

# DAL MODELLO GEOTECNICO ALLA VERIFICA IN CORSO D'OPERA DEI LAVORI DI CONSOLIDAMENTO DELLA FRANA DI FAIETO (TE)

Di Francesco R., Siena M.

GEO&GEO Instruments® – research & development, Teramo (TE); www.geoandgeo.com

Ferrari M.

Servizio di Difesa del Suolo e Servizio Geologico della Regione Umbria, Perugia (PG)

## SOMMARIO

Se la località Faieto è nota da tempi antichi, come dimostrato dalla presenza di reperti archeologici di fattura romana, la frana che la caratterizza è sicuramente posteriore a tale epoca, dal momento che la stessa ha troncato una antica strada che collegava Teramo con i siti dell'entroterra. Nel 2001, con la stesura di un progetto di consolidamento, sono stati eseguiti studi geologici e geotecnici volti alla definizione di un modello numerico capace di fornire analisi predittive. Il monitoraggio inclinometrico e topografico, iniziato in tale periodo e protratto fino al 2005, ha dimostrato nel contempo due aspetti essenziali: a) alcuni limiti del modello numerico; b) la necessità di rivedere il progetto iniziale. Il problema è incentrato nella difficoltà di modellazione dei terreni coinvolti, con accumuli di crollo in scivolamento su argille strutturalmente complesse antiche di oltre 5 milioni di anni, plastiche, e dal pronunciato comportamento rammollente. I risultati finali non sono stati del tutto soddisfacenti, dal momento che l'impostazione di un modello numerico inizialmente convergente e successivamente predittivo ha solo parzialmente risposto ad alcuni dei problemi analizzati.

Parole chiave: frana, modello predittivo, monitoraggio, analisi retrospettiva

## 1 INTRODUZIONE

Faieto è una frazione del comune di Cortino, ubicata nell'entroterra abruzzese ai piedi dei Monti della Laga. In questa area, oggetto di studi per la realizzazione di un intervento di consolidamento dell'abitato, vi si ritrovano tracce di insediamenti di epoca romana e medievale. Il dato più significativo è legato all'esistenza di un viabilità minore che collegava Interamnia (nome latino di Teramo) con i siti dell'entroterra e che risulta troncato dalla frana sulla quale sorge l'abitato attuale di Faieto.

L'area in studio interessa una frana traslazionale adagiata sulla Formazione delle Marne a Pteropodi (8÷5,5 MA), rappresentata da argille strutturalmente complesse e in continuità stratigrafica con le sottostanti Marne con Cerrognola (21÷8 MA), una formazione calcarenitica che alla scala delle osservazioni può essere considerata indeformabile. Ed in effetti tutto il problema è incentrato nel comportamento delle argille le quali, plastiche e con un pronunciato comportamento rammollente, agiscono da "cuscinetto lubrificante" tra la formazione sottostante e quella sovrastante, questa ultima rappresentata da strati arenacei, spessi e fratturati, appartenenti alla Formazione della Laga (5,5÷5 MA). Tale comportamento ha inoltre influenzato l'evoluzione del paesaggio di tutto l'entroterra, con superfici di erosione sospese sulle valli fluviali e sistematicamente coincidenti con il tetto della formazione calcarenitica (figura 2).

Le perforazioni di sondaggio, strumentate con inclinometri e piezometri, hanno evidenziato uno spessore massimo della frana di circa 24 metri, con appoggio alle scarpate sub-verticali di monte e chiusura al piede, dove viene sostituita da materiali fini di spessore metrico depositati per rifluimento idraulico (figura 3). Inoltre hanno indicato anche una struttura complessa, caratterizzata da un notevole grado di eterogeneità dovuta

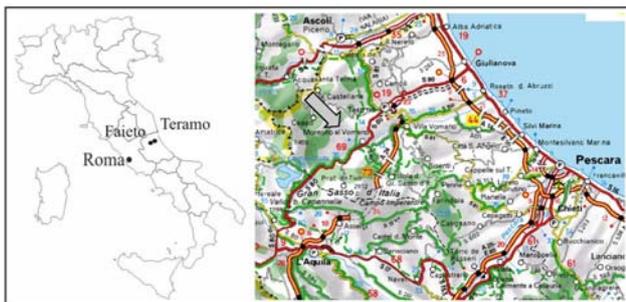


Figura 1. Ubicazione di Faieto nel territorio teramano.

alla presenza di blocchi arenacei immersi in matrice limo-sabbiosa, la quale influisce sull'idrodinamica delle acque sotterranee con vie preferenziali di drenaggio e mancanza di un livello piezometrico lateralmente continuo.

Sulla base dei risultati delle indagini e del monitoraggio, inclinometrico e topografico, la frana è stata suddivisa in tre settori caratterizzati, da monte verso valle, dall'attenuazione della velocità di deformazione; inoltre, se l'area di monte è dotata di un campo di sforzi distensivo e quella di valle denota una azione prevalentemente compressiva, la zona centrale del corpo di frana, dove sono concentrati i quadri fessurativi sulle abitazioni, risulta essere invece la più critica, dal momento che è soggetta a deformazioni sia distensive che compressive, in relazione allo smembramento della frana in tre sub-corpi. Infine è da notare come le indagini abbiano evidenziato la presenza di una superficie profonda di taglio e scorrimento e che appare come una fascia di intensa fratturazione interessante la Formazione delle Marne a Pteropodi, con il materiale completamente destrutturato e presenza di calcite isoorientata (slickensides).

In considerazione della complessità geologica e geotecnica è stato impostato un modello numerico ad elementi finiti, utilizzando varie leggi costitutive al fine di ricostruire la storia tensionale e deformativa della frana, da utilizzare come base per le previsioni progettuali. Ciò ha richiesto anche lo studio dei fenomeni tempo-dipendenti, utilizzando parametri dedotti dall'analisi integrata delle prove edometriche e del monitoraggio inclinometrico.

