

# Valutazione empirica dell'efficacia di sistemi drenanti realizzati su 13 frane dell'Appennino emiliano

Giulia Biavati

Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali, Università di Bologna, Via Zamboni 67, 40126 Bologna, E-mail: giulia.biavati@unibo.it

*Empirical evaluations of the effectiveness of drainage systems of 13 landslides in the Emilia Apennines (Italy)*

**ABSTRACT:** Drainage systems are commonly used in mitigating unstable slopes and are generally constructed on the basis of empirical observations. Lacking any significant information on their effects, up to now it has not been possible to obtain rational project schemes. This study shows a series of mitigation measures carried out in Bologna Province Apennines (Italy). 13 cases of drainage systems (trench drains and well drains) implemented on complex landslides (rotational-translational movements evolving into earth flows) in structurally complex clay formations were chosen. The state of activity of these landslides was studied by comparing inclinometer data and direct evidence of movements before and after the application of mitigation measures. In order to evaluate the effectiveness of these measures, landslide evolution history has been considered as a significant parameter. A decrease in velocity was noticed for landslides characterized by a slow and constant rate of movement (mm/month). The effectiveness of drains on pore pressures has been studied considering the pore pressure data collected by means of transducers before and after the insertion of drains on the Castiglione dei Pepoli landslide. The data collected show a decrease in pore pressure in the very near of the drains. In order to confirm the trends observed and assess the drains' distance of influence on pore pressures, a specific monitoring campaign should be carried out for future research.

**Key terms:** Drainage systems, Complex landslides, Inclinometer monitoring, Pore pressure monitoring

**Termini chiave:** Sistemi drenanti, Frane complesse, Monitoraggio inclinometrico, Monitoraggio piezometrico

## Riassunto

I sistemi drenanti, molto diffusi nella sistemazione dei versanti instabili, vengono tipicamente realizzati su base empirica. Non esistono, infatti, a tutt'oggi, solide basi teoriche e osservative che ne permettano una progettazione razionale. Il presente studio propone una rassegna di interventi di sistemazione effettuati nell'Appennino bolognese. Sono stati scelti 13 casi di sistemi drenanti profondi (trincee e pozzi) realizzati su frane complesse (scivolamenti roto-traslativi che evolvono in colata) in terreni argillosi strutturalmente complessi. Sulla base di letture inclinometriche e testimonianze dirette, è stato confrontato lo stato di attività precedente e successivo agli interventi. È emerso come sia necessario inquadrare l'intervento nel contesto evolutivo del movimento franoso. È stato possibile constatare più chiaramente una diminuzione delle velocità di spostamento in prossimità di interventi realizzati su frane caratterizzate da un movimento lento costante (dell'ordine dei mm/mese). Per valutare l'effetto degli interventi sulle pressioni interstiziali, sono state considerate le misure raccolte in continuo da piezometri strumentati messi in opera presso la frana di Castiglione dei Pepoli precedentemente la realizzazione di sistemi drenanti. I dati raccolti testimoniano un

abbassamento delle pressioni interstiziali in un intorno molto prossimo agli interventi realizzati. Il quadro emerso ha permesso di constatare come sarebbe necessario un monitoraggio mirato all'osservazione della distanza di influenza dei dreni sia sulle velocità di movimento (per vedere se esiste realmente la tendenza riscontrata), sia sulle pressioni interstiziali.

## Introduzione

Nonostante i sistemi di drenaggio siano una delle tecniche più frequenti nella stabilizzazione dei pendii in frana, esistono scarse basi teorico-sperimentali che permettano la formulazione di previsioni affidabili riguardo la loro efficacia; nella pratica geologico-tecnica ed idrologica non si sono affermati criteri di progetto universalmente riconosciuti per i quali esista una solida base osservazionale. La realtà progettuale, infatti, si presenta spesso decisamente più complessa (stratigrafia, eterogeneità spaziale dei parametri, note difficoltà connesse alla loro misura, scarsa conoscenza dell'idrologia ed idrogeologia, in particolare dei terreni fini) rispetto ai casi schematici e ideali a cui si riferiscono le soluzioni teoriche esistenti (cfr. Hutchinson, 1977; Burghignoli & Desideri, 1986; Airò Farulla & Valore, 1994).

Questo lavoro presenta lo stato di fatto di alcuni interventi di stabilizzazione eseguiti su versanti instabili dell'Appennino bolognese, cercando di fornire indicazioni empiriche utili per la valutazione dell'efficacia dei sistemi drenanti a scopo previsionale e progettuale. La ricerca si è concentrata sui sistemi drenanti (trincee drenanti, pozzi) che sono particolarmente diffusi nella stabilizzazione delle frane dell'Appennino emiliano. Secondo l'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI, 2004) il 78% delle 132 frane censite della Provincia di Bologna è stato oggetto di interventi di sistemazione; nel 75% dei casi, tali interventi sono di drenaggio. Il presente studio si è concentrato su 13 casi rappresentativi di frane complesse (Cruden & Varnes,

1996) in formazioni strutturalmente complesse a dominante argillosa. Si stima che questo tipo di movimento possa rappresentare circa l'80% di tutti i corpi franosi esistenti nel territorio dell'Appennino emiliano (Bertolini & Pellegrini, 2001). Il criterio di scelta è stato guidato sostanzialmente dalla disponibilità di dati sullo stato di attività (quali testimonianze di movimento e riattivazioni e/o dati inclinometrici) precedente e successiva la realizzazione degli interventi. Per valutare l'effetto degli interventi sulle pressioni interstiziali, sono state considerate le misure raccolte in continuo da piezometri strumentati messi in opera presso la frana di Castiglione dei Pepoli precedentemente la realizzazione di sistemi drenanti.

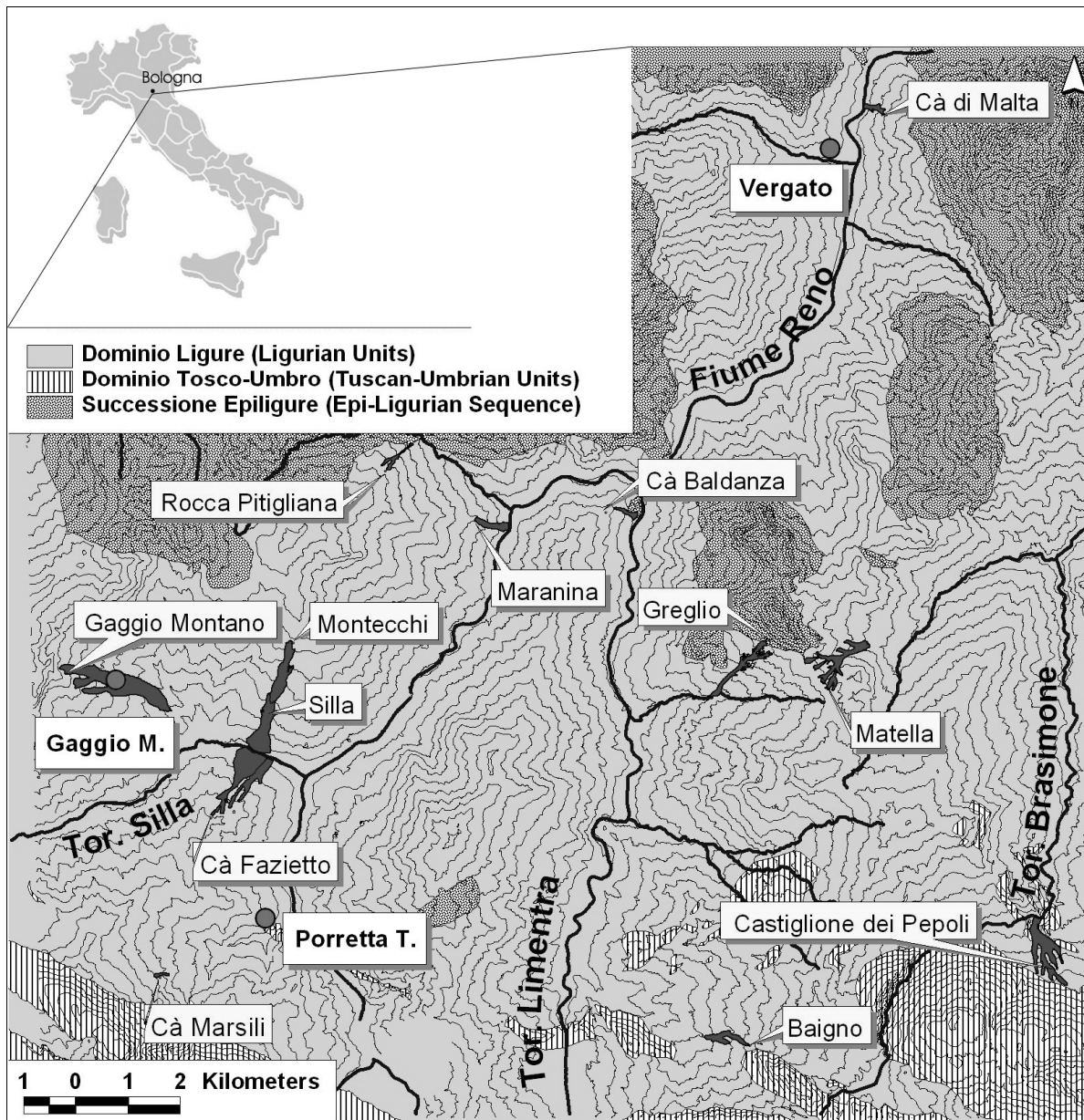


Fig. 1 – Inquadramento geografico e geologico dell'area  
 Fig. 1 - Geographical and geological setting

