

POLITECNICO DI TORINO

*Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio*



Tesi di Laurea Magistrale

**Evoluzione del fenomeno franoso
prospiciente la stazione RFI di Limone Piemonte:
interventi e monitoraggi**

Relatore

Claudio Oggeri

Relatore esterno

Luigi Guido Marengo

Candidata

Francesca D'Emilio

Luglio 2018

Indice

Introduzione	5
1 I fenomeni franosi	6
1.1 Parti di un versante in frana: nomenclatura	7
1.2 Classificazione delle frane	9
1.2.1 Crolli	11
1.2.2 Ribaltamenti	12
1.2.3 Scivolamenti planari o traslazionali	13
1.2.4 Scivolamenti rotazionali	13
1.2.5 Espansioni	13
1.2.6 Colate detritiche	14
1.2.7 Fenomeni complessi	14
1.3 Monitoraggi tipici	15
1.3.1 Misure topografiche	15
1.3.2 Misure inclinometriche	16
1.3.3 Misure piezometriche	18
1.4 Interventi tipici di bonifica di versanti	18
1.4.1 Inquadramento interventi	19
1.4.2 Riduzione delle pressioni neutre	20
1.4.3 Opere di sostegno	25
1.4.4 Ancoraggi	28
1.4.5 Modifica della geometria del pendio	31
1.4.6 Ingegneria naturalistica	32
2 Frana di Limone Piemonte	36
2.1 Descrizione del caso	36
2.2 Inquadramento geografico	37
2.3 Descrizione geologica e geomorfologica locale	37
3 Evoluzione del fenomeno	39
3.1 Indagini e studi effettuati sul versante	39

3.1.1	Studi e interventi del 1979, 1982, fino al 2000	39
3.1.2	Studi del 2001	41
3.1.3	Studi del 2005	43
3.2	Interventi di consolidamento del 2011	47
3.2.1	Programma di intervento	47
3.2.2	Sistemi di monitoraggio	49
4	Monitoraggi, indagini e progettazione pre-opera	51
4.1	Informazioni da sistemi di monitoraggio	51
4.2	Indagini 2017	52
4.3	Nuova progettazione	53
4.3.1	Analisi di stabilità del fenomeno franoso	54
4.3.2	Interventi in progetto	58
5	Interventi in atto	59
5.1	Micropali	59
5.2	Tirantature di consolidamento	60
5.3	Drenaggio profondo e regimazione superficiale	61
5.3.1	Drenaggio profondo	61
5.3.2	Regimazione superficiale	62
5.4	Riprofilatura	63
5.5	Piano di monitoraggio	64
6	Grado di definizione del caso e manutenzione a lungo termine	65
6.1	Considerazioni sull'instabilità del pendio	65
6.2	Monitoraggi e manutenzione a lungo termine	67
6.3	Confronto con caso a scala maggiore: frana di Issime	69
7	Conclusioni	72
	Bibliografia	74
	Allegato A - Campagna geognostica 1982	76
	Sondaggio S1	76

Allegato B - Campagna geognostica 2017	77
Sondaggio Pz1n	77
Sondaggio I1n	78

Introduzione

Il presente lavoro di tesi consiste nello studio dei fenomeni franosi e della loro evoluzione, ponendo particolare attenzione al caso di un fenomeno franoso in atto nel comune di Limone Piemonte.

Nel primo capitolo si definiscono i fenomeni franosi, le loro classificazioni e cause abituali, e vengono riassunte le principali tipologie di indagine, monitoraggio e interventi tipicamente adottate.

Il secondo e il terzo capitolo sono un'introduzione al fenomeno franoso di Limone Piemonte, con una generale descrizione del caso e un primo sommario inquadramento geologico. Viene successivamente ripercorsa la storia degli studi, delle indagini e degli interventi che negli anni hanno interessato il versante in oggetto.

Il quarto capitolo è dedicato alle indagini e progettazioni effettuate nell'ultimo anno a seguito della decisione di intervenire in condizione d'urgenza per mettere in sicurezza il versante, e per la quale sono state effettuate alcune analisi di stabilità. Il dettaglio degli interventi e di alcune fasi operative è quindi riportato nel capitolo quinto, nel quale è definito anche il piano di monitoraggio in progetto.

Nel sesto capitolo sono infine discusse le considerazioni nate di conseguenza a quanto elaborato e trattato nei capitoli precedenti, con particolare riferimento alla stabilità del pendio in oggetto, e alla funzionalità di manutenzioni e monitoraggi, riportando l'esempio di un'ulteriore fenomeno franoso. Da tali considerazioni nascono dunque le conclusioni finali, a termine del lavoro di tesi.

1 I fenomeni franosi

La superficie terrestre è soggetta ad una continua evoluzione, dovuta in parte al tempo, in parte a processi di tipo geologico, geomorfologico e meteorologico.

Tra questi processi è possibile evidenziare le frane in senso stretto e fenomeni di deformazione lenta, tutti raggruppati nel più generico termine di "fenomeni franosi".

In letteratura si possono individuare molteplici definizioni di frane e fenomeni franosi; di seguito le più comuni:

frana: spostamento rapido di una massa di roccia, terreno residuale o sedimento formante un pendio, in cui il baricentro avanza verso il basso o verso l'esterno (Terzaghi, 1950);

frana: movimento verso il basso di una massa di roccia, terreno o detrito lungo un pendio (Cruden, 1991);

fenomeno franoso: movimento controllato dalla gravità, superficiale o profondo, rapido o lento, di materiali costituenti un versante o un intero rilievo (Varnes, 1978).

Tali definizioni mettono in evidenza come i fenomeni franosi coprano una vastissima casistica di eventi; per fare un esempio, il volume dei corpi di frana può variare da poche decine a parecchi milioni di metri cubi, con velocità variabili da alcuni mm/anno a decine di m/s.

I pendii interessati da fenomeni franosi possono essere di tipo artificiale o naturale, questi ultimi di maggior interesse per la presente trattazione. I pendii naturali sono soggetti per definizione a un'evoluzione naturale del proprio stato di attività nel tempo, che ne caratterizza la propensione o meno a muoversi. Si possono distinguere i seguenti stati di attività:

attivo: in movimento;

quiescente: attualmente non in movimento, ma che potrebbe trasformarsi in pendio attivo, nel caso in cui si ripresentasse la causa di movimento originale;

stabilizzato: non in movimento, in quanto le cause di movimento risultano assenti, per eventi naturali o per intervento umano;

inattivo: non risultano movimenti negli ultimi cicli stagionali.

Il pendio è un sistema meccanico di tipo geotecnico le cui risposte meccaniche ai cambiamenti nel tempo delle condizioni al contorno si esplicitano in movimenti di pendio.

1.1 Parti di un versante in frana: nomenclatura

Per descrivere correttamente una frana si fa ricorso ad una terminologia precisa, di seguito riportata e rappresentata in Figura 1.1. In una frana si distinguono:

- ◇ *una zona di scorrimento:* zona della frana all'interno della quale il materiale mobilizzato giace ad una quota inferiore a quella della superficie originaria del pendio;
- ◇ *una zona di accumulo:* zona della frana all'interno della quale il materiale mobilizzato giace ad una quota superiore a quella della superficie originaria del pendio.

Per materiale mobilizzato si intende il materiale che si è mosso rispetto alla sua posizione originaria e si è depresso più a valle.

Nella **zona di scorrimento** si possono distinguere ulteriormente:

- ◇ *il coronamento:* è adiacente alla parte superiore della scarpata principale ove il materiale roccioso, formante il pendio originario del versante, si trova ancora in posto indisturbato o poco disturbato da crepe o fessure di collasso (*Massimo Civita, 1982*);
- ◇ *la scarpata principale:* superficie ripida che si crea nella parte alta della zona indisturbata in seguito al movimento di materiale; è la zona del versante da cui ha avuto origine il distacco del materiale;

- ◇ *la superficie di rottura*: superficie che isola inferiormente il materiale che ha subito movimento; dal punto di vista meccanico è chiamata superficie di scorrimento o di taglio;
- ◇ *il corpo principale*: è la porzione del corpo di frana che giace al di sopra della superficie di rottura, quindi tra la scarpata principale e il piede della frana.

Entro il *corpo principale* si possono riconoscere:

- ◇ *la testata*: la parte più alta del materiale in frana, al contatto con la scarpata principale;
- ◇ *le scarpate secondarie*: superfici ripide che interrompono la continuità del materiale franato.

Nella **zona di accumulo** si possono distinguere:

- ◇ *la superficie di separazione*: superficie lungo la quale si ha il contatto tra il materiale franato e quello sottostante, in posto;
- ◇ *il piede*: coincide con il punto terminale, a valle, della superficie di rottura o scivolamento; è la zona più distante dalla scarpata principale e di forma generalmente curva.

I movimenti franosi si caratterizzano anche da un punto di vista geometrico, attraverso le seguenti grandezze:

- *larghezza del corpo di frana*: distanza tra i due fianchi della frana, destra e sinistra, calcolata sulla media di un numero significativo di sezioni;
- *lunghezza del corpo di frana*: distanza tra il punto sommitale e il punto inferiore;
- *lunghezza relativa del corpo di frana*: distanza tra il punto sommitale e il piede;
- *profondità del corpo di frana*: massima dimensione del corpo frana misurata in verticale fino alla superficie di scorrimento o scivolamento.

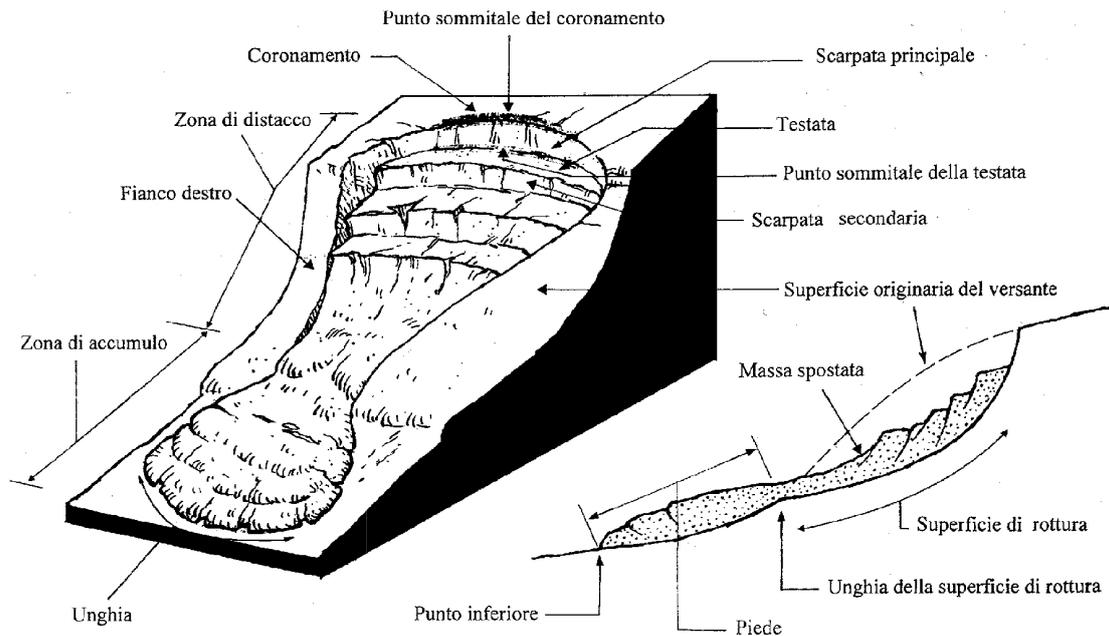


Figura 1.1: Nomenclatura delle varie parti di un movimento franoso

1.2 Classificazione delle frane

Il fenomeno franoso è la risposta di un pendio, nei terreni e nelle rocce, ai cambiamenti delle condizioni al contorno, di carattere idraulico e ambientale. Tale risposta si esplicita in un movimento, detto cinematismo, che è uno dei principali criteri di classificazione di questo fenomeno. La possibilità di identificare e assegnare un movimento franoso ad una certa classe attraverso caratteri direttamente osservabili è infatti di fondamentale importanza a scopo applicativo.

La classificazione di fenomeni franosi generalmente adottata in campo internazionale è quella di Varnes del 1978, rivista poi da Cruden e lo stesso Varnes nel 1996. Essa suddivide tali fenomeni franosi in classi in base al tipo di cinematismo e al tipo di materiale, definendo dunque una casistica che include ogni possibile evento.

I cinque tipi di cinematismo distinti sono: crollo, ribaltamento, scivolamento, espansione, colata, ai quali si aggiungono i fenomeni complessi, considerati a parte.

I tre tipi di materiale sono: roccia, detrito, terra.

In Tabella 1.1 è riportata in modo schematico tutta la casistica potenziale.

Material		ROCK	DEBRIS	EARTH
Movement type				
FALLS		<p>Scar Rock fall Rock Fall Debris</p>	<p>Scar Debris fall Scree Debris cone</p>	<p>Scar Earth fall Colluvium Debris cone</p>
		<p>Rock topple</p>	<p>Debris topple Debris cone</p>	<p>Cracks Earth topple Debris cone</p>
SLIDES	Rotational	<p>Single rotational slide (slump) Failure surface</p>	<p>Crown Scarp Head Scarp Multiple rotational slide Minor Scarp Failure surface Ice</p>	<p>Successive rotational slides</p>
	Translational (Planar)	<p>Rock slide</p>	<p>Debris slide</p>	<p>Earth slide</p>
SPREADS		<p>Normal sub-horizontal structure Cap rock Clay shale Thinning of beds Plane of décollement Competent substratum</p>	<p>Gully Camber slope Dip and fault structure Valley bulge (planed off by erosion) e.g. cambering and valley bulging</p>	<p>Earth spread</p>
FLOWS		<p>Solifluction flows (Periglacial debris flows)</p>	<p>Debris flow</p>	<p>Earth flow (mud flow)</p>
COMPLEX		<p>e.g. Slump-earthflow with rockfall debris</p>	<p>e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe</p>	

Figura 1.2: Classificazione di Cruden e Varnes

Tabella 1.1: Classificazione delle frane di Cruden e Varnes, 1996

TIPO DI MOVIMENTO	TIPO DI MATERIALE		
	Rocce	Terreni	
		Grossolani	Fini
Crollo	di roccia	di detrito	di terra
Ribaltamento	di roccia	di detrito	di terra
Scivolamento	rotazionale	di roccia	di detrito
	traslazionale	blocchi	blocchi
Espansione laterale	di roccia	di detrito	di terra
Colata	di roccia	di detrito	di terra
Frana complessa	combinazione di due o più tipi principali		

1.2.1 Crolli

Il crollo (*fall*) consiste in un distacco di un volume di materiale da un pendio molto ripido o sub-verticale in cui si presenta una discontinuità che può generare il distacco. Esso si può verificare in roccia, terra o detrito ma è più frequentemente rilevato nelle rocce. Dopo il distacco, i massi o blocchi di materiale lapideo discendono in caduta libera fino all'impatto e successivamente il loro moto evolve in rimbalzo e rotolamento o scivolamento, compatibilmente con la morfologia e la rigidità del pendio, la dimensione relativa tra il blocco in caduta e gli elementi del substrato costituenti il pendio stesso e dalla presenza di situazioni particolari come può essere la presenza di vegetazione. A seguito dell'impatto e degli eventuali rimbalzi, c'è un'ulteriore possibilità di frammentazione del blocco con fenomeni di scoppio e di disgregazione dei volumi rocciosi, i quali inoltre possono provocare la proiezione di schegge anche a notevole distanza.

I crolli in roccia si distinguono in:

grandi frane da crollo: sono coinvolti grandi volumi con il distacco non di un singolo elemento ma di un ammasso roccioso (Figura 1.3);



Figura 1.3: Frana da crollo in roccia - Donnas, 2017

caduta massi: riguarda singoli blocchi di roccia fino a 10 m^3 divisi da discontinuità; dopo la fase di rimbalzo si ha lo scivolamento o rotolamento sino all'arresto.

1.2.2 Ribaltamenti

Il ribaltamento (*topple*) è il risultato di una rotazione di una massa tipicamente di roccia rispetto ad un punto o asse al di sotto del centro di gravità della massa stessa. In accordo con Goodman e Bray si distinguono due tipi di ribaltamento:

ribaltamento a blocchi: sono presenti due piani di discontinuità, uno sub-orizzontale e uno sub-verticale, che isolano dei blocchi che interagiscono tra loro;

ribaltamento flessionale: è presente un sistema di discontinuità che immerge nel pendio e che genera delle lastre di roccia o delle colonne di roccia soggette al ribaltamento. Le lastre si inflettono sotto l'azione del proprio peso, sotto l'azione dell'acqua o sotto l'azione di appoggio delle lastre più a monte. Quando la lastra si inflette si generano delle fratture dovute al raggiungimento della resistenza a trazione della roccia.

I due tipi di ribaltamento si possono combinare in caso di inflessione, generazione di una superficie di rottura e poi ribaltamento dei blocchi.

1.2.3 Scivolamenti planari o traslazionali

Lo scivolamento (*slide*) è il movimento verso il basso di suolo o roccia, che avviene nelle zone superficiali di un pendio lungo una superficie di taglio che genera un cambiamento nel pendio. Si differenzia in planare e rotazionale.

