

ANALISI DEI CINEMATISMI POST ROTTURA METEO- INDOTTI IN UN RILEVATO STRADALE FONDATA SU UN VERSANTE MARNOSO

Luca Comegna

*Dipartimento di Ingegneria, Università della Campania “Luigi Vanvitelli”
luca.comegna@unicampania.it*

Alessandro Mandolini

*Dipartimento di Ingegneria, Università della Campania “Luigi Vanvitelli”
alessandro.mandolini@unicampania.it*

Denise Manna

*Dipartimento di Ingegneria, Università della Campania “Luigi Vanvitelli”
denise.manna@unicampania.it*

Guido Rianna

*Fondazione CMCC, Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici
guido.rianna@cmcc.it*

Alfredo Reder

*Fondazione CMCC, Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici
alfredo.reder@cmcc.it*

Sommario

Un tratto di rilevato dell’Autostrada A24 Roma-L’Aquila-Teramo, realizzato lungo una porzione della dorsale appenninica laziale posta tra i comuni di Roviano (RM) ed Arsoli (RM), è stato interessato a partire dalla fine degli anni ‘80 da continui fenomeni di avvallamento. I dati inclinometrici a disposizione hanno evidenziato che tali dissesti sono il risultato di un meccanismo di rottura che ha interessato non solo il rilevato ma anche il versante marnoso-arenaceo su cui esso è fondato. Avendo il monitoraggio messo in luce una variabilità stagionale delle velocità di spostamento, è stato sviluppato un modello semplificato finalizzato a ricostruire la cinematica meteo-indotta del fenomeno portando in conto le forzanti atmosferiche che regolano il processo. La nota descrive i principali risultati di tali analisi.

1. Introduzione

La presente nota intende fornire un aggiornamento sul caso studio presentato in occasione dello IARG 2021 (Comegna et al., 2021) riguardante i fenomeni di dissesto che hanno interessato un rilevato dell’Autostrada A24 Roma - L’Aquila – Teramo (Fig. 1a), realizzato alla fine degli anni ‘70 lungo una porzione della dorsale appenninica laziale posta tra i comuni di Roviano (RM) ed Arsoli (RM). Verso la fine degli anni ‘80, un tratto lungo circa 70 m della pavimentazione stradale posta sulla corsia di marcia lenta in direzione L’Aquila ha iniziato a subire cedimenti che hanno richiesto negli anni l’esecuzione di diversi interventi mirati a recuperare la quota di progetto. Il monitoraggio degli spostamenti profondi, eseguito a partire dal 1998 (Fig. 1b), ha evidenziato l’esistenza di un meccanismo di rottura che ha interessato non solo il rilevato ma anche il versante naturale (Fig. 2a). Data la variabilità stagionale del regime piezometrico (Fig. 2b) e degli spostamenti (Fig. 2c,d), è stato sviluppato un modello finalizzato a ricostruire la cinematica del fenomeno portando in conto bilanci di tipo idroclimatico del versante. Per la definizione delle forzanti atmosferiche ci si è avvalsi del dataset di osservazioni, riportato su griglia

regolare, sviluppato da ISPRA nell'ambito di SCIA (Sistema nazionale per l'elaborazione e diffusione di dati climatici). Questo ha consentito di analizzare un lungo intervallo temporale non coperto dalle attività di monitoraggio. Di seguito saranno illustrati i principali risultati delle analisi.

