REPORT DI VALIDAZIONE

Confronto con soluzioni di letteratura

Motore di calcolo Berlinese Micropali Studio - NTC 2018

Casi esaminati	19
Casi superati	19 / 19
Errore massimo	0.509 %
Data	22/10/2026

TUTTI I CASI DI VALIDAZIONE SONO SUPERATI

Errore relativo massimo 0.509% (tolleranze indicate caso per caso)

1. SCOPO

Il presente documento verifica la correttezza numerica del motore di calcolo confrontando i risultati prodotti dal programma con soluzioni chiuse pubblicate nella letteratura tecnica (teoria di Rankine e Bell, metodo di Blum, metodo Free Earth Support, formulari di Roark, norme NTC 2018 ed Eurocodici, metodo di Bustamante-Doix).

2. METODOLOGIA

- Il valore "calcolato" è prodotto dalle stesse funzioni che il programma usa nel progetto (equilibrio limite, integrazione delle sollecitazioni, deformata, sezione a fibre, integrazione dei bulbi), senza adattamenti per il test.
- Il valore "di riferimento" è ottenuto valutando la formula chiusa citata, con algoritmo indipendente (formula esplicita o radice di polinomio con il metodo di Newton). Nessun valore è inserito a mano.
- Il report viene rigenerato a ogni esecuzione: una modifica del motore che alterasse i risultati verrebbe evidenziata come caso non superato.
- La tolleranza è 0.01% per le grandezze esatte, 0.1-0.5% dove il programma integra numericamente (passo 5 mm), 5% nel solo confronto tra legame parabola-rettangolo e stress-block, che sono modelli costitutivi diversi ammessi entrambi dalla norma.

3. QUADRO RIASSUNTIVO

Codice	Caso	Riferimento	Valore rif.	Calcolato	Errore	Toll.	Esito
BM-01	Coefficiente di spinta attiva Ka, ϕ' = 30°	Rankine (1857); Lancellotta, Geotecnica, cap. spinte	0.3333 -	0.3333 -	0.000%	0.01%	SUPERATO
BM-02	Coefficiente di spinta passiva Kp, ϕ' = 30°	Rankine (1857)	3.0000 -	3.0000 -	0.000%	0.01%	SUPERATO
BM-03	Pressione attiva in terreno coesivo a z = 6 m	Bell (1915); Craig, Soil Mechanics, cap. 11	38.969 kPa	38.969 kPa	0.000%	0.10%	SUPERATO
BM-04	Profondita' delle fessure di trazione z0	Bell (1915); Craig, Soil Mechanics	1.587 m	1.585 m	0.115%	0.50%	SUPERATO
BM-05	Terreno a due strati: pressione attiva subito sotto l'interfaccia	Craig, Soil Mechanics; Lancellotta, Geotecnica	17.357 kPa	17.357 kPa	0.000%	0.10%	SUPERATO
BM-06	Pressione netta con falda (monte z_w = 2 m, valle al fondo scavo) a z = 8 m	Padfield & Mair, CIRIA Report 104 (1984)	11.745 kPa	11.745 kPa	0.000%	0.10%	SUPERATO
BM-07	Profondita' del punto di rotazione D0 (Blum)	Blum (1931); Lancellotta, Geotecnica; USS Steel Sheet Piling Design Manual	4.629 m	4.629 m	0.000%	0.50%	SUPERATO
BM-08	Momento massimo per unita' di lunghezza	Blum (1931); soluzione chiusa per ϕ' = 30° (x = H/2)	281.25 kNm/m	281.25 kNm/m	0.000%	0.50%	SUPERATO
BM-09	D0 con sovraccarico q = 20 kPa	Blum (1931): equilibrio dei momenti al piede	5.566 m	5.566 m	0.000%	0.50%	SUPERATO
BM-10	Mmax con sovraccarico q = 20 kPa	Blum (1931): taglio nullo sotto il fondo scavo	482.36 kNm/m	482.36 kNm/m	0.000%	0.50%	SUPERATO
BM-11	Infissione D (Free Earth Support)	Padfield & Mair, CIRIA 104; Craig, Soil Mechanics, cap. 11	2.171 m	2.171 m	0.000%	0.50%	SUPERATO
BM-12	Reazione orizzontale del tirante T	Padfield & Mair, CIRIA 104 (equilibrio alla traslazione)	86.82 kN/m	86.90 kN/m	0.087%	0.50%	SUPERATO
BM-13	Momento massimo in campata	Padfield & Mair, CIRIA 104 (taglio nullo tra tirante e fondo scavo)	125.92 kNm/m	126.16 kNm/m	0.193%	0.50%	SUPERATO
BM-14	Mensola con carico triangolare (max all'incastro): freccia in sommita'	Roark's Formulas for Stress and Strain, tab. travi a mensola	0.13653 m	0.13653 m	0.000%	0.50%	SUPERATO
BM-15	Trave appoggiata con carico uniforme: freccia in mezzeria	Roark's Formulas for Stress and Strain; Belluzzi, Scienza delle Costruzioni	0.02604 m	0.02604 m	0.000%	0.50%	SUPERATO
BM-16	Sforzo normale resistente massimo, sezione circolare D = 250 mm, 8ϕ16	NTC 2018 §4.1.2.3.4.2; EC2 §6.1 (pivot C, ε = 2 permille)	1302.0 kN	1302.1 kN	0.002%	0.50%	SUPERATO

