

XXVI Geoalp Wintercup

Verifiche di stabilità durante gli impatti da caduta
massi sui rilevati in terra rinforzata e in terra
naturale

Ing. PhD Maddalena Marchelli

Prof. Valerio De Biagi

Ing. Stefano Vigna

Prof. Daniele Peila



**Politecnico
di Torino**



r!SKACT

RILEVATI PARAMASSI (RPE) IN TERRA RINFORZATA

Tra le differenti tipologie i rilevati **in terra rinforzata** presentano molteplici vantaggi. Sono realizzati in terra compattata con rinforzi (cioè geotessili, geogriglie, reti metalliche), con forma trapezoidale nella sezione trasversale e inclinazione delle facce di circa 70°.

Obiettivi del sistema di rinforzo:

- Aumentare l'**inclinazione** della faccia a monte (ed eventualmente quella a valle)
- Fornire una **maggiore resistenza** all'impatto dei blocchi



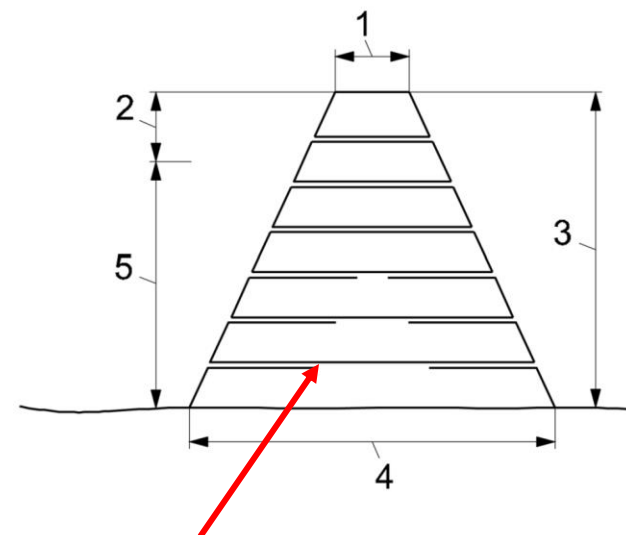
Cogne (AO)

Componenti:

- **Strati di rinforzo:** devono garantire la **stabilità sia in condizioni statiche che dinamiche**. Hanno funzione di **confinare** il terreno di riempimento e **assorbire le forze di trazione** necessarie a limitare la deformazione e a conferirgli capacità di resistenza agli urti
- Eventuali **prodotti antierosione** e **antidilavamento** in facciata, per garantire la **stabilità a lungo termine** e la protezione all'erosione e al dilavamento
- **Terreno di riempimento**, costipato a strati, che deve **assorbire l'energia** a spese della propria deformazione.

Esempio di rilevato in terra rinforzata

- 1 Larghezza in sommità
- 2 Franco superiore minimo $f_{\min}$
- 3 Altezza h_{tot}
- 4 Base b
- 5 Altezza di intercettazione di progetto h_d



strati orizzontali di elementi di rinforzo
resistenti a trazione

UNI 11211-4 (2018)



Oggeri, Peila & Recalcati, 2004

COME DIMENSIONARLI?

9.1.2.3

composite retaining structures

walls composed of elements from the above two types of wall. A large variety of such walls exists and examples include double sheet pile wall cofferdams, earth structures reinforced by tendons, geotextiles or grouting and structures with multiple rows of ground anchorages or soil nails.

9.2 Limit states

(1)P A list shall be compiled of limit states to be considered. As a minimum the following limit states shall be considered for all types of retaining structure:

- loss of overall stability;
- failure of a structural element such as a wall, anchorage, wale or strut or failure of the connection between such elements;
- combined failure in the ground and in the structural element;
- failure by hydraulic heave and piping;

EN 1997-1 (2004) Eurocodice 7

Opere in terra rinforzata con geotessile

6.5. OPERE DI SOSTEGNO

Le norme si applicano a tutte le costruzioni e agli interventi atti a sostenere in sicurezza un corpo di terreno o di materiale con comportamento simile. In particolare :

- muri, per i quali la funzione di sostegno è affidata al peso proprio del muro e a quello del terreno direttamente agente su di esso (ad esempio muri a gravità, muri a mensola, muri a contrafforti);
- paratie, per le quali la funzione di sostegno è assicurata principalmente dalla resistenza del volume di terreno posto innanzi l'opera e da eventuali ancoraggi e puntoni;
- strutture miste, che esplicano la funzione di sostegno anche per effetto di trattamenti di miglioramento e per la presenza di particolari elementi di rinforzo e collegamento.

In presenza di azioni sismiche, oltre a quanto previsto nel presente paragrafo, le opere di sostegno devono rispettare i criteri di verifica di cui al successivo § 7.11.6.

NTC 2018

5.3.4.2 Verifiche

1. L'**altezza** del rilevato deve intercettare il blocco di progetto
2. Il blocco dotato di energia cinetica rotazionale non deve superare il rilevato per **rotolamento** sul paramento di monte
3. La **stabilità statica** del rilevato deve essere verificata, tenendo conto delle caratteristiche dei rinforzi. Le verifiche devono essere condotte secondo la *normativa vigente* e sulla base di procedure affidabili e verificate dalla letteratura tecnica
4. La **stabilità dinamica** del rilevato deve essere verificata considerando le conseguenze dell'impatto. Il progettista deve definire:
 - La massima penetrazione ammissibile sul paramento di *monte* δ_{md} affinché il rilevato risulti riparabile con piccoli interventi di manutenzione
 - La massima deformazione accettabile sul paramento di *valle* δ_{vd} affinché non vi sia instabilità della struttura o interferenza con strutture adiacenti
5. Deve essere verificato il corretto **deflusso** delle **acque** del versante

VERIFICHE PRIMA CHE IL BLOCCO IMPATTI: STATICHE E SISMICHE (3,5)

VERIFICHE DINAMICHE ALL'IMPATTO (1,2,4)

COME DIMENSIONARLI?

