancoraggi passivi (ottobre 2020).
- UNI EN 1997-1 (Eurocodice 7) – Progettazione geotecnica.
- Sirive® – Scheda tecnica barre cave autoperforanti S460J0 ad uso geotecnico.

3. Modello di calcolo

3.1 Geometria

Il modello rappresenta una sezione trasversale del pendio di altezza H = 10,00 m e inclinazione β = 26,6°; il dominio si estende per 12,00 m a monte del ciglio, 20,00 m a valle del piede e 10,00 m sotto il piede, per una larghezza complessiva di 52,00 m. Origine in basso a sinistra, x verso valle e y verso l'alto. La base è vincolata in direzione orizzontale e verticale, i bordi laterali in direzione orizzontale.

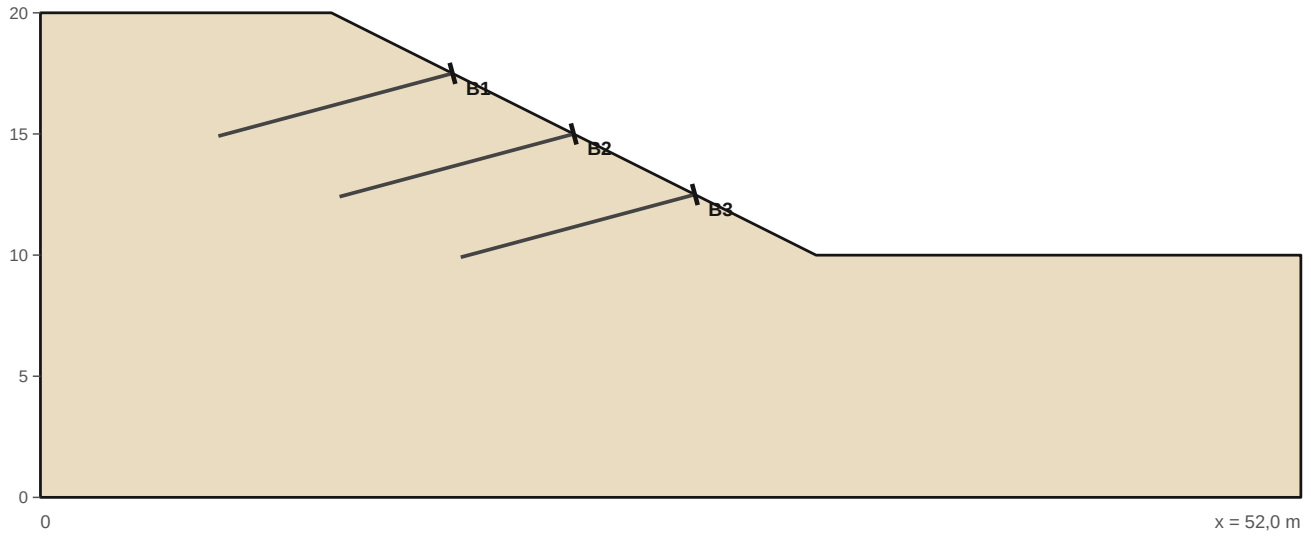

Figura 1 – Sezione di calcolo: stratigrafia, falda e posizione delle barre.

3.2 Discretizzazione e legame costitutivo

Il terreno è discretizzato con elementi triangolari quadratici a 6 nodi (TRIA6), dimensione massima 1,00 m, infittiti a 0,40 m sul fronte e a 0,40 m lungo le barre; il modello conta circa 5441 nodi nel terreno. Il comportamento del terreno è elastico lineare – perfettamente plastico con criterio di Drucker-Prager associato (DRUCK_PRAGER) i cui parametri sono scelti in modo che, in deformazione piana, la condizione di rottura coincida con quella di Mohr-Coulomb ($\alpha = \sqrt{3}\cdot\tan\varphi'/\sqrt{(9+12\tan^2\varphi')}$, $k = 3\sqrt{3}\cdot c'/\sqrt{(9+12\tan^2\varphi')}$); analisi drenata in tensioni efficaci. La scelta è motivata dalla maggiore robustezza dell'integrazione locale rispetto alla legge MOHR_COULOMB.

Le barre sono modellate con elementi monodimensionali 2D_BARRE (solo sforzo normale) con nodi in comune con la mesh del terreno (aderenza perfetta nel modello). Poiché il modello piano rappresenta una striscia di larghezza unitaria, l'area della barra è divisa per l'interasse orizzontale s_h: $A_{eq} = A/s_h$, con modulo E = 205.000 MPa e legame elastico – plastico con snervamento alla forza $F_{0,2}$ (VMIS_ISOT_LINE, incrudimento trascurabile). La resistenza delle barre non viene ridotta durante la procedura SRM.

3.3 Metodo SRM

Per ogni valore del fattore di riduzione F il calcolo è ripetuto da zero: peso proprio e pressioni neutre applicati in modo incrementale con i parametri ridotti, con le barre presenti fin dall'inizio, quindi sovraccarico e forze sismiche pseudo-statiche. F cresce per passi di 0,10, passando per $F = \gamma M$ e $F = \gamma M\cdot\gamma R$; il fattore di sicurezza FS è l'ultimo valore per cui il calcolo converge, affinato per bisezione fino a una tolleranza di 0,010. In prossimità di FS lo spostamento del ciglio cresce rapidamente (Figura 2), a conferma che la mancata convergenza corrisponde allo sviluppo del meccanismo.

