RAPPORTO DI VALIDAZIONE

Motore di calcolo «Parete chiodata con spritz-beton – NTC 2018»

Confronto con esempi numerici pubblicati e ricalcolo indipendente – 16/10/2026

1. Scopo e criterio

Il presente rapporto documenta la validazione del motore di calcolo, come richiesto dalle NTC 2018 §10.2 per l'uso di codici di calcolo («il progettista deve controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati»). La validazione è articolata in tre livelli:

- A – Benchmark di stabilità dei pendii senza rinforzi: problema ACADS 1(a) (Giam & Donald, 1989), riportato come Verification #1 nel manuale di verifica Rocscience Slide.
- B – Benchmark di parete chiodata: Example 1 del manuale utente FHWA SNAP-2 (Soil Nail Analysis Program), con stabilità globale calcolata col metodo di Bishop semplificato.
- C – Ricalcolo indipendente delle singole formule (coefficienti di spinta, capacità portante, resistenze del chiodo e del paramento), confrontato con valori tabellati di letteratura e con un'implementazione separata in Python.

Per i benchmark A e B il motore è stato eseguito con coefficienti parziali unitari sui parametri del terreno (M1) e senza sovraccarico, in modo da riprodurre le condizioni degli esempi originali; per il caso B le resistenze dei chiodi sono state assunte pari ai valori ammissibili di SNAP-2.

2. Benchmark A – ACADS 1(a)

Pendio omogeneo di altezza 10 m con pendenza 1:2, terreno con γ = 20 kN/m³, c' = 3 kPa, φ' = 19,6°, senza falda né carichi esterni. Il valore di riferimento (referee) è FS = 1,00; il codice commerciale Slide fornisce FS = 0,987 con Bishop semplificato.

Fonte	Metodo	FS	Scarto rispetto al motore
Riferimento ACADS (Giam & Donald)	—	1,000	-1,5 %
Rocscience Slide	Bishop semplificato	0,987	-0,2 %
Rocscience Slide	Spencer / GLE	0,986	—
Questo motore	Bishop semplificato	0,985	—
Questo motore, griglia 2,5× più fitta	Bishop semplificato	0,985	0,01 %

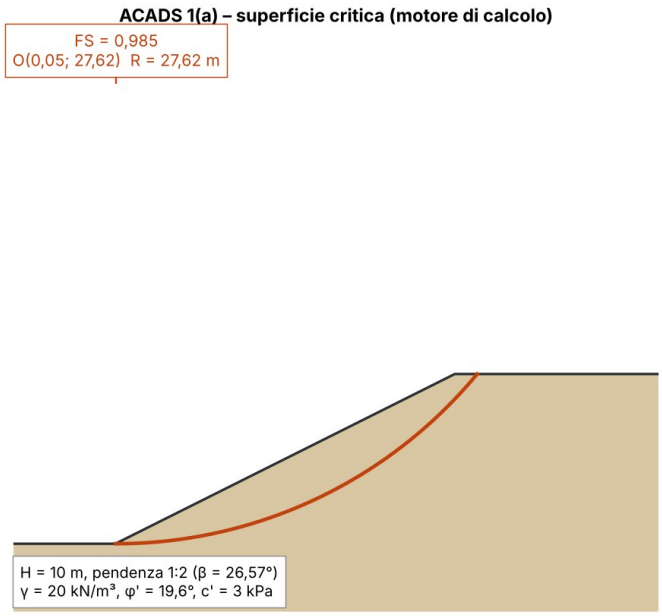

Figura 1 – ACADS 1(a): superficie critica individuata dal motore (origine al piede).

Esito: scarto -0,2 % rispetto a Slide e -1,5 % rispetto al riferimento; la soluzione è stabile al raffinamento della griglia di ricerca. Validazione superata.

3. Benchmark B – FHWA SNAP-2, Example 1

Parete chiodata in spritz-beton di altezza 31,2 ft (9,51 m), paramento inclinato di 10° sulla verticale, terrapieno orizzontale. Dati originali (unità US) e conversione adottata:

Grandezza	Valore originale	Valore SI adottato
Altezza parete	31,2 ft	9,510 m
Inclinazione paramento	10° dalla verticale	β = 80°
Peso di volume	114,5 lbf/ft³	17,99 kN/m³
Angolo d'attrito	34°	34°
Coesione	104 lbf/ft²	4,98 kPa
Aderenza ultima bulbo-terreno	15 lbf/in²	103,4 kPa
Chiodi	6 file, L = 25 ft, Sh = Sv = 5 ft, α = 15°	L = 7,62 m, S = 1,524 m
Prima fila	3,28 ft dal ciglio	1,00 m
Perforo	8,0 in	203,2 mm
Barra	#8 (1 in), A = 0,79 in², fy = 60 ksi	Ø25,4 mm, fy = 413,7 MPa
Resistenza ammissibile a sfilamento	φ = 0,50 × Qu (Qu = 4524 lbf/ft)	qs,d = 51,7 kPa
Resistenza ammissibile del tendine	0,55 × fy·A	116,0 kN
Resistenza ammissibile in testa	TF = 9939 lbf	44,2 kN
FS globale minimo SNAP-2	Bishop semplificato	1,93