VERIFICHE PRIMA CHE IL BLOCCO IMPATTI: STATICHE E SISMICHE (3,5)

La **stabilità statica** del rilevato deve essere verificata, tenendo conto delle caratteristiche dei **rinforzi**. Le verifiche devono essere condotte secondo la normativa vigente e sulla base di procedure affidabili e verificate dalla letteratura tecnica

6.5 OPERE DI SOSTEGNO

strutture miste, che esplicano la funzione di sostegno anche per effetto di trattamenti di miglioramento e per la presenza di particolari elementi di rinforzo e collegamento.

Verifiche di stabilità statica

6.5.3 Verifiche agli stati limite

6.5.3.1 Verifiche di sicurezza (SLU)

6.5.3.1.1 Muri di sostegno

SLU di tipo geotecnico (GEO)

- scorrimento sul piano di posa;
- collasso per carico limite del complesso fondazione-terreno;
- ribaltamento;
- stabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno;



$$E_d \leq R_d$$

SLU di tipo strutturale (STR)

- raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali.

NTC 2018 (DM 17/01/2018) + Circolare 21/01/2019 n°7

COME DIMENSIONARLI?

VERIFICHE PRIMA CHE IL BLOCCO IMPATTI: STATICHE E SISMICHE (3,5)

In presenza di azioni **sismiche**, le opere di sostegno devono rispettare anche i criteri di verifica di cui al successivo § 7.11.6

7.11.6 Opere di sostegno

- **scorrimento** sul piano di posa;
- collasso per **carico limite** del complesso fondazione-terreno;
- **ribaltamento**;
- raggiungimento della **resistenza** negli **elementi strutturali**
- **stabilità globale** del complesso opera di sostegno-terreno;

Con i coefficienti parziali unitari sulle azioni e sui parametri geotecnici e lato resistenze γ_R

PS: In aggiunta alle verifiche di sicurezza nei confronti degli stati limite ultimi SLV, devono essere condotte verifiche nei confronti degli stati limite di esercizio SLD. In particolare, gli spostamenti permanenti indotti dal sisma devono essere compatibili con la funzionalità dell'opera e con quella di eventuali strutture o infrastrutture interagenti con essa.

NTC 2018 (DM 17/01/2018) + Circolare 21/01/2019 n°7

5.3.4.2 Verifiche

1. L'**altezza** del rilevato deve intercettare il blocco di progetto
2. Il blocco dotato di energia cinetica rotazionale non deve superare il rilevato per **rotolamento** sul paramento di monte
3. La **stabilità statica** del rilevato deve essere verificata, tenendo conto delle caratteristiche dei rinforzi. Le verifiche devono essere condotte secondo la *normativa vigente* e sulla base di procedure affidabili e verificate dalla letteratura tecnica
4. La **stabilità dinamica** del rilevato deve essere verificata considerando le conseguenze dell'impatto. Il progettista deve definire:
 - La massima penetrazione ammissibile sul paramento di *monte* δ_{md} affinché il rilevato risulti riparabile con piccoli interventi di manutenzione
 - La massima deformazione accettabile sul paramento di *valle* δ_{vd} affinché non vi sia instabilità della struttura o interferenza con strutture adiacenti
5. Deve essere verificato il corretto **deflusso** delle **acque** del versante

VERIFICHE DINAMICHE ALL'IMPATTO (1,2,4)

Verifiche dinamiche

Considerando il verificarsi di un evento di caduta massi, tre sono le possibili modalità di rottura:

- (i) il blocco **scavalca** il rilevato, con o senza impattare contro il rilevato;
- (ii) il blocco, impattando sulla struttura, provoca una **deformazione eccessiva** o il **crollo** della struttura stessa,
- (iii) il **sistema** pendio-struttura **crolla** a causa dell'impatto.

Valutando ogni modalità separatamente, tre sono gli scenari possibili che portano alla **prima modalità (i)**:

- (a) l'altezza di passaggio del blocco è superiore dell'altezza del rilevato, oppure dopo l'impatto
- (b) il blocco rotola sulla parete a monte
- (c) il blocco si separa in frammenti e alcuni di essi saltano sopra la parete a monte.

Verifiche dinamiche

1. L'altezza del rilevato deve intercettare il blocco di progetto $\rightarrow h_{tot} \geq h_d + f_{min} + h_{corso}$

2. Il blocco dotato di energia cinetica rotazionale **non deve superare il rilevato per rotolamento sul paramento di monte** $\rightarrow$ considerando la direzione del moto in volo libero questa condizione **è praticamente sempre verificata** (lato di monte 60°-80°): l'impatto produce un'orma che impedisce l'instaurarsi di un moto rotatorio in grado di consentire la risalita del blocco lungo il paramento (energia rotazionale non sufficiente) (condizione non sempre verificata nel caso in cui il blocco impatti precedentemente all'interno della trincea di monte)

4. La **stabilità dinamica del rilevato** deve essere verificata considerando le conseguenze dell'impatto. Il progettista deve definire:

- La massima penetrazione ammissibile sul paramento di monte $\delta_{m,amm}$ affinché il rilevato risulti riparabile con piccoli interventi di manutenzione
- La massima deformazione accettabile sul paramento di valle $\delta_{v,amm}$ affinché non vi sia instabilità della struttura o interferenza con strutture adiacenti

Verifiche dinamiche

4. La stabilità dinamica del rilevato deve essere verificata considerando le conseguenze dell'impatto.

Deve essere calcolata la penetrazione del blocco di progetto e le conseguenti deformazioni del rilevato; il calcolo deve essere eseguito sulla base di procedure affidabili e documentare in letteratura tecnica. Le verifiche dinamiche devono accertare che:

- la penetrazione del blocco di progetto δ_m sia minore di quella massima ammissibile (condizione di stato limite di servizio).
- La deformata δ_v sul paramento di valle del rilevato sia minore di quella massima ammissibile (condizione di stato limite di servizio).
- Il rilevato non sia destrutturato per dislocazione e o ribaltamento del concio impattato (condizione di stato limite ultimo). Tali verifiche possono essere condotte con metodi semplificati dell'equilibrio limite.

