

## Monitoraggio e modellazione numerica di un versante in cui ha sede una discarica di RSU

Andrea Segalini<sup>1</sup>, Alessandro Campanini<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dott. Ing. - Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente e Territorio ed Architettura - Università di Parma. Parco Area delle scienze 181/a – Campus- 43100 Parma. Fax: 0521.905924 e-mail: andrea.segalini@unipr.it (Autore corrispondente)

<sup>2</sup>Ing. Neolaureato - Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente e Territorio ed Architettura - Università di Parma. e-mail: alessandro\_campanini@libero.it

### *Monitoring and Modelling of a Slope Side where a Waste Disposal Site is sited*

**ABSTRACT:** Most of the Parma Appenines mountainsides are subjected to slow landslide movements due to the relatively young age of these mountains and to their geological structure. The slope that seats the Tiedoli waste disposal site, located nearby the town of Borgo Val di Taro (PR), is a classical example of such movements. This slope is characterized by displacements of few centimetres per year and, from the mechanical point of view, can be considered as a “creep” movement (i.e. slow deformation under constant load). By means of borehole drilling, piezometric, inclinometric and topographical monitoring, the slope has been studied and the phenomena has been described. Furthermore, the degree of stability and the stress-strain behaviour of the slope has been accessed through numerical modelling. In particular it has been possible to quantify and qualify the surface movements (around 7 cm per year), determine the variation of the minimal safety factor in various piezometric conditions and, most importantly, demonstrate that the waste disposal site did not affected the global geomorphological structure of the slope at which can be ascribed the landslide activity. From the inclinometric monitoring and from the numerical modelling results, can be found that the deep displacements are occurring at the geological contact surface between the outcropping debris and the clayey substratum, showing a dependence of the landslide from the hydrogeological conditions.

*Key terms:* Numerical modelling, slow slope movements, creep, geotechnical monitoring.

*Termini chiave:* Monitoraggio, movimenti lenti, modelli numerici.

### **Riassunto**

Gran parte dei versanti dell'Appennino Parmense sono soggetti a movimenti molto lenti a causa, in particolare, della relativa giovane età delle montagne e delle loro strutture geologiche. Il pendio che ospita la discarica di RSU di Tiedoli, nei pressi di Borgo Val di Taro (PR), è un esempio di questi dissesti; è caratterizzato da spostamenti nell'ordine di qualche centimetro all'anno e dal punto di vista meccanico può considerarsi una deformazione lenta, caratterizzata da spostamenti evidenti sulle superfici di scivolamento e meno evidenti ma presenti all'interno del corpo di frana a carico costante. Mediante i sondaggi geognostici, i monitoraggi di tipo piezometrico, inclinometrico, topografico e tomografico, si è interpretato il dissesto e si sono valutate la stabilità e lo stato tenso-deformativo del versante. In particolare è stato possibile quantificare e qualificare gli spostamenti superficiali, determinare l'andamento del fattore di sicurezza minimo in diverse condizioni e, soprattutto, dimostrare, mediante la modellazione numerica, che la presenza della discarica non ha inciso sull'assetto globale del versante e che il dissesto è invece dovuto alla particolare geomorfologia dello stesso.

Dal monitoraggio inclinometrico e dalla modellazione si riscontra che gli spostamenti profondi si verificano proprio al contatto tra il detrito superficiale e substrato argilloso, in corrispondenza della falda, manifestando una dipendenza del dissesto dalle condizioni idrogeologiche.

### **Introduzione**

La discarica di Borgo Val di Taro è una discarica controllata di prima categoria, ossia destinata ai rifiuti solidi urbani, rifiuti speciali assimilati agli urbani, fanghi tossici e nocivi derivanti da insediamenti civili. La discarica è situata sul versante de "I Piani di Tiedoli" ed è composta da sei vasche, delle quali solo l'ultima è al momento in fase d'esercizio (le restanti cinque sono già colme di rifiuti e chiuse); le vasche hanno volumi diversi e sono caratterizzate da una disposizione progressiva da valle verso monte.

La discarica di Tiedoli è localizzata sulla sponda sinistra della valle fluviale del torrente Taro; per la sua collocazione nascosta in una conca valliva l'impatto ambientale non risulta eccessivo. Nella corografia proposta in Fig.1 si evidenzia l'inserimento nel contesto provinciale dell'impianto di discarica e la sua posizione rispetto alle

principali vie di comunicazione.

Nell'area della discarica è attivo un sistema di monitoraggio composto di numerosi strumenti come piezometri ed inclinometri, che permettono una valutazione dello stato attuale del versante oltre a misuratori di portata per il percolato che rendono possibile la valutazione della produzione dello stesso. Nel corso degli anni sono state eseguite numerose campagne topografiche che insieme ai risultati inclinometrici hanno dimostrato come, effettivamente, il versante sia sottoposto a un leggero movimento verso valle, di entità sempre abbastanza modesta; indubbiamente il problema non può essere sottovalutato e proprio in questo senso, nel corso degli anni, sono state realizzate opere idrauliche e di consolidamento: le prime, rappresentate soprattutto da dreni sub-orizzontali, hanno permesso un drenaggio che già nel breve termine ha prodotto un miglioramento generale delle condizioni del versante; le seconde, tra cui i micropali, hanno invece stabilizzato la zona immediatamente a valle del corpo di discarica.