4. Caratterizzazione geotecnica

Tabella 1 – Parametri geotecnici caratteristici degli strati.

Strato	γ [kN/m³]	γ_{sat} [kN/m³]	E [MPa]	ν	c' [kPa]	φ' [°]	ψ [°]	q_s [kPa]
1 – Terreno omogeneo	20,0	20,0	100,0	0,30	10,0	20,0	0,0	100

Falda: non presente nel volume significativo.

Il valore q_s è l'aderenza limite laterale bulbo–terreno adottata per la verifica a sfilamento (valori da prove o correlazioni di letteratura, ad es. Bustamante e Doix, per iniezione ripetuta o globale).

5. Interventi di consolidamento

Il consolidamento è costituito da 3 file di barre cave autoperforanti Sirive® con punta a perdere, iniettate con miscela cementizia durante la perforazione, collegate in testa con piastra di ripartizione. Il diametro di calcolo del bulbo è $D_s = \alpha \cdot Ø_{punta}$ con $\alpha = 1{,}20$.

Tabella 2 – Disposizione e caratteristiche delle barre (dati di catalogo Sirive®).

Fila	z testa [m]	x; y testa [m]	L [m]	α [°]	s_h [m]	Barra	A [mm²]	$F_{0,2}$ [kN]	F_t [kN]	Ø punta [mm]	D_s [mm]	Piastra
B1	7,50	17,00; 17,50	10,00	15,0	1,50	R32L (qualif.)	430	198	241	76	91	sì
B2	5,00	22,00; 15,00	10,00	15,0	1,50	R32L (qualif.)	430	198	241	76	91	sì
B3	2,50	27,00; 12,50	10,00	15,0	1,50	R32L (qualif.)	430	198	241	76	91	sì

Tabella 3 – Parametri equivalenti per metro di sviluppo del pendio usati nel modello piano.

Fila	$A_{eq} = A/s_h$ [mm²/m]	$E \cdot A_{eq}$ [kN/m]	$F_{0,2}/s_h$ [kN/m]	Peso acciaio [kg/m]
B1	287	58.767	132,0	22,5
B2	287	58.767	132,0	22,5
B3	287	58.767	132,0	22,5

6. Azioni e combinazioni di verifica

Le verifiche di stabilità globale sono condotte secondo l'Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R2) in condizioni statiche (§6.8.2 NTC 2018) e con il metodo pseudo-statico in condizioni sismiche (§7.11.3.5.2 e §7.11.4). Nel metodo SRM i coefficienti γM non sono applicati a priori: il fattore di sicurezza FS ottenuto con i parametri caratteristici è confrontato con il prodotto γM·γR.

Tabella 4 – Combinazioni analizzate.

Id	Descrizione	q [kPa]	k_h	k_v	γM	γR	FS richiesto	Barre
STAT	Statica A2+M2+R2	0,0	0,0000	0	1,25	1,10	1,375	sì
STAT_NB	Statica A2+M2+R2 – senza barre	0,0	0,0000	0	1,25	1,10	1,375	no

Statica: peso proprio con $\gamma_G = 1$, sovraccarico $q_k = 0{,}0$ kPa con $\gamma_Q = 1{,}30$ (A2).

7. Criteri di verifica

7.1 Stabilità globale

```
statica:  FS ≥ γM · γR = 1,25 × 1,10 = 1,375
```

7.2 Barre

Lo sforzo normale di progetto N_{Ed} di ogni barra è il maggiore tra il massimo lungo la barra nello stato F = γM (forze necessarie all'equilibrio con i parametri di progetto M2) e γE·N(F = 1) con γE = 1,30 (approssimazione della combinazione A1 sugli effetti delle azioni, §2.6.1); in sismica N_{Ed} = N(F = 1). Le forze per barra si ottengono moltiplicando per l'interasse s_h quelle per metro del modello.

```
Resistenza dell'acciaio (STR):     R_t,d = F0,2 / γs          γs = 1,15
Sfilamento (GEO, §6.6.2, A1+M1+R3): R_a,c = π · D_s · Σ q_s,i · L_r,i
                                   R_a,k = R_a,c / ξa3        ξa3 = 1,80
                                   R_a,d = R_a,k / γR         γR = 1,20 (ancoraggi
permanenti)
Verifiche:  N_Ed ≤ R_t,d     N_Ed ≤ R_a,d
Gerarchia (raccomandata):  F0,2 ≥ R_a,k
```

Il tratto resistente L_r si estende dall'interfaccia resistente al fondo della barra; l'interfaccia è posta, per ciascuna barra, nel punto di massima trazione al collasso, dove la barra attraversa la superficie di scorrimento individuata dal calcolo. Per le barre senza piastra in testa si verifica a sfilamento anche il tratto attivo. Il modello FEM non simula lo scorrimento barra–terreno: se allo stato di collasso la trazione supera $R_{a,c}$, il fattore di sicurezza calcolato è da considerare sovrastimato e viene segnalato.

8. Risultati – stabilità globale

Tabella 5 – Fattori di sicurezza e verifica di stabilità globale.

