RAPPORTO DI VALIDAZIONE DEL SOLUTORE

Pendio Chiodato NTC 2018 – Stabilità globale con il metodo di Bishop semplificato

Oggetto	Confronto con problemi di riferimento pubblicati
Versione del solutore	Ottobre 2026 (dopo le correzioni del §4)
Data	16/10/2026
Esito	Scarti entro ±0,5% sui casi ordinari; caso V6 discusso al §5

1. Scopo

Il rapporto documenta la verifica del solutore di stabilità globale dell'applicativo Pendio Chiodato NTC 2018, confrontandone i risultati con problemi di riferimento pubblicati in letteratura e nei manuali di verifica di programmi commerciali. Il confronto riguarda il calcolo del coefficiente di sicurezza minimo con il metodo di Bishop semplificato su superfici circolari, che costituisce la base delle verifiche agli stati limite ultimi GEO del pendio rinforzato.

Le analisi sono eseguite senza chiodi né pali, senza sovraccarico e con coefficienti parziali unitari ($\gamma_{\phi'} = \gamma_{c'} = \gamma_R = 1$), in modo da confrontare direttamente il coefficiente di sicurezza calcolato con quello di riferimento.

2. Metodo di calcolo verificato

$$F_s = r \cdot \Sigma[c' \cdot l \cdot \cos\alpha + (W - u \cdot b) \cdot \tan\phi'] / m_\alpha \;/\; \Sigma\, W \cdot (x - x_c) \qquad m_\alpha = \cos\alpha \cdot (1 + \tan\alpha \cdot \tan\phi' / F_s)$$

- Superfici circolari; massa instabile compresa tra l'arco e il piano campagna, inclusa l'eventuale porzione al di sotto del piano al piede.
- 60 strisce per superficie; lunghezza della base di ciascuna striscia calcolata esattamente sull'arco ($l = r \cdot \Delta\theta$).
- Ricerca su griglia di 18×16 centri e 14 quote del fondo, più i cerchi passanti per il piede; affinamento con ricerca a pattern in tre dimensioni (x_c, y_c, quota del fondo) da cinque punti di partenza.
- Limite $m_\alpha \geq 0{,}2$ applicato alle sole strisce con $\alpha < 0$ (zona al piede), come raccomandato in letteratura.
- Esclusione delle superfici che non riemergono dal piano campagna e di quelle che scendono sotto il substrato rigido, se assegnato.

3. Problemi di riferimento e risultati

Caso	Dati	Fonte
V1 – ACADS 1(a) – pendio omogeneo	H = 10 m, pendenza 1:2 (β = 26,57°), c' = 3,0 kPa, ϕ' = 19,6°, γ = 20,0 kN/m³, terreno asciutto, substrato rigido a 5 m sotto il piede	Giam e Donald (1989), problema di riferimento ACADS; Rocscience, RS2 Slope Stability Verification, Part 1, §1
V2 – Pendio omogeneo a bassa resistenza	H = 5 m, pendenza 1:2, c' = 9,8 kPa, ϕ' = 10°, γ = 17,64 kN/m³, terreno asciutto	Kalatehjari et al. (2012); Himanshu e Burman (2019); arXiv 2412.01598, Tab. 2, caso 1
V3 – Pendio omogeneo di media resistenza	H = 8,5 m, pendenza 1:2, c' = 14,71 kPa, ϕ' = 20°, γ = 18,63 kN/m³, terreno asciutto	Zolfaghari et al. (2005); Himanshu e Burman (2019); arXiv 2412.01598, Tab. 2, caso 2
V4 – Taylor – terreno puramente coesivo, β = 60°	H = 10 m, β = 60°, c_u = 40 kPa, ϕ = 0, γ = 20 kN/m³; $F_s = c_u/(N_s \cdot \gamma \cdot H)$	Taylor (1937), abaco dei numeri di stabilità per ϕ = 0 (N_s = 0,191)
V5 – Taylor – terreno puramente coesivo, β = 75°	H = 10 m, β = 75°, c_u = 40 kPa, ϕ = 0, γ = 20 kN/m³; $F_s = c_u/(N_s \cdot \gamma \cdot H)$	Taylor (1937), abaco dei numeri di stabilità per ϕ = 0 (N_s = 0,219)
V6 – Taylor – parete quasi verticale (caso di confronto)	H = 10 m, β = 89°, c_u = 40 kPa, ϕ = 0, γ = 20 kN/m³	Taylor (1937), N_s = 0,261 per β = 90° (cerchio al piede)