Codice	Caso	Riferimento	Valore rif.	Calcolato	Errore	Toll.	Esito
BM-17	Momento resistente a flessione semplice, D = 250 mm, 8ϕ16	NTC 2018 §4.1.2.1.2.1 (stress-block) - soluzione analitica su segmento circolare	34.97 kNm	34.80 kNm	0.509%	5.00%	SUPERATO
BM-18	Momento plastico CHS 219.1x12.5 S355	UNI EN 1993-1-1 §6.2.5; EN 10210-2 (Wpl)	180.61 kNm	180.61 kNm	0.000%	0.50%	SUPERATO
BM-19	Resistenza laterale di un bulbo che attraversa due strati	Bustamante & Doix (1985): Rs = π·Ds·Σ(qs,i·Li)	665.39 kN	665.01 kN	0.057%	0.50%	SUPERATO

4. SCHEDE DEI CASI

4.1 Spinte

BM-01 - Coefficiente di spinta attiva Ka, ϕ' = 30°

Riferimento: Rankine (1857); Lancellotta, Geotecnica, cap. spinte

Dati: ϕ' = 30°

$$Ka = \tan^2(45° - \phi/2) = 1/3$$

Riferimento = 0.3333 -; calcolato = 0.3333 -; errore = 0.0000% (tolleranza 0.01%) -> SUPERATO

BM-02 - Coefficiente di spinta passiva Kp, ϕ' = 30°

Riferimento: Rankine (1857)

Dati: ϕ' = 30°

$$Kp = \tan^2(45° + \phi/2) = 3$$

Riferimento = 3.0000 -; calcolato = 3.0000 -; errore = 0.0000% (tolleranza 0.01%) -> SUPERATO

BM-03 - Pressione attiva in terreno coesivo a z = 6 m

Riferimento: Bell (1915); Craig, Soil Mechanics, cap. 11

Dati: γ = 18 kN/m³, ϕ' = 20°, c' = 10 kPa

$$\sigma a = Ka \cdot \gamma \cdot z - 2c' \cdot \mathrm{sqrt}(Ka)$$

Riferimento = 38.969 kPa; calcolato = 38.969 kPa; errore = 0.0000% (tolleranza 0.10%) -> SUPERATO

BM-04 - Profondita' delle fessure di trazione z0

Riferimento: Bell (1915); Craig, Soil Mechanics

Dati: γ = 18 kN/m³, ϕ' = 20°, c' = 10 kPa

$$z0 = 2c' / (\gamma \cdot \mathrm{sqrt}(Ka))$$

Riferimento = 1.587 m; calcolato = 1.585 m; errore = 0.1154% (tolleranza 0.50%) -> SUPERATO

BM-05 - Terreno a due strati: pressione attiva subito sotto l'interfaccia

Riferimento: Craig, Soil Mechanics; Lancellotta, Geotecnica

Dati: q = 10 kPa; strato 1: h = 3 m, γ = 18; strato 2: γ = 20, ϕ' = 35°

$$\sigma a = Ka2 \cdot (q + \gamma 1 \cdot h1 + \gamma 2 \cdot (z - h1))$$

Riferimento = 17.357 kPa; calcolato = 17.357 kPa; errore = 0.0000% (tolleranza 0.10%) -> SUPERATO

