

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Geoscienze

Direttore: Prof.ssa Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

IN

GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**STUDIO DELLA RELAZIONE
TRA STATO DELLA FALDA E MOVIMENTI DELLA
FRANA DI IDRO (BRESCIA)**

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN
THE GROUNDWATER LEVELS AND DISPLACEMENTS FOR
THE LANDSLIDE OF IDRO (BRESCIA)

Relatore: Prof. Ing. Simonetta Cola

Laureando: Angelo Merlo

ANNO ACCADEMICO 2015/2016

INDICE

Introduzione	1
Capitolo 1 – Tipologia di frana in oggetto	3
1.1 – Movimenti lenti.....	3
1.2 – Analisi del comportamento di alcune frane lente in bibliografia	7
Capitolo 2 – Inquadramento della frana di Idro	18
2.1 - Inquadramento geografico	18
2.2 - Inquadramento geologico	21
2.3 - Inquadramento geomorfologico	26
2.4 - Caratterizzazione stratigrafica e idrogeologica del corpo di frana	29
Capitolo 3 – Monitoraggio e indagini sulla frana	33
3.1 - Sistemi di monitoraggio.....	33
3.1.1 - Misure piezometriche	39
3.1.2 - Misure inclinometriche	40
3.2 - Indagini geognostiche, geofisiche e prove geotecniche sul corpo di frana e modalità di scelta dei parametri del modello	43
3.3 - Considerazioni sulla stabilità della frana	55
3.4-Interventi proposti per la stabilizzazione del versante	60
Capitolo 4 – Analisi dei dati del monitoraggio e di velocità	73
4.1 - Modalità di scelta dei dati analizzati.....	73
4.2- Osservazioni generali sulla correlazione tra il livello di falda in PZ3, le precipitazioni e la velocità di scorrimento della frana.....	73
4.3 - Modelli più utilizzati.....	75
4.3.1 - Sforzi agenti e equazioni di velocità considerate dai modelli.....	76
4.3.2 – Modello con pendio indefinito e un ostacolo al piede	77
4.3.3 – Modelli che considerano un pendio indefinito	79

4.4 - Risorse a disposizione e parametri geotecnici adottati per la modellazione	82
4.5 - Applicazione del modello di Vulliet & Hutter con calibrazione differenziata alla frana di Idro	86
4.6 - Applicazione di un modello a pendio indefinito.....	96
4.7 - Applicazione di due modelli basati su una legge lineare e una legge esponenziale	98
4.8 - Valutazione dell'affidabilità dei modelli applicati.....	105
4.9 - Considerazioni sulla precisione delle sonde inclinometriche.....	108
Conclusioni e sviluppi futuri	120
Appendice 1	121
Appendice 2	149
Appendice 3	163
Bibliografia	174
Sitografia	179

Introduzione

La presente tesi tratta di geologia applicata e geotecnica e riguarda lo studio della cinematica di una frana di scivolamento in funzione del livello di falda e delle piogge.

L'obiettivo principale del lavoro è trovare una relazione matematica in grado di stimare accuratamente la velocità di scorrimento della frana di Idro (BS) in funzione dell'altezza di falda al suo interno.

Inoltre, si vogliono esporre delle osservazioni generali sul comportamento della falda e della velocità di scorrimento in funzione del regime pluviometrico della zona, con particolare attenzione al tempo di risposta della falda e all'escursione di livello che gli eventi piovosi provocano.

Il primo capitolo è puramente teorico e bibliografico; in esso viene inquadrata la tipologia di frana a cui appartiene il caso analizzato, presentando i principi comuni che caratterizzano i movimenti franosi che ne fanno parte, e presenta i risultati di studi sul comportamento della velocità e del livello di falda di alcune frane di esempio.

Il secondo capitolo è anch'esso teorico, ma focalizzato sull'inquadramento della frana di Idro, oggetto di studio.

Questa frana interessa l'alveo del fiume Chiese, in Val Sabbia, appena a valle del suo sbocco dal Lago di Idro, lago di origine glaciale sfruttato come bacino artificiale grazie alla traversa di regolazione idraulica, al piede della porzione destra della frana. La frana è compresa nella classe di massima pericolosità idrogeologica, a causa della potenziale occlusione dell'alveo a seguito di una brusca accelerazione; ciò provocherebbe, infatti, un innalzamento incontrollato del livello del lago e un potenziale cedimento improvviso dello sbarramento che si andrebbe a creare.

Il substrato del versante di frana è dalla Formazione delle Arenarie della Val Sabbia, che comprendono arenarie tufacee, siltiti e peliti.

La frana è una paleofrana classificabile come deformazione gravitativa profonda di versante originatasi in epoca post-glaciale e riattivatasi in tempi recenti come frana di scivolamento rotazionale, con superficie di scivolamento più superficiale.

Come evidenziato dai sondaggi verticali, questa si imposta in detrito composto da blocchi di roccia del substrato in matrice limoso-argillosa con una frazione di sabbie.

Nel terzo capitolo viene illustrato il sistema di monitoraggio installato in loco da Arpa Lombardia nel 2006, composto da tubi inclinometrici e piezometrici localizzati nella porzione media e inferiore del corpo di frana, utilizzati per indagini sullo spostamento in funzione della profondità, sulla velocità di scorrimento e sul livello di falda dal 2007 ad oggi.

Vengono illustrati anche i risultati delle prove di laboratorio su campioni prelevati durante i sondaggi a carotaggio continuo eseguiti in occasione della perforazione per la posa di alcuni dei predetti tubi.

Inoltre vengono riportati i risultati del calcolo del coefficiente di sicurezza ottenuti da più autori e, grazie ai dati di monitoraggio e ai dati geotecnici a disposizione, è fatta una stima degli sforzi agenti presso la superficie di scorrimento.

Infine, sono esposte le varie soluzioni proposte negli anni per la stabilizzazione della frana, accomunate dall'obiettivo di drenare le acque meteoriche abbassando il livello di falda.

Nel quarto e ultimo capitolo vengono esposti il lavoro svolto per raggiungere gli obiettivi prefissati e le relazioni matematiche trovate in bibliografia, necessarie al suo svolgimento.

Dopo aver motivato la scelta dei dati di monitoraggio per l'analisi in progetto, sono analizzati i dati pluviometrici, freaticometrici e di velocità, parallelamente traendo delle osservazioni generali.

Vengono, quindi, esposte le leggi matematiche tratte da fonti bibliografiche riguardo il calcolo della velocità di scorrimento di una frana in funzione dell'altezza di falda. Quindi sono applicati dei modelli di previsione della velocità al caso di studio.

I risultati ottenuti sono riassunti parallelamente e viene indicato quello ritenuto più affidabile.

Vengono, infine, presentati un'analisi della strumentazione utilizzata ad Idro, una panoramica degli errori degli inclinometri e altri modelli di inclinometro, utilizzati in altre frane e i cui dati possono essere comparati con quelli della frana in studio.

Capitolo 1 – Tipologia di frana in oggetto

1.1 – Movimenti lenti

Secondo Cruden & Varnes (1996) si definiscono frane lente quelle frane che comportano un movimento del terreno con velocità media uguale o minore di 156 m/anno (vedi Tabella 1.1).

I dati inclinometrici raccolti presso la frana di Idro evidenziano una velocità media di 6cm/anno, ponendola quindi nella categoria delle frane molto lente.

Tabella 1.1 – Classificazione delle frane secondo classi di velocità secondo Cruden & Varnes (Cruden & Varnes, 1996)

Velocity class	Description	Velocity (mm/s)	Typical velocity
7	Extremely rapid	5×10^3	5 m/s
6	Very rapid	5×10^1	3 m/min
5	Rapid	5×10^{-1}	1.8 m/h
4	Moderate	5×10^{-3}	13 m/month
3	Slow	5×10^{-5}	1.6 m/year
2	Very slow	5×10^{-7}	16 mm/year
1	Extremely Slow		

Nella maggioranza dei casi (Ranalli et al., 2010) le frane caratterizzate da un movimento di questo tipo rientrano nella categoria del movimento per scivolamento traslazionale o rotazionale (Cruden & Varnes, 1996). La frana di Idro, essendo impostata nel detrito, è classificata come frana di scivolamento rotazionale in detrito (debris slide) (vedi Tabella 1.2). Un movimento di questo tipo è riconducibile al comportamento di “creep” (Penta, 1960). I terreni interessati da creep possiedono sempre una matrice argillosa/siltosa associata, a volte, a frammenti lapidei provenienti dall’alterazione del substrato roccioso (Penta, 1960). Fisicamente il comportamento è da definirsi plastico-viscoso in quanto, una volta raggiunta la resistenza critica del materiale, questo inizia a fluire generando, oltre alla forza di resistenza prodotta dall’attrito, una forza di resistenza viscosa proporzionale alla velocità di scorrimento assunta (Ranalli et al., 2010).

La superficie sulla quale si impostano tali movimenti è spesso netta e localizzata all’interno degli con resistenza al taglio minore, corrispondenti spesso con quelli a maggior frazione argillosa (Di Maio et al., 2013).

Il creep può verificarsi in concomitanza sia ad una rottura con attivazione di una nuova frana sia alla riattivazione di una frana già esistente.

Tabella 1.2 – Classificazione delle frane secondo il tipo di movimento e il materiale coinvolto secondo Varnes (Hungry et al., 2014; basata su Varnes, 1978)

Movement type	Rock	Debris	Earth
Fall	1. Rock fall	2. Debris fall	3. Earth fall
Topple	4. Rock topple	5. Debris topple	6. Earth topple
Rotational sliding	7. Rock slump	8. Debris slump	9. Earth slump
Translational sliding	10. Block slide	11. Debris slide	12. Earth slide
Lateral spreading	13. Rock spread	–	14. Earth spread
Flow	15. Rock creep	16. Talus flow	21. Dry sand flow
		17. Debris flow	22. Wet sand flow
		18. Debris avalanche	23. Quick clay flow
		19. Solifluction	24. Earth flow
		20. Soil creep	25. Rapid earth flow
			26. Loess flow
Complex	27. Rock slide-debris avalanche	28. Cambering, valley bulging	29. Earth slump-earth flow

In questo secondo caso, nel quale rientra anche la frana di Idro, la resistenza al taglio in gioco è quella residua, cioè sempre minore della resistenza di picco (Stark & Hussain, 2010), salvo nei casi in cui si possa verificare un recupero parziale di resistenza durante un lungo periodo di periodi quiescenza.

Il creep si può suddividere in 3 fasi: la fase primaria, la fase secondaria e la fase terziaria (Varnes, 1978; Jamaludin et al., 2012).

La fase primaria si attiva con l'inizio del movimento ed è una fase di diminuzione della velocità di creep fino a raggiungere una fase a velocità costante (fase secondaria). Durante la fase terziaria il flusso di materiale accelera molto velocemente fino, eventualmente, a giungere alla rottura. In base allo stato di stress in rapporto alla resistenza di taglio residua possono manifestarsi le prime due o tutte e tre le fasi (Cola et al., 2016). Queste tre fasi, visibili in Figura 1.1, sono solamente un'approssimazione schematica del movimento del terreno.

Come suggerito dalla legge di Bingham e dal modello di Vulliet e Hutter (1988), il creep e la resistenza al taglio viscosa si manifestano con qualsiasi livello di stress. Tuttavia, come dimostrato da Bhat et al. (2011), il creep secondario e terziario si possono attivare solamente quando lo sforzo mobilizzato è maggiore della resistenza residua del materiale.

I fattori che governano la cinematica di questo tipo di frane sono quello idrogeologico e quello gravitativo. Le frane di questo tipo sono, in molti casi, sempre in movimento e possiedono una velocità media di pochi cm/anno.

Subiscono delle accelerazioni anche notevoli in concomitanza di precipitazioni continuative su un intervallo di tempo di almeno qualche ora e con quantità di pioggia cumulata rilevante (Cornforth, 2005).

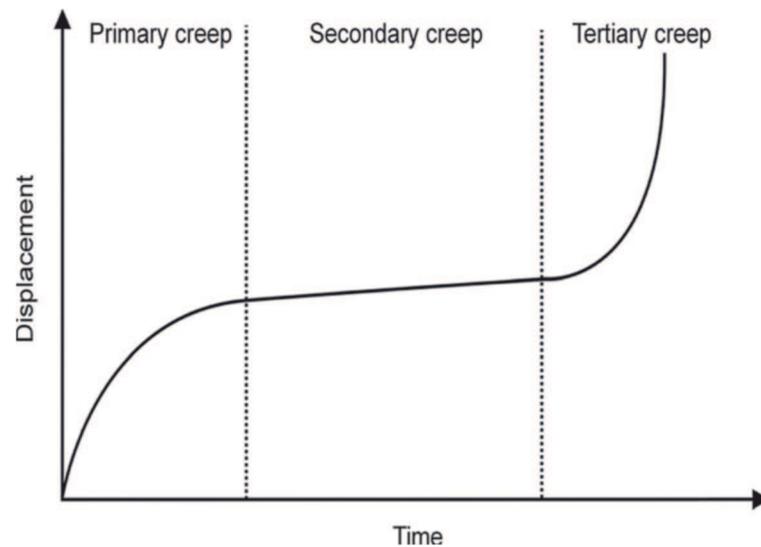


Figura 1.1 – Rappresentazione del modello di creep a tre fasi ipotizzato da Varnes (1978). (Jamaludin et al., 2012)

Tale requisito è necessario per far sì che il suolo superficiale raggiunga la saturazione di equilibrio, necessaria per far fluire l'acqua verso il basso, dove sono presenti la/le falde acquifere (Figura 1.2).

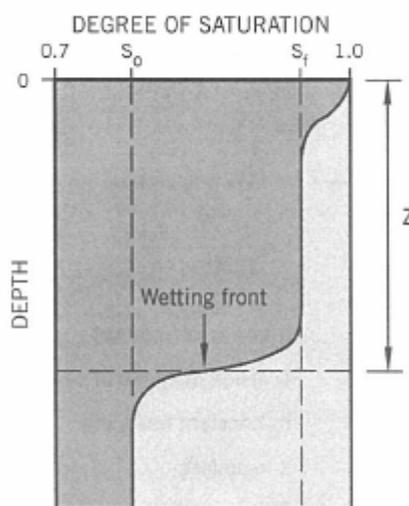


Figura 1.2 – Avanzamento del fronte di saturazione per l'infiltrazione della pioggia secondo la legge ipotizzata da Lumb, 1975 (Cornforth, 2005)

Innalzandosi il livello il livello di falda aumenta la pressione neutra all'interno del terreno e, secondo il Principio di Terzaghi, diminuisce la pressione efficace agente sulla superficie di scorrimento alla base del corpo di frana e, di conseguenza, lo sforzo resistente.

Oltre all'entità e alla distribuzione temporale delle precipitazioni è molto importante anche il periodo dell'anno in cui queste cadono e la storia pluviometrica recente del terreno. Ciò è legato al grado di saturazione.

Con un clima temperato durante il periodo estivo e primaverile, infatti, la vegetazione e l'insolazione diventano fattori rilevanti nell'assorbimento delle piogge cadute, in quanto il fenomeno dell'evapotraspirazione e porta a una forte riduzione dell'apporto d'acqua in profondità.