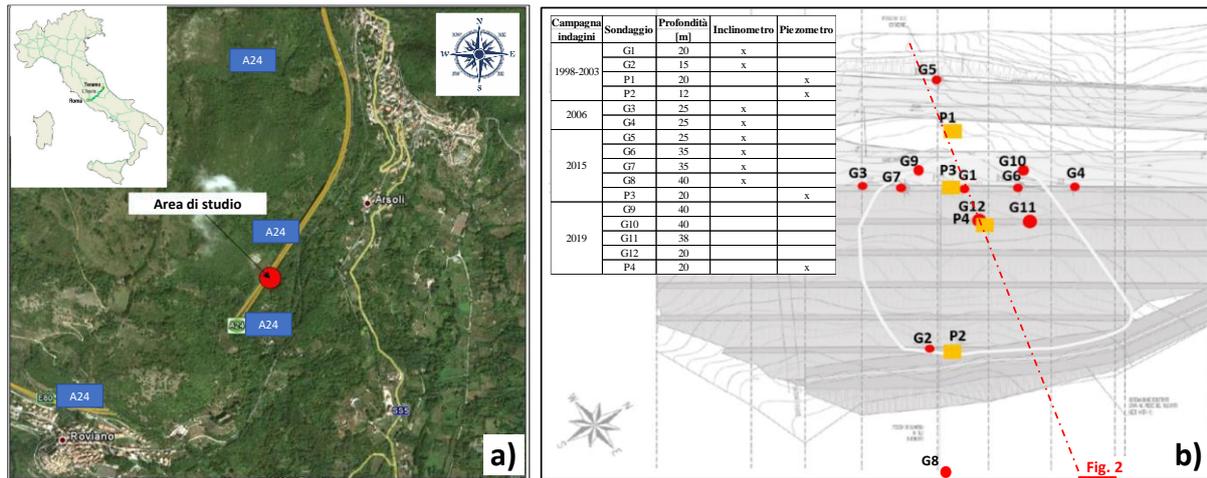


Fig. 1. Il caso di Roviano: a) area di studio (fonte Google Earth); b) posizione planimetrica dei sondaggi.

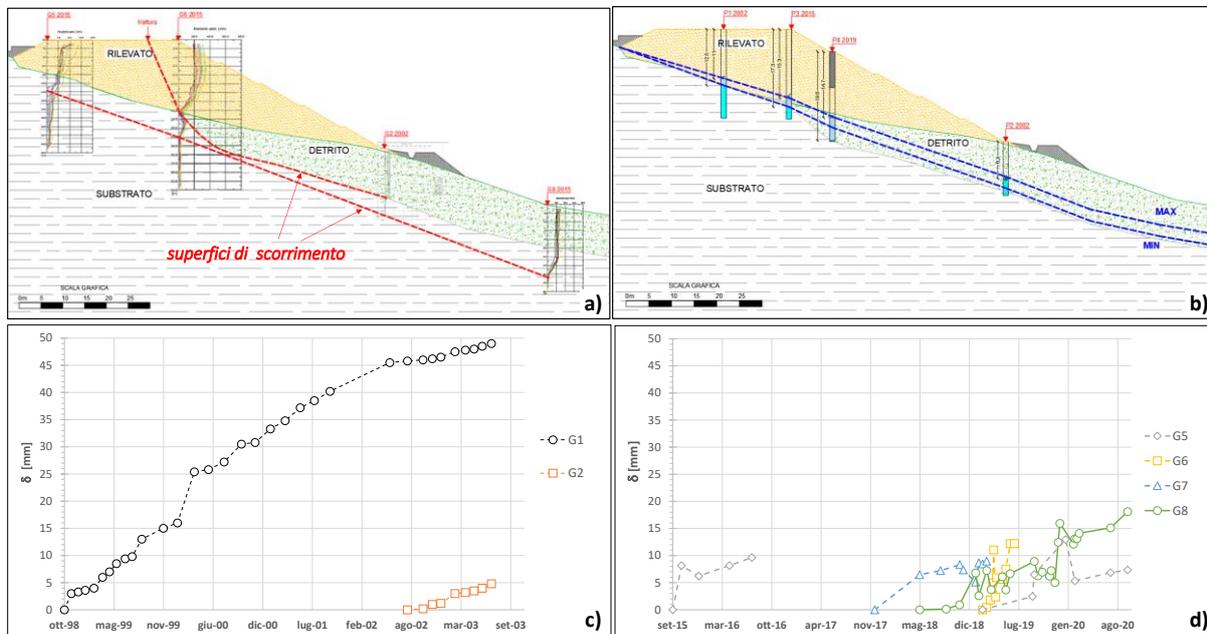


Fig. 2. Risultati del monitoraggio: a) superfici di scorrimento individuate dalle misure inclinometriche; b) livelli minimo e massimo della superficie freatica registrati dalle misure piezometriche; c) spostamenti orizzontali registrati dagli inclinometri G1 e G2; d) spostamenti orizzontali registrati dagli inclinometri G5, G6 G7 e G8.