BM-06 - Pressione netta con falda (monte z_w = 2 m, valle al fondo scavo) a z = 8 m

Riferimento: Padfield & Mair, CIRIA Report 104 (1984)

Dati: H = 6 m, γsat = 20 kN/m³, ϕ' = 30°

$$p = Ka \cdot \sigma' v,m + \gamma w(z - zw) - [Kp \cdot \sigma' v,v + \gamma w(z - H)]$$

Riferimento = 11.745 kPa; calcolato = 11.745 kPa; errore = 0.0000% (tolleranza 0.10%) -> SUPERATO

4.2 Paratia a mensola

BM-07 - Profondita' del punto di rotazione D0 (Blum)

Riferimento: Blum (1931); Lancellotta, Geotecnica; USS Steel Sheet Piling Design Manual

Dati: H = 5 m, γ = 18 kN/m³, ϕ' = 30°, q = 0

$D0 = H / ((Kp/Ka)^{(1/3)} - 1)$

Riferimento = 4.629 m; calcolato = 4.629 m; errore = 0.0001% (tolleranza 0.50%) -> SUPERATO

BM-08 - Momento massimo per unita' di lunghezza

Riferimento: Blum (1931); soluzione chiusa per ϕ' = 30° (x = H/2)

Dati: H = 5 m, γ = 18 kN/m³, ϕ' = 30°

$Mmax = \gamma/6 \cdot [Ka(H+x)^3 - Kp \cdot x^3] = 0.125 \cdot \gamma \cdot H^3$

Riferimento = 281.25 kNm/m; calcolato = 281.25 kNm/m; errore = 0.0001% (tolleranza 0.50%) -> SUPERATO

BM-09 - D0 con sovraccarico q = 20 kPa

Riferimento: Blum (1931): equilibrio dei momenti al piede

Dati: H = 5 m, γ = 18, ϕ' = 30°, q = 20 kPa

$Ka(qL^2/2 + \gamma L^3/6) = Kp \cdot \gamma \cdot D0^3/6, \; L = H + D0$

Riferimento = 5.566 m; calcolato = 5.566 m; errore = 0.0000% (tolleranza 0.50%) -> SUPERATO

BM-10 - Mmax con sovraccarico q = 20 kPa

Riferimento: Blum (1931): taglio nullo sotto il fondo scavo

Dati: H = 5 m, γ = 18, ϕ' = 30°, q = 20 kPa

$Ka(qL + \gamma L^2/2) = Kp \cdot \gamma \cdot x^2/2; \; M = Ka(qL^2/2 + \gamma L^3/6) - Kp \cdot \gamma \cdot x^3/6$

Riferimento = 482.36 kNm/m; calcolato = 482.36 kNm/m; errore = 0.0001% (tolleranza 0.50%) -> SUPERATO

4.3 Paratia tirantata

BM-11 - Infissione D (Free Earth Support)

Riferimento: Padfield & Mair, CIRIA 104; Craig, Soil Mechanics, cap. 11

Dati: H = 6 m, zt = 1.5 m, γ = 19, ϕ' = 32°, q = 15 kPa

$\Sigma M(tirante) = 0: Ka[q(L^2/2 - zt \cdot L) + \gamma(L^3/3 - zt \cdot L^2/2)] = Kp \cdot \gamma[D^3/3 + (H - zt)D^2/2]$

Riferimento = 2.171 m; calcolato = 2.171 m; errore = 0.0001% (tolleranza 0.50%) -> SUPERATO

BM-12 - Reazione orizzontale del tirante T

Riferimento: Padfield & Mair, CIRIA 104 (equilibrio alla traslazione)

Dati: come BM-11

$T = Ka(qL + \gamma L^2/2) - Kp \cdot \gamma \cdot D^2/2$

Riferimento = 86.82 kN/m; calcolato = 86.90 kN/m; errore = 0.0870% (tolleranza 0.50%) -> SUPERATO

BM-13 - Momento massimo in campata

Riferimento: Padfield & Mair, CIRIA 104 (taglio nullo tra tirante e fondo scavo)

