

# FRANE A CINEMATICA ESTREMAMENTE LENTA IN UNA VALLE GLACIALE DEL CORRIDOIO TEN-T5

Simeoni L.\* , Ronchetti F.\*\* , Corsini A.\*\* , Mongiovi L.\*\*\* , Ferro E.\*\*\* , Ghirardini G.\*\* , Girardi M.F.\*\*\*

\* Università degli Studi dell'Aquila

\*\* Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

\*\* Università degli Studi di Trento

## SOMMARIO

La memoria descrive tre casi di frane a cinematica estremamente lenta (velocità di spostamento media inferiore a 10 mm/anno) ubicate nella valle glaciale alpina dell'Isarco, tra Bolzano e Bressanone. Le tre frane sono riattivazioni parziali di DGPV, sviluppatasi dopo l'ultima glaciazione in rocce vulcaniche o metamorfiche e si classificano come scorrimenti rotazionali profondi di roccia e detrito. Si descrivono i sistemi di monitoraggio di spostamenti e pressioni interstiziali, attivi da un minimo di 5 anni ad un massimo di 20, che sono stati installati per la definizione dei meccanismi di evoluzione dei movimenti. Si evidenziano i metodi di elaborazione delle misure, finalizzati al controllo dell'affidabilità delle stesse, e si riportano le interpretazioni dei meccanismi di frana effettuate mediante verifiche di stabilità a ritroso.

Parole chiave: frane, estremamente lente, infrastrutture, monitoraggio, spostamenti.

## 1 LE FRANE NELLA VALLE DEL FIUME ISARCO

La valle dell'Isarco è ubicata nelle Alpi centro-orientali e ospita importanti infrastrutture di trasporto che collegano l'Italia all'Europa centrale: la SS12 dell'Abetone e del Brennero, l'autostrada A22 e la ferrovia RFI Verona-Brennero. Nella valle è prevista anche la realizzazione della linea ferroviaria ad Alta Capacità TNT-T5, che collega Berlino a Palermo.

La valle è costituita prevalentemente da rocce vulcaniche e metamorfiche. La morfologia della valle è la conseguenza dell'azione del modellamento glaciale e post-glaciale. I versanti della valle dell'Isarco, analogamente ad altre valli in passato soggette alla azione dei ghiacciai, sono caratterizzati dalla presenza di scivolamenti di roccia profondi (Cruden D.M. e Varnes D.J., 1996) e da vere e proprie Deformazioni Gravitative Profonde di Versante (DGPV) (Zischinsky U., 1966; Varnes et al., 1989; Cadoppi et al., 2006; Agliardi et al., 2009)

Nella parte meridionale, tra Bolzano (260 m s.l.m.) e Bressanone (560 m s.l.m.), la valle risulta particolarmente incisa e stretta perché derivante dall'erosione fluviale avvenuta nei periodi interglaciali e le infrastrutture di trasporto sono state spesso realizzate a ridosso di ripide pareti rocciose, sottoponendole a condizioni di pericolo associate a caduta massi e rock-avalanche (Fenti et al., 1981). Per lungo tempo l'attenzione è stata rivolta

prevalentemente alla mitigazione di questi rischi (come, ad esempio, lo spostamento in sotterraneo della ferrovia negli anni '90), soprattutto per evitare il ripetersi di vittime e feriti. Nell'ultima decade, però, l'attenzione si è lentamente spostata verso lo studio delle grandi frane a cinematica estremamente lenta, che stanno interagendo con infrastrutture di trasporto e con centri abitati. Infatti, sebbene questi tipi di frana difficilmente portino ad una distruzione repentina, provocherebbero danni ingenti alle strutture se non fossero riconosciute, studiate e gestite per tempo. Per le opere esistenti sarà necessario individuare interventi di mitigazione dei danni, ma per le opere pianificate è possibile modificarne l'ubicazione rispetto all'estensione delle aree in movimento.

Questa memoria descrive i tre casi di frana a cinematica estremamente lenta (velocità media inferiore a 10 mm/anno) riconosciuti nel tratto di valle tra Bolzano e Bressanone. Le tre frane sono state denominate V58, T64 e V70 (Figura 1) ed hanno caratteristiche confrontabili con quelle riportate in Glastonbury J. e Fell R., 2008.

Al piede della frana V58 sono situate l'autostrada A22 e la ferrovia RFI Verona-Brennero, la frana T64 interseca soltanto l'autostrada A22, mentre al piede della frana V70 scorrono la strada SS12 e l'autostrada A22. L'interazione tra la frana ed infrastruttura di trasporto si manifesta con lievi danni a quest'ultime, come le deformazioni anomale degli appoggi tra impalcato e pulvino dei viadotti autostradali, o ad opere accessorie, come la fessurazione

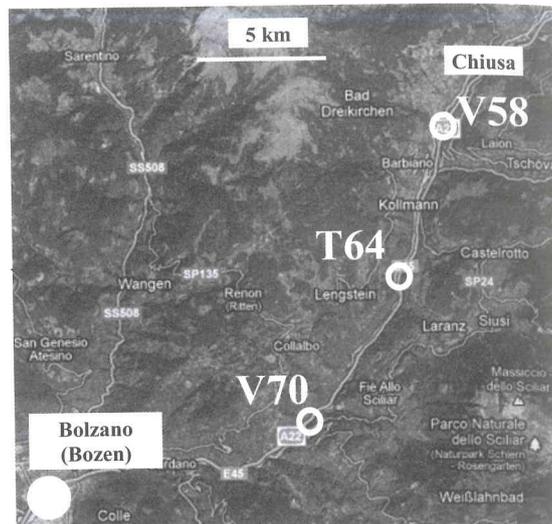
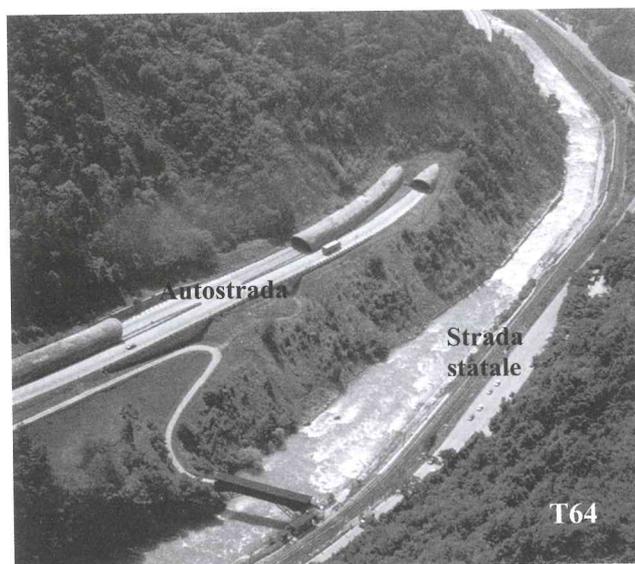