2. Area di studio

2.1 Inquadramento geomorfologico e climatico

L'area oggetto di studio si trova tra il km 42+030 (corrispondente all'imbocco lato Est della galleria Roviano) ed il km 42+340 dell'Autostrada A24 (Roma - L'Aquila - Teramo). Il rilevato autostradale presenta uno spessore massimo pari a 16 m, angolo medio di inclinazione delle scarpate pari a 28° e ingombro della piattaforma stradale di 30 m (Fig. 2a). Esso si trova collocato tra le quote +562 e +537 m s.l.m. della porzione più acclive (caratterizzata da inclinazioni comprese tra 15° e 20°) del monte S. Elia, appartenente alla catena montuosa dei Monti Sabini (Anibaldi, 2018). Quest'ultimo si sviluppa verso Sud-Est tra la quota +966 m e la quota +317 m s.l.m., in corrispondenza della quale scorre il fiume

Aniene. La formazione di base è costituita da un flysch marnoso-arenaceo fessurato, di età compresa tra il Triassico superiore e il Miocene inferiore, la cui evoluzione geomorfologica è fortemente governata dalla presenza di elementi di origine tettonica, quali superfici di taglio, faglie trascorrenti e sovrascorrimenti, tipici delle formazioni strutturalmente complesse molto diffuse lungo l'Appennino (Esu, 1977). Nell'area interessata dai fenomeni di dissesto, tale formazione risulta parzialmente coperta da un deposito detritico dello spessore di circa 8 m (Fig. 2a,b), costituito da clasti di ghiaia alterata mista a sabbia limosa molto alterata, ascrivibile ad una conoide alluvionale evidenziata nella cartografia geologica locale (AA.VV., 2006). I contatti tra questi materiali a differente conducibilità idraulica hanno favorito fenomeni di carsismo (testimoniati dalla presenza di doline, inghiottitoi e grotte) e lo sviluppo di numerose sorgenti naturali in prossimità soprattutto del tracciato autostradale che, come evidenziato in Fig. 2a, risulta fondato sia direttamente sulla formazione marnoso-arenacea (porzione di monte), che sul deposito detritico (porzione di valle).

Ai fini di una caratterizzazione delle forzanti atmosferiche che regolano il bilancio idrico in superficie, si è utilizzato il dataset sviluppato dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, ISPRA. In particolare, tale database restituisce su un grigliato regolare i dati giornalieri di precipitazione (risoluzione 10 km) e temperatura atmosferica (5 km) sulla base di interpolazioni dei valori osservati dalle stazioni meteorologiche che insistono sull'area. Con particolare riferimento al trentennio 1991-2020, che include i dati di monitoraggio di campo a nostra disposizione, la Fig. 3a mostra i valori mensili delle piogge cumulate P_I e delle temperature medie T_m sui punti griglia nell'intorno dell'area di studio. Nel trentennio esaminato, le P_I variano tra i valori minimi di Agosto (4-168 mm, 49 mm in media) ed i massimi di Novembre (43-401 mm, 169 mm in media). Per quanto riguarda i valori di T_m , essi oscillano tra i minimi di Gennaio (3-7 °C, media di 5 °C) ed i massimi di Agosto (20-26 °C, media di 23 °C).

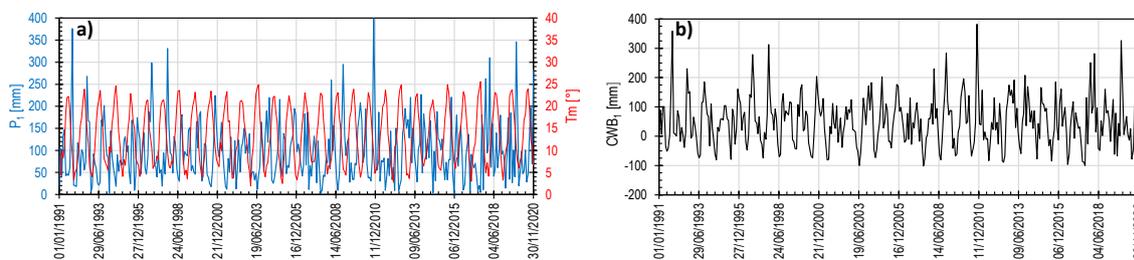


Fig 3. Dati climatici dell'area di studio: a) precipitazioni mensili, P_I , e temperature medie mensili, T_m ; b) valore mensile del Cumulative Water Balance, CWB_I .

