



Mitigazione dei Rischi Naturali per la Sicurezza  
e la Mobilità nelle Aree Montane del Mezzogiorno

**PNR 2015-2020**

Area di Specializzazione *Smart, Secure and Inclusive Communities*



**Obiettivi Realizzativi 2 e 5**

**Valutazione del Rischio Idrogeologico**

**Soluzioni per la mitigazione del rischio idrogeologico**

## **MODELLAZIONE NUMERICA DEL COLLASSO DI UN RILEVATO STRADALE NEL COMUNE DI TRIVIGNO (PZ)**

Sabatino Cuomo, Angela Di Perna

Consorzio inter-Universitario per la previsione e  
la prevenzione dei Grandi Rischi - Università degli Studi di Salerno

29/02/2024



UNIONE EUROPEA  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



## INDICE

Sommario.....	2
1. Area di studio ed individuazione della sezione di analisi.....	2
2. Configurazione di input.....	4
3. Analisi numeriche agli elementi finiti (FEM) .....	5
4. Analisi numeriche alle grandi deformazioni (MPM) .....	7
5. Analisi di sensitività.....	9
Conclusioni.....	11



# MODELLAZIONE NUMERICA DEL COLLASSO DI UN RILEVATO STRADALE NEL COMUNE DI TRIVIGNO (PZ)

Sabatino Cuomo, Angela Di Perna

## SOMMARIO

Il presente report descrive la procedura utilizzata per l'analisi del collasso di una parte di rilevato stradale nel Comune di Trivigno (PZ). Sono state condotte varie analisi parametriche per capire e determinare il meccanismo di collasso del rilevato. Tali analisi sono state eseguite con metodi numerici classici agli elementi finiti e con metodi avanzati alle grandi deformazioni. Le attività descritte sono state svolte dall'Università degli Studi di Salerno nell'ambito dell'OR5 "Soluzioni per la mitigazione del rischio idrogeologico" nell'ambito del Progetto MITIGO "Mitigazione dei rischi naturali per la sicurezza e la mobilità nelle aree montane del Mezzogiorno".

### 1. Area di studio ed individuazione della sezione di analisi

L'area di studio è rappresentata in Figura 1, in cui è possibile notare l'accumulo di materiale mobilitato durante il collasso del rilevato.

È stata condotta dapprima un'analisi temporale sulla costruzione della strada e quindi del rilevato stradale (Figura 2) da cui è emerso che:

- la costruzione della strada ha avuto inizio nel 2015 ed è terminata nel 2017;
  - nel 2021 è avvenuto un primo collasso;
  - nel marzo 2022 si è verificato il collasso una parte della scarpata con rilevante mobilitazione di materiale.
- Tale analisi, insieme ai DTM 1x1m forniti, ha permesso di ricavare il profilo altimetrico riportato in Figura 3. La pendenza della scarpata (28°) è stata ricavata dalle sezioni del rilevato che non hanno subito alcun crollo.

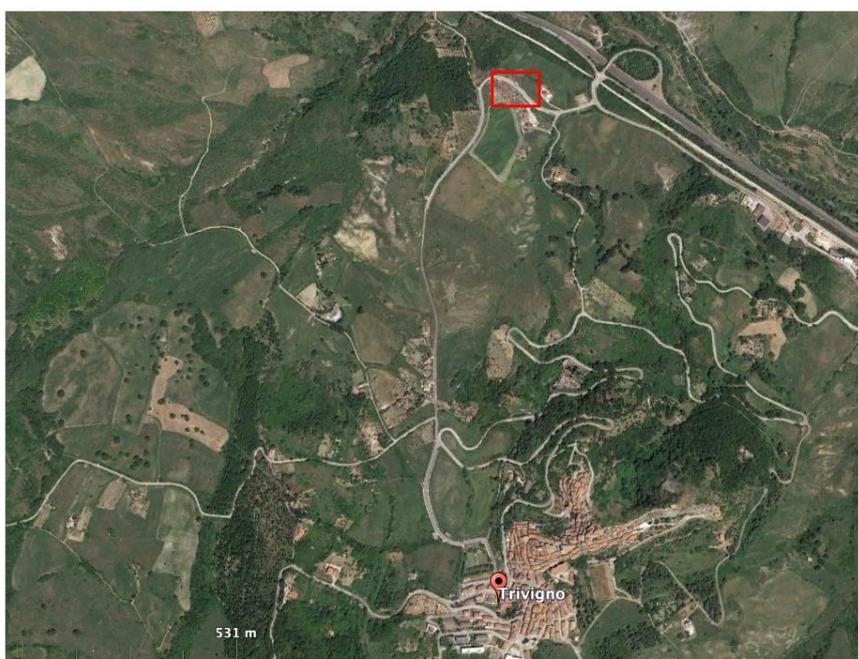


Figura 1: Inquadramento territoriale dell'area di studio.