Le cause sono la rapida evaporazione dovuta all'alta temperatura dell'aria, la maggiore radianza diurna e l'assorbimento da parte degli apparati radicali delle piante per il loro nutrimento, maggiore rispetto all'inverno e all'autunno, periodi nei quali l'attività delle piante è ridotta al minimo. In autunno e inverno questi fattori assumono un'importanza minore e gran parte della pioggia caduta si infiltra e raggiunge la falda, causandone l'innalzamento anche con precipitazioni di entità molto modesta. In un anno medio come pluviometria e termometria, da Maggio a Settembre il livello di falda cala a causa della minor entità delle precipitazioni e dell'azione dell'evapotraspirazione. Con l'arrivo delle piogge autunnali il livello di falda inizialmente non risponde e continua a calare a causa del non raggiungimento dello stato di saturazione di equilibrio; successivamente, specie con precipitazioni su più giorni, con notevole quantitativo di pioggia caduta e picchi di intensità rilevanti, aumenta. Durante l'inverno il livello di falda oscilla entro 2 limiti ideali di alto e basso livello discostandosi da questi solo in occasione di piogge con precipitazione cumulata e intensità particolarmente alta. Attorno a Febbraio/Marzo, con la primavera, il livello di falda inizia la fase calante, pur rispondendo ai vari eventi precipitativi, anche rilevanti, del periodo primaverile (Cornforth, 2005).

L'entità delle escursioni di falda in seguito a periodi secchi o piovosi è legato all'entità delle precipitazioni e al comportamento idrogeologico del terreno costituente il corpo di frana.

Il comportamento idrogeologico di quest'ultimo può essere molto complesso, essendo legato alla stratigrafia e alla morfologia.

Inoltre nelle zone di estensione presenti nella zona sommitale della frana si possono sviluppare sistemi di fratture che permettono la rapida infiltrazione nel corpo di frana (Xu et al., 2016).

1.2 – Analisi del comportamento di alcune frane lente in bibliografia

Per capire le tipologie di comportamento idrogeologico delle frane lente sono stati analizzati dei casi di studio bibliografici.

Xu et al. (2016) hanno studiato una frana di scivolamento traslazionale ubicata presso Kualiangzi, nella provincia dello Sichuan in Cina sud-occidentale. Il Sichuan è in una zona subtropicale, caratterizzata tra Maggio e Settembre dalla stagione dei monsoni, stagione durante la quale le piogge sono frequenti, intense e di lunga durata, con quantitativi di pioggia molto elevati.

Il versante studiato è coperto da uno strato spesso una decina di metri di terreno di tipo residuale e alluvionale, composto da argille siltose con scarsa frazione ghiaiosa. Al di sotto è presente il substrato roccioso, caratterizzato da grossi banchi di arenarie intercalati a sottili strati di argilliti.

Gli strati sono in franapoggio meno inclinato del versante e possiedono un'inclinazione di circa 10°. Ciò provoca uno scorrimento degli strati arenacei al di sopra degli strati di argillite, caratterizzati da una velocità di deformazione maggiore a causa del comportamento plastico, provocando la formazione di più fratture di tensione all'interno dell'arenaria nella zona del corpo di frana. La principale è posizionata tra la scarpata e la testata di frana e, come le altre, è riempita da materiale colluviale costituito da blocchi di arenaria con matrice di ghiaie e brecce.

L'intensa fratturazione conferisce al corpo di frana una porosità tra la primaria, tipica dei suoli, e la secondaria, tipica delle rocce e, quindi una buona permeabilità. L'acqua che durante gli eventi precipitativi si infiltra crea, infatti, una falda freatica che genera una pressione idrostatica sulla superficie di scorrimento impostata sul primo strato di argilliti e ne riduce la resistenza al taglio (vedi la legge di Terzaghi e il criterio di Mohr-Coulomb). Inoltre, sulla frana agisce la pressione idrostatica orizzontale generata dall'acqua infiltrata nella profonda frattura di tensione al piede della scarpata principale.

In Figura 1.3 è illustrato lo schema idrogeologico concettuale di questa frana.

La velocità di scorrimento media, rilevata con sensori GPS, è di 18.3 cm/anno (0.5 mm/giorno) e nella stagione delle piogge può accelerare fino a qualche metro all'anno per brevi periodi di tempo.

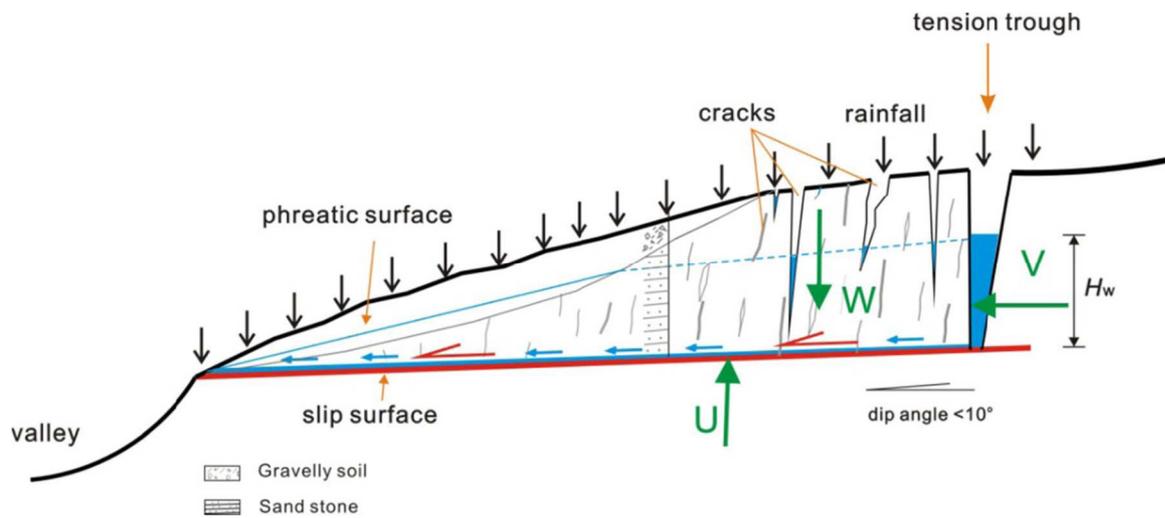


Figura 1.3 – Modello idrogeologico concettuale della frana di Kualiangzi (Sichuan, Cina). W è la forza peso del corpo di frana; U è la risultante della pressione idrostatica dovuta alla falda freatica; V è la risultante della pressione idrostatica nella frattura di tensione principale; H_w è l'altezza della falda freatica, indicata con la linea tratteggiata blu. Le frecce rosse indicano la direzione di scorrimento della frana e quelle blue la direzione di flusso dell'acqua presso la superficie di scorrimento. (Xu et al., 2016)

La pressione di poro e l'altezza di falda all'interno del corpo di frana sono state, rispettivamente, misurate con 4 piezometri a corda vibrante e 5 freatimetri collocati in tubi piezometrici che raggiungono la superficie di scorrimento (vedi Figura 1.4).

L'analisi dei dati relativi ai 4 eventi principali di una stagione delle piogge ha mostrato che, per ogni evento, esiste una differenza di alcune ore tra l'inizio dell'evento piovoso e la salita del livello di falda. Inoltre, la salita del livello di falda, registrata dai freatimetri, avviene prima dell'aumento della pressione di poro, che è caratterizzata da una minor velocità di salita rispetto al livello.

Inoltre, si è notato che i freatimetri posti nelle porzioni inferiore e media della frana (vedi Figura 1.4) misurano un'escursione di falda maggiore di quelli posti nella porzione superiore. Questa è caratterizzata da un acquifero impostato maggiormente in roccia fratturata, meno permeabile del terreno superficiale che costituisce le altre due porzioni, e da una risposta meno accentuata.

Il tempo di risposta del livello di falda nelle porzioni media e superiore è maggiore rispetto a quello nella porzione inferiore a causa della maggior profondità della superficie di scorrimento e della minor permeabilità verticale.

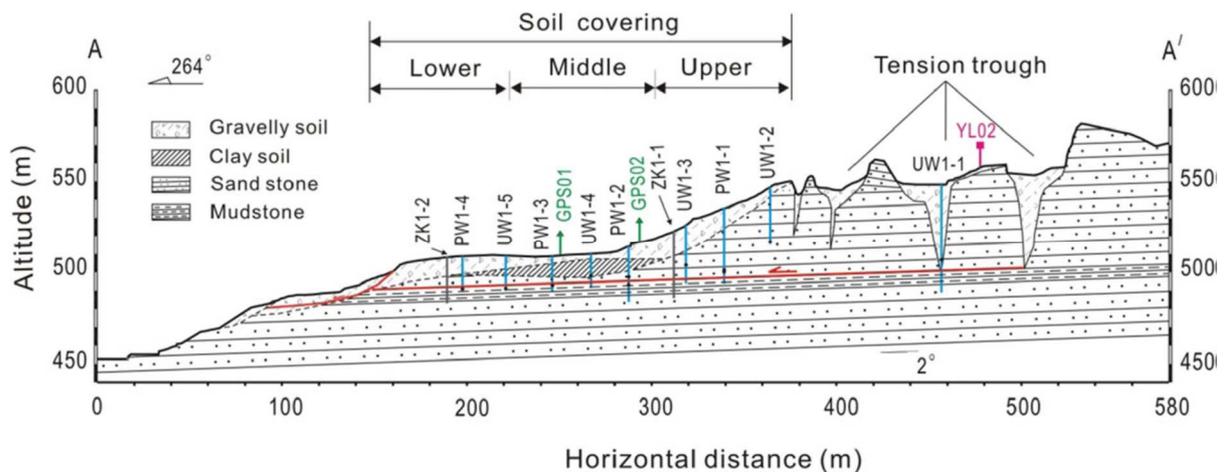


Figura 1.4 – Sezione geologica longitudinale della frana con ubicazione degli strumenti di monitoraggio. Le sigle YL,UW,PW,GPS e ZK indicano, rispettivamente i pluviometri, i freatimetri, i piezometri, le stazioni GPS e gli inclinometri fissi.

(Xu et al., 2016)

Rispetto ai primi 2 eventi il tempo di risposta degli ultimi è risultato molto minore, probabilmente perché il pendio all’inizio della precipitazione aveva un maggior grado di saturazione.

In corrispondenza dell’ultimo evento registrato, la pressione di poro ha subito una forte diminuzione che i ricercatori pensano sia dovuta all’improvvisa accelerazione della frana da una velocità superficiale di 0.15 cm/giorno a 2.4 cm /giorno, che ha cambiato le vie di drenaggio verticale dell’acqua (vedi Figura 1.5).

Questo evidenzia un effetto di trazione della superficie di scorrimento sulle arenarie soprastanti ed è la spiegazione della velocità di scorrimento presso la superficie di scorrimento molto maggiore rispetto a quella superficiale individuata nel breve periodo di funzionamento degli inclinometri fissi.

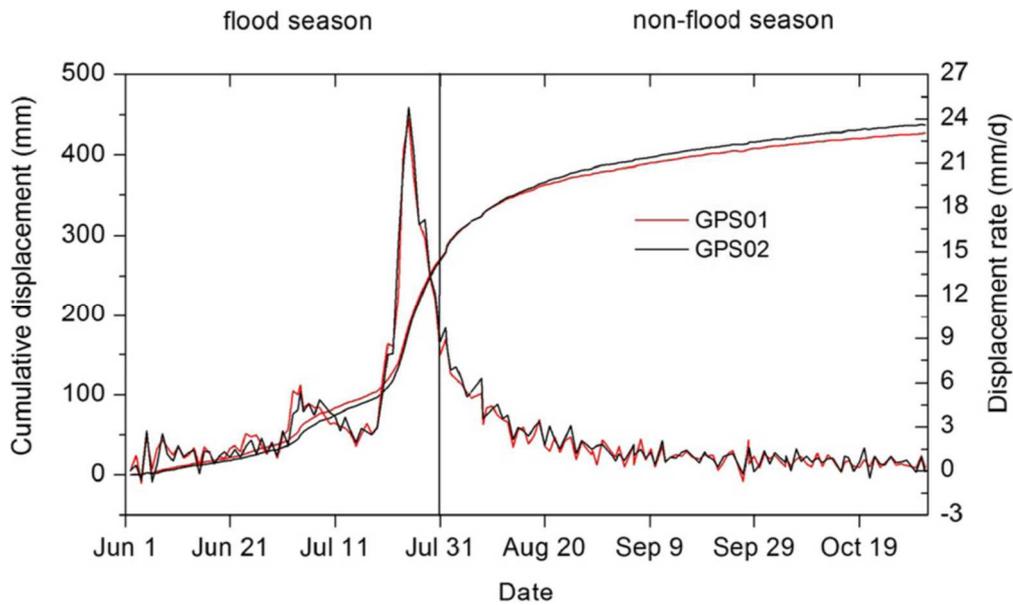


Figura 1.5 – Spostamento cumulato e velocità di scorrimento della frana in corrispondenza dell’ultimo evento precipitazione della stagione delle piogge del 2013. (Xu et al., 2016)

Un altro esempio interessante è la frana di scivolamento roto-traslazionale presso Xiashan (Zhi et al., 2016), sita nella provincia dello Zhanjiang in Cina sud-orientale e soggetta al periodo monsonico come la frana analizzata da Xu et al. (2016).

Questa seconda frana è composta da uno strato superficiale di suolo con argille siltose e ghiaie, dove risiedono la zona di scorrimento superficiale e una falda freatica a carattere stagionale; da un’alternanza di basalti fratturati e strati sedimentari e, alla base, da un substrato tufaceo-arenaceo intatto.

Gli strati sedimentari intercalati ai basalti sono suddivisi in strati ghiaioso-sabbiosi, dove risiedono acquiferi artesiani, e strati argillosi.

All’interno del primo pacchetto di strati sedimentari si imposta una zona di scorrimento profonda. Le zone di scivolamento sono state individuate grazie a misure inclinometriche manuali e automatiche all’interno di 2 tubi inclinometrici. È stato evidenziato come negli ultimi anni la zona di scorrimento più attiva sia quella superficiale. La zona di scorrimento profonda probabilmente si attiva in occasione di eventi piovosi eccezionale di lunga durata.

In Figura 1.6 è visibile la sezione geologica della frana e in Figura 1.7 una sezione con le superfici di scorrimento individuate tramite le misure inclinometriche.

