

PRINCIPI DI CALCOLO DI UN'OPERA DI INGEGNERIA NATURALISTICA PER IL SOSTEGNO DI  
MOVIMENTI FRANOSI SUPERFICIALI

*Original*

PRINCIPI DI CALCOLO DI UN'OPERA DI INGEGNERIA NATURALISTICA PER IL SOSTEGNO DI MOVIMENTI  
FRANOSI SUPERFICIALI / Bella, Gianluca; Barbero, Monica; Barpi, Fabrizio; BORRI BRUNETTO, Mauro; Peila,  
Daniele; Peila, Lorenzo. - STAMPA. - ATTI DI CONVEGNO - INCONTRO ANNUALE GIOVANI INGEGNERI  
GEOTECNICI:(2019), pp. 57-60. (Intervento presentato al convegno 9° IAGIG Incontro Annuale dei Giovani Ingegneri  
Geotecnici, Napoli (IT), 10-11 maggio 2019 tenutosi a Napoli, Università Partenophe nel 10-11 maggio 2019).

*Availability:*

This version is available at: 11583/2733893 since: 2021-04-22T23:24:32Z

*Publisher:*

Associazione Geotecnica Italiana

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in  
the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

# PRINCIPI DI CALCOLO DI UN'OPERA DI INGEGNERIA NATURALISTICA PER IL SOSTEGNO DI MOVIMENTI FRANOSI SUPERFICIALI

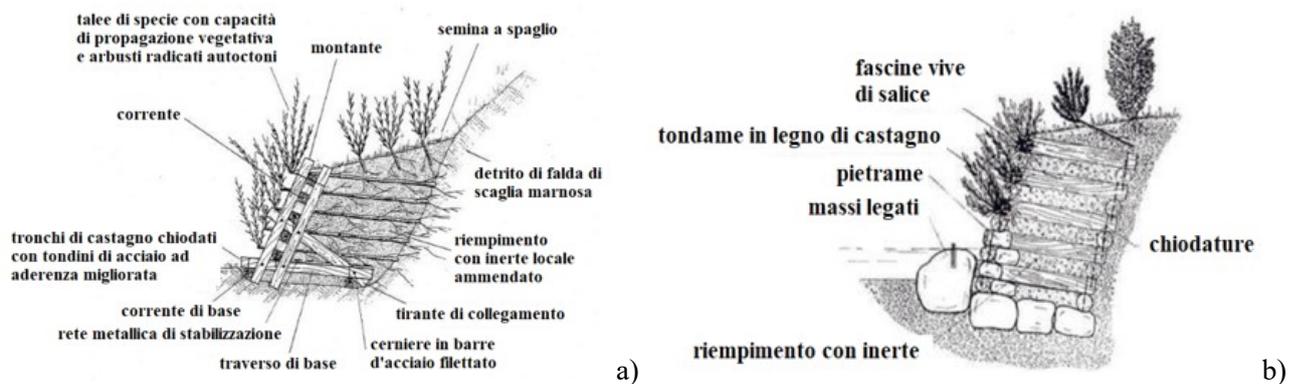
Gianluca Bella<sup>1,2</sup> (gianlucabella1989@libero.it), Monica Barbero<sup>2</sup> (monica.barbero@polito.it), Fabrizio Barpi<sup>2</sup> (fabrizio.barpi@polito.it), Mauro Borri-Brunetto<sup>2</sup> (mauro.borri@polito.it), Daniele Peila<sup>3</sup> (daniele.peila@polito.it), Lorenzo Peila<sup>3</sup> (lorenzo.peila90@gmail.com)

<sup>1</sup>Pini Swiss Engineers, Lugano, Svizzera, <sup>2</sup>Dipartimento di Ingegneria strutturale, edile e geotecnica, Politecnico di Torino, Torino, Italia, <sup>3</sup>Dipartimento di Ingegneria dell'ambiente, del territorio e delle infrastrutture, Politecnico di Torino, Torino, Italia