Figura 2: Analisi temporale della costruzione del rilevato fino alla data del collasso.

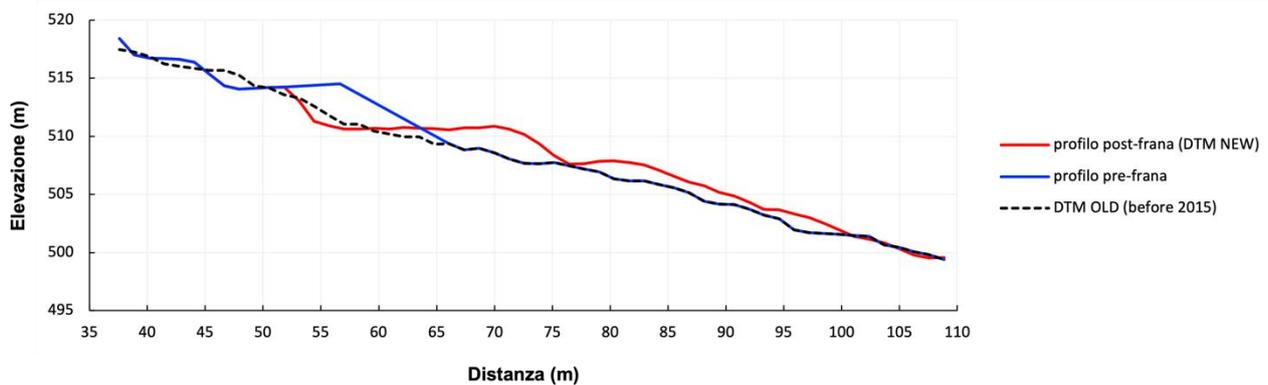
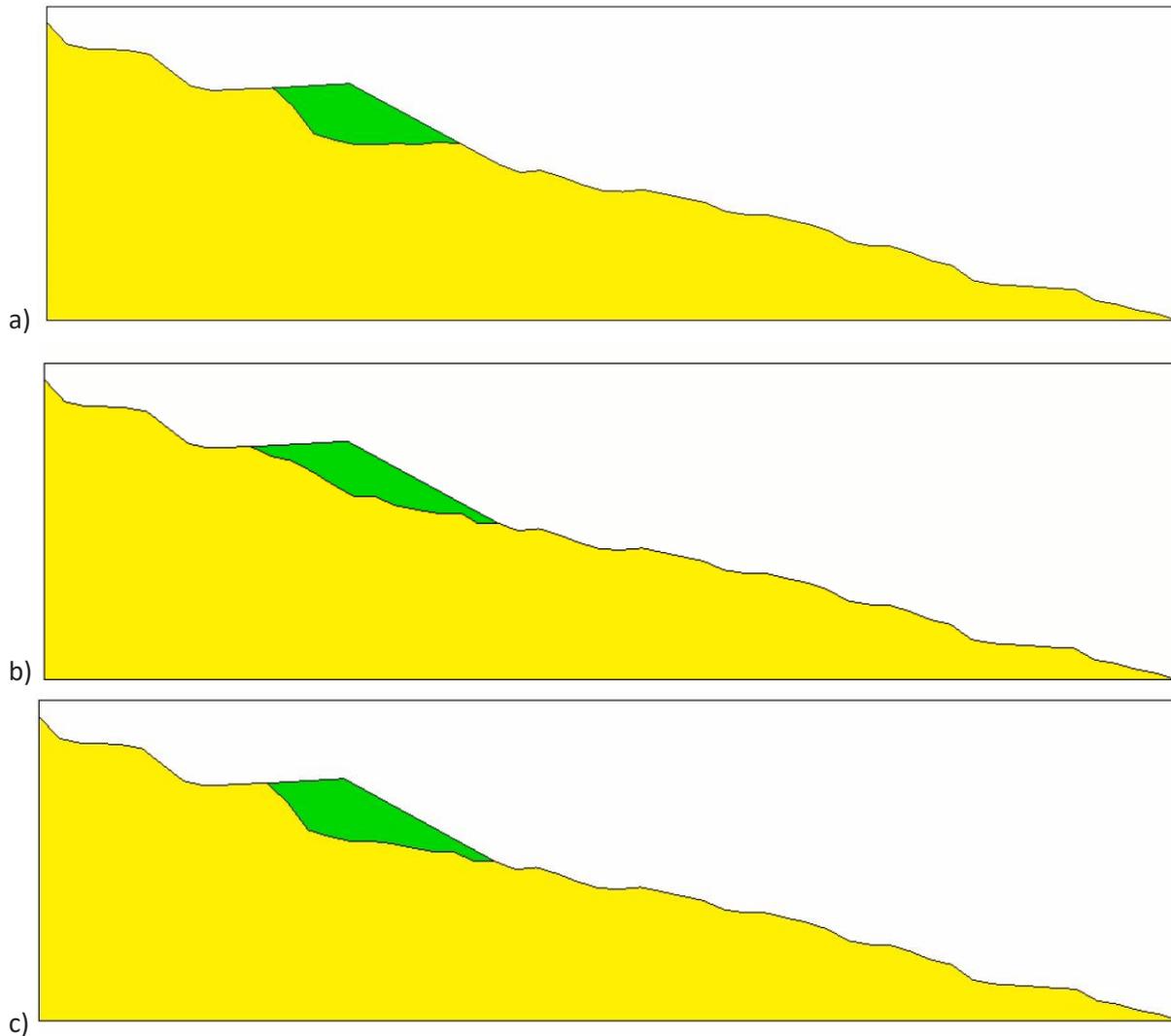