Figura 1 – Immagini ed ubicazione dei tre versanti in frana.

di muri di sostegno.

## 2 INDAGINI E MISURE

Si descrivono di seguito le indagini eseguite ed i sistemi di monitoraggio impiegati per lo studio del cinematisimo e del meccanismo di frana nei tre siti. In virtù della più agevole accessibilità, in generale le indagini e le misure sono state condotte al piede del versante.

### 2.1. Indagini e misure nella frana V58

Al fine di studiare la frana V58, sono state avviate tre campagne geognostiche (nel 2006, nel 2009 e nel 2012), ognuna con lo scopo di approfondire la precedente. I fori di sondaggio raggiungono profondità comprese tra 20 e 100 m. Nel complesso sono stati installati 9 piezometri, 5 a tubo aperto (due bipresa) e 4 Casagrande (due bipresa), e 11 inclinometri (Figura 2 e Figura 3), in cui si eseguono periodicamente misure manuali. A partire dal 2008, sono monitorati anche gli spostamenti delle 11 pile del viadotto ubicato in prossimità del piede della frana mediante Stazione Totale; in particolare sono stati installati 2 prismi su ogni pila in modo da poter calcolare anche la rotazione delle pile nell'ipotesi, verificata, di rotazione rigida. In

questo modo il sistema di misura degli spostamenti è ridondante ed è possibile verificare l'affidabilità delle misure mediante il confronto degli spostamenti in corrispondenza del piano di fondazione delle pile (Simeoni et al., 2014).

### 2.2. Indagini e misure nella frana T64

La prima campagna di indagine risale al 1997 con l'installazione di 7 tubi inclinometrici e 6 piezometri bipresa, in fori di profondità compresa tra 70 e 100 m (Figura 4). Individuata la posizione della superficie di scivolamento principale, nel 2000 il sistema di monitoraggio è stato integrato con l'installazione di 7 sonde inclinometriche fisse, una per ciascun tubo, e con l'installazione di due pluviometri. Nel 2004 il sistema di misura degli spostamenti è stato reso ridondante mediante la realizzazione di 12 capisaldi topografici e 4 portaprismi (Simeoni L. e Benciolini G.B., 2007), per la misura con Stazione Totale, e sono stati installati 4 piezometri a tubo aperto con trasduttori di pressione.

### 2.3. Indagini e misure nella frana V70

In una ventina d'anni sono state eseguite cinque campagne di indagine e misura (1993, 2000, 2002, 2009 e

2012) ed installati globalmente 16 inclinometri e 11 piezometri. Attualmente si eseguono misure periodiche in 11 inclinometri e 4 piezometri (due bipresa) (Figura 5). Nel 2004 il sistema di misura degli spostamenti è stato reso ridondante, come nel caso V58, mediante l'installazione di prismi per misure con Stazione Totale sui fusti di 7 pile del viadotto presente al piede del

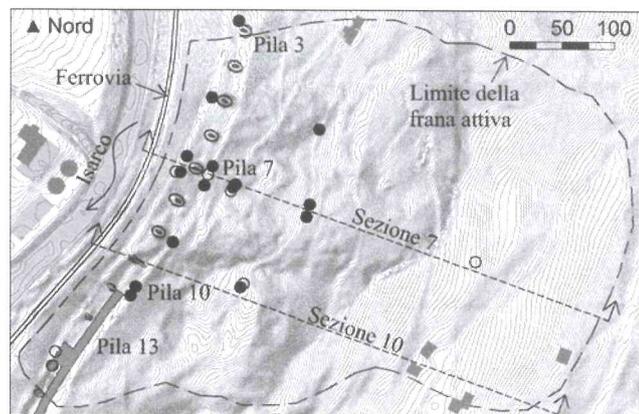


Figura 2 – Frana V58: planimetria con ubicazione degli strumenti di monitoraggio (cerchio: piezometro; pallino: inclinometro) e della traccia della sezione studiata.

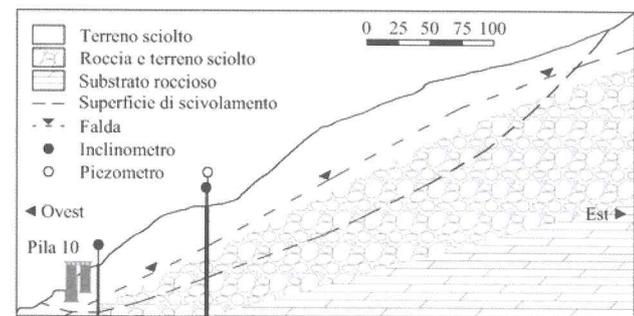


Figura 3 – Frana V58: sezione longitudinale con ubicazione di strumenti di monitoraggio, falda e superficie di scivolamento