## Inquadramento geologico e geomorfologico

Nell'area di studio (Fig. 1) affiorano essenzialmente terreni delle Unità Liguri, in particolare quelle Esterne; sono inoltre presenti isolati ma spesso importanti affioramenti appartenenti alla Successione Epiligure, in contatto tettonico o stratigrafico discordante con le unità argillose o flyschoidi sottostanti, e alle Unità Umbro-Toscane (Bettelli & De Nardo, 2001). Le frane oggetto di studio interessano quasi esclusivamente i terreni appartenenti alle Unità Liguri, prevalentemente i terreni argillosi strutturalmente complessi (Cotecchia & Chandler, 2000) della parte basale (APA: Formazione delle Argille a Palombini; AVC: Argilliti Variegate con Calcari; AVT: Argille Variegate di Grizzana Morandi; BAP: Breccie argillitiche poligeniche) e subordinatamente quelli appartenenti alle formazioni flyschoidi della parte sommitale (MOV: Formazione di Montevenere). In alcuni casi, a monte della nicchia di distacco del movimento franoso, affiorano formazioni a litologia competente, come le Arenarie di Bismantova-PAT (frana di Greglio) e le Arenarie del Monte Cervarola-CEV (frana di Castiglione dei Pepoli) (Regione Emilia-Romagna-CNR, 2002).

Le formazioni su cui insistono i movimenti franosi possono essere classificate tra le "rocce deboli" (Bieniawski, 1989) e attribuite a rocce litologicamente e/o strutturalmente complesse (Esu, 1977). La tipologia dei movimenti franosi studiati è per tutti ascrivibile al tipo complesso (Cruden & Varnes, 1996), che associa scivolamenti rotazionali e rototraslativi multipli in nicchia, a colamenti in terra lungo il corpo di frana; i movimenti sono di tipo retrogressivo nella parte alta, in avanzamento nella parte bassa, in allargamento su entrambi i fianchi laterali. E' comunque possibile individuare, per ognuna, una tipologia di movimento predominante (Tab. 1): nel caso in cui predominano i movimenti di colata (C), più facilmente si possono distinguere gli elementi morfologici caratteristici di zona di deplezione (*Depl*), canale (*Chan*), accumulo (*Acc*) (Picarelli et al., 2005); diversamente, se predominano gli scorrimenti (S), la zona di canale non è ben riconoscibile e il corpo di frana presenta un minor rapporto tra lunghezza e larghezza minima. L'estensione areale, riferita alla data di riattivazione citata in Tab. 1, varia da circa 14.000 m<sup>2</sup> (Cà Marsili) a circa 670.000 (Gaggio Montano), con spessori massimi dell'accumulo variabili tra 7 e 30 m.

Tab. 1 - Schema riassuntivo della localizzazione, morfometria e classificazione delle frane studiate (S: scorrimento, C: colata)  
Tab. 1 - Scheme of the location, morphometric features and classification of the studied landslides (S=slide; C=flow)

	BAIGNO	MON TECCHI	MARA NINA	ROCCA PITI GLIANA	CÀ MAR SILI	CÀ DI MALTA	GRE GLIO	CÀ BAL DANZA	SILLA	CÀ FA ZIETTO	MA TELLA	GAGGIO MON TANO	CASTI GLIONE DEI PEPOLI
formazioni geologiche coinvolte*	AVC (BAP)	APA	APA	APA	AVC	APA	APA (PAT)	MOV	APA	MOV	APA (AVT)	APA	AVC (CEV)
tipo di movimento principale	S	S	S	C	C	S	C	S	S	C	C	S	S
comune	Camugnano	Gaggio Montano	Gaggio Montano	Gaggio Montano	Porretta Terme	Grizzana Morandi	Camugnano	Grizzana Morandi	Gaggio Montano	Porretta Terme	Camugnano	Gaggio Montano	Castiglione dei Pepoli
ctr_5.000	252051/064	251041/236162	237133	237134/236161	251084	237101/104	237143/252024	237131/132	251041/236162	251041/042	252024/237143	236163/251044	252061
bacino idrografico	Torrente Limentra	Torrente Silla	Fiume Reno	Torrente Marano	Fiume Reno	Fiume Reno	Torrente Limentra	Torrente Limentra	Torrente Silla	Torrente Silla	Torrente Vezzano	Torrente Silla	Torrente Brasi mone
data ultima riattivazione	1996	ott 1994	feb 1996	1999	nov 2000	feb 2000	nov 2002	1995	1937	1969	1951	1939	1934
quota margine sup. accumulo (m)	650	690	403	625	655	273	730	350	520	540	800	775	728
quota piede (m)	505	490	264	435	563	190	450	290	350	345	690	430	500
dislivello (m)	145	200	139	195	92	83	280	60	170	195	110	345	220
lunghezza massima (m)	457	1260	675	937	292	330	1520	267	1130	1467	1180	2320	1480
pendenza media (°)	18	9	11.6	12.0	17.5	14.1	10.4	12.7	8.6	7.6	5.3	8.5	8.46
larghezza massima (m)	146	228	180	75	75	67	112	91	498	677	280	415	300
massimo spessore accumulo (m)	7	25	20	9	7	7	10	20	30	20	12	25	16
superficie frana (m <sup>2</sup> )	42200	210300	75700	56200	13900	13900	164300	45300	278700	469300	252500	673900	314000
*Carta Strutturale dell'E-R, 2002:	Unità argillose	Unità argillose	Unità argillose	Unità argillose	Unità argillose	Unità argillose	Unità argillose	Unità flyschoidi	Unità argillose	Unità flyschoidi	Unità argillose	Unità argillose	Unità argillose

Tab. 2 - Schema riassuntivo degli interventi effettuati sulle frane studiate.<sup>(1)</sup> *Depl*: zona di deplezione, *Chan*: canale, *Acc*: accumulo, *Ext*: esterno; <sup>2</sup> *L*: longitudinale, *D*: diagonale, *T*: trasversale). In neretto: data dell'intervento considerato nel caso di studio, descritto nella parte bassa della tabella