Figura 3: Profilo altimetrico della sezione scelta per lo studio.

## 2. Configurazioni di input

Sono state ipotizzate 3 configurazioni da utilizzare come input per le analisi numeriche. La configurazione in Figura 4a rappresenta in verde la porzione di rilevato compresa tra la linea rossa e la linea blu di Figura 3, mentre il resto in giallo rappresenta il materiale argilloso. Nella Figura 4b il rilevato è rappresentato dalla zona tra la linea blu e la linea nera di Figura 3, mentre in Figura 4c è stato considerato l'involuppo tra le linee rossa e nera.

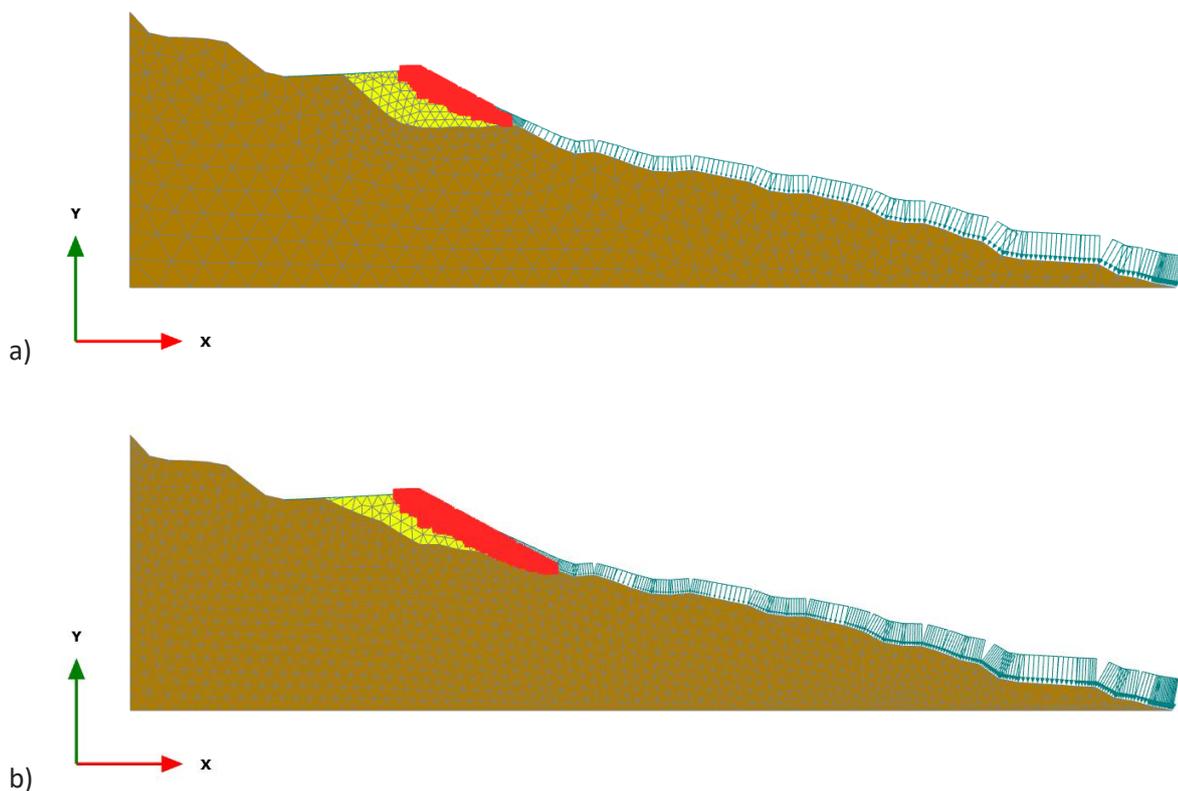


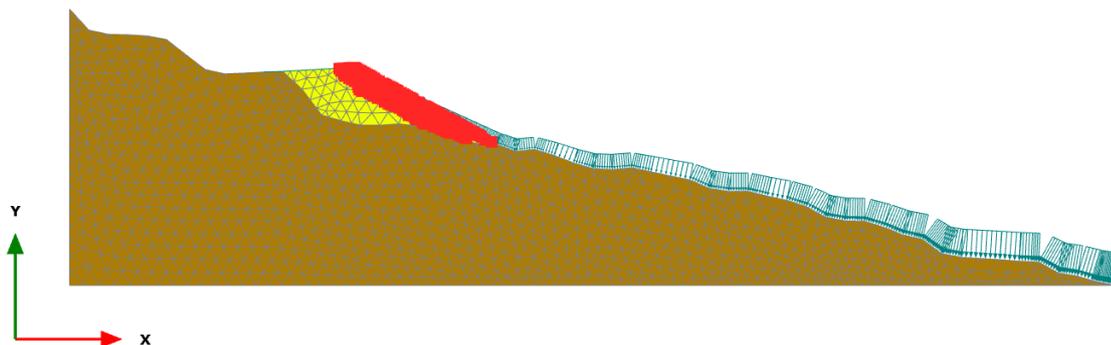
**Figura 4:** Configurazioni di input ipotizzate: a) rilevato 1; b) rilevato 2; c) rilevato 3.

### 3. Analisi numeriche agli elementi finiti (FEM)

Sono state condotte analisi numeriche agli elementi finiti (FEM) con il codice commerciale Plaxis 2D per studiare le condizioni di stabilità del rilevato stradale. Sono state utilizzate le 3 configurazioni di input descritte al paragrafo precedente, in cui sezione stratigrafica è costituita da due materiali (rilevato e argilla). Dalle analisi numeriche è stato ricavato un coefficiente di sicurezza maggiore dell'unità (Tabella 1), per cui la scarpata risulta essere stabile in condizioni di esercizio. Il comportamento a rottura di tali terreni è stato impostato come elastico-perfettamente plastico, con valori dei parametri meccanici tipici dei terreni granulari per il rilevato e desunti dalla letteratura