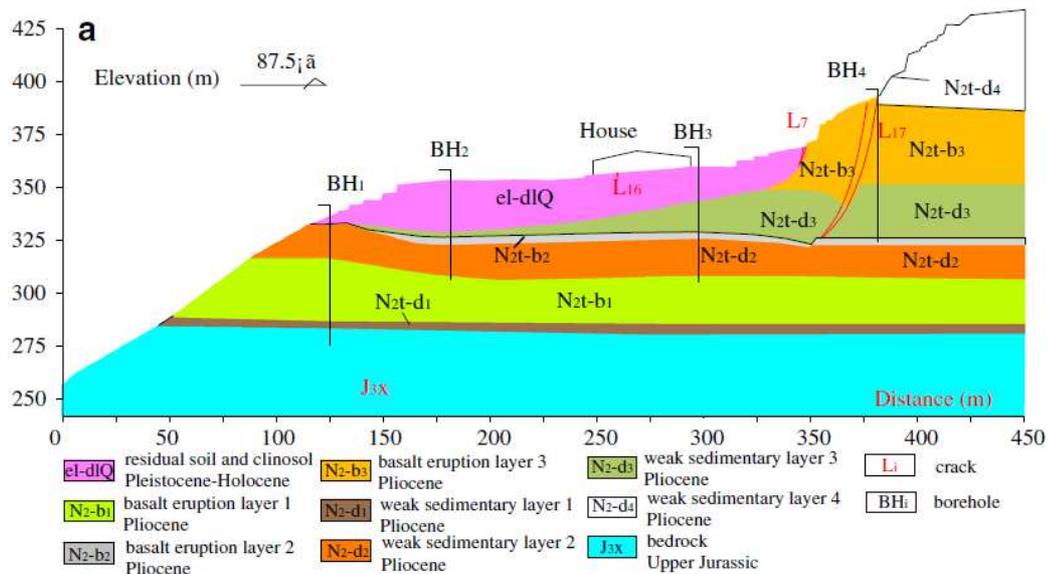


Figura 1.6 – Sezione geologica longitudinale al pendio della frana di Xiashan. (Zhi et al., 2016)

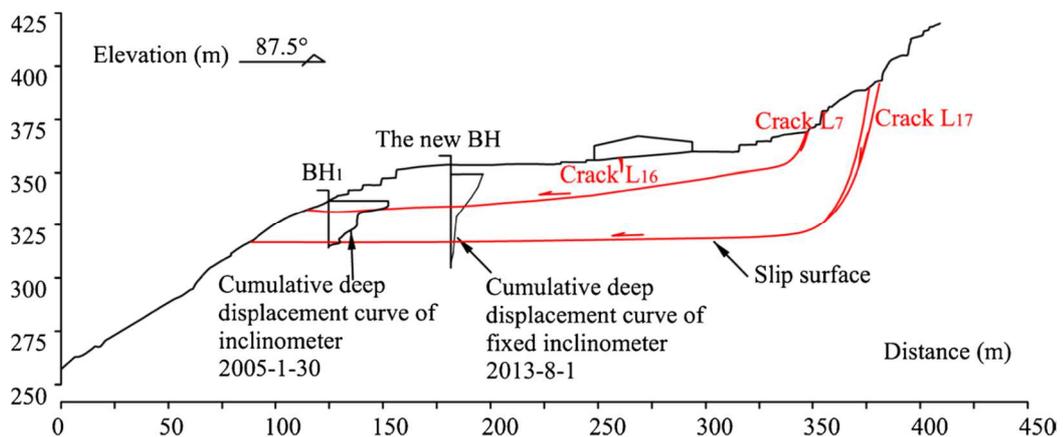


Figura 1.7 – Sezione del pendio con indicate le superfici di scorrimento principali e i profili inclinometrici ottenuti con misure inclinometriche tradizionali e inclinometri fissi rispettivamente eseguite presso il primo sondaggio (“BH₁”) e il secondo sondaggio (“The new BH”). (Zhi et al., 2016)

Studiando la correlazione tra precipitazioni, livello di falda e velocità della frana è stato notato come quest’ultima aumenti notevolmente quando il livello di falda sale sopra un determinato livello.

Si è visto come la frana mantenga una velocità media prossima a zero con picchi di 13 cm/anno nelle fasi in cui il livello oltrepassa la soglia (vedi Figura 1.8).

Come nel caso della frana dello Sichuan (Xu et al., 2016), anche in questo caso si riscontra un ritardo tra l’evento piovoso e la salita della falda ma la correlazione tra le caratteristiche dell’evento piovoso, l’entità di escursione della falda e lo spostamento è meno chiara. Il motivo è probabilmente la mutazione nel tempo delle vie di infiltrazione e scarico delle acque.

L'attivazione della frana avviene probabilmente a causa dello sviluppo di una forte pressione neutra nell'acquifero confinato presente nel secondo pacchetto di strati sedimentari tra i basalti. Questo si imposta, infatti, in un sottile strato di ghiaie sabbiose compreso tra 2 strati di natura argillosa.

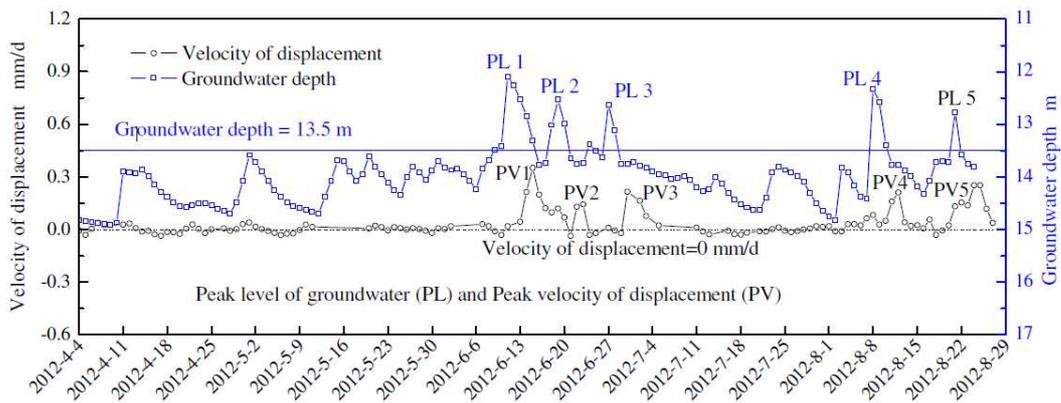


Figura 1.8 – Velocità di spostamento superficiale presso il secondo sondaggio in funzione del livello di falda nel periodo 4 Aprile 2012 – 28 Agosto 2012. (Zhi et al., 2016)

Schulz et al. (2009) hanno studiato la relazione tra il livello di falda, la pressione di poro e la velocità di scorrimento della frana di Slumgullion, località nello stato del Colorado (USA).

È una frana di scivolamento traslazionale in detrito (Cruden & Varnes, 1996). Il detrito è derivato da basalti, rioliti e andesiti alterate per l'attività idrotermale, caratterizzati dalla presenza di strati argillosi formati, probabilmente, per l'intrusione di dicchi.

Lungo questi strati argillosi sono impostate 2 superfici/zone di taglio su cui la frana scorre.

L'area di frana è molto vasta e solamente una parte di essa è attualmente attiva. La parte inattiva è controllata da una superficie di scorrimento più profonda e quella attiva da un'altra superficie meno profonda. Le due superfici sono delimitate da piccole dorsali di terreno chiamate "flank ridge".

La frana possiede una velocità di scorrimento costante durante quasi tutto l'anno, decrescente da monte verso valle con valore da 20 cm/anno a 7.4 cm/anno e picchi di più di qualche decina di m/anno, collocandosi quindi a cavallo tra le categorie delle frane lente e molto lente (Cruden & Varnes, 1996).

In Figura 1.9 è presentata una sezione longitudinale della frana.

Nella dorsale sono stati installati in un foro di sondaggio 3 piezometri a differenti profondità (vedi Figura 1.9) e un cavo coassiale; in superficie è stato posto un estensimetro a cavo. Nel pozzetto sono stati collocati 4 tensiometri a differenti profondità (vedi Figura 1.9) e in superficie un pluviometro, un termometro e un nivometro.

Il cavo coassiale aveva l'obiettivo di individuare la superficie/zona di scorrimento, ma la profondità raggiunta non è risultata sufficiente.

Durante il periodo di monitoraggio di 4 anni i tensiometri hanno evidenziato una buona risposta della pressione di poro e, quindi, del livello di falda alle precipitazioni e allo scioglimento della neve, che generalmente avviene nei mesi di Marzo e Aprile.

La velocità nel periodo oggetto dello studio è risultata maggiore in primavera ed estate e minore in autunno e inverno mostrando una correlazione positiva con le piogge.

Queste nei due anni di monitoraggio (2004 e 2005) sono risultate più intense tra Marzo e Aprile e tra Luglio e Settembre risultando meno intense a Giugno, Ottobre e Novembre e sotto forma prevalente di neve nel periodo Dicembre – Aprile.

La risposta del livello di falda/pressione di poro in seguito a eventi piovosi è registrata prima dai piezometri e tensiometri più superficiali e successivamente da quelli più profondi; nel caso di eventi di scioglimento di neve al suolo la risposta segue la tempistica opposta (vedi Figura 1.10 e Figura 1.11).

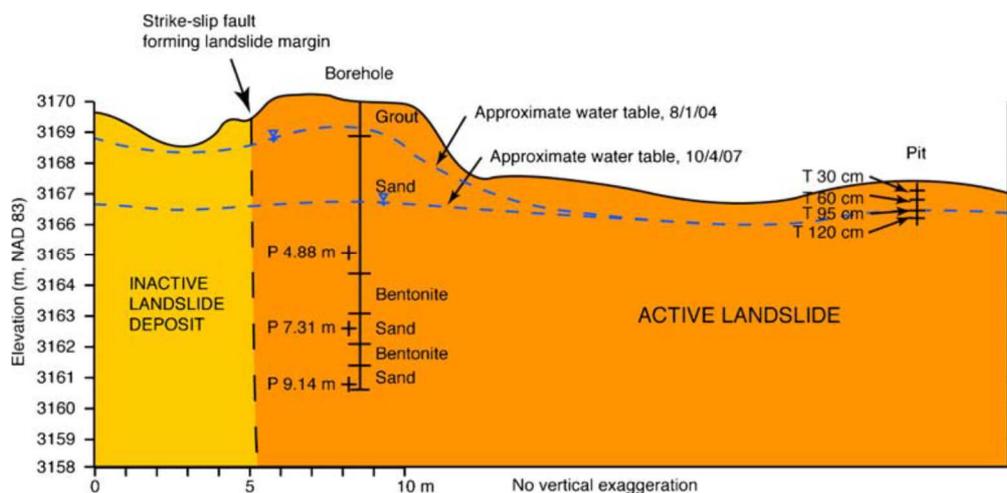


Figura 1.9 – Sezione longitudinale della frana di Slumgullion con indicate le posizioni del sondaggio e del pozzetto scavati per la posa, rispettivamente, di 3 piezometri accoppiato ad un cavo coassiale e 4 tensiometri. (Schulz et al., 2009)

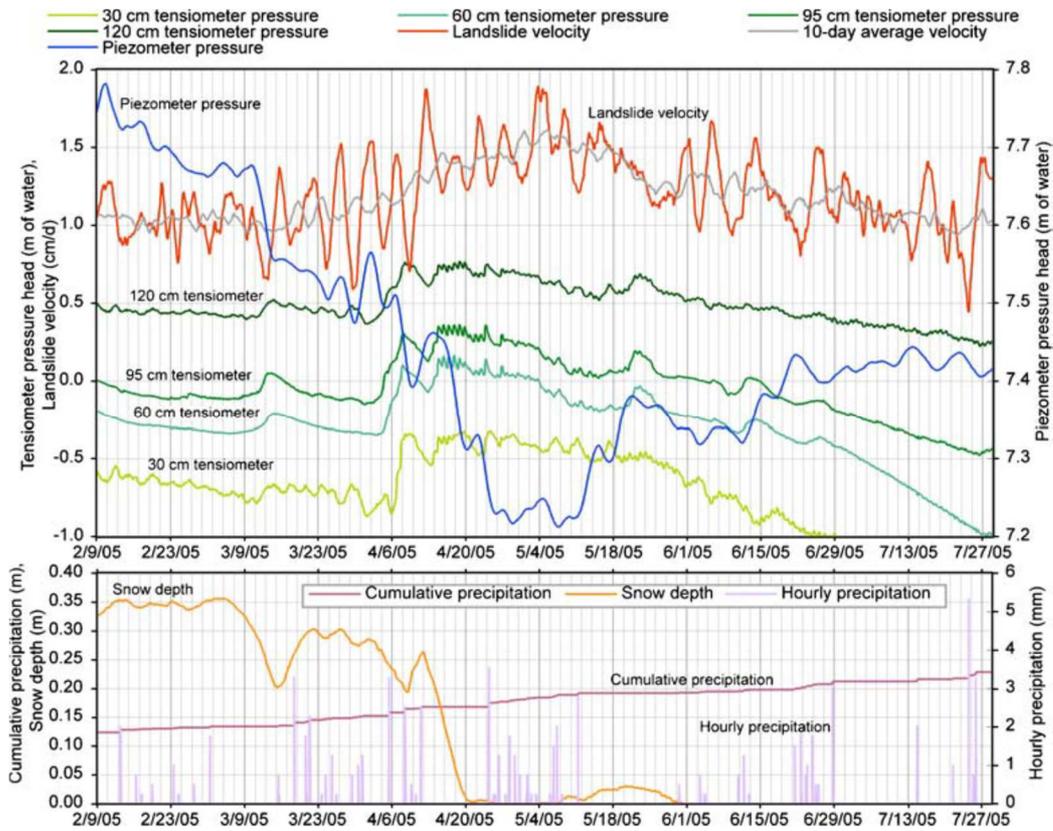


Figura 1.10 - Andamento del livello di falda misurato dal piezometro posto a 9.14 m dal p.c. e del livello di falda misurato dai vari tensiometri in funzione delle precipitazioni e dell'altezza della neve al suolo nel periodo 9 Febbraio – 28 Luglio 2005.

(Schulz et al., 2009)

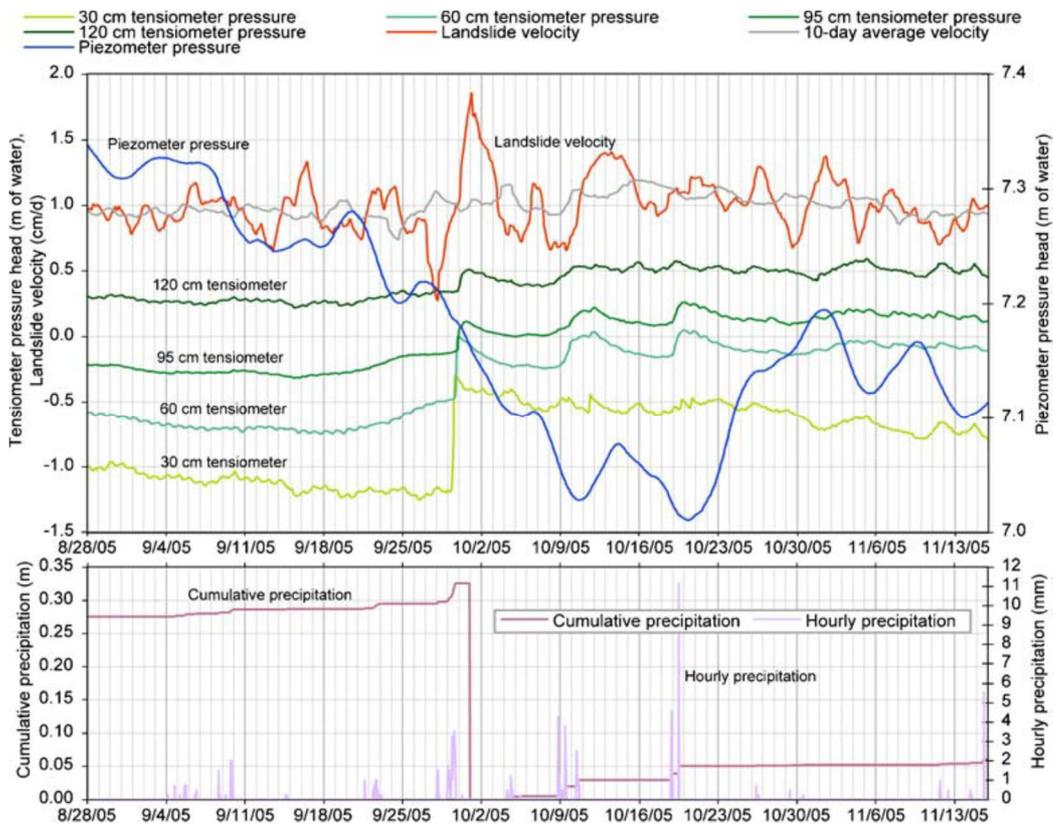


Figura 1.11 - Andamento del livello di falda misurato dal piezometro posto a 9.14 m dal p.c. e del livello di falda misurato dai vari tensiometri in funzione delle precipitazioni nel periodo 28 Agosto – 16 Novembre 2005. (Schulz et al., 2009)

Inoltre, mentre per gli eventi piovosi il tempo di risposta è di qualche ora o pochi giorni, per gli eventi di scioglimento della neve è di parecchi giorni.