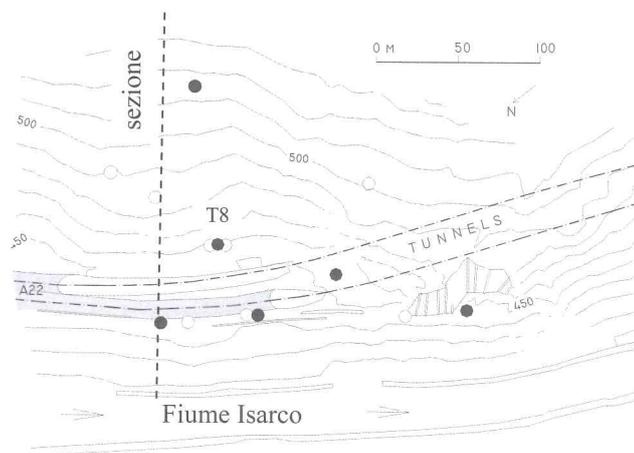


Figura 4 – Frana T64: planimetria con ubicazione degli strumenti di monitoraggio (cerchio: piezometro; pallino: inclinometro) e delle tracce delle sezioni studiate.

versante. Le 4 pile centrali sono monitorate anche con pendolo diretto (Tombolato et al., 2007). Nel 2013 sono state installate 11 sonde inclinometriche fisse e 3 trasduttori di pressione.

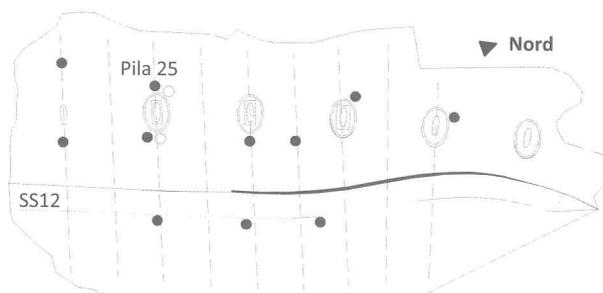


Figura 5 – Frana V70: planimetria con ubicazione degli strumenti di monitoraggio (cerchio: piezometro; pallino: inclinometro) e delle tracce delle sezioni studiate.

### 3 INQUADRAMENTO E MODELLO GEOLOGICO

La valle Isarco s'inserisce nel contesto geologico regionale delle unità appartenenti al dominio Sudalpino. Tale dominio è composto principalmente da una coltre di rocce sedimentarie permo-cenozoiche che ricoprono le unità più antiche rappresentate dalle rocce ignee appartenenti al Gruppo Vulcanico Atesino del Permiano inferiore e, ancora più in profondità, le rocce metamorfiche del Basamento Cristallino pre-Permiano.

L'attuale morfologia della valle è la conseguenza dell'azione del modellamento glaciale e post-glaciale. L'espansione glaciale Würmiana nella Valle Isarco è stata ricostruita da Penck A. e Brückner E. (1909) in base alla distribuzione altimetrica dei depositi glaciali, evidenziando uno spessore dei ghiacciai tale da raggiungere la quota assoluta di 2.000 m s.l.m. presso l'area di Bolzano e circa 2.500 m s.l.m. presso Bressanone.

Attualmente la valle si presenta ampia e con pendii mediamente inclinati a nord di Ponte Gardena (centro situato un paio di km a sud del sito V58), mentre si presenta stretta e con pendii fortemente incisi e con pendenze prossime alla verticale a sud di Ponte Gardena. La morfologia dei versanti è caratterizzata dalla presenza di fenomeni franosi di grandi e piccole dimensioni, attivi e non. Tra i fenomeni maggiori, sia per estensione che per spessore del materiale coinvolto, si segnala la presenza di scivolamenti di roccia e di DGPV. Tali fenomeni, in ambiente alpino, sono riconosciuti per essere la conseguenza della presenza di strutture tettoniche (faglie o fratture) o di piani di scistosità nel substrato, oppure del ritiro dalle valli dei ghiacciai.

La morfologia dei fondovalle è invece caratterizzata dalla presenza di alcune decine di metri di depositi fluvio glaciali, tra cui ampi depositi di conoide torrentizi, e alluvionali recenti.

### 3.1. Il modello geologico della frana V58

Il versante della frana V58 è caratterizzato dall'affioramento della formazione del substrato delle Filladi Quarzifere di Bressanone. Tale formazione è composta da rocce filladi con qualità geomeccaniche scadenti, caratterizzate da fitti piani di scistosità, che corrispondono spesso a superfici di discontinuità latente, che suddividono la massa rocciosa in un'aggregazione di elementi piuttosto deformabili. La composizione mineralogica e l'elevato grado di fessurazione, rende le filladi facilmente attaccabili degli agenti esterni, provocando minuti frammenti misti a una matrice fine di alterazione. Inoltre, il substrato è caratterizzato dalla presenza alla scala di versante di due sistemi di fratture NE-SW e WSW-ESE, alla scala dell'affioramento di due sistemi di discontinuità con orientazione di immersione circa 315° e 55° N e inclinazioni variabili tra i 25° (corrispondente con la scistosità) e i 90° (corrispondente con fratture). In foro di sondaggio il substrato raramente presenta RQD maggiori dell'80% e anche ad elevate profondità, si riconoscono orizzonti di roccia alterati dove le filladi si sono ridotte a scaglie in una matrice di materiale fine.

La frana V58 (Figura 6a) è un vasto fenomeno di dissesto ascrivibile ad una DGPV e composto da tre unità di frana sovrapposte, caratterizzate da differenti tipologie, cinematismi e tassi di deformazione, e volumi di materiale coinvolto. Dall'unità di frana più profonda a quella più superficiale si riconoscono: Unità A-DGPV; Unità B-Scivolamenti di roccia e terra medio-profondi; Unità C-Scivolamenti di terra o detrito superficiali.

L'unità A rappresenta l'unità di dissesto più profonda e antica del versante. Il fenomeno si estende dalla quota 480 m s.l.m. di fondovalle dell'Isarco alla quota 850 m. Lo spessore massimo di materiale coinvolto è dell'ordine di 140 m e il materiale coinvolto è costituito dalle filladi del substrato molto fratturate. Sulla base dei dati a disposizione, si ritiene che il fenomeno sia delimitato in profondità da una fascia di deformazione circolare e multipla e che sia non attiva.