**ABSTRACT.** La nota presenta i principi di dimensionamento di un'innovativa struttura prefabbricata per il sostegno di movimenti franosi superficiali. Tale opera ("palificata loricata TerraSafe") si compone di un telaio metallico completamente annegato nel terreno e da un paramento frontale a vista costituito da una struttura metallica volta a sostenere più ordini orizzontali di tronchi in legno. Data la difficoltà nell'interpretare l'interazione terreno-struttura sia in fase di realizzazione che di vita utile dell'opera, è stata realizzata una campagna di sperimentazione di un prototipo in vera grandezza al fine di valutarne il comportamento tensionale sul telaio metallico e valutarne il comportamento globale in termini deformativi sotto i carichi di esercizio. Sulla base di tali risultati, presentati in precedenti articoli, il presente lavoro propone una procedura semplificata di dimensionamento e calcolo per le verifiche di sicurezza interna ed esterna, basandosi sull'ipotesi che l'azione esterna sollecitante sia la spinta attiva del terreno, considerata realistica nel caso in esame data la grande deformabilità della struttura stessa.

## 1. INTRODUZIONE

Le opere di ingegneria naturalistica destinate al sostegno di terreni instabili sono attualmente utilizzate in larga misura. Tra esse si annoverano le palificate in legno o le doppie palificate Vesuvio, Roma o Latina (Cornellini *et al.*, 2012), ossia strutture in legno e pietrame utilizzate essenzialmente per il sostegno di movimenti franosi superficiali e dimensionate secondo i principi dei muri a gravità (*Figura 1*).



*Figura 1. a) Doppia palificata, b) sua variante (modificato da Provincia di Terni, 2003).*

Laddove sia necessaria maggior resistenza meccanica, un'opera non completamente biodegradabile è da preferire (Stokes *et al.*, 2014). Sulla base di ciò, è stato realizzato una struttura ibrida il cui comportamento tensio-deformativo è stato valutato in situ su un prototipo in vera grandezza durante le fasi di assemblaggio e sotto i carichi d'esercizio. Tale campagna sperimentale, esposta in precedenti articoli (Barbero *et al.*, 2013; Bella *et al.*, 2017) ha consentito di proporre la procedura di dimensionamento e verifica esposta nel presente elaborato.

## 2. DESCRIZIONE DELL'OPERA

La palificata loricata TerraSafe (*Figura 2*) è costituita dalla giustapposizione di diversi elementi, ciascuno dei quali ha una larghezza parallela allo sviluppo del fronte pari a 3.0 m ed un'altezza di 1.8 m, andando a

formare un paramento esterno discontinuo inclinato di  $60^\circ$  sull'orizzontale costituito da tronchi scortecciati. La struttura resistente è costituita da un telaio di profilati in acciaio, che termina con uno stelo inclinato collegato ad una piastra di ancoraggio o a un ancoraggio in fune o barra cementato nel terreno. Allo stelo è collegata una traversa orizzontale alla quale sono saldati i due ritti che sostengono il paramento frontale di tronchi sostenuti da supporti saldati ai ritti e ed assicurati con una catena di ritenuta.

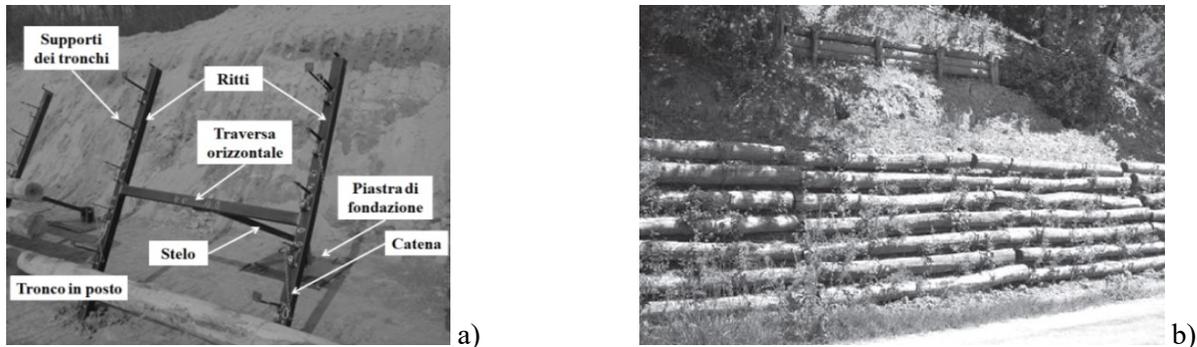


Figura 2. a) Palificata loricata TerraSafe in fase di assemblaggio con indicazione degli elementi costituenti, b) vista di più stendimenti assemblati ed in esercizio (modificato da Barbero et al., 2014).