L'aumento della pressione di poro nella zona interna della frana rappresentata dai tensiometri provoca una diminuzione della resistenza al taglio ed un'accelerazione della frana fino ad una velocità massima che circa il 170% della velocità media.

Questa accelerazione provoca, come misurato dai piezometri, una diminuzione della pressione di poro presso i margini della frana con conseguente aumento della resistenza al taglio e decelerazione della frana fino alla velocità media usuale.

Questo comportamento potrebbe essere dovuto all'instaurarsi di una dilatanza del terreno a velocità maggiore di quella di diffusione della pressione di poro come dimostrato da Moore & Iverson (2002) e Iverson (2005).

Le "flank ridge" ai margini della parte di frana attiva si sono probabilmente formate a causa di questo fenomeno, mostrando un terreno meno addensato rispetto a quello della zona più interna della frana.

L'ultimo caso qui esaminato è quello analizzato da Di Maio et al. (2010) e Vassallo et al. (2015) della frana di Costa della Gaveta, in Basilicata (Italia).

Essa si sviluppa nella porzione inferiore di una deformazione gravitativa profonda di versante (DGPV) ed è classificabile, secondo Varnes (1978) come frana traslazionale in terra (earth slide).

La porzione superiore del versante è compresa nella Formazione di Corleto Perticara, deformata e fratturata successione irregolare di marne calcaree, calcari marnosi, calcilutiti grigio-bianche e strati di argille grigio-marroni; la porzione media e la porzione inferiore hanno il substrato caratterizzato dal Gruppo delle Argille Varicolori, intercalazione irregolare di sottili strati argillosi, argilloso-marnosi e marnoso-argillosi intensamente alterati.

La DGPV si imposta in entrambe le formazioni con la scarpata principale e la zona sorgente impostate nella Formazione di Corleto Perticara. Questa è attualmente non attiva e coperta da detrito, su cui spesso agisce un debris flow superficiale.

La frana traslazionale si imposta nella porzione superficiale delle Argille Varicolori, fortemente destrutturate a formare un terreno di matrice argillosa con all'interno abbondanti frammenti rocciosi (vedi Figura 1.12).

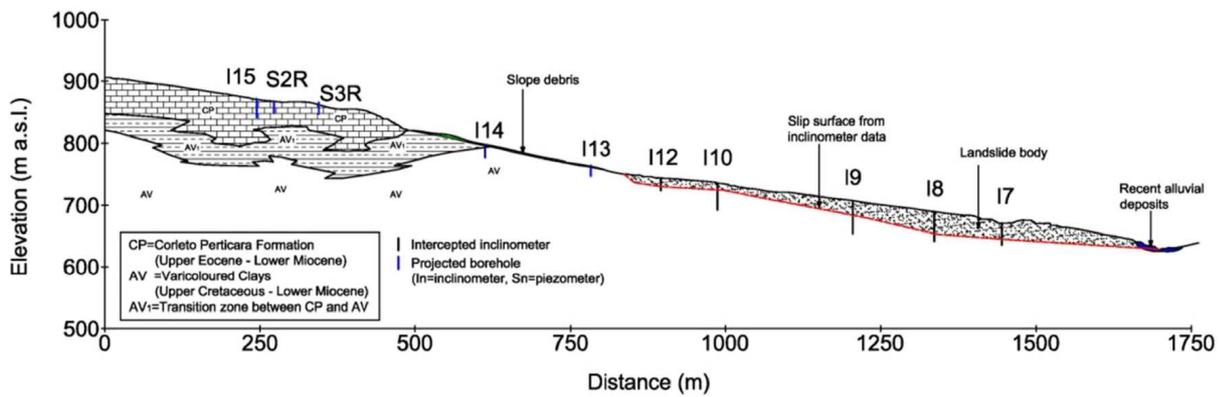


Figura 1.12 – Sezione geologica longitudinale del versante della frana di Costa della Gaveta con indicate le posizioni degli inclinometri installati e della superficie di scorrimento individuata. (Vassallo et al., 2014).

Nel periodo di funzionamento di 30 mesi la sonda inclinometrica fissa installata presso la superficie di scorrimento nel sondaggio n.9, posizione centrale della frana, ha rilevato una velocità media di 1.4 cm/anno con rari periodi in cui questa è nulla e i periodi di massimo e minimo, rispettivamente, in inverno e in estate (vedi Figura 1.13).

La frana è caratterizzata da una velocità decrescente da monte verso valle, dovuta probabilmente allo spostamento cumulato costante e un volume in uscita presso tutte le sezioni con una zona di scorrimento stretta e al successivo allargamento di sezione in corrispondenza della zona di accumulo.

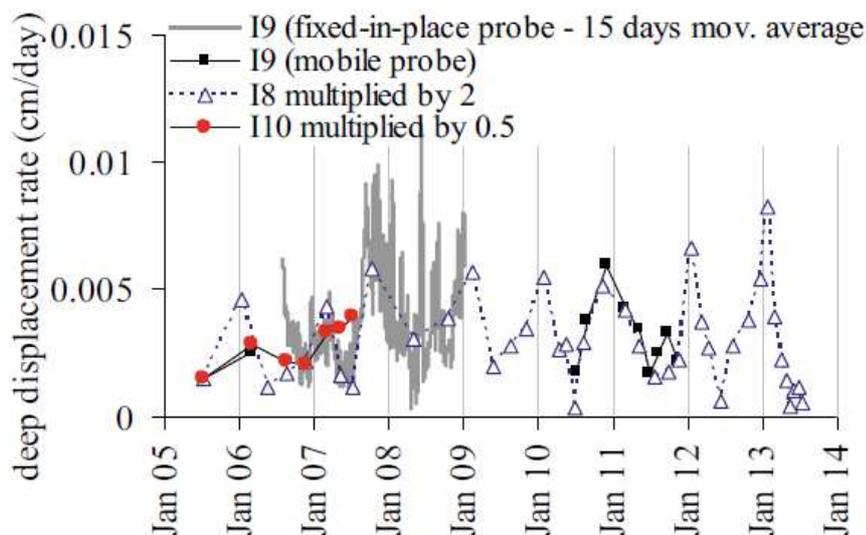


Figura 1.13 – Velocità di scorrimento della frana nel periodo di monitoraggio rilevata dalla sonda inclinometrica fissa e dalle sonde inclinometriche mobili. (Vassallo et al., 2014)

L'area è caratterizzata da precipitazioni di lunga durata e scarsa intensità, con massimo in tardo inverno-inizio primavera e minimo in estate.

Come visibile in Figura 1.14 quasi tutti i piezometri installati nei fori di sondaggio rispondono bene alle piogge con andamento del livello di falda paragonabile tra loro.

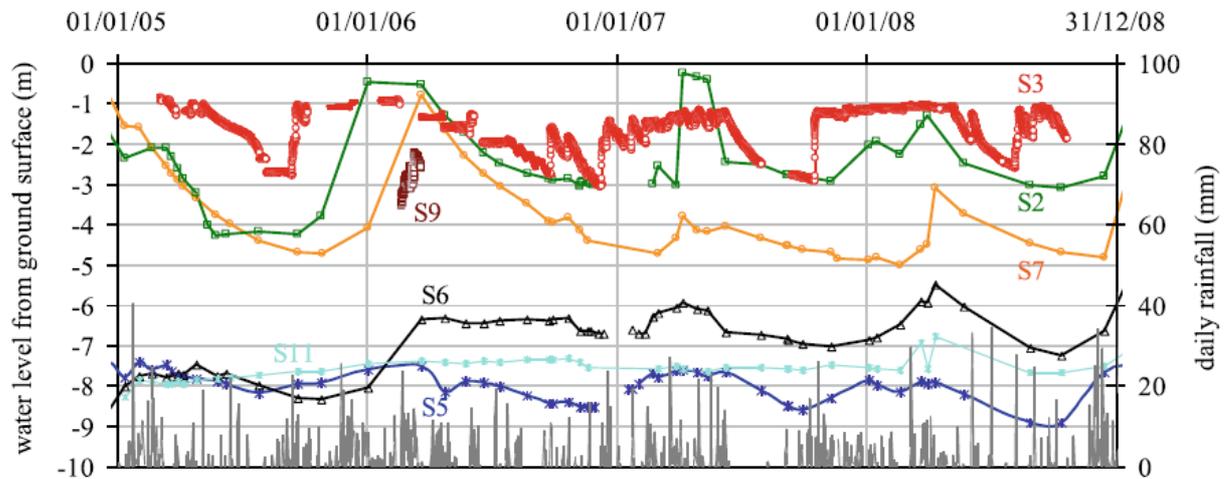


Figura 1.14 – Andamento del livello di falda rilevato dai piezometri e delle piogge nel periodo di monitoraggio. I piezometri presso i sondaggi S2, S3, S5 e S6 appartengono alla vicina frana di Varco d'Izzo. (Vassallo et al., 2014)

Data la scarsa permeabilità del corpo di frana (10^{-8} m/s) le variazioni di pressione di poro sono significative solo entro i 10 m di profondità, di conseguenza la stabilità della frana dipende principalmente dalla pressione di poro presso le porzioni più superficiali della superficie di scorrimento della frana.

Caratteristica comune a queste frane, considerata importante, è la variabilità del tempo di risposta in funzione della profondità dell'acquifero, della permeabilità del terreno o della roccia e della tipologia di precipitazione.

Un caso particolare molto interessante è la dilatanza che caratterizza il comportamento della frana di Slumgullion.

Capitolo 2 – Inquadramento della frana di Idro

2.1 - Inquadramento geografico

La “frana di Idro” è situata in Italia nordorientale, nella zona delle Giudicarie, tra le Prealpi Bresciane, in Lombardia.

La frana è situata 700m circa a ovest del Lago di Idro, 30km a nordest della città di Brescia, nella porzione di territorio compresa tra il Lago di Garda e il Lago di Iseo (vedi Figura 2.1 e Figura 2.2).

È localizzata in sinistra idrografica del fiume Chiese in Val Sabbia, allo sbocco del lago.

L’unghia di frana lambisce la traversa idraulica posta all’inizio del fiume Chiese emissario (vedi Figura 2.4); la “Strada Provinciale n.237 del Caffaro”; la frazione di Pieve Vecchia, facente parte del territorio del comune di Idro (BS); la ‘Galleria degli Agricoltori’ e la linea ENEL.

Il versante interessato dalla frana, esposto verso nord, ha apice lungo la linea di cresta tra Cima Antegolo (quota 750 m. s.l.m.) e la località Valledrane (quota 830 m. s.l.m.) e scende fino all’alveo del fiume Chiese (quota tra i 364 e i 352 m. s.l.m.).

La zona sommitale, che comprende la nicchia e la testata di frana, è all’interno del territorio comunale di Treviso Bresciano (BS); tutto il resto è all’interno del territorio del comune di Idro (BS).

La frana è stata suddivisa, secondo le norme dettate dalla legge n.267/98, in 2 zone a diverso grado di rischio idrogeologico, la zona 1 (rischio elevato) e la zona 2 (rischio medio-elevato), mostrate in Figura 2.2 e Figura 2.3.

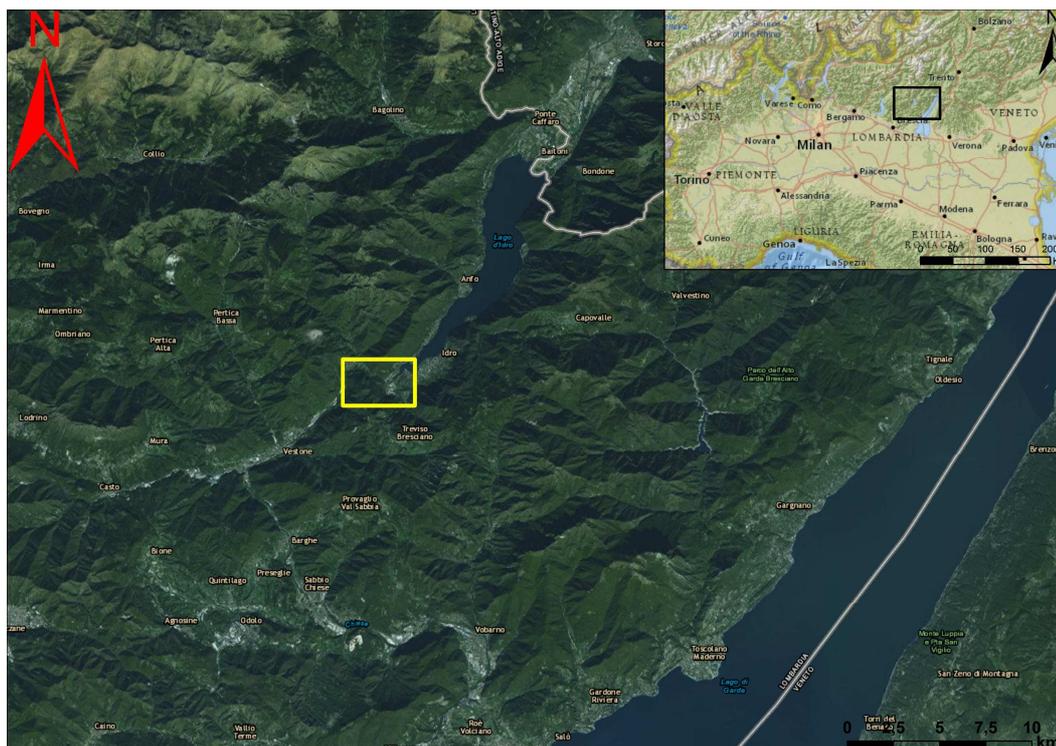


Figura 2.1 – Inquadramento geografico generale della zona di frana. In alto a destra è presente una vista a piccola scala dell'intera Italia settentrionale e nella mappa principale è possibile vedere a scala più grande la zona del Lago di Idro. Nel rettangolo nero in alto a destra è delimitata l'area con scala minore, inquadrata nella mappa principale. Nel rettangolo giallo disegnato in quest'ultima è, invece, compresa l'area rappresentata dalla mappa in Figura 2.2.