L'unità B rappresenta l'unità di dissesto medio-profonda, è sovrapposta all'unità A e rappresenta una sua recente evoluzione. È una frana di scivolamento di roccia e terra. Il fenomeno si estende dalla quota 490 m alla quota 750 m. Lo spessore massimo di materiale coinvolto è dell'ordine di 80 m e il materiale coinvolto è costituito da porzioni e blocchi di filladi immersi in una matrice di materiale fine. Sulla base dei dati a disposizione, si ritiene che il fenomeno sia delimitato in profondità da una superficie di scivolamento circolare e multipla e che sia attivo.

L'unità C rappresenta l'unità di dissesto più superficiale. Essa è costituita da diversi scivolamenti di detrito e colamenti di terra che rappresentano l'evoluzione delle porzioni superficiali delle unità A e B. Gli spessori di materiale coinvolto sono dell'ordine dei 5-10 m; il materiale coinvolto è costituito da blocchi e clasti di filladi talvolta immersi in una matrice abbondante di materiale fine. Tali fenomeni sono delimitati in profondità da superfici singole prevalentemente planari attive e non.

Dal punto di vista idrogeologico, nel versante è stata

evidenziata la presenza di alcune sorgenti perlopiù concentrate nell'unità B.

### 3.2. Il modello geologico della frana T64

L'area della frana T64 coincide con il margine NE del complesso vulcanico atesino. La serie locale risale al Permiano superiore ed è rappresentata dal complesso basale di natura lavico-tufacea e da elementi del complesso intermedio, mediamente acido riodiacitico (quarzolattico) ignimbrítico e tufaceo e dall'ultimo elemento ignimbrítico del complesso superiore riolitico. Nell'area della frana la giacitura degli strati del substrato roccioso è a frana-poggio, con immersioni di circa 30°-40° SW; dal punto di vista tettonico strutturale è possibile distinguere due allineamenti principali orientati in direzione NE-SO e NO-SE.

Allo stato attuale dello studio in corso, la frana T64 può essere suddivisa in due unità (Figura 6b): Unità A, riconducibile a fenomeni di scivolamento di materiale detritico, costituito da blocchi immersi in una matrice da sabbiosa ad argillosa, che al piede è sovrascorsa alle alluvioni fluviali; ed una Unità B, rappresentata da un fenomeno di scivolamento di materiale ignimbrítico e tufaceo. Durante la costruzione della sede autostradale, nell'Unità A si sono manifestati fenomeni d'instabilità in seguito ad operazioni di scavo.

Per quanto riguarda la circolazione idrica, sono state rilevate emergenze idriche in corrispondenza dei dreni

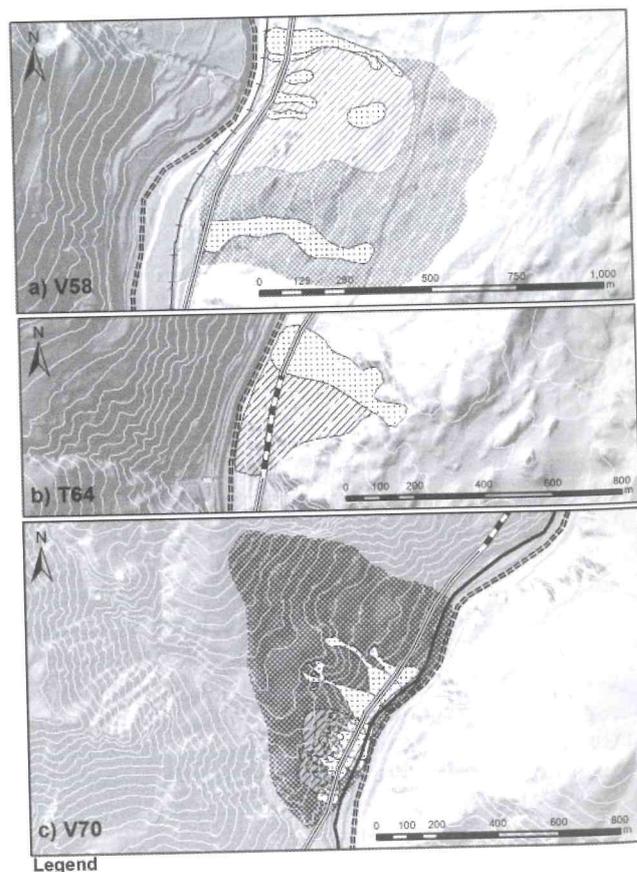


Figura 6 – Unità di frana dei tre casi studio V58, V70 e T64.

della paratia realizzata al piede del pendio ed in corrispondenza del bordo settentrionale della strada.

### 3.3. Il modello geologico della frana V70

La geologia del versante, sul quale si sviluppa il complesso della frana V70, è rappresentata dai litotipi appartenenti alle vulcaniti permiane appartenenti al Gruppo Riodacitico e Latit-Andesitico/Dacitico. I litotipi che costituiscono il substrato roccioso sono principalmente rappresentati da ignimbriti e talvolta da lave e tufi. Le ignimbriti riodacitiche, distinguibili da una marcata colorazione grigio-verdognola, sono caratterizzate da un'elevata e fitta fessurazione secondo l'asse verticale. La formazione ignimbritica riodacitica risulta interrotta da intercalazioni tufacee: si tratta di lave di colore verde scuro e alterate in massa, in cui lo stato di alterazione è reso evidente da una colorazione gialla di varia intensità. Dal punto di vista tettonico strutturale è possibile distinguere due allineamenti principali orientati in direzione N-S e EES-OON. L'affioramento roccioso, in corrispondenza del sito della frana V70, mostra la presenza di tre principali famiglie di discontinuità, di cui una caratterizzata da rapporti di reggi-poggio e due posizionate in assetto di frana-poggio. Per quanto riguarda le due famiglie di discontinuità a frana-poggio è possibile definire un'orientazione di immersione media pari a  $128^\circ \div 130^\circ$  N, con valori di inclinazione pari a  $80^\circ$  e  $20^\circ$ . Il substrato roccioso ignimbritico-tufaceo mostra scarse caratteristiche meccaniche, data l'abbondante presenza di piani di discontinuità sui quali è evidente una marcata alterazione fisico-meccanica.