In relazione alla limitata disponibilità economica, nel 2001 è stato progettato un intervento di consolidamento basato sulla realizzazione di un unico pozzo drenante strutturale di grande diametro ubicato presso la testata della frana, nonostante le analisi geotecniche di tipo convergente → predittivo, impostate per una finestra temporale di 5 anni, dimostrassero una efficacia limitata nel tempo di tale soluzione. Nel contempo tale soluzione è stata preferita all'esecuzione di due pozzi accoppiati, da ubicarsi al piede della frana, dove lo spessore è decisamente inferiore, corredati di microdreni capaci di raggiungere il settore centrale di maggiore criticità.

Il proseguo del monitoraggio ha consentito di evidenziare alcuni limiti sia del progetto che del modello numerico, poiché: 1) il campo degli spostamenti misurati ha palesato una efficacia parziale dell'intervento eseguito; 2) tutte le modellazioni non sono state capaci di simulare correttamente il comportamento della frana.

## 2 COSTRUZIONE DEL MODELLO FISICO

Le conoscenze geologiche e geomorfologiche dell'area hanno evidenziato come la configurazione attuale del paesaggio sia il risultato dell'interazione tra i processi morfogenetici (esogeni) e le caratteristiche strutturali e geotecniche del substrato (Di Francesco R. e Scalella G., 2003) le quali hanno influito sulle condizioni di innesco e di evoluzione del fenomeno franoso. Quindi, considerata la complessità dei fenomeni e la necessità di ricorrere ad analisi numeriche, è stato necessario costruire

preliminarmente il modello fisico del problema, al fine di ottenere un quadro di riferimento per la convergenza dei risultati. Con tale metodologia è stato di conseguenza possibile dapprima guidare le indagini geognostiche e successivamente costruire un modello ad elementi finiti di tipo convergente → predittivo.

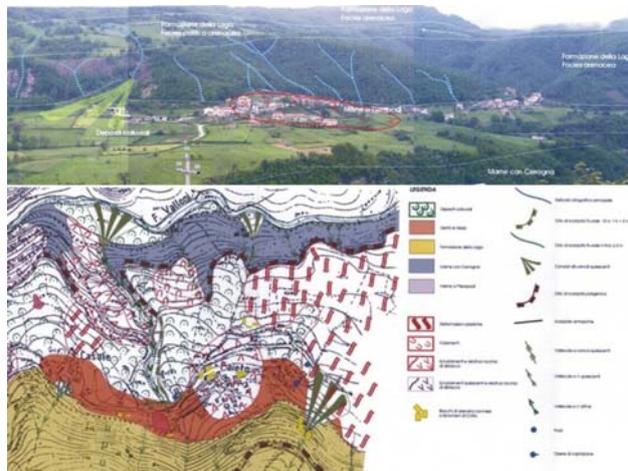


Figura 2. Carta geologica e geomorfologica corredata di panoramica dell'area con la ricostruzione dell'assetto strutturale e dei processi fisici in atto (da Di Francesco R. e Scalella G., 2003, modificata).

Dai rilievi geologici e geomorfologici, sintetizzati nella figura 2, è stata inizialmente ricostruita la struttura profonda dell'area, alla quale è stata successivamente sovrapposta l'evoluzione del paesaggio fisico. Le formazioni litoidi riscontrate appartengono alla fase di strutturazione della catena appenninica e sono caratterizzate da litologie e reologie diverse. Dal basso verso l'alto sono presenti: la Formazione delle Marne con Cerrognola (21÷8 MA), costituita da calcareniti che alla scala delle osservazioni possono essere considerate indeformabili; la Formazione delle Marne con Pteropodi, (8÷5,5 MA), costituite da argille strutturalmente complesse; la Formazione della Laga (5,5÷5 MA), con strati di spessore decametrico di arenarie fratturate. Il problema sostanzialmente è tutto incentrato sia sullo spessore che sul comportamento geotecnico delle Marne a Pteropodi, le quali, con affioramenti variabili da pochi metri a circa 50, risultano essere plastiche (LL = 45.3%; LP = 17.9%; IP = 27.4; w = 8.5%) e dotate di un pronunciato comportamento rammollente, agendo di conseguenza da "cuscinetto lubrificante" tra la formazione sottostante e quella sovrastante.

In particolare il ridotto spessore si ritiene sia dovuto a due effetti: a) la deposizione in ambiente marino asfittico, ovvero di condizioni riducenti e non ossidanti, tipico delle zone più depresse; in altre parole esso è da considerarsi originariamente esiguo; b) la compressione differenziale subita dall'accumulo di centinaia di metri di arenarie. Ne consegue che, in funzione della diagenesi legata alle fasi di seppellimento e della successiva erosione in ambiente sub-aereo, le Marne a Pteropodi hanno subito una forte sovraconsolidazione di tipo sia chimico che meccanico,

rendendone complessa la comprensione del comportamento geotecnico.

Le analisi geomorfologiche del paesaggio hanno evidenziato come la complessa struttura abbia influenzato le fasi di approfondimento e di stasi del reticolo idrografico, con la formazione di valli sospese e ripide scarpate impostate sulle formazioni delle Marne con Cerroigna e della Laga e scarpate a basso angolo tipicamente coincidenti con le argille strutturalmente complesse. Tutti i fenomeni franosi, compresi quello in studio, sono risultati sistematicamente impostati sulle Marne a Pteropodi. Inoltre è emerso chiaramente, dallo studio della geometria e dei rapporti strutturali, che la frana ha avuto origine per fenomeni di crollo, la cui genesi è da ricondurre alla combinazione dell'intensa alterazione in ambiente sub-aereo delle argille e della diffusa fratturazione dei sovrastanti strati arenacei (figura 3).