Lo scivolamento traslazionale è generalmente un fenomeno superficiale e consiste in uno scorrimento di materiale lungo una superficie planare, solitamente coincidente con orizzonti di debolezza strutturale quali fratture, superfici di stratificazione, superfici di contatto fra substrato roccioso e materiale di copertura, superfici di contatto fra strati con diverse proprietà geotecniche. In generale l'innescò del movimento è anticipato dalla formazione di fessurazioni trasversali, subrettilinee e discontinue, a seguito delle quali si verifica il collasso con scivolamento verso valle.

1.2.4 Scivolamenti rotazionali

Lo scivolamento rotazionale è lo scorrimento lungo una superficie curvilinea concava verso l'alto. Rispetto allo scivolamento planare è un fenomeno più profondo, essendo il rapporto tra profondità del corpo di frana D e ampiezza L variabile tra 1.2 e 1.5. Il fenomeno si può presentare sia nelle rocce che nei terreni, e in entrambi i casi all'interfaccia si può generare un ulteriore tension crack e quindi una nuova superficie di rottura, caratterizzando il fenomeno come retroattivo.

1.2.5 Espansioni

Le espansioni avvengono tipicamente su grandi porzioni di territorio e su pendii poco inclinati o su piani campagna orizzontali. Il cinematismo è un movimento laterale molto lento, che può essere associato anche ad altri tipi di cinematismo.

L'espansione in roccia e terreno può essere dovuta ad una formazione con buone caratteristiche meccaniche poggiate su un'altra formazione con caratteristiche scendenti. Per il movimento del terreno sottostante possono formarsi delle fratture nel

materiale superiore, fino ad arrivare ad una divisione in blocchi che si muovono molto lentamente.

1.2.6 Colate detritiche

Le colate detritiche, comunemente anche chiamate *debris flow*, si caratterizzano come un rapido movimento di una massa nel quale la combinazione di materiale sciolto, roccia, materia organica, aria e acqua si mobilita verso valle trasportando materiale tipicamente detritico. La differenza rispetto agli scivolamenti planari è che nei debris flow il movimento non avviene solamente lungo la superficie di separazione tra substrato e massa in frana, ma è distribuito in modo continuo anche nel corpo frana, che si comporta quindi come un fluido viscoso, adattando la sua forma ad ogni cambiamento.

La proprietà caratterizzante della colata è la sua velocità di propagazione, che può variare da pochi *mm/anno* a *m/h* sino a *m/s*, provocando movimenti estremamente rapidi che possono essere distruttivi. Le colate detritiche sono caratterizzate da alcune peculiarità che le rendono facilmente riconoscibili dall'esterno: l'associazione del pendio a ripidi canali, la mancanza di una nicchia di distacco e una forma allungata e stretta della scarpata principale, priva di vegetazione, sono infatti tipiche di questo fenomeno franoso.

Le cause principali di questi fenomeni sono attribuite a intense precipitazioni o rapidi scioglimenti di neve, che erodono e mobilitano il materiale sciolto o le rocce in pendii ripidi, azioni facilitate dall'assenza di vegetazione, come ad esempio a seguito di un incendio.

1.2.7 Fenomeni complessi

La classificazione esposta sin qui considera l'avvenimento dei singoli eventi franosi, ma molto spesso i movimenti di pendio sono una combinazione di due o più tipologie di cinematismo. Tale combinazione può essere di tipo temporale, ossia si verificano in successione due eventi con due diverse modalità, o di tipo spaziale, quando si verificano contemporaneamente due differenti cinematismi in diverse parti di pendio.

1.3 Monitoraggi tipici

Il monitoraggio consiste nella valutazione della possibile evoluzione spazio-temporale del fenomeno di instabilità; per affrontare un evento franoso infatti non è sufficiente individuare la tipologia di movimento, ma anche la corretta identificazione dello stato e della distribuzione dell'attività del movimento.

I sistemi di monitoraggio hanno due funzioni principali di fondamentale rilevanza: aumentare la conoscenza del fenomeno franoso, con il fine di prevederne i possibili scenari evolutivi, ed effettuare il controllo dell'efficacia di interventi di stabilizzazione. In entrambi i casi è infatti di primaria importanza poter interpretare i cinematismi e riconoscerne i modelli evolutivi.

I parametri assunti come indicatori dell'evoluzione del fenomeno, riportati nei paragrafi successivi, sono necessari per la costruzione di un modello geomeccanico che possa dare una quantificazione della distribuzione della frana ed eventualmente dei tempi di riattivazione del movimento, con il fine di fare delle previsioni dell'evento. Tale concetto di previsione è ciò che permette di attuare dei provvedimenti volti alla riduzione del livello di rischio e di conseguenza alla riduzione degli eventuali effetti provocati dall'evento franoso.

Nei paragrafi seguenti verranno esposti le principali tipologie di reti di monitoraggio, ossia:

- topografica, per gli spostamenti superficiali;
- inclinometrica, per gli spostamenti profondi;
- piezometrica, per le oscillazioni della tavola d'acqua;
- estensimetrica, per l'apertura delle fessure;
- idrometeorologica, per i dati di pioggia, temperatura, etc.

1.3.1 Misure topografiche

Metodo tradizionale per eccellenza, il metodo geodetico-topografico si basa sul controllo degli spostamenti di punti di riferimento, generalmente nominati capisaldi, posti sulla superficie del terreno.

Il **teodolite** o le cosiddette stazioni totali sono lo strumento tipicamente utilizzato, tramite il quale è possibile determinare gli spostamenti con misure ripetute nel tempo. I capisaldi possono essere mire ottiche o prismi che vengono posizionati sia all'interno dell'area del corpo di frana che all'esterno.

A vantaggio di questo metodo sono la semplicità di realizzazione e dei limitati costi di installazione in cambio di un'elevata precisione. Tuttavia è vero che l'appoggio di mire ottiche da apporre fisicamente sul terreno può non essere sempre efficace, ed è riscontrato come numerose variabili possano sovente intervenire ad ostacolare la misurazione, quali ad esempio la presenza di neve o la crescita di vegetazione.

Altro metodo topografico, ma relativamente recente, è il **laser-scanner**, tecnologia ad oggi molto affinata che utilizza elementi riflettenti e che consente, attraverso la rielaborazione di una nuvola di punti, di fare una scansione del versante senza la necessità di ricorrere a mire ottiche e per questo più economico e più efficace. Dopo fasi di elaborazione e filtrazione, il risultato è un modello tridimensionale che, accuratamente analizzato, porta all'identificazione dei parametri ricercati.

1.3.2 Misure inclinometriche

L'inclinometro è uno strumento che misura la deviazione dalla verticalità, misurando la dinamica evolutiva dello spostamento lungo la superficie. Esso consiste in una tubazione in alluminio, dotata di quattro scanalature, collocato verticalmente nel terreno (Figura 1.1).

Le letture vengono effettuate a intervalli di quota minimi - tipicamente 0.5-1m - tramite un'apposita sonda che, disposta secondo l'asse del foro, ne misura l'inclinazione e l'azimut. Dopo una prima lettura iniziale, chiamata lettura degli zeri in quanto il fondo viene imposto a zero, le successive letture nel tempo permettono di visualizzare la dinamica evolutiva dello spostamento lungo superficie, ottenendo il profilo degli spostamenti inclinometrici.

Perché le misure inclinometriche risultino efficace è ovviamente necessario che l'inclinometro vada oltre la superficie di scorrimento, raggiungendo con l'estremità una porzione di terreno stabile, che avrà dunque uno spostamento nullo. Monito-



Figura 1.1: Tubo inclinometrico

orando nel tempo questo tipo di misure si è in grado di determinare con una discreta precisione la posizione della superficie di scorrimento (o le superfici di scorrimento) e la sua dinamica evolutiva nel tempo. Con il confronto dei dati inclinometrici con i dati pluviometrici è inoltre possibile ricercare la correlazione tra movimenti della frana e particolari eventi meteorici, dato molto importante per esempio dal punto di vista della protezione civile per eventuali allertamenti.

E' evidente che in termini di costi, tempi e risorse, l'installazione di una rete di monitoraggio di tipo inclinometrico risulta essere impegnativo, ma è di fondamentale importanza per frane di particolare rilevanza, e per questo motivo estremamente diffuso.

1.3.3 Misure piezometriche

Il monitoraggio dell'acqua in un versante in frana è molto importante, dal momento che nella maggior parte dei casi la sua presenza rappresenta un fattore che va a discapito della stabilità del versante stesso. Per individuare e monitorare la quota piezometrica dell'acqua e per determinare le pressioni neutre all'interno della massa in movimento si ricorre dunque alle misure piezometriche.

Tali misure si effettuano tramite dei dispositivi chiamati piezometri, che consistono in un tubo piezometrico che viene risalito dal liquido fino a raggiungere il piano dei carichi idrostatici che corrisponde ad una pressione relativa nulla del fluido.

Esistono diverse tipologie di piezometro, e la scelta viene effettuata in base alle caratteristiche della zona in frana e in particolare al coefficiente di permeabilità del terreno, che condiziona fortemente il tempo di risposta del piezometro. Per materiali ad alta permeabilità infatti, le variazioni della pressione idrostatica producono variazioni del livello dell'acqua nel piezometro pressoché istantanee; al contrario, in caso di mezzi a bassa permeabilità il tempo necessario per raggiungere il livello di equilibrio può essere molto lungo.

1.4 Interventi tipici di bonifica di versanti

La messa in sicurezza di versanti interessati da fenomeni franosi negli ultimi anni è stata oggetto di una crescente attenzione da parte di pubbliche amministrazioni ed enti gestori, in quanto è stato verificato come le conseguenze indesiderate di tali fenomeni possano essere di grande rilevanza sia economica che sociale. Come già espresso nel capitolo precedente, il rischio relativo agli eventi franosi si può mitigare agendo su due fattori: la pericolosità del versante, operando su di esso con interventi geotecnici, o l'esposizione, sino ad arrivare a spostare i beni esposti alle conseguenze indesiderate. Essendo quest'ultima solitamente considerata solamente come una soluzione d'emergenza, la presente trattazione si concentrerà sugli interventi tipici che si adottano per la messa in sicurezza dei versanti, diminuendo quindi il fattore pericolosità.

In questo capitolo verranno esplicate ed analizzate le diverse tipologie di intervento che si possono adottare per la stabilizzazione di un versante, generalmente utilizzati per le seguenti finalità:

- prevenzione e messa in sicurezza di dissesti naturali, tramite la modifica delle cause intrinseche generanti l'instabilità (riduzione delle pressioni neutre, modifica delle caratteristiche meccaniche del terreno, modifica della morfologia del pendio), o la modifica delle condizioni di instabilità (realizzazione di opere di sostegno, applicazione di forze stabilizzanti);
- protezione di siti estrattivi a giorno, con il sostegno preventivo del pendio in caso di sbancamento;
- messa in sicurezza di un'infrastruttura civile e salvaguardia di opere esistenti, tramite la realizzazione di opere di sostegno a monte dell'opera da salvaguardare.

1.4.1 Inquadramento interventi

Si definisce *fattore di sicurezza* il rapporto tra forze stabilizzanti e forze instabilizzanti, ossia il rapporto tra la resistenza al taglio del materiale dell'ammasso roccioso e la resistenza al taglio mobilizzata; di conseguenza, si ha intuitivamente una condizione di instabilità quando tale fattore è inferiore o prossimo a 1. Per mettere in sicurezza un versante in frana è dunque necessario intervenire su uno di questi fattori. Per un primo inquadramento generale è possibile suddividere gli interventi in due tipologie: interventi che riducono le forze che tendono a provocare la rottura e interventi che aumentano le forze resistenti.

RIDUZIONE DELLE FORZE INSTABILIZZANTI

Le forze squilibranti si possono ridurre agendo in due modi, secondo due diversi principi fisici:

- riduzione degli sforzi tangenziali lungo la superficie di scivolamento, ad esempio attraverso degli scavi di alleggerimento a monte del pendio, abbattimento della scarpata o rinfianchi al piede;

- trasferimento degli sforzi tangenziali ad elementi strutturali ancorati ad una formazione non interessata dal fenomeno, quali muri di sostegno, paratie, palancole o pali.

INCREMENTO DELLE FORZE STABILIZZANTI

L'aumento delle forze resistenti può essere raggiunto nelle seguenti modalità:

- incremento degli sforzi normali ed effettivi lungo la superficie di scivolamento, attraverso la realizzazione di elementi strutturali con tiranti pretesati oppure con rinfianchi al piede;
- riduzione delle pressioni neutre in punti interni al volume in frana o lungo il contorno di esso, con l'allontanamento delle acque superficiali e l'ampia gamma dei sistemi di drenaggio;
- miglioramento della resistenza al taglio del materiale e modifica delle caratteristiche meccaniche del terreno, tramite addensamento o iniezioni.

Nel paragrafo successivo vengono elencate le più comuni tipologie di interventi di stabilizzazione, i loro vantaggi e svantaggi.

1.4.2 Riduzione delle pressioni neutre

Le più comuni opere di drenaggio hanno lo scopo di eliminare l'acqua in circolo nell'ammasso instabile, andando a ridurre le pressioni neutre. Questo tipo di realizzazione è generalmente idonea ad ogni tipo di frana, in particolare in rocce sciolte, e a seconda della tipologia può intervenire in superficie, attraverso opere quali le trincee drenanti, o in profondità, tramite pozzi, gallerie o fori orizzontali e suborizzontali.

Fondamentale da tenere in conto per la realizzazione di opere di drenaggio è il fattore permeabilità, caratteristico del materiale costituente l'ammasso. In caso di materiale ad alta permeabilità si avranno alte portate di fuoriuscita con conseguente progressivo abbassamento del livello di falda, in caso di superamento delle portate di alimentazione. In caso contrario, in un materiale a bassa permeabilità, si avranno minori portate che però contribuiranno ugualmente a stabilizzare il versante, per effetto della diminuzione delle pressioni neutre.

La caratterizzazione della permeabilità non è tuttavia banale, per cui la progettazione e il posizionamento delle opere di drenaggio può spesso risultare difficoltosa e di incerta valutazione. Complice di questo fattore è anche la scarsità di informazioni sulla affidabilità nel tempo, per cui si rendono necessari continui monitoraggi sulla falda, prima e dopo gli interventi. Il tempo necessario perché il versante si stabilizzi è infatti funzione di tanti fattori, quali il volume e la geometria del versante in frana, la deformabilità dello scheletro solido e la già citata permeabilità, solo per sottolinearne alcuni. Durante questo tempo, in conseguenza alle nuove condizioni al contorno, si verrà a creare un nuovo moto di filtrazione all'interno dell'ammasso roccioso.

Le opere di drenaggio sono considerate tra le principali opere di mitigazione, essendo l'acqua uno dei fattori potenzialmente innescanti il dissesto, per cui sono realizzate molto frequentemente, secondo la logica che meno acqua è presente nel versante in frana meglio è. Tuttavia è necessario tener conto che in taluni casi si possono presentare delle controindicazioni e che è essenziale verificare che non avvengano ad esempio fenomeni di sifonamento o di erosione interna, che potrebbero andare a peggiorare la condizione di instabilità.

L'acqua è di frequente un fattore contribuente all'innescamento di movimenti franosi, e la sua presenza all'interno delle discontinuità di un ammasso roccioso nella quasi totalità dei casi porta a conseguenze negative per quel che riguarda la stabilità. I drenaggi hanno come obiettivo l'abbassamento del livello piezometrico all'interno del versante, riducendo le pressioni interstiziali lungo la superficie di scorrimento e aumentandone quindi la resistenza al taglio.

Tenuto conto del principio degli sforzi efficaci, si rappresenta la resistenza al taglio dei terreni con la seguente funzione:

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \phi$$

dove:

τ resistenza al taglio;

c' coesione dello scheletro solido;

ϕ' angolo d'attrito dello scheletro solido;

σ tensione normale totale agente lungo la superficie presa in esame;

u pressione neutra.

L'azione drenante provoca una riduzione della pressione neutra u e un aumento della tensione normale effettiva ($\sigma - u$), con un conseguente incremento della resistenza al taglio τ .

Per poter intervenire su questo fattore è necessario avere un'ottima conoscenza dell'ammasso, in quanto le fratturazioni sono spesso irregolari e la percolazione fortemente variabile da zona a zona. Viste tali difficoltà, nel modificare le condizioni piezometriche si procede spesso con un approccio cautelativo nella progettazione, che sovente si basa più sull'esperienza e sul confronto con altri casi reali piuttosto che su calcoli e modelli che tentano di riprodurre la realtà; ulteriore conseguenza di tale complessità è la difficoltà finale di valutare in modo preciso l'incremento del fattore di sicurezza a seguito dell'intervento.