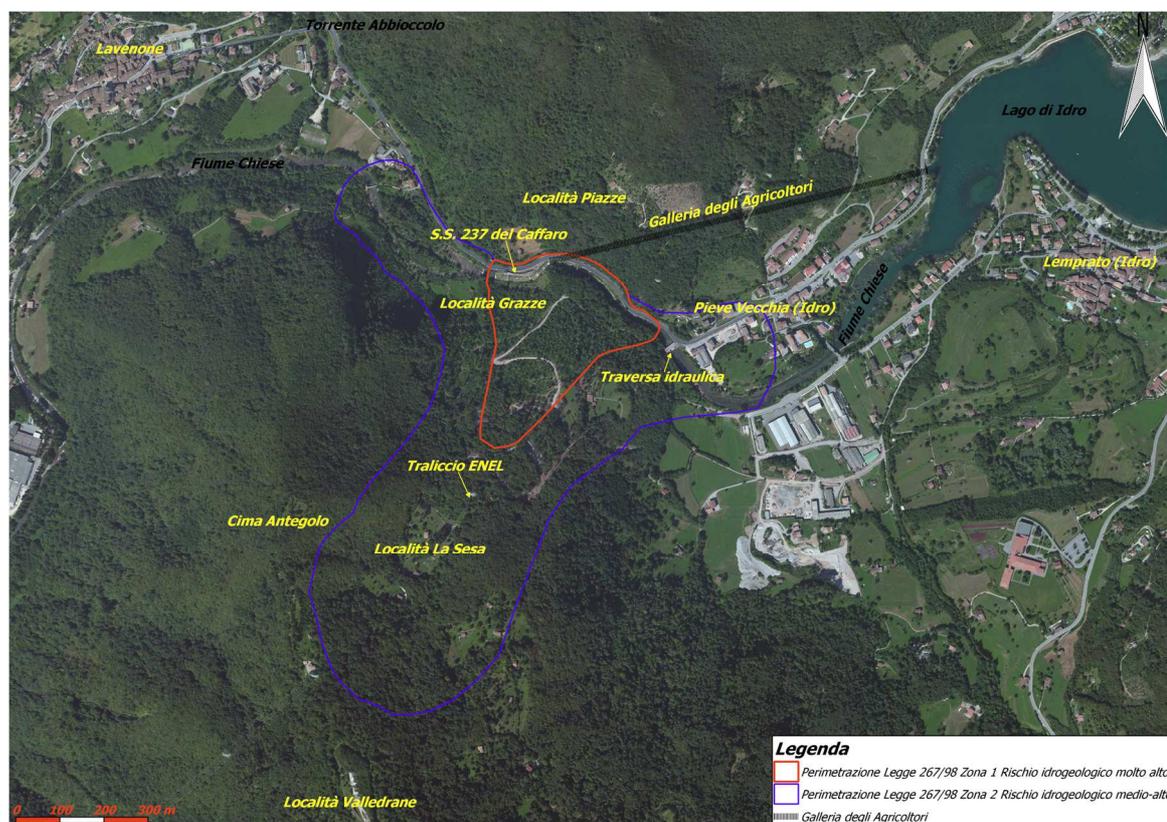


Figura 2.2 – Foto satellitare dell'area di frana con indicati i toponimi dei luoghi e gli elementi a rischio.

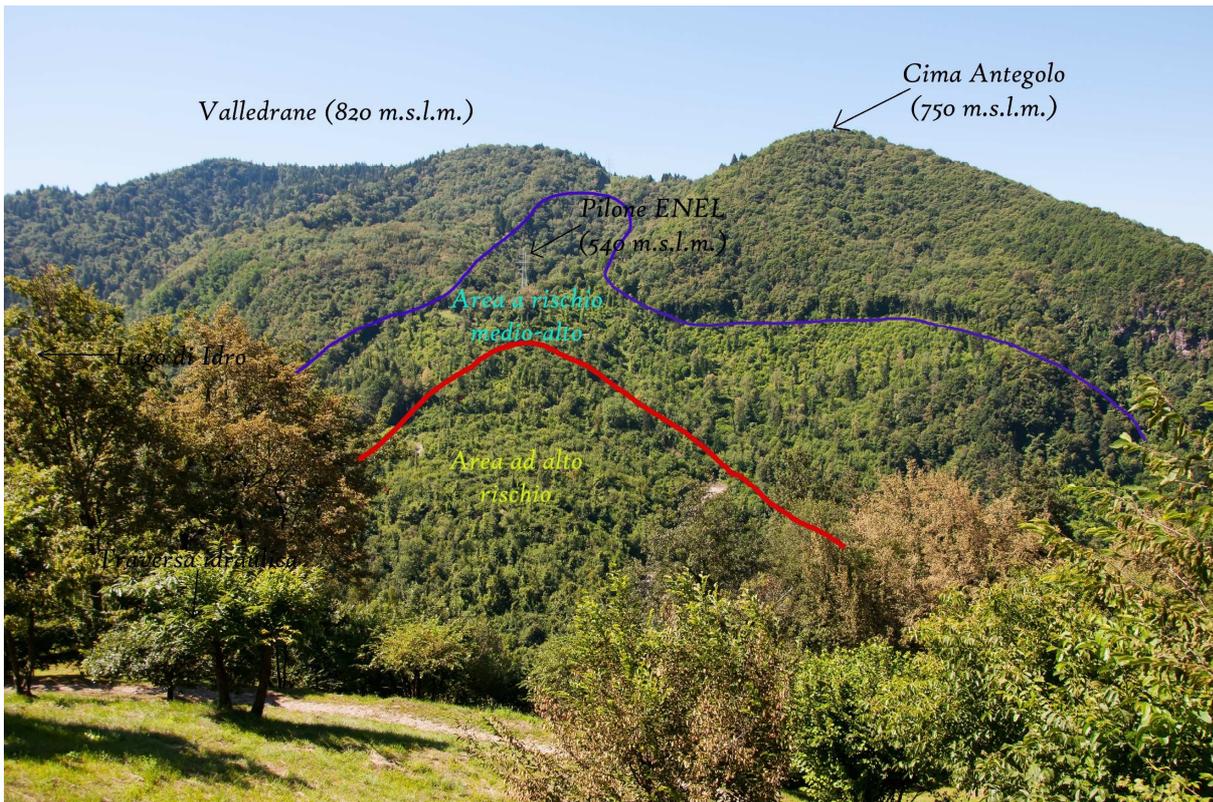


Figura 2.3 – Visuale sull’area di frana da quota 495 m.s.l.m. sul versante settentrionale della Val Sabbia, 200m a ovest della località Piazze.

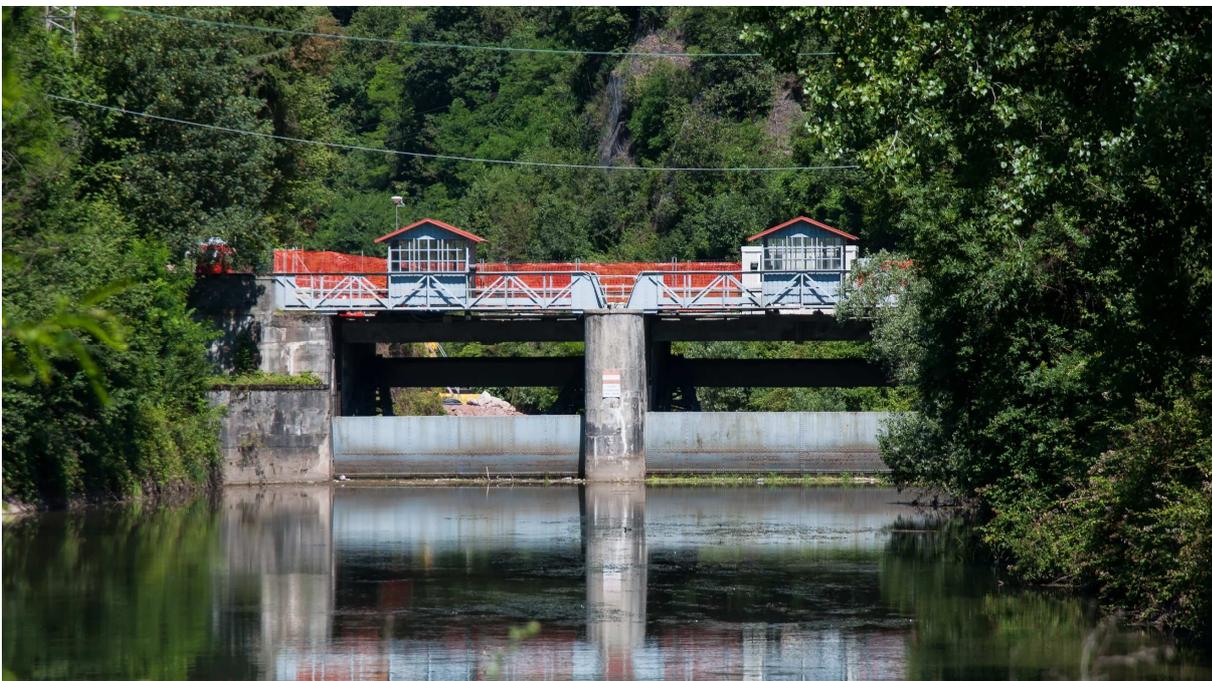


Figura 2.4 – Traversa idraulica, posta al piede della frana, tra il fiume Chiese emissario e il Lago di Idro. Visuale dalla zona artigianale a sud di Pieve Vecchia verso NW.

2.2 - Inquadramento geologico

Il territorio interessato dalla frana di Idro è all'interno del Dominio Sudalpino, posto a sud della Linea Insubrica, che segna la transizione con il Dominio Austroalpino (Figura 2.5) (Castellarin et al, 1992). Il Dominio Sudalpino è caratterizzato da falde di ricoprimento a vergenza meridionale.

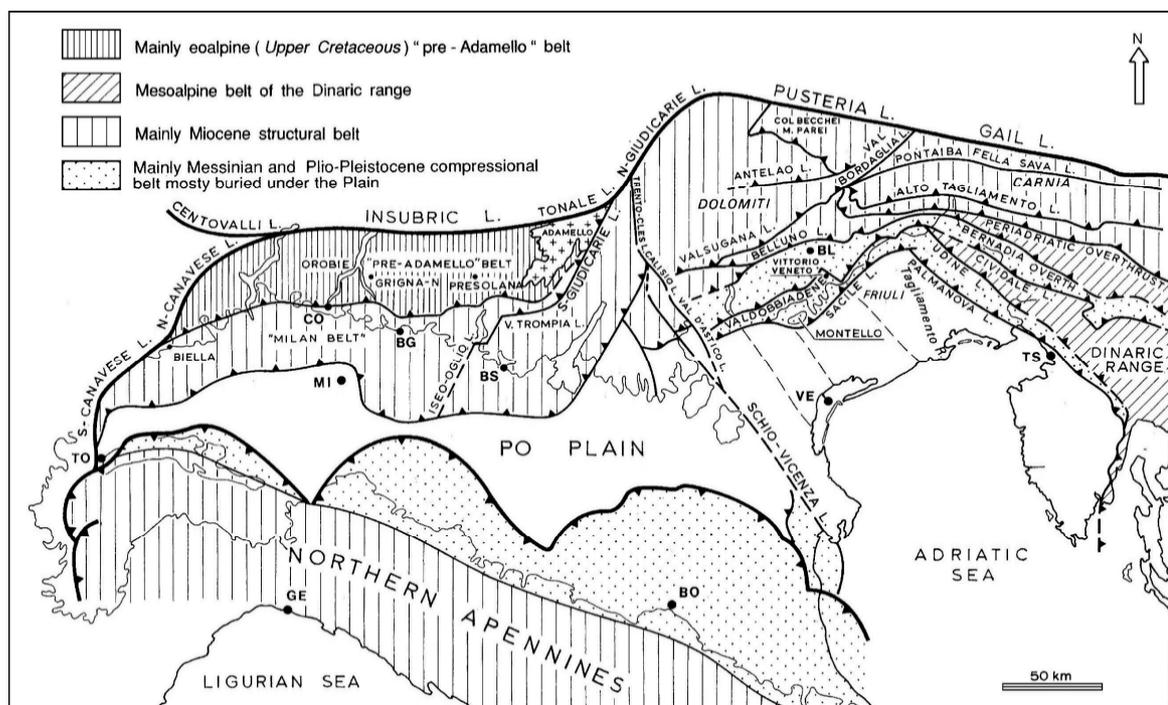


Figura 2.5 - Assetto strutturale semplificato delle Alpi Meridionali, incluse la Pianura Padana e gli Appennini Settentrionali (Castellarin et al., 1992).

L'assetto tettonico regionale è determinato dalla sovrapposizione di coperture sedimentarie più antiche sopra coperture più giovani tramite thrust. Il piano di faglia è, in genere, impostato su formazioni di rocce sedimentarie poco o per nulla competenti.

La geologia della zona è stata evinta dalle note illustrative del Foglio 34 Breno (1971) e del Foglio 35 Riva (1948) della Carta Geologica d'Italia in scala 1:100000, dalle note illustrative della Carta geologica delle Prealpi bresciane a sud dell'Adamello (1972) e dalla Relazione Geologica del progetto definitivo per le nuove opere di regolazione per la messa in sicurezza del Lago d'Idro (2012).

Le principali famiglie di faglie presenti nella zona di studio sono il Sistema Triumplino e il Sistema Giudicariense.

La prima famiglia comprende faglie con direzione che varia da E-W a ENE-WSW; la seconda ha direzione, all'incirca, NNE-SSW.

La faglia più importante che interessa la zona di frana è la flessura/faglia di Abbioccolo, ubicata sul versante settentrionale della Val Sabbia, in destra idrografica del fiume Chiese emissario, evidenziata prevalentemente dai dati stratigrafici. Il suo ruolo e significato geodinamico, ancora in via di definizione, potrebbe essere quello di struttura ancestrale riattivata in senso transpressivo destro in occasione della fase compressiva eo-alpina cretacea e di svincolo tra il Sistema Triumpilino e il Sistema Giudicariense.

La Linea delle Giudicarie, che termina nella Valle del Caffaro, a NW del lago, ha generato un trend strutturale e pieghe con direzione NNE-SSW, parallelo alla faglia stessa.

Come evidenziato dalla Carta Geologica delle Prealpi Bresciane a sud dell'Adamello (Boni & Cassinis, 1973) nella regione affiorano le rocce di una successione sedimentaria triassica secondo la seguente sequenza stratigrafica:

Servino (Scitico Inferiore) - Calcere di Prezzo (Anisico Superiore) - Calcere di Buchenstein o Livinallongo (Ladinico Inferiore) - Porfiriti (Ladinico) - Formazione di Wengen o di La Valle (Ladinico Superiore) - Calcere di Esino (Ladinico) - Arenaria di Val Sabbia (Carnico Medio - Inferiore) - Formazione di San Giovanni Bianco (Carnico Superiore) - Dolomia Principale (Norico Inferiore-Medio) - Calcere di Zorzino (Norico medio) - Argillite di Riva di Solto (Norico Superiore – Retico Inferiore) - Calcere di Zu (Norico Superiore – Retico Medio). Nell'area immediatamente circostante la frana, come visibile nella carta geologica in Figura 2.4, affiorano solamente le formazioni del Trassico Superiore, appartenenti al Carnico Medio-Superiore e al Norico: la Formazione delle Arenarie di Val Sabbia, la Formazione di San Giovanni Bianco e la Dolomia Principale.