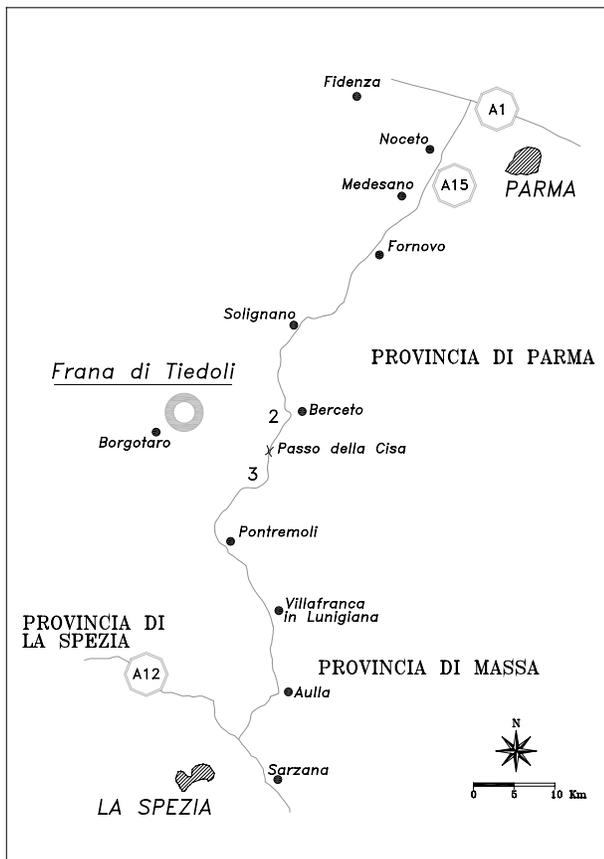


Figura 1: Collocazione della discarica nel territorio parmense.  
*Position of the RSU dump in the Parma territory.*

Una campagna topografica di dettaglio, svolta nel maggio 2005, ha permesso inoltre di determinare un modello digitale del terreno, riportato in Fig. 2.

Oltre a fornire un'utile immagine prospettica dell'area

considerata, il modello digitale è risultato indispensabile per la definizione precisa della sezione, che è stata poi oggetto di analisi di stabilità e di analisi numeriche alle differenze finite. Nell'immagine rappresentata in Fig. 2 si può notare una zona sensibilmente più scura che rappresenta l'area più a monte che è costituita da un ammasso roccioso caratterizzato da una pendenza piuttosto elevata. Questa zona in passato è stata soggetta a fenomeni di caduta massi, che andavano a interferire con i lavori di scavo e di colmata delle vasche di discarica più alte (la quinta e la sesta vasca in particolare); questo problema è stato ovviato con la realizzazione di una serie di interventi attivi e passivi che hanno permesso lo svolgersi in sicurezza dei lavori.

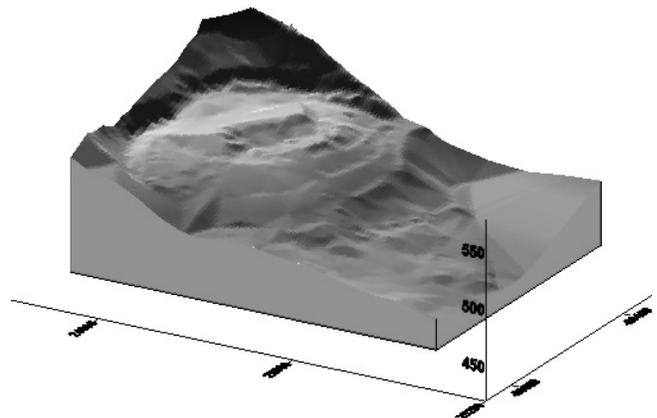


Figura 2: Modello digitale del terreno. Vista da sud-ovest del versante.

*Digital model of the terrain. View of the slope from south east.*

L'ammasso roccioso di monte è caratterizzato dalla presenza di sinclinali, che hanno anche facilitato la venuta a giorno dell'acqua di falda. Nella zona centrale, rappresentata nel modello digitale, sono presenti le vasche di discarica che sono disposte in maniera progressiva da valle verso monte, per un totale di sei vasche, l'ultima delle quali, al momento degli studi, è ancora in fase di colmata. Si possono notare inoltre le strade interne alla discarica: le due più a valle delimitano una zona in cui sono presenti i micropali di consolidamento e tre degli inclinometri attualmente monitorati.

Gli inclinometri hanno potuto confermare un effettivo scivolamento verso valle: l'inclinometro SII, per esempio, che si trova nella zona menzionata proprio nei pressi della strada interna dell'impianto, ha riscontrato un movimento lieve verso valle di circa 10-15 mm in sei mesi. Esaminando i riscontri inclinometrici il dato più interessante è che il movimento si sviluppa nella zona sovrastante il contatto tra il detrito colluviale e il substrato argilloso. Il fenomeno non è isolato: gli spostamenti riscontrati negli altri inclinometri funzionanti sono sempre "localizzati" sopra al contatto tra i due materiali ma hanno entità differenti seppure ovunque limitate. Il contatto tra le argille di San Siro costituenti il substrato ed il detrito colluviale varia in profondità da zona a zona non definendo quindi una superficie di rottura

continua nel versante ma piuttosto un dissesto che assume caratteristiche diverse a seconda della posizione considerata sul versante. A questi spostamenti maggiormente evidenti (seppur limitati in entità) se ne aggiungono altri, di entità molto inferiore e poco percepibile, che possono essere espressione di movimenti lenti di “creep” (deformazione lenta a carico costante) caratteristici dei versanti appenninici emiliani.

