Report di validazione numerica

Programma «Terre Armate NTC 2018» — opere di sostegno in terra rinforzata con geosintetici

Voce	Contenuto
Programma	Terre Armate NTC 2018.html (applicazione web, motore di calcolo in JavaScript)
Versione validata	2 — corretta a seguito della presente validazione (la versione 1 è quella del progetto «terra armata» prima delle modifiche)
Normativa	D.M. 17/01/2018 (NTC 2018), Circolare n. 7/2019; FHWA-NHI-10-024; UNI EN 1998-5
Elaborati del programma	Relazione di calcolo in PDF; disegni DXF (sezione tipo, prospetto, pianta, modello 3D, distinta di taglio)
Data	22/10/2026

Esito. La versione 2 supera tutti i 96 confronti (96/96) entro le tolleranze dichiarate. La versione 1 ne superava 91/96: i 5 confronti non superati hanno portato a due correzioni del calcolo (coefficiente di spinta interna per paramento inclinato, area di influenza dello strato più alto) e a tre correzioni degli elaborati (codifica del simbolo di grado nel DXF, sovrapposizione del cartiglio, distinta di taglio mancante).

1. Sintesi

Il motore di calcolo del programma è stato eseguito fuori dal browser sullo stesso codice contenuto nella pagina, senza modifiche, e confrontato con 96 valori di riferimento: soluzioni in forma chiusa della letteratura geotecnica, un problema di riferimento internazionale per la stabilità dei pendii (ACADS), un esempio FHWA di muro in terra rinforzata e un ricalcolo indipendente dell'intero caso di progetto predefinito. I valori di riferimento sono stati calcolati con un codice separato (Python) oppure ripresi dalle fonti citate, mai dal programma stesso.

Gruppo	Oggetto	Prove	v1 superate	v2 superate	|scarto| max v2
B1	Spinta attiva di Rankine (paramento verticale)	16	16	16	0,17 %
B2	Spinta di Coulomb con paramento inclinato	12	8	12	0,00 %
B3	Spinta sismica di Mononobe-Okabe	6	6	6	0,00 %
B4	Capacità portante (Vesic, Brinch Hansen, Paolucci-Pecker)	20	20	20	0,03 %
B5	Stabilità globale: problema ACADS 1(a)	3	3	3	4,64 %
B6	Azione sismica NTC 2018	22	22	22	0,00 %
B7	Stabilità interna FHWA (paramento verticale)	7	6	7	0,00 %
B8	Scorrimento: esempio FHWA (2001)	2	2	2	1,38 %
B9	Caso completo: ricalcolo indipendente delle verifiche esterne	8	8	8	0,00 %
	Totale	96	91	96	

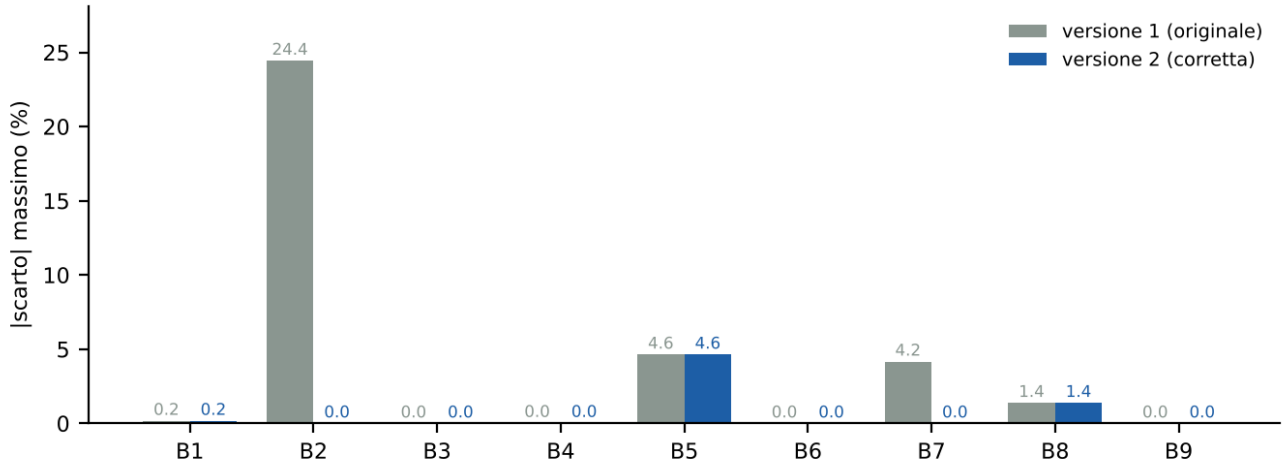


Figura 1 — Scarto massimo per gruppo di prove. Gli scarti della versione 1 nei gruppi B2 e B7 derivano dai due errori corretti; gli scarti residui della versione 2 (B5, B8) sono dovuti alla ricerca della superficie critica e ad arrotondamenti delle fonti.