Dati: come BM-11

$Ka(qz + \gamma z^2/2) = T; \; M = Ka(qz^2/2 + \gamma z^3/6) - T(z - zt)$

Riferimento = 125.92 kNm/m; calcolato = 126.16 kNm/m; errore = 0.1932% (tolleranza 0.50%) -> SUPERATO

4.4 Deformata

BM-14 - Mensola con carico triangolare (max all'incastro): freccia in sommita'

Riferimento: Roark's Formulas for Stress and Strain, tab. travi a mensola

Dati: L = 8 m, w = 50 kN/m, EI = 50000 kNm²

$y = w \cdot L^4 / (30 \cdot EI)$

Riferimento = 0.13653 m; calcolato = 0.13653 m; errore = 0.0000% (tolleranza 0.50%) -> SUPERATO

BM-15 - Trave appoggiata con carico uniforme: freccia in mezzeria

Riferimento: Roark's Formulas for Stress and Strain; Belluzzi, Scienza delle Costruzioni

Dati: L = 10 m, w = 20 kN/m, EI = 100000 kNm²

y = 5·w·L^4 / (384·EI)

Riferimento = 0.02604 m; calcolato = 0.02604 m; errore = 0.0000% (tolleranza 0.50%) -> SUPERATO

4.5 Sezione C.A.

BM-16 - Sforzo normale resistente massimo, sezione circolare D = 250 mm, 8ϕ16

Riferimento: NTC 2018 §4.1.2.3.4.2; EC2 §6.1 (pivot C, ε = 2 permille)

Dati: C25/30 (fcd = 14.17 MPa), B450C

NRd = Ac·fcd + As·(min(fyd, Es·0.002) - fcd)

Riferimento = 1302.0 kN; calcolato = 1302.1 kN; errore = 0.0017% (tolleranza 0.50%) -> SUPERATO

BM-17 - Momento resistente a flessione semplice, D = 250 mm, 8ϕ16

Riferimento: NTC 2018 §4.1.2.1.2.1 (stress-block) - soluzione analitica su segmento circolare

Dati: C25/30, B450C, copriferro 40 mm, spirale ϕ8

Segmento compresso di altezza 0.8x a σ = fcd; equilibrio N = 0

Riferimento = 34.97 kNm; calcolato = 34.80 kNm; errore = 0.5085% (tolleranza 5.00%) -> SUPERATO

Nota: Il programma usa il legame parabola-rettangolo; lo stress-block e' un'approssimazione normativa: tolleranza 5%.

4.6 Tubolare acciaio

BM-18 - Momento plastico CHS 219.1x12.5 S355

Riferimento: UNI EN 1993-1-1 §6.2.5; EN 10210-2 (Wpl)

Dati: fy = 355 MPa, γM0 = 1.05

Mpl,Rd = Wpl·fy/γM0, Wpl = (de³ - di³)/6

Riferimento = 180.61 kNm; calcolato = 180.61 kNm; errore = 0.0003% (tolleranza 0.50%) -> SUPERATO

Nota: Calcolato per integrazione numerica a fibre dello stato plastico, confrontato con il modulo plastico chiuso.

4.7 Tiranti

BM-19 - Resistenza laterale di un bulbo che attraversa due strati

Riferimento: Bustamante & Doix (1985): Rs = π·Ds·Σ(qs,i·Li)

Dati: testa a 1.5 m, α = 20°, L0 = 6 m, Lb = 8 m, Ds = 0.18 m, qs = 100/200 kPa, interfaccia a 5 m

Rs = π·Ds·[qs1·L1 + qs2·L2]

Riferimento = 665.39 kN; calcolato = 665.01 kN; errore = 0.0568% (tolleranza 0.50%) -> SUPERATO

5. CONCLUSIONI

Tutti i 19 casi risultano superati, con errore relativo massimo pari a 0.509%. Gli algoritmi di spinta, equilibrio limite, integrazione delle sollecitazioni, deformata, resistenza delle sezioni e capacità dei bulbi riproducono le soluzioni di riferimento entro le tolleranze dichiarate.

Ambito della validazione: i casi verificano la correttezza numerica delle procedure rispetto ai modelli teorici adottati. Non costituiscono una validazione dei modelli stessi rispetto al comportamento reale delle opere (misure in sito, analisi di interazione), che resta responsabilità del progettista.