Il complesso della frana V70 è classificabile come una DGPV (Figura 6c), sulla quale si sono instaurati altri fenomeni di dissesto, di minore entità. Nel complesso, partendo dal meccanismo più profondo, sono distinguibili le seguenti unità: Unità A-DGPV; Unità B e C-Scivolamenti di roccia; Unità D-Crolli di Roccia (coni di detrito); Unità E-Scivolamenti di roccia e terra; Unità F-Colate di terra.

L'unità A suddivide il versante in elementi morfologici distinti, estendendosi all'interno del substrato roccioso ignimbritico. Il meccanismo di dissesto si sviluppa sui piani di scistosità e fissilità che caratterizzano il substrato roccioso. Il fenomeno di DGPV evidenziato si estende dalla quota di monte di 750 m s.l.m. fino a raggiungere la quota attuale di 336 m del letto dell'Isarco. Mancando dati e indizi di cinematicismo in atto, il fenomeno è da considerarsi inattivo, nonostante non sia escludibile un tasso di movimento nell'ordine di decimi di millimetro o qualche mm/anno.

Le unità B e C si dispongono sul fronte dell'Unità A, in prossimità della quota del F. Isarco. Sono definite da fenomeni di scivolamento roto-traslativo di roccia che generano la formazione di scarpate e trench alla sommità del tratto di versante su cui si sviluppano. L'Unità B, più profonda, rappresenta il massimo ingombro sul quale si sviluppa il cuneo di roccia appartenente all'Unità C. Sulla base dei dati derivanti dai rilievi in sito e di monitoraggio, le unità B e C si possono definire attive.

Sul fronte della scarpata e delle Unità B e C, si colloca l'Unità D, rappresentata da fenomeni di crollo di materiale

ignimbritico e tufaceo. Tali fenomeni hanno originato depositi con forma tipica di coni di detrito, che si estendono dal ciglio di scapata fino all'alveo fluviale, come evidenziato dai sondaggi stratigrafici dove si trovano sepolti e interdigitati con i depositi alluvionali. L'unità D risulta attiva solamente nelle porzioni prossime alle nicchie di distacco, dove è possibile apprezzare la presenza di detrito accumulato per recenti crolli.

Nella porzione nord dell'Unità A è presente l'Unità E, costituita da un esteso corpo di frana per scivolamento di detrito e terra. Tale fenomeno ha zona di distacco posta a quota 600 m s.l.m. e raggiunge, nella zona del piede, il F. Isarco a quota 340 m. Sulla scorta dei rilievi svolti e dei dati a disposizione è possibile escludere l'attività per l'Unità E.

In direzione sud rispetto all'Unità E, sono presenti corpi di frana per colata di terra, caratterizzati da depositi a granulometria fine. Tali fenomeni, catalogati come Unità F, si sviluppano dalla quota dei 500 m s.l.m. fino a raggiungere la quota dell'Isarco, dove risultano sepolti dal materiale grossolano costituente il primo ordine di terrazzi del fiume. I fenomeni di colata non mostrano indizi di attività.

## 4 CINEMATISMO DI FRANA

Una delle sfide nello studio delle frane a cinematica estremamente lenta è riuscire a descrivere l'evoluzione degli spostamenti nel tempo, per comprendere il meccanismo di frana (Leroueil et al., 1996; Leroueil, 2001) e per valutare il contributo viscoso nella resistenza del terreno in cui si colloca la superficie di scivolamento (Bertini et al., 1986; Vulliet L., 1986; Vulliet L. e Hutter K., 1988; Vulliet L. e Hutter K., 1988b; Van Asch et al., 2007; Puzrin A.M. e Schmid A., 2012). È dunque importante utilizzare tecniche di monitoraggio precise, accurate ed affidabili. Un modo per valutare l'affidabilità delle misure è rendere il sistema ridondante (Simeoni et al., 2014).

### 4.1. Il cinematicismo della frana V58

Nella frana V58 si usano inclinometri per la misura degli spostamenti del sottosuolo e la Stazione Totale per la misura degli spostamenti dei fusti delle pile del viadotto. L'affidabilità delle misure, che in questo caso è risultata molto buona, è verificata mediante il confronto degli spostamenti in corrispondenza del piano di fondazione calcolati con le due tecniche (Simeoni et al., 2014).

In quest'area sono disponibili anche "Persistent Scatterers" da elaborazioni di interferometria da satellite pubblicate sul sito del Ministero dell'Ambiente ([www.pcn.minambiente.it/GN](http://www.pcn.minambiente.it/GN)).

La frana ha un volume di circa  $5.8 \text{ Mm}^3$  ed un'estensione planimetrica di circa 400 m, sia in direzione longitudinale che trasversale al movimento; la superficie di scivolamento è rotazionale a curvatura ridotta con profondità massima di 80 m, ma sempre al di sopra del substrato roccioso. La velocità media è compresa tra 4 e 9 mm/anno, maggiore nella parte meridionale e costante nel tempo. La superficie di scivolamento è quasi totalmente

ubicata sotto falda; l'integrazione locale delle misure inclinometriche ha infatti evidenziato una leggera stagionalità (Simeoni et al. 2014) difficile però da quantificare, vista la bassa frequenza delle misure piezometriche ed inclinometriche.