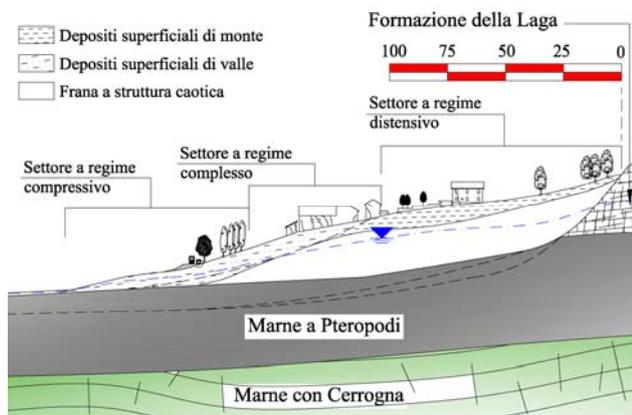


Figura 3. Sezione geologica integrata con alcune informazioni scaturite dalle indagini e dal monitoraggio; da evidenziare l'effetto cuscinetto esercitato dalle Marne a Pteropodi (da Di Francesco R. e Scaletta G., 2003, modificata).

### 3 COSTRUZIONE DEL MODELLO NUMERICO

La complessità del problema rivela durante gli studi preliminari, propedeutici a quelli geotecnici, ha richiesto: 1) l'esecuzione di indagini geognostiche comprendenti perforazioni a carotaggio continuo con prelievo di campioni e strumentazione dei fori con piezometri e inclinometri; 2) l'esecuzione di un monitoraggio inclinometrico e topografico. In particolare il campionamento delle Marne a Pteropodi ha richiesto l'uso del triplo carotiere, stante la tendenza delle argille ad incollarsi letteralmente alle fustelle. E ciò ha comportato anche ovvie difficoltà di esecuzione delle analisi di laboratorio, consistenti in prove TRX-CD e prove edometriche di lunga durata.

Altra difficoltà infine è emersa nel campionamento della matrice del corpo di frana, dal momento che quest'ultima è risultata costituita da blocchi arenacei di grandi dimensioni, con spessori fino a 13 metri, a costituire uno scheletro solido tipico di una frana di crollo. Quindi, integrando i risultati delle indagini dirette con quelle di superficie sintetizzate nel paragrafo precedente, la frana di Faieto può essere considerata come costituita

da più eventi di crollo originatisi sulle pareti arenacee e scivolate lungo le sottostanti argille. Allorquando le zone di alimentazione hanno raggiunto uno stato di (quasi)equilibrio, è continuata la normale sedimentazione di superficie ad opera delle acque di ruscellamento, come dimostrato dalla presenza di materiali limosi e sabbiosi di copertura (figura 3). È anche probabile, però, che la frana possa aver avuto un'origine proprio dall'interno della formazione argillosa, considerato la presenza di una superficie di scivolamento profonda individuata nel settore centro-basale, sia in sede di carotaggi che in fase di monitoraggio. Tale superficie di scivolamento appare come una sottile zona di taglio che ha comportato la destrutturazione delle argille e la formazione di calcite isoorientata, tipica di condizioni di sforzi orientati (figura 4).



Figura 4. Frammento di Marna a Pteropodi prelevata presso il settore di valle della frana, ad una profondità di 16÷16.5 m dal piano di campagna, in corrispondenza di una zona di taglio.

Il monitoraggio inclinometrico e topografico ha permesso di riconoscere settori della frana quasi omogenee, ognuno caratterizzato da un proprio stato e velocità di deformazione. Per tale motivo, integrando tali risultati con le indagini del sottosuolo e le conoscenze di superficie, la frana è stata suddivisa in tre zone distinte caratterizzate, da monte verso valle, da variazioni della velocità di deformazione e da condizioni diverse di stato tensionale (figura 3). Ma l'elemento di maggiore importanza è dipeso dall'aver potuto ricostruire una superficie di scivolamento secondaria, la quale congiunge il piede della frana con il settore centrale, laddove gli effetti sugli edifici risultano essere più concentrati e sviluppati in termini di quadri fessurativi.

In considerazione della complessità geologica e geotecnica, la costruzione del modello numerico ad elementi finiti ha richiesto l'utilizzo di varie leggi costitutive al fine di ricostruire la storia tensionale e deformativa del corpo di frana, da utilizzare come base per le previsioni progettuali. La Formazione della Laga è stata modellata in campo elastico isotropo, sia per l'elevata rigidità presentata dai litotipi arenacei e sia per evitare una diretta influenza sul comportamento

dell'intero modello tale da obliterare il reale punto di vista. Per le Marne a Pteropodi è stato adottato il "cap model" (plastico incrudente o rammollente) che è basato sul fatto che l'isteresi volumetrica esibita da molti geomateriali può essere descritta da un modello plastico, se tale modello è basato su una superficie di snervamento incrudente che include condizioni di stress idrostatico (Chen W.F. & Baladi G.Y., 1985). I restanti geomateriali sono stati modellati come mezzi elastici non lineari-perfettamente plastici, caratterizzati dalla superficie di snervamento di Drucker-Prager e da una regola di flusso associata ( $\psi=0$ ). La non linearità è stata formulata mediante l'adozione dello schema iterativo di Newton-Raphson modificato.