2. Oggetto e metodo della validazione

- **Codice provato.** Le funzioni di calcolo (azione sismica, cuneo di spinta, strati, capacità portante, verifiche interne ed esterne, Bishop) sono state estratte dalla pagina ed eseguite in Node.js senza alcuna modifica, sia nella versione 1 sia nella versione 2.
- **Riferimenti.** Per le soluzioni in forma chiusa il valore di riferimento è calcolato con un codice indipendente scritto in Python a partire dalle formule pubblicate. Per ACADS ed FHWA il riferimento è il valore numerico pubblicato.
- **Tolleranze.** 0,5% per le formule chiuse (il programma cerca il piano di rottura con passo 0,2°); 0,1% per i parametri sismici tabellari; 3% per il fattore di sicurezza ACADS (dispersione tra codici nel confronto originale); 5% per l'esempio FHWA (ipotesi di calcolo dell'esempio non riportate per intero nella fonte).
- **Elaborati.** La funzione che scrive il DXF è stata eseguita realmente e il file controllato con un lettore indipendente e con l'importazione in LibreOffice Draw. La funzione che scrive la relazione PDF è stata eseguita fino in fondo contro una libreria jsPDF simulata (§5.2).

3. Risultati dei confronti (versione 2)

Per ogni prova: valore di riferimento, valore calcolato dal programma, scarto percentuale (calcolato − riferimento)/riferimento, tolleranza ed esito. La colonna «v1» riporta l'esito della versione originale.

B1 — Spinta attiva di Rankine (paramento verticale)

Fonti: Rankine (1857); Lancellotta, Geotecnica, cap. 'Spinta delle terre'; FHWA-NHI-10-024 §4.4.7: Kr=Ka per geosintetici; Rankine: Kq = Ka; Rankine: ρ = 45°+φ'/2

ID	Grandezza	Riferimento	Calcolato	Scarto	Toll.	v1	v2
B1-25	Ka Rankine, paramento verticale, φ'=25°	0,4059	0,4059	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B1-25r	Kγ rinforzi (forza orizzontale), φ'=25°	0,4059	0,4059	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B1-25q	Kq sovraccarico, φ'=25°	0,4059	0,4059	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B1-25ρ	Inclinazione piano di rottura ρ, φ'=25°	57,5000 °	57,4000 °	-0,17 %	0,5 %	OK	OK
B1-30	Ka Rankine, paramento verticale, φ'=30°	0,3333	0,3333	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B1-30r	Kγ rinforzi (forza orizzontale), φ'=30°	0,3333	0,3333	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B1-30q	Kq sovraccarico, φ'=30°	0,3333	0,3333	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B1-30ρ	Inclinazione piano di rottura ρ, φ'=30°	60,0000 °	60,0000 °	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B1-34	Ka Rankine, paramento verticale, φ'=34°	0,2827	0,2827	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B1-34r	Kγ rinforzi (forza orizzontale), φ'=34°	0,2827	0,2827	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B1-34q	Kq sovraccarico, φ'=34°	0,2827	0,2827	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B1-34ρ	Inclinazione piano di rottura ρ, φ'=34°	62,0000 °	62,0000 °	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B1-38	Ka Rankine, paramento verticale, φ'=38°	0,2379	0,2379	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B1-38r	Kγ rinforzi (forza orizzontale), φ'=38°	0,2379	0,2379	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B1-38q	Kq sovraccarico, φ'=38°	0,2379	0,2379	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B1-38ρ	Inclinazione piano di rottura ρ, φ'=38°	64,0000 °	64,0000 °	+0,00 %	0,5 %	OK	OK

B2 — Spinta di Coulomb con paramento inclinato

Fonti: Coulomb (1776); Das, Principles of Foundation Eng., eq. di Coulomb con δ=0; Equilibrio limite del cuneo (ricerca indipendente); FHWA-NHI-10-024 §4.4.7 / AASHTO LRFD 11.10.6.2: Ka di Coulomb (δ=0) per paramento inclinato

