

XXVI Geoalp Wintercup

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

(Prodotto della ricerca 1.1 dell'accordo tra Regione Autonoma Valle d'Aosta e Politecnico di Torino di cui al PD n.7355 del 14/12/2020).

r!SKACT

GRUPPO DI RICERCA:

ING. STEFANO VIGNA

ING. MADDALENA MARCHELLI, PhD

PROF. VALERIO DE BIAGI

PROF. DANIELE PEILA



**Politecnico
di Torino**



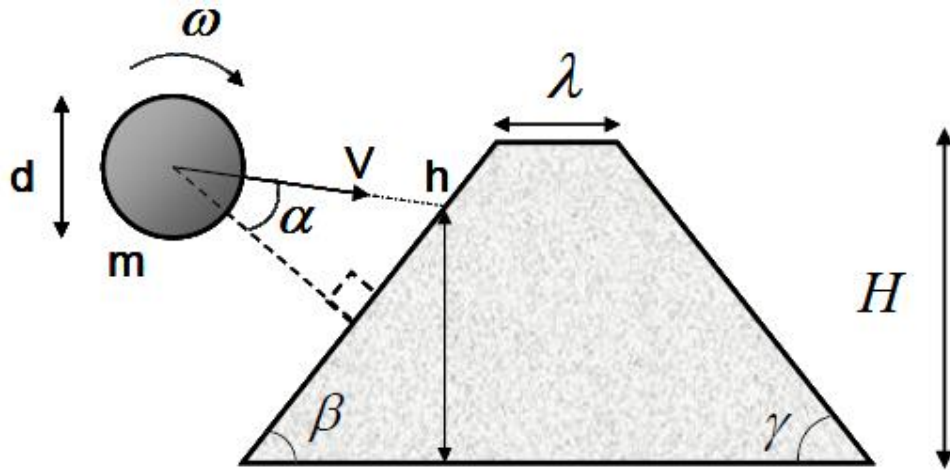
OBIETTIVO

Comprendere il comportamento dei rilevati paramassi in terreno sciolto durante l'impatto, al fine di ottimizzare la scelta di questa tipologia di opere e per consentire una verifica preliminare dei rilevati in terra sciolta costruiti nel passato.

INDICE

- 1. Stato dell'arte e normative esistenti**
- 2. Modellazioni numeriche sviluppate**
- 3. Presentazioni dei risultati**

Analisi DEM sviluppate da Plassiard e Donzè (2009, 2010)



Parametri principali del blocco e del rilevato, variati durante l'analisi parametrica, la definizione dell'angolo di impatto α in funzione della pendenza β a monte e dell'angolo α . (Plassiard & Donzè, 2009)

PARAMETRI GEOMETRICI

$\beta = \gamma = 60^\circ$ inclinazioni dei paramenti di monte e valle

$H = 5m$ altezza del rilevato

$L = 12m$ larghezza del rilevato

$\lambda = 2m$ cresta del rilevato

PARAMETRI MECCANICI

$E_0 = 100MPa$ modulo elastico del terreno

$\nu = 0.3$ coefficiente di Poisson

$\varphi = 43^\circ$ angolo di attrito di picco

$c = 10kPa$ coesione

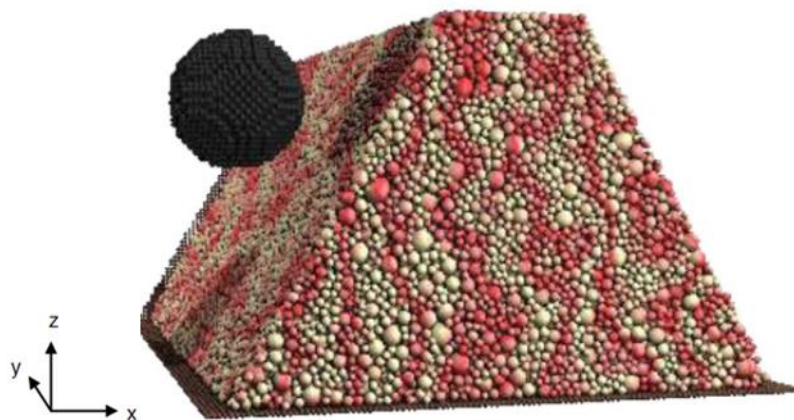
$\psi = 15^\circ$ dilatanza

$\varphi_{res} = 35^\circ$ angolo di attrito residuo

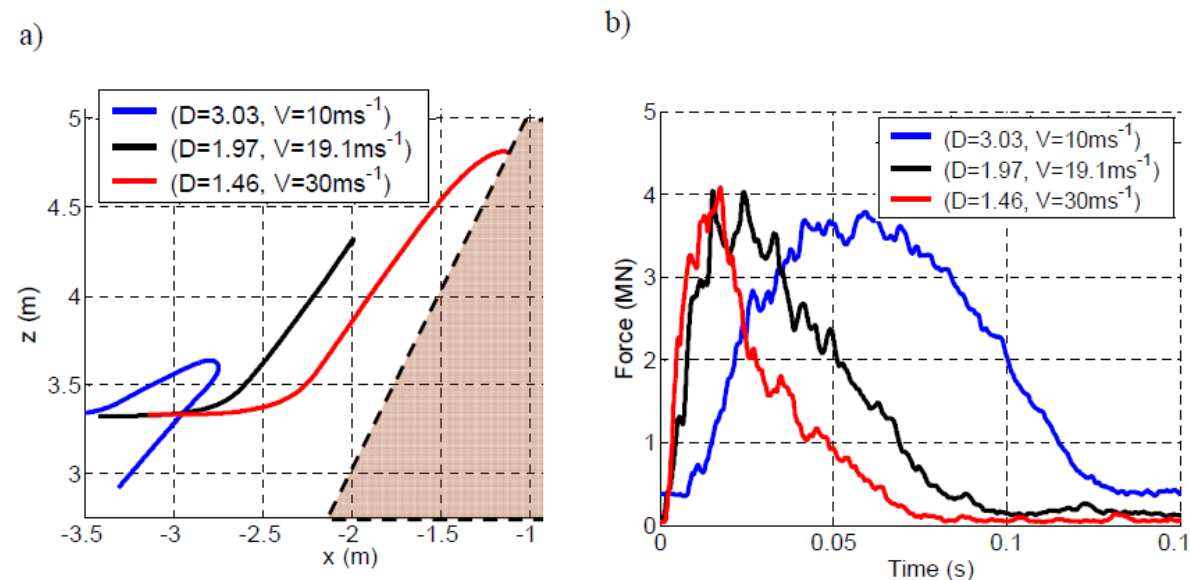
Obiettivi: studiare l'effetto dell'energia rotazionale e traslazionale dell'impatto su rilevati paramassi compattati e non rinforzati, mantenendo costanti i parametri meccanici e geometrici del rilevato.

Analisi DEM sviluppate da Plassiard e Donzè (2009, 2010)

A parità di energia traslazionale e assenza di rotazionale, sono state indagate l'influenza di diametro del blocco e sua velocità.



Raffigurazione del modello numerico. (Plassiard & Donzè, 2010)

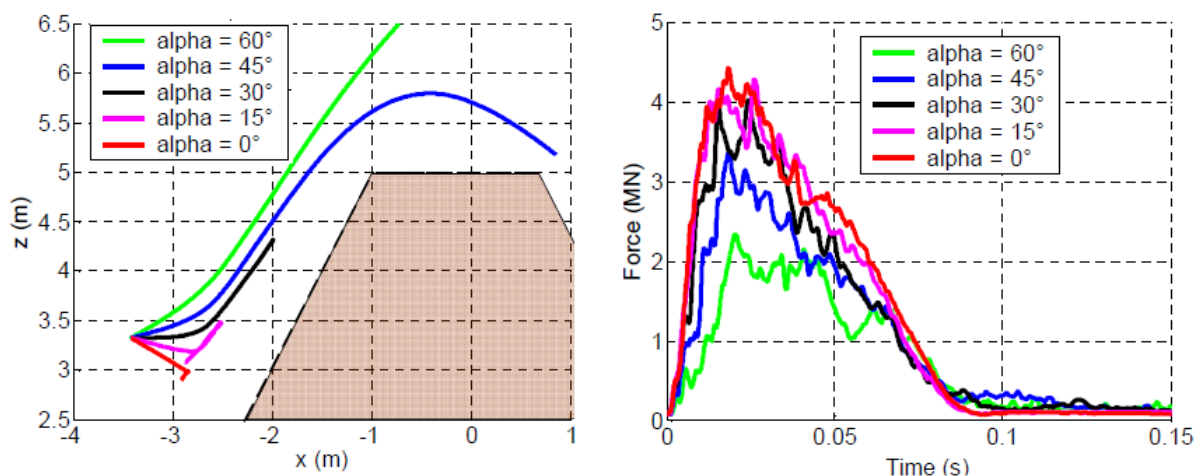


Simulazioni di impatto per energie cinetiche traslazionali di circa 2000 kJ ($\omega = 0$ rad/s) al variazione del diametro e della velocità: (a) traiettoria del blocco nel piano x-z rispetto alla configurazione del rilevato prima dell'impatto; (b) intensità della forza tra il blocco e il rilevato. (Plassiard & Donzè, 2009)

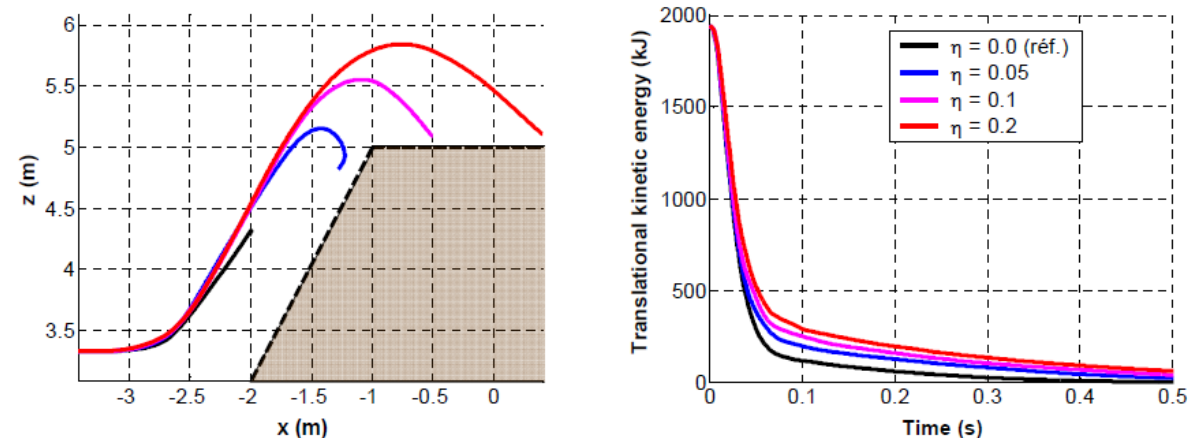
Analisi DEM sviluppate da Plassiard e Donzè (2009, 2010)

$$\text{Coefficiente } \eta = \frac{Ek_{\text{rotazionale}}}{Ek_{\text{totale}}}$$

Influenza della rotazione a fissata energia totale di 2000kJ e punto d'impatto (D=1,97m, v=19,1 m/s, h_{imp}=3,33m).