### Quadro geologico

Mediante i sondaggi geognostici è stato possibile determinare la configurazione geologica del versante interessato dall’impianto di discarica (Segalini et al., 1999).

Il carattere principale comune dei movimenti franosi lenti presenti nell’Appennino settentrionale dipende dalla storia geologica dello stesso; in particolare, per quel che riguarda l’Appennino emiliano il fenomeno più importante è infatti quello del sovrascorrimento che ha portato alla sovrapposizione di formazioni rocciose provenienti dal Tirreno, prevalentemente costituite torbiditi, sulle precedenti formazioni alloctone costituite per lo più da

complessi argillosi più o meno caotici.

Alla base delle unità formazionali sovrascorse per effetto degli “stress” tettonici si sono ingenerate breccie tettoniche di spessore talora rilevante (decine di metri). L’aspetto caotico di queste breccie ne determina un diverso comportamento idrogeologico (variazioni puntuali di permeabilità) e geomeccanico (variazione del grado di fratturazione del mezzo) che fanno dell’unità litologica un elemento di criticità per le condizioni di stabilità del versante.

Successivi movimenti per crollo e scivolamento, provenienti dalle pareti delle formazioni rocciose sovrastanti, hanno creato potenti coltri detritiche colluviali (fino a qualche decina di metri nei casi in esame) che, a causa della presenza di materiali fini, determinano caratteristiche meccaniche scadenti. A peggiorare le condizioni di stabilità di questo detrito si aggiunge la presenza di acque di falda che, alimentate dalle rocce serbatoio arenacee o calcaree, filtrano nelle formazioni tettonizzate e determinano pressioni interstiziali nel materiale fine costituente il detrito.

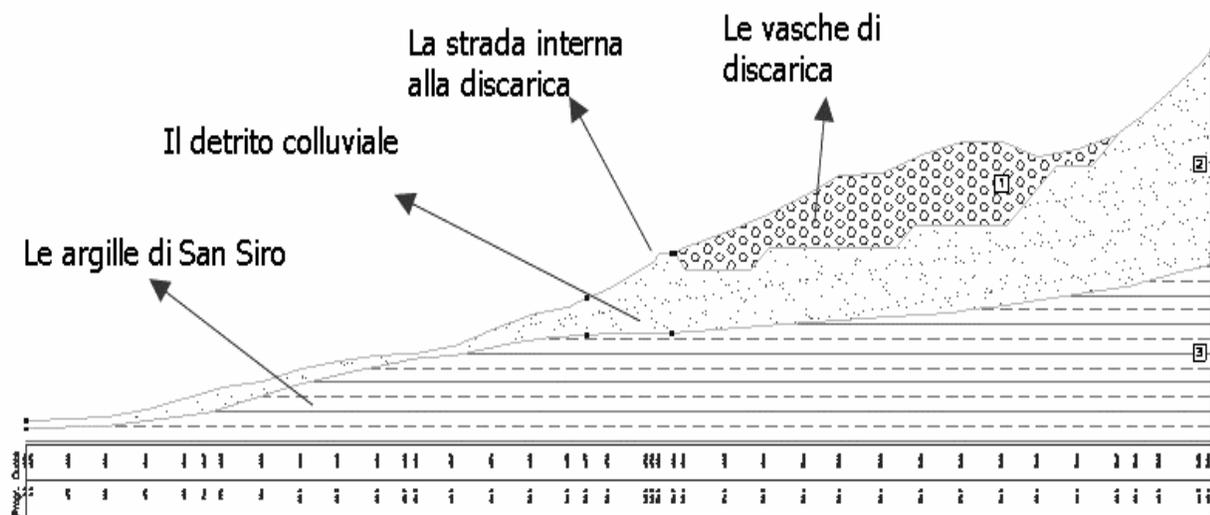


Figura 3: Sezione di riferimento per le analisi di stabilità e le analisi tenso-deformative.  
*Referral section for stability and stress-strain analysis.*

I materiali che caratterizzano in maniera rappresentativa il versante in esame sono le Argille di San Siro e il detrito colluviale (Fig. 3) a questi vanno aggiunti i rifiuti solidi urbani che riempiono le vasche della discarica. Nella parte più a monte sono presenti le Arenarie di Ranzano in varie facies, tra le quali è anche presente un olistostroma caotico.

#### **Argille di S. Siro**

Sulla base dei rilevamenti e dei dati dei sondaggi trivellati che sono stati effettuati nell’area della discarica alla base

della litofacies caotica delle Arenarie di Ranzano è stata rilevata l’unità delle Argille di S. Siro. Trattasi di un complesso costituito da argille prevalenti grigio-scure, talora rosso vinate, con intercalati lembi di strati di micriti silicizzate e di arenarie fini varieguate, profondamente alterate.

Sotto l’aspetto idrogeologico si tratta di un’unità a comportamento semiimpermeabile così da configurare il letto delle falde che hanno sede nelle sovrastanti Arenarie di Ranzano sia nella loro configurazione caotica di breccia

tettonica che in quella caratterizzata da giacitura primaria ordinata.

#### ***Arenarie di Ranzano (in giacitura primaria)***

La formazione delle Arenarie di Ranzano si inquadra nella successione epiligure di Ranzano-Bismantova (Eocene sup-Tortoniano) che qui ha originato l'importante struttura del M. Barigazzo di cui il sito in esame occupa il versante orientale.

Sono costituite da arenarie torbiditiche a grana da fine a media, di colore prevalentemente grigio, in strati regolari e netti da centimetrici a pluridecimetrici, alternati a peliti siltose grigie scure. Intercalati nella serie si rinvengono strati arenacei, talora conglomeratici, di spessore metrico caratterizzate da un colore grigio verdastro per effetto dei minerali.

