

MONITORAGGIO E MODELLAZIONE DI UNA COLATA DI ARGILLA

Antonella Giammarino

*Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale. Università degli Studi di
Napoli Federico II*

antonella.giammarino@unina.it

Gianfranco Urciuoli

*Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale. Università degli Studi di
Napoli Federico II*

gianurci@unina.it

Sommario

Le colate di argilla costituiscono il tipo di frana più diffuso nell'Appennino centro-meridionale e rappresentano una seria minaccia per il territorio e le infrastrutture, nonché una difficile sfida per l'ingegneria civile. Ciò nonostante la letteratura scientifica è povera di studi dedicati alla comprensione dei meccanismi che regolano il loro movimento ed in particolare mancano esempi robusti di modellazione dei fenomeni. In questa nota si affronta il tema della simulazione delle varie fasi del ciclo morfologico delle colate di argilla, mettendo in evidenza l'importante ruolo del legame costitutivo. I risultati delle analisi, basati su un'ampia ed accurata sperimentazione di laboratorio, vengono confrontati con i dati di 15 anni di monitoraggio in sito.

Le colate di argilla

Il corpo di frana delle colate di argilla è costituito da terreno rimaneggiato, per effetto dei grandi spostamenti subiti, e trasformato sotto il profilo fisico-chimico dai fenomeni di rigonfiamento meccanico (dovuto alla decompressione provocata dalla rottura per taglio) ed osmotico (dovuto all'infiltrazione di acqua piovana, che dilava gli ioni dell'acqua di porosità). Per effetto di questi fenomeni, il terreno è poco consistente e compressibile, nella stagione umida, quando il suo contenuto di acqua è elevato, più rigido nella stagione secca.

È ben noto che le colate di argilla sono caratterizzate da un'evoluzione morfologica e cinematica complessa, con stati di attività di durata annuale o pluriennale, che si seguono, talvolta ciclicamente. Le velocità di spostamento variano tra i m/giorno, nella fase immediatamente successiva all'attivazione o riattivazione, e i mm/anno nella fase "matura".

Il monitoraggio della colata di Masseria Marino

Inquadramento

Le colate di argilla sono state studiate presso l'Università degli studi di Napoli Federico II fin dal 1991, quando nell'Alta Valle del Basento (Pz) furono posti sotto osservazione tre siti, ritenuti rappresentativi della franosità di un'area geologicamente omogenea di 70 Km² in cui erano state riconosciute circa 400 frane di cui il 95% di tipo colata (Iaccarino, 1991). Le tre frane monitorate (in località Masseria Marino, Acqua di Luca e Masseria De Nicola) presentano morfologie e velocità di spostamento piuttosto diverse che dipendono dall'estensione e dell'attività della zona di alimentazione. Le argille coinvolte appartengono alla formazione delle Argille Varicolori, costituita da banchi argillitici compatti e consistenti

con intercalazioni di calcari in blocchi ed in strati di modesto spessore. Solo una parte minoritaria delle suddette colate coinvolge altre formazioni, comunque con una forte presenza di argilla.

Nel seguito della nota verrà presentato il caso della colata di Masseria Marino, che negli anni del monitoraggio si è mostrata particolarmente attiva. Essa è caratterizzata da una classica forma a “clessidra”, con un’ampia area di alimentazione (posta a circa 620 m s.l.m.) del tipo ad anfiteatro, formatasi per effetto di uno scorrimento rotazionale che subito a valle evolve in colata, creando un canale di flusso poco sviluppato in lunghezza; la zona di accumulo è impostata su un deposito alluvionale. La strumentazione installata (planimetria in **Figura 1**) consisteva in picchetti topografici, piezometri Casagrande e tubi inclinometrici, nonché sensori acquisiti in continuo (piezometri a corda vibrante ed inclinometri fissi del tipo elettrolivelle). Periodicamente la strumentazione è stata sostituita a causa dei danni subiti durante le riattivazioni intermittenti della colata. Lo studio fu completato con un’ampia sperimentazione di laboratorio svolta nell’ambito di due tesi di dottorato (Guerriero, 1995; Comegna, 2005).