Il terreno sostenuto dalla palificata affiora tra i tronchi ed il fronte può essere ulteriormente stabilizzato mediante piantumazione di specie vegetali dal robusto apparato radicale, quali talee.

### 3. PRINCIPI DI DIMENSIONAMENTO

Come avviene per il dimensionamento delle opere di sostegno quali muri a gravità, mensola o gabbionate, anche per quest'opera la procedura di dimensionamento si compone di due parti: (i) verifica interna delle componenti strutturali in metallo, (ii) verifica esterna che considera la struttura come un muro a gravità.

### 4. VERIFICHE INTERNE

Le verifiche di sicurezza interne, condotte a stato limite ultimo, sono effettuate ai fini di assicurare la resistenza strutturale della struttura metallica della palificata.

#### *Spinte, reazioni vincolari e scorrimento della piastra di fondazione*

La Figura 3 riporta una vista schematica della struttura in acciaio, assieme ai vincoli (carrello alla base e cerniera in fondazione), il peso proprio  $P$  agente nel baricentro, le rispettive reazioni vincolari  $V$ ,  $H$ ,  $F$ , la spinta del terreno a tergo  $S_y$  e la spinta dell'eventuale sovraccarico a monte  $S_q$ .

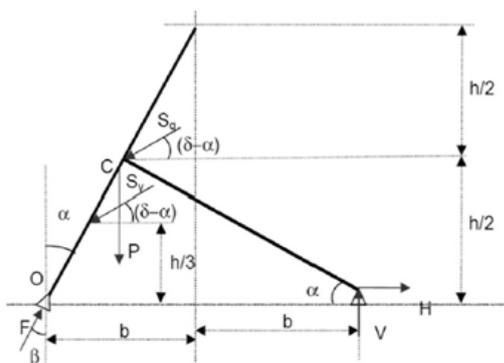


Figura 3. Rappresentazione schematica della geometria della Palificata loricata TerraSafe, con indicazione dei vincoli e delle azioni agenti (Barbero et al., 2014).

Nell'ipotesi di assenza di falda, le spinte caratteristiche del terreno  $S_y$  e degli eventuali sovraccarichi  $S_q$  possono essere calcolate utilizzando i coefficienti proposti da Absi e Kerisel (1990) in funzione dell'inclinazione  $\alpha$  del paramento frontale di valle:

$$S_Y = \frac{1}{2} K_{aY} \cdot \gamma \cdot d \cdot (2b)^2 \quad S_q = K_{aq} \cdot q \cdot (2b) \quad (1a, 1b)$$

L'applicazione dei coefficienti parziali permette quindi di ottenere i valori di dimensionamento  $S_{Y,d}$   $S_{q,d}$  delle spinte. Assumendo che l'angolo di attrito  $\delta$  paramento-terreno corrisponda all'angolo di resistenza all'angolo di resistenza al taglio del terreno di riempimento e che il piano superiore sia orizzontale, l'equilibrio alla traslazione orizzontale, verticale ed alla rotazione intorno al punto O (Figura 3) consente infine di ricavare i valori di progetto  $H_d$ ,  $V_d$  ed  $F_d$  delle reazioni vincolari:

$$H_d = \frac{1}{12} \left[ 6\sqrt{3}(S_{Y,d} + S_{q,d}) \frac{\cos(\beta + \delta)}{\cos\beta} + 6(S_{Y,d} + S_{q,d})\sin\delta + (2S_{Y,d}\cos\delta - 9P)\tan\beta \right] \quad (2a, 2b, 2c)$$

$$V_d = \frac{P}{4} - \frac{1}{6} (2S_{Y,d} + 3S_{q,d})\cos\delta \quad , \quad F_d = \frac{1}{12\cos\beta} [9P - 2S_{Y,d}\cos\delta + 6\sqrt{3}(S_{Y,d} + S_{q,d})\sin\delta]$$

La verifica interna a scorrimento della piastra di fondazione può essere dunque effettuata:

$$\frac{R_d}{H_d} \geq \gamma_R \quad \text{con} \quad R_d = [(2W_d - V_d)\tan\delta_a] \quad (3)$$

nella quale la resistenza di progetto  $R_d$  alla traslazione della piastra è valutata in funzione dell'angolo di attrito piastra di fondazione-terreno  $\delta_a$  e del peso di progetto del terreno  $W_d$  al di sopra della piastra di fondazione.