Combinazione	FS	FS richiesto	FS/FS_{rich}	Esito
STAT – Statica A2+M2+R2	1,594	1,375	1,159	**VERIFICATA**
STAT_NB – Statica A2+M2+R2 – senza barre	1,381	1,375	1,005	stato di fatto (confronto) – **VERIFICATA**

Statica A2+M2+R2: FS passa da 1,381 senza interventi a 1,594 con le barre (incremento del 15 %).

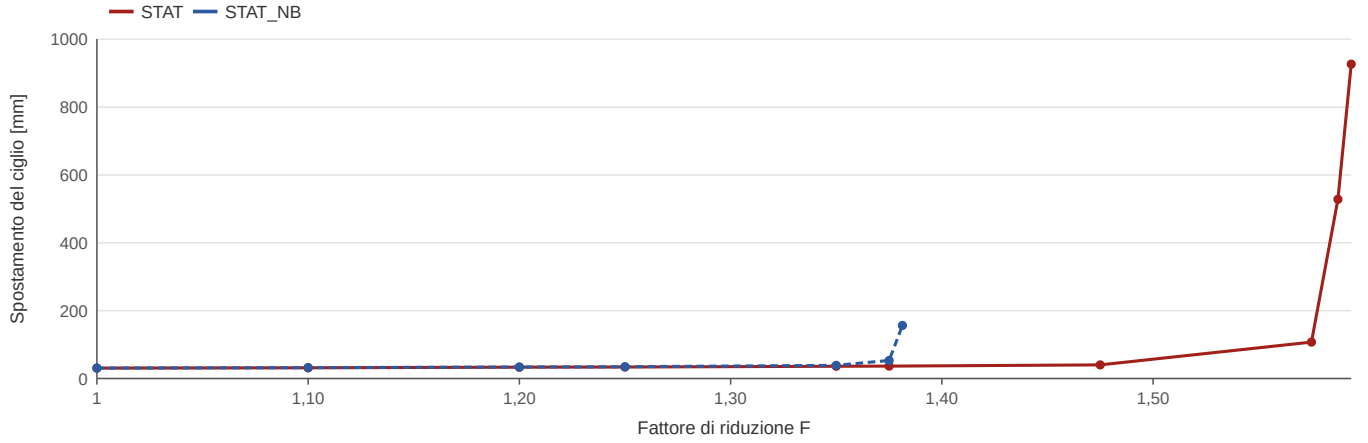

Figura 2 – Spostamento del ciglio in funzione del fattore di riduzione F: l'aumento rapido indica l'approssimarsi del collasso (linee tratteggiate: confronto senza barre).

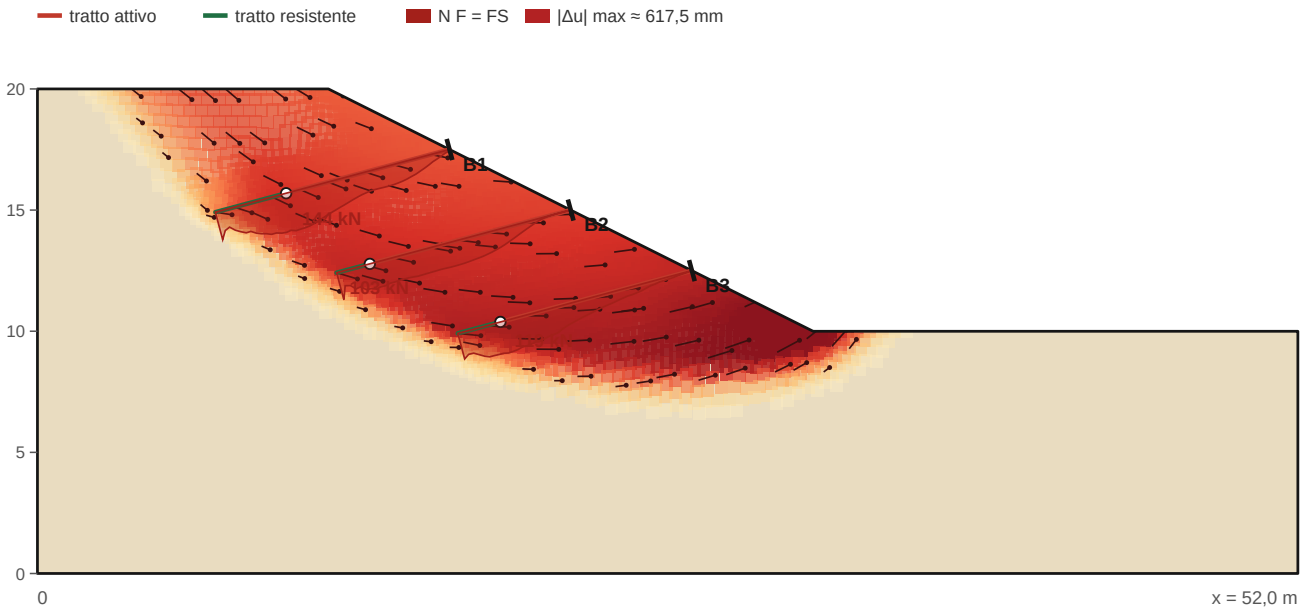

Figura 3 – STAT – meccanismo di collasso: incremento di spostamento tra gli ultimi due valori di F convergenti (1,588 → 1,594); sforzo normale nelle barre a F = FS.