scientifica per l'argilla facendo riferimento ai terreni in zona. Nello specifico, sono stati utilizzati i seguenti parametri (in parentesi quelli adottati per l'argilla): densità satura pari a 18 (17.5) kN/m<sup>3</sup>, coefficiente di Poisson di 0.25 (0.49), modulo di Young pari a 10000 (11500) kPa, coesione efficace uguale a 0 (50) kPa, angolo di attrito di 35° (15°), conducibilità idraulica pari a 10<sup>-3</sup> (10<sup>-4</sup>) m/s, viscosità liquida di 10<sup>-3</sup> Pa·s e una comprimibilità dell'acqua di 50000 kPa.

Le condizioni idrauliche al contorno sono state considerate quelle più gravose, ossia falda coincidente con piano campagna. Riducendo i parametri meccanici di input con il valore del coefficiente di sicurezza è possibile ottenere i parametri meccanici in stato limite di equilibrio (Tabella 1) che saranno poi utilizzati come input per le successive analisi di propagazione.





c)

**Figura 5:** Risultati delle analisi di stabilità del rilevato in cui sono evidenziati i punti di rottura in rosso: a) rilevato 1; b) rilevato 2; c) rilevato 3.

**Tabella 1:** Risultati delle analisi di stabilità in termini di fattore di sicurezza (FS) e parametri meccanici ridotti per le tre configurazioni.

	rilevato 1	rilevato 2	rilevato 3
<i>FS</i>	1.30	1.26	1.25
$\varphi'$ (rilevato)	35	35	35
$\varphi_{red}'$ (rilevato)	28.31	29.06	29.31
$\varphi'$ (argilla)	15	15	15
$\varphi_{red}'$ (argilla)	11.65	12.00	12.13
$c'$ (argilla)	50	50	50
$c_{red}'$ (argilla)	38.46	39.68	40.00