ID	Grandezza	Riferimento	Calcolato	Scarto	Toll.	v1	v2
B2-70-32	Ka Coulomb δ=0, β=70°, φ'=32° (spinta normale al retro)	0,1868	0,1868	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B2-70-32h	Kγ cuneo con trazione orizzontale, β=70°, φ'=32°	0,1545	0,1545	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B2-70-32F	Kγ usato nelle verifiche interne, β=70°, φ'=32°	0,1868	0,1868	-0,00 %	0,5 %	NO	OK
B2-80-30	Ka Coulomb δ=0, β=80°, φ'=30° (spinta normale al retro)	0,2703	0,2703	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B2-80-30h	Kγ cuneo con trazione orizzontale, β=80°, φ'=30°	0,2451	0,2451	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B2-80-30F	Kγ usato nelle verifiche interne, β=80°, φ'=30°	0,2703	0,2703	+0,00 %	0,5 %	NO	OK
B2-60-34	Ka Coulomb δ=0, β=60°, φ'=34° (spinta normale al retro)	0,1092	0,1092	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B2-60-34h	Kγ cuneo con trazione orizzontale, β=60°, φ'=34°	0,0825	0,0825	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B2-60-34F	Kγ usato nelle verifiche interne, β=60°, φ'=34°	0,1092	0,1092	-0,00 %	0,5 %	NO	OK
B2-70-28	Ka Coulomb δ=0, β=70°, φ'=28° (spinta normale al retro)	0,2399	0,2399	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B2-70-28h	Kγ cuneo con trazione orizzontale, β=70°, φ'=28°	0,1958	0,1958	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B2-70-28F	Kγ usato nelle verifiche interne, β=70°, φ'=28°	0,2399	0,2399	+0,00 %	0,5 %	NO	OK

Nota: θ della formula FHWA è misurato dall'orizzontale davanti al muro, quindi θ = 180° − β con la convenzione del programma (β = 70° significa paramento arretrato in sommità). Le righe «Kγ cuneo con trazione orizzontale» provano la funzione di ricerca del cuneo nella modalità usata dalla versione 1.

B3 — Spinta sismica di Mononobe-Okabe

Fonti: Mononobe-Okabe; UNI EN 1998-5 App. E eq. (E.2)-(E.4); Kramer (1996)

ID	Grandezza	Riferimento	Calcolato	Scarto	Toll.	v1	v2
B3-30-0.1-0	KAE·(1∓kv) M-O, φ'=30°, kh=0.1, kv=+0	0,3966	0,3966	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B3-30-0.2-0	KAE·(1∓kv) M-O, φ'=30°, kh=0.2, kv=+0	0,4733	0,4733	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B3-30-0.2-0.1	KAE·(1∓kv) M-O, φ'=30°, kh=0.2, kv=+0.1	0,5039	0,5039	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B3-30-0.2--0.1	KAE·(1∓kv) M-O, φ'=30°, kh=0.2, kv=-0.1	0,4434	0,4434	-0,00 %	0,5 %	OK	OK

ID	Grandezza	Riferimento	Calcolato	Scarto	Toll.	v1	v2
B3-35-0.15-0.075	KAE·(1∓kv) M-O, φ'=35°, kh=0.15, kv=+0.075	0,3796	0,3796	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B3-34-0.25-0	KAE·(1∓kv) M-O, φ'=34°, kh=0.25, kv=+0	0,4504	0,4504	-0,00 %	0,5 %	OK	OK

B4 — Capacità portante (Vesic, Brinch Hansen, Paolucci-Pecker)

Fonti: Vesic (1973); Das, Tab. fattori di capacità portante; Vesic (1973); Das, Tab. fattori; Vesic (1973): Nγ = 2(Nq+1)tanφ; Brinch Hansen (1970) fattori d; Vesic (1975) fattori i (m=2); Paolucci & Pecker (1997) fattori z; Prandtl; Vesic (1975) ic=1-mH/(B'cuNc)

ID	Grandezza	Riferimento	Calcolato	Scarto	Toll.	v1	v2
B4-25q	Nq, φ'=25°	10,6600	10,6621	+0,02 %	0,5 %	OK	OK
B4-25c	Nc, φ'=25°	20,7200	20,7205	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B4-25g	Nγ, φ'=25°	10,8800	10,8763	-0,03 %	0,5 %	OK	OK
B4-28q	Nq, φ'=28°	14,7200	14,7199	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B4-28c	Nc, φ'=28°	25,8000	25,8033	+0,01 %	0,5 %	OK	OK
B4-28g	Nγ, φ'=28°	16,7200	16,7168	-0,02 %	0,5 %	OK	OK
B4-30q	Nq, φ'=30°	18,4000	18,4011	+0,01 %	0,5 %	OK	OK
B4-30c	Nc, φ'=30°	30,1400	30,1396	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B4-30g	Nγ, φ'=30°	22,4000	22,4025	+0,01 %	0,5 %	OK	OK
B4-35q	Nq, φ'=35°	33,3000	33,2961	-0,01 %	0,5 %	OK	OK
B4-35c	Nc, φ'=35°	46,1200	46,1236	+0,01 %	0,5 %	OK	OK
B4-35g	Nγ, φ'=35°	48,0300	48,0288	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B4-40q	Nq, φ'=40°	64,2000	64,1952	-0,01 %	0,5 %	OK	OK
B4-40c	Nc, φ'=40°	75,3100	75,3131	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B4-40g	Nγ, φ'=40°	109,41	109,41	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B4-qa	qlim B=2 m, D=1 m, φ'=30°, carico centrato	782,27 kPa	782,27 kPa	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B4-qb	qlim B=3 m, e=0,25 m, D=1,5 m, φ'=28°, c'=10	1.199,63 kPa	1.199,63 kPa	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B4-qc	qlim con carico inclinato H/V=0,15, φ'=30°	669,01 kPa	669,01 kPa	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B4-qd	qlim sismica kh=0,20 (Paolucci-Pecker), φ'=30°	880,43 kPa	880,43 kPa	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B4-qu	qlim non drenata cu=50 kPa, H=40 kN/m	280,13 kPa	280,13 kPa	+0,00 %	0,5 %	OK	OK