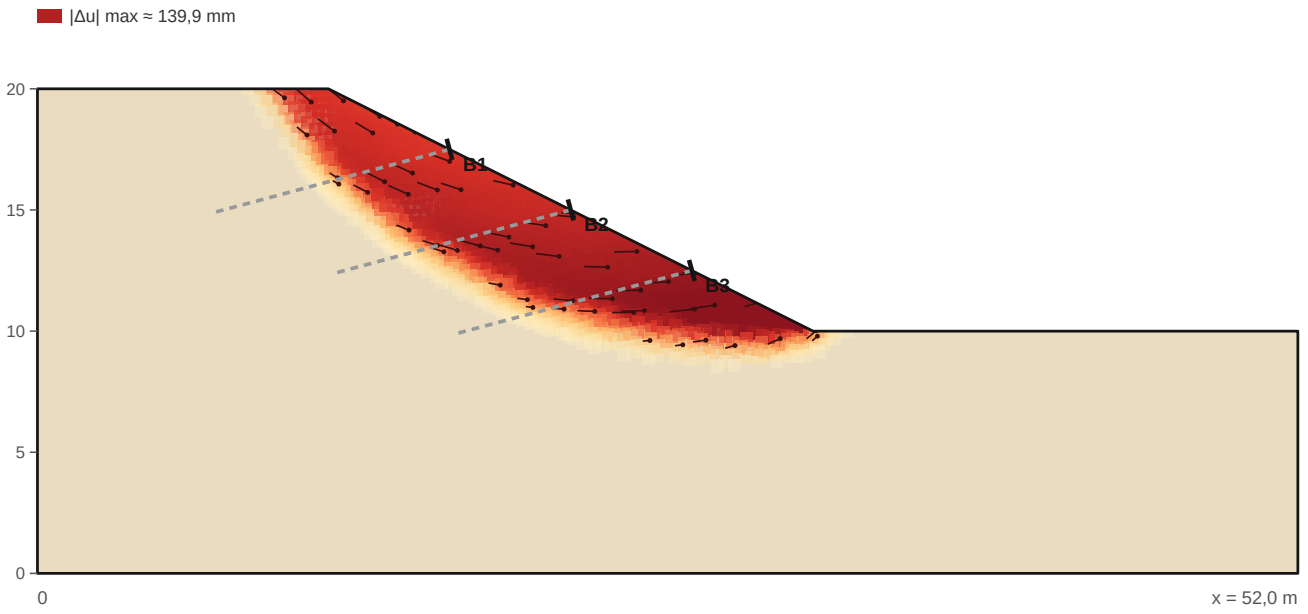

Figura 4 – STAT_NB – meccanismo di collasso: incremento di spostamento tra gli ultimi due valori di F convergenti (1,375 → 1,381).

9. Sollecitazioni nelle barre Sirive®

Lo sforzo normale N è ricavato dal campo SIEF_NOEU degli elementi 2D_BARRE (per metro di sviluppo) e moltiplicato per l'interasse s_h per ottenere la forza nella singola barra. Le resistenze di progetto sono $R_{t,d} = F_{0,2}/\gamma s$ (acciaio) e $R_{a,d} = \pi \cdot D_s \cdot \Sigma q_{s,i} L_{r,i} / (\xi a3 \cdot \gamma R)$ (sfilamento sul tratto resistente).