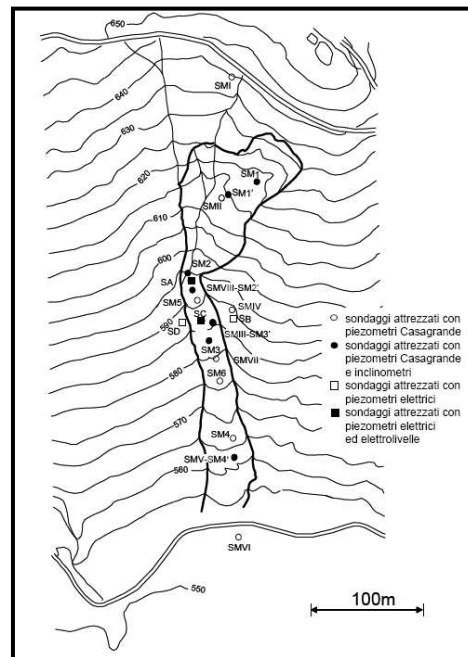


Figura 1 - Frana di Masseria Marino: planimetria e strumentazione installata

Interpretazione dei dati del monitoraggio

Fra il 1992 ed il 2004 furono eseguite varie campagne di misure topografiche, i cui risultati, raggruppati in base all’ubicazione degli strumenti nel corpo della colata (area di alimentazione, canale di flusso ed area di accumulo) sono riportati in **Figura 2** e sono confrontati con le piogge registrate.

È evidente l’influenza delle piogge sugli spostamenti dell’area di alimentazione, la cui mobilità è modesta o nulla tra giugno e novembre, quando i livelli idrici nei piezometri attingono i valori minimi; la frana si riattiva tra dicembre e maggio, quando la falda risale ai massimi livelli invernali. Il cinematismo del canale di flusso è invece più complesso, perché non dipende solo dalle precipitazioni ma anche dall’interazione con l’area di alimentazione. Il materiale per poter scorrere all’interno del canale deve adattarsi alla forma e alle dimensioni di quest’ultimo, e ciò avviene più agevolmente nella stagione umida quando il terreno è meno consistente e più deformabile. Il corpo di frana, dunque, non si muove come un unico corpo rigido: in genere prima si mobilita l’area di alimentazione, per effetto diretto delle precipitazioni, e solo in seguito il canale di flusso. A causa del comportamento descritto, all’interno del corpo della colata vi è la presenza simultanea di zone di estensione e di compressione. Nelle fasi più attive la velocità di spostamento della frana può raggiungere il m/giorno; a causa della bassa permeabilità dei terreni del corpo della colata è verosimile che questi processi si verifichino in condizioni non drenate o parzialmente tali. Ciò può giustificare le pressioni neutre nel corpo di frana maggiori di quelle idrostatiche, registrate nelle piazzole A e C, strumentate con elettrolivelle e piezometri a corda vibrante, che hanno fornito misure in continuo dal 1994 al 1998 (**Figura 3**).

Il piezometro installato nella piazzola C nel mese di marzo 1998 registrava valori di pressione neutra che, espressi in colonna d’acqua, superavano di circa 3 m il piano campagna; contemporaneamente le misure di spostamento relative alla piazzola A erano indicativi di una

chiara accelerazione. È verosimile che la repentina mobilitazione dei terreni di monte (piazzola A) abbia determinato un caricamento non drenato sui terreni di valle (piazzola C), con conseguente sviluppo di sovrappressioni neutre. Quindi si è mobilitata anche la parte di canale all'altezza della piazzola C, come si può osservare dal diagramma degli spostamenti.