B5 — Stabilità globale: problema ACADS 1(a)

Fonti: Giam & Donald (1989), ACADS; riportato in Rocscience RS2 Verification, prob. 1; Rocscience Slide2, Bishop semplificato (Verification Manual, prob. 1); LUSAS Verification 'Simple slope stability'

ID	Grandezza	Riferimento	Calcolato	Scarto	Toll.	v1	v2
B5-ref	ACADS 1(a): FS pendio omogeneo 2:1 (valore arbitro)	1,0000	0,9836	-1,64 %	3,0 %	OK	OK
B5-bsh	ACADS 1(a): FS Bishop di un codice commerciale	0,9870	0,9836	-0,34 %	3,0 %	OK	OK
B5-lus	ACADS 1(a): FS Bishop (verifica LUSAS) *(valore di confronto meno accurato)*	0,9400	0,9836	+4,64 %	5,0 %	OK	OK

Geometria ACADS 1(a): pendio 2:1 alto 10 m, c' = 3 kPa, φ' = 19,6°, γ = 20 kN/m³, nessuna falda e nessun rinforzo. Cerchio critico trovato dal programma: centro (0,02; 28,00) m dal piede, R = 28,00 m, passante al piede e interamente sopra il substrato a −5 m del problema originale.

B6 — Azione sismica NTC 2018

Fonti: NTC 2018 Tab. 3.2.IV; NTC 2018 §7.11.6.2.1 (βm=0,38 SLV); NTC 2018 Tab. 7.11.I; NTC 2018 §3.2.1, All. A

ID	Grandezza	Riferimento	Calcolato	Scarto	Toll.	v1	v2
B6-AS	SS cat. A (ag=0,165 g, F0=2,42)	1,0000	1,0000	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-AC	CC cat. A (Tc*=0,30 s)	1,0000	1,0000	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-Ak	kh muro = βm·Ss·ST·ag, cat. A	0,0627	0,0627	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-Ab	βs stabilità globale, cat. A	0,2700	0,2700	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-BS	SS cat. B (ag=0,165 g, F0=2,42)	1,2000	1,2000	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-BC	CC cat. B (Tc*=0,30 s)	1,3995	1,3995	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-Bk	kh muro = βm·Ss·ST·ag, cat. B	0,0752	0,0752	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-Bb	βs stabilità globale, cat. B	0,2400	0,2400	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-CS	SS cat. C (ag=0,165 g, F0=2,42)	1,4604	1,4604	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-CC	CC cat. C (Tc*=0,30 s)	1,5622	1,5622	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-Ck	kh muro = βm·Ss·ST·ag, cat. C	0,0916	0,0916	+0,00 %	0,1 %	OK	OK

ID	Grandezza	Riferimento	Calcolato	Scarto	Toll.	v1	v2
B6-Cb	βs stabilità globale, cat. C	0,2400	0,2400	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-DS	SS cat. D (ag=0,165 g, F0=2,42)	1,8000	1,8000	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-DC	CC cat. D (Tc*=0,30 s)	2,2822	2,2822	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-Dk	kh muro = βm·Ss·ST·ag, cat. D	0,1129	0,1129	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-Db	βs stabilità globale, cat. D	0,2400	0,2400	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-ES	SS cat. E (ag=0,165 g, F0=2,42)	1,5608	1,5608	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-EC	CC cat. E (Tc*=0,30 s)	1,8614	1,8614	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-Ek	kh muro = βm·Ss·ST·ag, cat. E	0,0979	0,0979	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-Eb	βs stabilità globale, cat. E	0,2400	0,2400	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-TRV	TR SLV (VR=50 anni, PVR=10%)	474,56 anni	474,56 anni	+0,00 %	0,1 %	OK	OK
B6-TRD	TR SLD (VR=50 anni, PVR=63%)	50,2890 anni	50,2890 anni	-0,00 %	0,1 %	OK	OK

B7 — Stabilità interna FHWA (paramento verticale)