Tab. 1 – Problemi di riferimento

Caso	F_s di riferimento	F_s calcolato	Scarto	Superficie critica (x_c; y_c; r) [m]	Superfici
V1	1,00 (referee); 0,987 (Slide2, Bishop); 0,993 (media Bishop, 18 programmi)	0,985	-0,2 %	-0,54; 28,75; 28,75	6608
V2	1,313 – 1,314 (PSO); 1,343 (Bishop, griglia fitta)	1,342	-0,1 %	3,67; 9,14; 9,89	4359
V3	1,74 (GA); 1,720 (PSO); 1,734 (Bishop, griglia fitta)	1,739	+0,3 %	4,41; 17,31; 17,87	5358
V4	1,047	1,050	+0,3 %	0,53; 14,25; 14,26	4701
V5	0,913	0,918	+0,5 %	-5,84; 19,46; 20,30	4969
V6	0,772 ($N_s \approx 0{,}259$ per $\beta = 89°$)	0,809	+4,7 %	-5,52; 17,54; 18,39	5294

Tab. 2 – Confronto dei coefficienti di sicurezza (origine delle coordinate al piede del pendio)

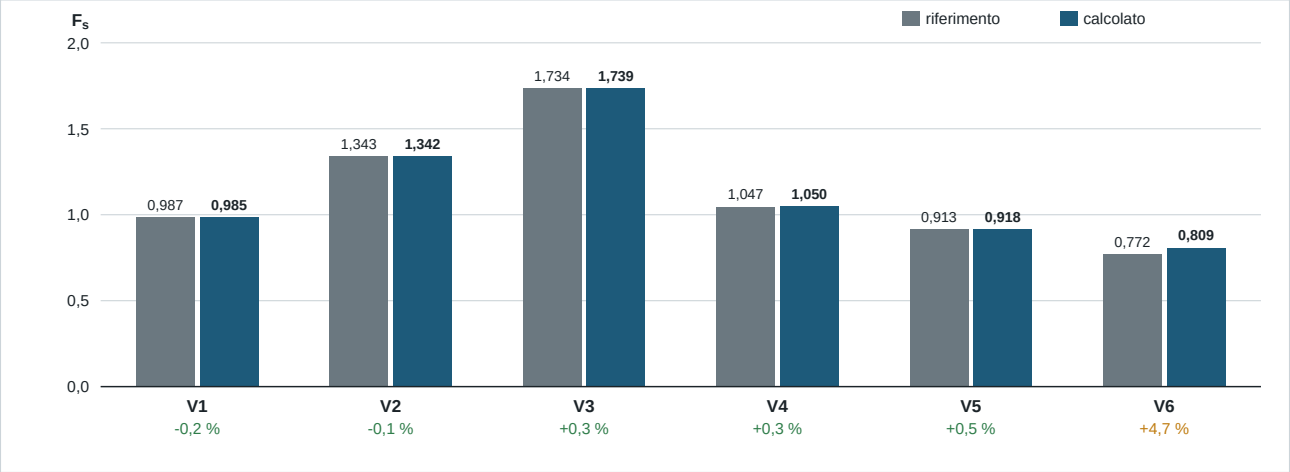

Fig. 1 – Coefficienti di sicurezza di riferimento e calcolati, con scarto percentuale

Per V1 lo scarto è riferito al valore di Bishop ottenuto con Slide2 (0,987): il valore del referee (1,00) è una soluzione di consenso fra metodi diversi. Per V2 e V3 lo scarto è riferito alla soluzione di Bishop con ricerca fitta riportata nella stessa fonte; i valori ottenuti con algoritmi di ottimizzazione (PSO, GA) differiscono tra loro fino al 2%.