Le informazioni a disposizione sono state impiegate per valutare il bilancio idroclimatico potenziale mensile ottenuto come differenza tra la precipitazione cumulata mensile P_I e l'evapotraspirazione potenziale di riferimento ET_I

$$CWB_I = P_I - ET_I \quad (1)$$

noto in letteratura come *Cumulative Water Balance*, CWB (Freeze and Cheery, 1979). Il valore mensile di ET_I è stato calcolato secondo la formula proposta da Hamon (1961)

$$ET_I = 13.97 \cdot d \cdot D^2 \cdot W_t \quad (2)$$

in cui d è il numero di giorni in un mese, D è il numero medio di ore di luce nel mese, $W_t = 4.95 \cdot \exp[(0.062 \cdot T_m)/100]$ è la densità di vapor saturo d'acqua funzione della temperatura media T_m . I valori ottenuti di CWB_I (Fig. 3b) evidenziano per il sito oggetto di studio un andamento tipico dell'area mediterranea: il bilancio mensile risulta, infatti, positivo (con picchi fino a circa +400 mm) per sette mesi all'anno, da ottobre ad aprile, mentre risulta essenzialmente negativo (con minimi fino a circa -100 mm) durante i mesi estivi.

2.2 Risultati del monitoraggio

Le informazioni sul regime piezometrico sono restituite dalle misure di quattro piezometri idraulici, di cui tre a tubo aperto (P1, P2 e P3 in Fig. 2b) ed uno di tipo Casagrande (P4 in Fig. 2b). Tutti e quattro i piezometri sono stati installati all'interno della formazione di base alle seguenti distanze dal tetto del substrato: 7.5 m (P1), 2.7 m (P3), 0.2 m (P4), 0.5 m (P2). I piezometri P1 e P2 sono rimasti in funzione per poco più di un anno (da maggio 2002 a luglio 2003). Il piezometro P3 ha fornito informazioni per circa 3 anni e mezzo (da luglio 2015 a marzo 2019). I dati del piezometro P4 sono stati ricavati per poco più di 9 mesi (da giugno 2019 ad aprile 2020). Non esistono, quindi, purtroppo informazioni tra il 2004 ed il 2014. A conferma della ricchezza di acqua dell'area dovuta al cospicuo numero di sorgenti, le letture hanno evidenziato livelli piezometrici medi piuttosto elevati caratterizzati ad esempio a monte da una posizione della superficie freatica quanto meno coincidente con il tetto del substrato (Fig. 2b). Il livello massimo della falda è stato invece letto: i) internamente al rilevato, ad una distanza di 2.0 m al di sopra del tetto del substrato (piezometro P3); ii) internamente al detrito, ad una distanza di 5.1 m sopra il tetto del substrato (piezometro P4). La linea freatica a valle del piezometro P4 si presenta essenzialmente parallela al contatto stratigrafico detrito-substrato. L'analisi dei dati piezometrici acquisiti con maggiore continuità dal piezometro P3 mette in evidenza un andamento ciclico stagionale dell'altezza piezometrica $h_{w,P3}$ (Fig. 4a), che risulta con buona approssimazione in fase con le fluttuazioni del bilancio idroclimatico potenziale su 5 mesi stimato attraverso il corrispondente valore cumulato CWB_5 : tale ritardo è giustificato dalla ridotta conducibilità idraulica del substrato (pari a circa $2.0E-10$ m/s). I CWB_5 così ottenuti variano da valori negativi (minimo assoluto pari -263 mm), attinti tipicamente tra i mesi di agosto e ottobre, a valori positivi (massimo assoluto pari a +837 mm) attinti tra gennaio e aprile. In particolare, la correlazione empirica che ha consentito la migliore sovrapposizione con i valori di $h_{w,P3}$ monitorati è la seguente

$$h_{w,P3} [\text{m}] = 3.5 + 0.0025 \cdot CWB_5 [\text{mm}] \quad (3)$$

La Fig. 4b illustra le variazioni di $h_{w,P3}$ calcolate con l'equazione 3 durante l'intero periodo di riferimento 1991-2020. Sulla base di tale stima, $h_{w,P3}$ oscillerebbe mediamente di 2.5 m con valori minimi e massimi rispettivamente pari a circa 3.0 m e 5.5 m (data la profondità di presa di P3, tali valori corrispondono a livelli piezometrici posti a 0.3 m e 2.8 m al di sopra del tetto del substrato).