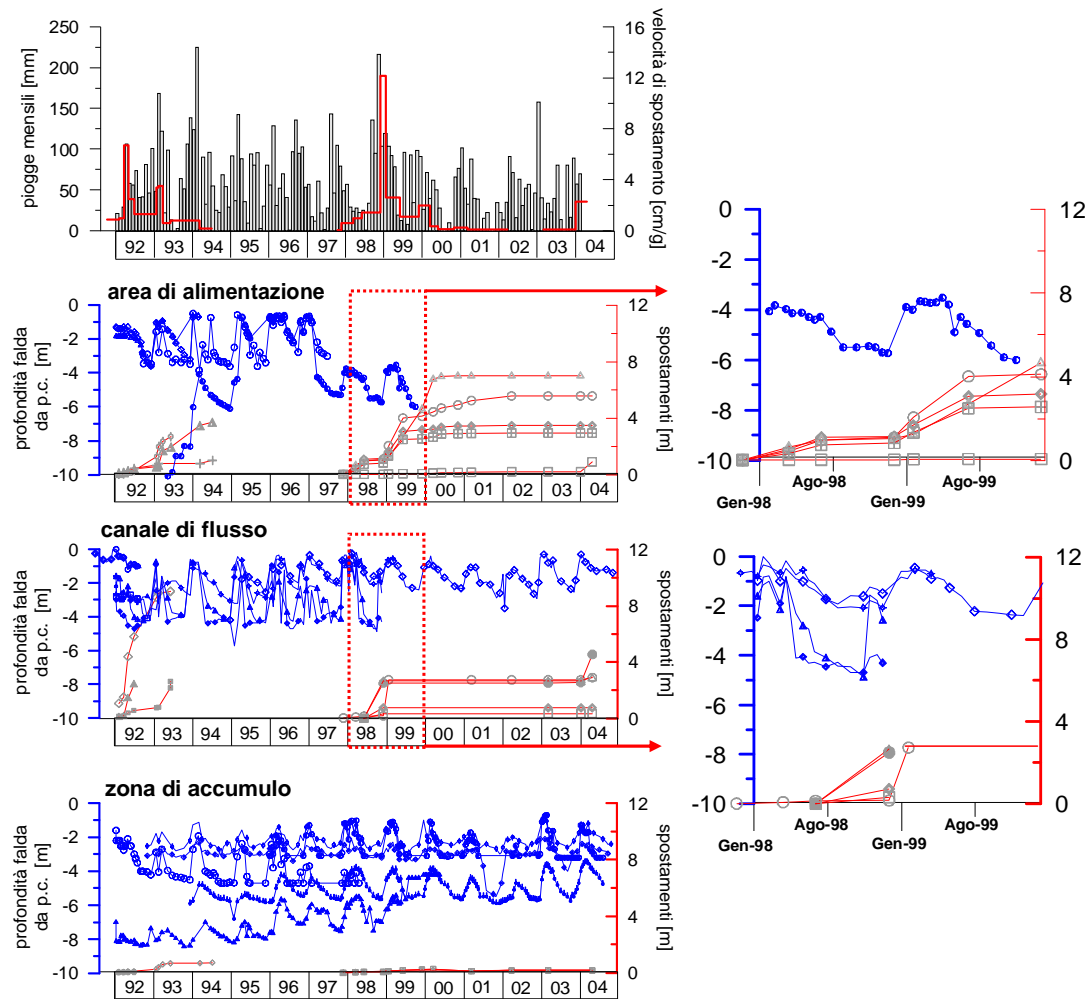


Figura 2 - Dati del monitoraggio eseguito dal 1992 al 2004: piogge, pressioni neutre e spostamenti, relativi alle tre zone della colata (area di alimentazione, canale di flusso e zona di accumulo). Gli ingrandimenti a lato consentono di visualizzare la relazione tra le pressioni neutre e gli spostamenti a scala mensile