Tab. 2 - *Scheme of the mitigation systems carried out on the studied landslides (Depl: depletion zone, Chan: channel, Acc: accumulation, Ext: external; <sup>2</sup> L: longitudinal, D: diagonal, T: transversal). In bold: date of the studied mitigation system described in the table*

		categoria A							categoria B					
		BAIGNO	MON TECCHI	MARA NINA	ROCCA PITI GLIANA	CÀ MARSILI	CÀ DI MALTA	GRE GLIO	CÀ BAL DANZA	SILLA	CÀ FA ZIETTO	MA TELLA	GAGGIO MON TANO	CASTI GLIONE DEI PEPOLI
CRONISTORIA INTERVENTI DI SISTEMAZIONE ESEGUITI	rimodellamento del versante			1997	1999-2003	anni '90	1997-2002	2003	2002					
	controllo erosione superficiale	<i>rivestimenti</i>										2002		
		<i>inerbimenti</i>		2004		2003	2002	lug-02	2003			2002		
	stabilizzazione superficiale	<i>vimate</i>						lug-02						
		<i>palizzate</i>			2002	2003		lug-02						
	opere di drenaggio	<i>dreni superficiali</i>	2004	2004	1997	1999	anni '90	lug-02	2003	feb-03			2002	
		<i>dreni suborizzontali</i>		1997								lug-00	2002	
		<i>trincee</i>	2004	1997-2004	1997-2002	2002	2002	lug-02	2003	feb-03			2002	2004
		<i>pozzi</i>		1995- 1997-2003							2001	lug-00	mag-01	1998
	opere di sostegno	<i>muri</i>				2003		lug-02					2002	
		<i>gabbionate</i>	2004		1997		2002	1997-2002					2002	
		<i>pali</i>					2002			feb-03				
		briglie	2004		2002	2003	2002							
	<b>caso di studio</b>													
quota (m)	superiore	690	550	395	615	610	515	715	335	407	445	725	650	650
	inferiore	585	523	375	475	545	510	700	308	387	440	585	590	620
porzione morfologica frana <sup>1</sup>		<i>Depl-Acc</i>	<i>Acc</i>	<i>Depl</i>	<i>Depl-Chan</i>	<i>Depl-Chan</i>	<i>Ext</i>	<i>Depl</i>	<i>Acc</i>	<i>Acc</i>	<i>Chan</i>	<i>Depl-Acc</i>	<i>Acc</i>	<i>Depl</i>
estensione lineare interventi (m)		1800	190	150	960	515	160	150	180	140	367	2100	540	650
rapporto lunghezza intervento/area frana (m <sup>-1</sup> )		0.043	0.001	0.002	0.017	0.037	0.012	0.001	0.004	0.001	0.001	0.008	0.001	0.002
disposizione rispetto al pendio <sup>2</sup>		<i>L-D</i>	<i>T</i>	<i>L</i>	<i>L</i>	<i>D</i>	<i>T</i>	<i>L</i>	<i>L</i>	<i>L</i>	<i>T</i>	<i>L-D</i>	<i>D</i>	<i>L</i>

Tutte le frane studiate rappresentano riattivazioni di fenomeni precedenti e sono inquadrabili in un tipico modello evolutivo in cui è possibile distinguere un alternarsi di fasi a movimento da estremamente lento a molto lento (dell'ordine dei mm/mese) e fasi a movimento parossistico (da lento a moderato, con una velocità al massimo dell'ordine dei m/mese) (Guida & Iaccarino, 1993). Presentando tutte, allo stato attuale, velocità di movimento superiori a 16 mm/anno, sono definibili come frane attive sospese (Cruden & Varnes, 1996).

Tra le cause di riattivazione dei movimenti, oltre a quelle predisponenti intrinseche, connesse al tipo di materiale debole, alterato e fratturato e al contesto tettonico dell'Appennino ancora in sollevamento, ed innescanti (precipitazioni eccezionali prolungate) che accomunano tutti i casi in studio, è possibile individuare altre cause che hanno predisposto alcuni movimenti in particolare, quali l'erosione fluviale alla base (Baigno, Cà Faziello), il contrasto di permeabilità tra le formazioni geologiche affioranti (Greglio, Castiglione dei Pepoli) e il carico sulla cresta del pendio (Cà Baldanza).

### Interventi di sistemazione nell'area di studio

Nella Tab. 2 sono riportati tutti i principali interventi realizzati sulle frane di studio negli ultimi anni. Sono stati distinti i casi in cui gli interventi sono stati realizzati in seguito a una fase parossistica di movimento (almeno entro 10 anni dal suo verificarsi) (categoria A) da quelli in cui l'ultima fase parossistica risale a tempi di accadimento storici (categoria B). Si nota come, a eccezione di Montecchi e Greglio, i casi A presentano estensione inferiore ai 100.000 m<sup>2</sup>, e i casi B presentano tutti estensione superiore (cfr. Tab. 1 con Tab. 2). Nei casi A, vengono tipicamente eseguiti interventi di riprofilatura del versante, per ripristinare l'equilibrio dell'ammasso franato. Il ricorso a interventi di ingegneria naturalistica, ultimamente molto diffuso, si rivela utile per frenare l'erosione e l'infiltrazione superficiale, ma non per sostituire interventi più invasivi mirati direttamente ad aumentare le resistenze o diminuire le forze destabilizzanti del corpo di frana.

Opere di sostegno (gabbioni, muri, paratie, terre armate)

vengono realizzati di solito solo in caso di problematiche puntuali, a ridosso di strade o abitazioni. La diffusione di sistemi drenanti profondi, come è noto, è giustificata da ragioni sia teoriche che empiriche: le condizioni idrauliche sfavorevoli sono considerate le cause più frequenti nell'innescare dei movimenti franosi e rappresentano un parametro fondamentale nel determinare le condizioni di stabilità; allo stesso tempo, il ricorrere ad opere drenanti costituisce spesso l'unica soluzione economicamente praticabile per intervenire su frane molto estese. La scelta tra trincee drenanti, pozzi e dreni orizzontali è dettata, oltre che dalla litologia, dalla profondità alla quale si attesta la potenziale superficie di scivolamento e dalle condizioni di accesso ai luoghi. La selezione dei casi di studio è stata fatta in base alla disponibilità di dati di monitoraggio precedenti e successivi all'intervento e alla posizione degli strumenti di monitoraggio rispetto agli interventi. Bisogna tuttavia considerare che interventi eseguiti precedentemente al periodo di analisi e/o in aree lontane dall'area di studio possono comunque aver influito sull'andamento delle deformazioni per la parte analizzata. Come si può notare dalle quote massime e minime degli interventi (cfr. Tab. 1 con Tab. 2), solo in 3 casi (Baigno, Rocca Pitigliana, Matella) essi interessano l'intera estensione della frana; più spesso sono limitati a porzioni del corpo di frana in cui risultavano maggiori i movimenti e i deflussi idrici. In 6 casi gli interventi considerati sono stati realizzati presso le

zone di deplezione (*Depl*) e di canale (*Chan*) del corpo di frana, in 4 casi sulla zona di accumulo (*Acc*), in 2 casi sia sulla zona di deplezione che su quella di accumulo, in un caso (Cà di Malta) a monte della scarpata di frana (*Ext*). La lunghezza complessiva dei drenaggi varia da 140 m a 2100 m in base all'estensione dell'area di intervento. La loro disposizione, che sia diagonale (*D*) (con i setti drenanti che portano l'acqua all'esterno lungo i fianchi del corpo di frana), o longitudinale (*L*) (con più bracci che convogliano l'acqua in un ramo principale lungo l'asse del corpo di frana) viene scelta per ottimizzare l'intercettazione dell'acqua sfruttando il più possibile la pendenza del versante per allontanarla. Più raramente si sceglie di disporre il drenaggio trasversalmente (*T*) all'asse del corpo franoso, allo scopo di intercettare ed allontanare l'acqua ancor prima che raggiunga il corpo di frana.

### Stato di attività dopo gli interventi

Sui 13 casi considerati solo in quello di Cà di Malta è testimoniata una riattivazione del movimento (gennaio 2003) dopo l'ultimazione degli interventi. I meccanismi di innescare e i cinematismi sono risultati simili al movimento precedente, con sviluppo di piccoli movimenti rotazionali in nicchia che hanno favorito l'instaurarsi di un carico non drenato, provocando un movimento di tipo colata lungo il corpo di frana.