Simulazioni di impatto per diversi orientamenti dell'angolo d'impatto α : (a) traiettorie del blocco nel piano x-z; (b) intensità della forza trasmessa al rilevato. (Plassiard & Donzè, 2009)



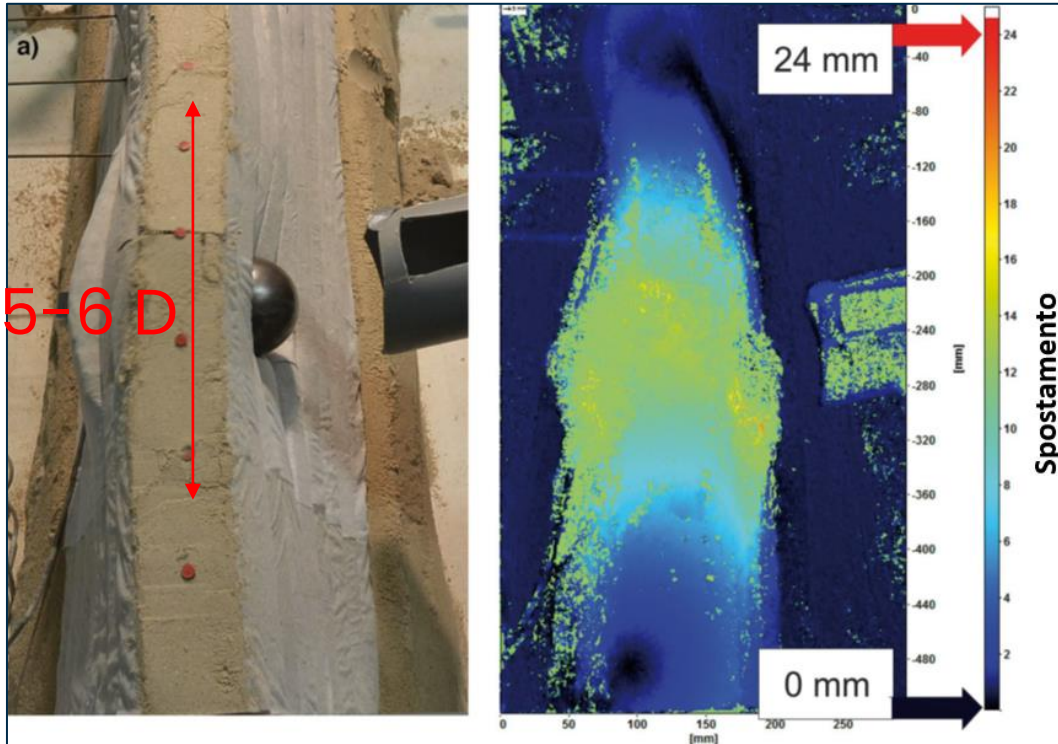
Simulazioni d'impatto per diverse energie cinetiche rotazionali: (a) traiettorie del blocco nel piano x-z; (b) dipendenza dal tempo dell'energia cinetica di traslazione. (Plassiard & Donzè, 2009)

Influenza dell'angolo d'impatto a fissata energia traslazionale di 2000kJ, punto d'impatto e velocità angolare nulla (D=1,97m, v=19,1 m/s, h_{imp}=3,33m).

Schema di uno dei test condotti da Hofmann e Mölk su un rilevato in terra sciolta. (Hofmann & Mölk, 2012)

Test di Hofmann e Mölk (2012):

Metodi di misura utilizzati: trasduttori di spostamento a barre + PIV (particle image velocity)



Modificato da Hofmann et al., 2017



*Immagine di un test su rilevato sciolto che ha portato la struttura al collasso.
(Hofmann & Mölk, 2012)*

Test di Hofmann e Mölk → ONR 24810 (2021)

Situazione progettuale BS3: SLU in presenza d'impatto escludendo altri carichi eccezionali

VERIFICA SULL'ALTEZZA:

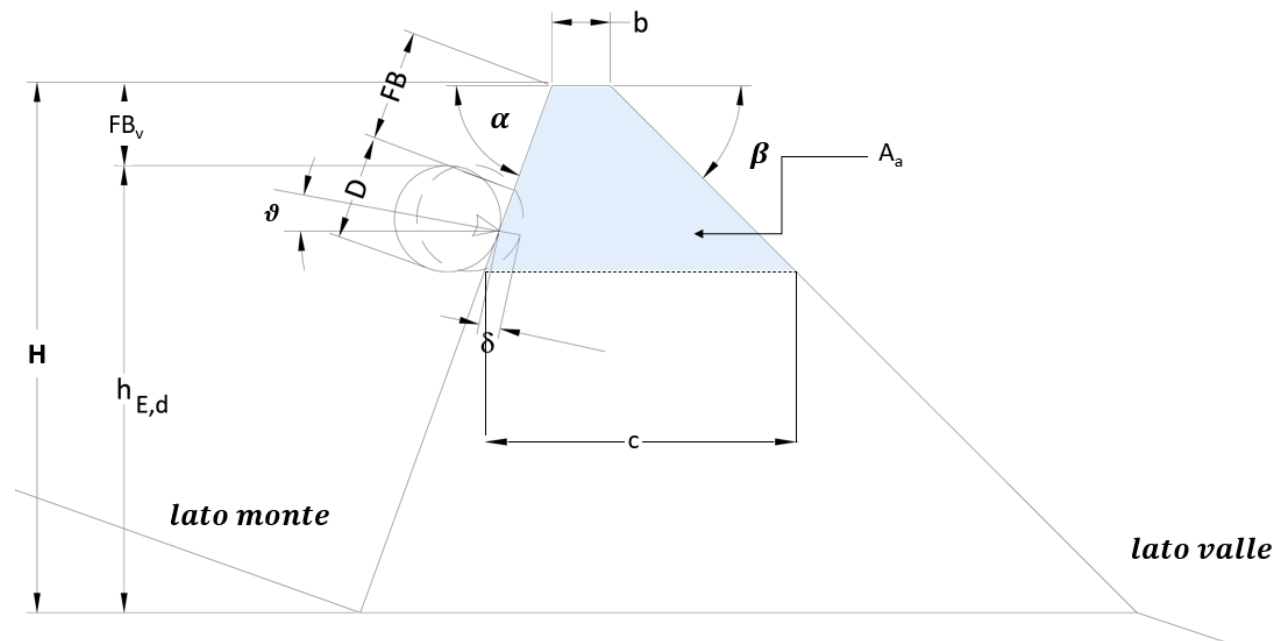
$$H \geq h_{E,d} + FB \sin(\alpha)$$

2D per pendenze < 50°

VERIFICA STRUTTURALE:

$$E^* = \frac{E}{\gamma A_a D h_a} \quad E = \frac{mv^2}{2}$$

$$\gamma = \rho_0 g \quad A_a = \frac{b+c}{2} h_a$$



Modificato da Technical Protection against Rockfall – Terms and Definitions, Effects of Actions, Design, Monitoring and Maintenance, 2021).

Test di Hofmann e Mölk → ONR 24810 (2021)

VERIFICA STRUTTURALE:

Una volta calcolato il valore di energia equivalente, la penetrazione δ viene valutata per mezzo del grafico progettuale e, tramite questa, la forza statica equivalente come di seguito valutata su una larghezza pari a 5-6D:

$$F_{max} = \frac{m_k v_k^2}{\delta} \cdot \gamma_E$$

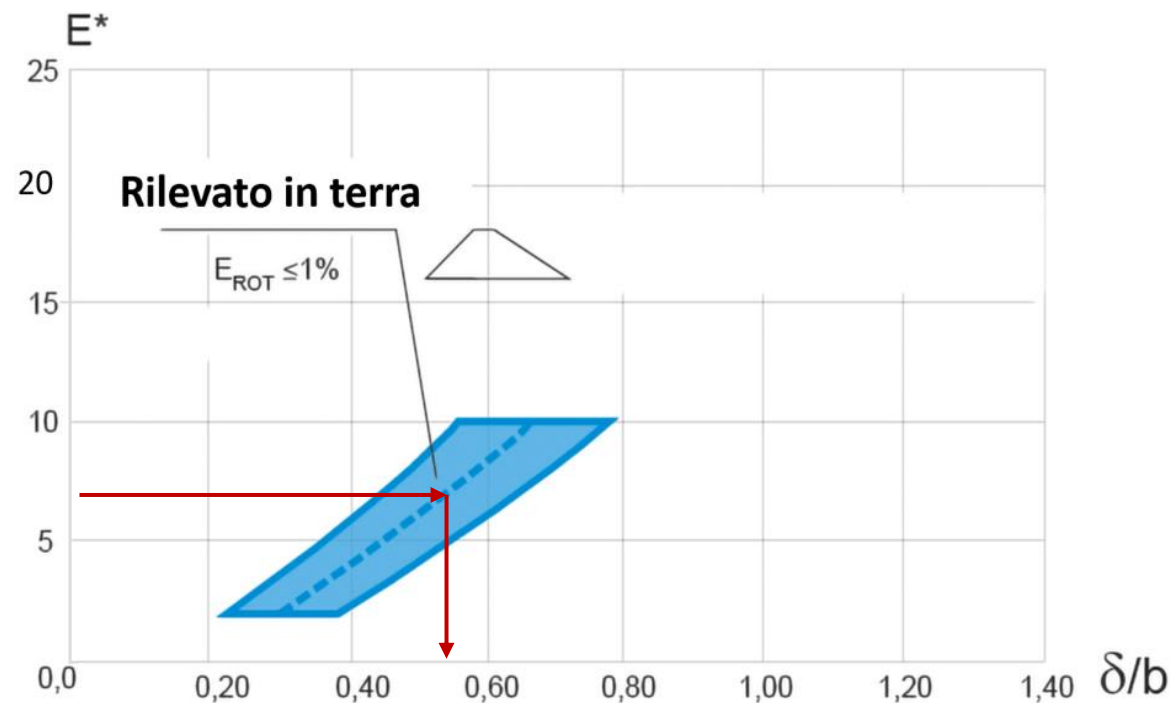


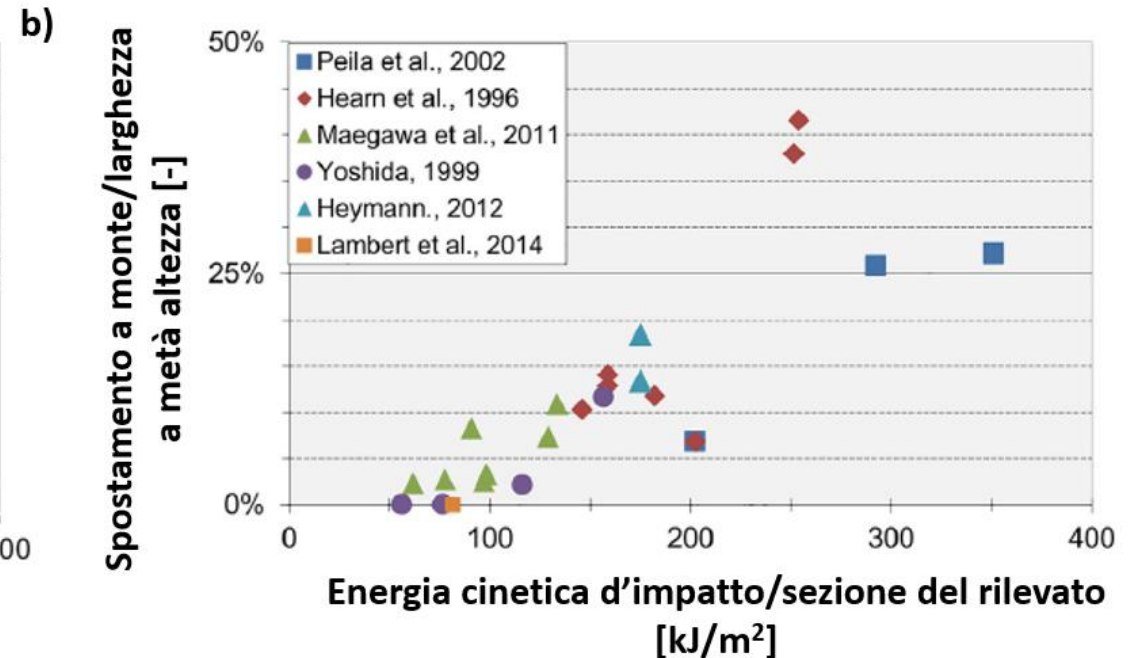
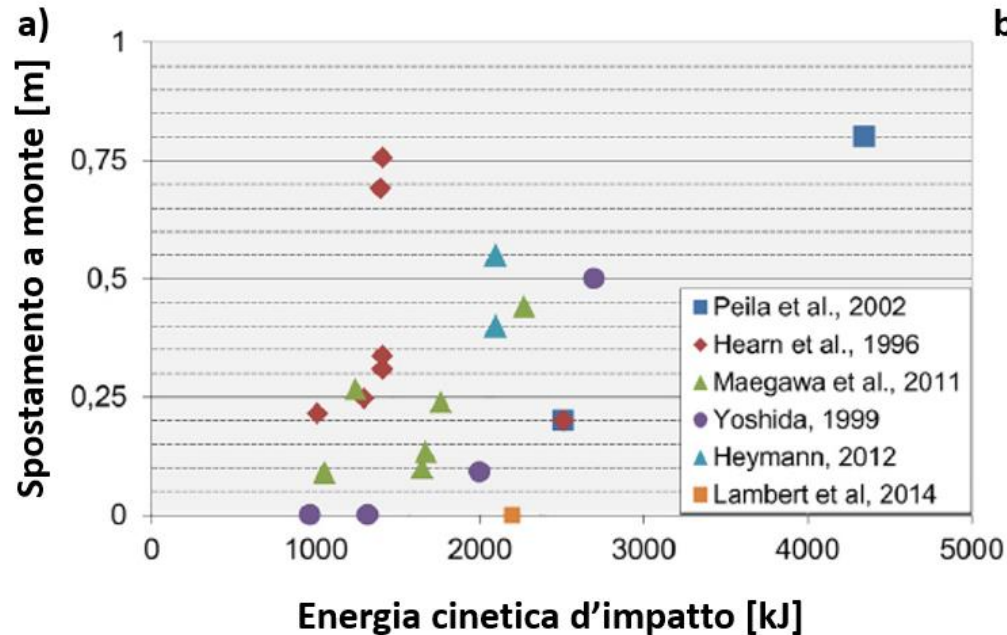
Grafico progettuale per i rilevati paramassi in terra non rinforzata (modificato da *Technical Protection against Rockfall – Terms and Definitions, Effects of Actions, Design, Monitoring and Maintenance*, 2021).

Analisi sviluppate da Lambert e Kister (2018)

Gli autori hanno elaborato i dati di energia e penetrazione di test su rilevati paramassi presenti in letteratura eseguendo una duplice normalizzazione:

$$E_{k,n} = \frac{E_k}{A}$$

$$\delta_n = \frac{\delta_{max}}{b(H/2)}$$



Analisi sviluppate da Lambert e Kister (2018)

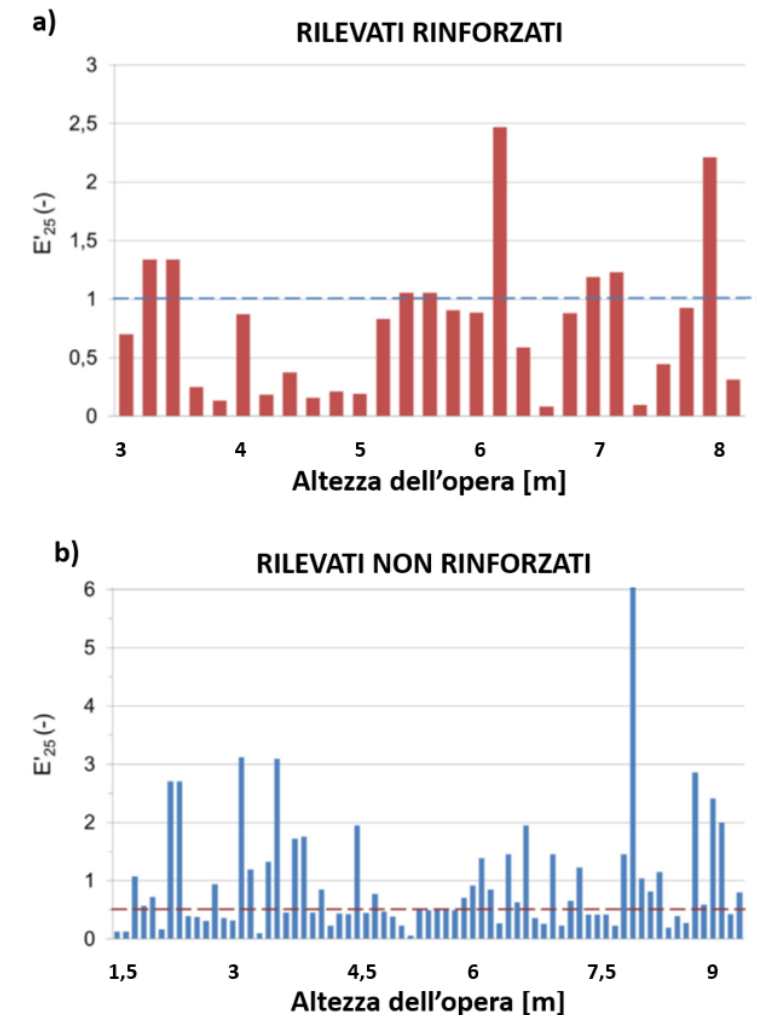
Viene pertanto definito il coefficiente E'_{25} come segue:

$$E'_{25} = \frac{E_k}{250 \cdot A} \leq 1$$

Da evidenze sperimentali presenti in letteratura, gli autori hanno proposto di adattare il criterio con un fattore 0,5 per i rilevati in terra sciolta:

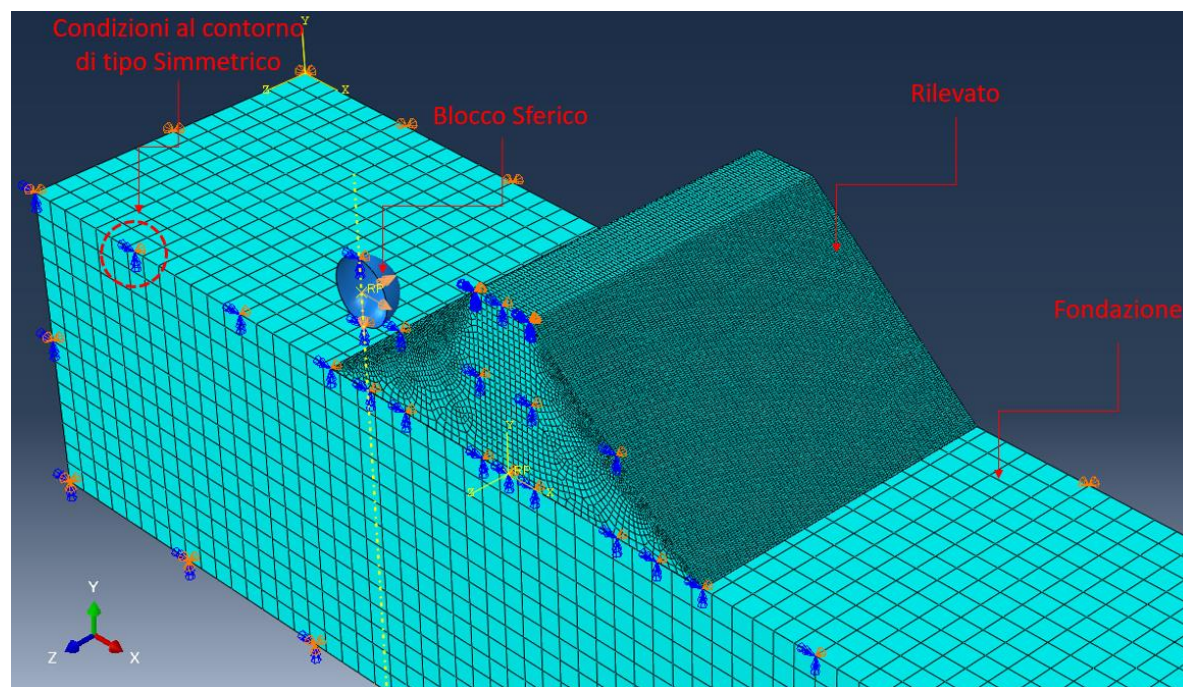
$$E'_{25} = \frac{E_k}{250 \cdot A} \leq 0.5$$