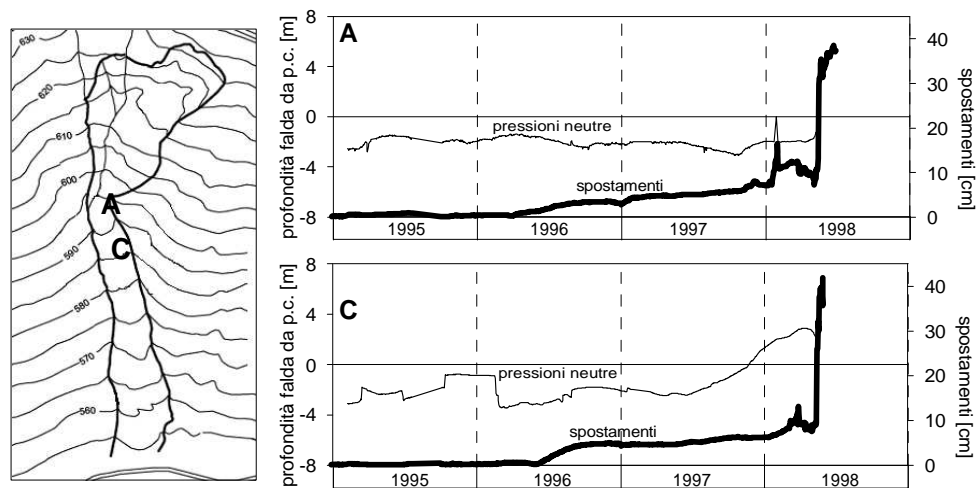


Figura 3- Pressioni neutre e spostamenti registrati in continuo, dal 1994 al 1998, nelle piazzole A e C strumentate con piezometri elettrici ed elettrolivelle

La modellazione della frana di Masseria Marino

Le criticità del problema

La messe di dati sperimentali disponibili per il sito di Masseria Marino consente di descrivere compiutamente il regime delle pressioni neutre nel pendio, le sue relazioni con quello delle piogge ed il meccanismo di frana, almeno durante le fasi 'lente' della colata, quando è possibile tenere in esercizio la strumentazione in sito. Durante le fasi 'rapide' quasi tutti gli apparecchi installati nel corpo di frana vengono distrutti e non è possibile registrare dati sperimentali utili a descrivere il comportamento della colata, se non gli spostamenti superficiali e le proprietà del terreno.

Sulla base di queste informazioni si è tentato di implementare un modello globale della colata in grado di descrivere il comportamento in tutte le fasi del suo ciclo morfologico, operando sul legame costitutivo del mezzo. Tutto ciò è stato svolto attraverso un codice di calcolo agli elementi finiti, il Plaxis 2D. L'obiettivo dell'analisi è stato riprodurre le pressioni neutre nel pendio, la loro relazione con le piogge registrate e gli spostamenti indotti. Considerato che durante le fasi di elevata mobilità della colata il terreno si trova in condizioni di drenaggio impedito, il fulcro della ricerca è stato la scelta di una legge costitutiva in grado di riprodurre correttamente lo sviluppo delle sovrappressioni neutre in terreni di modesta consistenza.

La geometria del problema

Nel modello geometrico implementato nel codice di calcolo numerico sono state ricostruite con estrema dovizia la topografia e la stratigrafia del sito (**Figura 4**), distinguendo il corpo della colata, la zona di taglio, in cui si concentrano le massime deformazioni distorsionali, ed infine la formazione di base, che è stata ipotizzata infinitamente rigida. Al contatto tra la formazione di base e la zona di taglio è stato inserito un elemento di interfaccia, che simula la presenza della superficie di scorrimento pregressa, su cui è disponibile la resistenza residua; ciò per tener conto delle molte riattivazioni già avvenute.

