

STUDIO DEI CINEMATISMI POST ROTTURA METEO-INDOTTI IN UN RILEVATO AUTOSTRADALE REALIZZATO SU UN VERSANTE MARNOSO

Denise Manna (denise.manna@unicampania.it)

Dipartimento di Ingegneria, Università della Campania “Luigi Vanvitelli”

ABSTRACT. Un tratto di rilevato dell’A24, realizzato lungo una porzione della dorsale appenninica laziale posta tra i comuni di Roviano (RM) ed Arsoli (RM), è stato interessato a partire dal 1988 da continui fenomeni di avvallamento. I dati inclinometrici a disposizione hanno evidenziato che tali lesioni sono la conseguenza di un movimento franoso di tipo lento che ha interessato non solo il rilevato ma anche il versante su cui esso poggia. Dato che il monitoraggio ha rivelato che le velocità di spostamento variano stagionalmente, è stato creato un modello numerico semplificato che tiene conto dei bilanci idroclimatici, al fine di ricostruire la cinematica meteo-indotta del fenomeno.

1. INTRODUZIONE

Questa nota si propone di fornire uno studio sui fenomeni di dissesto che hanno colpito un rilevato dell'Autostrada A24 Roma - L'Aquila - Teramo (Fig. 1a), realizzato alla fine degli anni '70 lungo una porzione della dorsale appenninica laziale tra i comuni di Roviano (RM) ed Arsoli (RM). Verso la fine degli anni '80, una sezione di circa 70 metri della pavimentazione stradale sulla corsia di marcia lenta in direzione L'Aquila ha iniziato a cedere, rendendo necessari nel corso degli anni vari interventi mirati a ripristinare la quota di progetto. A partire dal 1998 (Fig. 1b), il monitoraggio degli spostamenti profondi ha rivelato l'esistenza di un meccanismo di rottura che ha coinvolto non solo il rilevato stradale, ma anche il versante naturale adiacente (Fig. 2a). A causa della variazione stagionale del regime piezometrico (Fig. 2b) e degli spostamenti (Fig. 2c,d), è stato creato un modello numerico per ricostruire la cinematica del fenomeno, tenendo conto dei bilanci idroclimatici del versante. Per stimare questi ultimi, è stato utilizzato un sistema di raccolta dati climatici continui su lunghi periodi, curato dall'ISPRA. Grazie a questo sistema, è stato possibile estendere le valutazioni ad intervalli temporali non precedentemente esplorati, a causa di interruzioni delle attività di monitoraggio.

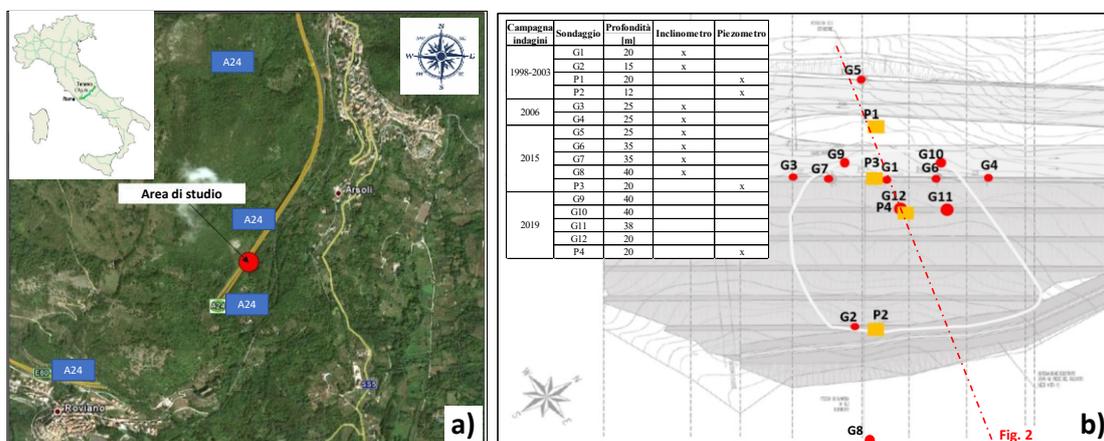


Figura 1. Il caso di Roviano: a) area di studio (fonte Google Earth); b) posizione planimetrica dei sondaggi.

