

## ELEONORA MARANI NICOLA PEDRAZZOLI

Titolo della tesi:

### ANALISI DELLE CAUSE DEI MOVIMENTI LENTI E DELLE CONDIZIONI DI STABILITÀ DI UNA CONDOTTA PER ACQUA POSTA SU UN VERSANTE IN ARGILLE PLIOCENICHE.

Relatore:  
Prof. Ing. GIANFRANCO MARCHI

Università di Bologna  
Facoltà di Ingegneria Civile  
Indirizzo Strutture

Voto di Laurea:  
Eleonora Marani: 90/100  
Nicola Pedrazzoli: 85/100  
Data di Laurea: 16/3/2001

Il versante oggetto del presente studio è situato in prossimità del centro abitato di Meldola (FO), e precisamente in una zona denominata "La Forbaiola". Tale versante è compreso in un'area geologicamente instabile, tra l'abitato di Meldola e la località Monte Casale di Bertinoro, ed è attraversato dalla condotta principale per acqua dell'acquedotto gestito dalla Società Romagna Acque.

L'area si sviluppa lungo la valle del Fiume Bidente, dove è ubicata una delle fasce dell'Appennino romagnolo più complicate dal punto di vista strutturale, in un complesso panorama geologico dove si ritrovano in prevalenza affioramenti appartenenti alle formazioni plioceniche; in particolare si distinguono le argille grigio-azzurre del Pliocene Inferiore, la formazione dello Spungone del Pliocene Medio e le argille grigie del Pliocene Superiore.

I versanti costituiti dalle argille plioceniche sono spesso caratterizzati da diffusi fenomeni d'instabilità che interessano la copertura eluvio-colluviale e la parte superficiale del substrato allentata. L'alveo del Fiume Bidente incide in genere la coltre superficiale fino ad intaccare il substrato di argille plioceniche che affiorano sulle sponde, spesso molto ripide.

A partire dal Luglio 1998 hanno avuto inizio campagne di indagini e monitoraggio del versante "La Forbaiola", situato in destra idrografica del Fiume Bidente. Sono stati posizionati 5 inclinometri (FORB1/98÷FORB5/98), 4 piezometri (Pz-FORB1/98÷Pz-FORB4/98) e sono state effettuate prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU).

In corrispondenza dell'inclinometro FORB1, posizionato nel versante a monte del Ristorante Pulcinella (si veda la sezione stratigrafica in figura 1), già dalle prime letture si è evidenziata la presenza di uno scorrimento profondo e molto lento all'interno del substrato argilloso (-13.5 m ÷ -14.5 m da p.c.); questa circostanza ha reso necessaria l'esecuzione, nel novembre 1999, d'alcune indagini integrative, consistenti nell'installazione di 5 ulteriori inclinometri (FORB6/99 ÷ FORB 10/99), 2 piezometri (Pz5/99 e Pz6/99) e l'effettuazione di alcune prove penetrometriche statiche meccaniche (CPT) e dinamiche (DPSH), per l'ampliamento del sistema di monitoraggio. Dall'analisi ed interpretazione delle letture inclinometriche, si ricava che tutto il versante è interessato da un movimento franoso assai lento, che si propaga in

direzione Nord-Ovest, cioè secondo la direzione di massima pendenza del versante, verso il sottostante meandro del fiume Bidente; si rileva una superficie di scorrimento relativamente profonda. Nell'ipotesi che il movimento individuato abbia fatto risentire i suoi effetti a partire dalla data di realizzazione della condotta (1986) e che lo scorrimento sia avvenuto con velocità media pari al valore medio determinato con le misurazioni inclinometriche fino ad ora effettuate, è stimabile uno scorrimento totale pari a:

$$\delta_{\text{tot}} = 18.5 \div 23.3 \text{ [mm/anno]} * 15 \text{ [anni]} = 259 \div 326 \text{ mm.}$$

Sulla base dei dati disponibili, è presumibile che lo scorrimento profondo presente nel versante continui a progredire costantemente nel tempo; occorre quindi proseguire con l'acquisizione periodica dei dati inclinometrici.

Dalle letture piezometriche si può osservare un generale innalzamento della falda nel periodo che va da novembre 1999 a gennaio 2000, che trova riscontro in un'accelerazione degli spostamenti rilevati negli inclinometri.

Sulla base delle indagini disponibili s'individuano le seguenti unità stratigrafiche.

Unità 1A: coltre superficiale

Argilla limoso-sabbiosa da mediamente consistente a consistente, di colore bruno-ocra con striature nerastre, derivante dall'alterazione del substrato sottostante o da accumulo di detrito di frana recente; localmente sono presenti frustoli vegetali e clasti calcarenitici (Spungone) e calcinelli.