### Sollecitazioni interne alla struttura

Le verifiche interne del telaio metallico sono effettuate in tre sezioni significative A, B e C (Figura 4).

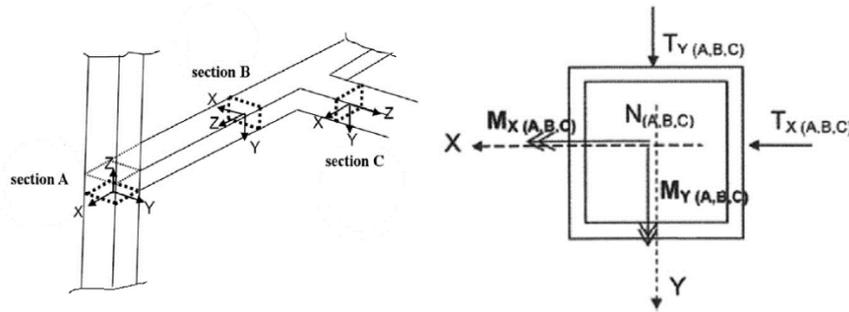


Figura 4. Sistema di riferimento e sezioni significative A, B, e C per le verifiche interne.

A partire dalle reazioni vincolari  $H_d$ ,  $V_d$ ,  $F_d$  precedentemente calcolate è possibile ottenere i valori di progetto delle sollecitazioni interne in termini di sforzo normale  $N_d$ , taglio  $T_d$  e momento flettente  $M_d$ :

$$\text{sezione A} \quad N_{C,d} = H_d \cos\alpha - V_d \sin\alpha \quad , \quad T_{YC,d} = -(H_d \sin\alpha + V_d \cos\alpha), \quad T_{YC,d} = 0$$

$$M_{XC,d} = \frac{3}{2} b V_d + \frac{1}{2} h H_d, \quad M_{YC,d} = 0, \quad M_{ZC,d} = 0 \quad (4a)$$

$$\text{sezione B} \quad N_{B,d} = 0 \quad , \quad T_{YB,d} = -\frac{T_{YC}}{2}, \quad T_{YB,d} = \frac{N_C}{2}$$

$$M_{XB,d} = -\frac{c T_{YC}}{2}, \quad M_{YC,d} = -\frac{c N_C}{2}, \quad M_{ZB,d} = \frac{M_{XC}}{2} \quad (4b)$$

$$\text{sezione C} \quad N_{A,d} = -\frac{F}{2} - \frac{3}{8} S_Y \sin\delta - \frac{P}{4} \cos\alpha - \frac{S_q}{4} \sin\delta \quad , \quad T_{YA,d} = \frac{3}{8} S_Y \cos\delta - \frac{P}{4} \sin\alpha + \frac{S_q}{4} \cos\delta$$

$$M_{XA,d} = \frac{5h}{18} \cdot \frac{3}{8} S_Y \cos\delta - \frac{hP}{4} \sin\delta + \frac{h}{4} \cdot \frac{S_q}{4} \cos\delta \quad (4c)$$

Note le sollecitazioni di progetto, la verifica interna a pressoflessione è soddisfatta se, per ogni sezione, vale la relazione di Navier per la quale l'azione interna di progetto  $\sigma_{i,d}$  è confrontata con la resistenza di progetto  $f_{y,d}$ :

$$\sigma_{i,d} = -\frac{N_d}{A} \mp \frac{M_{X,d}}{W_X} \mp \frac{M_{Y,d}}{W_Y} \leq f_{y,d} \quad (5)$$