Configurazione del motore	FS	Scarto vs SNAP-2
Adottata (componente tangente + normale del chiodo)	1,857	-3,8 %
Griglia di ricerca 2,5× più fitta	1,857	-3,8 %
Uscita superficie ≥ 9 ft (come nell'esempio)	1,857	-3,8 %

Solo componente tangente del chiodo (più cautelativa)	1,574	-18,4 %
Pendio senza chiodi (solo riferimento)	0,626	—

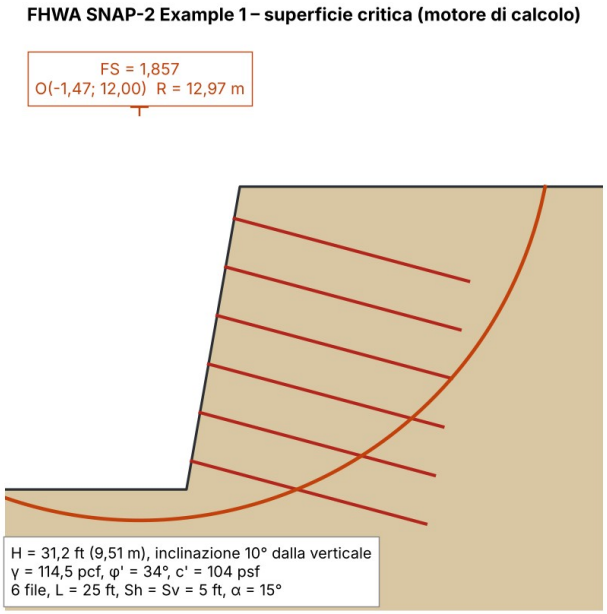

Figura 2 – SNAP-2 Example 1: superficie critica individuata dal motore.

Esito: il motore fornisce FS = 1,857 contro 1,93 di SNAP-2 (scarto -3,8 %, a favore di sicurezza). Lo studio FHWA-NHI-17-068 (2017) indica, per lo stesso tipo di analisi, differenze attese del 3–5 % tra SNAP-2 e Slide e fino al 7–10 % con SNAIL, e documenta che SNAP-2 tende a fornire FS più elevati degli altri codici. Lo scarto ottenuto rientra quindi nella dispersione fisiologica tra codici di calcolo. Validazione superata.

Nota: considerando la sola componente tangente della forza nel chiodo il FS scende a 1,574; questa ipotesi, presente nella prima versione del motore, risultava eccessivamente cautelativa ed è stata sostituita con la formulazione completa.

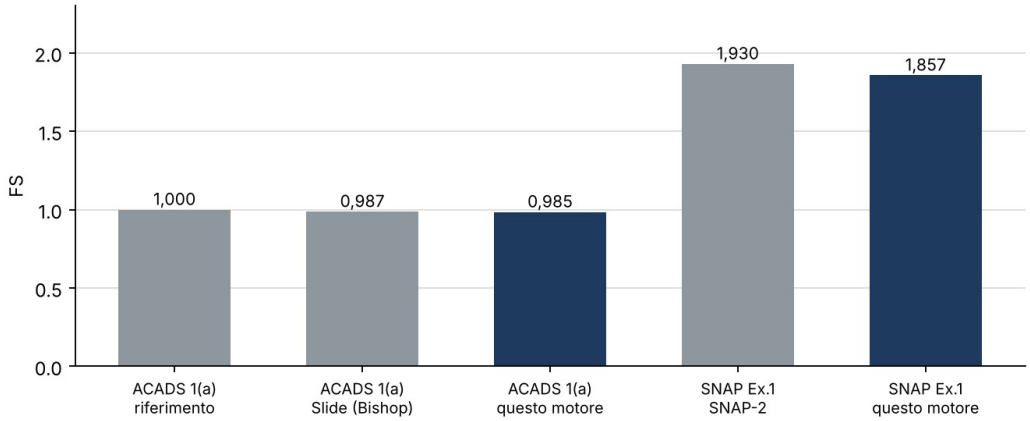

Figura 3 – Sintesi dei confronti sui fattori di sicurezza globali.

4. Ricalcolo indipendente delle formule

Le grandezze seguenti, relative all'esempio di progetto di default (H = 6 m, β = 70°, q = 20 kPa), sono state ricalcolate con un'implementazione indipendente in Python e, ove disponibili, confrontate con valori tabellati di letteratura.

Grandezza	Ricalcolo / letteratura	Motore	u.m.	Scarto	Esito	Rif.