Risultati del metodo applicato a 98 casi applicativi in Francia e Svizzera fra rilevati rinforzati e non rinforzati. (Modificata da S. Lambert & B. Kister, 2018)



Caratteristiche del codice numerico

- Codice agli elementi finiti Abaqus/Explicit Cae 2022.
- Parametri meccanici dedotti da precedenti pubblicazioni di Peila e al., 2007; Ronco e al., 2009.
- Legame costitutivo del terreno: Drucker-Pragher modificato.

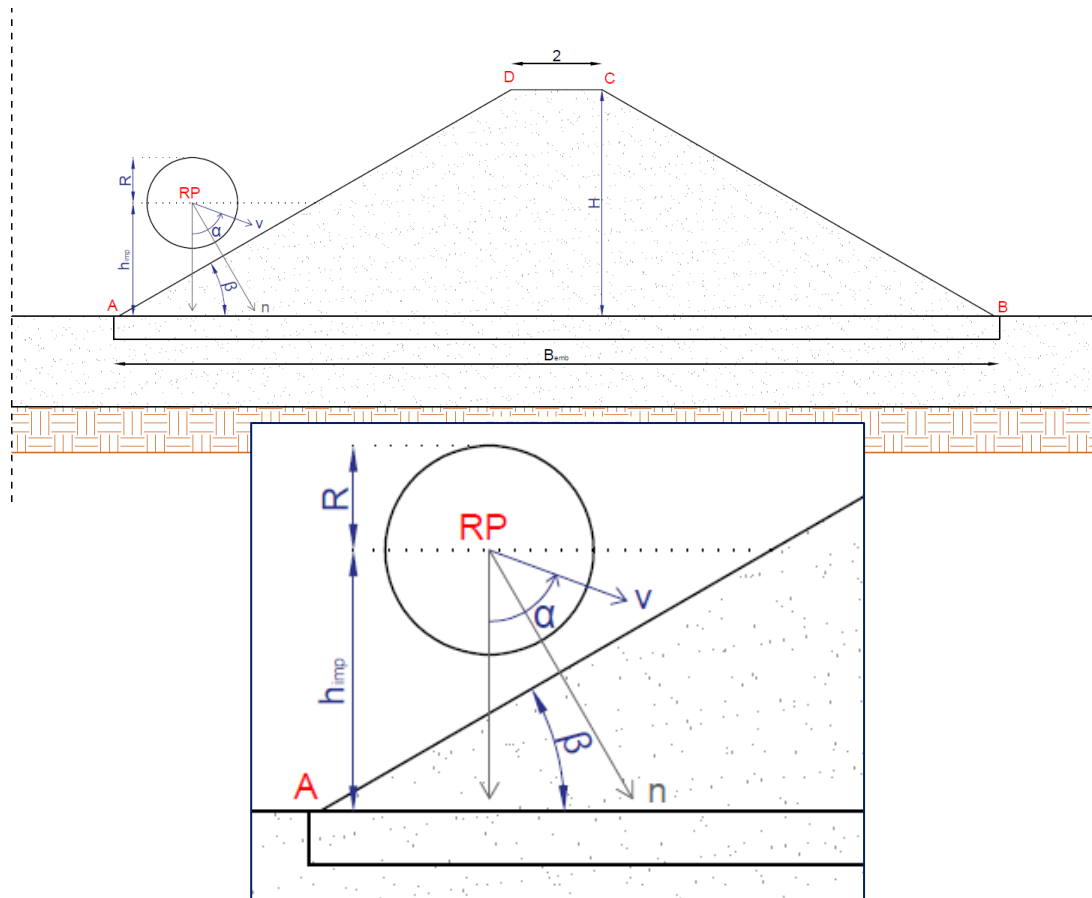


Parametri meccanici del terreno compattato

Elasticità lineare	Modulo elastico	200 MPa
	Coefficiente di Poisson	0.25
Drucker-Pragher modificato	Angolo di attrito alla M&C	34°
	Flow stress ratio	0.78
	Angolo di dilatanza	0°
Drucker-Pragher incrudimento	Tipologia di meccanismo	shear
	coesione	540 kPa
Damping alla Rayleigh	α	1.1
	β	0
Legge attrito	Coefficiente attrito	0.7

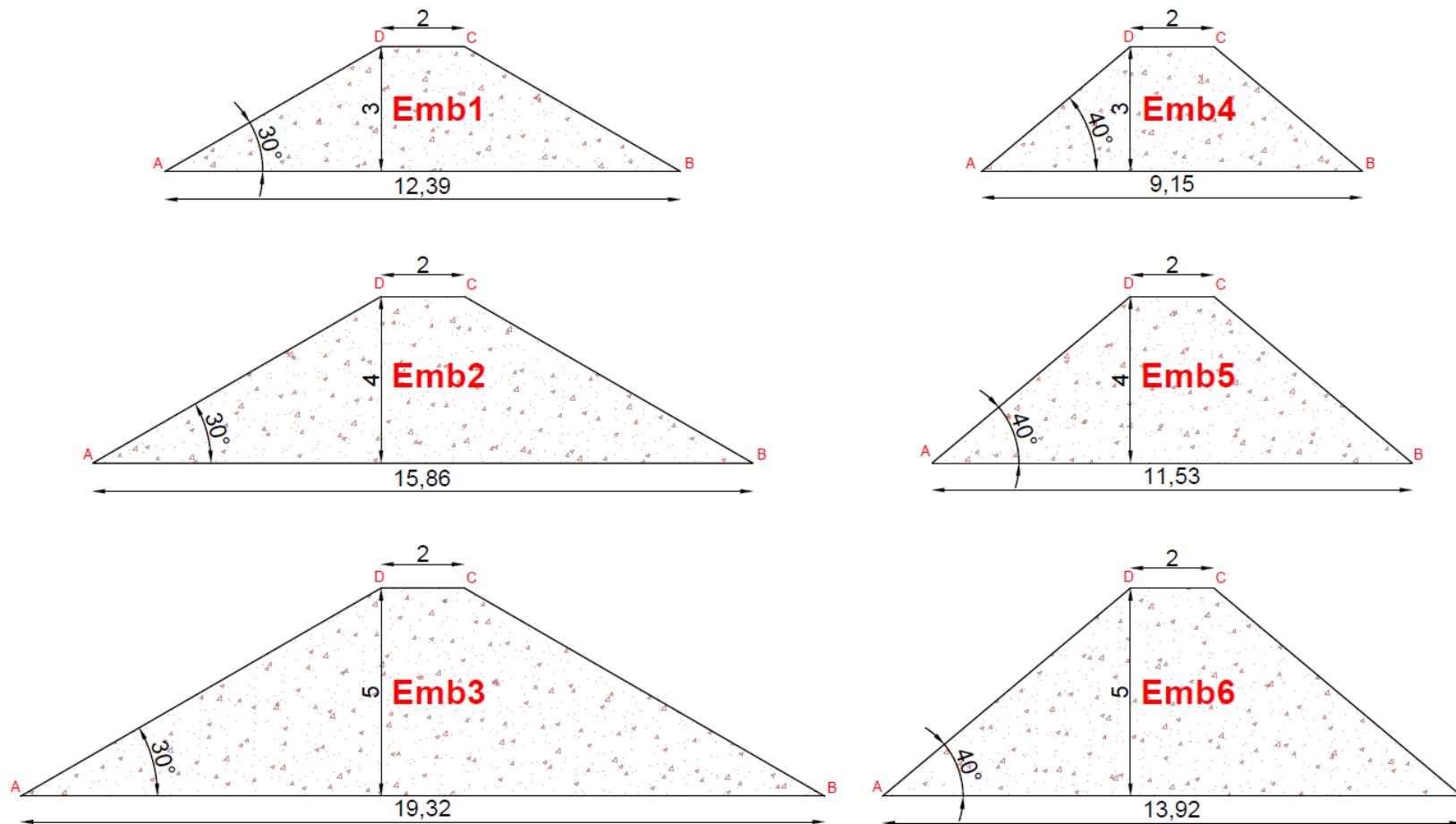
Caratteristiche del codice numerico

Più di 1700 analisi parametriche a 5 parametri → idoneo script in Python



Parametro	Numero di combinazioni	Valori
Raggio del blocco R	4	- 0.25 m - 0.50 m - 1.00 m - 1.50 m
Altezza d'impatto misurato dalla base del rilevato al baricentro della sfera h_{imp}	2	- $H/2$ - $H - 5R$
Angolo delle sponde del rilevato (considerate simmetriche) β	2	- 30° - 40°
Altezza del rilevato H	3	- 3.00 m - 4.00 m - 5.00 m
Modulo del vettore velocità d'impatto v	3	- 10 m/s - 20 m/s - 30 m/s
Angolo del vettore velocità, misurato in senso antiorario dalla direzione verticale verso il basso α	4	- β - $90^\circ - \beta/2$ - 90° - $90^\circ + \beta/2$
Velocità angolare del blocco ω	3	- 0 rad/s - 10 rad/s - 20 rad/s