STAT – Statica A2+M2+R2

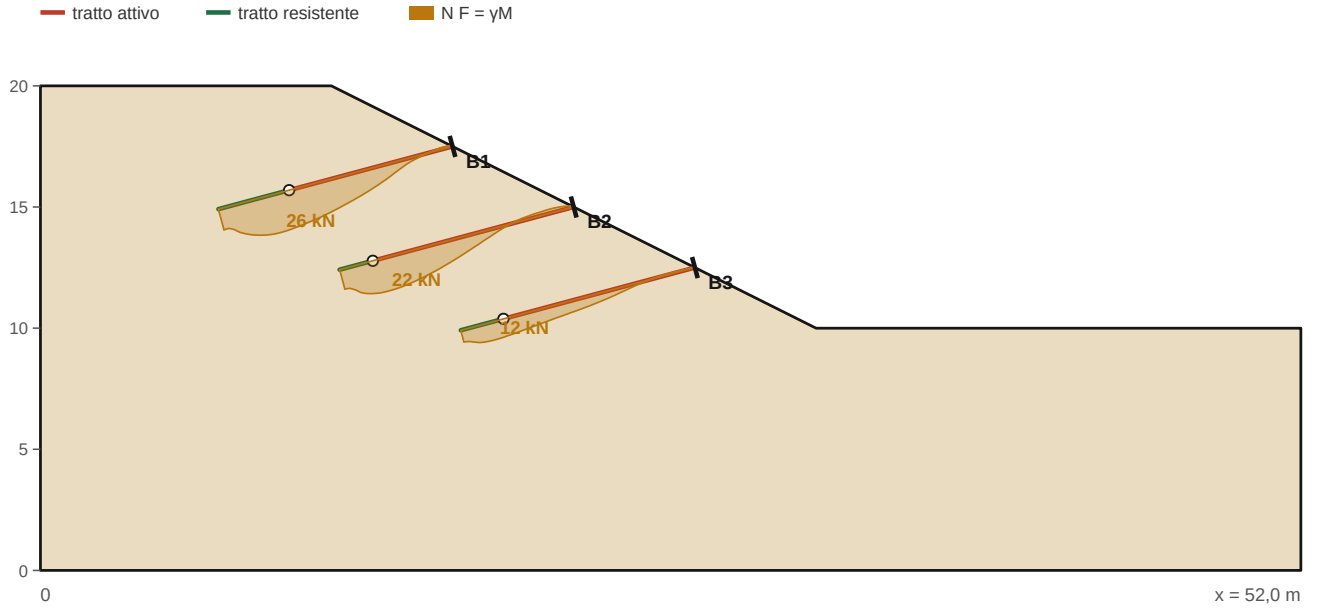

Figura 5 – STAT – diagrammi dello sforzo normale nelle barre allo stato F = γM, tratti attivi e resistenti.

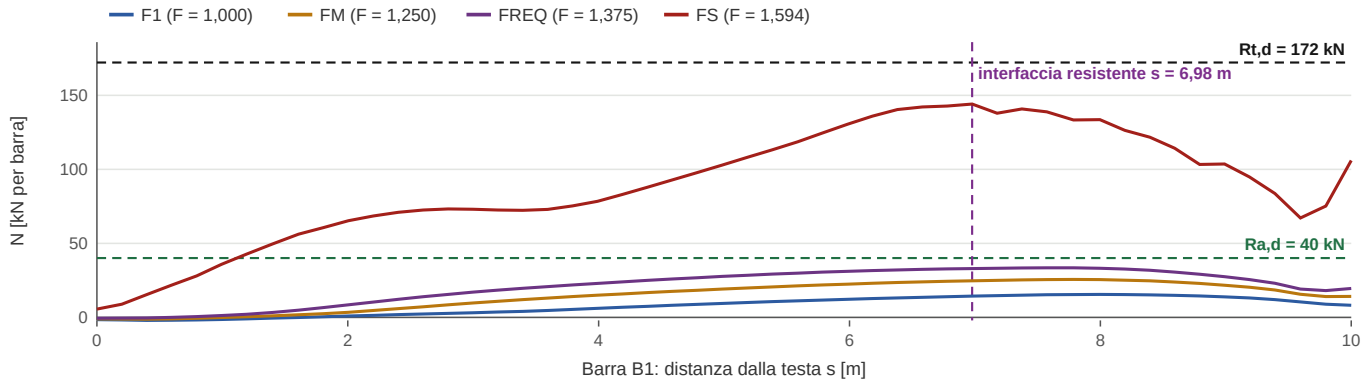

Figura 6 – STAT – barra B1 (R32L, L = 10,0 m): diagramma dello sforzo normale lungo la barra negli stati notevoli, con le resistenze di progetto.

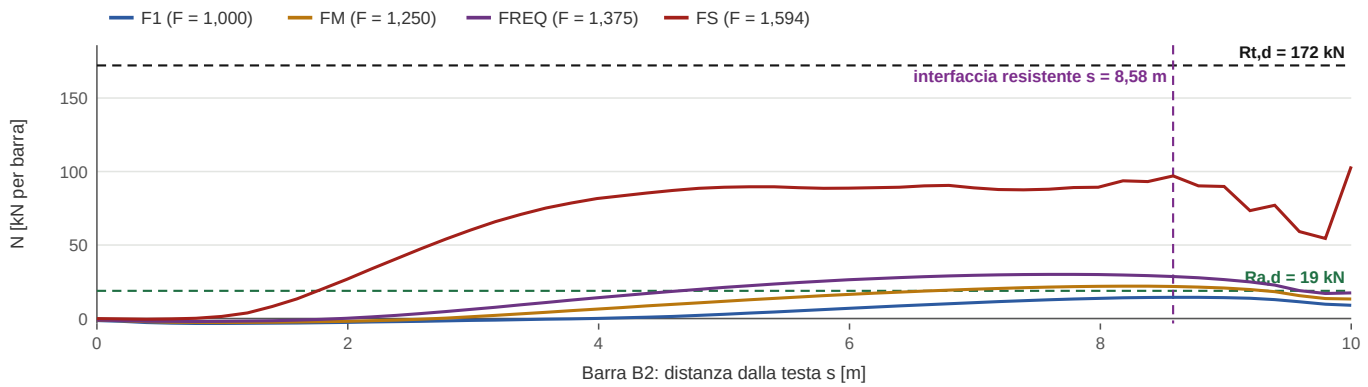

Figura 7 – STAT – barra B2 (R32L, L = 10,0 m): diagramma dello sforzo normale lungo la barra negli stati notevoli, con le resistenze di progetto.