#### 4.2. Il cinematismo della frana T64

Per la frana T64 sono disponibili misure di spostamento del sottosuolo, mediante inclinometri mobili e fissi, e misure di superficie con Stazione Totale. Le due tecniche di misura, inclinometrica e topografica, non danno valori simili di spostamento (Dominici et al., 2014), molto probabilmente perché almeno uno dei tre punti, assunti come base nella rete topografica, è in movimento e introduce un errore sistematico indeterminabile per l'assenza nella rete di punti di posizione nota. Ciò evidenzia l'importanza di garantire nei sistemi di monitoraggio la ridondanza delle misure (Simeoni L. e Benciolini G.B., 2007). Nonostante questa discrepanza, le misure individuano una frana di forma pressoché triangolare, con un volume di circa  $2.5 \text{ Mm}^3$ . La superficie di scivolamento è rotazionale a curvatura ridotta e con profondità massima di 63 m; si colloca tra il materiale detritico e il substrato roccioso nell'Unità A, all'interno di materiale roccioso nell'Unità B. Grazie alle misure piezometriche è possibile affermare che nella zona di piede, la superficie di scivolamento è sotto falda.

Entrambe le tecniche di misura riconoscono che le due unità di frana si muovono con velocità differente. La velocità di spostamento dell'Unità A si è ridotta dal cm/anno, in una prima fase dal 1997 al 2000, al mm/anno dal 2004 al 2009, evidenziando un carattere stagionale degli spostamenti (Figura 7). Gli spostamenti dell'Unità B sono più lenti, dell'ordine di 1-3 mm/anno nella prima fase e di 0.2 mm/anno nella seconda.

#### 4.3. Il cinematismo della frana V70

Il volume di terreno in movimento è stato stimato di circa  $1 \text{ Mm}^3$ , le superfici di scivolamento sono rotazionali a bassa curvatura, con una profondità massima di 31 m.

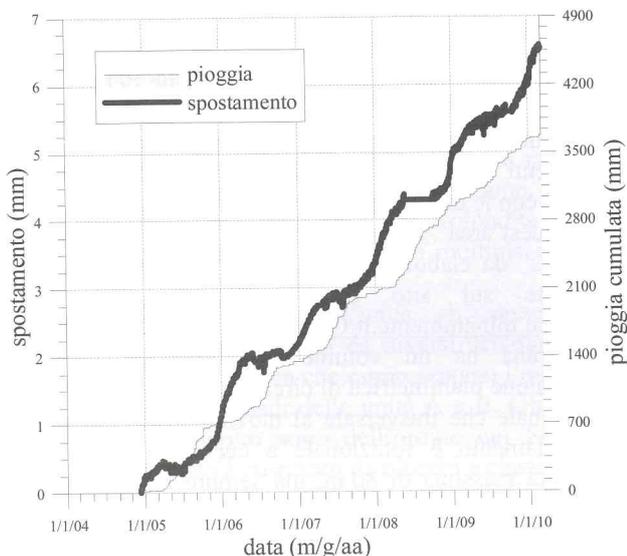


Figura 7 – Spostamenti dell'inclinometro fisso T8 e piogge cumulate.

Nella porzione di frana più settentrionale, in prossimità delle pile del viadotto sono state riconosciute due superfici: una ubicata in corrispondenza del piano di fondazione, una 3-4 m più in profondità. Nella porzione meridionale è presente soltanto la superficie più profonda. Come per la frana V58, anche per la frana V70 l'affidabilità delle misure di spostamento è stata verificata mediante il confronto degli spostamenti in corrispondenza della base di fondazione delle pile (Simeoni et al., 2014). Entrambe le tecniche di misura forniscono velocità di spostamento totale pressoché costanti nel tempo e pari a circa 10 mm/anno. Tale dato porterebbe ad escludere l'attività dell'Unità A.

### 5 REGIME DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI

In tutti e tre i casi, le misure piezometriche sono molto meno numerose delle misure di spostamento e sono ubicate esclusivamente al piede del versante. È stato tuttavia possibile formulare alcune ipotesi sul regime delle pressioni interstiziali.

#### 5.1. Le pressioni interstiziali nella frana V58

Non essendo il numero dei piezometri installati sufficiente a conoscere il livello della falda nel versante, sono state interpretate, con la dovuta cautela, anche le misure del livello dell'acqua nei fori di sondaggio. La falda così stimata è circa parallela al pendio (pendenza compresa tra 26 e 30°), alimenta il fiume Isarco e si trova mediamente circa 30 m al di sopra della superficie di scivolamento. A causa della bassa frequenza delle misure e della disponibilità di un solo piezometro con presa sempre sotto falda, non è ancora possibile riconoscere le oscillazioni stagionali.

#### 5.2. Le pressioni interstiziali nella frana T64

I piezometri sono ubicati al piede della frana e rivelano che in tale posizione la superficie di scivolamento si trova sotto falda e che la falda subisce oscillazioni collegate al livello del sottostante fiume Isarco. Se si prendono come riferimento anche i livelli d'acqua all'interno dei tubi inclinometrici ubicati nella porzione di versante leggermente più alta, si può concludere che in questa zona la superficie di scivolamento si trova soltanto occasionalmente sotto falda.

#### 5.3. Le pressioni interstiziali nella frana V70

Dal 2013 si misurano automaticamente le pressioni in tre piezometri ubicati in prossimità di una pila centrale del viadotto. Essi hanno evidenziato che la falda rimane sempre al di sotto delle superfici di scivolamento, anche quando si innalza per effetto delle oscillazioni del livello del fiume Isarco.

Alla luce di questi risultati, tutte le analisi di stabilità sono state effettuate considerando la falda assente e ipotizzando una pressione interstiziale nulla.

## 6 MECCANISMO DI FRANA

Per tutti e tre i casi la geometria della superficie di scivolamento è nota con una discreta affidabilità, mentre, escludendo il caso V70, permangono ancora alcune incertezze sul regime delle pressioni interstiziali. Sono state inoltre eseguite prove di taglio diretto in scatola di taglio su campioni ricostituiti di terreno raccolto in prossimità delle superfici di scivolamento, determinando le resistenze al taglio nelle condizioni di deformazione a volume costante (resistenza ultima) e residua. Trattandosi di tre casi di frane attive ( $F_s=1$ ), sono quindi state eseguite analisi a ritroso con i metodi dell'equilibrio limite globale (Bishop semplificato, laddove la superficie di scivolamento era riconducibile alla forma circolare; Morgenstern & Price negli altri casi) per verificare le ipotesi di meccanismo di frana. L'inviluppo di resistenza a taglio è stato assunto lineare con coesione nulla.