Per quanto riguarda gli spostamenti, il loro monitoraggio ha avuto inizio ad ottobre del 1998 a seguito dell'installazione di un inclinometro in prossimità del ciglio destro della carreggiata (denominato G1 in Fig. 1b) che ha restituito informazioni per circa 5 anni, fino a luglio 2003 (Fig. 2c). Altre informazioni sono fornite nei periodi agosto 2002-luglio 2003 dall'inclinometro G2 (Fig. 2c), settembre 2015-settembre 2020 dal G5 (con un'interruzione, però, di funzionamento da luglio 2016 a febbraio 2019), febbraio-giugno 2019 dal G6, novembre 2017-marzo 2019 dal G7 e maggio 2018-maggio 2019 dal G8 (Fig. 2d). Anche in questo, non sono quindi purtroppo disponibili informazioni tra il 2004 ed il 2014. Come già evidenziato in occasione dello IARG 2021 (Comegna et al., 2021), tali misure hanno permesso di riconoscere la presenza di due superfici di rottura continue collocate a differenti profondità (Fig. 2a). La superficie di rottura meno profonda, posta ad una massima distanza dal piano campagna di 16 m, si sviluppa per una lunghezza di circa 80 m internamente al rilevato ed al deposito detritico. La superficie più profonda si trova invece a distanze dal p.c. variabili tra 12 m e 22 m e presenta una forma sub-planare con inclinazione media pari a 20° . Essa risulta completamente immersa nella formazione di base sviluppandosi per una lunghezza di circa 120 m rilevata a partire dal ciglio sinistro della carreggiata. Tutti gli spostamenti risultano caratterizzati da azimuth preferenziali compatibili con la direzione di massima pendenza del versante. Poiché per nessuna delle due superfici si hanno evidenze dirette di chiusura a piano campagna a valle del rilevato, è probabile che in entrambi i casi si tratti di fenomeni di rottura di tipo locale e non globale. Le velocità misurate, mediamente pari a 10 mm/anno, presentano valori variabili su scala mensile (Fig. 2b,c). A tal proposito, confrontando le oscillazioni dei CWB_5 calcolati dal 1998 al 2003 e le corrispondenti velocità medie di spostamento del rilevato misurate in

superficie dall'inclinometro G1 (Fig. 4c e Fig. 4d) si è riscontrato un discreto accordo tra il bilancio idroclimatico potenziale su 5 mesi e la cinematica del fenomeno. La Fig. 4c mette in particolare in evidenza come il trend negativo del CWB_5 abbia verosimilmente prodotto un rallentamento del fenomeno nel periodo esaminato.