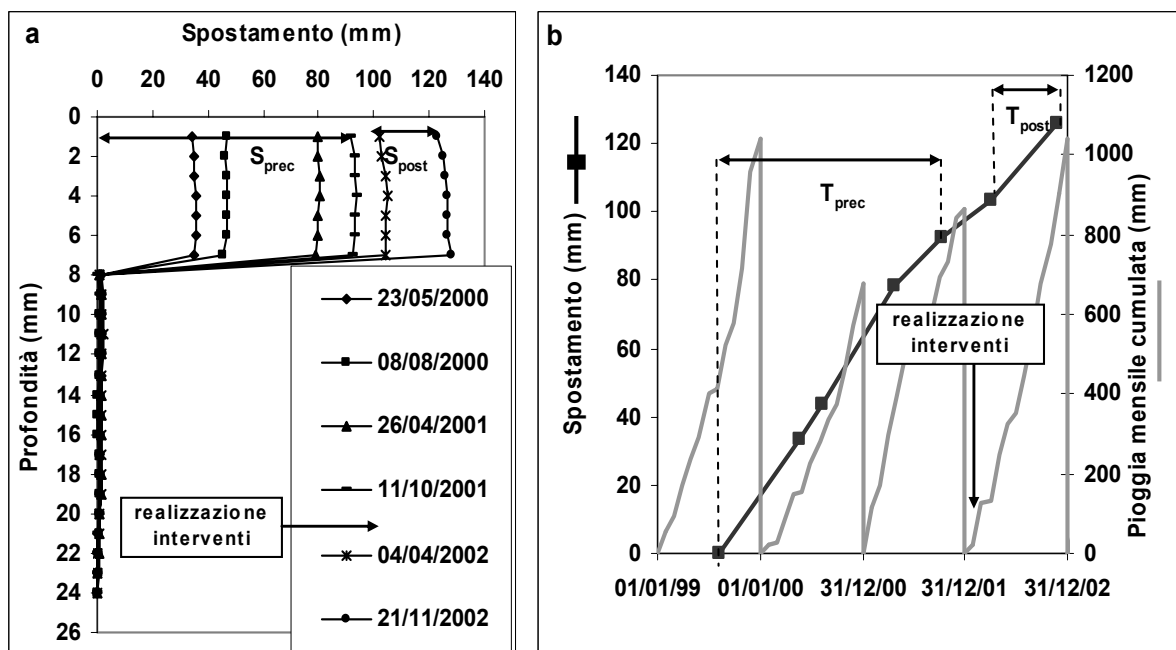


Fig. 2 – Esempio di interpretazione delle letture inclinometriche (I3 - Matella). a) profilo inclinometrico; b) andamento degli spostamenti al piano campagna nel tempo e pioggia mensile cumulata (stazione pluviometrica di Invaso, 485 m s.l.m.). (*S*: spostamento alla superficie, *T*: intervallo di tempo del periodo di monitoraggio; *prec*: precedente alla realizzazione dell'intervento, *post*: successivo alla realizzazione dell'intervento)

Fig. 2 – Example of interpretation of inclinometer monitoring (I3 - Matella). A) inclinometer profile; b) displacement at the ground surface versus time and cumulated rainfall. (*S*: displacement at the ground surface, *T*: elapsed time for the monitoring period; *prec*: before the mitigating measure; *post*: after the mitigating measure)

L'accumulo si sviluppa dalla medesima quota di quello precedente (273 m) fino a quota 210 m, e presenta un'area di quasi 7000 m<sup>2</sup>. In altri casi si sono verificati piccoli movimenti retrogressivi localizzati (Maranina, Rocca Pitigliana, Greglio, Matella) che non hanno determinato la rimobilizzazione del corpo di frana.

Ove possibile, sono stati confrontati i tassi di spostamento precedenti e successivi gli interventi realizzati. I dati si riferiscono a 24 tubi inclinometrici, che corrispondono circa a 1/3 di quelli esistenti sulle frane studiate. La cadenza del monitoraggio è da tri a semestrale. Oltre all'intervallo delle letture, la scelta è stata fatta in base alla loro posizione: sono stati considerati solo quegli inclinometri confinati dagli stessi elementi morfologici (impluvi ed espluvi) che comprendono gli interventi stessi. La disponibilità di dati è molto più scarsa e frammentaria per le frane di categoria A, dove in molti casi si verifica il tranciamento del tubo inclinometrico (Baigno, Montecchi, Rocca Pitigliana, Casa Baldanza). Nel caso della Maranina, dopo la fase parossistica, gli inclinometri non hanno registrato apprezzabili movimenti entro il corpo di frana sia prima che dopo gli interventi.

La velocità precedente agli interventi ( $V_{prec}$ ) è stata calcolata considerando lo spostamento medio mensile avvenuto alla superficie topografica tra la lettura di zero effettuata all'inizio del monitoraggio e l'ultima lettura precedente agli interventi; analogamente, quella successiva ( $V_{post}$ ) agli interventi è stata calcolata considerando lo spostamento avvenuto tra la prima lettura effettuata

successivamente agli interventi e l'ultima del periodo di monitoraggio (Fig. 2).

Gli intervalli di tempo ( $T_{prec}$  e  $T_{post}$ ) vanno da un minimo di 6 mesi ( $T_{prec}$  Cà Marsili) a un massimo di 4 anni ( $T_{post}$  Cà Faziutto). Entrambe le velocità sono state divise per la precipitazione media mensile relativa ai due periodi (mm/mese) misurata dal pluviometro della stazione meteorologica più vicina al caso di studio, per avere un valore indipendente dall'aumento di velocità che ci si può aspettare all'aumentare delle precipitazioni. Rapporti di  $V_{post}/V_{prec}$  maggiori, uguali e minori di 1 indicano rispettivamente un aumento, una invarianza e una diminuzione delle velocità dopo la realizzazione degli interventi. Per poco meno della metà dei casi (11 inclinometri su 24) la velocità è diminuita almeno del 50%; in 8 casi si è verificato un aumento della velocità. Il confronto delle velocità è stato messo in relazione con la distanza dagli interventi e con la profondità di messa in opera dei drenaggi ( $P_d$ ) rispetto a quella a cui si attesta la superficie di scorrimento del movimento franoso ( $P_s$ ). Si nota che il rapporto  $V_{post}/V_{prec}$  tende ad aumentare con la distanza dagli interventi (Fig. 3a).

In Fig. 3b sono stati esclusi 4 inclinometri, dai quali non è stata individuata una evidente superficie di rottura. Si noti che maggiore è la profondità dei dreni rispetto allo spessore in frana ( $P_d/P_s \geq 1$ ), maggiore è l'abbassamento delle velocità.

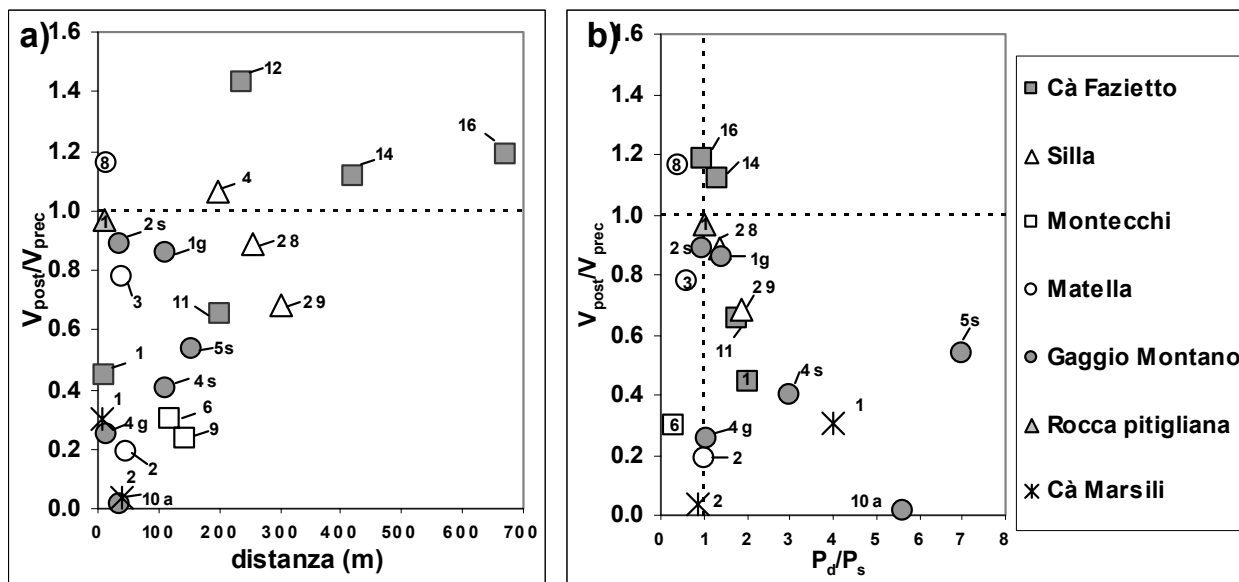


Fig. 3 – Confronto tra la variazione di velocità di spostamento precedente e successiva gli interventi di stabilizzazione: a) con la distanza dei punti di misura dalle opere; b) con la profondità di posa dei drenaggi ( $P_d$ ) normalizzata rispetto alla profondità della superficie di rottura ( $P_s$ ) ( $P_d/P_s < 1$ : i drenaggi non raggiungono la superficie di rottura). Nel grafico non sono plottati i punti Cà Marsili (14: a: 25; 534 – b: 1; 534), Gaggio Montano (16: a: 205; 4.2) e Baigno (11: a: 8; 3.6-b: 0.7; 3.6) per esigenze di scala