### 6.1. Il meccanismo della frana V58

Le analisi di stabilità sono state effettuate al fine di determinare quali fossero, nel rispetto delle indicazioni inclinometriche, stratigrafiche e geomorfologiche, la superficie di scivolamento critica e l'angolo di resistenza al taglio mobilitato, in diverse ipotesi di regime delle pressioni interstiziali. Le sezioni indagate sono ubicate in prossimità delle pile 7 e 10 (Figura 2); la superficie critica è risultata essere in accordo con quella ipotizzata sulla base dell'analisi geologica e geomorfologica del versante. L'angolo di resistenza a taglio mobilitato, calcolato mediante *back-analysis*, è compreso nell'intervallo  $30^\circ$ - $32^\circ$ , prossimo al limite superiore dei valori di resistenza residua ottenuti mediante prove di laboratorio (Figura 8). D'altronde, poiché nelle prove di laboratorio è stata esclusa la frazione ghiaiosa (tra il 20% e 35%) e in sito sono presenti frequenti blocchi, si ritiene possibile che la resistenza residua realmente mobilitata sia superiore a quella valutata in laboratorio, in virtù di una minore influenza sul comportamento a taglio residuo delle particelle di forma appiattita prodotte dal degrado delle filladi (Lupini et al., 1981). Il contributo delle pressioni interstiziali sulla stabilità è stato stimato in un incremento del coefficiente di sicurezza dell'1% per ogni metro di abbassamento della falda.

### 6.2. Il meccanismo della frana T64

In questo caso le verifiche sono state eseguite su una sezione centrale dell'Unità A della frana avente una direzione simile a quella degli spostamenti (Figura 4). L'angolo di resistenza a taglio mobilitato è risultato compreso tra  $26^\circ$  e  $27^\circ$  (Figura 8), in funzione delle ipotesi di regime delle pressioni interstiziali. Tale valore si colloca al limite superiore dei valori di resistenza residua ottenuti in laboratorio. Il contributo delle pressioni interstiziali sulla stabilità è stato stimato in un incremento del coefficiente di sicurezza dello 0.6% per ogni metro di abbassamento della falda.

### 6.3. Il meccanismo della frana V70

Le analisi a ritroso sono state eseguite in 9 sezioni

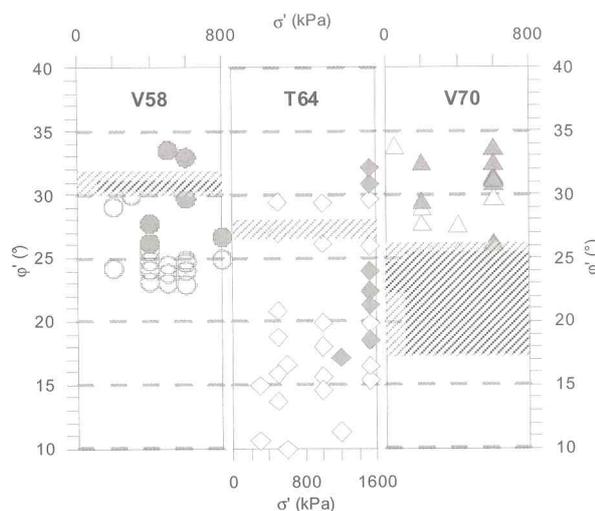


Figura 8 – Angoli di resistenza al taglio ottenuti da *back-analysis* (bande tratteggiate) e da prove di taglio diretto (simboli pieni=ultima; simboli vuoti=residua).

trasversali (Figura 5), facendo, coerentemente con il modello geologico, tre differenti ipotesi di estensione della superficie di scivolamento nell'ammasso roccioso a monte (solo Unità C o anche Unità B). Come già ricordato, il valore della pressione interstiziale è stato considerato nullo, in quanto non vi è la presenza di falda nel terreno interessato dal movimento franoso. In queste condizioni le uniche incognite del problema sono rappresentate dai valori dell'angolo di attrito del deposito di versante e dell'ammasso roccioso.

L'angolo di resistenza a taglio mobilitato del deposito di versante è risultato compreso tra  $17^\circ$  e  $26^\circ$  (Figura 8), con un valore medio pari a circa  $22,5^\circ$ . Tali valori sono coerenti con quelli di resistenza residua ottenuti in laboratorio.

## 7 CONCLUSIONI

Tre casi di grandi frane a cinematica estremamente lenta sono stati riconosciuti nella valle alpina dell'Isarco, tra Bolzano e Bressanone. Due di essi, V58 e V70, si collocano all'interno di DGPV. Particolare attenzione è stata posta nella misura degli spostamenti, utilizzando sistemi ridondanti di monitoraggio (inclinometri, Stazione Totale e pendoli) per il controllo dell'affidabilità della misura, al fine di valutare le velocità di spostamento e riconoscere i cinematismi di frana. In tutti e tre i casi la velocità media di spostamento è risultata pressoché costante nel tempo, leggermente decrescente per il caso T64, dove sono disponibili misure automatiche con inclinometri fissi che hanno evidenziato, almeno localmente, la stagionalità degli spostamenti. Le superfici di scivolamento si collocano all'interno dei volumi delle DGPV. Le misure piezometriche non sono risultate adeguate a descrivere le oscillazioni stagionali della falda, ma hanno permesso di riconoscere che nelle frane V58 e T64 la superficie di scivolamento è parzialmente sotto falda, nella frana V70 è sopra falda.

Le verifiche di stabilità a ritroso hanno fornito valori di angolo di resistenza a taglio mobilitato prossimi ai valori residui stimati in laboratorio, consentendo di confermare

le ipotesi su geometria della superficie di scivolamento e su regime delle pressioni interstiziali.