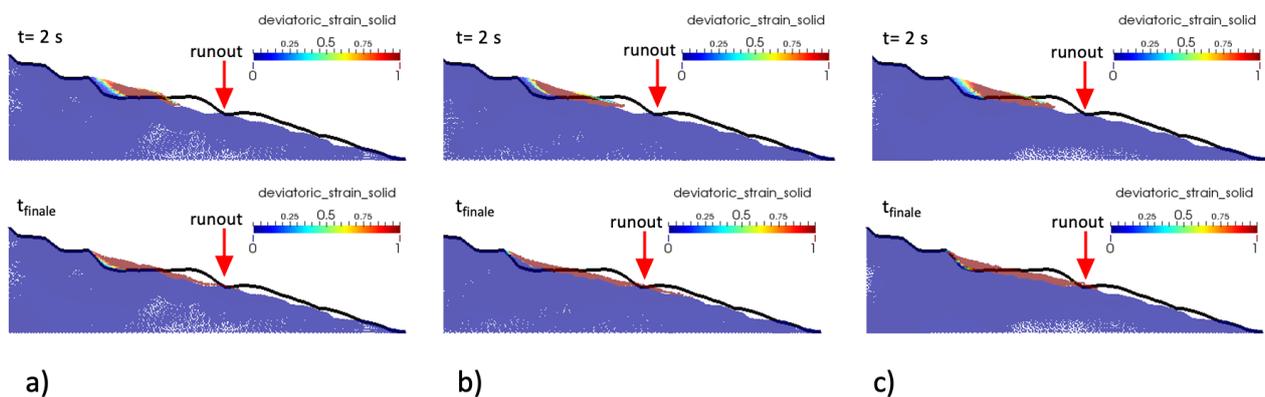
#### 4. Analisi numeriche alle grandi deformazioni (MPM)

Sono state poi condotte le analisi numeriche alle grandi deformazioni con il codice accademico sviluppato da Deltares (Delft, Paesi Bassi) per studiare la propagazione del rilevato instabile. Dalle analisi numeriche svolte in Plaxis 2D è stato possibile ricavare i parametri meccanici in condizioni di equilibrio limite usati come input per la modellazione (vedi Tabella 1), ottenuti dividendo i parametri meccanici dei materiali per il valore del coefficiente di sicurezza. Le analisi di propagazione sono state svolte con una tecnica numerica innovativa alle grandi deformazioni denominata “Material Point Method” (MPM), in cui i terreni sono rappresentati da un numero di punti lagrangiani (denominati punti materiali) che trasportano tutte le proprietà fisiche e i valori di sforzo-deformazione. Le analisi numeriche sono state eseguite ipotizzando un comportamento a rottura dei terreni di tipo elastico-perfettamente plastico e condizioni idrauliche al contorno più gravose, ossia falda coincidente con piano campagna.

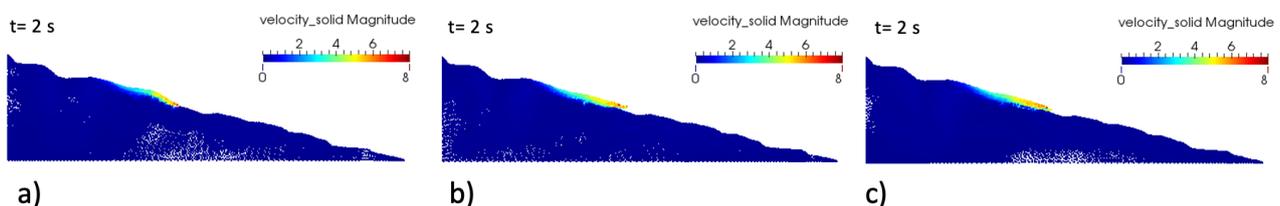
I risultati ottenuti comprendono l’evoluzione nel tempo e nello spazio in termini di deformazioni di taglio (Figura 6), campo di velocità (Figura 7) e spostamenti della massa instabile (Figura 8).

È stata inoltre valutata la dipendenza dei risultati dalla dimensione degli elementi costituenti la mesh computazionale e dal numero di punti materiali presenti in ogni elemento (Figure 9, 10 e 11), al fine di ottenere soluzioni numericamente attendibili e affidabili.

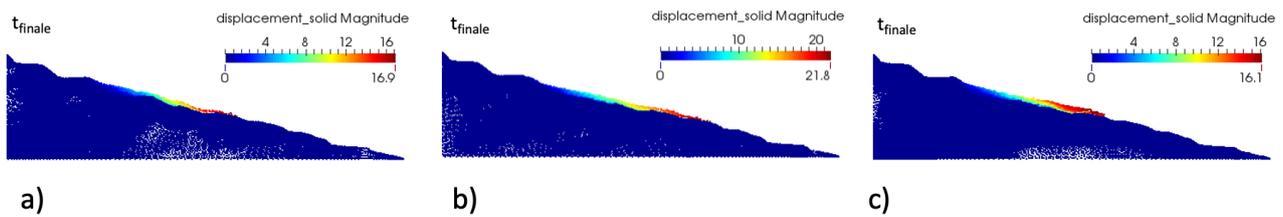
Dal confronto dei risultati si deduce che la configurazione “rilevato 3” fornisce una deposizione più vicina a quella realmente rilevata in sito. Tuttavia, vanno risolti alcuni problemi numerici per simulare meglio il distacco del materiale dal punto sommitale della scarpata.