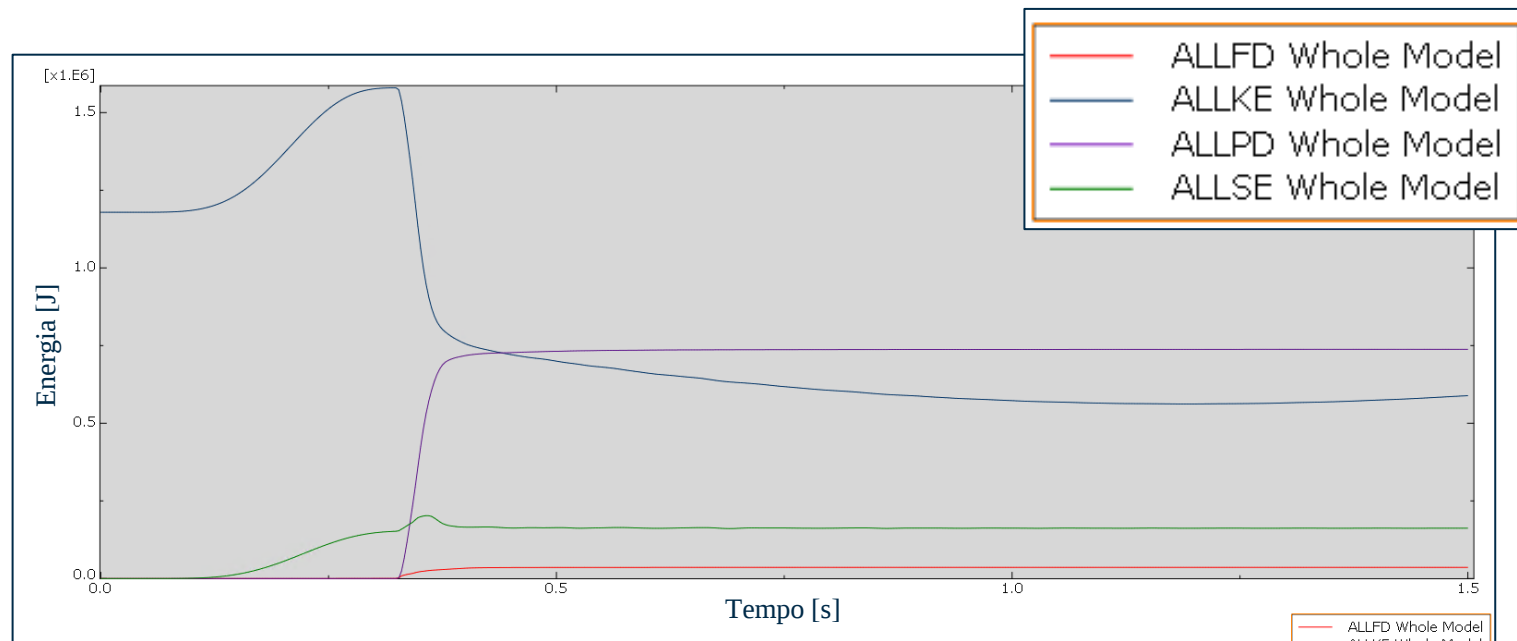
Le combinazioni generano 6 geometrie di rilevato differenti denominate come segue:



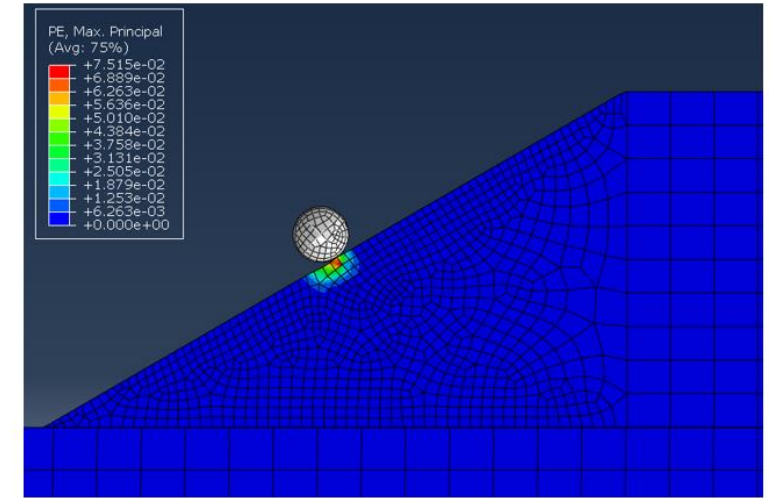
Risultati di carattere generale

Meccanismo resistente con il quale reagisce il rilevato:

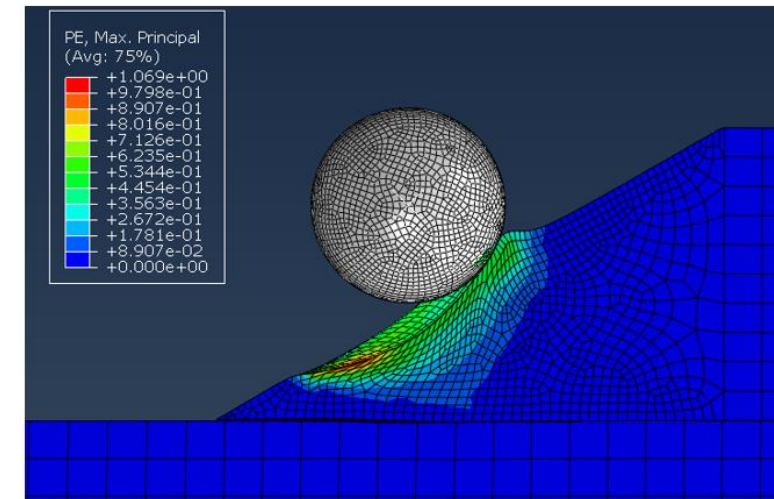
- Indipendente dal livello energetico;
- Prevalentemente energia di plasticizzazione;
- Limitazione di un modello FEM/XFEM.



Ripartizione delle energie durante l'impatto. Caratteristiche dell'impatto: massa = 11728 kg, raggio = 1 m, velocità = 20 m/s e energia di 2345 kJ.



a)

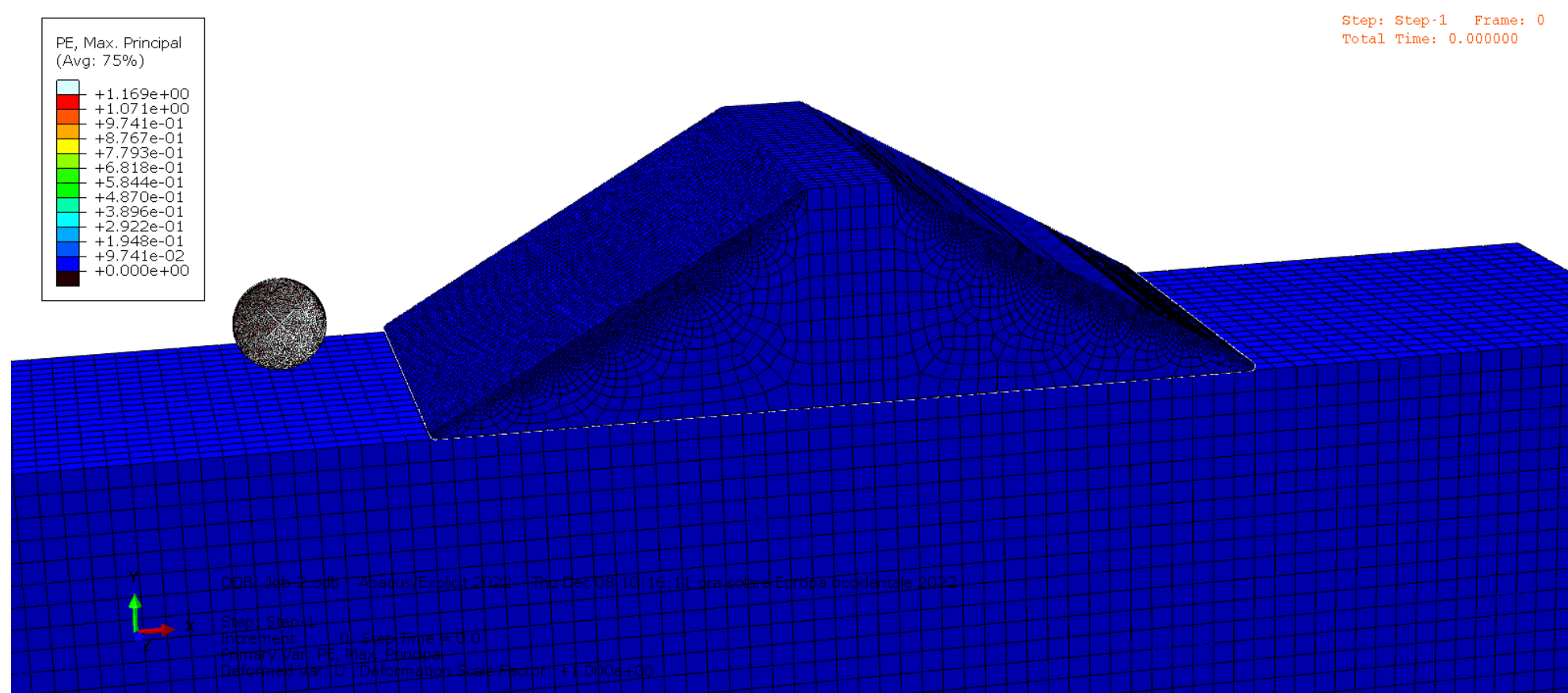


b)