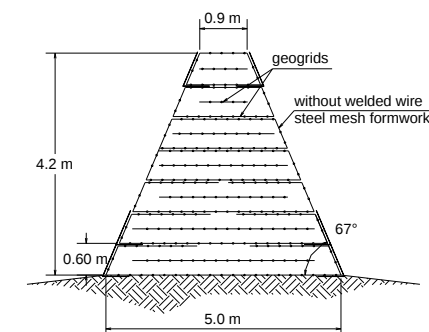
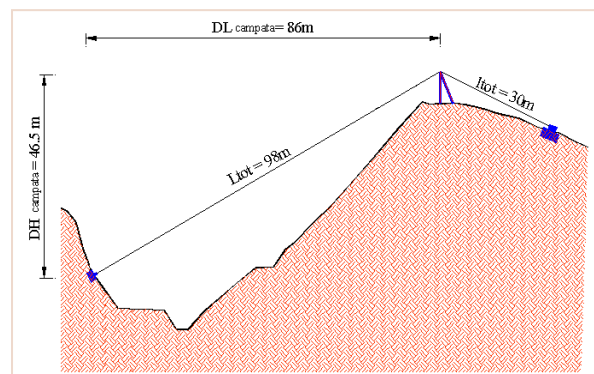
UNI 11211-4 (2018)

Verifiche dinamiche – APPROCCI UTILIZZATI

- **approcci energetici** che valutano la capacità del rilevato di resistere all'impatto sulla base di stime **analitiche dell'energia dissipata** all'interno del rilevato (l'impatto può essere descritto in termini di energia cinetica del blocco incidente o di forza di impatto). La dissipazione di energia è calcolata considerando una **Zona disturbata dall'Impatto (IDZ)**, cioè il volume del rilevato esposto a un forte carico che provoca grandi spostamenti, deformazioni e cambiamenti nelle caratteristiche meccaniche. I meccanismi dissipativi sono la **dissipazione di energia** attraverso la **compattazione del terreno** e **l'attrito** lungo i piani di taglio, assumendo che la IDZ si muova come un corpo rigido. *La progettazione consiste nel valutare che la **deformazione** della struttura richiesta per dissipare l'energia cinetica del blocco sia **coerente** con le dimensioni del rilevato. A tal fine, la deformazione a monte dovuta alla penetrazione del blocco può essere derivata dalla forza di impatto.*
- approcci di **modellazione numerica** che modellano l'impatto e valutano la deformazione del rilevato, usando FDM o FEM o DEM.

Politecnico di Torino test: 2001-2003

I test sono stati effettuati a Meano dove è stato costruito un dispositivo di traino in grado di lanciare blocchi di cemento armato fino a 10000 kN con una velocità di 32 m/s contro strutture di protezione passiva come barriere paramassi e rilevati.



**Embankment geometry type a)
test n. 1, 2, 3**

I parametri studiati erano il tipo di geosintetico, il tipo di suolo e la massa del blocco.

Questi rilevati in terra rinforzata hanno dimostrato di essere efficienti contro impatti successivi di 4500 kJ. Questa ricerca include esperimenti e modellazione numerica con l'obiettivo di sviluppare sia tabelle di progettazione che strumenti numerici da utilizzare per la progettazione.

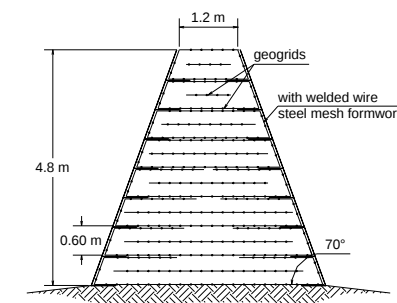
Table 2 Geotechnical characteristics of soils used in the tests as obtained from laboratory surveying

	c' (kPa)	ϕ' (°)	γ' (kN/m ³)	Description
Type 1	9	34	21	Sand and gravel
Type 2	50	30	17	Silt and clay

The compaction of the soil was carried out according to the standards foreseen for a correct preparation of ground-reinforced embankments, and a value of 95% of the proctor test standard was reached.

Table 3 Main characteristics of the tests that were carried out

Test #	Block speed (m/s)	Block mass (kg)	Block energy (kJ)	Number of impacts	Face surface steel mesh	Geogrid types	Soil type	Geometry type (Fig.)
1	31	5,000	2,402	1	Yes	TT050 (tensile strength 50 kN/m)	1	a
2	31	8,700	4,180	3	Yes	TT045 (tensile strength 45 kN/m)	1	a
3	31	8,700	4,180	1	No	Absent	1	a
4	31	8,700	4,180	1	Yes	TT045 (tensile strength 45 kN/m)	2	b



**Embankment geometry type b)
test n. 4**

Politecnico di Torino test: 2001-2003

Test 2 – primo impatto



Test 2 – secondo impatto



Test 2 – terzo impatto



Test 3

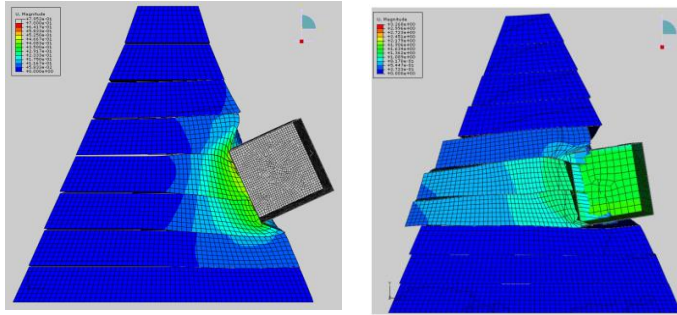


Nel **test 3**, effettuata su un rilevato non rinforzato, il blocco di roccia è stato fermato, ma il rilevato è crollato a causa di una fessura di tensione longitudinale che si è sviluppata al centro dello strato superiore, mentre lo spostamento sulla faccia a valle, non controllato dalle geogriglie, ha innescato il collasso totale della struttura.