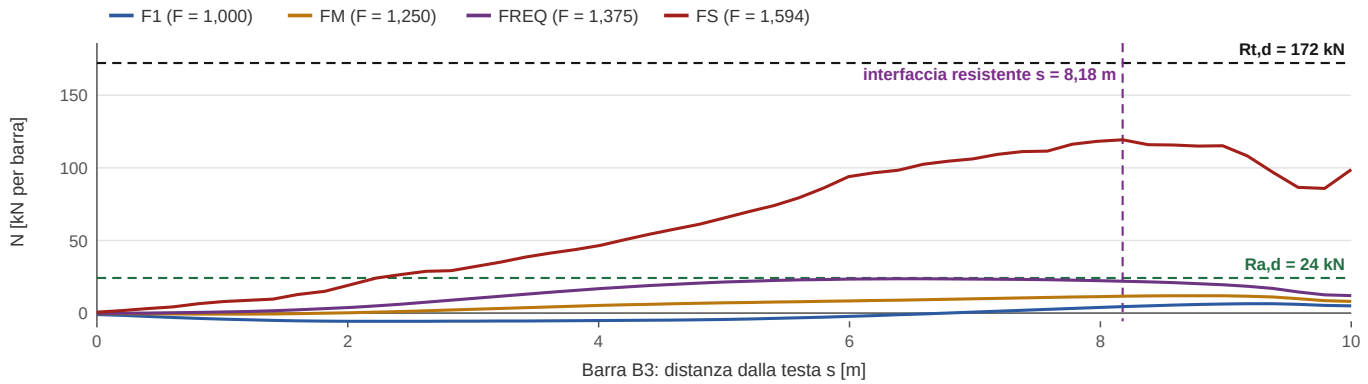

Figura 8 – STAT – barra B3 (R32L, L = 10,0 m): diagramma dello sforzo normale lungo la barra negli stati notevoli, con le resistenze di progetto.

Tabella 6 – STAT: sollecitazioni agenti e resistenti delle barre [kN per barra].

Barra	Stato	F	N_{max}	$s(N_{max})$ [m]	$R_{t,d}$	$N/R_{t,d}$	$R_{a,d}$	$N/R_{a,d}$	Esito
B1	F = 1	1,000	15	8,00	172	0,09	40	0,39	
B1	F = γM	1,250	26	7,79	172	0,15	40	0,64	
B1	F = γM·γR	1,375	34	7,57	172	0,19	40	0,84	
B1	collasso F = FS	1,594	144	6,98	172	0,84	40	3,60	informativo
B1	**N_{Ed} di progetto**		**26**		172	**0,15**	40	**0,64**	**VERIFICATA**
B2	F = 1	1,000	14	8,58	172	0,08	19	0,77	
B2	F = γM	1,250	22	8,38	172	0,13	19	1,17	
B2	F = γM·γR	1,375	30	7,59	172	0,17	19	1,59	
B2	collasso F = FS	1,594	103	8,58	172	0,60	19	5,49	informativo
B2	**N_{Ed} di progetto**		**22**		172	**0,13**	19	**1,17**	**NON VERIFICATA**
B3	F = 1	1,000	6	9,17	172	0,04	24	0,27	
B3	F = γM	1,250	12	8,78	172	0,07	24	0,50	
B3	F = γM·γR	1,375	24	6,59	172	0,14	24	0,98	
B3	collasso F = FS	1,594	119	8,18	172	0,69	24	4,93	informativo
B3	**N_{Ed} di progetto**		**12**		172	**0,07**	24	**0,50**	**VERIFICATA**

Tabella 7 – STAT: riepilogo delle verifiche strutturali e a sfilamento.

Barra	N_{Ed} [kN]	$R_{t,d}$ [kN]	$N_{Ed}/R_{t,d}$	L_r [m]	$\Sigma q_s L_r$ [kN/m]	$R_{a,c}$ [kN]	$R_{a,k}$ [kN]	$R_{a,d}$ [kN]	$N_{Ed}/R_{a,d}$	STR	GEO	Gerarchia
B1	26	172	0,15	3,02	302	87	48	40	0,64	**OK**	**OK**	F0,2 ≥ Ra,k
B2	22	172	0,13	1,42	142	41	23	19	1,17	**OK**	**NO**	F0,2 ≥ Ra,k
B3	12	172	0,07	1,82	182	52	29	24	0,50	**OK**	**OK**	F0,2 ≥ Ra,k

B1: N_{Ed} = N(F = γM); L_r = 3,02 m (massima trazione a F = 1,594) – Terreno omogeneo 3,02 m.
B2: N_{Ed} = N(F = γM); L_r = 1,42 m (massima trazione a F = 1,594) – Terreno omogeneo 1,42 m.
B3: N_{Ed} = N(F = γM); L_r = 1,82 m (massima trazione a F = 1,594) – Terreno omogeneo 1,82 m.

Osservazioni.

B1: allo stato di collasso la trazione (144 kN) supera la resistenza caratteristica a sfilamento (87 kN): il

FEM, che assume aderenza perfetta, sovrastima il contributo della barra e quindi FS.
B2: allo stato di collasso la trazione (103 kN) supera la resistenza caratteristica a sfilamento (41 kN): il FEM, che assume aderenza perfetta, sovrastima il contributo della barra e quindi FS.
B3: allo stato di collasso la trazione (119 kN) supera la resistenza caratteristica a sfilamento (52 kN): il FEM, che assume aderenza perfetta, sovrastima il contributo della barra e quindi FS.