Fonti: FHWA-NHI-10-024 eq. 4-28: Tmax = Kr·σv·Sv (Kr=Ka); FHWA-NHI-10-024 §4.4.7.e, geosintetici: piano a 45°+φ'/2; FHWA eq. 3-11: Pr = F*·α·σv·C·Le con C=2, F*·α = Ci·tanφ' = 0,8·tanφ'; Equilibrio globale della zona attiva (FHWA §4.4.7: ultimo strato fino alla sommità)

ID	Grandezza	Riferimento	Calcolato	Scarto	Toll.	v1	v2
B7-T0.5	Tmax/1,3 strato y=0.5 m (z=5.5 m), Sv=0,5	13,9944 kN/m	13,9944 kN/m	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B7-La0.5	La strato y=0.5 m (zona attiva di Rankine)	0,2659 m	0,2659 m	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B7-Pr0.5	Pr sfilamento strato y=0.5 m (Le = L-La)	505,81 kN/m	505,81 kN/m	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B7-T3.0	Tmax/1,3 strato y=3.0 m (z=3.0 m), Sv=0,5	7,6333 kN/m	7,6333 kN/m	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B7-La3.0	La strato y=3.0 m (zona attiva di Rankine)	1,5951 m	1,5951 m	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B7-Pr3.0	Pr sfilamento strato y=3.0 m (Le = L-La)	198,43 kN/m	198,43 kN/m	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B7-trib	Somma delle aree di influenza degli strati = H *(la fascia superiore non è assegnata a nessuno strato)*	6,0000 m	6,0000 m	+0,00 %	0,5 %	NO	OK

B8 — Scorrimento: esempio FHWA (2001)

Fonti: FHWA-NHI-00-043 (2001), esempio riportato in GeoStudio SLOPE/W 'Stability of a MSE wall'; Rankine

ID	Grandezza	Riferimento	Calcolato	Scarto	Toll.	v1	v2
B8-FS	FS scorrimento muro MSE H=7,8 m, L=5,5 m, q=9,4 kPa (azioni non fattorizzate)	2,1900	2,1597	-1,38 %	5,0 %	OK	OK
B8-Ka	Ka terreno a tergo φ'=30°	0,3333	0,3333	-0,00 %	0,5 %	OK	OK

B9 — Caso completo: ricalcolo indipendente delle verifiche esterne

Fonti: Coulomb; FHWA θ=180°-β; Ricalcolo indipendente (Python) con NTC 2018 Tab. 6.5.I e formule di §B4

ID	Grandezza	Riferimento	Calcolato	Scarto	Toll.	v1	v2
B9-Ka	Ka terreno a tergo, β=70°, φ'=30° (Coulomb δ=0)	0,2121	0,2121	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B9-slE	Scorrimento statico: Ed	124,51 kN/m	124,51 kN/m	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B9-slR	Scorrimento statico: Rd = V·tanδb/1,1	202,89 kN/m	202,89 kN/m	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B9-ovE	Ribaltamento: Mrib	549,23 kNm/m	549,23 kNm/m	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B9-ovR	Ribaltamento: Mstab/1,15	1.780,34 kNm/m	1.780,34 kNm/m	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B9-bE	Capacità portante: Ed = V (A1)	845,68 kN/m	845,68 kN/m	+0,00 %	0,5 %	OK	OK
B9-ecc	Eccentricità |e| (A1)	0,8286 m	0,8286 m	-0,00 %	0,5 %	OK	OK
B9-bR	Capacità portante: Rd = qlim·B'/1,4	1.289,07 kN/m	1.289,07 kN/m	+0,00 %	0,5 %	OK	OK

4. Anomalie della versione 1 e correzioni

4.1 Coefficiente di spinta interna con paramento inclinato (calcolo)

La versione 1 ricavava K_γ per le trazioni nei rinforzi da un cuneo in cui la forza incognita è orizzontale. Il risultato è un valore minore del coefficiente di Coulomb con δ = 0 che FHWA-NHI-10-024 (§4.4.7) e AASHTO LRFD (11.10.6.2) prescrivono per i paramenti inclinati: −17% per β = 70° e φ' = 32°, fino a −24% per β = 60°. Per paramento verticale le due formulazioni coincidono. Le trazioni di progetto risultavano quindi sottostimate rispetto alla prassi di riferimento. Nella versione 2 il coefficiente interno, statico e sismico, è quello di Coulomb (δ = 0) assunto come orizzontale, e coincide con la formula chiusa entro lo 0,01%.