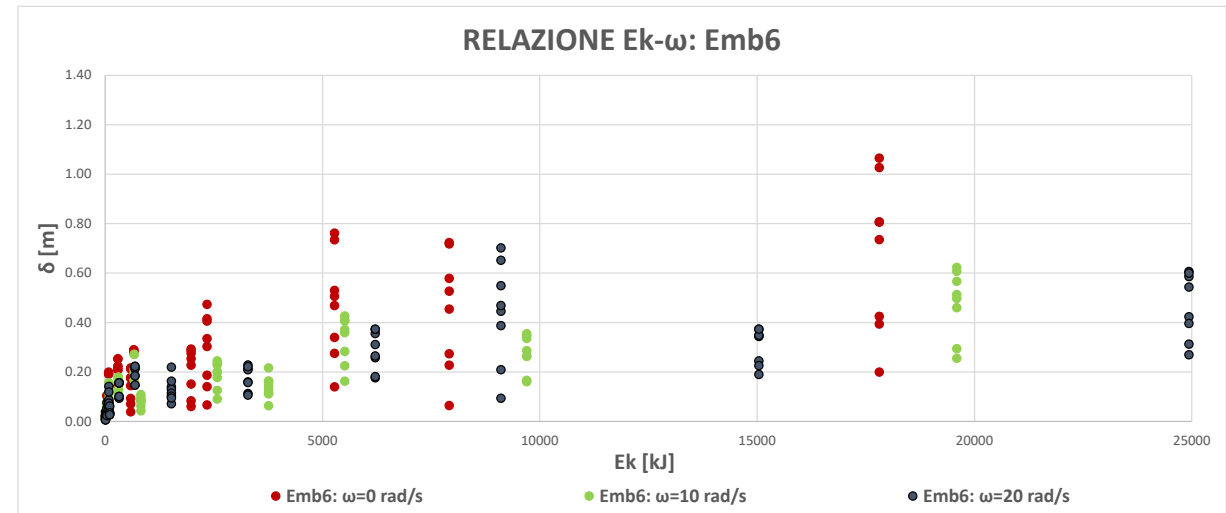
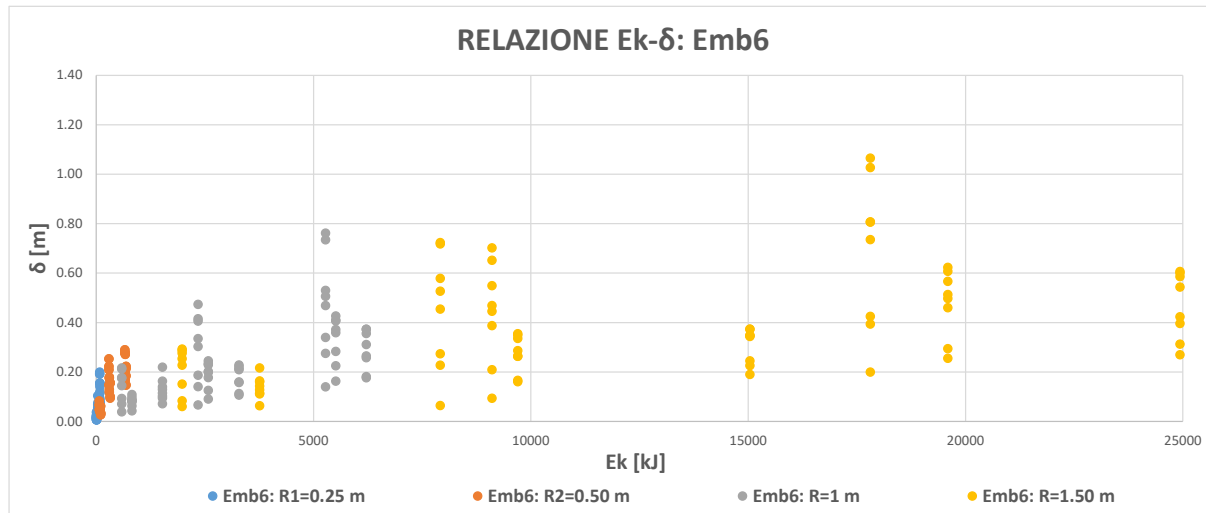
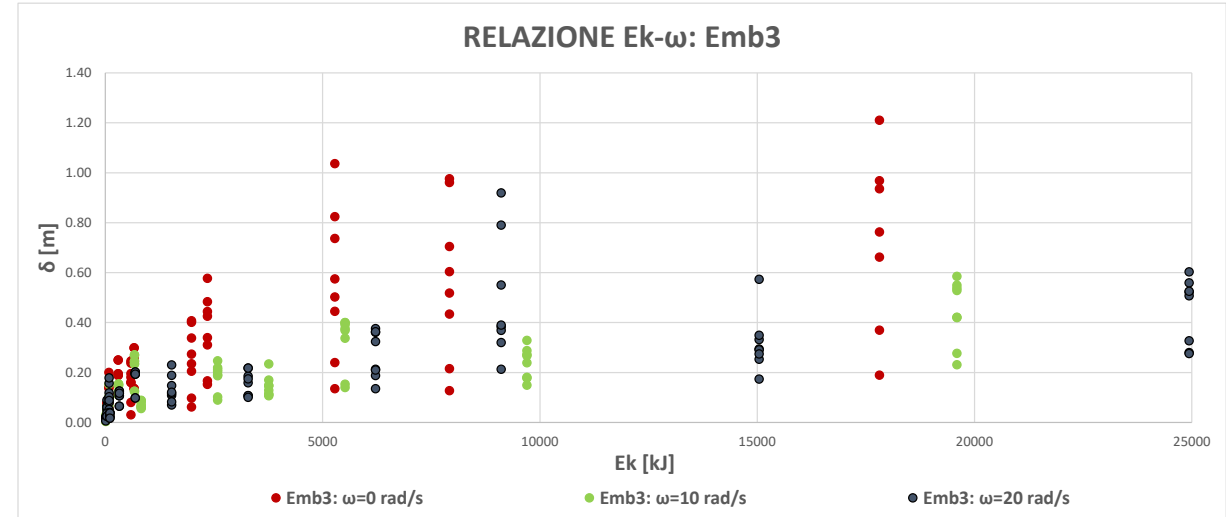
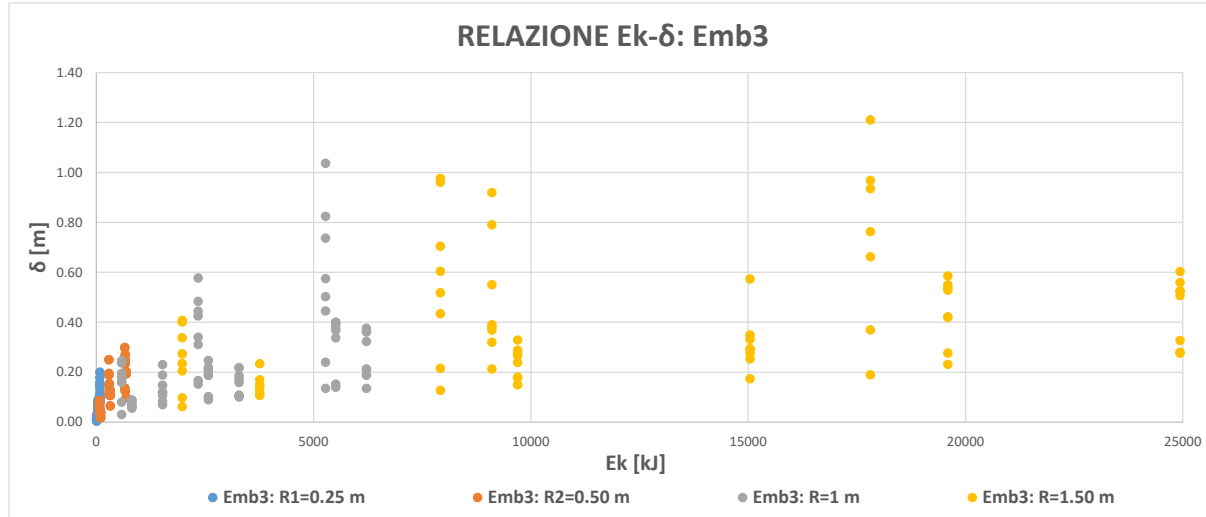
Deformazioni plastiche sul piano XY nel caso di blocco di raggio pari a 25 cm e 1,50 m.

Presentazioni dei risultati

La **maggiore criticità** osservata in relazione **all'incapacità** di contenimento dei blocchi, è il sormonto per effetto del rimbalzo e del rotolamento del blocco sul paramento di monte della struttura.



Relazioni fra la penetrazione e i parametri



Valutazione al superamento del blocco oltre il rilevato

Criterio di superamento → studio della traiettoria assunta dal baricentro del blocco: se le sue coordinate superano lo spigolo della cresta allora il superamento è avvenuto.