In questo intervallo di tempo nell'area prevalevano condizioni di mare relativamente basso con elevata salinità con una fase di regressione marina nel Carnico, dovuta a fattori climatici a livello globale e ad una tettonica sin-sedimentaria compressiva accompagnata da vulcanismo di arco magmatico (Garzanti et al., 1995), e una fase transgressiva nel Norico. I rapporti stratigrafici tra le Formazioni originate in Lombardia nel Triassico Superiore sono evidenziati in Figura 2.7, con uno schema semplificato dei rapporti con direzione E-W.

Nel Carnico Medio-Superiore nell'area settentrionale rispetto a quella di studio esisteva una zona di laguna protetta, caratterizzata da sedimentazione marina, rappresentata dalla Formazione di Gorno.

In alcune zone dell'area di laguna si passava ad una sedimentazione deltizia con depositi prevalentemente vulcanoclastici derivanti dallo smantellamento di un arco vulcanico emerso

per intensa attività di tipo acido, le Arenarie di Val Sabbia.

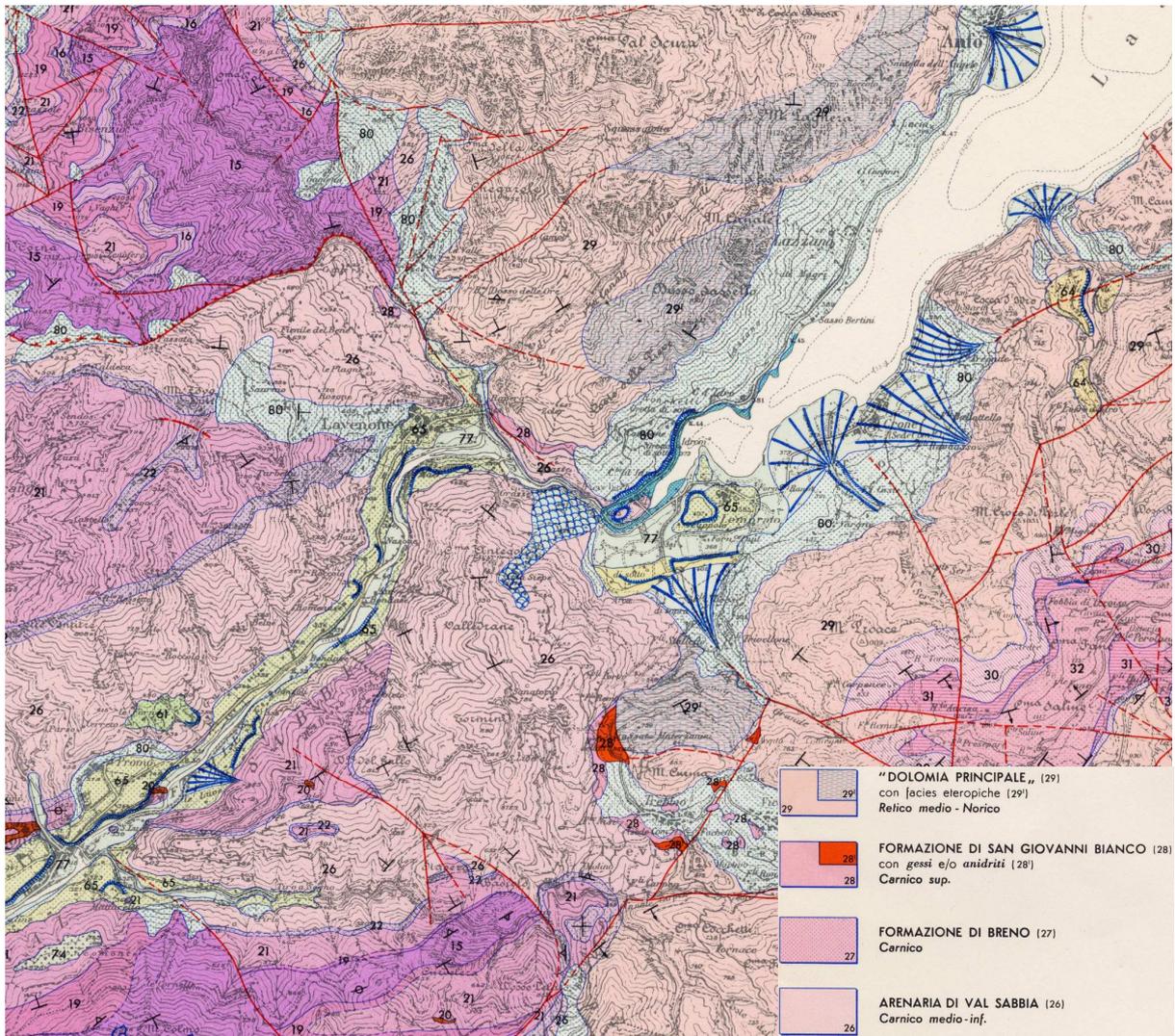


Figura 2.6 – Carta geologica dell’area a sud del Lago di Idro. Al centro è visibile la frana di Idro. (Boni & Cassinis, 1973)

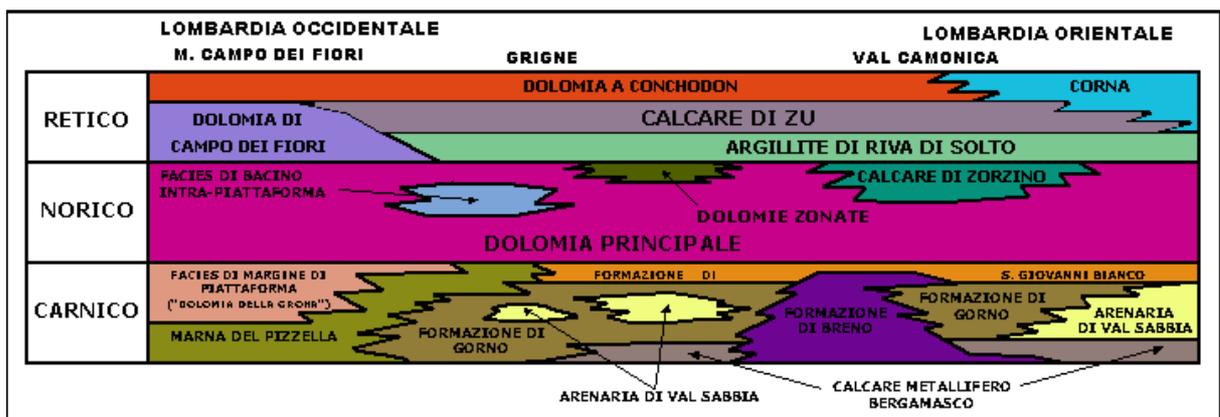


Figura 2.7 - Rapporti stratigrafici tra le Formazioni del Triassico Superiore delle Prealpi Lombarde in direzione W-E. (Cancelli, 2012)

Verso est si estendeva una piattaforma carbonatica (Formazione di Breno), caratterizzata da sedimentazione carbonatica di piana tidale con frequenti orizzonti di emersione.

Al termine del Carnico si ebbe una fase di regressione con deposizione di sedimenti in parte evaporitici (Formazione di S. Giovanni Bianco).

Nel Norico, con un lieve aumento del livello del mare per una fase transgressiva, si instaurò la sedimentazione tipica di una piattaforma carbonatica (Formazione della Dolomia Principale), con locali intercalazioni di torbiditi in corrispondenza di bacini interni alla piattaforma e di sedimenti dolomitici-bituminosi in corrispondenza di bacini chiusi a circolazione ristretta.

Le Arenarie di Val Sabbia caratterizzano il substrato roccioso del versante franoso e affiorano localmente in destra e sinistra idrografica del fiume Chiese, rispettivamente, lungo la SP327, tra l'abitato di Lavenone e la frazione di Pieve Vecchia (Comune di Idro) (Figura 2.8) e sul versante (Figura 2.9).



Figura 2.8 – Affioramento delle Arenarie di Val Sabbia lungo la SP327, al confine tra i comuni di Idro (BS) e Lavenone (BS).



Figura 2.9 – Affioramento delle Arenarie di Val Sabbia in sinistra idrografica del fiume Chiese, 1 chilometro circa più a valle del piede di frana (Cancelli, 2012).

La Formazione di San Giovanni Bianco affiora localmente sul versante settentrionale della Val Sabbia, a est della SP237, al tetto delle Arenarie della Val Sabbia. Inoltre, è stata individuata all'interno della Galleria degli Agricoltori in una sua estesa porzione.

È caratterizzata da una grande variabilità di litofacies, contenendo sia porzioni evaporitiche che facies dolomitico-pelitiche e facies arenacee.

La facies evaporitica, costituita da lenti gessose e anidritiche, è molto disturbata tettonicamente, probabilmente perché sede di uno sovrascorrimento.

Come scritto dal Dott. Geol. Griffini (2012) a riguardo della faglia dell'Abbioccolo, *“ Il sovrascorrimento ha provocato una traslazione tettonica delle dolomie noriche (Dolomia Principale l.s.) da NW verso SE al di sopra di un orizzonte di scollamento impostato nelle facies evaporitiche carniche (Formazione di S. Giovanni Bianco). Le testimonianze di tali strutture sono osservabili lungo la ex-S.S. 237 tra l'abitato di Pieve Vecchia e Lavenone. Si può ritenere che a grande scala sia confermata la presenza di una blanda struttura anticlinale asimmetrica, con l'asse spostato verso la sponda destra del lago, già segnalata in studi precedenti”*.

La Dolomia Principale, qui presente nel suo Membro Inferiore, affiora al di sopra della Formazione di San Giovanni Bianco sul versante settentrionale della Val Sabbia.

Oltre alle formazioni rocciose nell'area di studio si ritrovano anche depositi detritici di versante e depositi alluvionali-lacustri.

I primi sono derivanti dalle formazioni presenti sui versanti, in particolare dalla formazione delle Arenarie di val Sabbia e dalla Dolomia Principale. Sono costituiti da ghiaie grossolane in matrice sabbioso-limosa a cui si alternano livelli conglomeratici ben cementati. Nella matrice sabbioso-limosa sono presenti anche blocchi con dimensione pluridecimetrica.

I secondi si ritrovano sul fondovalle, sotto il piano stradale e lungo il corso del fiume Chiese, e lambiscono il piede della frana. Sono depositi ghiaioso-sabbiosi di litologia molto varia, con presenza di ciottoli provenienti anche da formazioni non locali (tonaliti del plutone dell'Adamello, rocce effusive, rocce della Formazione del Verrucano Lombardo, ecc...).

Tra il ponte di Pieve Vecchia e la traversa, tratto terminale del lago, spesso caratterizzato da corrente molto lenta o assente a causa dell'azione della traversa, sono prevalenti depositi alluvionali più fini, sabbiosi e sabbioso-limosi, con ghiaia di piccole e medie dimensioni meno abbondante che nell'area a valle della traversa.

2.3 - Inquadramento geomorfologico

Durante l'ultima era glaciale (tra i 20000 e i 15000 anni fa circa) gran parte della Val Sabbia era occupata dal ghiacciaio Chiese-Sarca, che scendeva dalle valli comprese tra il gruppo dell'Adamello e le Dolomiti del Brenta. Nella zona delle Giudicarie Inferiori una lingua del ghiacciaio del Sarca che si estendeva verso SSW si univa al ghiacciaio del Chiese portando ad uno spessore massimo del fronte glaciale di quasi 1000 metri in corrispondenza dell'attuale imbocco del lago d'Idro, presso Ponte Caffaro. Un tale spessore del ghiaccio incise notevolmente la Valle del Chiese, su cui si era impostato, dando vita ad un grande bacino dopo il suo ritiro. Procedendo verso valle lo spessore diminuiva a 650m al termine dell'attuale lago, a 250m nello stretto tratto della Val Sabbia tra il comune di Idro e Lavenone e si esauriva col fronte terminale presso Barghe, nella bassa Val Sabbia (G. Berruti, 1981). Presso l'attuale paese di Lavenone si diramava una breve lingua di ghiacciaio lungo la stretta Valle dell'Abbioccolo.

La fine della glaciazione è datata tra i 10000 e gli 8000 anni fa. Le testimonianze lasciate dal transito del ghiacciaio Chiese-Sarca sono il lago, originato nella grande depressione scavata dal ghiacciaio, e i depositi morenici su cui sorgono Anfo, Vesta e Vantoni, contenenti blocchi di porfido, quarzite e tonalite originari del gruppo dell'Adamello. Inoltre, nella parte terminale del lago, presso il comune di Idro, sono presenti grossi strati argillosi, sfruttati per la produzione di laterizi.

La depressione creata fu progressivamente in parte colmata dal sedimento trasportato a valle dai fiumi e dal ruscellamento superficiale impostato sui versanti. La superficie iniziale del lago si ridusse di circa la metà con la formazione, verso nord, della grande piana alluvionale di Storo, dove sfociano nel Lago d'Idro i fiumi Chiese e Caffaro (Cita et al., 2002).

L'analisi di alcuni sedimenti campionati durante i carotaggi sul corpo frana indicano la loro deposizione in ambiente non ossidante, ossia sottomarino. Questo ha portato ad ipotizzare lo sviluppo del movimento franoso in più fasi, le prime delle quali in ambiente subacqueo e, quindi, in epoca post-glaciale (Cita et al., 2002).

Le evidenze morfologiche dell'area di studio fanno presupporre che la frana abbia provocato uno spostamento verso NE del corso del fiume Chiese con innalzamento dell'alveo e conseguente conformazione attuale del lago, che ha termine presso la frazione di Pieve Vecchia.

Dall'osservazione delle foto aeree e del modello digitale del terreno (DTM) della zona

spondale effettuato da Geocart Srl (2009) tramite tecnologia LiDAR è ipotizzabile che l'intero versante a NE della cresta Cima Antegolo-località Valledrane sia soggetto a DGPV, come ipotizzato da altri studi degli anni '90.

Nel rilievo geomorfologico svolto da Arpa Lombardia (2008), oltre alla scarpata di frana principale, già individuata da tempo, sono state individuate all'interno della zona di accumulo varie scarpate secondarie, attivate in occasione di ulteriori eventi di scorrimento dopo l'evento principale avvenuto in epoca post-glaciale. Si ipotizza che attualmente il corpo di frana attualmente scorra sfruttando queste superfici di scorrimento secondarie, che hanno emergenza in superficie tramite le piccole scarpate suddette.

Elemento particolare è la disposizione su direttrici longitudinali ai margini del corpo di frana di grossi blocchi di roccia, di dimensioni metriche e decametriche. La loro origine potrebbe essere dovuta al dilavamento della frazione fine in cui erano immersi da parte delle acque di drenaggio, situate anch'esse nell'impluvio naturale ai margini della frana.

In Figura 2.10 è visibile la carta geomorfologica della frana realizzata da Arpa Lombardia nel 2008.