Per la simulazione delle condizioni di creep è stato necessario impostare le equazioni relative al modello di Kelvin-Voigt, con i parametri dedotti dall'analisi integrata delle prove edometriche e delle deformazioni inclinometriche, con uno scarto tra le previsioni numeriche e il modello reale risultato inferiore al 10%. Le altre condizioni al contorno hanno riguardato: a) il comportamento delle calcareniti, le quali, proprio per le considerazioni di cui al paragrafo 2, sono state eliminate dal modello e simulate direttamente con vincoli a cerniera posizionati sul limite inferiore; b) le condizioni di scivolamento reciproco tra le varie unità, simulate con elementi elasto-plastici di contatto, ognuno caratterizzato da una propria rigidità normale ( $k_n$ ) e tangenziale ( $k_t$ ) del tipo:

$$k_n = \frac{E}{h} \quad ; \quad k_t = \frac{G}{h} \quad (1)$$

nelle quali  $h$  è lo spessore dell'interfaccia e  $E$  e  $G$  i moduli elastici normali e tangenziali mediati tra i terreni in contatto.

Infine i principali parametri geotecnici delle varie unità sono sintetizzati nella seguente tabella 1 (P = Marne a Pteropodi; A = arenarie; M = depositi superficiali di monte sabbioso-limosi; V = depositi superficiali di valle, limo-sabbiosi; F = frana con matrice sabbioso-limoso):

Tabella 1. Principali parametri geotecnici.

unità	$\gamma_n$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'_p$ [kPa]	$\phi'_p$ [°]	$c'_r$ [kPa]	$\phi'_r$ [°]	$E'$ [MPa]	$\nu$	OCR
P	21.8	64	21.3	0	18	41.4	0.28	12
A	24.0	-	-	-	-	150	0.22	-
M	19.4	10	28.9	0	27	8.0	0.30	1
V	19.9	10	27.3	0	26	7.4	0.32	1
F	20.1	15	30.5	0	30	9.5	0.35	1

## 4 ANALISI GEOTECNICA

### 4.1 Modello convergente

Poiché l'obiettivo fondamentale delle analisi geotecniche è consistito nella realizzazione di un modello numerico di tipo predittivo, il problema fondamentale è derivato dalla necessità di riuscire a raggiungere la

convergenza con il modello reale scaturito invece dalla combinazione del monitoraggio di profondità e di superficie. Per tale motivo è stato necessario implementare il fenomeno di rammollimento, relativo ai geomateriali costituenti sia la frana che i depositi di superficie, inteso come processo interno (creep), simulato mediante il modello di Kelvin-Voigt, con legge di variazione logaritmica del tipo:

$$C_{(t,t_0)} = A_{(d,v)} \ln(1 + B_{(d,v)} t) \quad (2)$$

Nell'equazione 2 (ZACE, 2006),  $C_{(t,t_0)} = \epsilon^{cr}$  rappresenta le deformazioni per creep, mentre i parametri  $A_{(d,v)}$  e  $B_{(d,v)}$  hanno assunto i valori di cui alla tabella 2:

Tabella 2. Parametri del creep

unità	$A_d^*$	$A_v^{**}$	$B_d^*$	$B_v^{**}$
P	-	-	-	-
A	-	-	-	-
M	0.035	0.035	0.73	0.73
V	0.005	0.005	0.6	0.6
F	0.029	0.029	0.68	0.68

\* componente deviatorica della deformazione; \*\* componente volumetrica della deformazione.

Come già introdotto nel paragrafo precedente, la parametrizzazione della convergenza ha richiesto l'esecuzione preliminare di prove edometriche di lunga durata, con lo scopo di poter valutare l'influenza, sul modello, della consolidazione secondaria. I valori ottenuti sono stati quindi implementati nel modello numerico, salvo successive tarature in funzione dei risultati del monitoraggio. I risultati scaturiti (figura 5), relativi ad un tempo di 112 giorni di letture utili, hanno condotto a spostamenti complessivi pari a 22.2 mm per il settore centrale, di maggiore criticità, e di 9.9 mm per quello di valle, con uno scarto rispettivamente del 9% e del 23.3% rispetto ai valori calcolati.

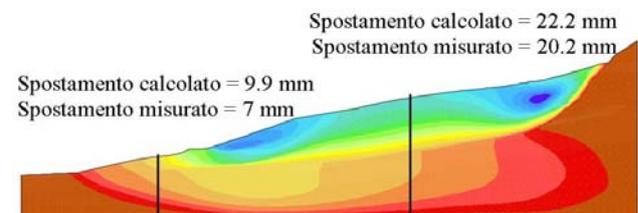


Figura 5. Grafico relativo al modello numerico a convergenza: deformazioni inclinometriche del settore centrale e di valle dopo 112 giorni (da Di Francesco R. e Scalella G., 2003, modificata).

Dalla lettura della figura 5 emergono alcune informazioni essenziali per la comprensione del cinematiso in atto e per la verifica del modello convergente. Innanzitutto occorre considerare che gli spostamenti calcolati, pur se concentrati all'interno della frana, mostrano di estendersi anche alle sottostanti Marne

a Pteropodi, con uno sviluppo che può essere tipico di un effetto bordo. Ma a tal proposito occorre considerare che il bordo inferiore simula la presenza delle calcareniti indeformabili, ragion per cui le deformazioni in atto potrebbero essere considerate come realmente in atto.

L'unica alternativa per migliorare la risposta del sistema consiste nel posizionare anche sul lato inferiore elementi elasto-plastici di contatto, a simulare lo scollamento tra le calcareniti e le sovrastanti argille. Ma, considerata la presenza di vincoli a cerniera, ciò impedisce di fatto il calcolo dello stato tensionale geostatico di riferimento per gli stati successivi, dal momento che esse comportano il collasso della mesh, impedendo di fatto il proseguo delle analisi. Nel contempo occorre sottolineare come il monitoraggio inclinometrico abbia effettivamente evidenziato la presenza di una superficie di scorrimento profonda, facilmente individuata presso il settore di valle laddove lo spessore dei materiali in frana è all'incirca di 7 metri. Viceversa nel settore di monte gli inclinometri hanno raggiunto la profondità di 30 m, da confrontare con lo spessore locale della frana di 24 metri. Ciò implica che la superficie più profonda debba estendersi al di sotto di tale quota e non sia stata per tale motivo realmente intercettata. E di fatti l'andamento della deformata locale, riferita all'inclinometro centrale, mostra chiaramente come lo stesso, pur evidenziando una elevata componente dello spostamento locale alla profondità di 24 m, non risulti ancorato ad un substrato indeformabile.