Tra i provvedimenti di "pronto intervento" per la stabilizzazione di un versante molto importante è la captazione e il convogliamento delle acque superficiali e di eventuali sorgenti che tendono a scorrere verso l'ammasso in frana, contribuendo al suo movimento gravitativo. Per rimediare a questa problematica si interviene con dei drenaggi superficiali, che evitano il ruscellamento libero delle acque piovane lungo i pendii, evitando così l'erosione superficiale e l'infiltrazione in profondità. I drenaggi superficiali di comune realizzazione sono i "sistemi di canalette" di raccolta delle acque meteoriche e di ruscellamento, che verranno approfondite più avanti nel paragrafo.

Successivamente alle cosiddette opere di pronto intervento, si realizzano le vere e proprie opere di drenaggio all'interno della progettazione degli interventi per la "sistemazione definitiva" del pendio. Queste opere di drenaggio sono tipicamente di drenaggio in profondità, quali trincee drenanti e dreni tubolari, sub-orizzontali o verticali, e le più dispendiose gallerie di drenaggio e pozzi drenanti.

SISTEMA DI CANALETTE SUPERFICIALI

Le canalette superficiali possono operare in diversi settori del versante: possono essere *di coronamento*, ovvero situate a monte del versante per captare e allontanare le acque dal ciglio superiore del pendio impedendo che esse entrino nell'area in frana; possono essere canalette *longitudinali*, o a spina di pesce, disposte appunto longitudinalmente lungo il pendio per aiutare a far defluire le acque più rapidamente; le canalette *di allontanamento dall'area*, verso impluvii naturali di opportuna capacità di flusso.

Le canalette superficiali possono essere realizzate con materiali prefabbricati, oppure rivestite con calcestruzzo rigido; nel primo caso le canalette hanno il palese vantaggio di essere meno sensibili a eventuali piccoli movimenti del corpo in frana, mantenendo quindi più a lungo la propria funzionalità rispetto a quelle rivestite in calcestruzzo. La realizzazione delle canalette talvolta può essere anche effettuata tramite trincee poco profonde riempite con ghiaia, che rappresentano il termine di passaggio tra i drenaggi superficiali e i drenaggi profondi.

TRINCEE DRENANTI

Le trincee drenanti hanno generalmente una sezione rettangolare o trapezoidale, con una larghezza che varia da 0.5 a 1 m, con una profondità massima di 5-6 metri, compatibilmente con le prestazioni delle attrezzature utilizzate per lo scavo, mentre la lunghezza delle si sviluppa nella direzione di massima inclinazione del pendio.

La funzione drenante delle trincee è svolta dal materiale di riempimento, sabbia e ghiaia, la cui alta permeabilità rispetto a quella del materiale circostante fa sì che l'acqua drenata venga allontanata per gravità. La scelta della granulometria del materiale di riempimento delle trincee deve essere fatta in modo tale da soddisfare la necessità di filtrare l'acqua senza trasportare materiale fine, quale materiale limoso-argilloso, che potrebbe progressivamente intasare la trincea. Per effettuare tale scelta si fa riferimento alla cosiddetta *regola dei filtri*, che impone le seguenti condizioni:

$$5 \cdot d_{15} < D_{15} < 5 \cdot d_{85} \quad ; \quad D_{85} > 2 \cdot \phi$$

dove:

d_{15}, d_{85} sono le dimensioni corrispondenti al 15% e all'85% in peso, di passante nella curva granulometrica del terreno da drenare;

D_{15}, D_{85} sono le dimensioni corrispondenti al 15% e all'85% in peso, di passante nella curva granulometrica del materiale drenante;

ϕ è la dimensione dei fori nei tubi drenanti inseriti alla base della trincea.

Tale regola soddisfa il *criterio di ritenzione*, per il quale i vuoti del terreno drenante devono essere della grandezza ottimale per mantenere un'adeguata velocità di filtrazione che consenta di evitare un eventuale intasamento dovuto al trasporto di materiale fini, e soddisfa il *criterio di permeabilità*, per il quale la permeabilità del materiale di riempimento dev'essere sufficientemente alta.

Un'alternativa al riempimento con sabbia e ghiaia è la posa di uno speciale materiale geosintetico costituito da un "telo" di materiale geocomposito con caratteristiche drenanti, mentre il riempimento della trincea viene effettuato con lo stesso materiale precedentemente escavato per la realizzazione della trincea stessa. Tale opzione ha certamente una efficacia inferiore a quella con sabbia e ghiaia e sabbia, ma è molto vantaggiosa da un punto di vista economico e logistico, non essendoci la necessità di reperire appositamente un materiale adeguato.

DRENI TUBOLARI

I dreni tubolari, anche detti microdreni, sono l'opera di drenaggio che agisce più in profondità tra quelle prese in considerazione nella presente trattazione. Questo tipo di drenaggio prevede la perforazione dell'ammasso roccioso, all'interno del quale è inserito un tubo microfessurato che viene percorso dall'acqua, scaricata per gravità. Perché questo metodo funzioni correttamente, è necessario che i fori intercettino le fratture che immagazzinano acqua, realizzando dunque un cosiddetto *sistema di dreni tubolari*, che richiede una progettazione attenta e accurata.

I dreni sono tipicamente di piccolo diametro, e si inseriscono nel pendio anche per diverse decine di metri, con una lieve pendenza verso il fronte del versante - compresa tra il 2 e il 20 % - in modo tale che l'acqua fuoriesca per gravità. I fori un interasse molto variabile - indicativamente tra i 3 e i 20 metri - e sono generalmente disposti su

più file a quote diverse. A seconda del tipo di materiale dell'ammasso in frana, i dreni possono essere costituiti da fori rivestiti o non rivestiti: in caso di rocce fratturate i fori non sono rivestiti e hanno generalmente un'efficacia anche a lungo termine, a patto che l'acqua drenata non sia mezzo di trasporto solido; nei terreni sciolti i fori sono invece attrezzati con rivestimento finestrato o forato dotato esternamente di un geotessile con lo scopo di evitare l'occlusione del dreno a causa del trasporto solido. Proprio per questa evenienza, nei dreni tubolari è di essenziale importanza un costante monitoraggio: periodicamente si procede con un'esplorazione dei fori e se necessario effettuare un lavaggio con acqua ad alta pressione per ripulire il dreno da eventuale materiale trasportato dall'acqua di filtrazione e depositatosi sulla superficie esterna del foro, occludendolo.

Infine, essendo l'efficacia di questo tipo di interventi di difficile determinazione, si considera opportune eseguire in fase di realizzazione una rete di piezometri per misurare la pressione interstiziale e di acqua drenata e monitorare così l'effetto positivo o negativo dell'intervento, e se necessario modificarlo o integrarlo.

1.4.3 Opere di sostegno

Si identificano tipicamente come opere di sostegno muri, pozzi, pali, setti, paratie e gabbionate. Esse hanno generalmente un effetto di stabilizzazione rapido e costante nel tempo, e che non richiede solitamente particolari interventi di manutenzione.

Le opere di sostegno si distinguono in opere continue o discontinue, in base alla loro disposizione sul pendio. Le strutture continue sono disposte al piede del versante in frana e rappresentano uno sbarramento che corre regolare per tutta la sua lunghezza, mentre le strutture discontinue sono distribuite all'interno del corpo in frana. A differenza delle opere al piede, le opere distribuite consentono di incrementare il fattore di sicurezza in maniera diffusa sul versante, con un effetto finale di stabilizzazione più uniforme. Per questa caratteristica le opere di sostegno discontinue sono adatte a frane di grandi dimensioni, anche se è necessario tenere in considerazione che l'entità delle azioni positive agenti è di difficile quantificazione, oltre che contenuta entro ovvi limiti fisici. Le frane di notevoli dimensioni rimangono infatti impossibili da stabilire con semplici opere di sostegno, sia continue che discontinue.

Ultima considerazione da fare sulle opere di sostegno, che possono essere molto differenti tra loro, è che in genere la valutazione dell'interazione tra il terreno del corpo di frana e la struttura di sostegno può essere molto complicata; solitamente si fa riferimento alla condizione dell'equilibrio limite, mentre a volte si opera in campo elastico portando in conto la deformabilità dei terreni e delle strutture, con notevoli difficoltà nella caratterizzazione dei terreni interessati.

Gli interventi strutturali identificati con il termine di "strutture di sostegno" hanno la funzione di applicare forze di contenimento, in modo attivo o passivo, con la conseguenza di aumentare le forze resistenti e quindi incrementare il margine di sicurezza di versanti instabili.

Perché opere di questo tipo siano efficaci al fine della stabilizzazione, è necessario adottare alcuni accorgimenti, ovvi ma non banali:

- le strutture di sostegno deve essere fondate e appoggiate su porzioni stabili del pendio, ossia a profondità maggiori della superficie di scivolamento;
- a tergo delle strutture di sostegno deve essere realizzato un efficace sistema di drenaggio in modo tale da impedire la formazione di sovrappressioni al piede del pendio;
- evitare di appesantire oltremisura il versante a valle della struttura di sostegno, per evitare situazioni di rottura del terreno.

A seconda della loro capacità di adattarsi ai movimenti e alle deformazioni dei terreni e degli ammassi rocciosi, le opere di sostegno si possono distinguere in due categorie: strutture *rigide*, in caso di fratturazione (ad esempio i muri di sostegno), o *flessibili*, in caso di adattamento alle deformazioni (come ad esempio diaframmi o cortine di pali o micropali).

Si elencano di seguito i principali elementi strutturali che si possono distinguere negli interventi di stabilizzazione.

MURI DI SOSTEGNO

I muri di sostegno sono interventi di stabilizzazione che possono operare su piccoli volumi instabili, e per questo sono perlopiù utilizzati con la specifica funzione di agire a protezione del piede del pendio. Essi possono essere:

- a mensola;
- in cemento armato gettato in opera;
- a gravità, o a semigravità (in muratura o in calcestruzzo);
- a elementi prefabbricati.

SISTEMI DI PALI VERTICALI

Intervento comune è la realizzazione di pali verticali o di pozzi distanziati e disposti lungo delle file, infissi in profondità nella porzione stabile, liberi o ancorati. L'azione di stabilizzazione da essi operata dipende dalla bontà della realizzazione ma prevalentemente dall'interasse tra gli elementi strutturali: minore è l'interasse, maggiore è l'efficacia.

MICROPALI E SOIL NAILING

I micropali e il soil nailing possono avere una qualunque inclinazione, orizzontale od ortogonale rispetto alla superficie di scorrimento, e sono costituiti da elementi esili di cucitura di tale superficie. Questo tipo di intervento è realizzato prevalentemente in ammassi rocciosi, o per piccole porzioni di pendii in rocce sciolte.

PARATIE

Le paratie operano un'azione di contenimento del corpo di frana o della massa instabile. Esse possono essere disposte lungo una o più sezioni del versante e sono infisse in profondità nella porzione stabile del pendio, talvolta vincolate tramite ancoraggi. Questo tipo di strutture possono essere realizzate in differenti modi - a pali aderenti o accostati, o a pannelli - ma in ogni caso sono considerate molto efficaci e in grado di bloccare completamente i movimenti che potrebbero eventualmente interessare il versante.

ELEMENTI STRUTTURALI DI PLACCAGGIO

Elementi strutturali di placcaggio con ancoraggi attivi che attraversano tutta la massa instabile e si infissano nello strato di substrato stabile. Si individuano due componenti nella forza di esercizio applicata: la componente normale alla superficie di scorrimento aumenta la forza resistente, mentre la componente parallela riduce la forza instabilizzante. Nel caso in cui gli ancoraggi siano pretesati al momento della messa in opera, questo intervento entra prontamente in carico, ossia in esercizio. Come nel caso dei micropali e del soil nailing, questo tipo di intervento è realizzato prevalentemente in ammassi rocciosi, o per piccole porzioni di pendii in rocce sciolte.

1.4.4 Ancoraggi

La realizzazione di ancoraggi rientra tra i cosiddetti interventi "di rinforzo", ossia interventi che hanno la funzione di stabilizzare il versante operando a livello dell'intera struttura. Gli ancoraggi sono elementi lineari, tipicamente in acciaio, che possono essere inseriti nell'ammasso naturale con tecniche diverse.

Tra i diversi tipi di ancoraggi si distinguono quelli attivi e quelli passivi, a seconda del loro principio di azione:

gli *attivi* producono una modifica dello stato tensionale della struttura, inducendo nell'armatura una forza di tesatura superiore a quella teorica di utilizzazione, per renderlo meno prossimo ad una condizione tensionale limite;

i *passivi* apportano un miglioramento delle caratteristiche di resistenza della formazione geologica, ed entrano in carico a seguito di movimenti dell'ammasso.

Ne risulta dunque che per la stabilizzazione di versanti in frana è generalmente preferibile l'utilizzo di ancoraggi attivi, in particolare tiranti nel caso di terreni, in quanto essi non necessitano di ulteriori movimenti del corpo in frana per entrare in carico, ma si attivano all'atto della messa in opera, a seguito di apposita tirantatura.

TIRANTI DI ANCORAGGIO

I tiranti di ancoraggio sono dunque interventi attivi, che rappresentano un elemento strutturale connesso al terreno e ad una struttura in grado di trasmettere una forza ad un punto in superficie, essendo ancora all'interno della massa rocciosa e in grado di essere tensionato. Per queste caratteristiche sono di conseguenza utilizzati per la stabilizzazione di versanti rocciosi soggetti a fenomeni franosi di diverso tipo.

Nella struttura di un tirante è possibile distinguere tre parti funzionali principali, individuabili in Figura 1.1:

- una *testa di ancoraggio*, che comprende anche la piastra di ripartizione; la testata è solitamente cementata a una struttura di sostegno, e ad essa trasmette la forza di trazione del tirante;
- una parte *libera*, che comprende la parte tensionabile, l'armatura e la guaina; la parte libera trasmette la forza di trazione della testata alla fondazione;
- una *fondazione*, ovvero un tratto di armatura vincolata al terreno, in modo da trasmettere alla formazione le forze di trazione del tirante; l'ancoraggio della fondazione può essere realizzato attraverso un dispositivo ad ancoraggio meccanico o più comunemente per cementazione, ma quel che è fondamentale è che esso deve avvenire in una porzione del terreno completamente stabile e non interessata dal supposto o reale movimento.

E' possibile individuare diversi parametri di classificazione dei tiranti, e uno di questi è la forza di tesatura N iniziale, secondo la quale un tirante può essere:

- *preteso* se nell'armatura viene indotta una forza di tesatura pari a quella di esercizio $N_i = N_{es}$;
- *parzialmente preteso* se nell'armatura viene indotta una forza di tesatura minore di quella di esercizio $N_i < N_{es}$;
- *non preteso* se nell'armatura non viene indotta alcuna forza di tesatura $N_i = 0$.

Altra distinzione estremamente importante è basata sulla durata di esercizio, per cui si identificano:

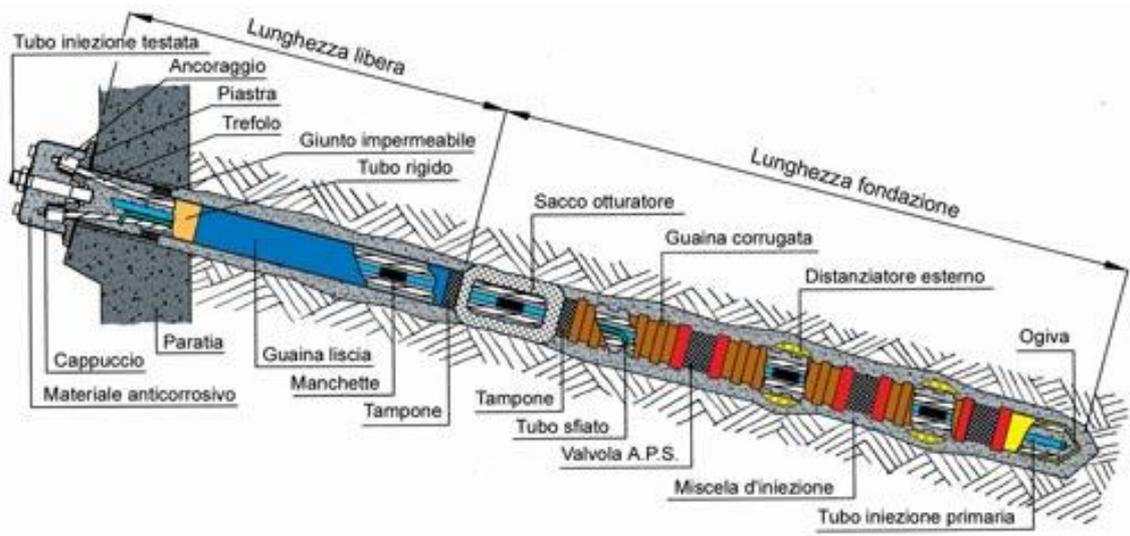


Figura 1.1: Sezione di tirante con ancoraggio di fondazione per cementazione realizzato tramite manchette

- tiranti *permanenti* se destinati ad esercitare la loro funzione per un periodo uguale o superiore a due anni;
- tiranti *temporanei* se destinati ad esercitare la loro funzione in fase costruttiva, al termine della quale non è più necessaria la loro funzione e comunque per un periodo inferiore a due anni.