Unità 1B: substrato alterato

Argille siltose, nocciola plastiche con zonature azzurre, con presenza di frustoli vegetali e clasti di Spungone, calcinelli e livelli sabbioso limosi ossidati colore marrone. Sono costituite da argille formazionali alterate e decomprese o da accumuli di frane relitte antiche.

Unità 2: paleosuolo

Paleosuolo costituito da argille marrone, plastiche con calcinelli e frustoli vegetali

Unità 3: terrazzo alluvionale

Costituito da ghiaie e sabbie con livelli sabbioso-ghiaiosi e sabbioso-limosi

Unità 4A: substrato argilloso

Costituito da argilla siltoso-limoso del Pliocene Superiore di colore grigio azzurro, finemente laminata, asciutta e molto consistente.

Unità 4B: substrato marnoso

Costituita da marne argillose massive grigie.

E' stato rilevato che le unità stratigrafiche 4A e 4B presentano una giacitura a franapoggio-

traversipoggio, con una pendenza di circa  $10^\circ \div 15^\circ$  sull'orizzontale.

Per l'unità 1B, alla quale si fa riferimento nelle verifiche di stabilità, le prove di laboratorio, effettuate su campioni indisturbati, hanno fornito i seguenti valori dei parametri geotecnici: contenuto medio d'argilla di circa 60%, peso di volume di  $20 \text{ KN/m}^3$ , indice plastico *PI* di circa 41%. Attraverso prove di taglio diretto consolidate e drenate (DSCD), i valori di *PI* (Lupini 1981), i valori del contenuto in argilla *clay fraction CF* (Skempton A.W., 1964), sono stati determinati i parametri di resistenza al taglio residui,  $\phi'_r = 8^\circ \div 15^\circ$  e  $c'_r \approx 0$ . Si fa riferimento ai valori residui, in quanto sono quelli utilizzati nelle verifiche di stabilità: infatti, si è in presenza di grandi deformazioni (>0.1m) e di terreni che hanno già subito rimaneggiamenti e alterazioni, a causa di movimenti franosi passati.

Alla luce delle indagini, dei sopralluoghi e degli studi condotti si può affermare che: la causa principale dei movimenti lenti è da attribuire all'attività erosiva esercitata dal Fiume Bidente in corrispondenza del meandro, il quale incide la coltre superficiale di detrito e argilla allentata, fino a fare affiorare il substrato argilloso, caratterizzato da una giacitura non favorevole alla stabilità.

Le pendenze al piede sono più accentuate ( $15^\circ$  circa) ed il versante di monte, con pendenza media di  $9.5^\circ$  risente di fenomeni di detensionamento e di richiamo. La zona è in estensione e lo scarico tensionale si propaga verso monte. Questa circostanza è confermata dal fatto che le velocità d'evoluzione delle deformazioni sono maggiori per gli inclinometri a valle ( $v_{\text{media}} \sim 59.0 \text{ mm/anno}$ ), che non per quelli a monte ( $v_{\text{media}} \sim 18.5 \div 23.3 \text{ mm/anno}$ );

Mentre in altri siti limitrofi le superfici di scorrimento non sono pensili o hanno una configurazione planimetrica favorevole alla stabilità, nel caso in esame il movimento oltre ad essere pensile, ha una configurazione planimetrica che si allarga verso il Fiume Bidente, quindi sfavorevole alla stabilità.

Come accennato, la scelta dei valori residui è determinata dalla presenza di terreni argillosi, che hanno già subito alterazioni e detensionamenti a causa di frane antiche, e dall'entità delle deformazioni che sono state registrate sulla superficie di scorrimento. Essendo la coesione residua praticamente nulla, l'unico parametro è l'angolo d'attrito interno residuo. Il valore della resistenza al taglio residuo è principalmente associato

allo scorrimento laminare delle particelle argillose, in genere di forma lamellare sottile, che all'aumentare della deformazione si allineano parallelamente alla direzione dello scorrimento. Oltre a considerare il riorientamento delle particelle nella zona di rottura, la caduta di resistenza al taglio dai valori di picco a quelli residui è legata anche al fenomeno della dilatanza, all'aumento del contenuto d'acqua (rammollimento), e alla rottura progressiva dei legami di adesione tra le particelle; essa non dipende dalla storia tensionale delle argille, cioè dal loro grado di consolidazione: argille sovraconsolidate e normalconsolidate raggiungono lo stesso valore residuo.

Le verifiche di stabilità sono state condotte attraverso i metodi dell'equilibrio limite. E' stato utilizzato, infatti, un programma di calcolo, STABL, il quale si basa sui modelli teorici di Bishop semplificato, Janbu semplificato e Spencer. Tali modelli considerano la massa di terreno, sopra la superficie di scorrimento, divisa in porzioni, conci, soggetti ad un sistema di forze equilibrato. Attraverso un procedimento di back-analysis, è stata determinata la resistenza al taglio mobilitata, cioè quella che il terreno oppone sulla superficie di scorrimento per contrastare la forza destabilizzante. Il rapporto tra l'effettiva resistenza disponibile e quella mobilitata dà un indice di stabilità relativo definito *fattore di sicurezza*.