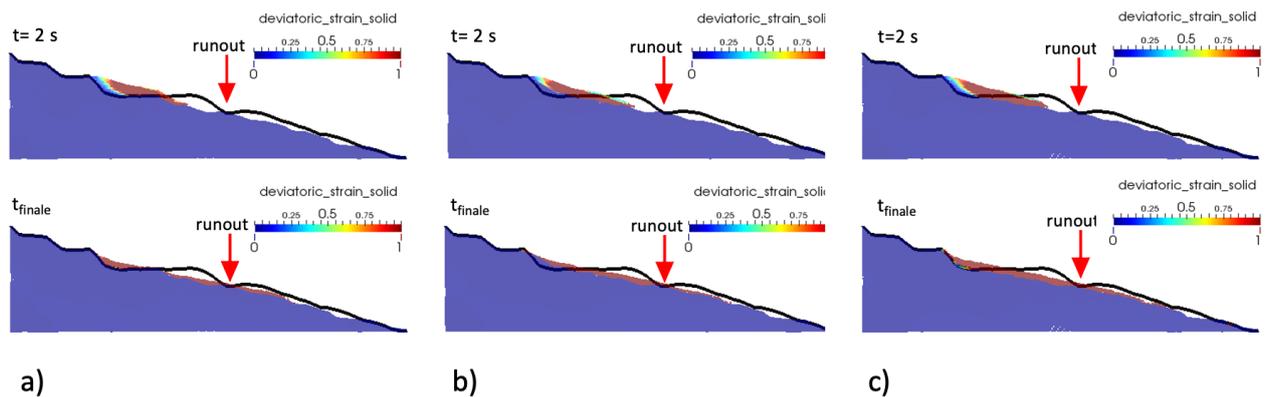
**Figura 6:** Distribuzione delle deformazioni di taglio per le 3 configurazioni ipotizzate considerando una mesh di 0.45 metri e 12 MPs: a) rilevato 1; b) rilevato 2; c) rilevato 3.



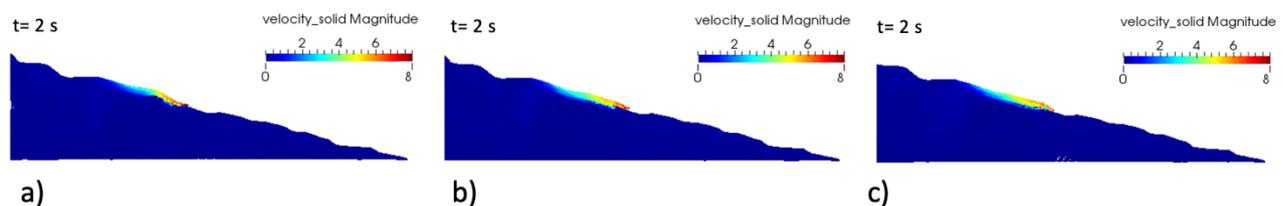
**Figura 7:** Distribuzione del campo di velocità per le 3 configurazioni ipotizzate considerando una mesh di 0.45 metri e 12 MPs: a) rilevato 1; b) rilevato 2; c) rilevato 3.



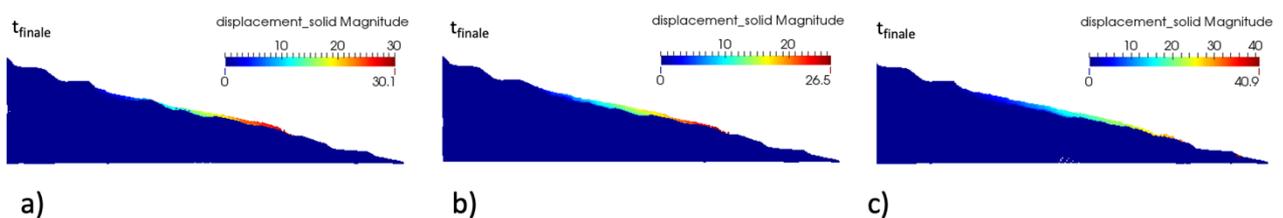
**Figura 8:** Distribuzione del campo degli spostamenti per le 3 configurazioni ipotizzate considerando una mesh di 0.45 metri e 12 MPs: a) rilevato 1; b) rilevato 2; c) rilevato 3.



**Figura 9:** Distribuzione delle deformazioni di taglio per le 3 configurazioni ipotizzate considerando una mesh di 0.35 metri e 16 MPs: a) rilevato 1; b) rilevato 2; c) rilevato 3.