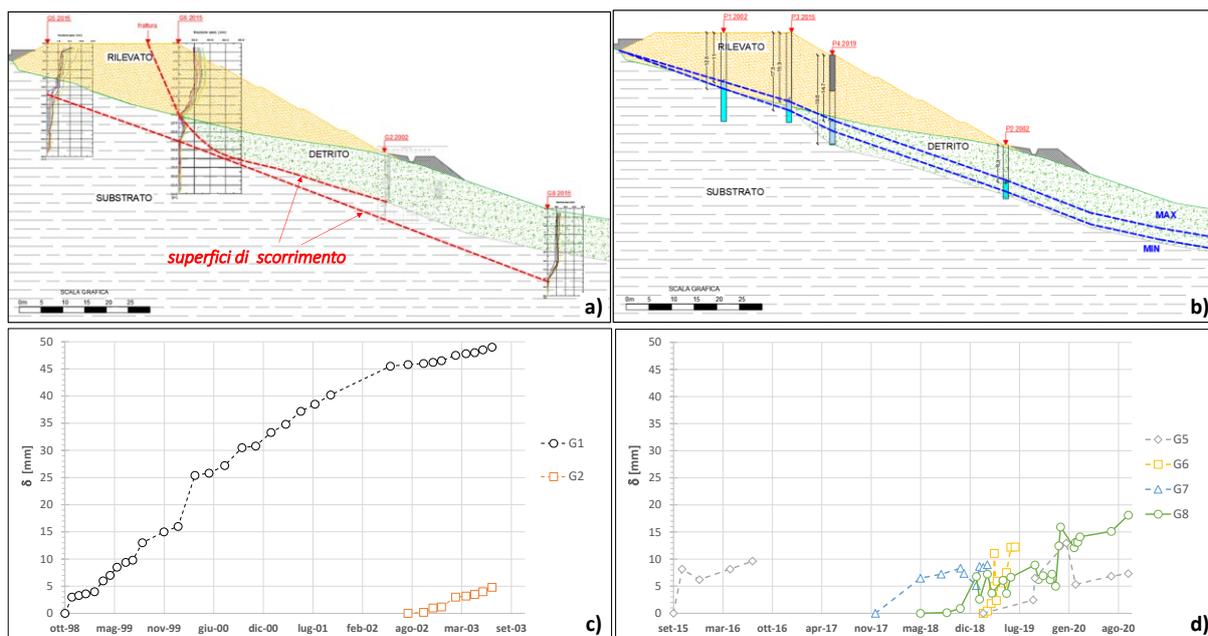


Figura 2. Risultati del monitoraggio: a) superfici di scorrimento individuate dalle misure inclinometriche; b) livelli minimo e massimo della superficie freatica registrati dalle misure piezometriche; c) spostamenti orizzontali registrati dagli inclinometri G1 e G2; d) spostamenti orizzontali registrati 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 e il km 42+340 dell'A24. Il rilevato autostradale ha uno spessore massimo di 16 metri, un angolo medio di inclinazione delle scarpate pari a 28° e un'ampiezza della piattaforma stradale di 30 metri (Fig. 2a). Il rilevato si trova in una zona montuosa dei Monti Sabini, precisamente sul monte S. Elia (Anibaldi, 2018), con un'altitudine compresa tra +562 e +537 m s.l.m. Questa porzione del monte ha una pendenza media tra il 15° e il 20° ed è situata tra la quota +966 m e la quota +317 m s.l.m., dove scorre il fiume Aniene in direzione Sud-Est. La formazione di base è costituita da un flysch marnoso-arenaceo fessurato, 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). Nella zona in cui si sono verificati i problemi di dissesto, tale formazione è parzialmente coperta da un deposito detritico spesso circa 8 metri (Fig. 2a,b) costituito da clasti di ghiaia alterata e sabbia limosa molto alterata, ed è stato attribuito ad una conoide alluvionale presente nella cartografia geologica locale (AA.VV., 2006). Per la caratterizzazione climatica dell'area, sono stati raccolti dati rilevati dal sito web SCIA del "Sistema nazionale per la raccolta, elaborazione e diffusione di dati climatici", gestito dall'ISPRA. Il database in questione fornisce dati giornalieri sul clima raccolti da stazioni meteorologiche situate nelle immediate vicinanze dell'area di interesse. La Fig. 3a mostra i valori mensili delle precipitazioni cumulate P_1 e delle temperature medie T_m nel trentennio 1991-2020. I dati sono stati ottenuti interpolando i dati provenienti da tre stazioni meteorologiche vicine all'area di studio: Agosta, Licenza e Arsoli.

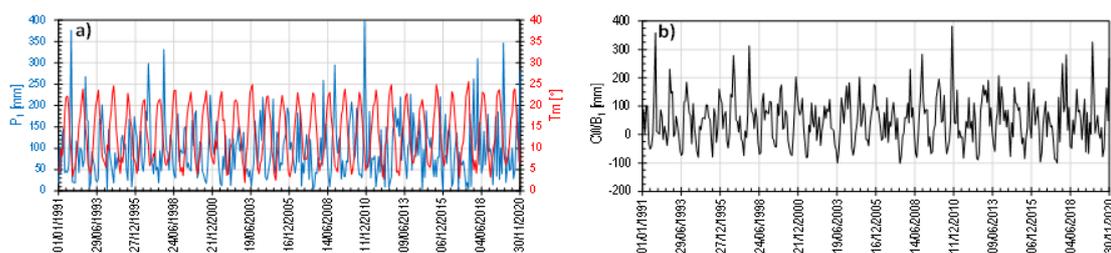


Figura 3. Dati climatici dell'area di studio: a) precipitazioni mensili, P_1 , e temperature medie mensili, T_m ; b) valore mensile del Cumulative Water Balance, CWB_1 .