L'unità affiora con continuità sul coronamento di monte della conca sovrastante la discarica di Tiedoli e la VI vasca.

La giacitura degli strati della parete arenacea esposta risulta a reggipoggio, configurando condizioni favorevoli ai fini della stabilità in grande del versante.

Va tuttavia precisato che la regolarità giaciturale risulta a luoghi interrotta da piccole faglie a rigetto metrico in corrispondenza delle quali si sono prodotte leggere incisioni per effetto dell'erosione selettiva.

Sotto l'aspetto idrogeologico il complesso delle Arenarie di Ranzano configura una permeabilità secondaria variabile, più accentuata negli strati più potenti allorché fessurati.

#### ***Detriti di falda***

Si tratta di depositi eluvio-colluviali originati dal disfacimento della roccia in posto e mobilizzati ad opera delle acque di ruscellamento diffuso e concentrato. Litologicamente sono caratterizzati da pezzame lapideo ad elementi arenacei in matrice limoso-sabbiosa.

Tali coperture, rilevate nelle incisioni della parete a monte obliterano la roccia in posto sottostante. In realtà si tratta di accumuli di spessore ridotto e realmente limitati, caratterizzati da permeabilità variabile in ragione della minore o maggiore percentuale di matrice fine.

#### **Analisi di laboratorio**

Nella zona della paratia di micropali sono presenti al momento tre inclinometri attivi che sono in grado di fornire i dati sugli spostamenti lenti che avvengono nel detrito. I provini dei sondaggi in questa zona a diversa profondità sono stati classificati mediante le prove granulometriche ed i limiti di Atterberg.

Dai risultati ottenuti dalle analisi di laboratorio è apparso evidente come il materiale abbia una granulometria particolarmente eterogenea, con una percentuale di fine variabile dal 3% al 33%; attraverso le prove di laboratorio si è inoltre riscontrato che se il campione viene messo in acqua per lungo tempo tende a sfaldarsi con un conseguente aumento sensibile della percentuale di materiale fine.

Dal punto di vista meccanico è lecito supporre che, pur

non disponendo al momento di analisi di laboratorio che confermino tali assunzioni, la permanenza della falda in corrispondenza del contatto tra le argille ed il detrito provochi un deterioramento delle caratteristiche meccaniche della frazione fine. Tale situazione favorisce il lento scorrimento verso valle della porzione detritica superficiale al contatto con il sottostante substrato delle argille di San Siro.

#### **Spostamenti superficiali**

Con l'ausilio dei dati di origine topografica è stato possibile qualificare e quantificare i vettori velocità di spostamento, confrontandoli con quelli di altre mensilità. A tal fine è necessario monitorare una serie di punti fissi determinandone le coordinate catastali; le differenze che si ricavano sul piano bidimensionale vengono divise per l'intervallo temporale tra una misura e la successiva ottenendo in questo modo dei vettori velocità che possono essere espressi, ad esempio, in mm/giorno.

L'esperienza ha mostrato come effettivamente gli spostamenti superficiali siano di entità limitata e localmente variabili in direzione; questi spostamenti sono l'effetto di una deformazione più profonda che può considerarsi un "creep" cioè una deformazione lenta a carico costante. Va da sé che la direzione dello scivolamento non può che essere verso valle ma, dai risultati ottenuti dal monitoraggio topografico, si può notare come essa, a breve termine, non sia sempre così ben definita manifestandosi talora in modo piuttosto irregolare.

#### **Analisi di stabilità**

Per valutare l'effettiva sicurezza del versante e dell'impianto di discarica sono state effettuate, nel corso degli anni, numerose verifiche di stabilità. Queste analisi sono svolte in campo bidimensionale, impiegando il metodo di Sarma, scegliendo una o più sezioni critiche del versante.

Nello studio si sono considerati i due litotipi che caratterizzano maggiormente il versante: le Argille di San Siro e il detrito colluviale. Le argille, come si può notare in Fig. 3, rappresentano il substrato argilloso e hanno caratteristiche granulometriche e di permeabilità tali da configurare, in prossimità del contatto con il detrito colluviale, un limite di permeabilità che origina una falda freatica. Il detrito colluviale ha invece una granulometria piuttosto variabile e uno spessore che varia da 1-2 metri nella zona più a valle a circa 50-60 metri nella zona più a monte. La sezione di riferimento è riportata in Fig. 3.

Nella analisi di stabilità sono state considerate anche le vasche di discarica, che nella sezione studiata sono, in ordine da valle verso monte, la terza, la quarta, la quinta, la sesta. L'ultima vasca, al momento delle ultime analisi (maggio 2005), era ancora in fase di esercizio, cioè di colmata; per questo, nella sezione riportata, si nota un andamento piuttosto irregolare della zona più alta del versante.

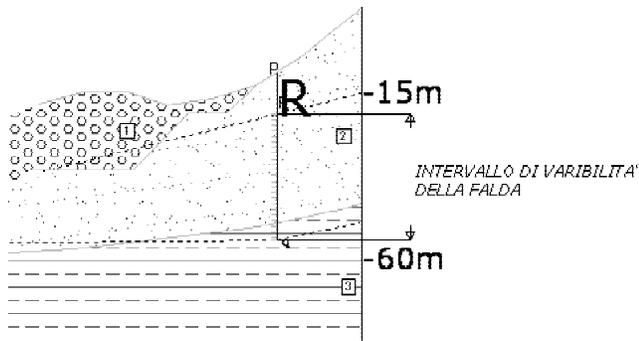


Figura 4: Intervallo di variabilità della falda considerata come rettilinea.