Come in tutti gli interventi, i tiranti di ancoraggio possono essere progettati correttamente soltanto sulla base di una chiara conoscenza del progetto di costruzione, dei requisiti strutturali dei tiranti e delle caratteristiche geotecniche del terreno. Per questo e per altri motivi, è necessario che vengano effettuate delle prove sia in fase progettuale che verifiche ad opere eseguite.

Il terreno e quindi la connessione terreno-elementi resistenti è un elemento vitale per i tiranti e pertanto sono essenziali indagini sul sito e un'indagine geotecnica di una qualità e di una profondità tali da:

- avere conoscenza della formazione geologica;
- escludere la presenza di strati profondi che ostacolano il progetto;
- definire le condizioni freatiche.

Un vantaggio di questi sistemi di ancoraggio è che possono essere integrati con una strumentazione di monitoraggio, con la quale è possibile misurare la forza in esercizio e in taluni casi derivati da movimenti strutturali, può essere necessaria una periodica rimessa in tiro dei tiranti per mantenere la forza di ancoraggio sopra il livello minimo richiesto.

1.4.5 Modifica della geometria del pendio

Gli interventi che modificano la geometria del versante sono interventi agenti sulla macroscale, che interessano la struttura nel suo insieme. Essi hanno come obiettivo la creazione di una geometria che limiti i possibili cinatismi, sulla base delle discontinuità presenti, e aumenti i fattori di sicurezza eliminando volumi potenzialmente instabili.

A seconda della tipologia di materiale in frana, se roccia o terreno, si parla principalmente di interventi di movimento terra.

RIMODELLAZIONE E PROFILATURA CON MOVIMENTI DI TERRA

Nel caso di pendii naturali o artificiali si può prevedere la riprofilatura con gradonature intermedie, il cui effetto è quello di conferire una minore inclinazione media, cui corrisponde un fattore di sicurezza più elevato.

DISGAGGIO

Per disgaggio si intende la rimozione di elementi instabili presenti in parete, sul ciglio o su cenge. Nel caso di un pendio in una massa rocciosa che presenta una porzione di roccia con una condizione di stabilità particolarmente critica, risulta tecnicamente fattibile ed economicamente possibile l'asportazione totale di quella porzione rocciosa. In questo metodo ci sono problematiche operative da risolvere, quali la scelta del metodo di distacco, possibili interferenze con strutture adiacenti o infrastrutture, e problematiche di progetto, quali lo studio delle ipotetiche traiettorie di caduta e aree di deposito.

ABBATTIMENTO CON ESPLOSIVO O CON ALTRI AGENTI CHIMICI

Nel caso fosse necessario eliminare grandi volumi di roccia, o nel caso di specifici problemi geostrutturali, è possibile ricorrere all'abbattimento con esplosivo. Questo metodo è certamente vantaggioso per quel che riguarda la velocità esecutiva, il basso costo e la possibilità di intervenire su grandi volumi anche in aree disagiate. Tuttavia, essendo una tecnica che impiega una grande quantità di energia, risulta essere particolarmente delicata in quanto se non ben controllata può creare danni all'ammasso roccioso sottostante, o creare problematiche alle infrastrutture vicine, motivo di numerosi vincoli. Per queste svariate ragioni questo metodo richiede la collaborazione di esperti specifici.

1.4.6 Ingegneria naturalistica

Il crescente interesse sul piano giuridico, sociale, tecnico e scientifico nell'ambito della protezione del territorio rende necessario inserire l'ingegneria naturalistica tra le discipline e tecniche da considerare indispensabili nell'affrontare problematiche legate alla stabilità dei versanti. Gli interventi di questo tipo, eco-compatibili, sono infatti efficienti per quel che riguarda la prevenzione e la risoluzione di fenomeni di dissesto idrogeologico, permettendo al contempo di salvaguardare o recuperare l'ambiente e il paesaggio.

L'Ingegneria Naturalistica prevede infatti [4] *l'utilizzo del materiale vegetale vivo e del legname come materiale da costruzione, in abbinamento in taluni casi con materiali inerti come pietrame e massi, terra, legname, tombino, ferro e acciaio, fibre vegetali e sintetiche e permette di risolvere un'ampia gamma di problematiche di rivegetazione, consolidamento e drenaggio di versanti, scarpate o sponde.*

Alla base di questa tecnica è quindi la limitazione dell'uso del cemento a favore del materiale vegetale, per favorire lo sviluppo dell'apparato radicale che ha un'azione di rinforzo del terreno, e per favorire il corretto assorbimento delle acque, con l'obiettivo di limitare il ruscellamento. Vantaggio di questa tecnica è la relativa economia, per i brevi tempi di realizzazione e per la possibilità di reperire i materiali direttamente sul luogo di intervento, mentre a svantaggio di questa tipologia di interventi c'è la

necessità di una manutenzione attenta e periodica, non sempre di facile realizzazione.

TECNICHE DI RIVEGETAZIONE

Le tecniche di rivegetazione si possono suddividere in inerbimento, messa a dimora di arbusti o talee con realizzazione di gradonate vive e impiego di reti in fibra naturale, tutte con l'obiettivo comune di limitare l'erosione superficiale e il ruscellamento.

Per l'**inerbimento** sono previste due differenti modalità di semina: la semina manuale (o a spaglio) e la semina idraulica (o idrosemina). In entrambi i casi è necessario utilizzare specie erbacee adatte al terreno sul quale si interviene, e tenere in considerazione il clima e la quota del sito per ottimizzare l'efficienza dell'attecchimento. In taluni casi è possibile prevedere la distribuzione di una coltre protettiva del suolo, costituita da fibre naturali, quale ad esempio la paglia, messa in posa a seguito della semina. Gli inerbimenti sono particolarmente adatti su versanti con pendenze elevate, in quanto gli apparati radicali hanno la funzione di stabilizzare il terreno e proteggerlo dall'erosione e il ruscellamento superficiali, dovuti all'azione della pioggia battente.

Le **talee** sono parti di piante vive che sono spesso utilizzate per la rivegetazione; per un corretto utilizzo di questa tecnica, sono necessari un'attenta calendarizzazione e numerosi accorgimenti nelle fasi operative, dall'approvvigionamento, alla conservazione, al trasporto, fino alla messa a dimora. Un accorgimento tra tutti è l'individuazione del riposo vegetativo per la messa a dimora, variabile nelle diverse stagioni a seconda dell'ambiente e della specie vegetale.

Un tipo di intervento che utilizza la messa a dimora di materiale vegetativo è la *gradonata viva*. Essa prevede le seguenti tre fasi realizzative:

- lo scavo manuale o meccanico, lungo le linee di livello, di una banchina di alcune decine di centimetri di profondità, con una contropendenza verso l'interno di circa il 10% e un interasse tra le banchine di 1.5-3 m;
- la messa a dimora orizzontale delle talee, in numero di circa 20 al metro, compatibilmente con le condizioni del pendio e l'interramento per circa tre quarti della loro lunghezza;

- la potatura delle talee.

Le **reti in fibra naturale** sono una soluzione sempre più apprezzata per i versanti più pendenti, in quanto hanno la doppia funzione di proteggere dall'erosione nel primo periodo seguente alla posa, consentendo lo sviluppo della vegetazione al di sotto della stessa, e al tempo stesso di fornire nutrimento alla vegetazione, con lo sgretolamento dei materiali biodegradabili - tipicamente fibre di juta o cocco. La posa di reti in fibra naturale richiede quindi comunque di ricorrere alle tecniche di inerbimento tramite semina, e in alcuni casi è può prevedere l'integrazione dell'intervento con delle reti metalliche che devono però essere ulteriormente ancorate, portando quindi a costi notevolmente maggiori che per un semplice reinverdimento.

OPERE IN LEGNAME

Le opere in legname possono seguire diverse metodologie costruttive, che di seguito riportiamo con un grado di complessità crescente.

Le **palificate semplici**, o palizzate, sono realizzate disponendo un tondame scortecciato idoneo e durabile, tipicamente castagno o larice, trasversalmente alla linea di massima pendenza, e fissandolo a valle in profondità con dei picchetti metallici, generalmente d'acciaio. La struttura può essere formata anche da più pali (**palificate semplici a pali sovrapposti**), però senza mai superare i 50 cm di altezza.

Le **palificate vive di sostegno a una parete** sono un'evoluzione delle palificate semplici, rispetto alle quali vengono aggiunti dei pali trasversali, anch'essi ancorati al terreno da picchetti in acciaio ad aderenza migliorata. I pali trasversali, detti anche traversi, sono inoltre infissi nel pendio per dare una maggiore stabilità e capacità di consolidamento alla palificata, che viene quindi denominata anche palificata ad infissione.

Un'ulteriore evoluzione sono le **palificate vive di sostegno a doppia parete**, generalmente riconosciute come palificate doppie. In questi manufatti viene aggiunta un'ulteriore fila interna di traversi, mentre lo spazio tra le due file viene riempito di materiale inerte e di materiale vegetale. In questo intervento lo scavo richiesto è

dunque abbastanza profondo ma la struttura è considerata autoportante e in grado di resistere a spinte ben più elevate rispetto alle palificate precedentemente descritte.

Tutti questi tipi di palificate richiedono sempre l'integrazione della messa a dimora di talee e talvolta di reti in fibra naturale, a ulteriore conferma dell'importanza della sinergia delle varie tecniche di intervento.

2 Frana di Limone Piemonte

Il presente lavoro di tesi, come già esplicitato nell'introduzione, ha come oggetto di studio un fenomeno franoso in atto nel territorio del comune di Limone Piemonte, in provincia di Cuneo, nei pressi della stazione ferroviaria.

2.1 Descrizione del caso

La stazione ferroviaria di Limone Piemonte si trova sulla tratta della linea ferroviaria Cuneo-Ventimiglia, anche detta linea del Tenda, al confine tra Italia e Francia. Questa linea fu messa in funzione nel tratto fino alla stazione suddetta a partire dalla fine del 1800, interrotta per un periodo a seguito della seconda guerra mondiale, e solamente negli anni '70 riprese il concreto riarmo e riutilizzo.

Per la particolarità dell'ambiente in cui si trova, tutta la linea è interessata da numerose opere ingegneristiche di vario tipo, all'aperto e in sotterraneo, maggiori o minori, ma comunque tutte di fondamentale importanza per il suo funzionamento.

Il fenomeno franoso che interessa il pendio prospiciente la stazione di Limone Piemonte è dunque uno dei tanti fenomeni che hanno la potenzialità di interferire con tale linea, ma è reso particolarmente interessante dalla sua evoluzione nel tempo. I primi movimenti registrati e i primi studi ad essi connessi, risalgono infatti agli anni immediatamente successivi alla ripresa del funzionamento della linea, anni in cui la sensibilità verso tematiche ambientali di questo tipo era certamente maggiore rispetto agli anni di costruzione della linea.

Il pendio in questione, come si vedrà nel capitolo successivo, è stato negli anni oggetto di numerosi studi e di alcuni interventi di monitoraggio e consolidamento, vista la sua naturale propensione a scivolare lentamente verso valle. Nei capitoli successivi si ripropone nel dettaglio l'evoluzione di tali studi e dei loro risultati, e dei conseguenti interventi di consolidamento, compatibilmente con l'evoluzione del fenomeno franoso.

Di seguito si propone un inquadramento del sito di interesse, sia dal punto di vista geografico che geologico, sia spaziale che temporale.

2.2 Inquadramento geografico

Il comune di Limone Piemonte si trova nel Sud della provincia di Cuneo, nelle Alpi Sud-occidentali al confine tra Italia e Francia, specificatamente nella valle dell'alto bacino del torrente Vermenagna (Figura 2.1).



Figura 2.1: Inquadramento geografico di Limone Piemonte rispetto alla Provincia di Cuneo

L'abitato di Limone Piemonte è attraversato dal torrente Vermenagna ed è raggiungibile tramite la SS 20 "del Colle di Tenda", o con la linea ferroviaria che collega Cuneo e Ventimiglia, passando per una tratta in territorio francese.

L'area di studio, interessata dalla frana, è posta a Nord dell'abitato di Limone Piemonte, sul versante collinare-montuoso che si affaccia a Ovest, prospiciente la stazione ferroviaria.

2.3 Descrizione geologica e geomorfologica locale

Secondo la zonazione geologica, l'area di interesse della frana giace nella Zona Brianzonese, caratterizzata dalla presenza di formazioni con un'orientazione generale in direzione Nord Ovest - Sud Est.

I versanti della sponda orografica destra di tale Zona sono caratterizzati dalla presenza di scisti quarzitici e sericitici di vari colori, calcari grigiastri dolomitici, sci-

sti arenacei e argillosi, mentre i versanti della sponda orografica opposta presentano ampie zone di detriti di falda e scisti quarzitici e calcari dolomitici. Il fondovalle invece, sostanzialmente occupato dall'abitato di Limone Piemonte, presenta alluvioni terrazzate, talvolta cementate, del quaternario.

In corrispondenza dell'abitato, l'asse vallivo del Torrente Vermenagna ha un andamento sub-parallelo alle principali strutture geologiche, con strati e bancate posti a reggipoggio sui versanti del fianco orografico destro (quello interessato dal fenomeno franoso qui oggetto di studio), a franapoggio sul versante opposto.

3 Evoluzione del fenomeno

Il fenomeno franoso prospiciente la Stazione ferroviaria di Limone Piemonte è conosciuto e studiato da circa quarant'anni. Il monitoraggio di tale frana risulta infatti essere di fondamentale importanza, in quanto in caso di criticità potrebbe creare disagio alla linea ferroviaria e ai suoi utenti. Le prime documentazioni risalgono dunque al 1979, e il suo studio è stato affrontato a più riprese negli anni successivi, fino alla realizzazione di importanti interventi di stabilizzazione nel 2005, integrati con ulteriori interventi nell'inverno 2017/2018.

3.1 Indagini e studi effettuati sul versante

3.1.1 Studi e interventi del 1979, 1982, fino al 2000

Come detto, le prime documentazioni risalgono al 1979, anno in cui lo Studio Geotecnico Italiano fece un primo studio esaminando il movimento franoso in questione, indicando un programma lavori per il monitoraggio e la messa in sicurezza dell'area, riassunti in una "Specificazione Tecnica". Sulla base di tale programma nel 1982 vennero dunque effettuate delle indagini al fine di evidenziare la successione stratigrafica della formazione geologica interessata dal pendio in frana. Furono eseguiti tre sondaggi a carotaggio continuo per il prelievo di campioni disturbati e indisturbati; i tre carotaggi, cartografati in Figura 3.1, ad asse verticale, allineati lungo la direzione di immersione del versante, avevano una lunghezza di circa 50 m, e una profondità rispettivamente di 18 m per S1, 24 m per S2, 21.5 m per S3.

I risultati completi sono riportati nell'*Allegato A*, e dalla loro analisi è possibile osservare una buona correlazione delle formazioni intercettate dai sondaggi, che denota quindi una certa continuità e regolarità delle bancate. Si può dunque ricavare la successione stratigrafica, dall'alto verso il basso, descritta come segue [6]:

- *terreno di copertura di tipo eluvio-colluviale, con uno spessore medio di 2.5 m;*
- *scisti filladici, di colore dal verdastro al violaceo, con alterazione più o meno marcata in argilla e con scistosità ancora riconoscibile, dello spessore medio di circa 3 m;*

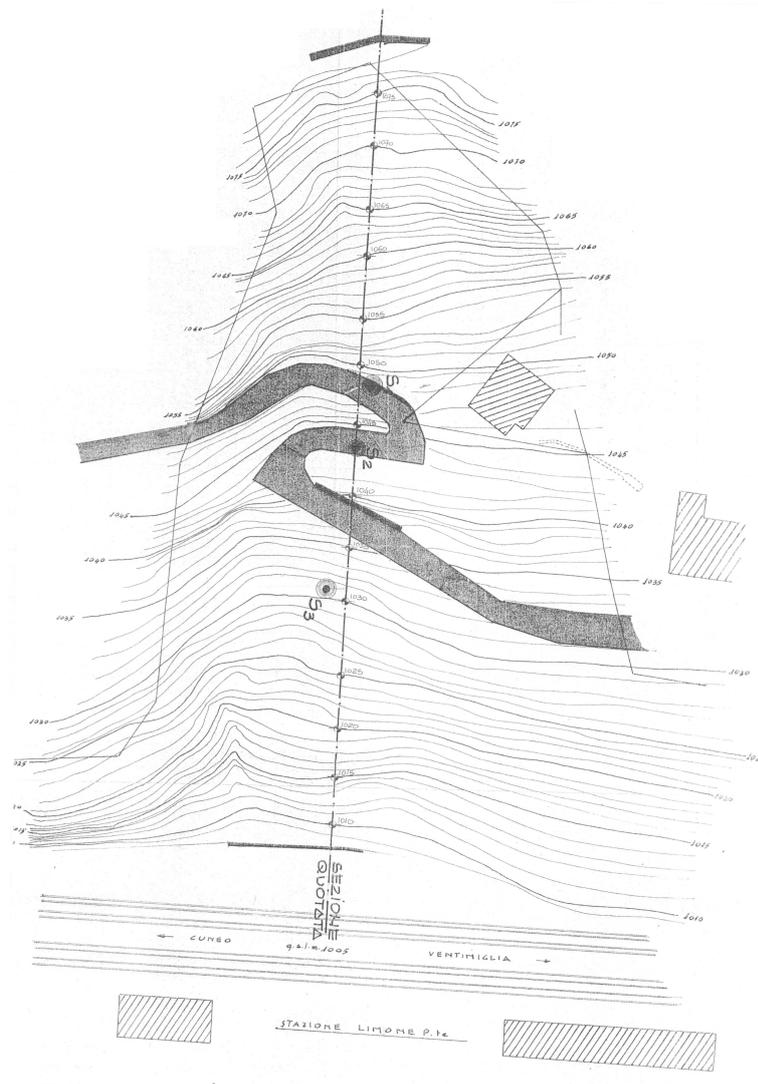


Figura 3.1: Topografia del versante, con il posizionamento dei 3 sondaggi effettuati nel 1982

- scisti sericitici verdastri, da parzialmente a fortemente alterati e fratturati, con spessore crescente (da 3 a 12 m) passando dal sondaggio più a monte (S1) al sondaggio più a valle (S3);
- scisti sericitici più compatti, laminati, a tratti parzialmente alterati, riscontrabili ad una profondità di 8-15 m dalla superficie del suolo.