Ka Coulomb (β=70°, φ=30°, δ=0)	0,4979	0,4979	–	0,000 %	OK	Coulomb (1776)
Area barra As	615,7522	615,7522	mm²	0,000 %	OK	–
Rt,d = As·fyk/γs	240,9465	240,9465	kN	0,000 %	OK	NTC §4.1.2.1.1.3
qs,d = qs/(ξ·γR)	46,2963	46,2963	kPa	0,000 %	OK	NTC Tab. 6.6.I, 6.6.III
La fila 4	7,3027	7,3027	m	0,000 %	OK	Culmann
Ra,d fila 4 = π·Dh·La·qs,d	138,0775	138,0775	kN	0,000 %	OK	NTC §6.6.2
T_Ed fila 4 (A1+M1)	124,7727	124,7727	kN	0,000 %	OK	equilibrio locale
l0 Schlosser	0,2839	0,2839	m	0,000 %	OK	Schlosser (1983)
V_Ed = ½·pu·Dh·l0	9,2276	9,2276	kN	0,000 %	OK	Schlosser (1983)
V_Rd = Av·fyk/(√3·γs)	88,5605	88,5605	kN	0,000 %	OK	NTC §4.2.4.1.2.4
T0 = Tmax·[0,6+0,2(Smax−1)]	87,3409	87,3409	kN	0,000 %	OK	FHWA GEC7
MRd paramento	14,6039	14,6039	kNm/m	0,000 %	OK	NTC §4.1.2.3.4.2
VRd punzonamento	129,6305	129,6305	kN	0,000 %	OK	EC2 §6.4.4
Nq (φ=30°) – tabella Vesic 18,40	18,4000	18,4011	–	0,006 %	OK	Vesic (1973)
Nc (φ=30°) – tabella Vesic 30,14	30,1400	30,1396	–	-0,001 %	OK	Vesic (1973)
Nγ (φ=30°) – tabella Vesic 22,40	22,4000	22,4025	–	0,011 %	OK	Vesic (1973)
Ka Rankine (φ=30°) = 1/3	0,3333	0,3333	–	0,000 %	OK	Rankine (1857)
kh = βs·S·ag/g	0,0741	0,0741	–	0,000 %	OK	NTC §7.11.3.5.2
Ka Rankine φ=30°	0,3333	0,3333	–	0,000 %	OK	Rankine
Ka Rankine φ=34°	0,2827	0,2827	–	0,000 %	OK	Rankine
Ka Coulomb φ=30°, δ=20°, parete verticale	0,2973	0,2973	–	0,005 %	OK	Das, tab. Coulomb
KAE Mononobe-Okabe φ=30°, kh=0,2 (formula in coseni)	0,4733	0,4733	–	0,000 %	OK	Mononobe-Okabe

5. Correzioni introdotte a seguito della validazione

- Esclusione delle superfici circolari che non intersecano realmente il piano campagna agli estremi (tagli verticali spuri, che generavano FS non fisici).
- Per la parete chiodata, ricerca limitata alle superfici passanti al piede o al di sotto: il paramento armato impedisce cinematismi che emergono sul fronte.
- Introduzione della componente normale della forza nel chiodo (incremento della resistenza per attrito sulla superficie di scorrimento).

A seguito delle correzioni, per l'esempio di progetto il FS globale statico (A2+M2+R2) passa da 1,384 a 1,569.

6. Limiti della validazione

- Il manuale FHWA GEC 7 (FHWA-NHI-14-007, Appendice C) contiene un esempio completo di progetto, comprese le verifiche del paramento, che non è stato possibile scaricare integralmente: si consiglia di aggiungerlo come terzo benchmark.
- Le verifiche del paramento sono eseguite con le formule EC2/NTC (punzonamento sul perimetro a 2d) e non sono direttamente confrontabili con le formule FHWA/ACI di SNAP-2: i valori NTC risultano più cautelativi.
- Il calcolo dei carichi sui chiodi per equilibrio locale (Ka pieno) è un'ipotesi cautelativa propria del motore, non confrontabile con le distribuzioni empiriche FHWA.
- La validazione copre terreno omogeneo e superfici circolari; stratigrafie e superfici non circolari non sono gestite dal motore.

7. Fonti

- Giam P.S.K., Donald I.B. (1989). Example problems for testing soil slope stability programs. Civil Engineering Research Report No. 8/1989, Monash University (ACADS).
- Rocscience – Slide2 Slope Stability Verification Manual, Verification #1. https://www.rocscience.com/assets/verification-and-theory/Slide2/Slide_SlopeStabilityVerification.pdf
- FHWA – SNAP (Soil Nail Analysis Program) User's Manual, Example 1. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/50009
- FHWA-NHI-17-068 (2017) – Evaluation of Limit Equilibrium Analysis Methods for Design of Soil Nail Walls. https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/nhi17068.pdf
- FHWA-NHI-14-007 (2015) – GEC 7, Soil Nail Walls Reference Manual. https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/nhi14007.pdf
- Vesic A.S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. JSMFD, ASCE, 99(SM1).
- Das B.M. – Principles of Foundation Engineering (tabelle dei coefficienti di Coulomb).