## BIBLIOGRAFIA

- Agliardi F., Crosta G.B., Zanchi A., e Ravazzi C., 2009. *Onset and timing of deep-seated gravitational slope deformations in the eastern Alps, Italy*. *Geomorphology*, 103(1), pp. 113-129.
- Bertini T., Cugusi F., D'Elia B. e Rossi-Doria M., 1986. *Lenti movimenti di versante nell'Abruzzo adriatico: caratteri e criteri di stabilizzazione*, XVI Convegno Nazionale di Geotecnica.
- Cadoppi P., Giardino M., Perrone G. e Tallone S., 2007. *Litho-structural control, morphotectonics, and deep-seated gravitational deformations in the evolution of Alpine relief: a case study in the lower Susa Valley (Italian Western Alps)*. *Quaternary international*, 171, pp. 143-159.
- Cruden D.M. e Varnes D.J., 1996. *Landslides Types and Processes*. In: Turner A.K. & Schuster R.L. (Eds.) *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247. National Academy Press, WA, pp. 36-75.
- Dominici D. Massimi V. e Simeoni L., 2014. *Reliability and precision of a network for monitoring very slow movements with a Total Station*. Proc. of the XII IAEG Congress, Torino (Italy), Section 2.1, September 15-19, 2014.
- Fenti V., Ruzzier D., Silvano S. e Spagna V., 1981. *I movimenti franosi della Valle Isarco tra Bolzano e Ponte Gardena (Alto Adige)*. *Studi Trentini di Scienze Naturali*, 58, pp. 59-130.
- Glastonbury J. e Fell R., 2008. *Geotechnical characteristics of large slow, very slow, and extremely slow landslides*. *Canadian Geotechnical Journal*, 45, pp. 984-1005.
- Leroueil S., Locat J., Vaunat J., Picarelli L., Lee H. e Faure R., 1996. *Geotechnical characterization of slope movements*. *Proceedings of 7th International Symposium on Landslides*, Rotterdam, 1, pp. 53-74.
- Leroueil S., 2001. *Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms*. *Géotechnique* 51, No. 3, pp. 197-243.
- Lupini J.F., Skinner A.E. e Vaughan P.R., 1981. *The drained residual strength of cohesive soils*. *Géotechnique*, Vol. 31, No. 2, pp. 181-213.
- Penck A. e Brückner E., 1909. *Die alpen im Eiszeitalter*. Vol. 3. Tauchnitz.
- Puzrin A.M. e Schmid A., 2012. *Evolution of stabilised creeping landslides*. *Géotechnique* 62, No. 6, pp. 491 - 501.
- Simeoni L. e Benciolini G.B., 2007. *Complementarietà tra i monitoraggi inclinometrico e topografico per l'analisi di stabilità di un versante*. *Atti del XXIII Convegno Nazionale di Geotecnica*, Padova-Abano Terme, 16-18 maggio 2007, pp. 639-646.
- Simeoni L. e Mongiovi L., 2007. *Inclinometer monitoring of the Castelrotto landslide in Italy*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 6, June 2007, pp. 653-666.
- Simeoni L., Ferro E. e Tombolato S., 2014. *Reliability of displacement measurements in two cases of viaduct-extremely slow landslide interactions*. Proc. of the XII IAEG Congress, Section 2.1, Torino (Italy), September 15-19, 2014.
- Tombolato S., Simeoni L., Pedrotti M. e Mongiovi L., 2011. *Field monitoring system of a motorway viaduct moving on an extremely slow landslide*. Proc. of the 8th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Berlin, Germany, 12-16 September 2011.
- Van Asch T.W.J., Van Beek L.P.H. e Bogaard T.A., 2007. *Problems in predicting the mobility of slow-moving landslides*. *Engineering Geology*, 91, pp.46-55.
- Varnes D.J., Radbruch-Hall D.H. e Savage W.Z., 1989. *Topographic and structural conditions in areas of gravitational spreading of ridges in the western United States*. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1496, p. 28
- Vulliet L., 1986. *Modelisation des pentes naturelles en mouvement*. Thesis No. 635, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland.
- Vulliet L. e Hutter K., 1988a. *Viscous-type sliding laws for landslides*. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 25, No. 3, pp. 467-477.
- Vulliet L. e Hutter K., 1988b. *Continuum model for natural slopes in slow movement*. *Geotechnique* 38, No. 2, pp. 199-217.
- Zischinsky U., 1966. *On the deformation of high slopes*. Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mechanics, 2, pp. 179-185.

## ABSTRACT

### EXTREMELY SLOW LANDSLIDES IN AN ALPINE GLACIAL VALLEY OF CORRIDOR TEN-T5 (ITALY)

Keywords: landslides, extremely slow, infrastructures, monitoring, displacements.

Major transport infrastructures connecting Italy to central Europe (such as state roads, motorway E45, national railway and the planned high-speed railway TEN-T5) run through the alpine Isarco Valley. Slopes of the Isarco valley are affected by deep seated rock slides and gravitational slope deformations, which are quite common features in previously glaciated valleys. The paper describes three case studies of such type of slope movements (herein referred to as V70, T64 and V58), that are characterized by extremely slow movement rates and that interact some of the above mentioned infrastructures. Displacements and pore water pressures of the landslides have been monitored for a minimum of 4 years to a maximum of 16 years. Redundant displacement measures were collected by using Total Station, inclinometers and in-place inclinometers, and revealed that in all the sites the displacement rate is lower than 10 mm/year. Except for site V70, where rates seem to be independent from the small water table oscillation, slight accelerations were observed when the Isarco river increased its discharge level during rainfall periods. Back-analysis revealed that mobilized residual shear strength is higher than it is when evaluated by laboratory tests, and that pore-water pressure distribution has a significant influence on slope stability only for sites V58 and V64.

ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA

XXV CONVEGNO NAZIONALE  
DI GEOTECNICA

Baveno 4-6 giugno 2014

LA GEOTECNICA NELLA DIFESA DEL TERRITORIO  
E DELLE INFRASTRUTTURE DALLE CALAMITÀ NATURALI

**VOLUME 2**

EDIZIONI AGI  
ROMA