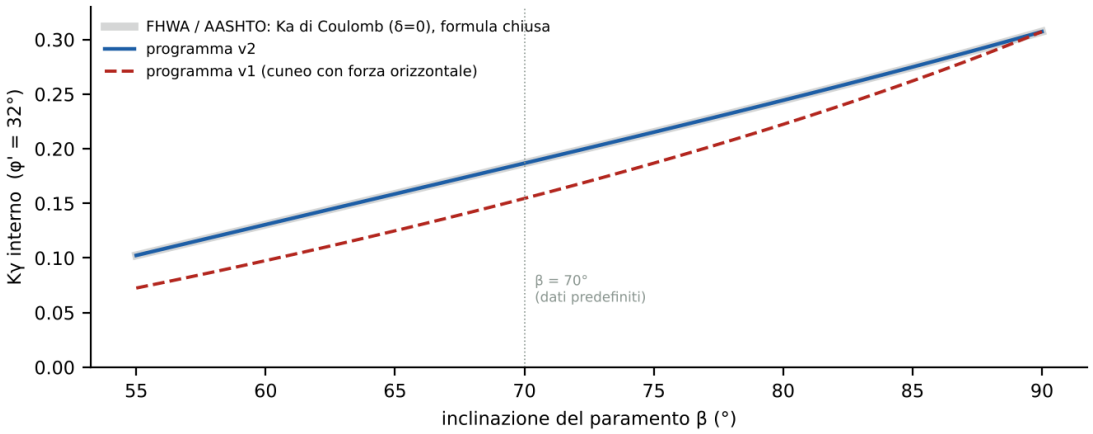


Figura 2 — K_γ interno al variare dell'inclinazione del paramento, φ' = 32°.

4.2 Area di influenza dello strato più alto (calcolo)

Nella versione 1 l'area di influenza di ogni strato era $S_v/2$ sopra e sotto la sua quota; la fascia tra l'ultimo strato e il coronamento (0,25 m con S_v = 0,5 m e H = 6 m) non era assegnata a nessun rinforzo, per cui la somma delle aree valeva H − $S_v/2$ invece di H (prova B7-trib). Con sovraccarico la spinta di quella fascia non è trascurabile. Nella versione 2 lo strato più alto raccoglie la fascia fino al coronamento, come in FHWA §4.4.7.

4.3 Effetto sul caso predefinito

Grandezza	Versione 1	Versione 2	Variazione
K_γ statico interno	0,1545	0,1868	+20,9 %
$K_{\gamma E}$ sismico interno	0,2120	0,2495	+17,7 %
T_{max} di progetto (kN/m)	12,86	15,49	+20,5 %
T_d resistente (kN/m)	51,65	51,65	—
Area di influenza strato più alto (m)	0,50	0,75	
Lunghezza dei rinforzi L (m)	5,00	5,00	invariata

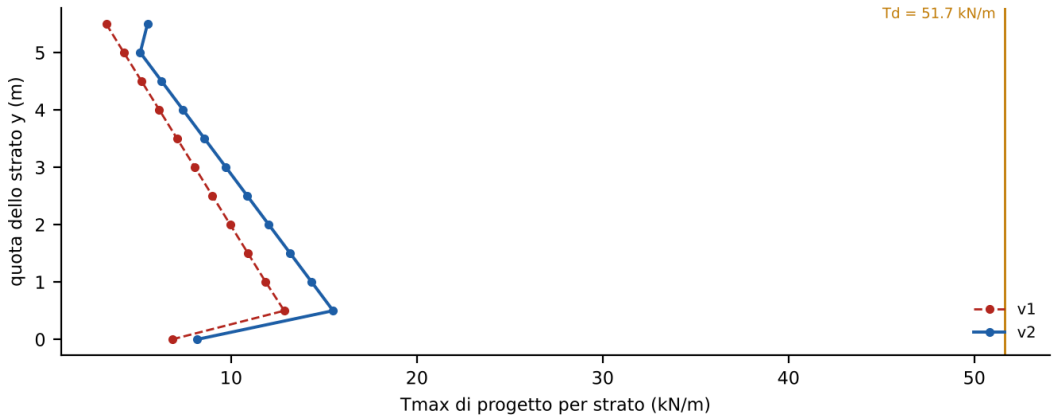


Figura 3 — Trazioni di progetto per strato nel caso predefinito (H = 6 m, β = 70°, q = 20 kPa). Il caso resta verificato, ma con margine minore: in progetti con rinforzi più sfruttati la versione 1 poteva dare esito positivo dove la versione 2 non lo dà.

4.4 Elaborati

- **Simbolo di grado nel DXF.** Il DXF è in formato R12 (AC1009), che non usa UTF-8: il simbolo «°» scritto come UTF-8 compare come «Â°» in AutoCAD. Nella versione 2 è scritto con il codice di controllo %%d.

- **Cartiglio.** Il cartiglio largo 26 m si sovrapponeva alla pianta quando la sezione è stretta; ora la sua larghezza è limitata allo spazio disponibile.
- **Distinta di taglio.** Mancava: è stata aggiunta nel DXF (tabella e sviluppo della striscia tipo, layer DISTINTA, giunti tra le strisce in prospetto e pianta), nella relazione PDF (§9 della relazione), nella pagina e nel testo copiabile. Nuovo dato di ingresso: larghezza del rotolo.