Nei fori dei sondaggi S1 e S3, furono installati due piezometri di tipo Casagrande a doppio tubo aperto, le cui misurazioni son riportate nell'Allegato A, mentre il foro del sondaggio S2 fu attrezzato con rivestimento inclinometrico, del quale non sono

stati rinvenuti dati, e che all'ispezione del 2005 risultò ostruito al passaggio della sonda, indice dell'attività del corpo franoso.

Secondo le fonti dell'epoca, gli interventi di stabilizzazione effettuati a seguito delle indagini geognostiche furono:

- regimazione delle acque superficiali attraverso linee di impluvio artificiali taglianti trasversalmente il versante, raccogliendo le acque in due canalette cementate ubicate alla base del versante, poste lungo la linea di massima pendenza in un'area di impluvio naturale;
- contenimento del corpo di frana con muro a secco alto 5-6 metri per una lunghezza di 50 m, con pendenza di 45° , posto sul piazzale della stazione al piede della scarpata. Esso è tutt'oggi presente, come visibile in Figura 3.2.



Figura 3.2: Muro a secco per il contenimento del corpo di frana - Foto del 30.04.2018

3.1.2 Studi del 2001

Risale all'aprile 2001 lo studio del geologo Lombardo [8], il quale nella relazione presentata alle Ferrovie dello Stato individuò due movimenti franosi apparentemente distinti:

- movimento franoso compreso tra quota 1005 m s.l.m e 1045 m s.l.m, con larghezza variabile da 23 m - in prossimità del muro a secco di Figura 3.2 - a 50 m - nella parte superiore, con inclinazione media del pendio di 25-26°. La superficie interessata dal dissesto è di circa 3400 m², con uno spessore medio del corpo frana lungo la linea di massima pendenza stimato di circa 7-8 m. Assumendo una variazione della profondità della superficie di scorrimento compresa tra i 5 e gli 8 m, risulta che i volumi interessati sono variabili tra i 17000 e 27000 m³. Tale ampio margine di variabilità è dovuto alla non univoca definizione della sezione della massa franosa, la quale può presentare anche superfici multiple con fenomenologie progressive in termini di entità dei movimenti subiti. Non è agevole poter attribuire una netta demarcazione stratigrafica alle coperture rispetto al substrato in posto, a causa delle caratteristiche reologiche degli scisti filladici;
- il secondo movimento franoso si trova immediatamente a monte del precedente, indicativamente tra le quote 1050 m s.l.m. - caratterizzata da aree di accumulo del terreno - e 1079 m s.l.m. - dove sono state individuate rotture del terreno. In questo caso la larghezza è variabile tra 20 e 30 m, per un'area in frana di circa 1650 m²; ipotizzando uno spessore medio del corpo di frana di 3-4 m, il volume risulta essere variabile tra 5000 e 6600 m³.

A seguito delle indagini e degli studi sin qui riportati, era stato installato un sistema di monitoraggio topografico, con l'obiettivo di avere maggiori informazioni qualitative e quantitative sul corpo di frana, valutando l'entità degli spostamenti. Dal febbraio 2003 dunque, un teodolite servoassistito comandato da computer, ubicato all'interno dell'edificio della Stazione di Limone Piemonte, aveva il compito di effettuare delle misurazioni su quattordici capisaldi collocati sul versante. Di questi quattordici capisaldi, quattro furono posizionati al di fuori del corpo di frana, con la funzione di punti fissi di riferimento per il sistema; i restanti dieci furono ubicati all'interno del corpo di frana, come rappresentato in Figura 3.3. Il posizionamento dei capisaldi è riferito al sistema di riferimento Nord-Est-H, con origine la stazione di rilevamento posta all'interno della stazione.

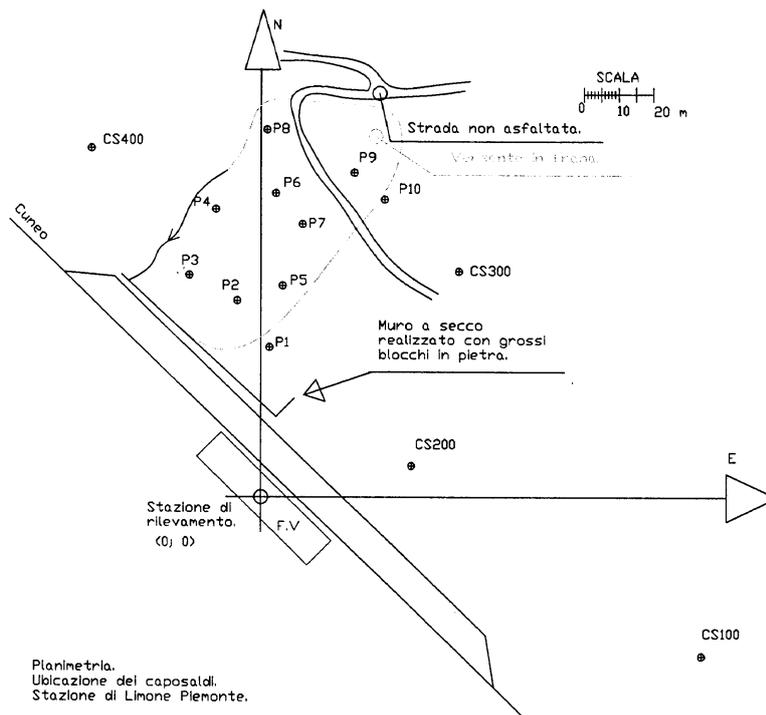


Figura 3.3: Planimetria dei capisaldi in un sistema di riferimento Nord-Est

Nei mesi immediatamente successivi all'installazione, dall'elaborazione dei dati ricavati dal presente monitoraggio topografico, è stato possibile rilevare movimenti pluricentrici, come rappresentato nell'*Allegato B*.

A seguito dello studio dei primi anni duemila, per incrementare il numero di dati e aumentare il livello di conoscenza del versante in frana, nel luglio 2004 viene installato un pluviometro, con inizio delle misurazioni in data 01/07/2004. I grafici pluviometrici derivanti, incrociati con le misure piezometriche nel foro del sondaggio S1, hanno permesso di individuare una modesta correlazione tra gli eventi meteorici e l'oscillazione della falda.

3.1.3 Studi del 2005

Viste le continue mobilitazioni, e l'importanza delle possibili conseguenze di ulteriori scivolamenti, con la possibilità di interferenze con la linea ferroviaria, nella primavera 2005 viene effettuato un nuovo studio del fenomeno franoso, a cura del Politecnico di Torino e nel particolare dagli Ing. Oggeri e Del Greco, con l'obiettivo di individuare dei possibili interventi di stabilizzazione.

Riprendendo gli studi e le indagini degli anni precedenti, vengono effettuate, su dei campioni di terreno prelevati, delle prove per la determinazione delle caratteristiche geotecniche dei materiali (analisi granulometrica, limiti di Atterberg). Tali prove sono finalizzate alla valutazione delle proprietà di resistenza al taglio residua in termini di sforzi efficaci.

A partire da questi dati, e dai dati geologici derivanti dai sondaggi del 1982, viene quindi ricavata una sezione geologica (Figura 3.4) e viene condotta un'analisi di stabilità del pendio, tramite un'analisi a ritroso (back analysis). Sulla base di una riproduzione geometrica e stratigrafica di versante, e la localizzazione della falda superficiale, sono dunque state esaminate diverse ipotesi di calcolo e analizzate con il metodo dell'equilibrio limite con il codice Slide 5.0, Rocscience Inc., Toronto.

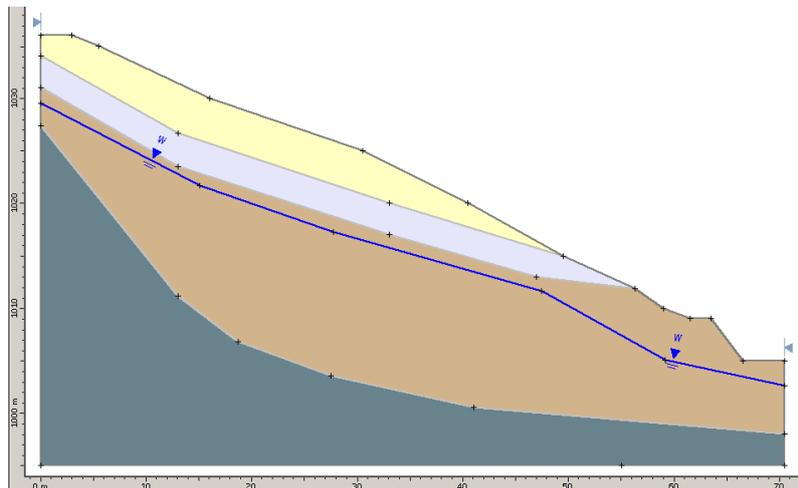


Figura 3.4: Sezione geologica definita nel 2005

Le diverse ipotesi di calcolo e le relative analisi di stabilità, sono state effettuate variando la geometria delle superfici di scorrimento, le condizioni di falda e i parametri geomeccanici, ricercando la configurazione con un fattore di sicurezza prossimo all'unità.

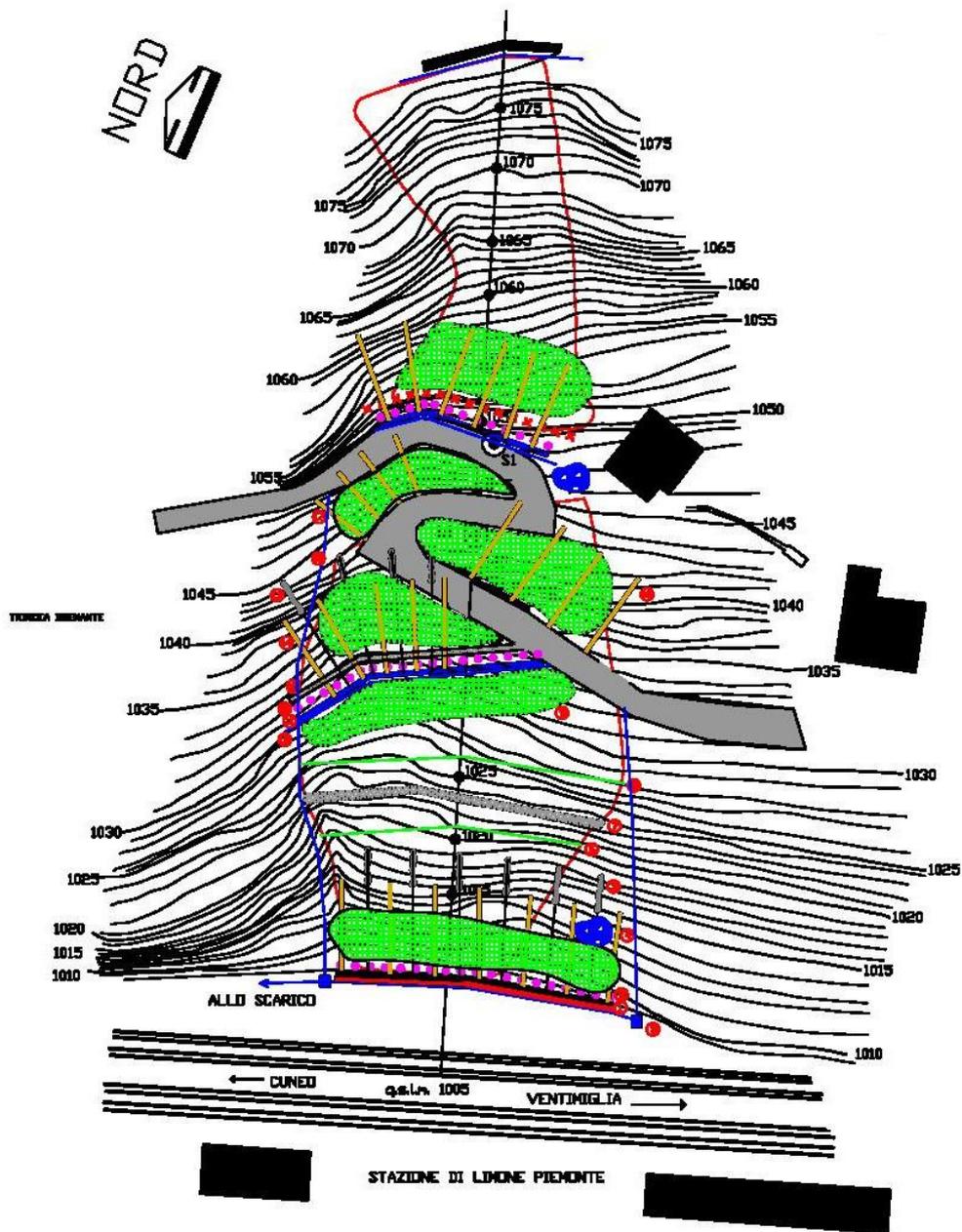
Il confronto delle analisi eseguite ha portato alla distinzione delle seguenti superfici di rottura [6]:

- *superficie meno profonda, mistilinea planare, tale da non coinvolgere il murglione di base, e ubicata a circa 9 m dal piano campagna;*

- *superficie rialzata, mistilinea planare, collocata a 8 m dal piano campagna, con coinvolgimento del muraglione di base;*
- *superficie profonda, curvilinea mista, posizionata a circa 10-11 m dal piano campagna, tale da coinvolgere anche la fondazione del muraglione di base.*

Sulla base di tali risultati, lo studio propone infine il seguente programma di intervento per la stabilizzazione del versante, tramite la riduzione delle pressioni di filtrazione e al miglioramento delle caratteristiche meccaniche (si considerano di seguito solo gli interventi proposti per la frana inferiore, mentre la totalità degli interventi è visibile in Figura 3.5):

- regimazione delle acque superficiali mediante canaletta di intercettazione, posta a monte della frana;
- dreni suborizzontali per la riduzione delle pressioni dovute all'acqua di filtrazione del corpo di frana;
- cortina leggera di micropali iniettata e vincolata in testa con una serie di tiranti permanenti, immediatamente a valle della strada; cortina profonda di micropali iniettata e vincolata in testa con una serie di tiranti permanenti, alla base del corpo di frana;
- trincea drenante a monte della cortina di monte;
- interventi di ingegneria naturalistica: rinforzo con geostuoie nelle zone soggette a dilavamento, e di palificate doppia in legname ubicate nell'area in frana, per una stabilizzazione del cotico superficiale.



LEGENDA

 FURETTO	 PALIZZATA
 MICROPALE	 TERREZA BERNINTE
 LIMITE DELLE AREE DI FANNA	 SILENTE
 CANTILETTA PER SERRAMENTI SUPERFICIALI	 TERRETE
 PALIFICATA	 SERRAMENTA
 PRESSIONE DI RESONANZE	 TORRELLI
	 TRAVE DI INNEA DI CHIUSURA

Figura 3.5: Planimetria degli interventi proposti

3.2 Interventi di consolidamento del 2011

Sulla base dello studio del 2005, nel 2011 vengono infine realizzati degli interventi di consolidamento riguardanti l'intera area di frana, sia superiore che inferiore. Si tenga tuttavia conto del fatto che i tempi dilazionati, nell'arco di tempo privo di interventi, intercorrente fra la fase di progettazione e la fase esecutiva, potrebbero aver influito in maniera negativa sul fenomeno franoso, che nel frattempo è continuato a muoversi ed evolversi.

Gli interventi effettuati vengono progettati sulla base dei risultati delle parametrizzazioni geomeccaniche del Politecnico di Torino, e riprendono per gran parte il programma proposto nella suddetta relazione.

3.2.1 Programma di intervento

Il programma di consolidamento ricopre entrambe le aree in frana, sia superiore che inferiore, mentre di seguito verranno descritti esclusivamente gli interventi realizzati tra le quote 1005 e 1035 m s.l.m., ossia riferiti alla frana inferiore.