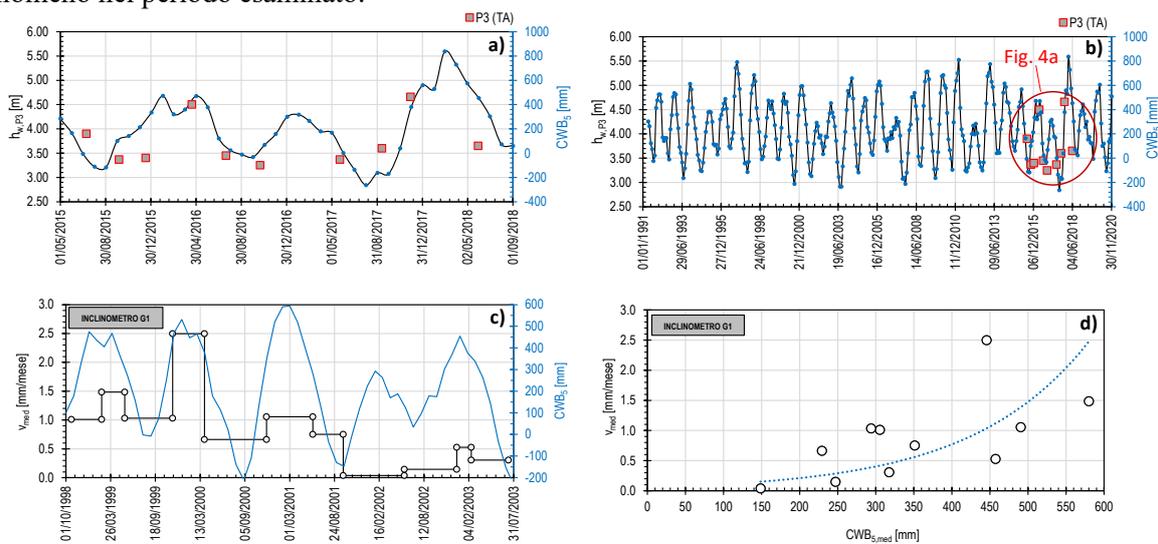


Fig. 4. Risultati del monitoraggio: a) confronto tra l'altezza piezometrica misurata dal piezometro P3, $h_{w,P3}$, e le oscillazioni del bilancio idrico cumulato su 5 mesi, CWB_5 , dal 2015 al 2018; b) oscillazioni dell'altezza piezometrica, $h_{w,P3}$, calcolata con l'equazione 3, e del CWB_5 dal 1991 al 2020; c-d) confronto tra la velocità media, v_{med} , misurata in superficie dall'inclinometro G1 ed il CWB_5 dal 1998 al 2003.

3. Analisi del cinematiso meteo-indotto

Le correlazioni descritte nel paragrafo precedente hanno indotto a sviluppare un modello numerico semplificato allo scopo di ricostruire la cinematica post-rottura del fenomeno in funzione del regime piezometrico meteo-indotto del versante. L'analisi, che ha portato in conto la geometria reale del problema, è stata implementata attraverso il codice FEM PLAXIS 2D. La discretizzazione agli elementi finiti è illustrata in Fig. 5a. Le tre unità litostratigrafiche coinvolte (rilevato, detrito, substrato) sono state modellate attraverso un legame costitutivo elastico-lineare perfettamente plastico con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb. Le proprietà assegnate ai terreni (Fig. 5a) derivano dai risultati di indagini eseguite in sito ed in laboratorio (Comegna et al., 2021). Le superfici di scorrimento evidenziate dal monitoraggio sono state simulate attraverso l'inserimento di elementi di interfaccia caratterizzati da parametri meccanici differenti in funzione dei terreni attraversati. In particolare, alla superficie di scorrimento planare interna al substrato è stato assegnato un angolo di attrito residuo pari a $20,4^\circ$. Al di sopra del rilevato autostradale si è tenuto conto di un carico stradale uniformemente distribuito di entità pari a 20 kPa.

Il regime piezometrico stagionale è stato modellato assumendo diverse posizioni della linea freatica. Queste sono state determinate considerando dal giorno 1 settembre 1991 (inizio anno idrologico 1991/1992) al 31 agosto 2020 (fine anno idrologico 2019/2020) le oscillazioni su scala mensile di $h_{w,P3}$ ricavate in funzione del CWB_5 tramite l'equazione 3 (Fig. 4b) ed assumendo le seguenti ipotesi basate sulle osservazioni di campo: i) linea freatica coincidente col piano campagna a monte del rilevato; ii) altezze piezometriche misurate dai piezometri P3 e P4 coincidenti ($h_{w,P3} = h_{w,P4}$); iii) linea freatica parallela al contatto stratigrafico detrito-substrato a valle del piezometro P4. Gli spostamenti orizzontali cumulati nel trentennio di riferimento calcolati dal modello sono, pertanto, dovuti alle variazioni di resistenza al taglio indotte lungo le interfacce dalle oscillazioni piezometriche imposte. I risultati ottenuti hanno permesso di riprodurre i profili inclinometrici osservati (Fig. 5a) cogliendo con buona approssimazione gli spostamenti orizzontali misurati in superficie durante le diverse campagne di

monitoraggio (Fig. 5b). È, in particolare, interessante notare che le velocità medie stimate in corrispondenza delle quattro verticali indagate dagli inclinometri variano lungo il versante da valori inferiori a 10 mm/anno (7-9 mm/anno in corrispondenza di G5 e G8) a valori superiori (13-15 mm/anno in corrispondenza di G2 e G1-G6-G7).