Durante il **test 2**, il rilevato è stato sottoposto a **tre impatti**, che sono stati ripetuti nella stessa posizione, con un'energia di 4500 kJ, fino al collasso del rilevato. Dopo il terzo impatto, lo spostamento sul lato della valle è stato molto grande e non ha permesso di mantenere la stabilità della struttura.

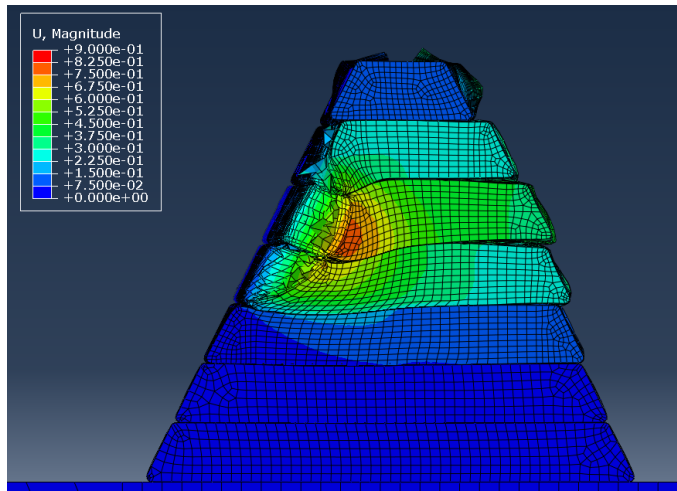
I rilevati rinforzati sono strutture efficienti contro la caduta massi quando si devono affrontare impatti ad alta energia e impatti multipli

Politecnico di Torino test: simulazioni numeriche (2011-ad oggi)

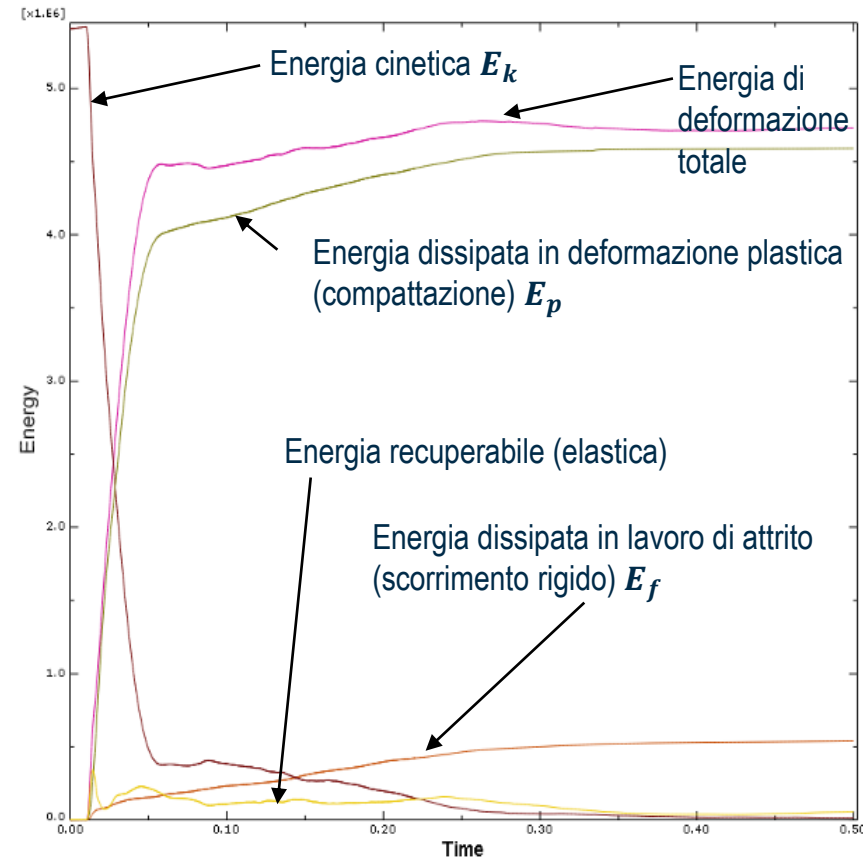


Ronco et al., 2011

All'impatto si ha una ripartizione dell'energia cinetica del blocco impattante in energia di scorrimento (E_s) ed energia di plasticizzazione del terreno e snervamento delle geogriglie (E_p)



Simulazioni Politecnico-2022



1. La dissipazione plastica si traduce in **compattazione e plasticizzazione**

(prima fase di **compattazione** locale del suolo, con un parziale **spostamento** verso valle del terreno (creazione del **cratere**), e dissipazione della maggior parte dell'energia cinetica del blocco).

2. La dissipazione in **attrito** provoca uno **scorrimento** verso valle

(l'energia cinetica rimanente è dissipata in attrito durante la traslazione in cui gli strati di terreno scivolando in maniera **rigida** a livello della geogriglia).

$$E_k \sim E_p + E_s$$

Politecnico di Torino test: simulazioni numeriche + test (2011-ad oggi)

Approccio energetico: valutazione delle deformazioni e dell'energia dissipata

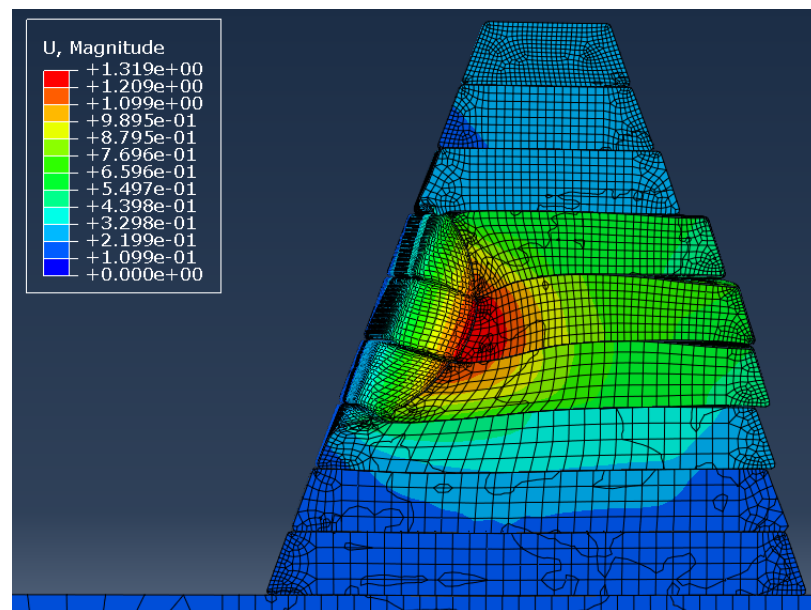


La **stabilità della struttura dopo l'impatto** viene verificata tenendo conto di:

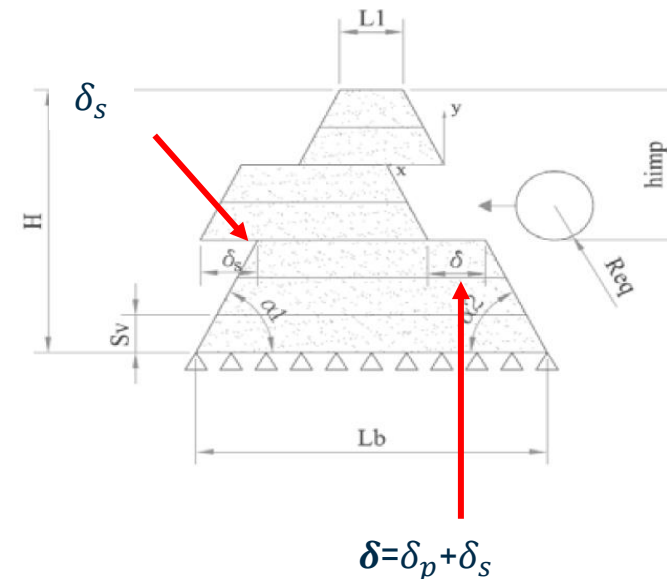
- 1) massimo **scorrimento degli strati di terreno coinvolti nell'impatto** (δ_s)
- 2) plasticizzazione del terreno con la **penetrazione dovuta alla plasticizzazione** (δ_p).

→ La **dimensione totale** del foro δ sul fronte del rilevato si ottiene aggiungendo δ_p alla componente di deformazione di scorrimento (δ_s)

Peila et al., 2007



Simulazioni Politecnico-2022



Approccio energetico: valutazione delle deformazioni e dell'energia dissipata

Verifiche dinamiche

il blocco non deve attraversare il rilevato + la deformazione non ne deve provocare il crollo e non deve originare una geometria deformata che superi la lunghezza del risvolto

Occorre considerare:

- la **penetrazione del blocco nel paramento di monte del rilevato a seguito dell'impatto δ_p** (compattazione e plasticizzazione del rilevato) (da studi sulla compactazione dinamica dei terreni e sugli effetti di impatti di blocchi sulle gallerie artificiali di protezione contro la caduta di massi)

I valori di penetrazione massima δ_p ottenuti sia dagli esperimenti che dai modelli corrispondono a quelli derivati bilanciando la quota parte di energia cinetica del blocco responsabile della plasticizzazione e il lavoro fatto dalla forza di arresto (integrale della forza sulla deformazione plastica), che si assume abbia forma triangolare, e il cui valore di picco $F_{i,p,max}$ può essere calcolato con la formula analitica di Labiouse et al. (1996) e Montani et al. (1996) o con altre formule

$$E_p = \alpha_p E_k$$

$$L_p = \frac{1}{2} F_{i,p,max} \delta_p = \frac{\alpha_p m_d v_d^2}{2}$$

$$\delta_p = \frac{2E_p}{F_{i,p,max}} = \frac{\alpha_p m_d v_d^2}{F_{i,p,max}}$$

$$F_{i,p,max} \approx 2.8 e_h^{-0.5} R^{0.7} M_E^{0.4} \tan \phi \left(\alpha_p \frac{m_d v_d^2}{2} \right)^{0.6} \text{ oppure}$$

$$F_{i,p,max} \approx 1.765 R^{0.2} M_E^{0.4} \tan \phi \left(\alpha_p \frac{m_d v_d^2}{2} \right)^{0.6}$$

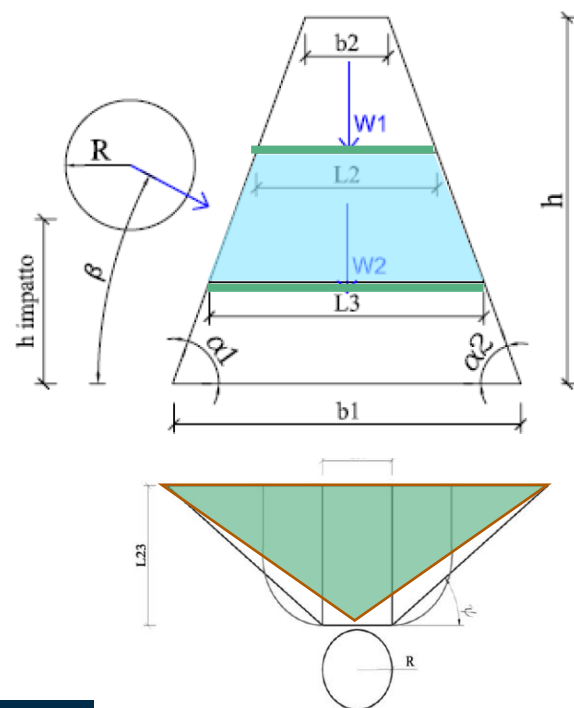
Approccio energetico: valutazione delle deformazioni e dell'energia dissipata

Verifiche dinamiche

il blocco non deve attraversare il rilevato + la deformazione non ne deve provocare il crollo e non deve originare una geometria deformata che superi la lunghezza del risvolto

Occorre considerare:

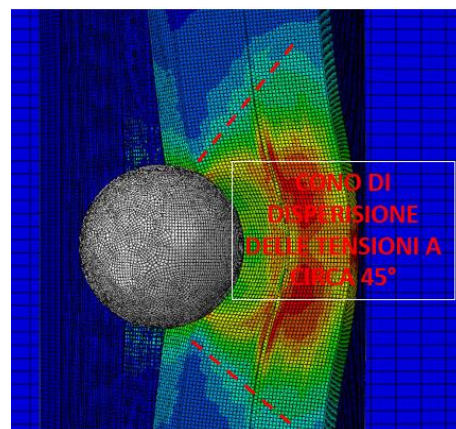
- lo **scorrimento dei corsi di valle** δ_s : i valori di massimo scorrimento degli strati di terreno coinvolti nell'impatto ottenuti dagli esperimenti trovano buona corrispondenza con quelli calcolati analiticamente bilanciando la % dell'energia cinetica del blocco responsabile dello scorrimento e il lavoro assorbito dalle forze di attrito (sulle superfici di scorrimento superiore, inferiore e laterale), il cui massimo F_s è dovuto allo scorrimento degli strati come un corpo rigido



$$\delta_s \sim \frac{1 \div 2 E_f}{F_s} = \frac{\alpha_s m_d v_d^2}{F_s}$$

$$L_s = \left(1 \div \frac{1}{2}\right) F_s \delta_s = \frac{0,15 m_d v_d^2}{2}$$

Assunzione cautelativa



$$F_s \approx \frac{2\mu K_a \sigma_{v,i} (h_{i,sup} - h_{i,inf}) L_m}{\sin \psi} + \mu \sigma_{v,inf} A_{i,inf} + \mu \sigma_{v,sup} A_{i,sup}$$

Il prisma trapezoidale rappresenta l'IDZ

Approccio energetico: valutazione delle deformazioni e dell'energia dissipata

Sulla base di esperimenti su scala reale e analisi numeriche, Ronco et al. (2009) hanno riscontrato che l' E_p 80-85% di E_k . Valori simili sono stati ottenuti da esperimenti su piccola scala (Hofmann & Molk, 2012), mentre da quelli di Kister et al. (2017) E_p varia tra il 75% e 85% di E_k . I valori suggeriti in letteratura sono derivati dalle configurazioni sperimentali e considerando le geometrie generali dei rilevati, quindi intrinsecamente appropriati per una gamma limitata di rilevati. Per superare questa limitazione, un semplice modello in grado di quantificare la quantità di energie cinetiche che vengono dissipate attraverso la compattazione del suolo l'attrito, è stato proposto da Marchelli & Deangeli (2022).

La valutazione della **percentuale di energia dissipata dall'attrito α_s** può essere ottenuta mediante il principio di **conservazione della quantità di moto**. L'ipotesi di impatto come un urto completamente anelastico può essere considerata rappresentativa in quanto durante il movimento di scorrimento il blocco e la porzione disturbata del rilevato sono solidali tra loro.

$$m_b v_b = (m_b + M_e) v_{out}$$

Da cui, calcolato v_{out} , si ottiene:

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_k} = \frac{m_b}{m_b + M_e}$$

M_e = massa del rilevato interessata dall'impatto

Approccio energetico: valutazione delle deformazioni e dell'energia dissipata

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_k} = \frac{m_b}{m_b + M_e}$$