**Figura 10:** Distribuzione del campo di velocità per le 3 configurazioni ipotizzate considerando una mesh di 0.35 metri e 16 MPs: a) rilevato 1; b) rilevato 2; c) rilevato 3.



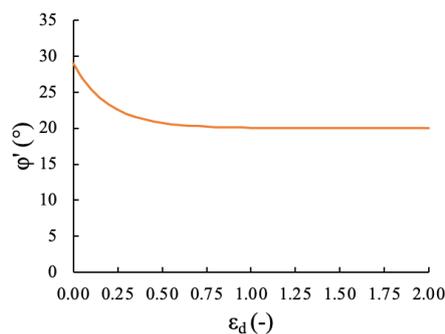
**Figura 11:** Distribuzione del campo degli spostamenti per le 3 configurazioni ipotizzate considerando una mesh di 0.35 metri e 16 MPs: a) rilevato 1; b) rilevato 2; c) rilevato 3.

## 5. Analisi di sensitività

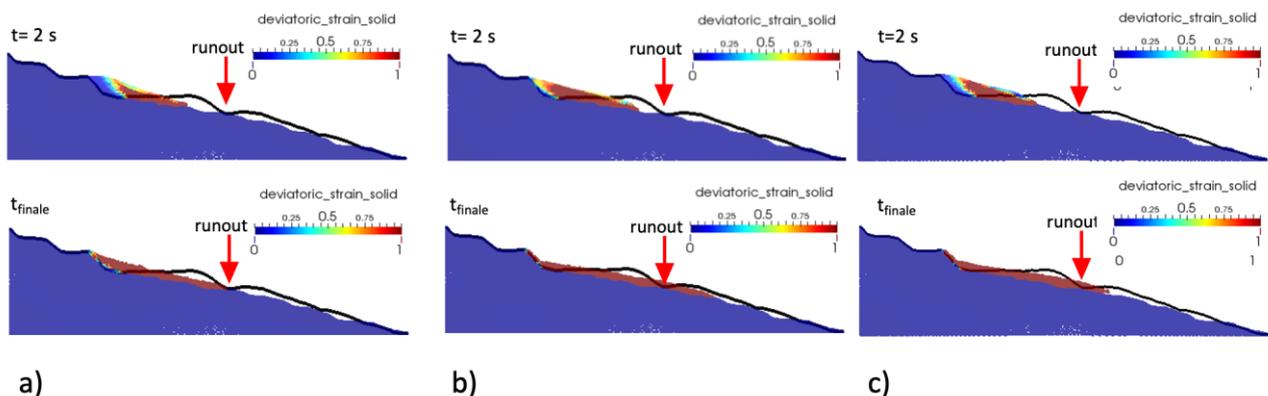
Per la configurazione che ha portato ad un più corrispondente deposito del corpo frana (rilevato 3) è stata condotta un'analisi di sensitività, per analizzare la variabilità dei parametri meccanici adottati, nonché il livello di falda e il modello costitutivo dei terreni costituenti il rilevato. Anche in questo caso, le analisi numeriche sono state condotte con la tecnica numerica innovativa alle grandi deformazioni denominata "Material Point Method" (MPM).

Per semplicità, vengono riportate solo alcune simulazioni significative: i) falda a metà strato del rilevato, mantenendo i parametri meccanici per il "rilevato 3" riportati in Tabella 1; ii) angolo di attrito del rilevato ridotto a 20°; iii) modello costitutivo del tipo Mohr-Coulomb strain-softening che prevede una riduzione dell'angolo di attrito del rilevato in funzione della deformazione a taglio (Figura 12).

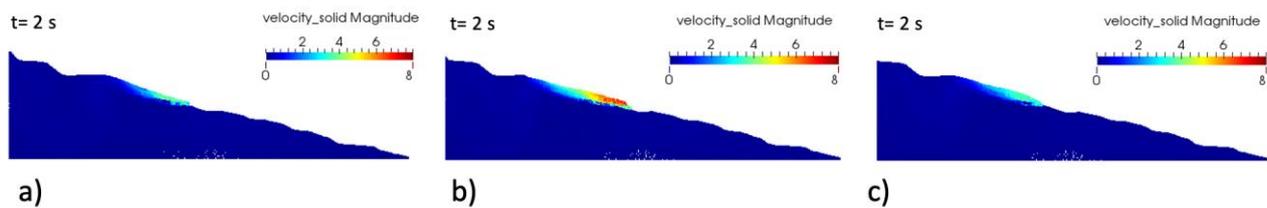
I risultati comprendono l'evoluzione nel tempo e nello spazio in termini di deformazioni di taglio (superfici di scorrimento) in Figura 13, del campo di velocità a  $t=2$  s (Figura 14) e del campo di spostamenti del corpo frana (Figura 15) per le 3 simulazioni prese a riferimento. Si nota che anche una falda a metà strato porta allo stesso risultato del caso di falda a piano campagna (Figura 13a, Figura 14a, Figura 15a), mentre un angolo di attrito più basso ha influenza sul runout della frana che risulta essere maggiore dell'osservazione in sito anche se porta ad una maggiore corrispondenza nella zona di distacco (Figura 13b, Figura 14b, Figura 15b). Per tale ragione, è stato poi adoperato un modello costitutivo più avanzato del tipo strain-softening che tiene conto della riduzione dell'angolo di attrito da un valore di picco di 29° a un valore residuo di 20° (Figura 13c, Figura 14c, Figura 15c) ottenendo una migliore riscontro con l'evidenza in sito.