5. Verifica degli elaborati prodotti dal programma

5.1 Disegni DXF

Sono stati generati i DXF di due casi: il caso A con i dati predefiniti (β = 70°) e il caso B con paramento verticale, H = 7,8 m e rotolo da 4 m. Ogni file è stato letto con un lettore indipendente (coppie codice/valore, sezioni, tabella dei layer, entità) e importato in LibreOffice Draw senza errori.

Controllo	Caso A	Caso B
Formato e chiusura (AC1009, EOF)	OK	OK
Entità su layer non definiti	nessuna	nessuna
POLYLINE chiuse da SEQEND	18/18	19/19
Linee / testi	148 / 181	178 / 192
Facce 3D (3DFACE) del modello	20	21
Viste presenti	sezione tipo, prospetto, pianta, modello 3D, distinta, sviluppo striscia	idem
Testi con caratteri non ASCII	nessuno	nessuno
Importazione in LibreOffice Draw	riuscita	—

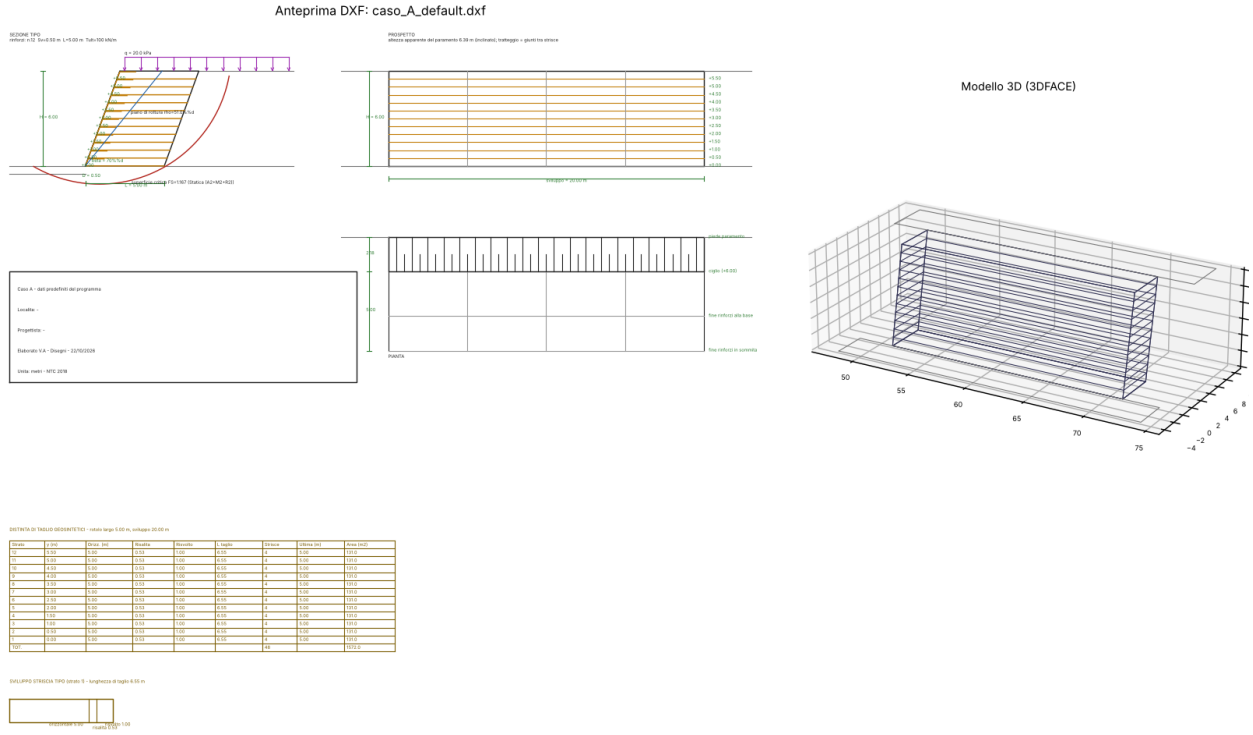


Figura 4 — Anteprima del DXF del caso A, ridisegnata dalle entità lette nel file. A sinistra sezione tipo, prospetto con i giunti tra le strisce, pianta, cartiglio e distinta di taglio con lo sviluppo della striscia tipo; a destra il modello 3D. Il codice %%d compare come testo in questa anteprima e come «°» nei programmi CAD.