La frana è caratterizzata, oltre che dallo scorrimento profondo, anche da fenomeni di scorrimento superficiale, detti "soil slip". La loro presenza è stata individuata dopo la realizzazione della prosecuzione della "strada dei taglialegna", piccola strada forestale allargata e allungata nel 2007 per permettere ai mezzi di risalire il corpo di frana per la realizzazione dei tubi inclinometrici e piezometrici.

Il piccolo taglio del versante nel Novembre 2007 ha provocato uno scivolamento molto superficiale, che, nel giro di qualche mese si è sviluppato occludendo completamente la piccola pista realizzata (Fig.2.11).

I fenomeni di scivolamento superficiale in una frana di questo tipo sono comunque prevedibili in seguito alla realizzazione di piste e al disboscamento, che fanno venire meno, rispettivamente, del tutto o in parte lo sforzo resistente del terreno.

Carta geomorfologica non in scala

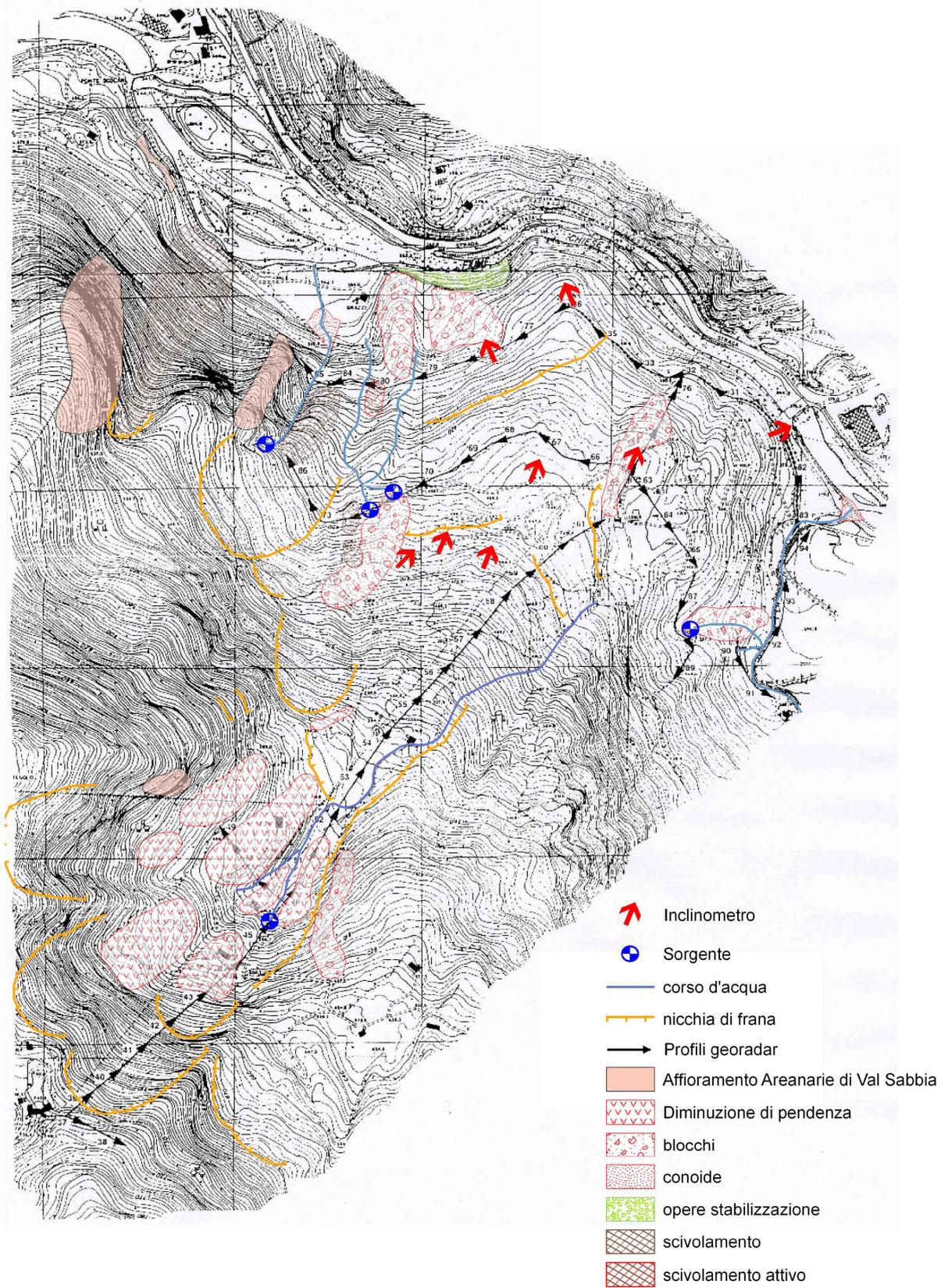


Figura 2.10 – Carta geomorfologica dell'area di frana. (Arpa Lombardia, 2010)



Figura 2.11 – Evoluzione del fenomeno di scivolamento superficiale sulla “pista dei taglialegna”.

Nella foto a) la situazione il 26/11/2007; nella foto b) la situazione il 22/04/2008; nella foto c) la situazione il 10/07/2008 e nella foto d) la situazione il 06/11/2008. (Arpa Lombardia, 2010)

2.4 - Caratterizzazione stratigrafica e idrogeologica del corpo di frana

La frana di Idro ha origine in epoca postglaciale, probabilmente causata dal detensionamento dei versanti per il venire a meno della spinta generata del ghiacciaio che si estendeva lungo la Val Sabbia. Si può quindi classificare come paleofrana riattivata con superficie di scorrimento più superficiale di quella antica, posta probabilmente al contatto con il substrato.

Il corpo di frana è compreso quasi totalmente all'interno del territorio comunale di Idro (BS), eccetto per la zona sommitale, in corrispondenza della nicchia di frana, posta all'interno del territorio di Treviso Bresciano (BS).

Inoltre, è derivato dalla disgregazione delle Arenarie di Val Sabbia che, in affioramento, si presentano come rocce ben stratificate in banchi di colore rosso/rosso-grigio a grana medio-fine con laminazione sottile piano parallela non sempre visibile (Cancelli, 2012). La litologia

prevalente è costituita da siltiti, argilliti e litareniti vulcaniche (tufacee) plagioclasiche con contenuto molto basso di quarzo.

La successione è organizzata in sequenze cicliche di fining upward (FU).

Alla base presentano livelli conglomeratici con spessore decimetrico o pluridecimetrico costituiti da clasti argillitici di color rosso cupo o grigio-nerastro e da clasti di calcarei, calcareo-dolomitici e porfirritici di dimensioni centrimetriche e con stratificazione indistinta.

Verso l'alto la successione passa a litareniti feldspatiche con granulometria medio-fine e laminazione piano-parallela e, infine, a siltiti massive caratterizzate dalla presenza di noduli calcareo-cloritici di origine pedogenetica, di cristalli di pirite e livelletti di litareniti finissime.

In affioramento la roccia, in corrispondenza dei livelli pelitici, si presenta intensamente frattura in scaglie millimetriche a causa del clivaggio diffuso.

Lo spessore della formazione nella zona di studio varia tra i 120 e i 170m. La zona tettonica della zona ha provocato una forte ondulazione e tilt degli strati. Nessuno dei sondaggi verticali effettuati sul corpo frana tranne tre arrivano a intercettare il substrato roccioso tranne quattro, dove è stato intercettato a profondità superiori ai 50 m. dal piano campagna. I sondaggi in questione sono stati effettuati in corrispondenza dei tubi inclinometrici IN6N, IN8, IN9 e in corrispondenza del tubo piezometrico PZ10, nella zona occidentale della frana e al piede della frana. Questo significa che il substrato roccioso si trova a profondità crescente spostandosi verso est.

La frana appare ora in lento e differenziale movimento di creep.

La matrice del deposito detritico del corpo di frana è di natura limoso-argillosa debolmente sabbiosa e contiene blocchi, ciottoli e ghiaie riferibili alle Arenarie di Val Sabbia. (Arpa Lombardia, 2007).

Nelle colonne stratigrafiche ottenute grazie ai sondaggi a carotaggio continuo eseguiti (vedi Appendice 1) sono state identificate 2 zone in base alla litologia prevalente degli orizzonti. Fino a circa 30 m. dal piano campagna c'è la prevalenza della matrice fine limoso-argillosa con discontinui orizzonti di materiale più grossolano di composizione siltitica e arenacea con dimensioni dei singoli clasti da decimetriche a metriche. Al di sotto si ritrovano in maniera diffusa siltiti e, in misura minore, argilliti rossastre molto fratturate con clasti di varia natura aventi dimensioni millimetriche e centimetriche (Arpa Lombardia, 2007).

All'interno di questi depositi si è impostato un complesso sistema di falde sovrapposte, presenti in corrispondenza dei depositi più grossolani.

In Figura 2.12 è rappresentata una sezione idrogeologica della frana. La zona di discontinuità individuata dalle misure inclinometriche effettuate si localizza spesso alla transizione tra queste 2 zone (Arpa Lombardia, 2007).

Sul corpo di frana esistono solamente due aste di drenaggio ben definite, in un contesto di gerarchizzazione pressoché assente (Arpa Lombardia, 2007).

Sul lato sud-orientale della frana sono presenti le sorgenti che alimentano l'asta di drenaggio che scorre in un impluvio laterale sul lato orientale della frana e sul lato nord-occidentale quelle che alimentano un'asta di drenaggio di minor sviluppo che scorre sul margine occidentale. Molte delle suddette sorgenti si attivano solo a seguito di precipitazioni prolungate e sono legate alle fluttuazioni del sistema di falde acquifere del corpo di frana. Le prime sono poste a quota 600 m.s.l.m. circa, lungo la strada sterrata che da Treviso Bresciano scende verso la frazione La Sesa, posta al di sotto della nicchia principale di frana, tra Forte Valledrane e Cima Antegolo. L'acqua che ne fuoriesce tende ad infiltrarsi dopo pochi metri nel terreno, ma riemerge appena 50 m più a valle formando un rio attivo quasi tutto l'anno che va ad incanalarsi lungo l'impluvio naturale al margine del corpo di frana. La frazione di La Sesa, geomorfologicamente, è interpretabile come testata di frana data la presenza di un cambio di pendenza, che favorisce il ristagno e l'infiltrazione delle acque appena uscite dalle sorgenti. Le acque scorrono quindi fino a valle del versante, dove sono state fatte incanalare all'interno di un'incisione scavata nel terreno che passa sotto la strada forestale costruita per l'installazione del sistema di monitoraggio, e, infine, sfociano nel fiume Chiese a monte della traversa idraulica.

È stata stimata una portata massima attorno ai 300-400 l/s e una velocità nel tratto terminale di 1 m/s circa, tale da determinare l'erosione delle sponde dell'incisione. Nel punto dove sfocia nel Chiese, sulla riva, sono presenti depositi limoso-argilloso-sabbiosi, in parte portati in sospensione dal rio e in parte depositati in loco dalle acque del fiume/lago che, in quel tratto, possiede velocità molto limitata. Il secondo gruppo di sorgenti citate è posto sul lato nord-ovest della frana. La sorgente più a monte si trova a quota 520 m.s.l.m. circa. L'acqua si infiltra subito nel terreno per riemergere a quota 440 m.s.l.m., 80 m più a valle, dove si unisce a quella proveniente da altre 3 piccole sorgenti e sfocia, infine, nel fiume Chiese a valle della traversa, del muro di contenimento e della nuova sistemazione in terra rinforzata.

La portata massima stimata è di circa 50-100 l/s, molto minore di quella caratterizzante l'asta di drenaggio orientale.

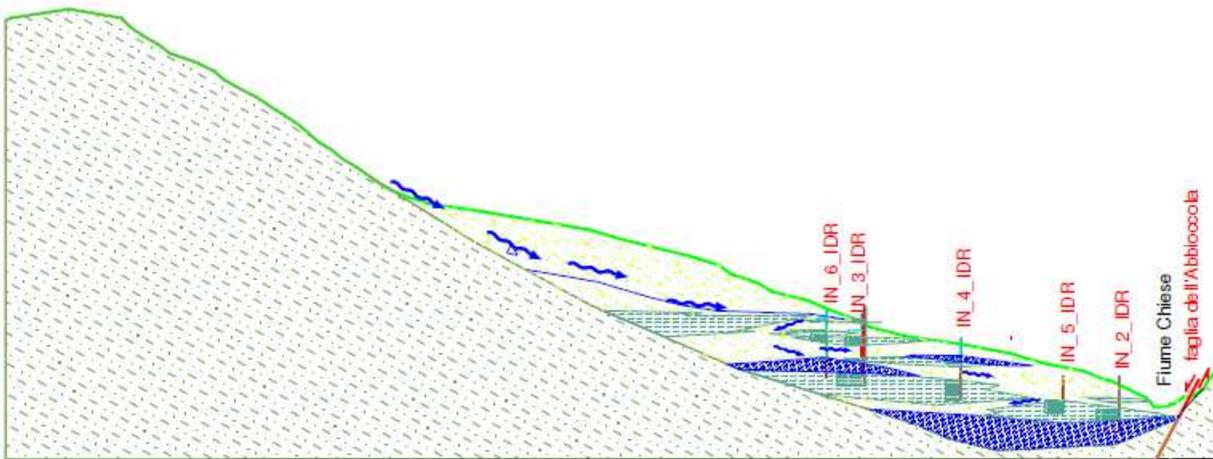


Figura 2.12 – Sezione idrogeologica della frana con indicazione della posizione degli inclinometri e della profondità in cui è stata rilevata la zona di deformazione (rettangoli grigi). Le frecce blu indicano la direzione di deflusso ipotizzata delle acque che si infiltrano. (Mannucci et al., 2008).

Capitolo 3 – Monitoraggio e indagini sulla frana

3.1 - Sistemi di monitoraggio

Dal 1997 la Provincia di Brescia e, successivamente, Arpa Lombardia hanno iniziato a monitorare gli spostamenti del corpo di frana attraverso l'installazione di un sistema di monitoraggio soggetto ad ampliamento nel corso degli anni.

Nel corso di 4 campagne di indagine sono stati installati 15 tubi inclinometrici e 10 piezometri. Nello specifico le campagne effettuate, commissionate a varie società di indagini geotecniche e studi tecnici, sono:

- SO.GE.TEC s.r.l. (1997):
 - Installazione di n.3 tubi inclinometrici (i.e. IN1, IN2 e IN3);
 - Installazione di n.2 piezometri a tubo aperto (i.e. PZ1 e PZ3).
- Dott. Geologo GIOVANNI FASSER – Studio di geologia tecnica e ambientale (2003):
 - Installazione di n.1 tubo inclinometrico (i.e. IN8).
- INGEO s.r.l. (2005-2006):
 - Re-installazione di n.2 tubi inclinometrici danneggiati (i.e. IN2, IN3);
 - Installazione di n.4 tubi inclinometrici (IN4, IN5, IN6, IN7);
 - Installazione di n.3 piezometri Casagrande a doppia cella di misura (i.e. PZ4, PZ6, PZ7);
 - Installazione di n.2 piezometri Casagrande a cella singola di misura (i.e. PZ2, PZ5).
- SONDEDILE s.r.l. (2011):
 - Installazione di n.7 tubi inclinometrici (i.e. IN3-N, IN4-N, IN6-N, IN7-N, IN9, IN10, IN11);
 - Installazione di n.3 piezometri Casagrande a doppia cella di misura (i.e. PZ9, PZ10, PZ11).