10. Tensioni di interfaccia bulbo–terreno

La tensione tangenziale d'interfaccia lungo il bulbo si ricava per equilibrio di un concio di barra dalla variazione dello sforzo normale:

```
τ(s) = (1 / π·D_s) · dN/ds        D_s = α·Ø_punta
```

dove N è la forza nella singola barra e la derivata è valutata con una regressione lineare locale su una finestra di ±0,35 m (almeno 2,5 passi di mesh), trascurando i tratti di estremità affetti dal picco numerico dell'ultimo elemento. $\tau > 0$ indica il tratto attivo (il terreno in movimento trascina la barra verso valle), $\tau < 0$ il tratto resistente (il terreno stabile trattiene la barra). Le tensioni sono confrontate con l'aderenza limite q_s dello strato attraversato e con il valore di progetto $q_{s,d} = q_s/(\xi a3 \cdot \gamma R) = q_s/2{,}16$. Poiché il modello assume aderenza perfetta, le τ calcolate non sono limitate da q_s: un rapporto $\tau/q_s > 1$ indica che nella realtà avverrebbe uno scorrimento locale con ridistribuzione degli sforzi.

STAT – Statica A2+M2+R2

Tabella 8 – STAT: tensioni tangenziali d'interfaccia [kPa].

Barra	Stato	τ_{max} attivo	s [m]	τ_{max} resistente	s [m]	max $\lvert\tau\rvert/q_s$	τ medio su L_r	q_s medio su L_r	$q_{s,d}$	$\tau_m \le q_{s,d}$
B1	F = γM	22,4	2,60	34,8	9,39	0,35	29,6	100,0	46,3	**OK**
B1	F = γM·γR	32,5	2,00	43,6	9,39	0,44	38,7	100,0	46,3	sì
B1	F = FS	122,3	0,99	160,5	9,19	1,60	166,5	100,0	46,3	no
B2	F = γM	18,8	3,99	32,1	9,39	0,32	54,1	100,0	46,3	**NO**
B2	F = γM·γR	27,6	3,58	43,1	9,39	0,43	73,8	100,0	46,3	no
B2	F = FS	121,7	2,19	147,5	9,39	1,48	254,3	100,0	46,3	no
B3	F = γM	9,6	3,02	14,4	9,37	0,14	22,9	100,0	46,3	**OK**
B3	F = γM·γR	24,5	3,02	30,3	9,37	0,30	45,1	100,0	46,3	sì
B3	F = FS	106,0	5,60	138,2	9,37	1,38	228,5	100,0	46,3	no

τ medio su $L_r = N_{max}/(\pi \cdot D_s \cdot L_r)$: aderenza media necessaria sul tratto resistente per equilibrare la trazione massima; la verifica nello stato di progetto (F = γM) equivale a $N \le R_{a,d}$.

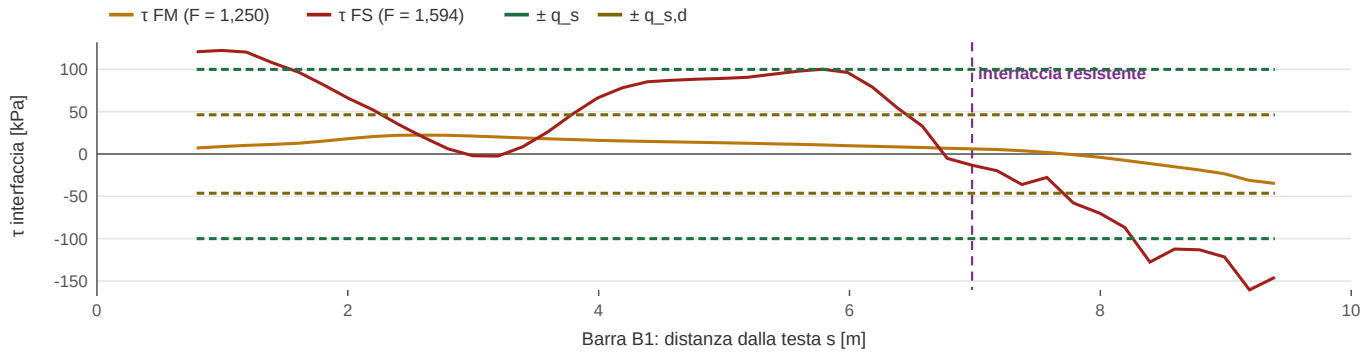

Figura 9 – STAT – barra B1: tensioni d'interfaccia $\tau(s)$ bulbo–terreno; linee tratteggiate $\pm q_s$ (verde) e $\pm q_{s,d}$ (oliva).

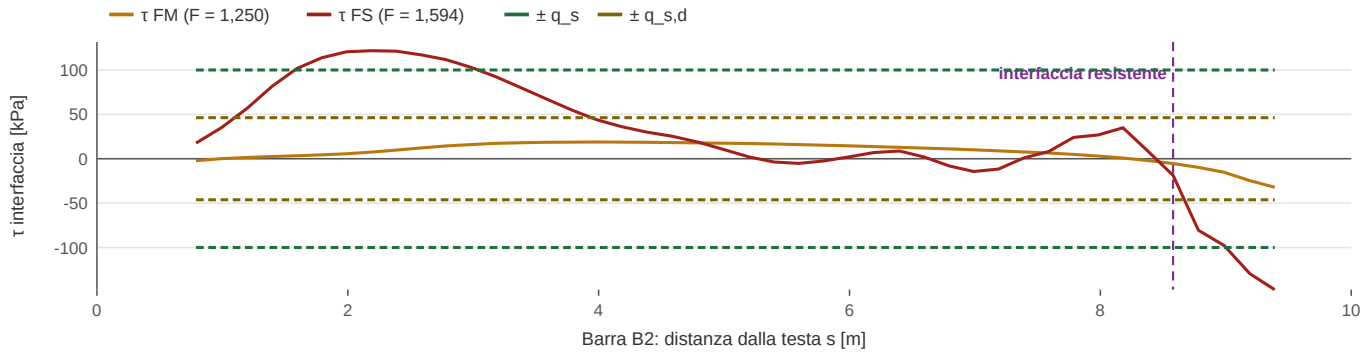

Figura 10 – STAT – barra B2: tensioni d'interfaccia τ(s) bulbo–terreno; linee tratteggiate $\pm q_s$ (verde) e $\pm q_{s,d}$ (oliva).