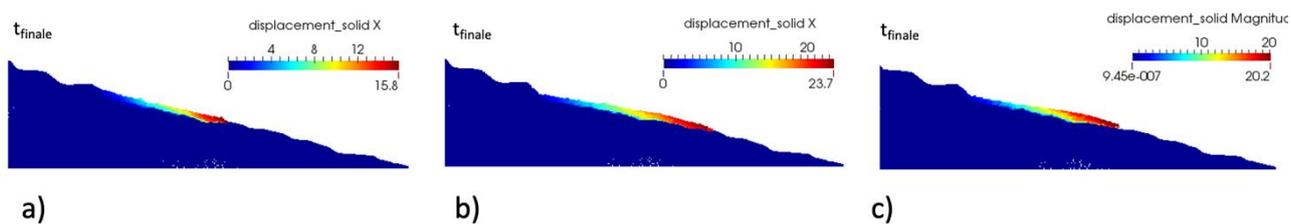
**Figura 12:** Andamento dell'angolo di attrito in funzione della deformazione deviatorica (valore di picco= 29°; valore residuo= 20°).



**Figura 13:** Distribuzione delle deformazioni di taglio considerando una mesh di 0.45 metri e 12 MPs: a) falda a metà strada 1; b) angolo di attrito del rilevato pari a 20°; c) modello costitutivo Mohr-Coulomb strain-softening.



**Figura 14:** Distribuzione del campo di velocità considerando una mesh di 0.45 metri e 12 MPs: a) falda a metà strada 1; b) angolo di attrito del rilevato pari a  $20^\circ$ ; c) modello costitutivo Mohr-Coulomb strain-softening.



**Figura 15:** Distribuzione del campo degli spostamenti considerando una mesh di 0.45 metri e 12 MPs: a) falda a metà strada 1; b) angolo di attrito del rilevato pari a  $20^\circ$ ; c) modello costitutivo Mohr-Coulomb strain-softening.

## CONCLUSIONI

Lo studio condotto mostra l'applicabilità di modelli numerici basati su: 1) modellazione a elementi finiti (FEM) a piccola deformazione e 2) modellazione MPM a grande deformazione nell'analizzare l'evoluzione del collasso di un rilevato stradale.

L'utilizzo combinato di questi i metodi mostra che è possibile ottenere risultati molto vicini alle condizioni osservate in sito, aggiungendo maggiori informazioni riguardo le quantità cinematiche e tenso-deformative del terreno durante l'evoluzione spaziale e temporale della frana (dall'innescio alla propagazione e fino alla deposizione).

L'analisi di sensitività condotta ha permesso di valutare l'influenza dei alcuni parametri fondamentali per le analisi di propagazione, ottenendo migliori riscontri con l'evidenza in sito.

In conclusione, l'approccio proposto consente di valutare l'interazione tra terreno e strutture/infrastrutture e di determinare le condizioni di collasso di pendii potenzialmente instabili, considerando sia l'accoppiamento idro-meccanico tra scheletro solido e fase liquida e sia le grandi deformazioni sviluppate durante la propagazione.





[www.mitigoinbasilicata.it](http://www.mitigoinbasilicata.it)

## Obiettivi Realizzativi 2 e 5

### Valutazione del Rischio Idrogeologico

### Soluzioni per la mitigazione del rischio idrogeologico

Questa pubblicazione è stata realizzata con il cofinanziamento dell'Unione Europea - FESR, PON Ricerca e Innovazione 2014-2020.

[www.ponricerca.gov.it](http://www.ponricerca.gov.it)

Responsabile della pubblicazione:  
 Università degli Studi della Basilicata  
 Scuola di Ingegneria  
 Via dell'Ateneo Lucano 10  
 85100 Potenza



UNIONE EUROPEA  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Mitigazione dei Rischi Naturali  
per la Sicurezza e la Mobilità nelle  
Aree Montane del Mezzogiorno