*Variation of the water table considered as linear.*

Le analisi di stabilità sono state effettuate utilizzando il metodo dell'equilibrio limite e si è considerata la superficie di scivolamento circolare passante per un punto; quest'analisi richiede, oltre all'ascissa e all'ordinata del punto, la posizione, la grandezza e l'inclinazione della maglia che raggruppa i centri delle superfici di scivolamento elaborate. Il punto di passaggio risulta fondamentale per un esame che rappresenti realisticamente il problema d'instabilità e, nel caso in esame, si è considerato un punto tale che il cerchio della superficie di scivolamento risulti tangente al piano delle argille di San Siro in corrispondenza della posizione degli inclinometri; la conseguenza di questa scelta è che il contributo all'instabilità è dato per intero dal detrito colluviale, che si trova sopra alle argille, e dal rifiuto solido urbano presente nelle vasche, con una conseguente sensibile riduzione del fattore di sicurezza rispetto al caso in cui il cerchio di scivolamento passi attraverso le argille sottostanti.

Tabella 1: Valori assegnati alle caratteristiche meccaniche dei materiali considerati nelle analisi.

*Values assigned to the mechanical characteristics of the materials for the analyses.*

	$\phi$ (°)	c (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
Detrito colluviale	18	0	19,6
Rifiuto Solido Urbano	24	10	9,8
Argille di San Siro	25	50	17,64

I materiali considerati nelle analisi di stabilità e nel modello numerico, come già accennato, sono sostanzialmente tre: il detrito colluviale, le Argille di San Siro e i RSU (rifiuti solidi urbani). Le caratteristiche geomeccaniche utilizzate nelle analisi sono riassunte in Tab. 1. In questo studio restano da definire le caratteristiche della falda che verosimilmente assume un ruolo fondamentale nel contesto della stabilità e dello stato tenso-deformativo. Di fatto l'andamento della falda non può essere determinato con assoluta certezza, perché dipendente da fattori quali la

tenuta idraulica del telo di sottofondo delle vasche, del quale non è stato possibile definire l'effettiva integrità. A questo proposito lo studio si è incentrato su di un'analisi parametrica del livello della falda, mirata a descrivere l'andamento del fattore di sicurezza in relazione alle variazioni della falda e ad individuare le situazioni più sfavorevoli. Sono state effettuate numerose analisi utilizzando la medesima superficie di scivolamento ma considerando tipi e profondità di falda differenti.

La prima falda studiata è di tipo "rettilinea" e si trova, procedendo da sinistra verso destra cioè da valle verso monte, localizzata ad un metro sopra alle argille, diminuendo progressivamente in profondità sino ad arrivare ai -15 metri dal piano campagna in prossimità della strada interna; da qui sino al punto noto (R) più a monte (15 metri di profondità dal piano campagna) si presenta rettilinea ed interseca le vasche di scarica. Sono state svolte diverse analisi di stabilità al variare di questa falda: da R ci si abbassa di 2 metri in 2 metri, in modo da ottenere una serie di analisi con falde aventi l'inclinazione del pelo libero diversa e che quindi portano diversi contributi alla stabilità del versante (Fig. 4). Fisicamente quest'ipotesi rappresenta una condizione di mancanza di tenuta idraulica del telo di fondo delle vasche e, quindi, di equilibrio idrogeologico tra la falda acquifera ed il percolato.

Le altre due tipologie di falda sono descritte a seguire:

*Falda adiacente alle vasche (tipo 1):* si presenta, per il primo tratto, identica alla falda sopra descritta per poi seguire il profilo delle vasche; nel momento in cui la falda raggiunge la profondità nota in R (-15 metri) si mantiene orizzontale fino alla fine della sezione considerata: anche in questo caso le profondità del punto finale verso monte sono state gradatamente aumentate (Fig 5). Fisicamente questa situazione rappresenta una condizione di perfetta tenuta idraulica del telo di fondo delle vasche di scarica.

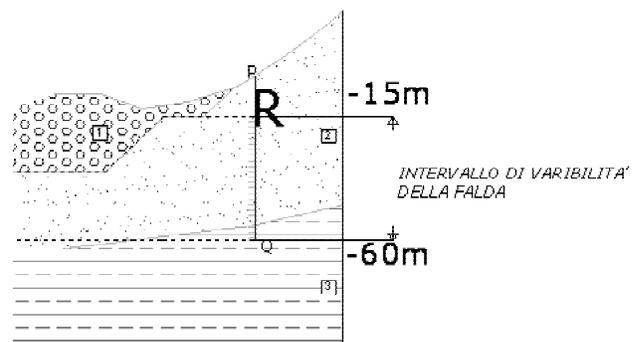


Figura 5: Intervallo di variabilità della falda adiacente alle vasche (tipo 1).

*Variation of the water table adjacent to the RSU tank (type 1).*

*Falda adiacente alle vasche (tipo2, percolato):* per il primo tratto rispecchia l'andamento della falda di tipo 1, cioè procedendo verso monte la falda di tipo 2 segue rigorosamente il profilo inferiore delle vasche; in questo

caso però si è progressivamente incrementato il livello di falda (aumenti crescenti di 1 metro sino ad arrivare a + 4 metri) all'interno delle vasche, in modo da valutare la presenza ed il contributo del percolato. Va sottolineato che, essendo la sesta vasca in completamento, sarebbe scorretto attribuire al percolato un livello pari al valore massimo di 4 metri e, conseguentemente si è scelto di definire un valore di picco di + 2 metri rispetto alla quota di fondo vasca (Fig. 6).