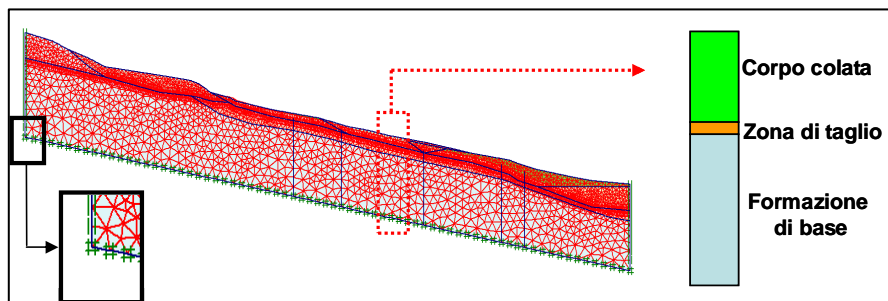


Figura 4 - Geometria del pendio inserita nel codice di calcolo, con indicazione dei vincoli al contorno, del reticolo nodale e della stratigrafia

I modelli costitutivi utilizzati nelle analisi e i parametri meccanici dei terreni

Le analisi numeriche sono state sviluppate in maniera comparativa, utilizzando tre differenti modelli costitutivi per caratterizzare i terreni del corpo della colata, in modo da operare un mutuo confronto e mettere in evidenza l'inadeguatezza dei modelli più semplici:

- Modello Mohr Coulomb (MC), che semplicisticamente considera il terreno elastico-perfettamente plastico, ma è utile per mettere in evidenza i vantaggi delle modellazioni più sofisticate;
- Modello Soft Soil (SS), che consente di portare in conto la non linearità del comportamento elastico del terreno, includendo anche una legge di incrudimento;
- Modello Soft Soil Creep (SSC), elasto-viscoplastico, che compendia le caratteristiche del modello Soft-Soil e permette di considerare anche il parametro 'tempo' e quindi il ruolo della velocità dei percorsi di carico in condizioni di drenaggio impedito. I parametri meccanici ed

idraulici assegnati ai terreni sono stati ricavati dalle prove di laboratorio eseguite sui terreni del sito nell'ambito di due tesi di dottorato precedenti (Guerriero, 1995; Comegna, 2005).

Le analisi numeriche

Lo scopo delle analisi numeriche era di riprodurre il fenomeno di riattivazione che si è verificato a Masseria Marino nel periodo '97-'99, a partire dal regime pluviometrico registrato in sito. Il codice di calcolo utilizzato, tuttavia, non consente di imporre al contorno del modello geometrico flussi in uscita od in entrata, per cui le condizioni meteorologiche sono state schematizzate attraverso opportuni valori di pressione neutra applicati al contorno superiore, variabili nel tempo in funzione delle condizioni meteorologiche. Durante il periodo umido al piano campagna è stata applicata una lama d'acqua; durante i periodi asciutti, poiché si sviluppa un fenomeno di evapotraspirazione, con progressiva riduzione delle pressioni neutre nel terreno, al p.c. si instaurano valori di suzione incogniti, che nel caso in esame sono stati calcolati mediante una procedura di analisi a ritroso basata su due anni di registrazioni, ottenendo una legge di variazione della suzione a p.c. che meglio delle altre consente di interpretare le misure piezometriche nel sottosuolo.

Nelle zone della colata di minore mobilità, e cioè la zona di accumulo e la parte inferiore del canale di flusso (piezometri P6, P4 e PVI in **Figura 5**) che mostrano spostamenti modesti, praticamente nulli, anche durante le fasi di riattivazione della colata, i risultati delle simulazioni numeriche, in termini di riproduzione delle pressioni neutre nel pendio sono soddisfacenti, qualsiasi sia il modello costitutivo adottato. Queste aree del pendio non sono interessate da processi deformativi rilevanti e proprio per l'assenza di repentine variazioni di tensioni totali nel corpo di frana i terreni si trovano verosimilmente in condizioni drenate. In queste condizioni, anche i modelli meno sofisticati, come quello elastico-perfettamente plastico di Mohr Coulomb riescono ad interpretare correttamente la risposta dei terreni alle variazioni della condizione idraulica al contorno, a valle di un'opportuna calibrazione dei parametri. Al contrario, in corrispondenza delle zone di elevata mobilità della colata, ovvero la zona di alimentazione (PA), le velocità e l'entità degli spostamenti che si generano in conseguenza della riattivazione, regolata dalle fluttuazioni del livello di falda, sono tali da indurre un processo di compressione dei terreni a valle, nella parte superiore del canale di frana, di tipo non drenato. Questo giustifica le risposte differenti dei tre modelli usati, in termini di pressione neutra, per i piezometri che si trovano in prossimità della zona di alimentazione della colata.