La figura 5 fornisce inoltre una chiave di lettura degli spostamenti, i quali presentano effetti differenziati tra il settore di monte e quello di valle, conformemente ai risultati preliminari (Di Francesco R. e Scalella G., 2003). Nel primo caso le maggiori deformazioni sono da attribuire all'attiva idrodinamica di falda, che nel settore di monte trova riscontro nell'alimentazione della stessa da parte delle arenarie fratturate. Riguardo invece al piede della frana occorre evidenziare che in tale zona si assiste al passaggio dalla stessa, propriamente detta, ai terreni di accumulo colluviali, favorendo le locali condizioni di instabilità. Per chiarire ulteriormente tale aspetto, il modello iniziale è stato completato con un'analisi di stabilità, mediante un algoritmo di riduzione dei parametri di resistenza (figura 6).

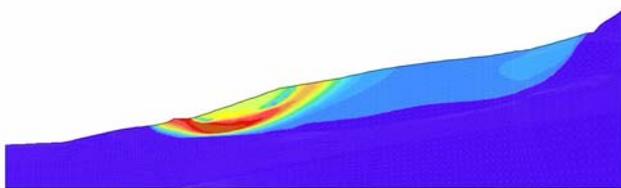


Figura 6. Analisi di stabilità relativa al modello convergente. Le condizioni di collasso evidenziano la congruenza con il modello reale, con particolare riferimento alla superficie di scivolamento di valle (rif. Figura 3).

I risultati hanno mostrato come sia effettivamente il settore di valle a raggiungere per primo le condizioni di rottura, con una geometria di collasso conforme al

modello reale. La lettura comparata delle figure 3, 5 e 6 contribuisce a chiarire ulteriormente tali aspetti.

Il settore centrale, infine, appare comportarsi come un corpo (quasi)rigido, con condizioni di scivolamento che dipendono dalla interazione degli accumuli di crollo con il sottostante contatto con le Marne a Pteropodi. Nel contempo esso risulta essere soggetto a condizioni tensionali complesse, dipendenti dall'azione del settore di monte, a regime distensivo, e di quello di valle, a regime compressivo.

#### 4.2 Modello predittivo

Il progetto di consolidamento, per limitate disponibilità economiche, ha comportato la realizzazione di un unico pozzo strutturale, di grande diametro, con funzione drenante, del diametro interno di 5 m e con una profondità di 27 m, completato da quattro ordini di tiranti ancorati nella Formazione arenacea della Laga. Lo stesso è stato pensato con una funzione strutturale, in modo tale da fornire un contributo statico all'equilibrio globale del pendio (Tambura F., 1998), anche se il suo scopo primario consiste nel raggiungimento di un abbassamento costante del livello di falda. La funzione drenante è stata pertanto affidata a tre raggiere di microdreni, la cui lunghezza è dipesa dalla necessità di voler raggiungere la zona di diretta alimentazione dell'idrodinamica di falda, ovvero gli strati arenacei ubicati a monte. Inoltre, sempre in relazione alle disponibilità economiche, la funzione di smaltimento delle acque drenate è stata affidata ad un sistema di pompe ad immersione collegate ad un cunicolo di superficie conducente ad un fosso naturale.

Le analisi predittive, volte alla valutazione degli effetti degli interventi di consolidamento della frana ed eseguite nel 2001, sono state impostate con una finestra temporale di 5 anni. Inoltre, poiché le stesse dovevano fornire informazioni confrontabili, sono state eseguite sia nelle condizioni pre-intervento che post-intervento, al fine di delineare un quadro di riferimento comparativo (figura 7).

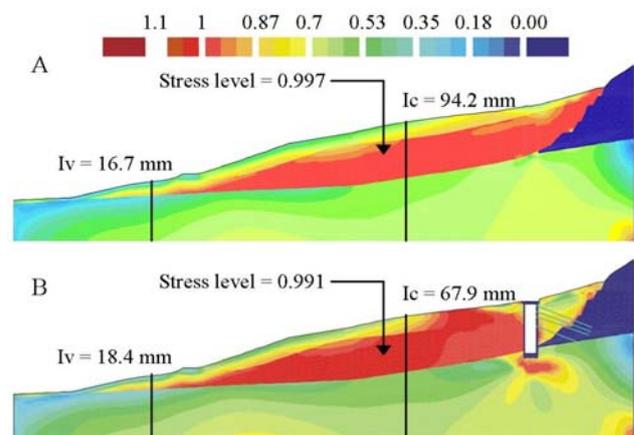


Figura 7. Variazione dello Stress-Level e degli spostamenti nel confronto tra l'evoluzione del modello attuale (A) e quella del modello progettuale (B), proiettati nel periodo 2001-2005. Ic/Iv sono gli inclinometri centrale e di valle.

Il confronto dei grafici costituenti la figura 7 fornisce di conseguenza una utile chiave di lettura dei modelli numerici impostati. Di fatti in essa sono sintetizzati gli studi eseguiti mediante la sovrapposizione di due elementi ritenuti rappresentativi: le condizioni di *Stress-Level* raggiunto ed i massimi spostamenti corrispondenti agli inclinometrici centrale (Ic) e di valle (Iv) introdotti e discussi nel paragrafo precedente.