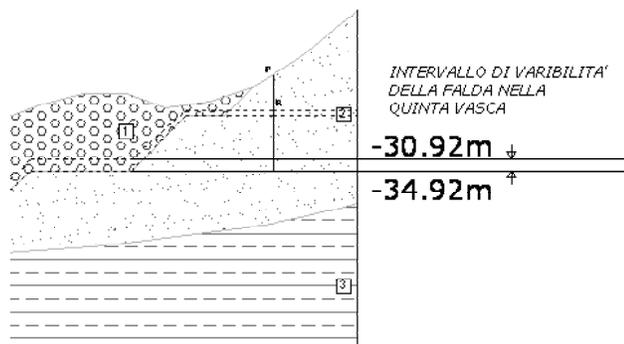


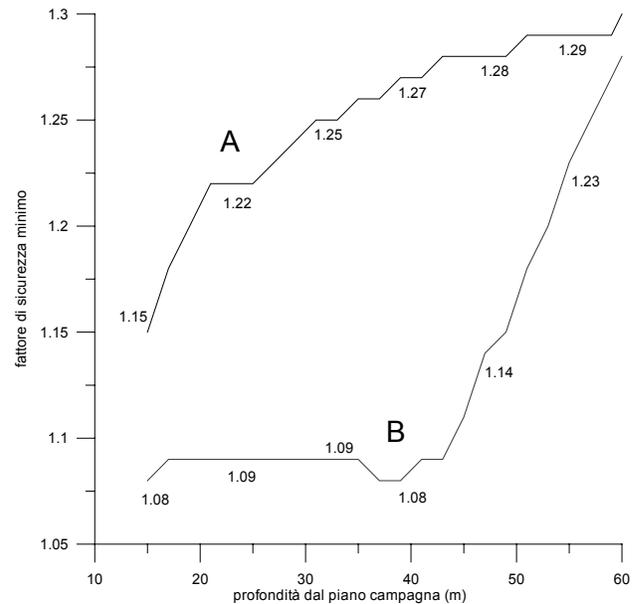
Figura 6: Intervallo di variabilità della falda adiacente alle vasche (tipo 2) con contributo del percolato.

*Interval of variability of the water table adjacent to the RSU tank (type 2) with contribution of the liquid waste.*

I risultati ottenuti sono rappresentati in alcuni grafici che dimostrano come i fattori di sicurezza minimi siano nella maggior parte dei casi inferiori a 1,3 (Fig. 7).

Si può facilmente notare dal grafico come il fattore di sicurezza minimo sia decisamente inferiore nel caso di falda adiacente alle vasche. Mediante l'analisi parametrica, variando il tipo di falda e la sua profondità, è emerso che la situazione più sfavorevole si presenta con una falda che segue l'andamento delle vasche di discarica: la situazione si aggrava nel caso in cui si consideri anche il contributo del percolato. Questo significa che, dal punto di vista meccanico, la situazione peggiore si presenta con la tenuta idraulica delle vasche quando queste siano piene di percolato e non nel caso di una situazione di equilibrio idrogeologico del versante (falda rettilinea, mancanza di tenuta idraulica del telo di fondo). Va chiarito che tutte queste valutazioni non considerano, dal punto di vista meccanico, la possibilità di una fuoriuscita di percolato dalle vasche di discarica; questa condizione implicherebbe infatti il deterioramento delle caratteristiche meccaniche della frazione fine del detrito, con una conseguente alterazione dell'assetto globale del versante. È importante sottolineare come nel caso di falda rettilinea caratterizzata da una profondità a monte di 60 metri dal piano di campagna, il fattore di sicurezza sia pari ad 1,3 (versante stabile nel rispetto della normativa). Questa circostanza è quella attualmente prevedibile dal momento che nella zona di monte della discarica sono stati realizzati dei pozzi drenanti con lo scopo di abbassare la falda a questo livello e

ridurre conseguentemente le pressioni interstiziali nel versante.



**A**=fattore di sicurezza minimo con falda di tipo rettilinea

**B**=fattore di sicurezza minimo con falda adiacente alle vasche

Figura 7: Grafico dell'andamento del fattore di sicurezza minimo al variare della profondità della falda nel caso di falda rettilinea adiacente alle vasche.

*Diagram of the variation of the minimal safety factor with the depth of the water table when it is considered as linear and adjacent to the RSU tank.*

Si è effettuato anche un breve studio per quanto concerne la stabilità locale. In particolare è stata esaminata la zona nei pressi della strada interna alla discarica; ovviamente le caratteristiche dei materiali sono le medesime utilizzate nello studio di stabilità globale, mentre cambiano il punto di passaggio e le caratteristiche della superficie di scivolamento. La falda considerata è quella rettilinea cioè quella che potenzialmente interseca le vasche di discarica (caso di non tenuta idraulica delle vasche). Dallo studio è emerso come in questa zona possa essere considerevole il rischio di instabilità arrivando a fattori di sicurezza inferiori a uno (valore minimo 0.77). Anche nell'analisi numerica successiva è risultato evidente come questa zona sia caratterizzata da deformazioni eccessive. Nella realtà proprio questa instabilità localizzata ha spinto i tecnici a decidere di realizzare delle opere di consolidamento: a valle della strada interna infatti è presente una paratia di micropali che, insieme ad interventi di drenaggio superficiale e profondo del terreno, risulta essere sufficiente a garantire la stabilità locale; inoltre, nel corso degli anni, anche i mezzi di trasporto del materiale all'interno dell'impianto hanno contribuito al consolidamento del

terreno in quella zona. Allo stato attuale quest'area non rappresenta un problema rilevante, in quanto soggetta a inevitabili cedimenti di entità molto bassa. Nello studio non sono state considerate la presenza delle opere di consolidamento in quanto la stabilità locale è di poca importanza nei confronti della situazione globale del versante.