CORTINE DI MICROPALI INTIRANTATI



Figura 3.6: Cordolo di micropali intirantati al livello 1 - Foto del 04.10.2017

Vengono realizzati due cordoli di micropali intirantati, alle quote 1008 e 1031 m s.l.m., d'ora in poi definiti rispettivamente come livello 1 e livello 2 (Figura 3.6).

Per il **livello 1** viene effettuata una fila di micropali verticali e inclinati a cavalletto, sia verso monte che verso valle, con le seguenti caratteristiche:

- lunghezza 18 m;
- diametro esterno 139 mm;
- spessore nominale 12 mm;
- interasse pali verticali 0.37 m;
- interasse pali obliqui verso monte 6 m, con inclinazione di 15°;
- interasse pali obliqui verso valle 6 m, con inclinazione di 15°;

La cortina di micropali è inoltre intirantata con una serie di tiranti con le seguenti caratteristiche:

- tiranti da 4 trefoli da 100 t;
- interasse 1.5 m;
- inclinazione rispetto all'orizzontale 5°;
- lunghezza tirante 30 m, con una fondazione di 12m.

Per il **livello 2** viene invece effettuata una fila di micropali verticali e inclinati a cavalletto solamente verso monte, con le seguenti caratteristiche:

- lunghezza 15 m;
- diametro esterno 139 mm;
- spessore nominale 12 mm;
- interasse pali verticali 0.75 m;
- interasse pali obliqui verso monte 6 m, con inclinazione di 15°;
- interasse pali obliqui verso valle 6 m, con inclinazione di 15°;

La cortina di micropali è inoltre intirantata con una serie di tiranti con le seguenti caratteristiche:

- tiranti da 4 trefoli da 60 t;
- interasse 1.5 m;
- inclinazione rispetto all'orizzontale 5°;

- lunghezza tirante 30 m, con una fondazione di 12m.

DRENI PROFONDI

Per la riduzione della saturazione causata dall'acqua di infiltrazione nel corpo di frana e per evitare innalzamenti della falda, sono stati realizzate due file di dreni suborizzontali (Figura 3.7). I dreni sono stati realizzati immediatamente a monte delle due file di tiranti, con le seguenti caratteristiche, differenti tra i due livelli solamente per quel che riguarda la lunghezza:



Figura 3.7: Fila di dreni in corrispondenza del livello 1 - Foto del 04.10.2017

- lunghezza 30 m per il livello 1, 20 m per il livello 2;
- diametro 100 mm;
- interasse 1.5 m;
- inclinazione rispetto all'orizzontale 7°.

GEOSTUOIA

Immediatamente a monte del livello 1, e a monte e a valle del livello 2, sono state poste delle geostuoie, a rinforzo delle zone soggette a dilavamento superficiale.

3.2.2 Sistemi di monitoraggio

A seguito degli interventi di consolidamento, viene inoltre attivato il seguente programma di monitoraggio:

- ripristino del sistema di monitoraggio tramite teodolite servoassistito, posto all'interno della Stazione Ferroviaria, e vengono riposizionate le mire ottiche (Figura 3.8);
- monitoraggio geotecnico con posa di tre colonne inclinometriche e un piezometro a tubo aperto immediatamente a valle del livello 2;
- installazione di celle di carico sulla testa dei tiranti delle travi (3 sulla trave di monte e 3 su quella di valle) - Figura 3.8.



Figura 3.8: Cella di carico su un tirante di valle e mira ottica

4 Monitoraggi, indagini e progettazione pre-opera

A partire dal 2013 si è manifestata una parziale riattivazione del movimento franoso, in particolar modo nella porzione di versante compresa tra gli interventi di consolidamento effettuati nel 2011.

Come riportato nella relazione geologica del Progetto Esecutivo del 2017 a cura dell'Ing. Marengo, il rilevamento sul campo ha individuato un tension crack immediatamente a valle del reticolo di consolidamento di monte e *evidenze di modesti rigonfiamenti non specificatamente localizzabili lungo lo sviluppo del versante a valle, sino in prossimità del reticolo di micropali tirantato del livello 1*. Lo sviluppo trasversale dello scivolamento viene considerato di circa 50 m, mentre lo sviluppo longitudinale di circa 40 m, con un dislivello di 28-30 (da 1035 a 1005 m s.l.m. circa).

4.1 Informazioni da sistemi di monitoraggio

Riprendendo i sistemi di monitoraggio installati precedentemente descritti, si procede con la raccolta dei dati recenti, relativi agli ultimi due anni, resi a disposizione da tali monitoraggi:

- i tre sondaggi effettuati nel 1982, dei quali sono a disposizione i risultati stratigrafici, non danno informazioni recenti, in quanto: il piezometro di tipo Casagrande installato nel foro del sondaggio S1 è fuoriuso; medesima situazione per l'inclinometro installato nel foro del sondaggio S2, inutilizzabile già dal 2005, a seguito della verificata ostruzione del passaggio della sonda a profondità di 4.75 m, probabilmente a causa del movimento franoso;
- del sistema di monitoraggio topografico in continuo, mediante teodolite servoassistito, ripristinato a seguito dei lavori di consolidamento del 2011, non si hanno risultanze in quanto il suo utilizzo è caduto in disuso;
- dei monitoraggi geotecnici messi in opera a seguito degli interventi del 2011, tre inclinometri e un piezometro, non si hanno misurazioni, in quanto test recenti ne hanno verificato l'eccessiva deformazione che ne impedisce l'utilizzo;

- le celle di carico installate sulle teste dei tiranti messi in opera nel 2011 sono leggibili come segue:
 - per i tiranti di monte, valori compresi tra 260-270 kN, in linea con i tiri dichiarati da progetto;
 - per i tiranti di valle, valori compresi tra 415 e 480 kN, in linea con i tiri dichiarati da progetto.

Si evidenzia dunque la scarsità di informazioni derivanti dai sistemi di monitoraggio installati nel corso degli anni. Ad eccezione dei valori dei tiri sulle celle di carico infatti, i monitoraggi inclinometrici, piezometrici e topografici non forniscono dati alcuni, in taluni casi anche a causa di una mancanza sul lungo termine della continuità delle letture di tali monitoraggi, che vengono spesso abbandonati dopo qualche anno.

4.2 Indagini 2017

Nella primavera 2017, data la riattivazione del movimento, e il conseguente pericolo per la circolazione ferroviaria, viene prevista la realizzazione di interventi in condizioni di urgenza, per la stabilizzazione del versante.

Nel giugno dello stesso anno 2017 viene pertanto effettuata una nuova campagna geognostica che prevede due perforazioni a carotaggio continuo, per ottenere ulteriori e più recenti informazioni sulla stratigrafia del versante, e per installare un tubo piezometrico e un tubo inclinometrico che possano supplire alla carenza di dati dei precedenti sistemi di monitoraggio.

Gli estratti stratigrafici di tali perforazioni, riportati nell'*Allegato C*, sono quindi utilizzati per ridefinire la sezione geologica, compatibilmente con quella già individuata nello studio del 2005. Per fare questo vengono dunque incrociati i dati delle due campagne geognostiche, pervenendo ad una stratigrafia che di base varia le profondità degli strati in corrispondenza dei sondaggi più recenti.

La nuova stratigrafia di riferimento, rappresentata in Figura 4.1 individua dunque alcune minime variazioni rispetto a quella del 2005, rilevando le seguenti modifiche:

- il *terreno di copertura* passa da una profondità media di 2,5 m a una profondità media di poco inferiore ai 4 m;
- la potenza degli *scisti filladici alterati*, in precedenza pari a circa 3 m, varia ora dagli 8 ai 5.8 m;
- la potenza degli *scisti sericitici non alterati*, che prima variava dai 3 ai 12 m, attualmente risulta variare tra i 10 e i 6.2 m.

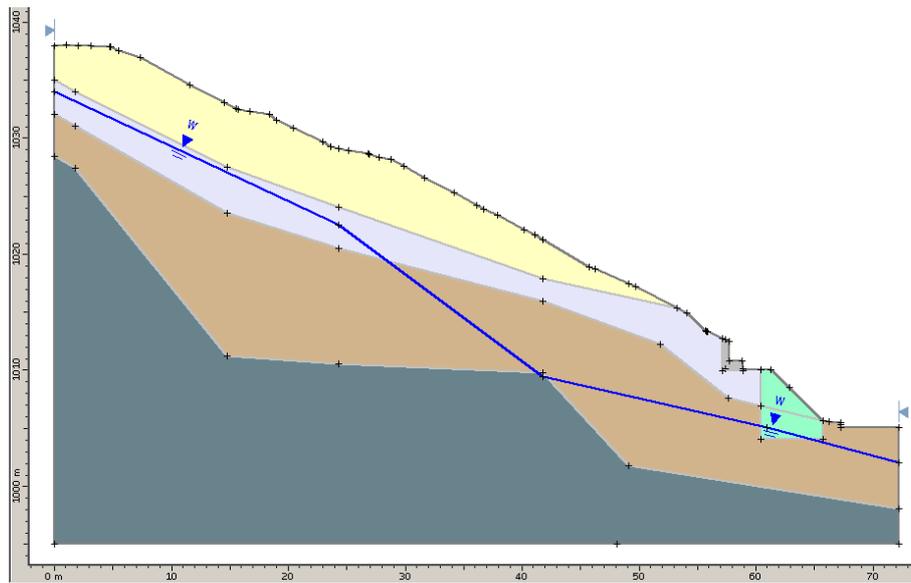


Figura 4.1: Sezione geologica di progetto individuata nel 2017

4.3 Nuova progettazione

Il piano di interventi in condizione d'urgenza, attualmente in fase di realizzazione, è stato sviluppato effettuando le seguenti considerazioni:

- per la stratigrafia di progetto si fa riferimento a quanto definito nel paragrafo precedente (Figura 4.1), e quindi riprendendo l'assetto litostratigrafico definito nel 2005, mediato con quanto adottato nella progettazione delle opere di prima fase e con le risultanze della campagna di indagine condotta nel giugno 2017;
- non essendo state individuate fessurazioni riguardanti i cordoli dei livelli 1 e 2, e non avendo registrato incrementi dei tiri sulle celle di carico, è stato possibile

ipotizzare che l'attuale movimento interessi la porzione di frana compresa tra i due livelli, e pertanto è in questa porzione che si va ad intervenire;

- si fa riferimento al set di parametri geotecnici già adottati per gli interventi del 2011, facenti riferimento alla precedente fase progettuale del 2005 a cura del Politecnico di Torino, riportati in Tabella 4.1;
- la presenza di precedenti interventi profondi (micropali, tiranti e dreni) condiziona notevolmente la geometria delle scelte progettuali effettuabili;
- la stabilizzazione del versante segue una procedura per fasi e livelli successivi, con riferimento alle caratteristiche del dissesto, alla geometria del versante, e alle disponibilità economiche.

Tabella 4.1: Set di parametri geotecnici utilizzati in fase progettuale

¹	γ (kN/m^3)	c' (kPa)	Φ' ($^\circ$)
Copertura eluvio-colluviale	22	4	24
Scisti filladici alterati	23-24	4	24
Scisti sericitici meno alterati	23-24	7	30
Substrato	24-25	200	35

4.3.1 Analisi di stabilità del fenomeno franoso

In fase di progettazione, al fine di validare la parametrizzazione geotecnica della Tabella 4.1 per le verifiche progettuali, sono state condotte alcune analisi di stabilità del versante nelle condizioni corrispondenti attuali. Per effettuare tali analisi si è ricorso al codice Slide 5.0, - proposto da Rocscience Inc., Toronto - che applica il teoria dell'equilibrio limite; per ogni analisi il fattore di sicurezza è stato calcolato con il metodo di Janbu semplificato, che risolve le equazioni di equilibrio alla traslazione e alla rotazione di ogni concio, e confrontato con i fattori di sicurezza risultanti

¹dove: γ è il peso di volume, c' è la coesione, Φ' è l'angolo di attrito

con i metodi di Bishop e Morgensten & Price.

In questo contesto, si è posta prevalente attenzione alle ipotesi riguardanti la falda freatica, la quale potrebbe essere la principale causa scatenante del dissesto per l'innalzamento della falda in corrispondenza di importanti eventi meteorici. Sono stati inoltre imposti dei limiti per la definizione della superficie di scorrimento, imponendo che avesse il suo principio immediatamente a valle del livello 2 di interventi, compatibilmente con l'individuazione del tension crack.

Di seguito sono sinteticamente riportate le analisi di stabilità condotte, variando l'ipotesi di superficie di scivolamento circolare o non circolare e ipotizzando un innalzamento della falda; in Tabella 4.2 sono invece riportati i diversi fattori di sicurezza ottenuti variando le ipotesi sulle condizioni di falda e le ipotesi sulla superficie di scorrimento.

Tabella 4.2: Fattori di sicurezza nelle diverse ipotesi e con i diversi metodi

Ipotesi di verifica	Janbu	Bishop	M&P
Condizioni attuali - sup. circolare	1.082	1.108	1.108
Innalzamento falda - sup. circolare	1.026	1.058	1.058
Condizioni attuali - sup. non circolare	1.132	1.180	1.211
Innalzamento falda - sup. non circolare	1.125	1.080	1.157

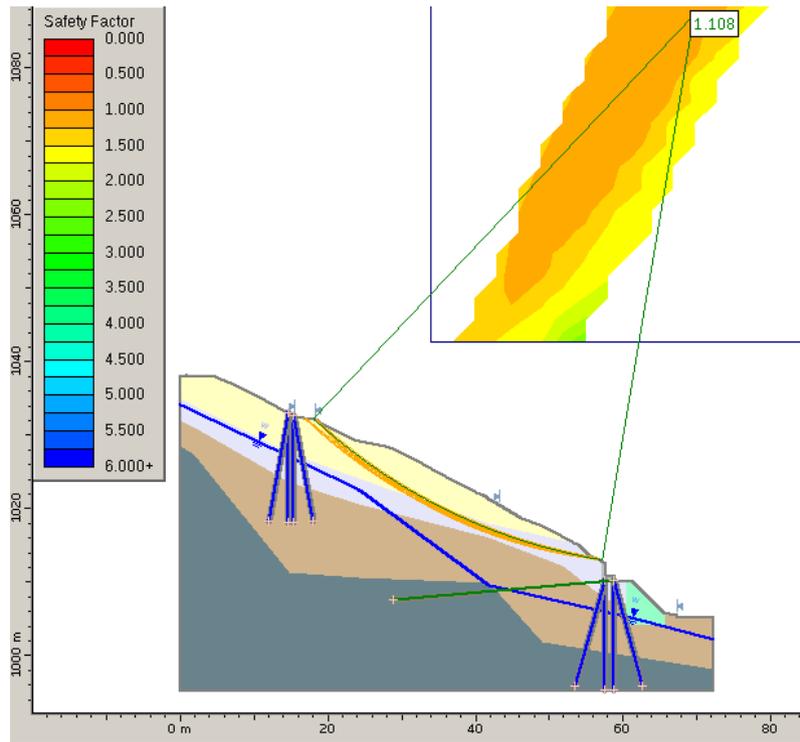


Figura 4.2: Risultati analisi di stabilità del versante nelle condizioni attuali, ipotizzando superficie circolare

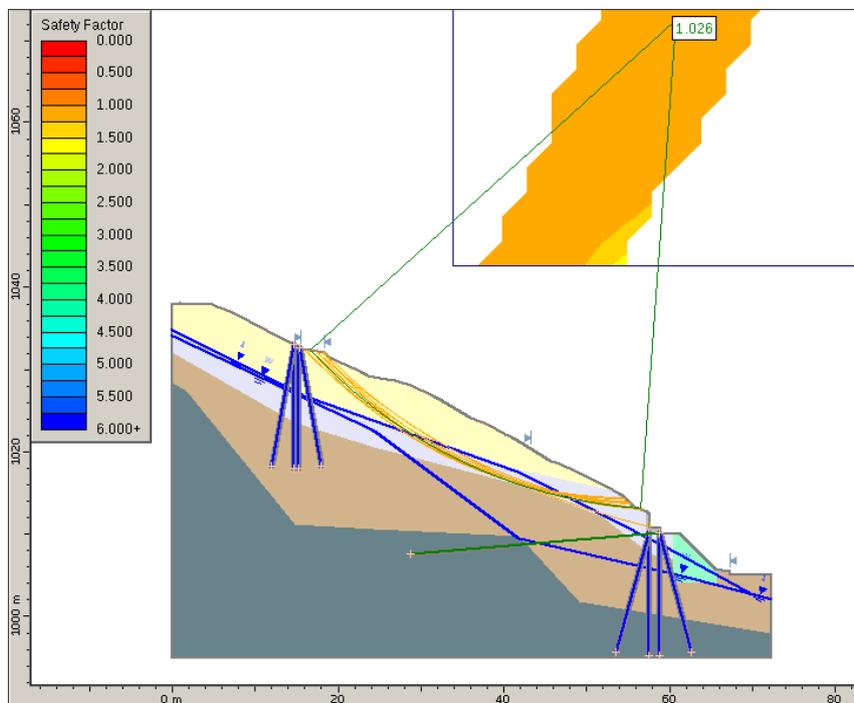


Figura 4.3: Risultati analisi di stabilità del versante nelle condizioni di innalzamento di falda, ipotizzando superficie circolare