Con il termine di *Stress-Level* si intende il rapporto tra lo sforzo deviatorico di esercizio e il corrispondente valore a rottura, determinato tramite l'invariante secondo del tensore deviatorico dello sforzo:

$$SL = \frac{q}{q_{rottura}} \quad \text{con} \quad q = \sqrt{3J_2} \quad (2)$$

Nel dettaglio, la figura 7-A mostra un andamento dello *Stress-Level* prossimo alle condizioni di rottura ( $SL = 0.997$ ) interessante l'intero corpo di frana inteso come fenomeni di crollo e scivolamento, mentre le restanti porzioni sono soggette a condizioni decisamente lontane da quelle di collasso. Inoltre è evidente che, in funzione di una evoluzione normale, i massimi spostamenti aumentano a valori di 94.2 mm per il settore centrale e di 16.7 mm per quello di valle, con velocità di spostamento rispettivamente di 14.4 e 1.36 millimetro/anno.

Considerando invece nel modello numerico l'esecuzione del pozzo drenante strutturale, la figura 7-B evidenzia una scarsa funzionalità generale dello stesso, come denotato dalle porzioni di frana ancora prossime a condizioni di rottura ( $SL = 0.991$ ) e spostamenti di 67.9 e 18.4 mm rispettivamente per Ic e Iv. Le relative velocità di spostamento risultano invece essere di 9.14 e 1.7 millimetro/anno.

E' evidente, dal confronto dei dati calcolati, che l'esecuzione del pozzo drenante strutturale nella posizione di progetto non comporta benefici apprezzabili, in termini di condizioni di stress, spostamenti e velocità di spostamento. Di fatti, con l'esclusione del settore di monte, i settori centrali e di valle mantengono praticamente invariate le condizioni attuali, con l'unica differenza che nel modello di progetto si assiste ad un modesto aumento della deformazione della porzione inferiore della frana rispetto a quella centrale. E si ritiene che tale scarsa efficacia possa dipendere sostanzialmente dalla incapacità di un singolo pozzo di drenare costantemente le acque di falda, le quali tendono ad un riequilibrio verso le condizioni pre-intervento a valle del pozzo stesso, all'incirca in prossimità del settore centrale.

A completamento delle modellazioni numeriche ed al fine di ottenere un ulteriore quadro di riferimento, è stata infine eseguita anche la simulazione degli effetti drenanti di pozzi strutturali ubicati presso il piede della frana. Il vantaggio di tale soluzione consiste nella possibilità di operare in un settore di limitato spessore della frana, con valori non superiori a circa 7 metri. Ciò comporta che, a parità di costo complessivo, è possibile eseguire due pozzi appaiati ed accoppiati, del medesimo diametro di quello progettato e profondità di soli 12 metri ciascuno. Inoltre ciò consente di inserire una doppia raggiera di microdreni di lunghezza tale ( $\approx 60$  m) da estendersi fino al settore

centrale, ovvero quello caratterizzato dalle condizioni di maggiore criticità.

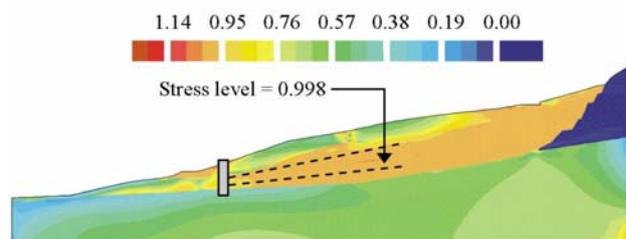


Figura 8. Variazione dello *Stress-Level* in condizione si drenaggio operato dal piede ed esteso fino al settore centrale.

Riferendosi ai risultati sintetizzati nella figura 8, è evidente che la soluzione alternativa, pur ritenuta valida o comunque migliore di quella di progetto, non corrisponde in termini di *Stress-Level* alle aspettative. In altre parole i risultati non sono affatto incoraggianti, tale da richiedere un'analisi critica dell'intero modello predittivo.

#### 4.3 Analisi retrospettiva

In relazione alle problematiche riscontrate, in termini di affidabilità dei modelli numerici, la soluzione del problema è stata affidata all'analisi critica combinata del monitoraggio inclinometrico e piezometrico, considerato che tali modelli sono stati impostati proprio sulla base dei primi risultati misurati.

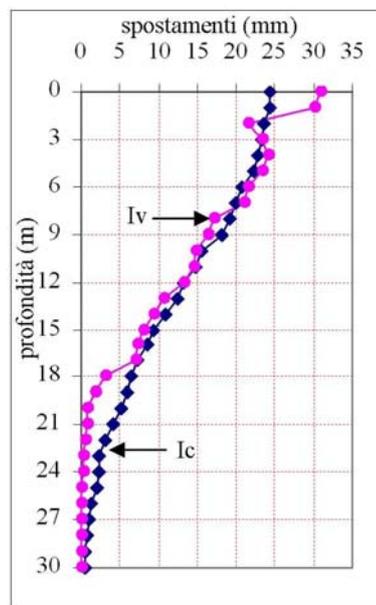


Figura 9. Confronto tra gli spostamenti inclinometrici misurati per il settore centrale (Ic) e quello di valle (Iv) relativi al periodo 2001÷2005.

In effetti, come già introdotto e discusso nei paragrafi precedenti, il modello di tipo predittivo ha preso origine

da un modello di tipo convergente, la cui taratura è avvenuta mediante analisi integrata di prove di laboratorio e di letture inclinometriche relative ai primi 112 giorni di funzionamento del sistema di monitoraggio. L'analisi critica ha quindi richiesto la graficizzazione in serie degli spostamenti misurati agli inclinometri Ic e Iv nel periodo 2001÷2005 (figura 9) e delle relative velocità di spostamento (figura 10) calcolate per lo stesso periodo.