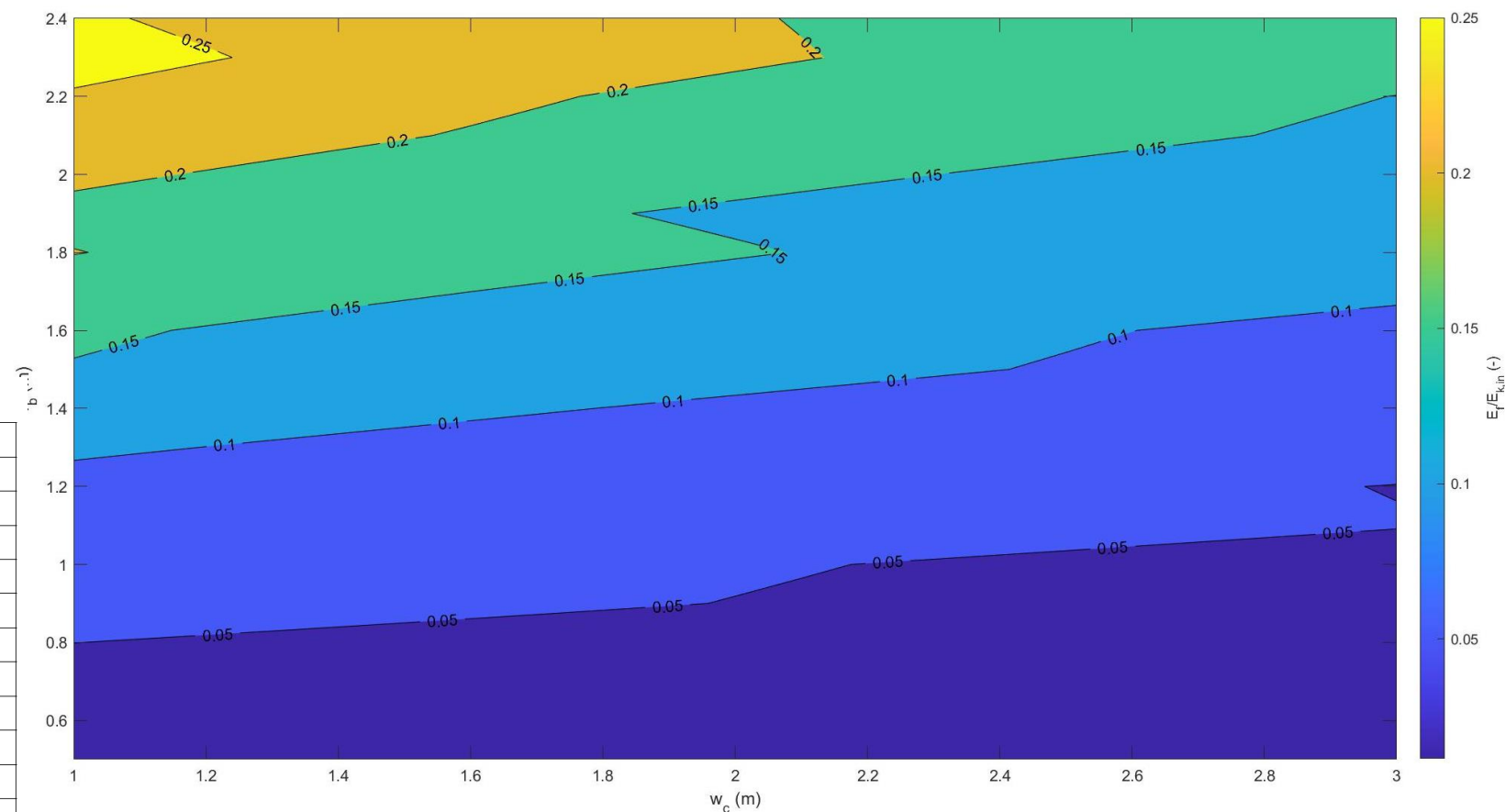
$$\text{ma } E_k \sim E_p + E_s$$

$$\rightarrow \alpha_p = \frac{E_p}{E_k} = 1 - \alpha_s$$

**Del tutto compatibili con
i risultati sperimentali**

Tab. I – Input parameters of the sensitivity analysis.

Parameter	Value
Embankment height H_e	6 m
Height of each layer h_l	0.6 m
Uphill face slope angle	60 °
Downhill face slope angle	60 °
Crest width w_c	in the range from 1 m to 3 m
Length of the flap l_{flap}	1 m
Elastic modulus of the soil M_E	25 MPa
Internal friction angle ϕ	30°
Friction coefficient at the layers surfaces μ	0.45
Height of impact h_i	3 m
Block radius r_b	in the range from 0.5 m to 2.4 m



Marchelli & Deangeli, 2022

VERIFICHE DINAMICHE ALL'IMPATTO

Approccio energetico: valutazione delle deformazioni e dell'energia dissipata

- il blocco non deve attraversare il rilevato

$$\delta < L_2$$

Dove

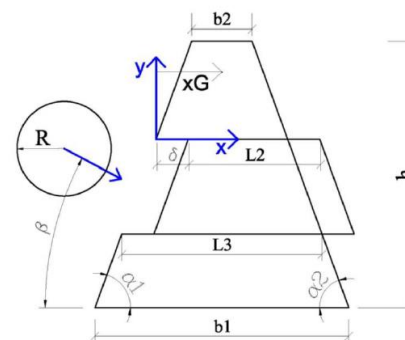
$\delta = \delta_p + \delta_s$ penetrazione totale

L_2 = lunghezza del corso superiore a quello interessato dalla penetrazione

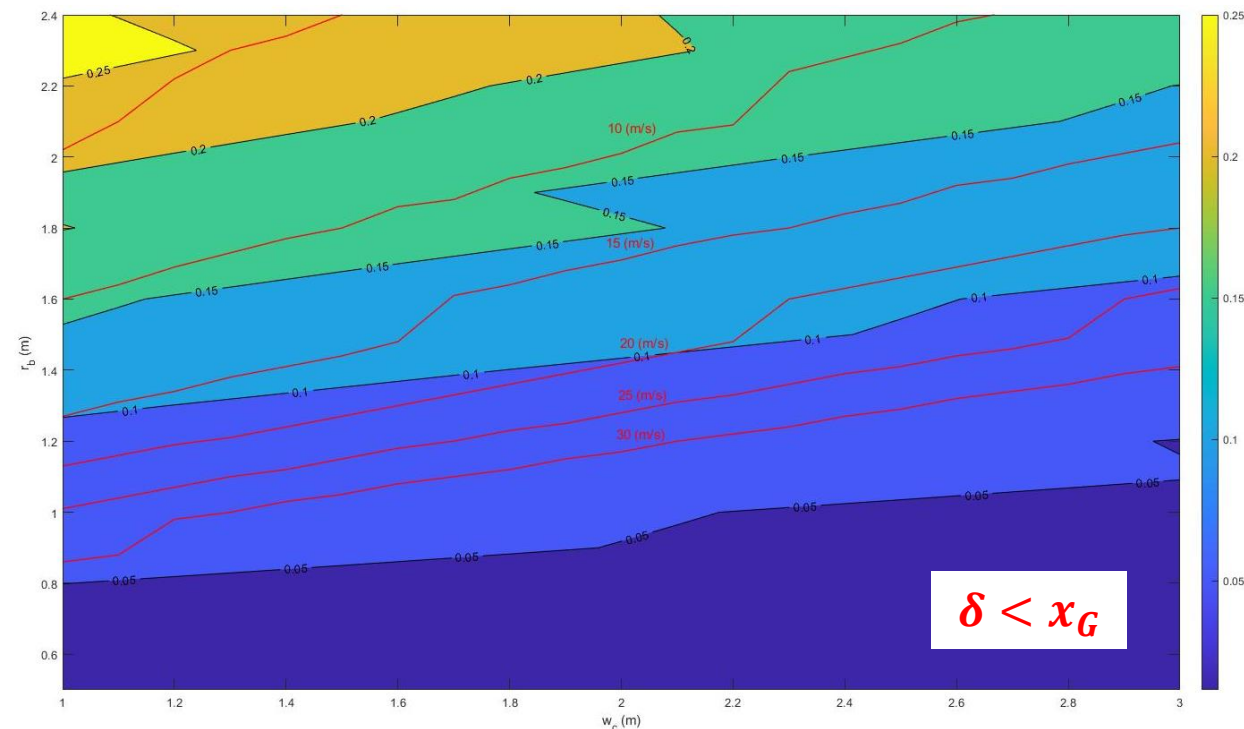
- la deformazione non ne deve provocare il crollo e non deve originare una geometria deformata che superi la lunghezza del risvolto

$$\begin{cases} \delta < x_G \\ \delta_s < 0,70L_{\text{risvolto}} \end{cases}$$

x_G e $0,70L_{\text{risvolto}}$ rappresentano gli spostamenti ammissibili di monte e di valle