Fig. 3 – Comparison between displacement rate before and after the mitigating measures: a) with the drain distance; b) with the depth of drain ( $P_d$ ) normalized respect to the depth of landslide surface of rupture ( $P_s$ ) ( $P_d/P_s < 1$ : drains do not reach the depth of landslide surface of rupture). In the graph, points Cà Marsili (14: a: 25; 534 – b: 1; 534), Gaggio Montano (16: a: 205; 4.2) and Baigno (11: a: 8; 3.6-b: 0.7; 3.6) are not plotted because of their different scale

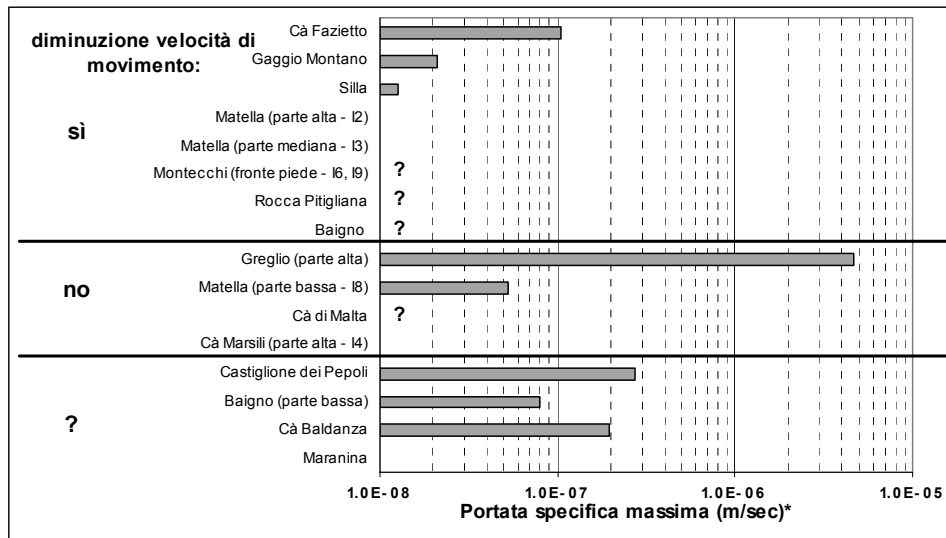


Fig. 4 – Valori di portata massima misurata allo scarico dei drenaggi (\*normalizzata rispetto alle dimensioni dei drenaggi)  
 Fig. 4 – Maximum flow rate values measured at drainage discharge points (\*normalized with respect to drainage dimensions)

In entrambi i confronti vi sono dati che non seguono l'andamento generale: alcuni inclinometri (Rocca Pitigliana I1, Matella, I3 e I8; Gaggio Montano, I1g e I2s) sono più vicini ai drenaggi (distanza massima 112 m), ma presentano un basso rapporto tra  $P_d$  e  $P$ , e  $V_{post}/V_{prec}$  è prossimo a 1 (Fig. 3a); altri (Cà Marsili I1 Matella I2, Gaggio Montano I4), anche se i drenaggi non raggiungono la superficie di scorrimento, si trovano più vicini ai dreni (distanza massima 46 m), e presentano un basso rapporto  $V_{post}/V_{prec}$  (Fig. 3b).

**Condizioni idrauliche**

L'efficienza dei drenaggi in esame è stata indagata attraverso la misura periodica (periodo 2004-2005) delle portate in uscita (Fig. 4). In alcuni casi lo scarico non è raggiungibile (Montecchi, Rocca Pitigliana, Baigno parte alta, Cà di Malta), in altri non è stata rilevata alcuna portata neppure in corrispondenza della stagione piovosa (Matella parte medio-alta, Cà Marsili, Maranina). Per permettere un confronto dei dati, la portata è stata normalizzata rispetto a lunghezza e profondità del dreno ( $p_s = p/(H*L)$  dove  $p_s$  (m/s) = portata specifica,  $p$  = portata (m<sup>3</sup>/s),  $H$  (m) = altezza del dreno,  $L$  (m) = lunghezza del dreno). Non è stata notata relazione tra variazione di portata e andamento delle deformazioni nel tempo.

Se è noto che l'efficacia di un sistema drenante non è necessariamente legata alla quantità di acqua allontanata (Desideri *et al.*, 2004), non si può affermare con altrettanta certezza che in caso di assenza di acqua non vi sia un effetto stabilizzatore da parte dei dreni, sia in termini di redistribuzione dell'acqua, attraverso matrice e discontinuità all'interno dei terreni argillosi, sia in termini di effetto di detensionamento causato dallo scavo. Ad eccezione di Greglio, dove i drenaggi sono in corrispondenza di una spessa coltre di detrito arenaceo proveniente da monte, i

valori di portata specifica sono compresi tra e  $1.3 \cdot 10^{-8}$  m/s (Silla) e  $2.7 \cdot 10^{-7}$  m/s (Castiglione dei Pepoli). Tale intervallo è compatibile con i valori di permeabilità generalmente associati alla matrice argillosa dei terreni in esame. Anche se non è ben chiaro il ruolo della circolazione idrica per fessurazione all'interno dei terreni argillosi strutturalmente complessi, i dati permettono di affermare che la permeabilità è comunque distribuita in modo omogeneo alla scala del versante.

I piezometri Norton fenestrati su tutta la lunghezza non sono stati ritenuti idonei per studiare l'effetto dei sistemi drenanti sulle condizioni idrauliche: l'altezza dell'acqua al loro interno, infatti, è indicativa della posizione della tavola d'acqua (Freeze & Cherry, 1979), e può non coincidere con l'altezza di pressione interstiziale alla profondità di misura (e.g. Picarelli *et al.*, 2005, Simoni *et al.*, 2004). L'analisi preliminare basata sui dati esistenti, riferiti principalmente a letture a cadenza trimestrale della profondità dell'acqua all'interno di piezometri di questo tipo, non ha evidenziato alcuna relazione tra l'esecuzione di sistemi drenanti e la posizione della tavola d'acqua all'interno dei versanti. Si è ricorso, invece, a misure di pressione interstiziale riferite a un intervallo discreto di profondità, raccolte in continuo nelle vicinanze di sistemi drenanti. Il monitoraggio è stato effettuato presso il movimento franoso che coinvolge il paese di Castiglione dei Pepoli nella sua parte nord-occidentale (Fig. 5). L'assetto geologico-strutturale dell'area è caratterizzato dalla presenza del contatto tettonico fra la Formazione del Monte Cervarola (torbiditi arenaceo-pelitiche), e le sottostanti Argilliti Variegate con Calcari. Al contatto tra le due formazioni è presente un cuneo detritico sul quale sorge il paese. Il forte contrasto di permeabilità e competenza fra le arenarie torbiditiche (ed i loro detriti) e le argille sottostanti costituisce la principale causa predisponente del movimento franoso.

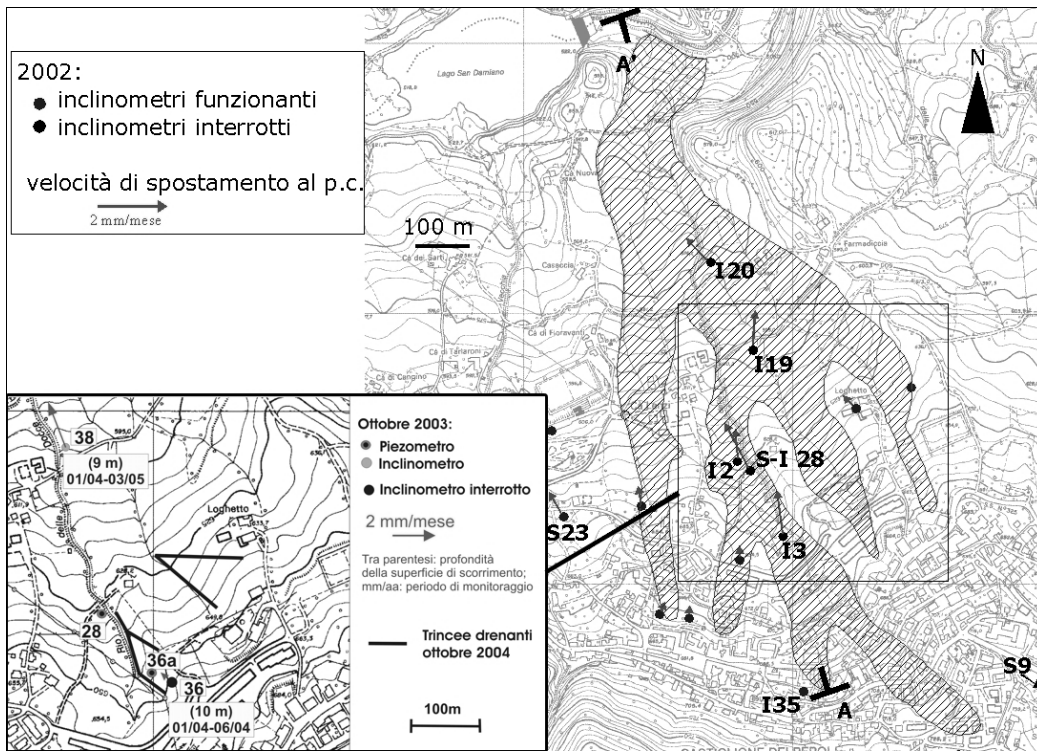


Fig.5 – Ubicazione dell’area test per la valutazione degli effetti sulle condizioni idriche dei drenaggi (frana di Castiglione dei Pepoli)  
 Fig. 5 – Location of the test area for assessing the effect on drainage water conditions (Castiglione dei Pepoli landslide)