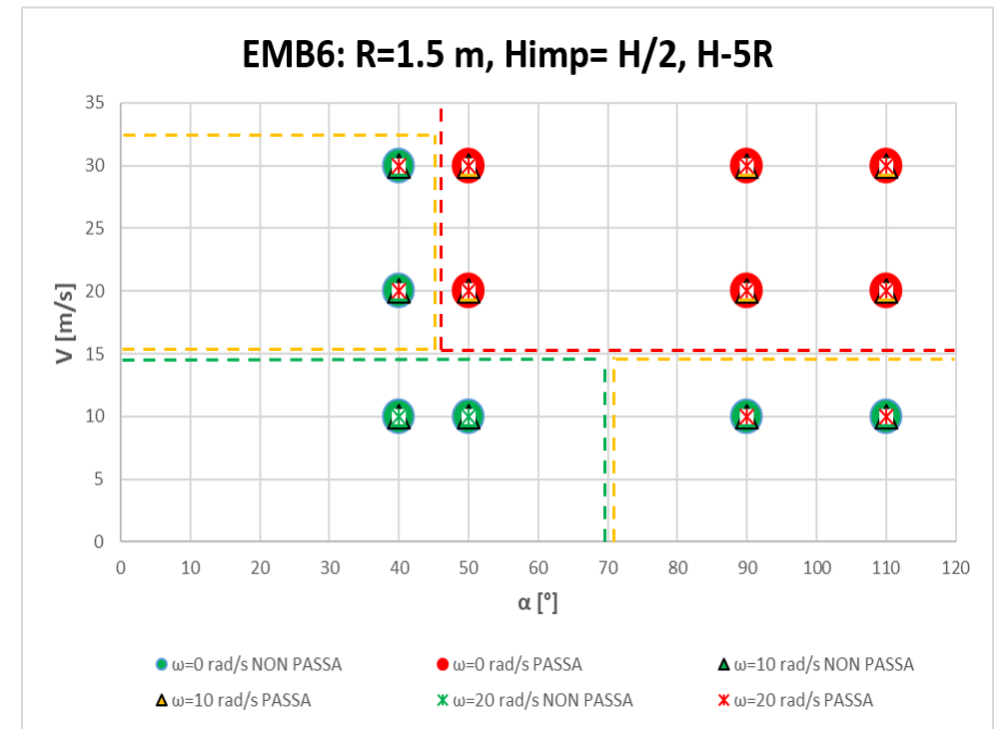
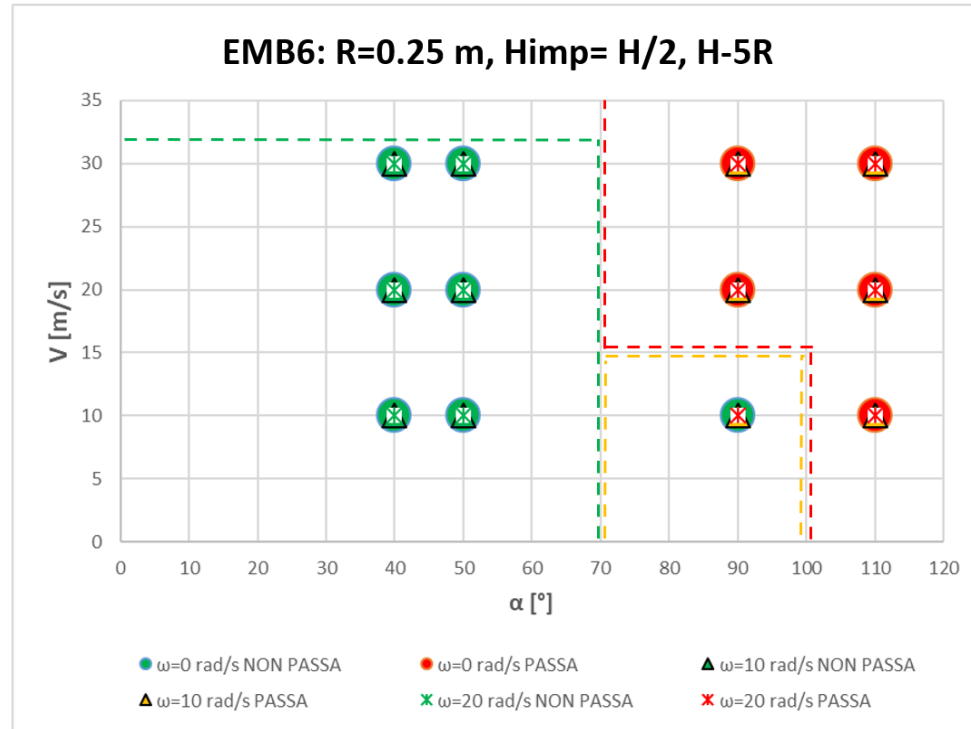
$$\text{VERIFICA AL SUPERAMENTO} = f(E_k, R, v, \omega, \alpha, h_{imp})$$


POCO INFLUENTE

Elaborazione di pratici grafici progettuali:

- **dominio verde** → blocchi efficacemente fermati
- **dominio arancione** → parte dei blocchi efficacemente fermati
- **dominio rosso** → blocchi non fermati

Presentazioni dei risultati

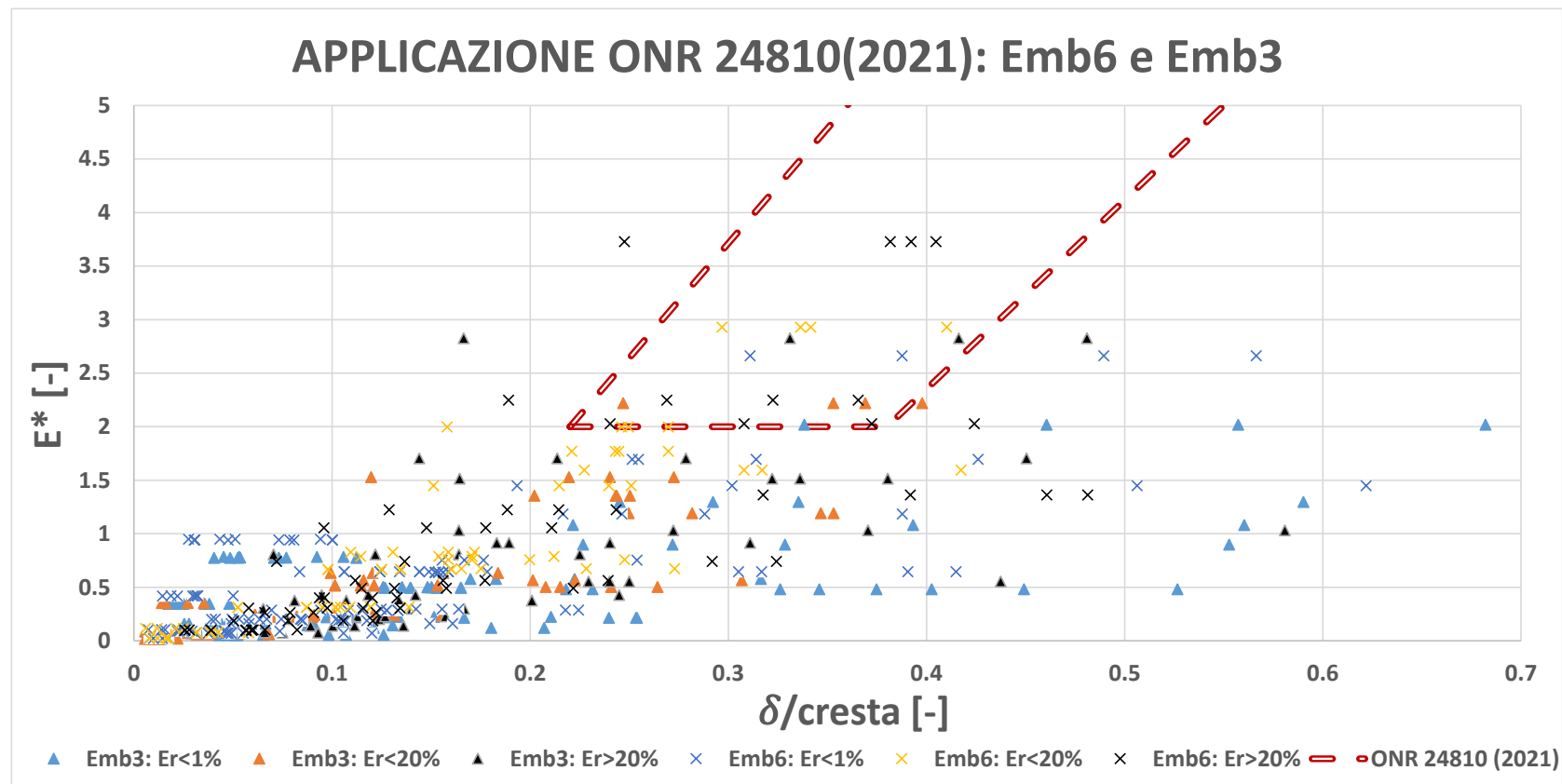


In quei casi per cui la traiettoria impostata è tangente il p.c., il piano d'appoggio, subito dopo il primo impatto, tende a fornire al blocco una traiettoria piuttosto verticale e quindi a facilitarne il sormonto:

VERIFICA DELLA PRESCRIZIONE ONR 24810 SULL' ALTEZZA D'IMPATTO

Applicazione dei casi simulati alla norma austriaca:

- buona parte dei punti risiede al di fuori del dominio della norma;
- punti decentrati verso l'origine.

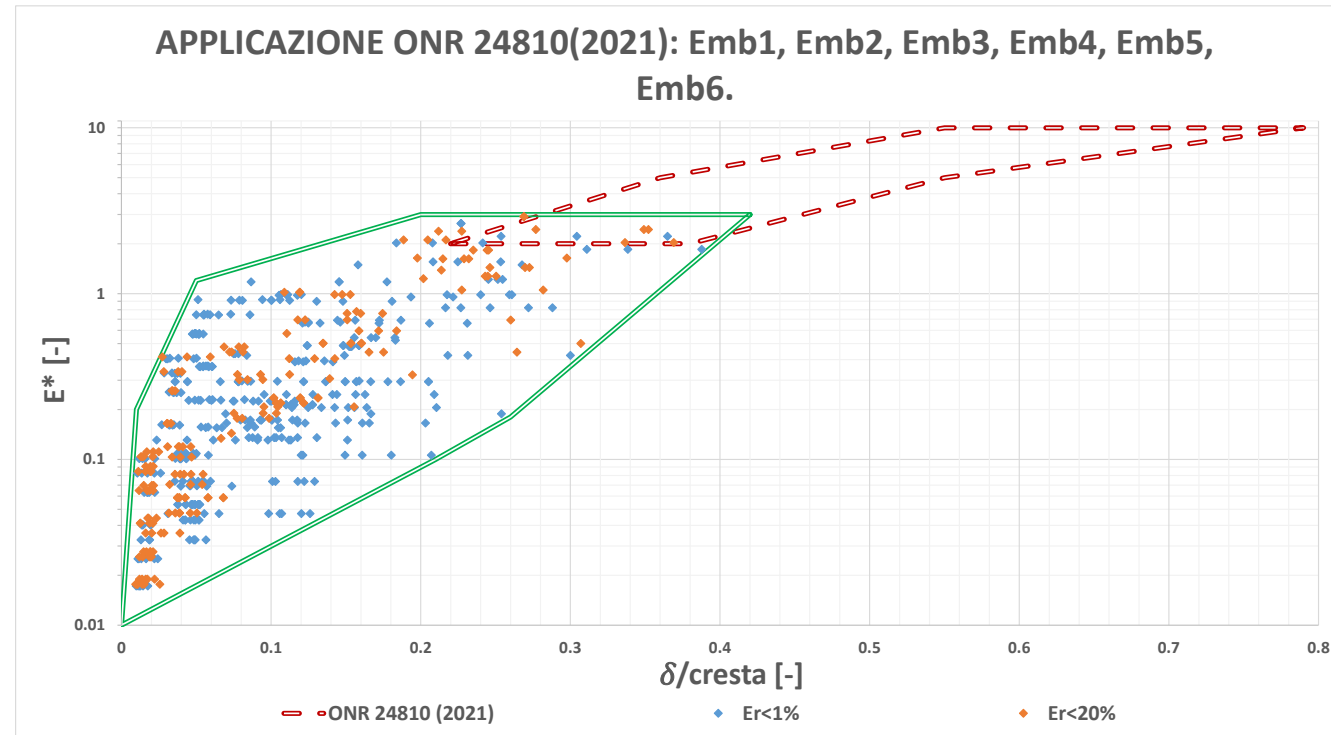


Confronto fra le simulazioni e le norme ONR 24810 (2021)