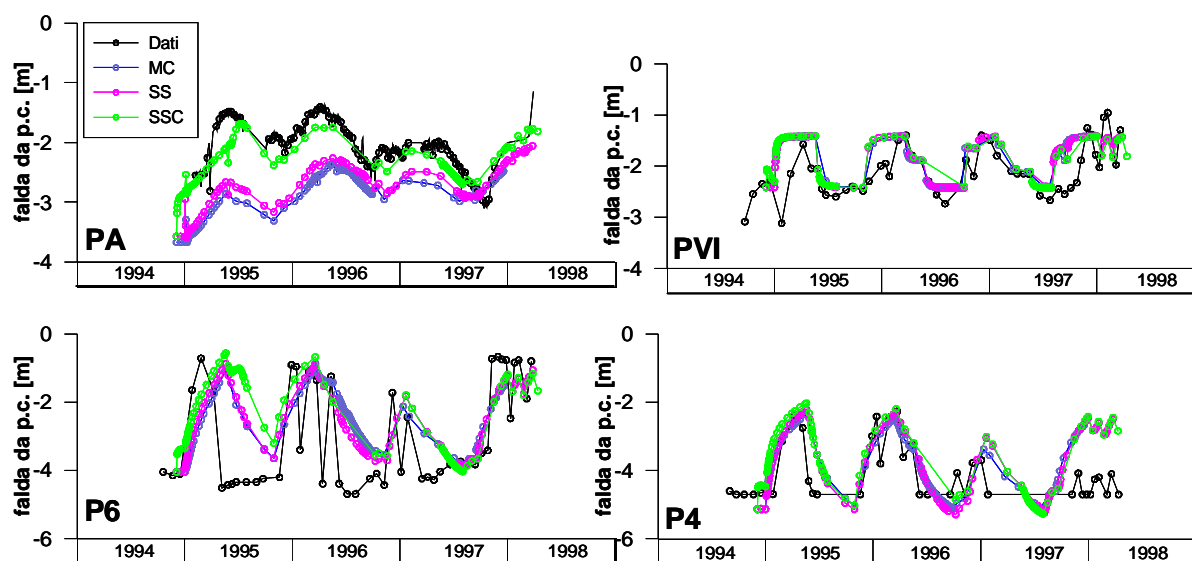


Figura 5 -Confronto tra le misure di pressione neutra registrate in sito e i dati ottenuti dalle analisi numeriche utilizzando tre diversi modelli costitutivi: Mohr Coulomb (MC), Soft-Soil (SS) e Soft Soil Creep (SSC)

Il modello Soft Soil Creep è l'unico dei tre adoperati nelle analisi che riesce a riprodurre in maniera adeguata i fenomeni di riattivazione osservati in sito: nell'analisi di stabilità eseguita con la procedura di riduzione progressiva dei parametri di resistenza del mezzo (*c e phi reduction*) attraverso il codice Plaxis, il calcolo con SSC restituisce un coefficiente di sicurezza unitario, mentre le analisi svolte con MC e SS restituiscono un valore di FS superiore all'unità, in conseguenza, evidentemente, di una stima errata per difetto delle pressioni neutre all'interno del pendio. Inoltre, i meccanismi di mobilitazione prodotti dalle tre analisi sono diversi: si osservi dalla **Figura 6** che quello relativo al SSC coinvolge solo la parte di monte del canale di flusso, così come avviene nella realtà e come mostra la fig. 6D che riporta gli spostamenti superficiali misurati in quel periodo. Secondo gli altri due modelli (MC e SS) la frana avrebbe dovuto mobilitarsi nella sua interezza, cosa che non è accaduta né in quella occasione, né in altre comunque osservate dal gruppo di ricerca.