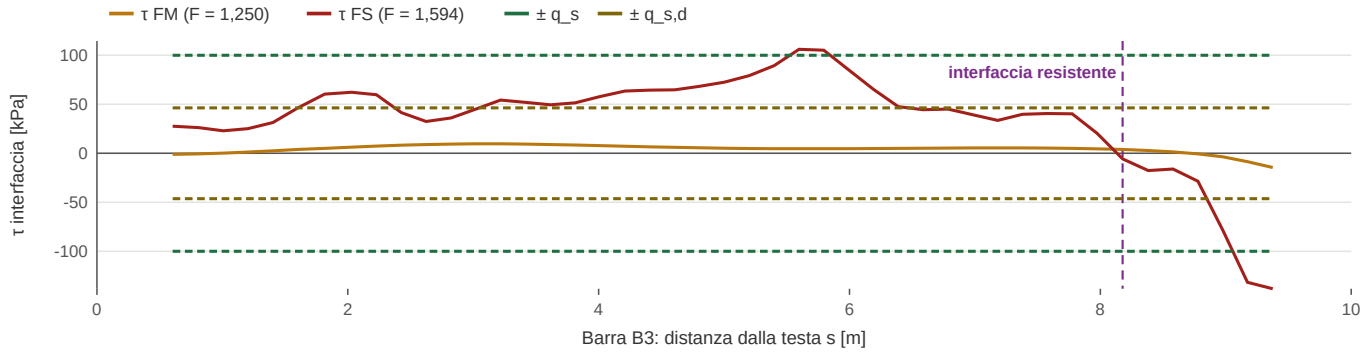

Figura 11 – STAT – barra B3: tensioni d'interfaccia τ(s) bulbo–terreno; linee tratteggiate $\pm q_s$ (verde) e $\pm q_{s,d}$ (oliva).

11. Conclusioni

Le analisi agli elementi finiti con riduzione dei parametri di resistenza forniscono i seguenti fattori di sicurezza: Statica A2+M2+R2 FS = 1,594 (richiesto 1,375). La verifica di stabilità globale risulta **soddisfatta** per tutte le combinazioni.

Attenzione: allo stato di collasso la trazione in almeno una barra supera la resistenza caratteristica a sfilamento; poiché il modello FEM assume aderenza perfetta, il fattore di sicurezza con le barre è da considerare un limite superiore. Si raccomanda di verificare la stabilità globale anche con un metodo all'equilibrio limite in cui la forza delle barre sia limitata dalla resistenza a sfilamento, o di allungare le barre fino a superare con margine la superficie di scorrimento individuata.

Le verifiche strutturali (acciaio) e geotecniche (sfilamento) delle barre Sirive® risultano **non soddisfatte** (rapporto massimo N_{Ed}/R_d = 1,17). La resistenza a sfilamento di progetto dovrà essere confermata con prove di carico in sito secondo §6.6.4 NTC 2018 e la Linea guida C.S.LL.PP. sugli ancoraggi passivi.

Ipotesi e limiti: deformazione piana; aderenza perfetta barra–terreno nel FEM (sfilamento verificato a posteriori); flessione e taglio nelle barre non considerati; falda con distribuzione idrostatica sulla verticale; collasso individuato dalla mancata convergenza numerica. Si raccomanda il confronto con un metodo all'equilibrio limite.

Allegato – Storia della ricerca di FS

Tabella 9 – STAT – Statica A2+M2+R2: prove SRM.

F	Esito	dx ciglio [mm]	dy ciglio [mm]
1,0000	converge	0,01	-30,61
1,1000	converge	0,86	-31,75
1,2000	converge	2,01	-33,10
1,2500	converge	2,73	-33,88
1,3500	converge	4,60	-35,74
1,3750	converge	5,20	-36,29
1,4750	converge	8,69	-39,19
1,5750	converge	77,82	-74,02
1,5875	converge	462,86	-255,24
1,5938	converge	822,71	-426,56
1,6000	non converge	–	–
1,6250	non converge	–	–
1,6750	non converge	–	–

Tabella 10 – STAT_NB – Statica A2+M2+R2 – senza barre: prove SRM.

F	Esito	dx ciglio [mm]	dy ciglio [mm]
1,0000	converge	0,03	-30,73
1,1000	converge	0,89	-31,97
1,2000	converge	2,13	-33,52
1,2500	converge	2,98	-34,50
1,3500	converge	6,40	-38,05
1,3750	converge	19,95	-49,41
1,3813	converge	104,51	-116,68
1,3875	non converge	–	–
1,4000	non converge	–	–
1,4250	non converge	–	–
1,4750	non converge	–	–