DEPURAZIONE dai casi **IRREALISTICI** ($E_{rot} > 20\%$) e quelli di **SORMONTO**



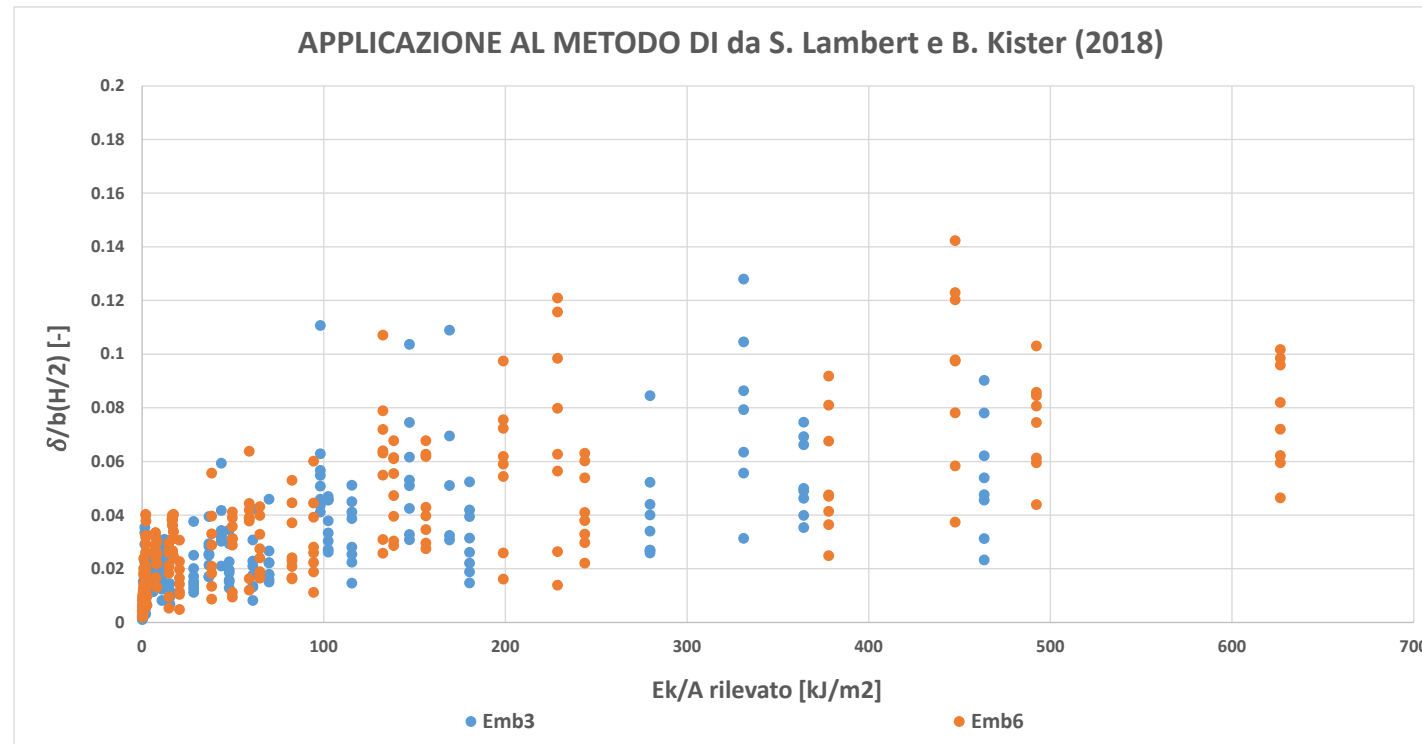
NUOVO DOMINIO su un piano semilogaritmico valido per $E^* < 2$



Confronto fra le simulazioni e il metodo di Lambert e Kister

Applicazione del metodo proposto dagli autori Lambert e Kister alle simulazioni realizzate:

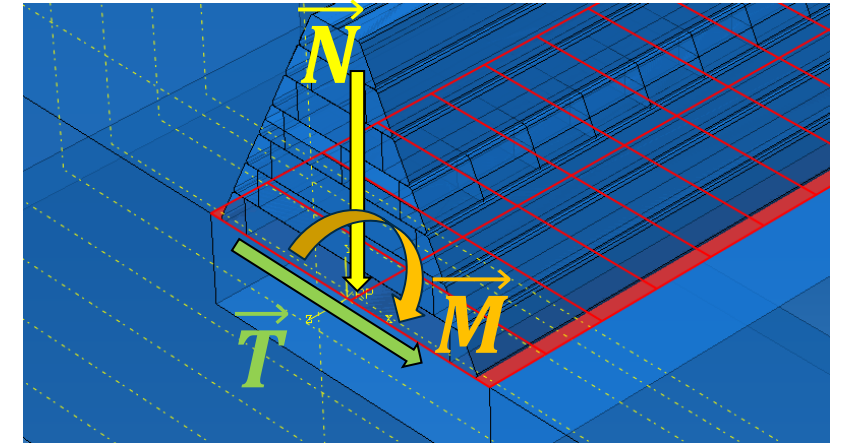
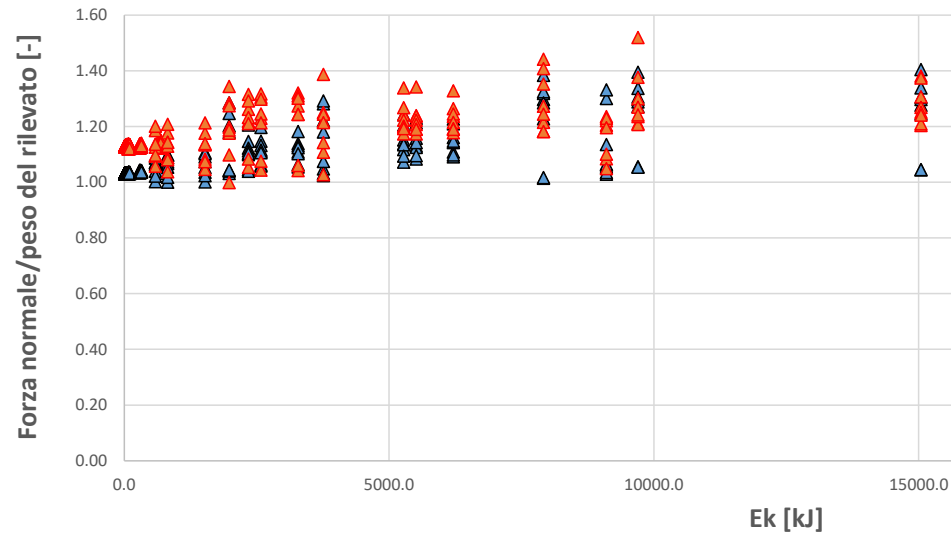
$$E'_{25} = \frac{E_k}{250 \cdot A} \leq 0.5$$



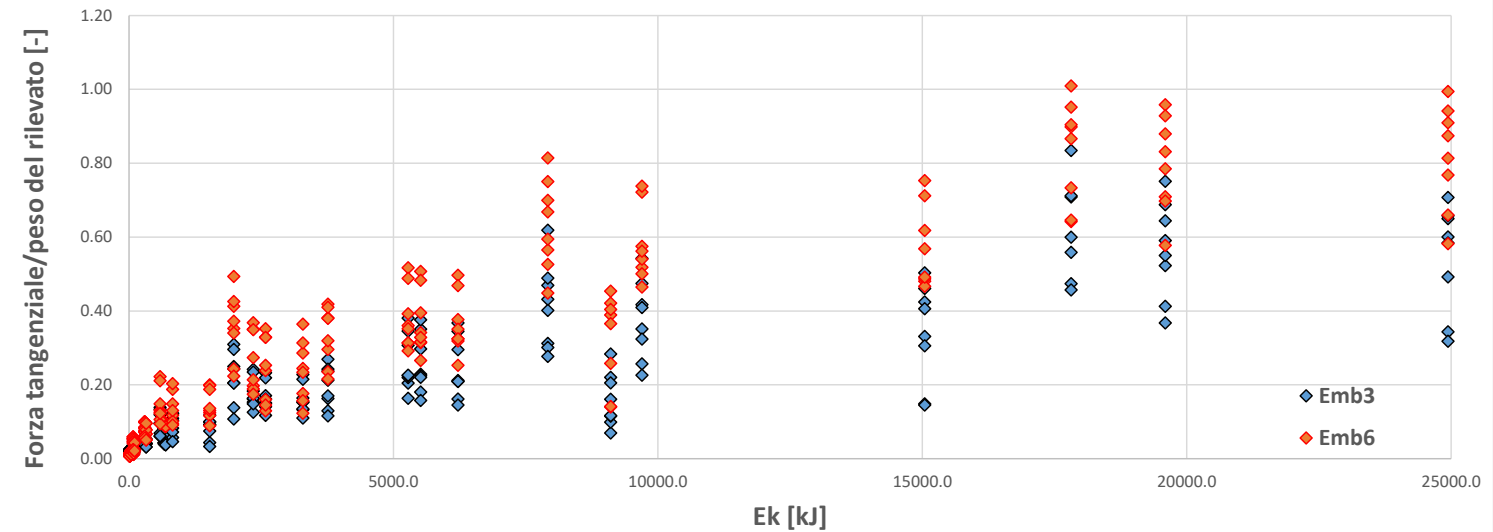
Applicazione del metodo proposto da S. Lambert e B. Kister ai rilevati Emb3 e Emb6.

Sollecitazioni in fondazione

FORZA NORMALE IN FONDAZIONE: Emb6 e Emb3



FORZA TANGENZIALE IN FONDAZIONE: Emb6 e Emb3



**GRAZIE PER
L'ATTENZIONE**



**Politecnico
di Torino**