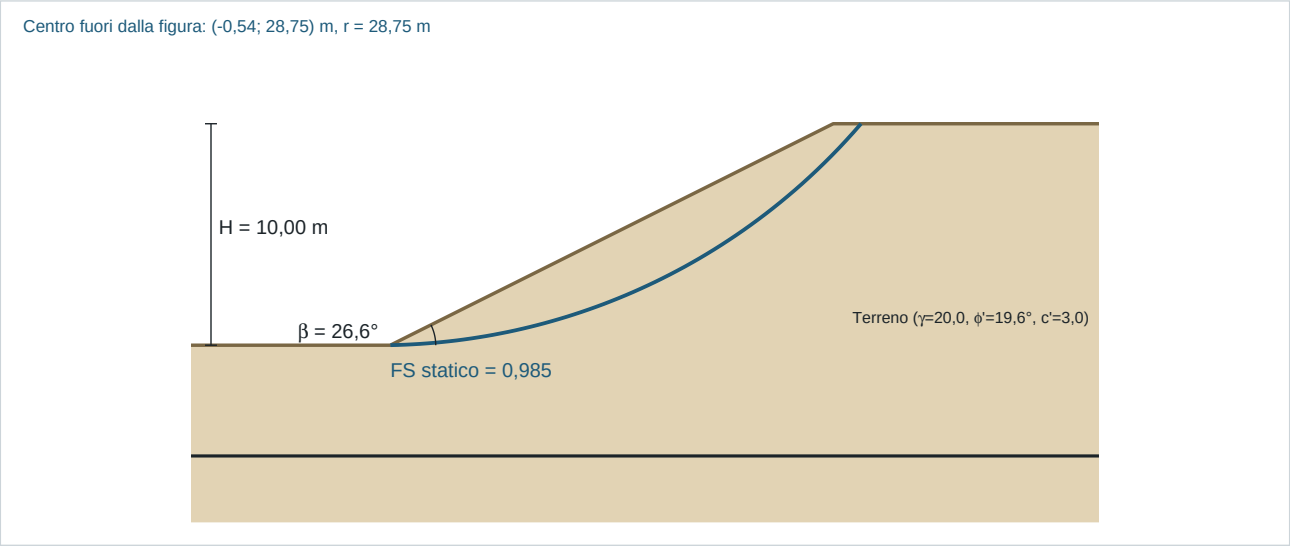

Fig. 2 – Caso V1: superficie critica calcolata, F_s = 0,985 (linea spessa: substrato rigido)