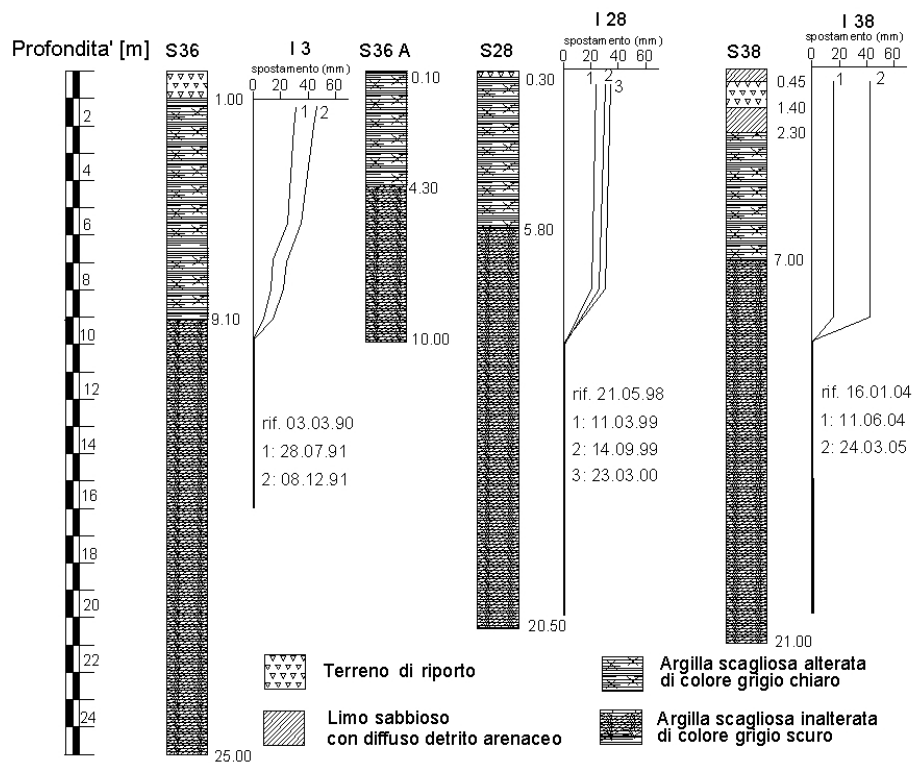


Fig. 6 – Stratigrafie di sondaggio e letture inclinometriche della frana di Castiglione dei Pepoli (ubicazione in Fig. 5)  
 Fig. 6 – Stratigraphic reconstruction (from boreholes) and inclinometer monitoring of the Castiglione dei Pepoli landslide (location shown in Fig. 5)



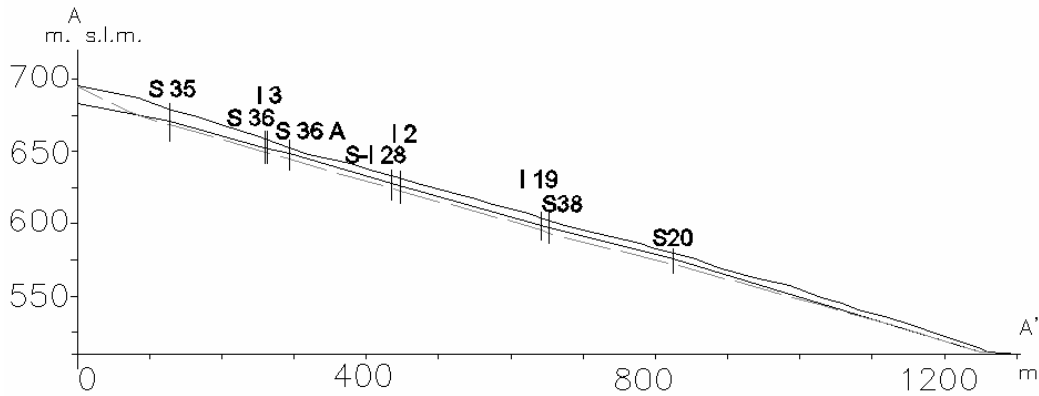


Fig. 7 – Ricostruzione della profondità del passaggio coltre-sustrato, rispetto alle stratigrafie di sondaggio (linea continua), e dell'ipotetica superficie di rottura, rispetto alle misure inclinometriche (linea tratteggiata) (si veda Fig. 6)

Fig. 7 - Reconstruction of the depth of landslide body/bedrock boundary (continuous line) and the surface of rupture (dashed line) (cf. Fig. 6).

Il corpo di frana è caratterizzato da più rami a prevalente movimento traslativo che evolvono in un unico corpo di colata centrale entro il bacino del Rio delle Docce. Confrontando le stratigrafie di sondaggio con le letture inclinometriche (Fig. 6) risulta che la profondità alla quale si attesta il movimento, che aumenta verso valle da 8 m a 16 m, è più profonda del passaggio coltre-sustrato. La velocità massima di movimento è di 2 mm/mese lungo il Rio delle Docce. In Fig. 7 è stata ricostruita la profondità della superficie di scivolamento lungo tutto il versante di frana, considerando anche la profondità alla quale si sono interrotti gli inclinometri non più funzionanti.

Il Servizio Tecnico di Bacino Reno (STBR) ha coordinato i lavori di consolidamento realizzando nella parte alta delle trincee drenanti nell'ottobre del 2004 e nella porzione mediana dei pozzi drenanti nell'estate del 2005. Le trincee drenanti consistono in pannelli drenanti sintetici di altezza 1 m e spessore 0,3 m, racchiusi da un gabbione metallico, posti a profondità tra 5 m e 7 m. Nell'aprile 2004 sono stati realizzati due piezometri in previsione delle future trincee: P28, (fenestrato da 1 a 10 m), dalla parte opposta rispetto all'impluvio, e P36 (fenestrato da 8 a 10 m), a 3 m di distanza dalle trincee in progetto. Al loro interno è stato collocato un trasduttore di pressione dotato di acquirente dati, che ha misurato la variazione dell'altezza dell'acqua in continuo fino al settembre 2006 (Fig. 8).