Si è ritenuto di dover studiare il pendio considerando separatamente la parte a valle del Ristorante "Pulcinella" e della Strada Provinciale n°99 Meldola-Fratta Terme e la parte a monte; infatti, come emerge dalle indagini condotte la prima è caratterizzata da una maggiore pendenza e le velocità di spostamento, registrate dagli strumenti, sono molto più elevate. Per la prima parte si ipotizza un cinematisma locale in seguito al fenomeno d'erosione al piede esercitato dal Fiume Bidente, che determina "creep" superficiali e instabilizzazione.

Attraverso un processo di "back analysis"

si sono determinati i valori dei parametri di resistenza al taglio operativi e l'ipotetica superficie di minima resistenza (superficie critica). Questa è stata determinata, ricercando tra potenziali superfici di scorrimento di cui è stata imposta la forma (circolare), e per le quali si è imposto un fattore di sicurezza  $F.S. \approx 1$ , vale a dire al limite dell'equilibrio.

L'angolo d'attrito interno mobilitato dal terreno è  $\phi_T = 18.7^\circ$ , per il quale si ha un  $F.S. = 0.998$ . Avendo ricavato con buona approssimazione l'angolo d'attrito mobilitato dal terreno, si è determinato l'abbassamento, supposto uniforme, della falda, necessario per riportare il valore del fattore di sicurezza nei limiti dettati dalle norme, vale a dire  $F.S. = 1.3$ . Si è così trovato, che un abbattimento medio della falda  $\Delta f = -4.5$  m porta il coefficiente di sicurezza al valore  $F.S. = 1.350$ . In tal modo è garantita teoricamente la stabilità del pendio, per quanto riguarda la zona a valle del ristorante. Per la parte a monte, molto più estesa, è ipotizzabile, che la massa di terreno instabile risenta di fenomeni di richiamo e detensionamento, provocati dal movimento innescato al piede del versante, di cui si è parlato in precedenza. E' possibile ricondurre il cinematisma ad un *movimento retrogressivo multiplo traslazionale*, secondo la dicitura del *Glossario Internazionale delle Frane*; quindi, a seguito dell'instaurarsi di una superficie di rottura circolare nella parte più ripida del versante (a valle del ristorante), si propagano verso monte altre rotture, retrogressive appunto, le quali interagiscono a formare una comune superficie di scorrimento di base, quella individuata dagli inclinometri. Si è considerato, per lo studio di stabilità, che la massa di terreno si muova in maniera uniforme di moto traslazionale sulla superficie citata. L'angolo d'attrito interno mobilitato dal terreno,  $\phi_T = 14.6^\circ$ , trova riscontro nei valori determinati dalle prove di laboratorio. In corrispondenza di questo valore si ha un  $F.S. = 1.034$ , al limite

dell'equilibrio. Abbassando in modo uniforme la falda di  $\Delta f = -4.5$  m è possibile portare il versante in condizioni di sicurezza con un  $F.S. = 1.361$ . Data la notevole estensione e le caratteristiche geomorfologiche della zona a monte è possibile applicare le formule del *pendio illimitato*. Queste confermano i risultati ottenuti con *STABL*.

Si pone dunque il problema di progettare interventi per la stabilizzazione del fenomeno franoso in atto.

Al riguardo si osserva che, in relazione all'estensione planimetrica del versante e alla profondità della superficie di scorrimento individuata, gli interventi per la mitigazione del fenomeno franoso sono assai onerosi, richiedono lunghi tempi d'esecuzione e risultano efficaci a distanze temporali non piccole dal loro completamento.

Indicativamente si è pensato ad un complesso di opere comprendenti: un sistema di briglie lungo il meandro formato dal Fiume Bidente per attenuare i fenomeni erosivi al piede; opere di difesa spondale e opere di presidio superiori costituite da muri in gabbioni stabilizzati alla base da un sistema di pali trivellati di grande diametro, tirantati in sommità per contrastare le spinte del terreno. Quest'opera consente il ricarico e quindi la stabilizzazione della base del versante in movimento. Un sistema di trincee drenanti approfondite fino a  $4 \div 5$  m da piano campagna per il drenaggio delle acque superficiali e la stabilizzazione della coltre superficiale. Un complesso di pozzi drenanti di grande diametro per l'intercettazione e la raccolta delle acque profonde. Un *intervento locale di protezione della condotta*, in grado di aumentare il coefficiente di sicurezza attuale e almeno attenuare i fenomeni deformativi. Per le motivazioni esposte appare meritevole di considerazione l'ipotesi di progetto di un tracciato alternativo, per il tratto di condotta principale tra Meldola e Monte Casale.

Figura 1: sezione stratigrafica del versante