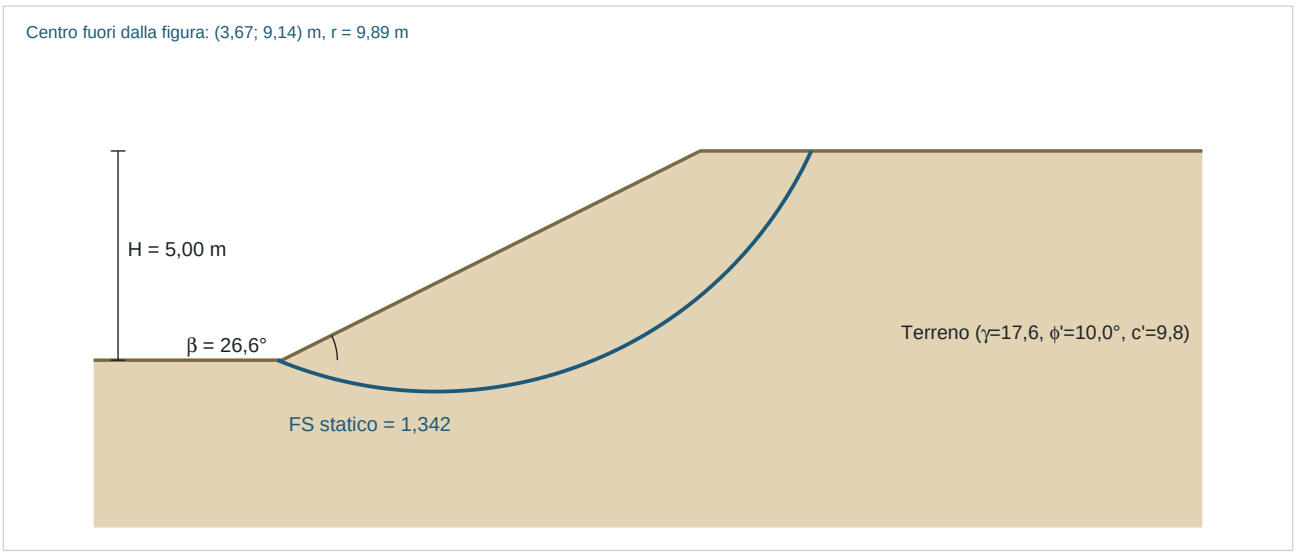

Fig. 3 – Caso V2: superficie critica calcolata, F_s = 1,342

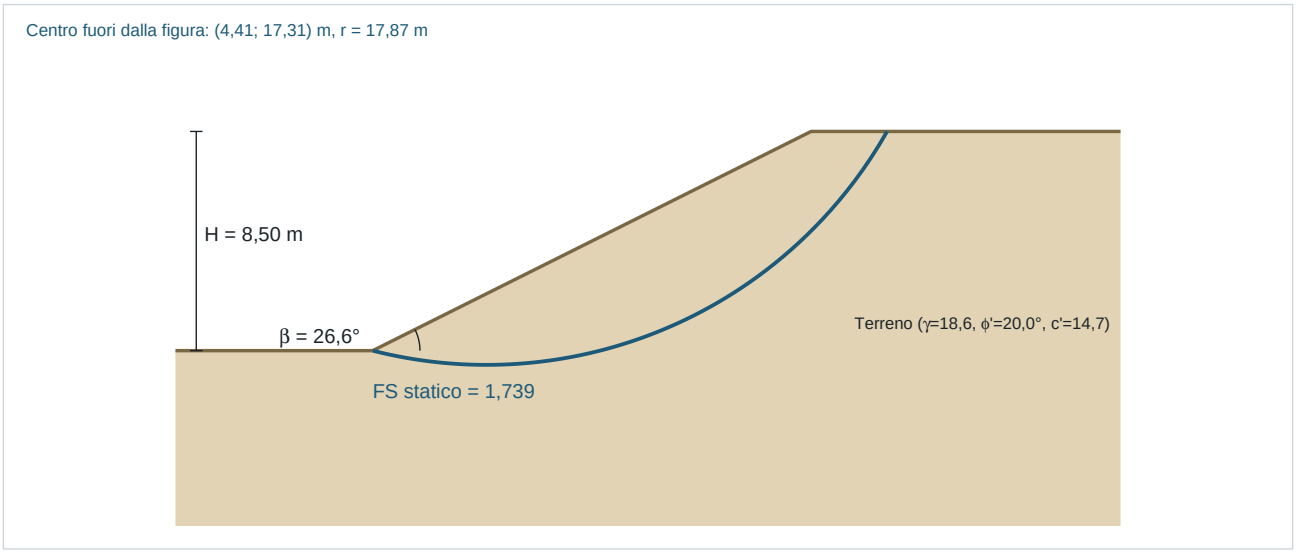

Fig. 4 – Caso V3: superficie critica calcolata, F_s = 1,739

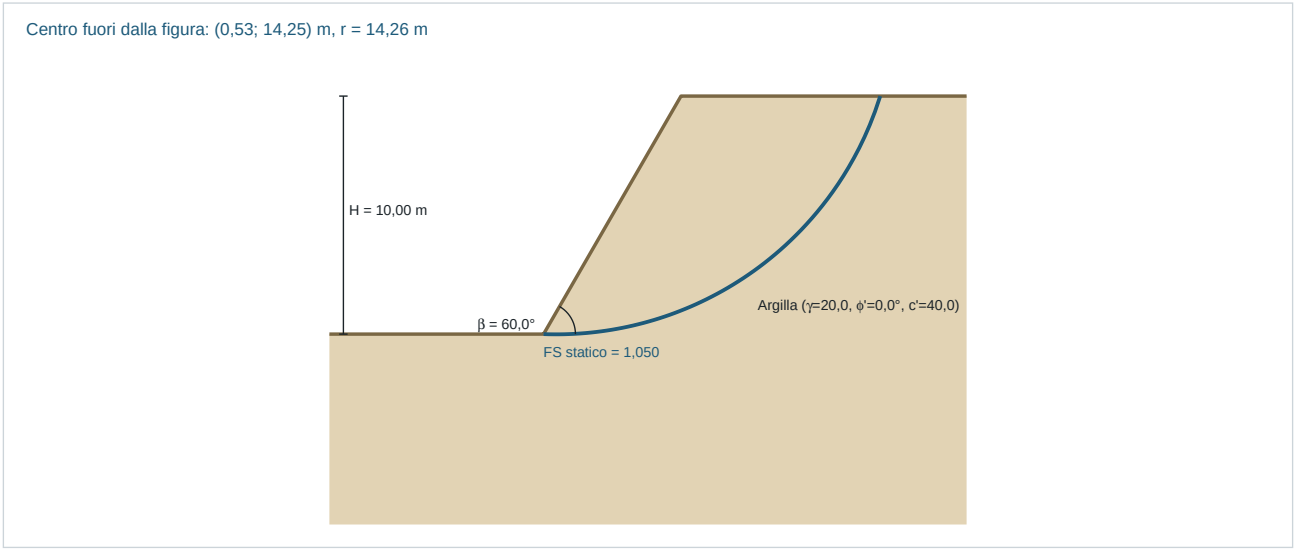

Fig. 5 – Caso V4: superficie critica calcolata, F_s = 1,050

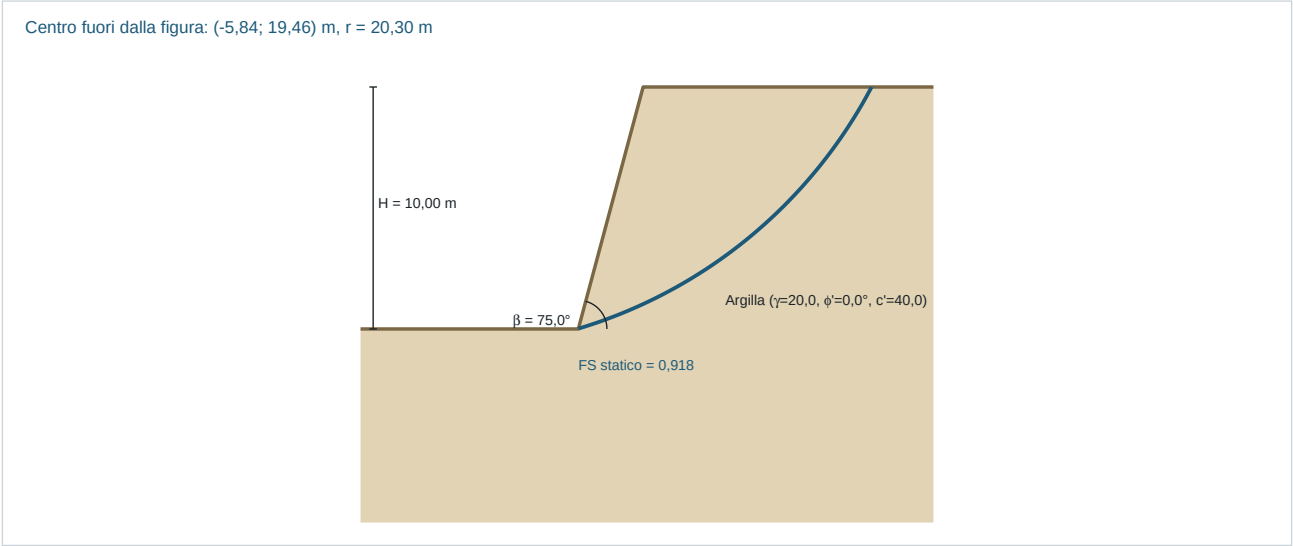

Fig. 6 – Caso V5: superficie critica calcolata, F_s = 0,918

4. Anomalie rilevate e correzioni

La prima esecuzione dei casi di riferimento ha evidenziato scarti fino al 12% sui pendii ripidi in terreno coesivo (V5), con coefficienti di sicurezza sottostimati. L'analisi delle superfici critiche ha individuato tre cause, tutte corrette prima delle esecuzioni riportate in Tab. 2:

Anomalia	Effetto	Correzione
Accettazione di cerchi la cui estremità superiore resta sotto il piano campagna: la massa veniva chiusa da un taglio verticale privo di resistenza	F_s sottostimato fino al 12–15% su pendii ripidi	Esclusione delle superfici che non riemergono dal piano campagna a entrambe le estremità
Lunghezza della base delle strisce approssimata con b/cosα e limite $m_\alpha \geq 0{,}2$ applicato anche alle strisce con $\alpha > 0$	Resistenza coesiva sottostimata nelle strisce molto inclinate	Lunghezza esatta sull'arco; limite su m_α solo per $\alpha < 0$
Griglia dei centri troppo ristretta verso valle e affinamento da un solo punto di partenza	Minimo non raggiunto (scarto residuo 2–3% su V5)	Griglia estesa a –1,2·H, cerchi per il piede, affinamento 3D da cinque punti

Tab. 3 – Anomalie e correzioni

Le correzioni hanno ridotto il coefficiente di sicurezza del caso di esempio dell'applicativo da 1,247 a 1,240 in condizioni statiche e da 1,350 a 1,336 in condizioni sismiche: l'effetto sui pendii di inclinazione usuale è modesto.

5. Discussione del caso V6 (parete quasi verticale)

Per $\beta = 89°$ il solutore restituisce F_s = 0,809, circa il 5% in più del valore dell'abaco di Taylor (0,772). Una ricerca esaustiva indipendente, eseguita con passo di 0,25 m sui centri e sei quote del fondo, ha fornito 0,815, confermando che il solutore raggiunge il minimo del proprio modello.

La differenza è dovuta alla definizione della massa instabile. Per le pareti molto ripide il cerchio critico ha il centro a valle del piede e l'arco scende al di sotto del piano al piede: il solutore, come i programmi commerciali (Slide2, SLOPE/W), include nella massa anche il terreno compreso tra l'arco e il piano al piede, che ha effetto stabilizzante; il cerchio al piede di Taylor considera invece soltanto l'arco tra il piede e il ciglio. Una verifica indipendente che esclude quella porzione restituisce 0,778, in accordo con Taylor. Per pareti con inclinazione superiore a 80° in terreni coesivi si raccomanda pertanto un controllo con superfici piane o composite.

6. Ambito non coperto dalla validazione

- Contributo dei chiodi e dei pali alla stabilità: non sono stati reperiti esempi pubblicati liberamente accessibili e completi di tutti i dati. L'esempio di progetto del manuale FHWA GEC 7 (2015, Appendice C) è il riferimento indicato per il completamento della validazione.

- Azione sismica pseudostatica e pressioni neutre: i casi ACADS 1(d) e 3(a) richiedono strati inclinati o superfici non circolari, non rappresentabili nel modello a strati orizzontali.
- Verifiche strutturali e di sfilamento dei rinforzi: controllate per coerenza interna (azioni di progetto non superiori alle resistenze, diagrammi delle sollecitazioni in equilibrio con annullamento in punta).

7. Conclusioni

Il solutore di Bishop semplificato riproduce i problemi di riferimento su pendii di inclinazione usuale con scarti non superiori allo 0,5%, sia per terreni dotati di attrito e coesione sia per terreni puramente coesivi. La validazione ha consentito di individuare e correggere tre anomalie che portavano a sottostimare il coefficiente di sicurezza sui pendii ripidi. Il contributo dei rinforzi resta da validare su un esempio pubblicato completo.

Fonti

- Rocscience – RS2 Slope Stability Verification Manual, Part 1 (ACADS 1(a), 1(c), 1(d), 3(a)): rocscience.com/assets/verification-and-theory/RS2/RS2_SlopeStabilityVerification_Part1.pdf
- Giam P.S.K., Donald I.B. (1989) – Example problems for testing soil slope stability programs. Civil Eng. Research Report 8/1989, Monash University (ACADS).
- An efficient slope stability algorithm with physically consistent parametrisation of slip surfaces – arXiv 2412.01598, Tab. 2.
- Kalatehjari R. et al. (2012); Himanshu N., Burman A. (2019); Zolfaghari A.R. et al. (2005), citati in arXiv 2412.01598.
- Taylor D.W. (1937) – Stability of earth slopes. J. Boston Soc. Civil Eng., 24(3).
- FHWA-NHI-14-007 (2015) – Geotechnical Engineering Circular No. 7, Soil Nail Walls, Appendice C.