Il Servizio Tecnico di Bacino Reno (STBR) ha

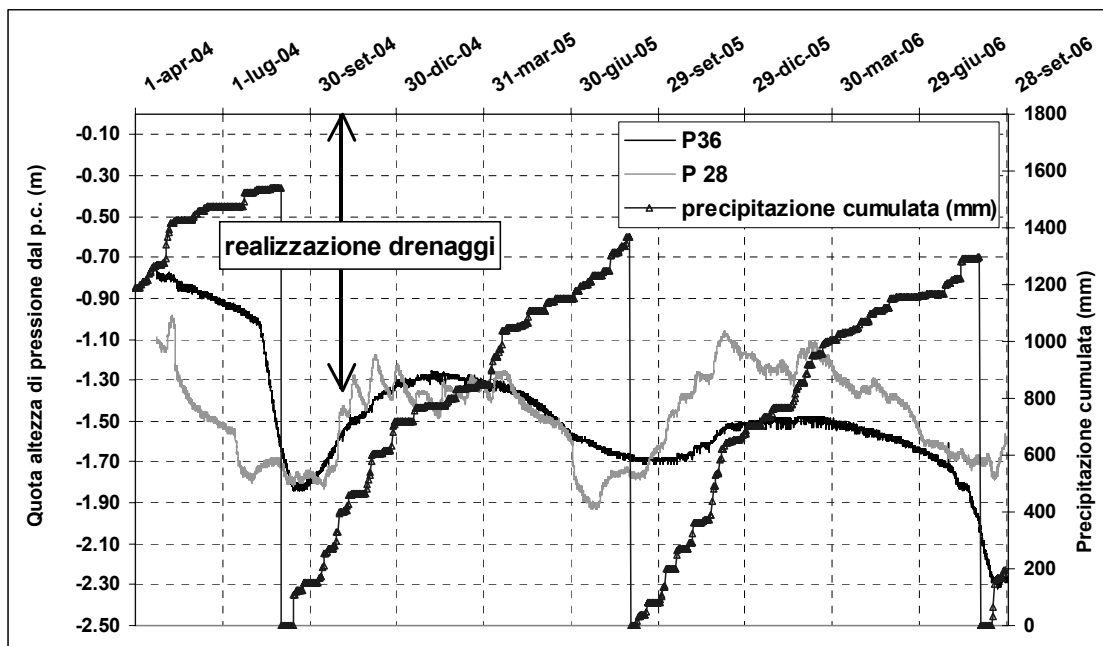


Fig. 8 – Monitoraggio delle pressioni interstiziali presso i drenaggi realizzati sulla frana di Castiglione dei Pepoli

Fig. 8 – Monitoring of pore water pressures in correspondence of drainages placed on the Castiglione dei Pepoli landslide (in the right axis: cumulated rainfall)

Con il permeametro a carico costante di Guelph (Elrick & Reynolds, 1992) è stata misurata a 20 cm di profondità una permeabilità del terreno in prossimità dei piezometri pari a  $6 \times 10^{-7}$  m/s. Anche se per tali valori di permeabilità i piezometri a tubo aperto non sono considerati i più adatti per osservare le oscillazioni piezometriche (Angeli & Gasparetto, 2000), il livello piezometrico in P28, a meno delle oscillazioni di ampiezza di circa 0,2 m e durata dai 7 ai 15-20 giorni in coincidenza con i più rilevanti eventi piovosi, può con buona approssimazione rappresentare la superficie libera della falda nel terreno.

Essa presenta un'escursione stagionale che nei tre anni idrologici considerati si mantiene pressoché costante; questo è in coerenza con la piovosità cumulata annuale che non subisce rilevanti variazioni. Il livello piezometrico passa da un massimo medio -1,3 m in autunno-inverno a un minimo medio di -1,8 m in estate. Il livello piezometrico in P36 è, invece, indicativo della pressione dell'acqua nell'intervallo 8-10 m. Essendo tale livello paragonabile a quello misurato in P28 e in altri piezometri a tubo aperto in prossimità, si può con buona approssimazione supporre che esiste un moto di filtrazione parallelo al pendio. In P36, non si hanno oscillazioni legate a singoli eventi di pioggia, bensì variazioni connesse ai periodi stagionali. Si nota come sia il massimo che il minimo stagionale siano diminuiti in seguito alla realizzazione dei drenaggi, in particolare, il livello massimo è sceso da -0,8 m (2004) a -1,3 m (2005) a -1,5 m (2006).

Per verificare come la variazione di pressione riscontrata possa influire sulla stabilità del versante, è stata considerata la variazione del fattore di sicurezza dalle condizioni in assenza e in presenza di dreni, rispettivamente. Le condizioni geomorfologiche del versante permettono di assumere un modello all'equilibrio limite di pendio infinito, per cui:

$$F_s = \frac{c' + [\gamma z \cos^2 \beta - \gamma_w h_w] \tan \phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta}$$

dove:  $c'$  = coesione del materiale (kPa),  $\phi'$  = angolo di attrito

(°);  $\gamma$  = peso di volume del terreno ( $\text{kN/m}^3$ );  $\gamma_w$  = peso di volume dell'acqua ( $\text{kN/m}^3$ );  $\beta$  = angolo di inclinazione del pendio;  $z$  = spessore di terreno (m);  $h_w$  = altezza di pressione misurata sulla superficie di scorrimento (m). Si sottolinea come l'attenzione sia rivolta non tanto al valore in termini assoluti di  $F_s$ , bensì alla sua variazione in funzione di  $h_w$  a parità delle altre variabili.

Il calcolo è stato effettuato in riferimento all'area compresa tra S36 e S36A, assumendo che le condizioni idrauliche si mantengano costanti lungo il pendio. Come valori dei parametri di resistenza del materiale sono state utilizzate le medie dei risultati di prove di taglio diretto (Tab. 3, archivio STBR).

Tab. 3 – Parametri meccanici di resistenza al taglio da prove di taglio diretto (archivio STBR)

Tab. 3 – *Shear strength parameters from direct shear tests (STBR archive)*

cam pnone	profondità (m)	$\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$c'$ (kPa)	$\phi'$	$c'_r$ (kPa)	$\phi'_r$
s9 1	4.75	20	23	20	1	15
s23 1	3.75	19.2	31	19	4	15
s23 2	6.75	19.9	20	20	7	14
s28 1	4.25	19.9	34	19	9	15

L'analisi è stata effettuata secondo due differenti scenari, considerando per entrambi i parametri delle resistenze residue del materiale: 1) superficie di scorrimento individuata dalle letture inclinometriche (che risulta più profonda del passaggio coltre-substrato); 2) superficie di scorrimento ipotizzata coincidente col passaggio coltre-substrato. L'abbassamento di pressione interstiziale indotta dalla presenza dei dreni provoca un aumento del fattore di sicurezza che è tanto maggiore quanto è maggiore la profondità della superficie di scorrimento (Tab. 4), ma l'ordine di grandezza dell'aumento è comunque basso per aumentare considerevolmente le condizioni di stabilità.

Tab. 4 – Aumento del fattore di sicurezza per effetto della presenza dei dreni secondo l'analisi all'equilibrio limite (pendio infinito) per i due scenari ipotizzati: scenario 1: superficie di scivolamento estrapolata dall'interpretazione dei dati inclinometrici. scenario 2: superficie di scorrimento in corrispondenza del passaggio coltre-substrato

Tab. 4 – *Increasing of factor of safety thanks to drains respect to results of limit-equilibrium analysis (infinite slope) according to two scenarios: 1) surface of rupture desumed from inclinometer data; 2) surface of rupture in correspondence of the landslide body/bedrock boundary*

	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$z$ (m)	$\beta$ (°)	$h_w$ (m)		$F_s$		$\Delta F_s$
						pre-dreni	post-dreni	pre-dreni	post-dreni	
scenario 1	5.25	14.75	19.8	7	11	6.2	5.5	0.94	1.01	0.11
scenario 2				4.4		3.6	2.9	1.11	1.22	0.07

## Discussione e conclusioni

Il lavoro svolto presenta una rassegna sullo stato di fatto degli interventi di stabilizzazione realizzati nell'area di interesse. Anche se vi è un indiscusso interesse sull'argomento da parte sia della comunità scientifica che degli enti operativi, l'osservazione dell'evoluzione del versante a interventi ultimati è spesso trascurata.

Nonostante alcune difficoltà connesse alla disponibilità di materiale, tipicamente più scarsa per i periodi precedenti ai progetti di sistemazione, i dati consultati suggeriscono che le velocità di movimento diminuiscono per distanze inferiori a circa 200 m dai drenaggi presenti sulle frane di categoria *B* (Silla, Cà Faziello, Matella, Gaggio Montano) e sulle porzioni di accumulo di alcune frane di categoria *A* (Montecchi, Cà Marsili, Rocca Pitigliana). Segni di attività vi sono stati quasi esclusivamente nelle parti alte dei corpi di frana, in prossimità della nicchia di distacco; questo è testimoniato o da movimenti retrogressivi (Montecchi, Maranina, Rocca Pitigliana, Greglio) o da  $V_{post}/V_{prec}$  maggiore o uguale a 1 (Cà Marsili). Si può osservare che questo è avvenuto a prescindere da ubicazione, lunghezza totale rispetto all'estensione areale della frana, e disposizione rispetto al pendio dei drenaggi. Si noti però che l'unico caso di riattivazione è avvenuto per l'unico caso in cui è presente una trincea disposta trasversalmente al versante a monte della nicchia di distacco.