### Analisi tenso-deformativa

Sempre partendo dalla medesima sezione si è voluta dare un'interpretazione dal punto di vista deformativo al movimento del versante attraverso una modellazione alle differenze finite impiegando il programma di calcolo Flac.

Il modello è stato realizzato impiegando per i vari materiali il modello costitutivo Mohr-Coulomb, in quanto l'interesse era legato alla verifica della variazione delle aree di plasticizzazione in relazione alle operazioni di costruzione e coltivazione della discarica. Lo studio è stato di conseguenza condotto per fasi successive: la simulazione delle fasi di scavo e colmata delle vasche di discarica è preceduta da una fase di consolidamento iniziale che definisce il versante nel suo stato naturale originario. In questo modo è stato possibile capire se e come la presenza della discarica abbia influito e tutt'ora influisca sulla stabilità del versante di Tiedoli.

Dalle analisi è emerso che, nelle diverse fasi di modellazione tese a simulare la sequenza delle condizioni di carico e scarico effettivamente avvenute sul versante, la soglia di plasticizzazione si mantiene all'incirca costante sin dalle condizioni iniziali e si colloca, con un andamento ad arco, nella zona più a monte appena sopra il contatto tra argille di San Siro e detrito colluviale (in Fig. 8 è possibile notare la plasticizzazione, caratterizzata da una fascia in grigio chiaro).



Figura 8: Zone di plasticizzazione del versante durante una delle fasi analizzate; la fascia di plasticizzazione è rappresentata con un grigio più chiaro.

*Plasticity zones developing in the slope during one of the analyzed phases; the plasticity band is represented with light gray colour.*

La costante presenza della soglia di plasticizzazione indica che la presenza della discarica e l'effettuazione delle operazioni ad essa connesse, non ha inciso in maniera determinante sull'equilibrio del versante; il fenomeno di lento scivolamento verso valle della porzione superficiale

dello stesso risulta legato alla particolare conformazione del sottosuolo e alla presenza costante della falda che, come osservato anche in laboratorio, contribuisce al deterioramento delle caratteristiche meccaniche della frazione fine, favorendo una plasticizzazione che, a sua volta, induce il formarsi di una possibile superficie di scivolamento e deformazione proprio al contatto con il substrato.

Infine, per verificare la validità del modello numerico, si sono determinati gli spostamenti che avvengono alle diverse profondità; in particolare si sono prese in considerazione due verticali, corrispondenti al posizionamento degli inclinometri nei pressi della strada interna in modo da procedere al confronto tra le misure inclinometriche ed i risultati della modellazione numerica.

Facendo riferimento agli spostamenti sulla prima verticale, cioè nei pressi dell'inclinometro SI3, si può notare come vi sia un gradino molto marcato tra i -10 m e i -9 m (Fig. 9, Inclinometro SI3). La variazione degli spostamenti è considerevole (sempre nell'ordine dei mm) ed è localizzata proprio appena sopra il contatto del detrito colluviale con il substrato argilloso: qualitativamente i risultati sono in buon accordo con i dati inclinometrici in nostro possesso.

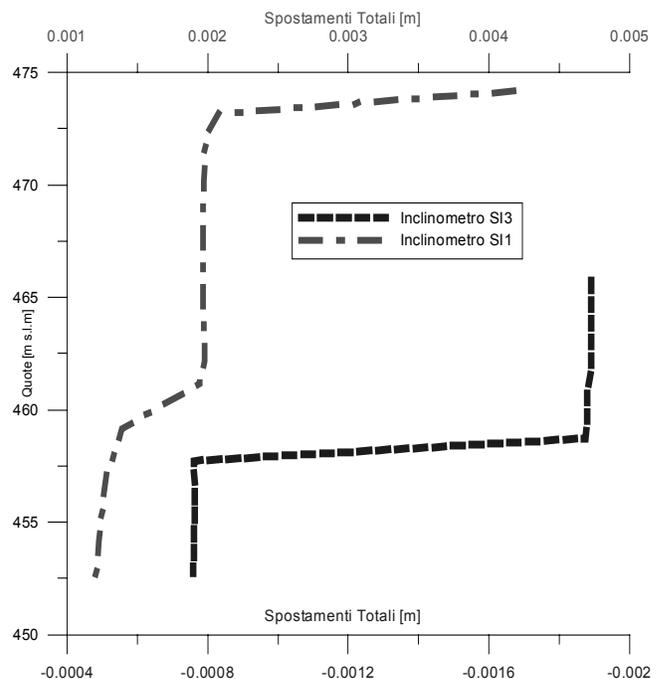


Figura 9: Grafico in cui sono rappresentati gli spostamenti profondi ottenuti dal modello numerico (sulle ascisse) in relazione alla quota (sulle ordinate) lungo le verticali corrispondenti agli inclinometri SI3 ed SI1.