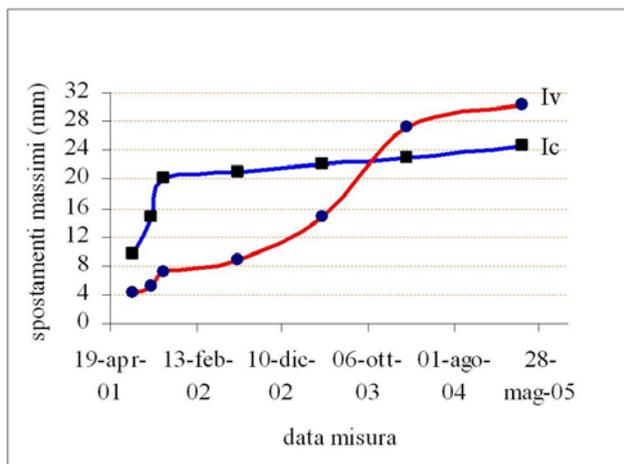


Figura 10. Confronto tra le velocità di spostamento degli inclinometrici Ic (settore centrale) e Iv (settore di valle), relative al periodo 2001÷2005.

Le informazioni ottenibili dalle figure 9 e 10 possono essere riassunte in pochi ma essenziali passi:

- 1) gli spostamenti misurati non sono affatto confrontabili con quelli calcolati mediante analisi numeriche (figura 7), dal momento che i valori reali risultano essere sistematicamente più bassi;
- 2) gli spostamenti finali (aprile 2005) di valle ( $\cong$  31 mm) sono decisamente maggiori rispetto a quelli di monte ( $\cong$  25 mm), contrariamente ai risultati numerici; è anche vero però che, non considerando gli spostamenti dei primi 2 metri dell'inclinometro Iv, le deformate inclinometriche sono praticamente coincidenti, denotando di conseguenza uno scivolamento traslazionale di un corpo (quasi) rigido;
- 3) l'inclinometro Iv evidenzia la presenza, nel settore di valle, di tre superfici di scivolamento, ubicate alle profondità di -2 m, -7 m e -16 m dal piano di campagna; tale assunzione trova corpo anche nell'analisi degli spostamenti locali, non riportati nella figura 9 relativa solo agli spostamenti per sommatoria; in ogni caso, con l'esclusione della prima, attribuibile alla locale presenza di terreno di riporto, la seconda è pertinente alla frana, mentre la terza costituisce la superficie profonda presente all'interno della Formazione delle Marne a Pteropodi;
- 4) l'inclinometro centrale Ic, pur considerando uno spessore locale della frana di 24 m, denota l'esistenza di movimenti più profondi, che tendono ad estinguersi a profondità superiori ai 30 metri della sua lunghezza;
- 5) le velocità degli spostamenti evidenziano un picco iniziale per entrambi gli inclinometri, con valori di 34.9

mm/anno per Ic e 9.1 mm/anno per Iv, da confrontare con i rispettivi valori calcolati pari a 41.4 mm/anno e a 18.6 mm/anno; le velocità successive risultano quasi costanti e decisamente basse per l'inclinometro centrale (1.23 mm/anno), mentre assumono valori alquanto variabili per l'inclinometro di valle. In particolare per questo ultimo è possibile individuare due fasi di decelerazioni (ottobre 2001 – luglio 2002; marzo 2004 – aprile 2005) ed una fase di accelerazione (luglio 2002 – marzo 2004) che, almeno apparentemente, non presentano alcuna possibile correlazione con l'alternarsi delle stagioni e di conseguenza con il regime pluviometrico e/o nevimetrico.

Le informazioni inclinometriche evidenziano pertanto una notevole complessità della frana, dal momento che gli spostamenti, pur risultando confrontabili tra gli inclinometri di riferimento, denotano nel contempo l'esistenza di uno scivolamento traslazionale e di deformazioni interne ed esterne. In altre parole, se la geometria del corpo di frana può essere considerato un elemento noto, la meccanica della stessa è fortemente condizionata sia dalla struttura interna, con blocchi arenacei a costituire uno scheletro solido, che dal comportamento geotecnico delle sottostanti Marne a Pteropodi. Inoltre occorre anche considerare l'esistenza di una superficie di scivolamento profonda, che agisce all'interno delle argille strutturalmente complesse e la cui geometria è nota solo parzialmente.

E tale complessità ha influito sulla costruzione del modello convergente prima e del modello predittivo dopo. Il problema inoltre è stato poi complicato ulteriormente dalla parziale esecuzione del pozzo strutturale drenante progettato, per una controversia legale nata tra l'impresa appaltatrice e la stazione appaltante, tale da inficiare il confronto tra il monitoraggio inclinometrico e le analisi predittive.

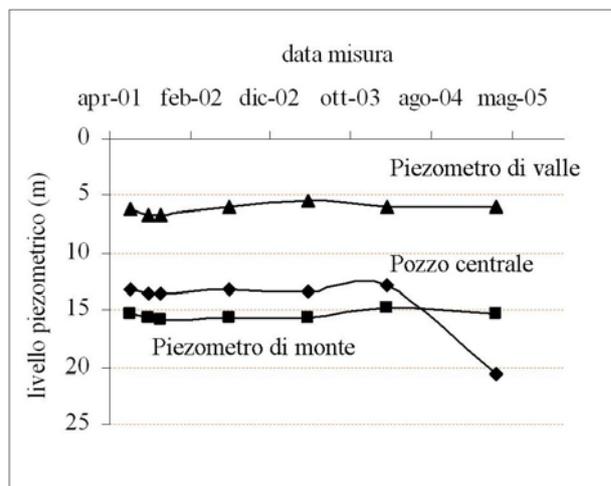


Figura 11. Livelli piezometrici monitorati nel periodo luglio 2001 – aprile 2005.