Le informazioni raccolte sono state utilizzate per calcolare il bilancio idroclimatico potenziale mensile (Fig. 3b), ricavato sottraendo l'evapotraspirazione potenziale di riferimento ET_1 dalla precipitazione cumulata mensile P_1 .

$$CWB_1 = P_1 - ET_1 \quad (1)$$

noto in letteratura come Cumulative Water Balance, CWB_1 (Freeze and Cheery, 1979).

Il valore mensile di ET_1 è stato calcolato secondo la formula proposta da Hamon (1961)

$$ET_1 = 13,97 \cdot d \cdot D_2 \cdot W_t \quad (2)$$

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.

2.2 Risultati del monitoraggio

Per comprendere il regime idrologico del sito oggetto di studio, sono state misurate le altezze piezometriche di quattro piezometri idraulici, tre a tubo aperto (P1, P2 e P3 in Fig. 2b) e uno di tipo Casagrande (P4 in Fig. 2b), installati all'interno della formazione di base a diverse distanze dal tetto del substrato. I livelli piezometrici medi risultano piuttosto elevati, ad esempio a monte si osserva una posizione della superficie freatica che coincide almeno in parte con il tetto del substrato (Fig. 2b). Tuttavia, il livello massimo della falda è stato rilevato internamente al rilevato stesso, ad una distanza di 2.0 m sopra il tetto del substrato (piezometro P3) e internamente al detrito, a una distanza di 5.1 m sopra il tetto del substrato (piezometro P4). L'analisi dei dati piezometrici acquisiti con maggiore frequenza dal piezometro P3 mostra un andamento ciclico stagionale dell'altezza piezometrica $h_{w,P3}$ (Fig. 4a), che è in buona correlazione con le fluttuazioni del bilancio idroclimatico potenziale su 5 mesi, stimato attraverso il corrispondente valore cumulato CWB_5 . In particolare, la correlazione empirica che ha consentito la migliore sovrapposizione con i valori di $h_{w,P3}$ monitorati è la seguente

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

La figura 4b mostra le variazioni dell'altezza piezometrica $h_{w,P3}$ calcolata tramite l'eq. 3 nel periodo 1991-2020. In base a questa stima, $h_{w,P3}$ ha un'oscillazione media di 2,5 metri, con valori minimi di circa 3,0 metri e massimi di circa 5,5 metri. Il monitoraggio degli spostamenti è iniziato nel 1998 con l'installazione dell'inclinometro G1 (Fig. 1b), il quale ha fornito dati fino al 2003 (Fig. 2c). Altre informazioni sono state raccolte da altri inclinometri installati in diverse fasi, ad esempio G2 (Fig. 2c), G5, G6, G7 e G8 (Fig. 2d). Tuttavia, come per le misure piezometriche, non ci sono dati disponibili tra il 2004 e il 2014. Le misurazioni effettuate hanno permesso di individuare la presenza di due superfici di rottura continue una più superficiale ed una più profonda interna alla formazione di base (Fig. 2a). Tutti gli spostamenti risultano caratterizzati da direzioni preferenziali conformi alla massima pendenza del versante. Non ci sono prove dirette di chiusura a valle del rilevato per nessuna delle due superfici, pertanto è probabile che si tratti di fenomeni di frattura locale e non globale. Le velocità di spostamento misurate, in media inferiori a 10 mm/anno, variano su scala mensile (Fig. 2b,c).

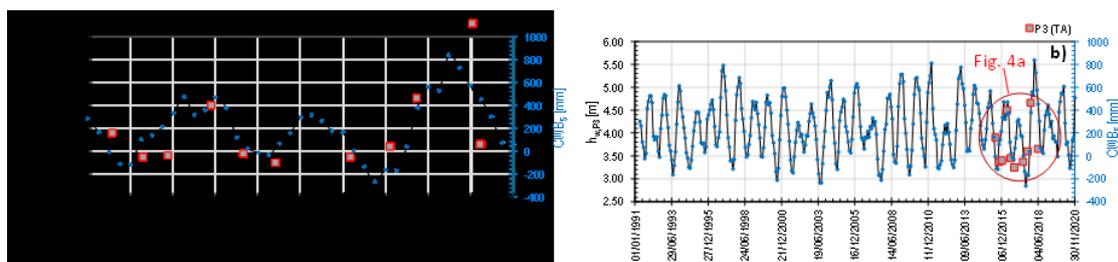


Figura 4. Risultati del monitoraggio: a) confronto tra l'altezza piezometrica misurata dal piezometro P3, $h_{w,P3}$, e le oscillazioni del CWB_5 dal 2015 al 2018; b) oscillazioni dell'altezza piezometrica, $h_{w,P3}$, calcolata con l'equazione 3, e del CWB_5 dal 1991 al 2020