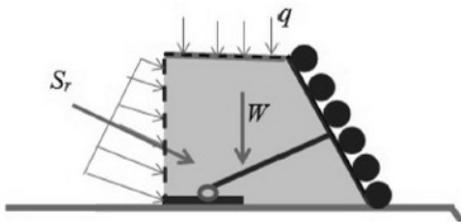
dove  $f_{y,d}$  e  $W$  rappresentano la resistenza a snervamento di progetto ed il modulo resistente proprio della sezione in metallo. Analogamente, la verifica a taglio è soddisfatta se, per ogni sezione di calcolo, vale la relazione:

$$T_d \leq T_{R,d} = A_v f_{yd} \quad (6)$$

dove  $T_d$  è taglio di progetto agente sulla sezione di riferimento,  $T_{R,d}$  è il taglio resistente di progetto del profilato in metallo, calcolato in funzione della sua area resistente a taglio  $A_v$ .

## 5. VERIFICHE ESTERNE

Le verifiche di sicurezza esterne sono effettuate considerando le spinte applicate su un paramento virtuale verticale posto a tergo della piastra di fondazione (*Figura 5*). Precedenti studi su prototipi in vera grandezza (Bella *et al.*, 2017) hanno consentito di considerare un livello deformativo tale da giustificare il raggiungimento di una condizione di spinta attiva. Poiché l'opera consente il drenaggio delle acque, è inoltre lecito considerare l'assenza della spinta dovuta al carico idraulico.



*Figura 5. Rappresentazione schematica delle azioni da considerare per le verifiche esterne. Il sovraccarico  $S_y$  agente a tergo deve considerare l'azione del terreno e delle condizioni di sismicità del sito (Barbero *et al.*, 2014).*

Le analisi di sicurezza esterne, comprendono quindi: (i) verifica della capacità portante del terreno, (ii) verifica a stabilità globale, (iii) verifica a rotazione - generalmente trascurabile se la struttura è caratterizzata da una geometria tozza - e (iv) la verifica traslazionale. Quest'ultima verifica è soddisfatta se la resistenza a scorrimento di progetto della struttura  $R_d$  è superiore alla spinta di progetto  $S_{r,d}$  del terreno di monte.

$$\frac{R_d}{S_{r,d}} \geq \gamma_R \quad \text{con} \quad R_d = W_d \cdot \tan \delta_a \quad (7)$$

La resistenza esterna  $R_d$ , in assenza di ulteriori sovraccarichi, è valutata in funzione del peso proprio di progetto  $W_d$  del terreno racchiuso nel volume della struttura come illustrato in *Figura 5*.

## 6. CONCLUSIONI

L'articolo ha esposto il procedimento di calcolo e verifica di un'innovativa opera di sostegno. Essa racchiude in sé vantaggi quali economicità e rapidità d'assemblaggio tipici di strutture biodegradabili d'ingegneria naturalistica e, dall'altra, la resistenza strutturale delle opere sostegno più tradizionali.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Absi E., Kerisel J. (1990). Active and passive earth pressure tables. Taylor and Francis Group.
- Barbero M., Barpi F., Borri-Brunetto M., Pallara O., Peila D., Peila L., Valfrè A., Cornelini P. (2013). Comportamento di una palificata prefabbricata per il contenimento delle terre: studi sperimentali. *Geingegneria Ambientale e Mineraria* 138(1):5-12.
- Barbero M., Barpi F., Borri-Brunetto M., Peila D. (2014). Principi di dimensionamento della palificata loricata Terrasafe. *Geingegneria Ambientale e Mineraria* 142(3):43-48.
- Bella G., Barbero M., Barpi F., Borri M., Peila D. (2017). An innovative bio-engineering retaining structure for supporting unstable soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 9, 247-259.
- Cornelini P., Sauli G. (2012). Principi, metodi e deontologia dell'ingegneria naturalistica. Regione Lazio.
- Provincia di Terni (2003). Manuale Tecnico di Ingegneria Naturalistica della Provincia di Terni: Applicabilità delle tecniche, limiti e soluzioni. Servizio Assetto del Territorio e Ufficio Urbanistica.
- Stokes A. *et al.* (2014). Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners. *Plant and Soil* 377(1):1-23.