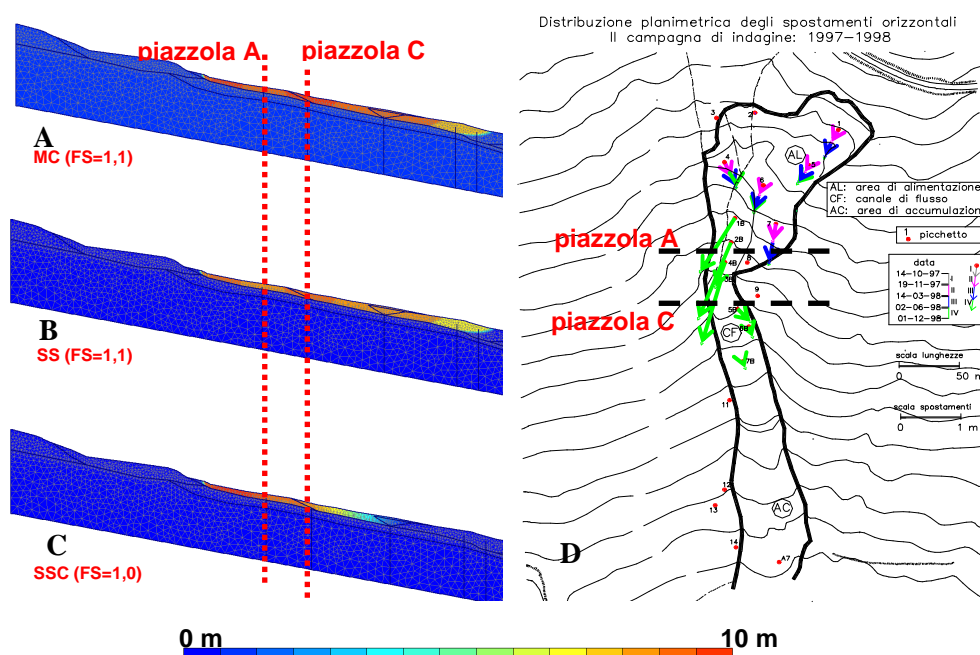


Figura 6 – Confronto tra i meccanismi di frana previsti nelle analisi dai differenti modelli costitutivi (A-Mohr Coulomb, B-Soft Soil, C-Soft Soil Creep) e gli spostamenti registrati in sito nello stesso periodo (D)

Conclusioni

L'adozione della legge costitutiva SSC ha consentito di svolgere analisi che ben interpretano la fase non drenata delle colate di argilla, in cui a causa delle elevate sovrappressioni neutre che insorgono nel corpo di frana, le velocità di spostamento possono essere significative, fino al m/g. Si conferma che nelle analisi delle fasi lente, in cui la condizione di drenaggio è consentita, i risultati sono meno dipendenti dalla legge costitutiva adottata.

Bibliografia

- Guida, D. e G. Iaccarino. « Fasi evolutive delle frane tipo colata nell'Alta Valle del F. Basento » (Potenza). in Studi Trentini di Scienze Naturali, Acta Geologica. 1991
- Comegna, L., « Proprietà e comportamento delle colate in argilla », 2005, Seconda Università degli Studi di Napoli, Tesi di Dottorato
- Guerrero, G., « Modellazione sperimentale del comportamento meccanico dei terreni in colata » 1995, Università degli Studi di Napoli Federico II, Tesi di Dottorato.