4. ANALISI DEL CINEMATISMO METEO-INDOTTO

Per ricostruire la cinematica post-rottura di un fenomeno in funzione del regime piezometrico meteo-indotto del versante è stato sviluppato un modello numerico semplificato. Il modello è stato realizzato attraverso il codice FEM PLAXIS 2D, considerando la geometria reale del problema, utilizzando una discretizzazione agli elementi finiti riportata in Fig. 5a. Le tre unità litostratigrafiche coinvolte nel fenomeno sono state modellate con un legame costitutivo elastico-lineare perfettamente plastico con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb, utilizzando

proprietà dei terreni derivanti da indagini in sito e in laboratorio (Comegna et al., 2021). Le superfici di scorrimento sono state simulate attraverso l'utilizzo di elementi di interfaccia con 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 $20,4^\circ$. La variazione temporale del regime piezometrico è stata simulata utilizzando diverse posizioni della linea freatica, che sono state identificate attraverso l'analisi delle oscillazioni mensili di $h_{w,P3}$ dal 1 settembre 1991 al 31 agosto 2020, in base all'eq. 3 (Fig. 4b). L'analisi, eseguita disaccoppiando flusso-deformazione, ha permesso la valutazione degli spostamenti orizzontali cumulati nel periodo di riferimento, che sono stati causati dalle variazioni di resistenza al taglio lungo le interfacce, dovute alle oscillazioni piezometriche. Grazie a questi risultati, è stato possibile riprodurre con buona approssimazione i profili inclinometrici osservati (Fig. 5a) e gli spostamenti orizzontali in superficie durante le diverse campagne di monitoraggio (Fig. 5b). In particolare, si osserva che le velocità medie stimate nei quattro punti esaminati dagli inclinometri variano lungo il versante, con un minimo di 8 mm/anno (inclinometro G8) e un massimo di 15 mm/anno (inclinometro G2).

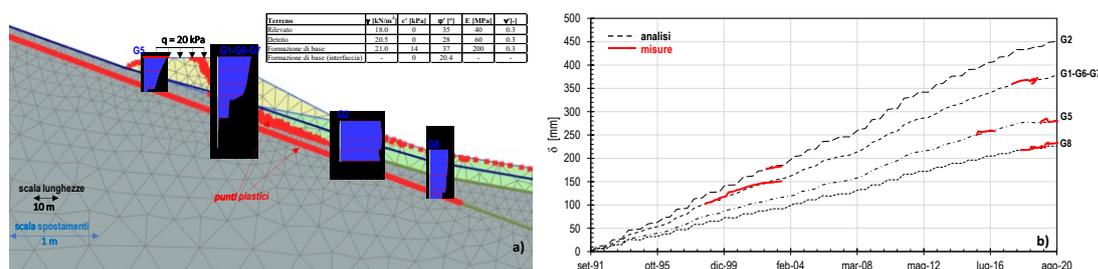


Figura 5. Risultati della modellazione numerica FEM: a) profili inclinometrici; b) confronto tra gli spostamenti orizzontali cumulati, d , calcolati (da settembre 1991 ad agosto 2020) e misurati.

5. CONCLUSIONI

Le analisi numeriche semplificate hanno mostrato che gli spostamenti del rilevato autostradale sono causati da due meccanismi di rottura combinati, come evidenziato anche dal monitoraggio. Il primo meccanismo si verifica internamente al manufatto, lungo una parte del contatto tra il deposito detritico e la formazione di base, ed è influenzato dalle caratteristiche geotecniche delle due unità. Il secondo meccanismo, invece, si verifica a maggiore profondità ed è legato alla mobilitazione della resistenza residua lungo una superficie sub-planare preesistente all'interno del substrato. La modellazione numerica ha cercato di correlare la cinematica stagionale del fenomeno al regime piezometrico meteo-indotto del versante, calcolato sulla base di bilanci idroclimatici. Questi, che sono stati adeguatamente calibrati in base alle letture dei piezometri, hanno consentito la ricostruzione continua della cinematica del fenomeno per un periodo di 30 anni, permettendo di colmare le lacune di informazione del monitoraggio.

6. BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (2006). Carta geologia 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.
- Comegna L; Mandolini A; Manna D; Rianna G; Reder A. (2022). "Analisi dei cinematismi post-rottura meteo-indotti in un rilevato autostradale fondato su un versante marnoso". Atti Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, IARG 2022.
- 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.