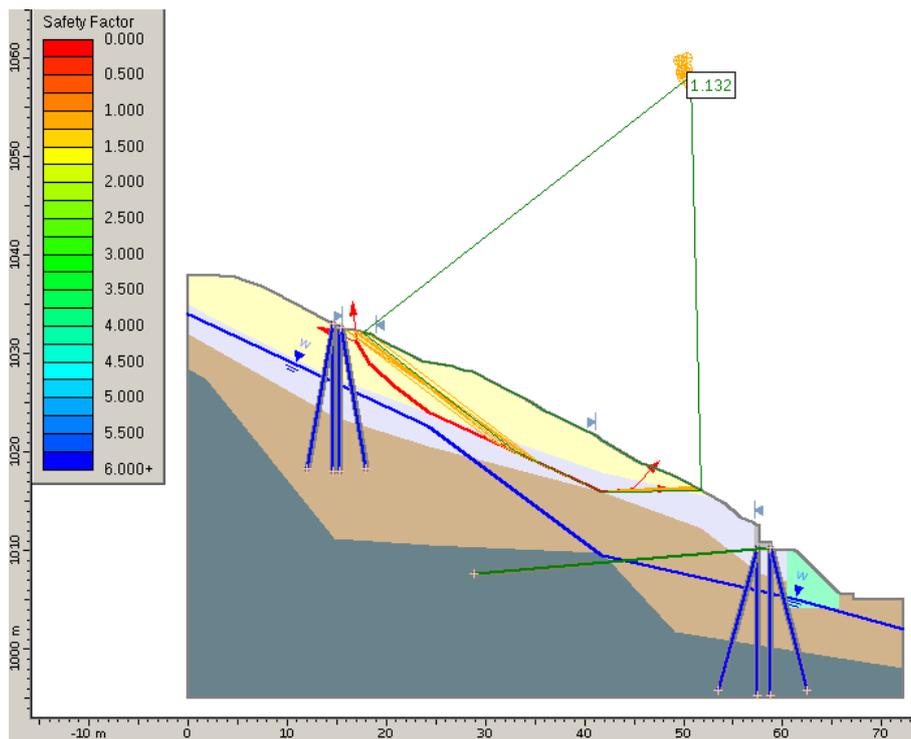


Figura 4.4: Risultati analisi di stabilità del versante nelle condizioni attuali, ipotizzando superficie non circolare

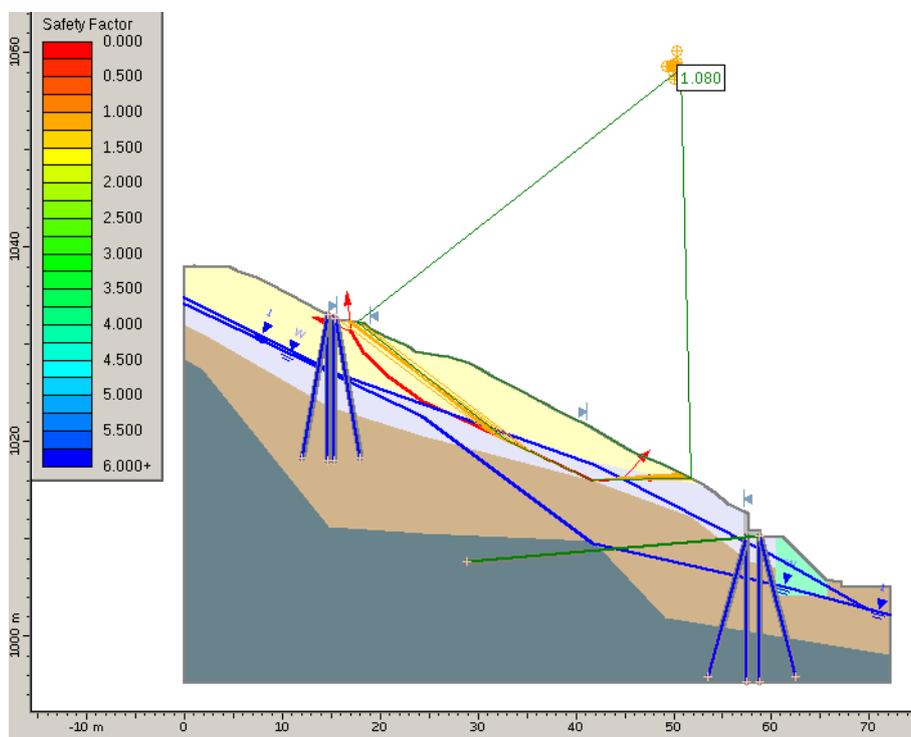


Figura 4.5: Risultati analisi di stabilità del versante nelle condizioni di innalzamento di falda, ipotizzando superficie non circolare

4.3.2 Interventi in progetto

Il piano di interventi prevede il miglioramento delle attuali condizioni di dissesto mediante drenaggio profondo delle acque tramite microdreni, interventi di consolidamento profondo tramite sistemi di micropali e tiranti, e regimazione delle acque superficiali tramite canalette. La progettazione è stata effettuata ai sensi delle Norme Tecniche delle Costruzioni DM 14/01/08. ²

Come da relazione geotecnica [11], gli interventi in progetto sono:

reticoli di micropali ancorati con tirantature: con questo intervento su due livelli si intende integrare il consolidamento profondo del corpo di frana, immorsando le tirantature nel substrato, necessariamente al di sotto della superficie di scorrimento. Come già sottolineato, la presenza di precedenti opere profonde influenza e vincola pesantemente le scelte progettuali possibili: è stato infatti individuato solamente uno stretto corridoio nel quale poter operare, localizzato all'incirca a metà tra il livello 1 e il livello 2;

batteria di microdreni: il drenaggio profondo del corpo di frana è reso indispensabile per la presenza di importanti venute d'acqua localizzate a valle del livello 2, motivo per cui la batteria è progettata in corrispondenza del cordolo tirantato superiore;

riprofilatura superficiale: in funzione delle condizioni assunte dal versante durante la realizzazione degli interventi, si prevede una riprofilatura superficiale del versante ed eventualmente interventi di protezione dal ruscellamento e dall'erosione superficiale.

²Nota: la data di progetto è antecedente l'uscita delle nuove NTC 2018

5 Interventi in atto

Il set di parametri geotecnici utilizzati per la progettazione sono, come già detto, quelli di riferimento adottati già nella progettazione di prima fase, riportati nuovamente in Tabella 5.3.

Tabella 5.3: Set di parametri geotecnici utilizzati in fase progettuale

³	γ (kN/m^3)	c' (kPa)	Φ' ($^\circ$)
Copertura eluvio-colluviale	22	4	24
Scisti filladici alterati	23-24	4	24
Scisti sericitici meno alterati	23-24	7	30
Substrato	24-25	200	35

5.1 Micropali

L'intervento in progetto prevede la realizzazione di due reticoli di micropali aventi la funzione di distribuire l'azione esplicata dai tiranti di ancoraggio all'interno della massa instabile.

Di seguito si riportano le caratteristiche dei micropali:

- realizzazione su tre file, con disposizione a cavalletto;
- diametro 250-260 mm;
- interasse 1 m;
- armatura con profilati tubolari in acciaio con diametro 168.3 mm.

In Figura 5.6 sono rappresentate rispettivamente la macchina di perforazione a distruzione, utilizzata per la realizzazione dei micropali nell'ottobre 2017, e lo stato dei lavori nel novembre 2017.

³dove: γ è il peso di volume, c' è la coesione, Φ' è l'angolo di attrito



Figura 5.6: Successive fasi di lavoro dei micropali

5.2 Tirantature di consolidamento

Sono previsti due livelli di tirantatura nella porzione mediana del versante limitato dagli interventi ai livelli 1 e 2 del 2011. Entrambi i livelli - che da qui in poi verranno semplicemente definiti come *livello di monte* e *livello di valle* - sono dotati di un cordolo di ripartizione e contenimento in cemento armato.

I tiranti sono costituiti da ancoraggi attivi con una lunghezza di 38 m, dei quali 12 di fondazione, interasse di 2 m, e inclinazione di 15° , e cinque trefoli in acciaio armonico con le caratteristiche riportate in Tabella 5.4.

Tabella 5.4: Caratteristiche trefoli in acciaio armonico

Sezione nominale trefolo	$A_{trefolo}$	139	mm^2
Tensione caratteristica di rottura	f_{yk}	1860	N/mm^2

Si effettuano dunque le verifiche di sicurezza sulla base delle scelte progettuali, sulla base delle raccomandazioni AICAP 2012.

RESISTENZA STRUTTURALE TREFOLI DI ARMATURA

Il dimensionamento dell'armatura adotta un tasso di lavoro del 90% del tasso di lavoro ammesso per gli acciai dello stesso tipo dalla Normativa sul c.a.p. vigente, per cui la forza teorica di utilizzazione di ciascun tirante risulta:

$$N_Q = 0.90 \cdot 0.60 \cdot A_s \cdot f_{yk} = 698.06kN$$

dove A_s è l'area della sezione dell'armatura, quindi coincide con la sezione del trefolo per il numero di trefoli.

RESISTENZA ALLO SFILAMENTO DEGLI ANCORAGGI

Si verifica infine la forza limite ultima del terreno, ossia la forza di trazione che provoca lo sfilamento dell'armatura dalla fondazione, oppure lo sfilamento della fondazione stessa dal terreno:

$$N_{fu} = D \cdot l_a \cdot \tau_{qs} \cdot \pi = 56.3kN/m$$

dove:

- $D = \alpha \cdot D_P$ diametro convenzionale della fondazione
 - $\alpha = 1.1$;
 - $D_P = 160mm$ diametro di perforazione;
- τ_{qs} tensione tangenziale ultima, cioè al limite di aderenza, tra la fondazione e il terreno, adottata pari a 220 kPa, secondo la teoria di Bustamante-Doix;

E' importante sottolineare inoltre come l'intervento sia stato progettato prevedendo di poter essere integrato con ulteriori interventi di integrazione, in funzione di potenziali nuovi movimenti, e in questo senso è prevista la conservazione di un idoneo tratto di trefolo oltre la testata di ancoraggio, che consenta un'eventuale ripresa dei tiri, come visibile in Figura 5.7.

5.3 Drenaggio profondo e regimazione superficiale

5.3.1 Drenaggio profondo

In base agli studi precedenti, e all'osservazione in loco in una fase immediatamente antecedente la fase di progettazione, hanno permesso di individuare zone con signi-



Figura 5.7: Tratto di trefoli

ficative venute d'acqua, in funzione delle quali sono state previste importanti opere di drenaggio profondo. In particolare è stata progettata una batteria di microdreni, con lunghezza di 18 m, diametro di 3" e inclinazione di 7-9°; tali dreni scaricano nella cunetta integrata nelle travi di ripartizione.

In Figura 5.8 è rispettivamente rappresentato lo stato dei lavori a seguito della realizzazione nell'autunno 2017, e lo stato dei lavori in data 30.04.2018, che rappresenta il cordolo del livello di monte e la batteria di microdreni con scarico nella cunetta.

Si evidenzia inoltre che durante la fase di esecuzione degli interventi nell'autunno 2017 si è provveduto anche al controllo della pulizia dei dreni realizzati in prima fase di interventi nel 2011, che sono risultati liberi da intasamenti.

5.3.2 Regimazione superficiale

Le acque intercettate dai dreni profondi vengono convogliate verso i limiti laterali esterni del versante, in direzione di impluvi naturali. Da qui vengono raccolte da canalette che scaricano in due pozzi già esistenti ai piedi del pendio.

Questo sistema di canalette era già stato realizzato negli interventi di prima



Figura 5.8: Cordolo del livello di monte e relativa batteria di microdreni

fase e se ne prevede quindi il ripristino, implementato con delle opere di ingegneria naturalistica quali palizzate in legname.

5.4 Riprofilatura

A conclusione degli interventi profondi, si prevede una riprofilatura e risagomatura della superficie del versante nelle zone a monte e a valle dei cordoli. Tale attività è al momento in fase di studio, sulla base delle caratteristiche dei materiali rilevate e delle geometrie venutesi a creare durante le fasi di intervento. I riporti vengono valutati in modo da evitare zone ad elevata acclività; qualora ciò non fosse possibile, si provvederà alla messa in posa di geostuoie antierosiva e interventi di rivegetazione

mediante opere di ingegneria naturalistica.

5.5 Piano di monitoraggio

Vista la scarsità di dati relativi al dissesto in oggetto, è previsto un importante sistema di monitoraggio, prevalentemente geotecnico, per il controllo delle condizioni del versante durante e soprattutto dopo la realizzazione degli interventi.

Il sistema in progetto prevede:

- **5 inclinometri** realizzati con perforazione a carotaggio continuo, per il controllo delle deformazioni del versante. Uno di questi inclinometri è stato installato nel luglio 2017 in occasione delle perforazioni per i sondaggi geognostici, mentre i restanti quattro sono stati realizzati all'inizio dell'autunno con un martello a fondo foro, in corrispondenza della realizzazione dei micropali.

In data 15.11.2017 è stata effettuata la prima misurazione per l'impostazione del fondo a zero, ma ad oggi, luglio 2018, non risultano ulteriori misurazioni.

- **4 piezometri** a tubo aperto per il controllo del livello di falda lungo il versante; tre piezometri sono stati realizzati con perforazione a distruzione di nucleo, mentre il quarto è stato realizzato con carotiere, in occasione dei sondaggi geognostici. Anche per quel riguarda i piezometri, in luglio 2018 non risultano ancora misurazioni di dati.
- **6 celle di carico**, 3 sul livello di monte e 3 sul livello di valle, per il controllo delle variazioni nel tempo dei carichi sui tiranti e l'eventuale ripresa di carico dei medesimi.

Si evidenzia infine che in progetto non è previsto un monitoraggio di tipo topografico, ma che sarebbe una buona pratica ripristinare i capisaldi e il teodolite servoassistito all'interno della stazione, per un ulteriore controllo dei movimenti all'interno del corpo di frana.

6 Grado di definizione del caso e manutenzione a lungo termine

Nei capitoli precedenti sono stati riproposti tutti quelli che sono stati gli studi, i monitoraggi e gli interventi effettuati sul movimento franoso di Limone Piemonte negli ultimi cinquant'anni, secondo i dati a nostra disposizione. Di seguito si procede dunque ad una discussione dello stato e dell'evoluzione di tale fenomeno, sulla base di quanto fin qui descritto.

6.1 Considerazioni sull'instabilità del pendio

La prima considerazione riguarda la quantità dei dati a disposizione: è immediato notare infatti come, sebbene il fenomeno sia conosciuto e studiato da alcune decine di anni, i dati provenienti dai monitoraggi siano relativamente scarsi in quantità, seppure di buona qualità. Avere a disposizione delle serie di dati piezometrici e inclinometrici con una certa continuità nel tempo, avrebbe permesso un grado di conoscenza del fenomeno, della sua superficie di scivolamento e delle sue cause predisponenti e scatenanti, indubbiamente più approfonditi.

I dati a disposizione, opportunamente analizzati ed elaborati, hanno comunque consentito di arrivare ad una buona progettazione di interventi di prima fase, che non hanno fino ad ora subito danni, ma che hanno anzi contribuito alla stabilizzazione di alcune porzioni di versante, e ad una buona progettazione di seconda fase che ha l'obiettivo di stabilizzare la porzione mediana del pendio. Viste le caratteristiche litostratigrafiche del pendio e vista la continua evoluzione del fenomeno, è tuttavia opportuno pensare che difficilmente il fenomeno in oggetto si stabilizzerà del tutto, anche a seguito delle importanti opere in fase di realizzazione. Lo studio nel corso degli anni ha infatti evidenziato un processo molto lento ma costante che gli interventi sono in grado di rallentare ulteriormente e di circoscrivere spazialmente, ma non di fermare completamente.

A supporto di queste considerazioni è la presenza di uno strato di copertura superficiale con scarse caratteristiche meccaniche, e con una naturale tendenza al-

l'imbibizione causata dall'arrivo da monte di acque di infiltrazione e di ruscellamento; questa tesi è confermata anche dall'individuazione nel passato di polle d'acqua, prevalentemente a valle del livello 2. Durante le operazioni di cantierizzazione degli interventi cominciati nel 2017, sono inoltre state individuate alcune zone interessate dalla presenza di detriti, rappresentate in Figura 6.1. Tali detriti, prevalentemente nella forma di laterizi, sono presumibilmente riconducibili al periodo di costruzione degli edifici soprastanti la frana, in corrispondenza dell'attraversamento stradale, e contribuiscono certamente al decadimento delle caratteristiche meccaniche.



Figura 6.1: Presenza di detriti nello strato di copertura - foto del 15.11.2017

L'importanza della circolazione idrica sotterranea e la sua influenza sulle condizioni di dissesto sono peraltro già state evidenziate nelle analisi di stabilità precedenti, le quali evidenziano come un innalzamento della falda, che potrebbe verificarsi in corrispondenza ad importanti eventi meteorici, abbassi notevolmente il fattore di sicurezza, fino a valori di 1.02, indice di una certa instabilità.