*Diagram in which the deep movements obtained from the numerical model are reported (on the abscissas) in relation to the quota (on the formers) along the vertical correspondents to inclinometers SI3 and SI1.*

Considerando gli spostamenti relativi alla seconda verticale, localizzata nei pressi della strada interna della discarica (Fig. 9, Inclinometro SI1), si può osservare che, anche in questo caso, l'andamento degli spostamenti è caratterizzato da un gradino marcato localizzato tra i 21 ed i 23 metri di profondità con relativo sviluppo fino a quote più basse; anche in questo caso, il gradino di spostamento si trova appena al di sopra del contatto tra il detrito colluviale e le argille di San Siro, manifestando, come nel caso precedente, un'ottima concordanza con i dati inclinometrici.

L'analisi numerica ha quindi dimostrato come la soglia di plasticizzazione presente fin dalla prima fase di consolidazione non si modifica nelle varie fasi di scavo e di colmata: questo riscontro tende quindi ad avvalorare l'ipotesi che la presenza della discarica non abbia sensibilmente modificato l'assetto del versante, ma che piuttosto gli interventi di natura idraulica e di bonifica legati ad essa abbiano migliorato la situazione complessiva dello stesso; si può quindi affermare che il dissesto sia per lo più legato alla particolare geomorfologia del pendio, problematica comune ad altri versanti dell'Appennino parmense.

Dallo studio effettuato risulta chiaro come il versante sia soggetto ad un lento movimento; da parecchi anni il dissesto non ha subito particolari modifiche ed i valori di spostamento ad esso associati hanno mantenuto una pressoché totale costanza. Senza dubbio è necessario tenere costantemente monitorata l'area e definire delle soglie di allarme utili nel caso dovessero evidenziarsi delle situazioni al di fuori della norma.

I parametri assunti nella modellazione ed il confronto finale tra le letture inclinometriche reali e quelle ottenute dal modello hanno confermato la validità delle ipotesi fatte. Occorre però considerare che, nonostante i valori di spostamento totale misurati siano confrontabili con quelli derivati dalla modellazione, il comportamento meccanico evidenziato dalla coltre detritica configura una sovrapposizione di effetti tra fenomeni di scivolamento e fenomeni di colamento. Assegnando, nel modello numerico,

un comportamento alla Mohr-Coulomb alla coltre detritica è stata implicitamente esclusa la possibilità di cogliere gli effetti indotti dal colamento; ulteriori analisi sono al momento in corso nell'ottica di introdurre una dipendenza dal tempo delle deformazioni attraverso l'impiego di modelli numerici di creep.

## Conclusioni

I versanti appenninici settentrionali sono spesso assoggettati a movimenti lenti o molto lenti, superficiali o poco profondi che frequentemente interessano la porzione detritica dei pendii. Tali spostamenti, per la loro natura ed entità sono riscontrabili soltanto nel lungo termine quando sono disponibili monitoraggi prolungati di strutture di interesse pubblico localizzate sulle pendici montuose.

Il presente studio ha descritto il caso di una discarica di RSU posta su di un versante nell'Appennino parmense ed interessata da movimenti gravitativi lenti. L'interesse scientifico di questo caso risiede nelle procedure di analisi di stabilità e di analisi a ritroso riferita ai modelli numerici realizzati. Il lavoro evidenzia come, avendo disponibilità di elementi provenienti dai monitoraggi topografici ed inclinometrici e acquisendo alcuni dati di partenza al riguardo delle caratteristiche meccaniche dei materiali coinvolti, sia possibile formulare un modello numerico che ricostruisca nel dettaglio quanto avvenuto in precedenza sul versante. Un successivo affinamento del modello attraverso un confronto con le grandezze monitorate consente di realizzare un buon accordo tra quanto modellato e quanto avviene nella realtà. A questo punto il modello numerico "tarato" diventa un utile strumento previsionale e può costituire l'elemento di base per l'eventuale progettazione di interventi di consolidamento e/o per la definizione di soglie critiche di allarme da associare a monitoraggi automatici mirati alla tutela della salute e sicurezza pubblica.

## Bibliografia

- Bates, R.L. and Jackson, J.A., eds. 1980 *Glossary of Geology*, 2<sup>nd</sup> ed. American Geological Institute, Fall Church, Va.
- Bromhead, E. N., 1986. *Stabilità dei pendii*, Ed. Dario Flaccovio.
- Ippolito, F., Nicotera, P., Lucini, P., Civita, M., 1993. *Geologia Applicata*, Ed. Utet.
- Lancellotta, R., 1997. *Geotecnica*, Ed. Flaccovio.
- Mitchell, J., 1993. *New perspectives on soil creep*. Journal of Geo. Eng. Proc. ASCE 119(3).
- Segalini A., 2001. *Numerical modeling of time dependant – slow moving – landslides in colluvium*, FLAC and numerical modelling in Geomechanics. Proc. of the II Int. FLAC symposium. Lyon, France. Balkema, NL. ISBN 90 2651 859 5. pp. 171-178.
- Segalini A., Tagliavini S., Giani G.P., 1999. *Indagini e studi per il progetto di consolidamento di un versante su cui insiste una discarica di RSU*. XX Convegno nazionale di Geotecnica. (pp. 481-488). ISBN/ISSN: 88 555 2513 1. Università degli Studi di Parma - Facoltà di Ingegneria.
- Segalini, A., 1998. *Movimenti lenti di versante in formazioni complesse: validazione di modelli numerici previsionali attraverso misure sperimentali*, Tesi di Dottorato, Dottorato di ricerca in Geingegneria Ambientale, Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Torino.