Utilizzando come riferimento la figura 11 e confrontandola con la sezione di cui alla figura 3, occorre precisare che anche il monitoraggio piezometrico ha mostrato i propri limiti. In effetti la ricostruzione del

livello di falda è stata inizialmente eseguita mediante l'installazione di due piezometri, ubicati a monte e a valle della frana, integrati con i dati misurati in un pozzo esistente presso il settore centrale, tutti all'incirca allineati secondo la direzione di massima pendenza. In tal modo è stata posizionata la quota piezometrica che varia dai circa 15÷13 m dal piano di campagna a monte fino ai circa 5 m a valle. E sulla base di tale posizione sono stati impostati sia i modelli numerici prima, che il progetto di consolidamento dopo. Ma nel luglio 2005, data di ultima misurazione, il pozzo ha manifestato un comportamento del tutto anomalo, con una caduta della quota piezometrica a -20.6 m dal piano di campagna, un evento definito normale dalle testimonianze locali. Di fatti, da un'indagine presso gli abitanti di Faieto, è emerso che il pozzo ha da sempre subito forti oscillazioni del livello della falda, senza che nel contempo potesse essere ricostruita una propria ciclicità. Ovvero l'evento è da ritenersi del tutto casuale.

Appare evidente, alla luce delle nuove informazioni, che l'andamento del livello piezometrico ricostruito nella figura 3 non è più aderente alla realtà e che anzi dobbiamo iniziare ad ipotizzare, proprio per la complessità della struttura della frana, che non esista una falda vera e propria, ma solo direzioni preferenziali di drenaggio. E ciò ha ulteriormente complicato la taratura dei modelli numerici, inficiandone parzialmente i risultati in termini predittivi.

## 5 CONCLUSIONI

La moderna geotecnica è caratterizzata dall'utilizzo di modelli numerici, i quali, implementati in software molto potenti e versatili grazie anche all'accresciuta capacità di elaborazione dati dei mezzi di calcolo, sono capaci di simulare gli effetti derivanti da azioni antropiche di qualunque complessità. E di fatti molta della ricerca è rivolta alla codifica matematica del comportamento dei geomateriali.

Il problema fondamentale nell'utilizzo di modelli numerici complessi, capaci di cogliere gli aspetti salienti dei problemi affrontati, deve necessariamente imporre l'utilizzo di una procedura interattiva, dal momento che lo studio del comportamento reale di strutture geotecniche non può essere limitato alla pura predizione e/o alla verifica mediante back analysis, ma deve evolvere attraverso passi di calibrazione tra le soluzioni numeriche, i monitoraggi ambientali e strutturali, le prove in sito e quelle di laboratorio (Doležalová et al., 2001).

Il caso della frana di Faieto affrontato ha messo ulteriormente in luce alcuni di tali aspetti, dal momento che, nonostante la calibrazione dei modelli numerici attraverso il monitoraggio inclinometrico e topografico, i risultati in termini predittivi non sono stati del tutto soddisfacenti. Le differenze rilevate possono essere addotte ad alcune condizioni al contorno del tutto particolari, quali: a) la complessità della simulazione del comportamento di argille strutturalmente complesse, antiche di diversi milioni di anni; b) la presenza di una struttura interna della frana costituita da uno scheletro solido derivante da più eventi di crollo; c) una

idrodinamica di falda corrispondente a vie preferenziali di drenaggio.

Infine è necessario puntare il dito contro un ulteriore problema di non minore importanza dal momento che, se la ricerca è rivolta al perfezionamento dei mezzi di calcolo, spesso sono i valori finali ad inficiare i risultati, dal momento che fondi insufficienti possono vanificare qualunque sforzo tendente al miglioramento della qualità della vita.

## BIBLIOGRAFIA

- Chen W.F., Baladi G.Y., 1985. *Soil Plasticity: Theory and Implementation*. Elsevier New York, 113-155
- Di Francesco R., Scalella G., 2003. *Geositi in aree a rischio idrogeologico: il caso di Faieto nel Comune di Cortino*. Convegno Nazionale "La geologia ambientale, strategie per il nuovo millennio - SIGEA, Genova.
- Doležalová M., Hladík I., Zemanová V., Danko J., 2001. *Problem solving by interactive use of numerical models and field measurements*. Proceedings X International Conferenze on computer methods and advances geomechanics, Tucson 2001 - Vol. 1, 39-48
- Tambara F., 1998. *Stabilizzazione di pendii*. HEVELIUS EDIZIONI srl, Benevento.
- ZACE (2006). *Z\_SOIL.PC Theoretical Manual*. Elmeppress International, Zace Services Ltd, Lousanne.

## ABSTRACT

### FAIETO LANDSLIDE: FROM GEOTECHNICAL MODEL TO DATA CONTROL IN PROGRESS

Keywords: landslide, forecast, monitoring, retrospective analysis

If the Faieto locality is famous since old times, as demonstrated by the presence of archaeological find of roman make, the landslide that characterizes it is surely posterior to such age, since this landslide has cut an ancient road that connected Teramo with the hinterland's places. In the 2001, geological and geotechnical studies have been executed, with the drawing up of a consolidation plan, aimed to the definition of a numerical model able to forecast the landslide behaviour. The inclinometric and topographical monitoring, that begun in such period and extended until 2005, has demonstrated at the same time two essential aspects: a) some limits of the numerical model; b) the necessity to revise again the starting's plan. The problem is focused the difficulty of moulding the involved lands, characterized of accumulates of landslide sliding on structurally complex plastic clay aged beyond 5 million years, and with pronounced soft behaviour. The final results have not been satisfactory, because the formulation of a initially convergent and subsequently forecasting numerical model has only at all answered to some of the tasted problems.