Come precedentemente affermato, i movimenti franosi quali quelli oggetto di studio possono rappresentare fasi diverse di uno stesso percorso evolutivo. Nei casi di categoria *A* il confronto delle velocità registrate dagli inclinometri precedentemente e successivamente l'esecuzione degli interventi può essere spesso fuorviante poiché dopo movimenti veloci una frana tende di per sé a diminuire progressivamente la propria velocità. Dato che i tempi di ritorno delle frane complesse sono molto variabili (Iaccarino *et al.*, 1995), non è semplice definire in questi casi un tempo di osservazione minimo. Il confronto è inoltre complicato dal fatto che solitamente con movimenti maggiori di 5 mm/mese si verifica la rottura degli strumenti inclinometrici. Per i casi di categoria *B* il confronto tra le letture precedenti e successive agli interventi assume maggiore significato, trattandosi in entrambi i casi di movimenti continui e lenti (dell'ordine dei mm/mese). Dai dati osservati risulta che se la profondità di messa in opera dei drenaggi raggiunge o è maggiore di quella della superficie di scorrimento, l'effetto di diminuzione delle velocità di movimento è maggiore. La portata dei drenaggi non è, invece, risultata indicativa rispetto alla loro efficacia. Il monitoraggio delle portate ha, comunque, permesso di notare una certa coerenza nei valori di portata misurata in condizioni di terreno saturo. Nonostante numerosi scarichi siano risultati privi di portata, se la circolazione avvenisse

prevalentemente attraverso vie preferenziali, si attenderebbero in condizioni di saturazione valori che tra i vari siti differirebbero più di un ordine di grandezza a seconda dell'entità delle discontinuità.

L'utilizzo di piezometri automatici si è rivelato adeguato per monitorare la variazione delle pressioni interstiziali in prossimità di sistemi drenanti. Nei due anni idrologici successivi agli interventi realizzati presso la frana di Castiglione dei Pepoli, si nota un abbassamento progressivo dei massimi e minimi stagionali. Ulteriori dati sarebbero necessari per verificare i tempi di equilibrio. Da un'analisi di stabilità preliminare, assumendo costanti le condizioni idrauliche lungo la superficie di scorrimento, è emerso che con l'abbassamento di pressione interstiziale raggiunto si ottiene un aumento del fattore di sicurezza dell'ordine di 0,1 unità. L'analisi non tiene conto della reale diminuzione dell'influenza dei drenaggi con la distanza, che andrebbe indagata più in dettaglio.

Una valutazione sistematica degli interventi di stabilizzazione richiederebbe uno studio di campo che preveda un monitoraggio mirato all'osservazione delle variazioni temporali e spaziali degli spostamenti e delle pressioni interstiziali rispetto alla realizzazione di drenaggi, attraverso la messa in opera di inclinometri e piezometri posizionati a distanze da essi crescenti. Particolare attenzione deve essere posta nella messa in opera dei piezometri, che dovrebbero sempre essere fenestrati in un intervallo di profondità discreto, in corrispondenza della potenziale superficie di scorrimento. I tempi di osservazione dovrebbero essere paragonabili per i periodi precedente e successivo, e complessivamente coprire un intervallo di tempo che dipende dalla fase di attività della frana (più esteso per le frane di categoria *A*). Le frequenze di misurazione possono essere di 3/6 mesi per le frane di tipo *B*, mentre almeno mensili per quelle di tipo *A*. Con accorgimenti di questo tipo è possibile migliorare apprezzabilmente la fase di progettazione degli interventi, ottimizzandone le loro potenzialità.

## Ringraziamenti

L'autrice ringrazia:

- il personale tecnico della Regione Emilia-Romagna, Servizio Tecnico Bacino Reno, che a diverso titolo ha contribuito alla realizzazione di questo lavoro: Dott. Geol. Anna Rita Bernardi, Geom. Gianfranco Rodolfi, Dott. Pasquale Catapano, Dott. Geol. Enrico Mazzini, Dott. Geol. Chiara Roffi, Dott. Geol. Maurizio Fuoco;
- la Comunità Montana Alta Media Valle del Fiume Reno, in particolare il Dott. Geol. Aldo Fantini;
- il Dott. Alessandro Simoni dell'Università di Bologna.

## Bibliografia

- Airò Farulla C., Valore C., 1994. Evoluzione delle condizioni di sicurezza di pendii stabilizzati mediante gallerie drenanti. Atti del convegno: Il ruolo dei fluidi nei problemi di ingegneria geotecnica. Mondovì (CN), 6-7 settembre 1994.
- Angeli M.G., Gasparetto P., 2000. An analytical approach to obtain the actual groundwater response using open standpipe piezometers. In: Bromhead E., Dixon N., Ibsen M-L. (eds.), "Landslides in research, theory and practice". Thomas Telford, London, 1, 71-76.
- Bertolini G., Pellegrini M., 2001. The landslides of the Emilia Apennines (northern Italy) with reference to those which resumed activity in the 1994-1999 period and required Civil Protection interventions. In: Bertolini G., Pellegrini M. & Tosatti G. (eds.) "Le frane della Regione Emilia-Romagna oggetto di intervento di Protezione Civile nel periodo 1994-1999". Pubbl. GNDCI-CNR n° 2131. Quaderni di Geologia applicata 8 (1), 27-74.
- Bettelli G., De Nardo M. T., 2001. Geological outlines of the Emilia Apennines (Italy) and introduction to the rock units cropping out the areas of landslides reactivated in the 1994-1999 period. In: Bertolini G., Pellegrini M. & Tosatti G. (eds.) "Le frane della Regione Emilia-Romagna oggetto di intervento di Protezione Civile nel periodo 1994-1999". Pubbl. GNDCI-CNR n° 2131. Quaderni di Geologia applicata 8 (1), 1-26.
- Bieniawski Z. T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications. Wiley, Chichester, 251 pp.
- Burghignoli A., Desideri A., 1986. Efficienza dei drenaggi. AGI, XVI Conv. Naz. Di Geotecnica. Bologna, 14-16 Maggio 1986.
- Regione Emilia-Romagna & CNR, 2002. Carta geologica strutturale dell'appennino emiliano-romagnolo scala 1: 250.000. Ed. S.EL.CA, Firenze.
- Cotecchia F., Chandler R. J., 2000. A general framework for the mechanical behaviour of clays. *Geotechnique*, 50 (4), 431-447.
- Cruden D. M., Varnes D. J., 1996. Landslide Types and Processes. In: A.K. Turner & R.L. Schuster (eds.) "Landslides Investigation and Mitigation", Special Report 247, T.R.B., National Research Council, 3, 36-75, Washington D.C.
- Desideri A., Miliziano S., Rampello S., 2004. Drenaggi a gravità per la stabilizzazione dei pendii. 79 pp., Hevelius Edizioni, Benevento.
- Elrick D. E., Reynolds W. D., 1992. Infiltration from constant-head well permeameters and infiltrometers. In: G.C. Topp, W. D. Reynolds & R. E. Green (eds.) "Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice", Madison, Wisconsin, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 1-24.
- Esu F., 1977. Behaviour of slope in structurally complex formations. Proc. Int. Symp. The Geotechnics of Structurally Complex Formations, Capri, 2, 292-304.
- Freeze R. A., Chedry G. A., 1979. Groundwater. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 604 pp.
- Guida D., Iaccarino, G., 1993. Fasi evolutive delle frane di tipo colata nell'alta valle del F. Basento (Potenza). Studi Trent. Scienze Nat. Acta Geologica, 68, 127-152.
- Hutchinson J. N., 1977. Assessment of the effectiveness of corrective methods in relation to geological conditions and types of slope movements. Bulletin of International Association of Engineering Geology, 16, 131-155.
- Iaccarino G., Peduto E., Pellegrino A., Picarelli, L., 1995. Principal features of earthflows in part of Southern Apennine. 11th Europ. Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering. Copenhagen, 4, 354-359.
- IFFI, 2004. Inventario Fenomeni Franosi in Italia. Apat 2004. Sito internet: <http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Progetti/IFFI/>.
- Picarelli L., Urciuoli G., Ramondini M., Comegna, L., 2005. Main features of mudslides in tectonized highly fissured clay shales. *Landslides*, 1, 15-30.
- Simoni A., Berti M., Generali M., Elmi C., Ghirotti, M., 2004. Preliminary result from pore pressure monitoring on an unstable clay slope. *Engineering Geology*, 73, 117-128.