Le problematiche dovute alla presenza di acqua sono inoltre state rilevate anche durante le fasi di intervento stesse, in quanto durante il sopralluogo effettuato in cantiere a seguito dell'inverno, è stata individuata una grande porzione di versante completamente imbibita, a causa delle piogge oltre che dallo scioglimento della neve, come visibile in Figura 6.2.



Figura 6.2: Notevole presenza d'acqua nel post-inverno - foto del 30.04.2018

6.2 Monitoraggi e manutenzione a lungo termine

Come visto nel precedente capitolo, il piano di interventi in fase di esecuzione prevede la messa in opera di una serie di monitoraggi sul versante e sulle opere realizzate, quali:

- 4 inclinometri per il controllo delle deformazioni del versante;
- 3 piezometri a tubo aperto per il controllo del livello di falda;
- 6 celle di carico per il controllo delle variazioni dei carichi sui tiranti.

Questo sistema di monitoraggi ha l'obiettivo di supplire alla scarsità di dati relativi alla conoscenza del fenomeno in oggetto e del suo sviluppo a seguito degli interventi, oltre che di controllo e di ottimizzazione degli interventi stessi. Sulla base di quanto sin qui evidenziato, è tuttavia fondamentale sottolineare l'importanza non solo dell'installazione dei sistemi di monitoraggio, ma anche e soprattutto del loro corretto utilizzo: affinché un sistema di monitoraggio fornisca dati fruibili nel tempo, è infatti necessaria una programmazione delle letture che venga mantenuta non solo sul breve ma anche sul lungo periodo.

Solo in questo modo sarà possibile effettuare delle analisi accurate dei dati che permettano di:

- individuare l'andamento della falda e un'eventuale correlazione tra innalzamento della falda e dati meteorici;
- individuare una curva degli spostamenti differenziali cumulati e un'eventuale correlazione tra spostamenti e dati meteorici;
- individuare le superfici di scorrimento preferenziali.

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione, ma sin qui tralasciato, è l'importanza della pulizia e manutenzione delle opere già realizzate: infatti, perché un intervento possa essere definito adeguato, deve certamente essere ben eseguito, ma deve necessariamente anche mantenere la proprio efficienza sul lungo termine. A questo riguardo particolare attenzione viene posta sulle opere di drenaggio, sia superficiali che profonde, essendo queste le tipologie di intervento che più risentono della mancanza di manutenzione.

Per quel che concerne le canalette superficiali, è situazione comune rinvenire fogliame e vegetazione all'interno delle stesse, come ad esempio in Figura 6.3.



Figura 6.3: Intasamento canalette superficiali

Nel caso dei dreni profondi, la problematica è ancora maggiore in quanto un eventuale intasamento delle fessurazioni del tubo o della calza, significa un'efficienza del dreno prossima allo zero, in quanto l'acqua non riesce a fuoriuscire dall'ammasso

ma tende a rimanere al suo interno. Per tale motivo sono necessari controlli regolari, effettuati inserendo una sonda all'interno degli stessi e verificandone l'intasamento o il corretto funzionamento. In caso di intasamento, sia delle opere superficiali che profonde, è necessario quindi procedere con delle operazioni di spurgo.

6.3 Confronto con caso a scala maggiore: frana di Issime

Considerazioni di questo tipo riguardanti la fruibilità dei monitoraggi e delle opere sul lungo termine, valgono per la stabilizzazione di tutti i fenomeni franosi. Si prende ora ad esempio e a confronto l'evento franoso in località San Grato nel Comune di Issime, in Val d'Aosta.

In tale località nel 1997 si avevano le prime segnalazioni di instabilità del versante, occorse più volte anche negli anni a seguire, fino ad un'importante riattivazione del fenomeno in occasione dell'evento alluvionale dell'ottobre del 2000, con il franamento di una porzione di versante, con una nicchia di distacco di 100 metri di lunghezza e 20 metri di larghezza. A seguito di tale evento calamitoso, la Regione Valle d'Aosta ha approvato il Piano di interventi per la *messa in sicurezza, il consolidamento e il ripristino ambientale del versante in località Boutschtschucke*. [12]

Il Piano di interventi prevedeva, principalmente:

- opere di contenimento con berlinesi di micropali accostati e tirantati;
- una fitta rete di drenaggi - disposti al piede, nel corpo frana ed eventualmente lateralmente - per il controllo delle acque profonde, e canalette superficiale per la raccolta delle acque;
- strutture leggere antierosione ed opere di ingegneria naturalistica;
- tenere sotto controllo in modo continuo l'evoluzione del dissesto tramite la lettura degli inclinometri.

In Figura 6.4 è riportata la situazione post-intervento.

Il caso di Issime è un esempio di studio e opere ben eseguite, che dopo una quindicina d'anni dagli interventi non dà segnali di riattivazione. Tuttavia è importante sottolineare come anche in questo caso, il sistema di monitoraggio installato non sia



Figura 6.4: Ripristino del versante

più soggetto a letture e la manutenzione delle opere risulti assente. In occasione di un sopralluogo effettuato nel giugno 2018, è stato possibile osservare la generale incuria delle canalette superficiali e dei piezometri e inclinometri, non lucchettati, come visibile nelle Figure 6.5 e 6.6.



Figura 6.5: Intasamento canalette



Figura 6.6: Inclino metro in disuso

Il caso di Issime è un chiaro esempio di come in mancanza di dati di monitoraggio si tenda a far riferimento alla sola osservazione. In condizioni come queste in cui il monitoraggio non risulta attivo, a causa di pertinenze amministrative, costi e talvolta scomodità dei rilievi e delle misure, in caso dell'apparente raggiungimento della stabilità del versante, si tende a ritenere l'intervento concluso positivamente. Tuttavia è necessario sottolineare come la sola osservazione non possa essere considerata garantista in senso assoluto, non dando la certezza fisica che in occasione di un nuovo importante evento l'opera risponda correttamente.

Soprattutto su interventi a scala così ampia è infatti possibile la presenza di fenomeni secondari difficili da percepire, quali la perdita di efficacia degli interventi come l'intasamento dei dreni o il rilassamento degli ancoraggi, che sul medio-lungo periodo potrebbero portare alla riattivazione anche solo locale del movimento franoso.

7 Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha avuto sin dall'inizio l'obiettivo di studiare l'evoluzione di un fenomeno franoso, prendendo ad esempio il caso di Limone Piemonte. Ripercorre la storia della frana e degli studi ad essa riferiti, ha potuto portare alla considerazione di alcune evidenze.

Si è visto come il movimento in questione fosse conosciuto già da qualche decina di anni, e nel frattempo sia stato oggetto di molteplici studi e indagini; tuttavia è rilevante notare come solo recentemente, a seguito dei movimenti avvenuti a partire dagli anni 2000, siano effettivamente stati presi dei provvedimenti con l'attuazione di importanti opere di consolidamento.

E' inoltre interessante rilevare come il più importante di questi interventi, quello realizzato nel 2011, sia stato effettivamente realizzato solamente alcuni anni successivamente alla fase di progetto, coincidente con il 2005, e questo dilazionarsi dei tempi ha certamente contribuito ad un netto aumento dell'instabilità di pendio. Non è infatti da sottovalutare come nonostante gli interventi realizzati, già a partire da 2013 siano stati rilevati nuovi movimenti all'interno del versante; verosimilmente questo non è da attribuirsi ad una mal progettazione o realizzazione degli interventi effettuati, quanto piuttosto ad una condizione di instabilità di pendio che è risultata peggiore di quanto esaminato in precedenza.

Risulta quindi fondamentale per una corretta gestione dell'instabilità che le fasi di indagine, di progettazione ed esecuzione siano temporalmente ravvicinate, anche se questo non è sempre possibile, a causa di disguidi burocratici e/o economici.

Un'ulteriore considerazione riguarda l'importanza delle indagini e dei monitoraggi. Il caso in questione ha evidenziato come sia fondamentale avere dati numerosi e aggiornati per poter effettuare un adeguato studio e delle corrette valutazioni circa un versante e la sua stabilità. A questo riguardo si può sottolineare come spesso i sistemi di monitoraggio siano installati, ma solamente controllati ed utilizzati nell'arco di tempo immediatamente successivo all'installazione. Questa è una pro-

blematica che ha come conseguenza la carenza di dati aggiornati sulle condizioni del movimento franoso, oltre ad un decadimento delle condizioni delle strumentazioni, dovuto ad una scarsa manutenzione.

Manutenzione e monitoraggio risultano dunque due aspetti imprescindibili, e sebbene richiedano un certo investimento in termini di costi, è evidente come entrambi siano necessari per un corretto completamento dell'intervento sul lungo termine. Si deve inoltre tener conto di come il mantenimento in efficienza dell'opera abbia costi notevolmente inferiori a quelli relativi ad un eventuale intervento correttivo, a seguito di nuovi fenomeni d'instabilità. In tal caso infatti non sono da considerarsi solamente i costi palesi di intervento, ma anche tutti i costi non monetizzabili quali ad esempio, nel caso in oggetto, l'interruzione della circolazione ferroviaria con tutte le necessarie conseguenze.

In conclusione, è doveroso affermare l'importanza di monitoraggi continui e ben eseguiti per avere una corretta visuale dell'evoluzione del fenomeno franoso, e di conseguenza delle azioni da intraprendere al riguardo.

Riferimenti bibliografici

- [1] Aicap - *Ancoraggi nei terreni e nelle rocce*, 2012
- [2] Braccesi G., Caselli D., Cardinali A. - *Indagini geofisiche e geotecniche di supporto alla caratterizzazione di un movimento franoso*, Rovereto 2008
- [3] Cruden D.M., Varnes D.J. - *Landslide types and processes*, in: Turner A.K., Schuster R.L., *Landslides Investigation and Mitigation (Sp. Rep. 247, pp. 36-75)*, Transportation Research Board, US National Research Council, Washington 1996
- [4] Società Consorzile per Azioni - CSEA, Regione Piemonte - *Ingegneria naturalistica : nozioni e tecniche di base*, 2006
- [5] Del Greco O. - *Dispense di "Consolidamento di rocce e terreni"*, Torino
- [6] Del Greco O., Oggeri C. - *Analisi dei fenomeni franosi in atto presso la stazione ferroviaria di Limone Piemonte*, Torino 2005
- [7] Goodman R., Bray J. - *Toppling of Rock Slopes*, Colorado 1976
- [8] Lombardo P. - *Relazione geologico-tecnica*, Torino 2001
- [9] Lombardo P. - *Monitoraggio della frana nei pressi della Stazione di Limone Piemonte*, Torino 2004
- [10] Marengo L. - *Relazione geologica*, Torino, 2017
- [11] Marengo L. - *Relazione geotecnica e di calcolo*, Torino, 2017
- [12] Peila D., Oggeri C., Bottino G., Rosso M. - *Studio geologico tecnico e caratterizzazione dei fenomeni franosi nella conca Buhl - Hurlli - Boutschtschucke con indicazione delle tipologie degli interventi e di pianificazione del monitoraggio*, Torino, 2001
- [13] Pelizza S., Peila D., Oggeri C. - *Tipologie di intervento per la bonifica di versanti rocciosi*, Trento 2004

- [14] Ranaboldo M. - *Stabilizzazione di un versante in frana nei pressi della stazione di Limone Piemonte*, Torino 2005
- [15] Varnes D.J. - *Slope movements types and processes*, in: Schuster R.J., Krizek R.J., *Landslides, analysis and control (Sp. Rep. 176, pp. 11-33)*, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington, 1978

Sitografia

www.provincia.torino.gov.it/protciv

www.isprambiente.gov.it

Allegato A - Campagna geognostica 1982

Sondaggio S1

Località: Stazione FF.SS. Limone Piemonte

Data: dal 11/11/82 al 12/11/82

Quota inizio: piano campagna

Profondità raggiunta: 24 m

Metodo di Perforazione: rotazione

Diametro di perforazione 101/127 mm

Profondità (m)	Descrizione terreno
0 - 1.4	Terreno di riporto: ghiaia e ghiaietto con elementi di calcare dolomitico e quarzo in matrice sabbioso-limosa, passante ad argillosa negli ultimi 20 cm
1.4 - 2.0	Massa argillosa verde prodotta dalla alterazione degli scisti sottostanti
2.0 - 3.0	Scisti filladici verdi, teneri e parzialmente alterati; è ancora evidente la scistosità
3.0 - 4.5	Scisti filladici di colore grigio violetto, alterati in una massa argillosa; l'alterazione in argilla è completa verso il fondo
4.5 - 5.4	Scisti sericitici altamente alterati
5.4 - 7.2	Scisti sericitici altamente laminati con piani di scistosità ondulati, facilmente disgregabili e leggermente alterati; è presente la componente quarzosa verso il fondo
7.2 - 8.1	Scisti sericitici altamente alterati in una massa argillosa; liberato abbondante quarzo
8.1 - 12.0	Scisti sericitici meno alterati, ma facilmente disgregabili in piccole scaglie; meno frequente la componente quarzosa
12-12.5	Livello di alterazione ad argilla inglobante quarzo
12.5-13.7	Scisti sericitici altamente laminati e leggermente alterati; quarzo assente
13.7 - 15.0	Scisti sericitici, friabili e più alterati che nel livello sovrastante
15.0 - 18.0	Scisti sericitici altamente fratturati e facilmente divisibili secondo piani di scistosità, ma più fresca e a tratti compatta rispetto ai livelli superiori; frequente la componente argillosa

Allegato B - Campagna geognostica 2017

Sondaggio Pz1n

Profondità (m)	Descrizione terreno
0 - 0.80	Terreno di riporto eterogeneo attuale, costituente la piazzola di lavorazione
0.80 - 1.40	Terreno di riporto sabbioso limoso ghiaioso con ciottoli di quarzite conglomeratica (diam. Max 15-20 cm); colore bruno chiaro
1.40 - 3.90	Limo sabbioso argilloso con ghiaia, da spigolosa ad arrotondata, in prevalenza derivanti da alterazione di argilliti violacee; colore variabile da grigio violaceo a bruno chiaro
3.90 - 5.80	ghiaia e ciottoli (diam max 10-12 cm) di natura prevalentemente quarzitica, in subordinata matrice sabbioso limosa; colore bruno chiaro
5.80 - 12	sabbia limosa e limo sabbioso con ghiaia e ciottoli, derivanti da pressoché totale alterazione ed argillificazione di quarzoscisti, quarziti conglomeratiche e scisti sericitici. Sono presenti nuclei relitti decimetrici poco o nulla alterati (ad es. tra m 8,30 e m. 8,50). Colore bianco verdognolo con screziature rosate
12 - 20.20	Quarzoscisti e scisti sericitici da poco a mediamente fratturati, con fratture inclinate di circa 45-60° rispetto all'orizzontale, da chiuse a debolmente aperte con riempimenti argillosi. Presenza di domini decimetrici più friabili, debolmente alterati e argillificati, evidenti fino alla profondità di m 16,70. a m 17,80 sono presenti tracce di un'iniezione cementizia. Colore bruno verdognolo con presenza di fenocristalli rossicci

Sondaggio I1n

Profondità (m)	Descrizione terreno
0 -2.20	Terreno di riporto eterogeneo sabbioso limoso argilloso con ghiaia e ciottoli fino a decimetrici. Presenza sporadica e diffusa di frammenti di laterizi e macerie edili. Colore bruno chiaro
2.20 - 3.80	Limo sabbioso argilloso con ghiaia costituita in prevalenza da scaglie pluricentriche di rocce scistose varicolori, a tratti alterate ed argillificate; colore bruno chiaro con screziature grigiastre e violacee
3.80 - 18	Quarzoscisti, cloritoscisti e quarziti conglomeratiche pressoché totalmente alterate e argillificate. Presenza di sporadici nuclei centimetri a minor grado di alterazione. Colore bianco verdognolo con domini centimetrico decimetrici di colore bruno chiaro
18 - 19.80	Quarziti conglomeratiche, quartzoscisti e cloritoscisti parzialmente alterati e argillificati; colore bruno verdognolo
19.80 - 27.20	Quarzoscisti e scisti sericitici, mediamente fratturati, con fratture inclinate di circa 60° rispetto all'orizzontale. Presenza di domini centimetrico decimetrici totalmente alterati e argillificati. Colore verde chiaro biancastro con fenocristalli centimetrici rossastri

Ringraziamenti

I miei sentiti ringraziamenti al prof. Ing. Oggeri, per la sua infinita disponibilità e grande pazienza, e per avermi condotto in questo lavoro di tesi condividendo interessanti aneddoti oltre che numerose esperienze ingegneristiche.

Un dovuto ringraziamento inoltre al compartimento di Torino di RFI, nella persona dell'Ing. Cantore, la società GEO engineering s.r.l, l'Ing. Marengo e il Geol. Lombardo, e l'impresa Nuove Costruzioni, per avermi concesso di accedere al cantiere e aver messo a disposizione tutti i dati necessari allo svolgimento della tesi.

Infinite grazie alla mia famiglia, che mi ha sempre supportato. Mamma, papà, Rocco, Beppe e Sere, non vi "preoccupate" però: anche se laureata, continuerò a cullarmi nel privilegio di essere pur sempre la piccola di casa.