Distinta di taglio del caso A (estratto)

Strato	y (m)	Orizzontale	Risalita	Risvolto	L taglio (m)	Strisce	Area (m²)
12	5,50	5,00	0,53	1,00	6,55	4	131,0
11	5,00	5,00	0,53	1,00	6,55	4	131,0
10	4,50	5,00	0,53	1,00	6,55	4	131,0
…							
1	0,00	5,00	0,53	1,00	6,55	4	131,0
Totale					314,4 m	48	1.572,0

Controllo manuale, strato 1: risalita = S_v/sin β = 0,50/sin 70° = 0,532 m (programma 0,532 m); L taglio = 5,00 + 0,53 + 1,00 = 6,53 m, arrotondata per eccesso a 6,55 m; area = 6,55 × 20,0 = 131,0 m². Totale 12 × 131,0 = 1.572,0 m².

5.2 Relazione di calcolo PDF

La relazione è scritta nel browser con la libreria jsPDF, caricata dalla rete al momento del download; da questo ambiente la libreria non è raggiungibile. La funzione che compone la relazione è stata quindi eseguita fino in fondo contro una versione simulata di jsPDF che registra testi e tabelle: nessun errore, 17 tabelle e i capitoli seguenti, nell'ordine:

1. Premessa e riferimenti normativi · 2. Geometria, terreni e materiali · 3. Azione sismica · 4. Metodi di calcolo · 5. Sezione tipo · 6. Verifiche di stabilità interna · 7. Verifiche di stabilità esterna · 8. Verifiche di stabilità globale · 9. Distinta di taglio dei geosintetici · 10. Riepilogo e conclusioni

La prova copre la logica della relazione (dati, verifiche, distinta, riepilogo) ma non l'impaginazione finale. Va completata scaricando una volta la relazione dalla pagina pubblicata e controllandone l'aspetto.

6. Limiti della validazione

- Non è stato trovato un esempio pubblicato e verificabile di muro in terra rinforzata con geosintetici che riporti, strato per strato, trazioni e lunghezze con paramento inclinato. La stabilità interna è validata termine per termine (spinta, zona attiva, sfilamento) e con paramento verticale secondo FHWA.
- La stabilità globale è confrontata su un pendio omogeneo senza rinforzi (ACADS 1(a)). Il contributo dei rinforzi nel metodo di Bishop non ha un confronto esterno; la sua formulazione (min(T_d, P_r) per braccio) è stata controllata per ispezione del codice.
- L'interpolazione dei parametri sismici dal reticolo dell'Allegato B non è stata provata con il file ufficiale; sono validate le formule di amplificazione, i coefficienti β_m e β_s e i periodi di ritorno.
- Il valore predefinito γ_R = 1,0 per lo sfilamento non è prescritto dalle NTC per i geosintetici; FHWA richiede un fattore di sicurezza 1,5 in tensioni ammissibili. La scelta resta al progettista.
- Il benchmark FHWA di scorrimento (2,19) riguarda un muro con armature metalliche; la verifica di scorrimento non dipende dal tipo di rinforzo.

7. Bibliografia

- D.M. 17 gennaio 2018, «Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni» (NTC 2018); Circolare C.S.LL.PP. 21/01/2019 n. 7.
- Berg R.R., Christopher B.R., Samtani N.C. (2009). *Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes*, FHWA-NHI-10-024, Vol. I.
- Elias V., Christopher B.R., Berg R.R. (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes — Design and Construction Guidelines*, FHWA-NHI-00-043.
- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Sezione 11.10 (muri MSE).
- UNI EN 1998-5:2005, Appendice E (spinte sismiche, Mononobe-Okabe). Kramer S.L. (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall.
- Coulomb C.A. (1776); Rankine W.J.M. (1857). Das B.M., *Principles of Foundation Engineering*, Cengage (fattori di capacità portante, tabella di Vesic).
- Vesic A.S. (1973, 1975); Brinch Hansen J. (1970), «A revised and extended formula for bearing capacity», Danish Geotechnical Institute, Bull. 28.
- Paolucci R., Pecker A. (1997), «Seismic bearing capacity of shallow strip foundations on dry soils», *Soils and Foundations* 37(3).
- Bishop A.W. (1955), «The use of the slip circle in the stability analysis of slopes», *Géotechnique* 5(1).

- 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).
- Rocscience, *RS2 Slope Stability Verification Manual, Part 1*, problema 1 (ACADS 1(a)): rocscience.com/assets/verification-and-theory/RS2/RS2_SlopeStabilityVerification_Part1.pdf
- LUSAS, *Verification example: Simple slope stability*: lusas.com/user_area/documentation/V21_1/verification_examples/Simple Slope Stability.pdf
- Seequent GeoStudio, *SLOPE/W example: Stability of a Mechanically Stabilized Earth Wall*: files.seequent.com/GeoStudio/SlopeW/Stability of a Mechanically Stabilized Earth Wall.pdf

I file di prova (sorgenti del motore, script di confronto e risultati in JSON) sono conservati insieme al presente report e permettono di ripetere la validazione dopo ogni modifica del programma.