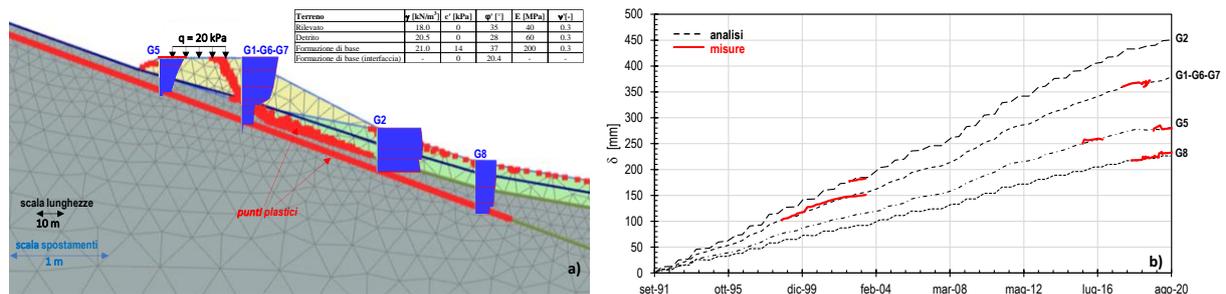


Fig 5. Risultati della modellazione numerica FEM: a) profili inclinometrici; b) confronto tra gli spostamenti orizzontali cumulati, δ , calcolati (da settembre 1991 ad agosto 2020) e misurati.

4. Conclusioni

I risultati della modellazione numerica semplificata descritta hanno evidenziato che, come messo in luce dal monitoraggio, gli spostamenti del rilevato autostradale oggetto di studio sono l'effetto combinato di due meccanismi di rottura locale attivati a differenti profondità. Quello più superficiale, sviluppato internamente al manufatto e lungo una porzione del contatto stratigrafico posto tra il deposito detritico e la formazione di base, è connesso alle caratteristiche geotecniche delle due unità. Il meccanismo di rottura a maggiore profondità è invece associato alla mobilitazione della resistenza residua disponibile lungo una superficie sub-planare preesistente interna al substrato stesso.

Le analisi numeriche hanno inoltre inteso correlare la cinematica stagionale del fenomeno al regime piezometrico meteo-indotto del versante stimato sulla base di bilanci di tipo idroclimatico. Questi ultimi, opportunamente calibrati sulle letture piezometriche disponibili, hanno permesso di ricostruire con continuità la cinematica del fenomeno per un periodo di 30 anni, consentendo di colmare i “vuoti” di informazione del monitoraggio. L'attendibilità dei risultati di tale modellazione ne suggerisce l'impiego ai fini di una valutazione dell'efficacia di alcuni interventi di consolidamento recentemente realizzati.

Ringraziamenti

Questo lavoro è parte dei progetti di ricerca SEND, finanziato dall'Università degli Studi della Campania “Luigi Vanvitelli” nell'ambito del programma VALERE 2019, e MITIGO, finanziato dal MIUR nell'ambito del PON Programma R&I 2014–2020 (ARS01_00964).

Bibliografia

- AA.VV. (2006). Carta geomorfologica d'Italia in scala 1:50.000, foglio 367 ‘Tagliacozzo’. SELCA, Firenze.
- Anibaldi G. (2018). Frana Roviano - Risultati delle indagini in sito e di laboratorio. Interventi di adeguamento e messa in sicurezza urgente (M.I.S.U.) delle autostrade A24 e A25.
- Comegna L., Mandolini A., Calvanese C., Manna D. (2021). “Analisi del meccanismo di rottura in un rilevato autostradale fondato su un versante marnoso”. Atti Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, IARG 2021.
- Esu F. (1977). “Behaviour of slopes in structurally complex formations”. Proc. Int. Symp. on The Geotechnics of Structurally Complex Formations, 2, 292–304.
- Freeze R.A., Cherry J.A. (1979). Groundwater, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Hamon W.R. (1961). “Estimating Potential Evapotranspiration”. Journal of Hydraulics Division, Proc. of the American Society of Civil Engineers, 87, 107-120.