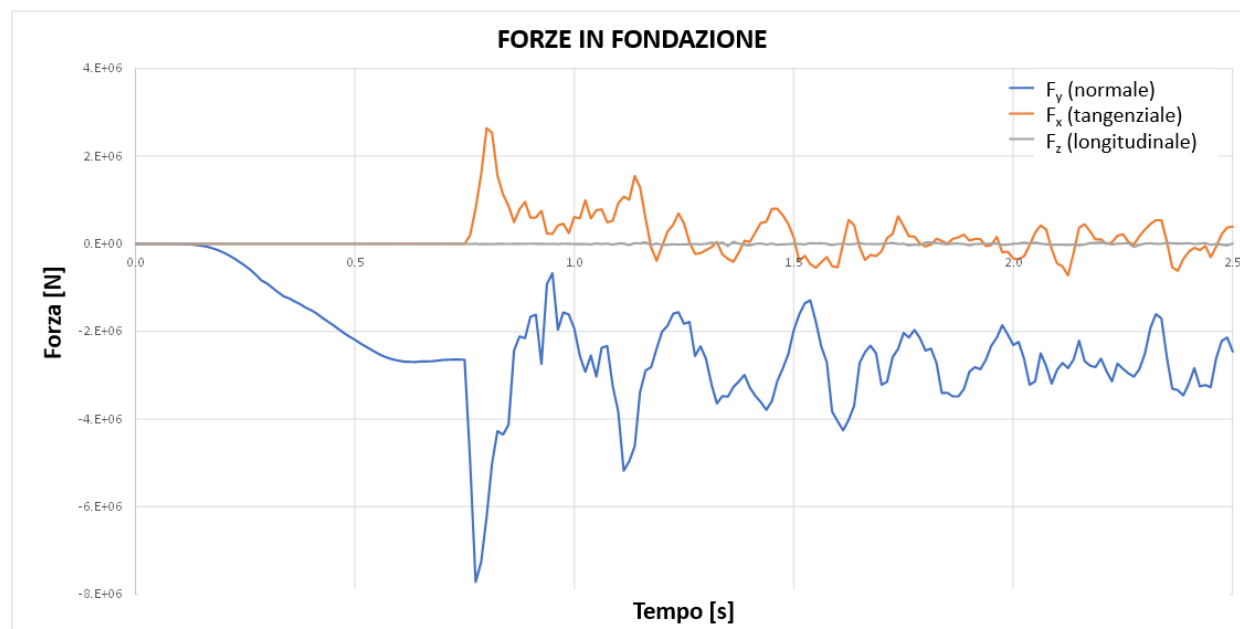


x_G = coordinata del baricentro del trapezio superiore al corso traslato rispetto ad un sistema di assi cartesiani come da figura



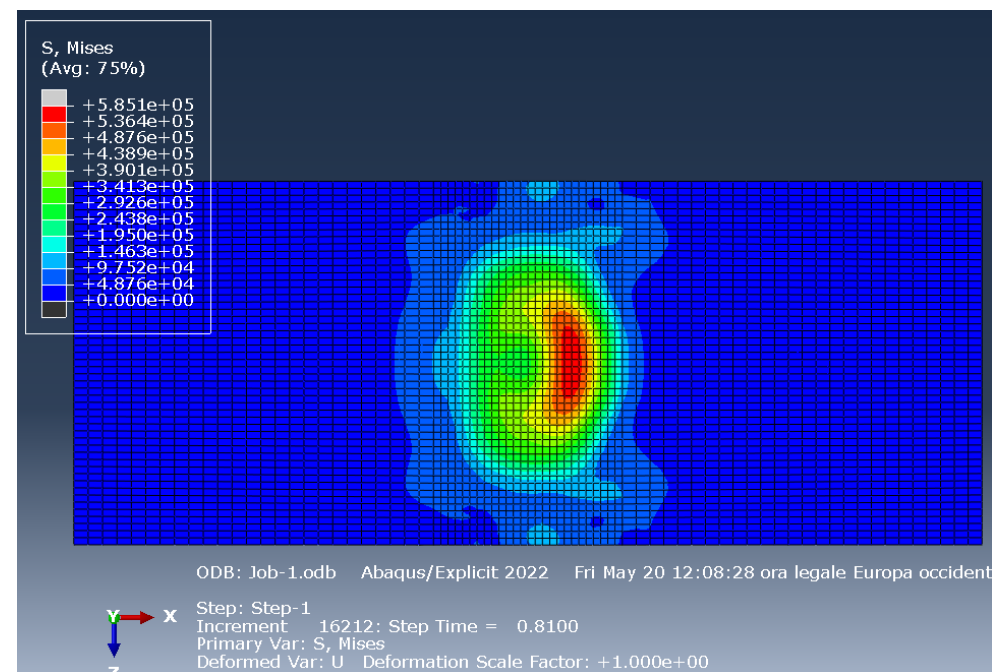
Marchelli, M., Deangeli, C. (2022) Towards a codified design procedure for rockfall reinforced earth embankments. GEAM. GEOINGEGNERIA AMBIENTALE E MINERARIA, vol.165, pp. 50-59

Considerando l'**ultima modalità di stato limite**, cioè un'**instabilità globale**, il metodo generalmente adottato consiste nel considerare una **forza statica equivalente** per rappresentare l'impatto ed eseguire gli usuali calcoli per la verifica della stabilità globale. Per calcolare questa forza, un'espressione equivalente a quella quella proposta per $F_{i,p,max}$ può essere adottata considerando E_k al posto di E_p (nuove simulazioni: 2022-on-going)



Nel caso simulato, all'impatto si genera una forza dinamica non trascurabile in fondazione:

- Forza **normale** pari a circa **2,5-3 volte il peso** dell'RPE;
- Forza **tangenziale** pari a circa il **peso** dell'RPE.



Simulazioni Politecnico-2022

GRAZIE PER L'ATTENZIONE



**Politecnico
di Torino**



r!SKACT