Ad eccezione dell'IN6-N e dell'IN8 gli altri tubi inclinometrici non sono più utilizzabili per eccessiva deformazione.

Anche alcuni piezometri sono oggi inutilizzabili.

Sui tubi inclinometri sono state effettuate varie campagne di misura manuali, con intervallo tra l'una e l'altra variabile tra 2 e 5 mesi.

Le misure manuali effettuate sui tubi inclinometrici, invece, hanno un intervallo di tempo tra una e l'altra di 2/3 mesi.

Inoltre, nel Luglio 2011, la ditta C.S.G. s.r.l, nel tubo IN3-N ha installato la propria sonda deformabile DMS 2D Slope. La sonda arriva fino alla profondità di 56 m. dal p.c. e, dalla profondità di 40 m dal p.c., è composta da moduli della lunghezza di 1m snodabili tramite

giunti sferici che ne permettono la deformazione diminuendo fortemente il rischio di lesionamento e/o rottura che caratterizza, invece, i tubi inclinometrici tradizionali.

Questa ha permesso di acquisire i dati dello spostamento lungo la superficie di scorrimento dal 15 Luglio 2011, data di attivazione, al 10 Luglio 2013 per i moduli 11-16 (da 40 a 45 m. dal p.c.) e ad oggi per i moduli 0-10 (da 46 a 56 m. dal p.c.). Il periodo di campionamento è di 1 ora e l'acquisizione è proseguita con rari periodi di non funzionamento.

Inoltre, nell'Agosto 2012 presso i tubi inclinometrici IN9, IN10 e IN11, alla profondità della superficie di scorrimento individuata grazie alle misure manuali, sono state installate delle sonde inclinometriche fisse.

All'interno di alcuni tubi piezometrici, tra il 2011 e il 2012, sono stati installati dei sensori piezometrici in grado di rilevare il livello di falda con periodo di campionamento di 30 minuti. In Tabella 3.1 e Tabella 3.2 sono, rispettivamente, riportati i dati relativi ai tubi inclinometrici, ai tubi piezometrici. In Figura 3.1 è riportata la planimetria della frana con il posizionamento degli inclinometri e dei piezometri.

Tabella 3.1 – Specifiche dei tubi piezometrici, periodo delle misure manuali e periodo di funzionamento dei sensori piezometrici automatici.

Sigla piezometro	Tipo di strumento	Coordinate (Gauss-Boaga)			Profondità sensore piezometrico [m. dal p.c]	Profondità della cella di misura o del tratto fenestrato [m. dal p.c]	Profondità tubo [m. dal p.c]	Periodi con misure manuali	Periodo con misure automatiche	Note
		X	Y	Z (quota bocca foro) [m. s.l.m.]						
PZ1	Tubo aperto	1612988 E	5065406 N	427m	42m	Tratto fenestrato fino a 81.5m	83m	Febbraio 2006-Novembre 2015	/	
PZ2	Casagrande	1612925 E	5065572 N	397m	48m	48m	60m	Gennaio 2006-Agosto 2013	/	
PZ3	Tubo aperto	1612800 E	5065317 N	458m	39m	Tratto fenestrato fino a 65m	65m	Febbraio 2006-Novembre 2015	Luglio 2011-Dicembre 2015	
PZ4a	Casagrande	1612902 E	5065385 N	442m	41m	43.4m	70m	Novembre 2005-Giugno 2013	Ottobre 2010-Giugno 2014	
PZ4b				442m	21.75m	21.9m	70m	Novembre 2005-Agosto 2015	Ottobre 2010-Maggio 2013	
PZ5	Casagrande	1612877 E	5065529 N	398m	(35.7)m	35.7m	40m	/	/	Non funzionante Sensore incastrato a 17.40m
PZ6a	Casagrande	1612748 E	5065301 N	462m	(57.0)m	57m	75m	/	/	Non funzionante Sensore bloccato a causa di strozzatura a 38.60m
PZ6b				462m	15m	15.6m	75m	Ottobre 2005-Novembre 2015	Ottobre 2010-Dicembre 2015	
PZ7a	Casagrande	1612856 E	5065288 N	464m	40m	49.4m	90m	Dicembre 2005-Novembre 2015	Ottobre 2010-Dicembre 2015	
PZ7b				464m	32m	33m	90m	Gennaio 2006-Novembre 2015	Ottobre 2010-Dicembre 2015	
PZ9a	Casagrande	1612707 E	5065189 N	513m	35.8m	36m	80m	Settembre 2011-Novembre 2015	Settembre 2012-Dicembre 2015	
PZ9b				513m	71.2m	72m	80m	Settembre 2011-Novembre 2016	Dicembre 2013-Dicembre 2015	
PZ10a	Casagrande	1612759 E	5065416 N	420m	30.8m	31m	55m	Settembre 2011-Marzo 2013	Settembre 2012-Giugno 2015	
PZ10b				420m	53.6m	54m	55m	Settembre 2011-Agosto 2014	Settembre 2012-Dicembre 2015	
PZ11a	Casagrande	1613081 E	5065357 N	406m	21m	21m	65m	Settembre 2011-Novembre 2015	Settembre 2012-Dicembre 2015	
PZ11b				406m	55.5m	57m	65m	Settembre 2011-Novembre 2015	Dicembre 2013-Dicembre 2015	

Tabella 3.2 - Specifiche dei tubi inclinometrici e periodo di accessibilità per le misure inclinometriche tradizionali

Sigla inclinometro	Coordinate (Gauss-Boaga)			Azimuth guida A-B	Profondità (originaria - ispezionabile durante l'ultima misura) [m. dal p.c.]	Profondità deformazione rilevata [m. dal p.c.]	Periodo di accessibilità/misura	Note
	X	Y	Z (quota bocca foro) [m. s.l.m.]					
IN1	1612988 E	5065406 N	427m	N 40°	71m - 59m	60m	Agosto 2007-Maggio 2008	
IN2	1612923 E	5065572 N	397m	N 5°	63.50m - 49m	27.50m	Agosto 2007-Dicembre 2014	
IN3	1612800 E	5065317 N	458m	N 340°	80m - 50.5m	52.5m	Agosto 2007-Aprile 2014	
IN3-N	1612803 E	5065316 N	458	N 340°	60m - 60m	52m	Luglio 2011-Luglio 2013 (da 40 a 45m dal p.c.) Luglio 2011-Dicembre 2015 (da 46 a 56m dal p.c.)	Posizionata colonna inclinometrica DMR con moduli da 40m a 56m in registrazione automatica
IN4	1612902 E	5065385 N	442m	N 330°	80m - 52m	48m	Agosto 2007-Giugno 2013	
IN4-N	1612897 E	5065386 N	442m	N -30°	55m - 55m	48m	Luglio 2011-Settembre 2013	
IN5	1612877 E	5065529 N	398m	N 345°	43m - 43m	28m	Agosto 2007-Luglio 2009	
IN6	1612748 E	5065301 N	462m	N 320°	75m - 37m	38m	Agosto 2007-Dicembre 2009	
IN-6N	1612672 E	5065275 N	476m	N 10°	60m - 60m	5m	Luglio 2011-Dicembre 2015	
IN7	1612856 E	5065288 N	464m	N 30°	90m - 66m	68m	Agosto 2007-Dicembre 2009	
IN7-N	1612874 E	5065274 N	464m	N 30°	80m - 80m	67.5m	Luglio 2007-Marzo 2013	
IN8	1613165 E	5065397 N	372m	N 350°	49.50m - 49m	12m	Agosto 2007-Dicembre 2015	
IN9	1612707 E	5065189 N	513m	N -9°	90m - 90m	42m	Giugno 2011-Aprile 2014 Agosto 2012-Novembre 2014 (sonda fissa)	Sonda inclinometrica fissa posta a 42m. dal p.c.
IN10	1612759 E	5065416 N	420m	N 34°	65m - 65m	14.50m	Luglio 2011-Gennaio 2015 Agosto 2012-Dicembre 2014 (sonda fissa)	Sonda inclinometrica fissa a 14.5m. dal p.c.
IN11	1613081 E	5065357 N	406m	N 322°	65m - 65m	47.5m	Luglio 2011-Aprile 2014 Agosto 2012-Dicembre 2014 (sonda fissa)	Sonda inclinometrica fissa a 47.1m. dal p.c.

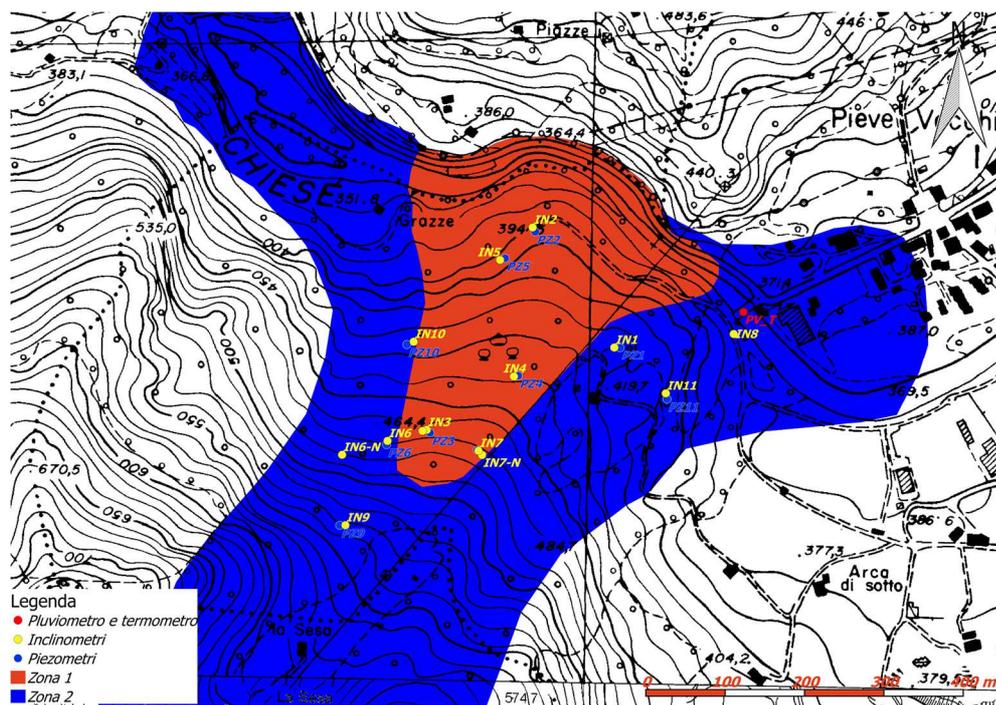


Figura 3.1 – Ubicazione dei tubi piezometrici e inclinometrici.

Nel 2012, all'interno dei tubi inclinometrici 9-10-11, furono installate anche delle sonde inclinometriche biassiali fisse alla profondità corrispondente alla superficie di scorrimento individuata tramite le varie campagne di rilevamento condotte. I dati da esse raccolte sono tuttavia non utilizzabili per gli scopi della tesi a causa di un intervallo di campionamento dell'ordine di qualche giorno, considerato troppo elevato.

Per verificare i dati di spostamento rilevati presso la superficie di scorrimento e in superficie nei tubi inclinometrici nel 2006 fu installata una rete di capisaldi ("corner reflectors") per il rilievo dello spostamento nel tempo tramite interferometria radar satellitare SAR (Figura 3.2), fu effettuato un rilievo con tecnologia laser da terra e nel 2010 uno da aereo (Figura 3.4). Tra il 2007 e il 2012 all'interno dei tubi inclinometrici IN2, IN3, IN4, IN5, IN6 e IN7 erano installati dei cavi coassiali in aderenza ai primi. Tramite strumentazione ecometrica venivano effettuate misure TDR (Time Domain Reflectometer) ogni 1-3 mesi con lo scopo di verificare qualitativamente i dati ottenuti dalle misure inclinometriche tradizionali. Il vantaggio dei cavi coassiali è la maggior tolleranza alle deformazioni e, quindi, una maggior vita rispetto ai tubi inclinometrici. Tuttavia la deformazione del cavo coassiale non necessariamente indica una deformazione anche del tubo inclinometrico e, quindi, del corpo di frana. Per tale motivo le misure TDR, senza il supporto delle misure inclinometriche tradizionali, sono di difficile

interpretazione. Possono risultare utili nel momento in cui la deformazione del tubo inclinometrico diventa eccessiva per il transito della sonda rimovibile. In tale situazione le misure TDR tarate sulle precedenti possono dare indicazioni qualitative sulle deformazioni in atto, anche alle profondità non più rilevabili tramite sonda inclinometrica rimovibile per inaccessibilità del tubo.

Presso la traversa nel 2007 furono installati un pluviometro riscaldato e un termometro.

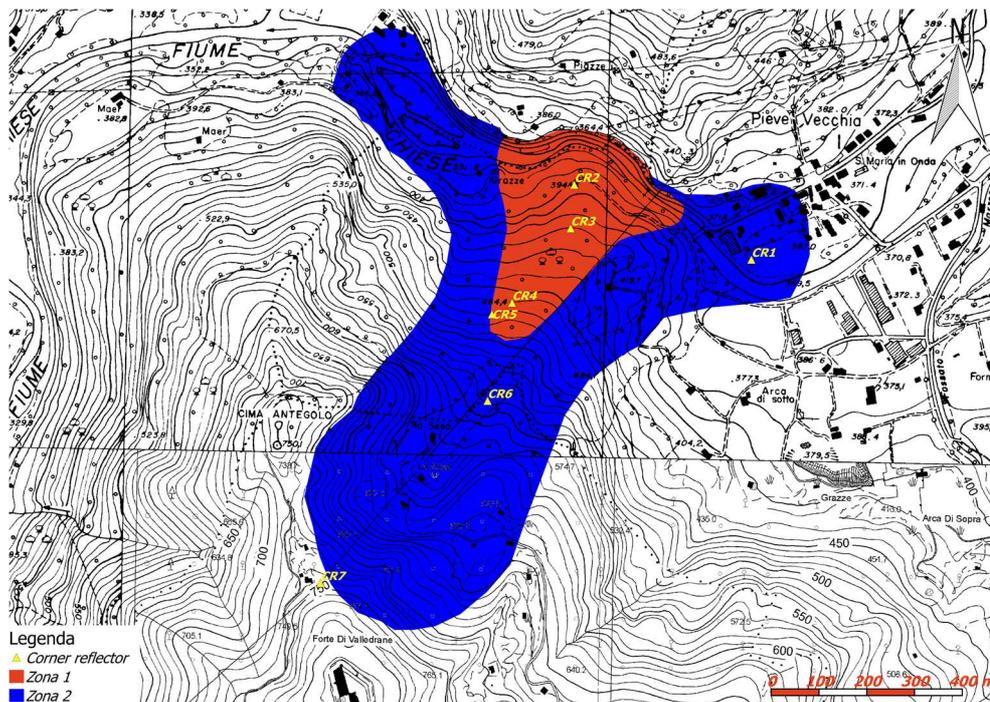


Figura 3.2 – Ubicazione dei corner reflector sulla frana.

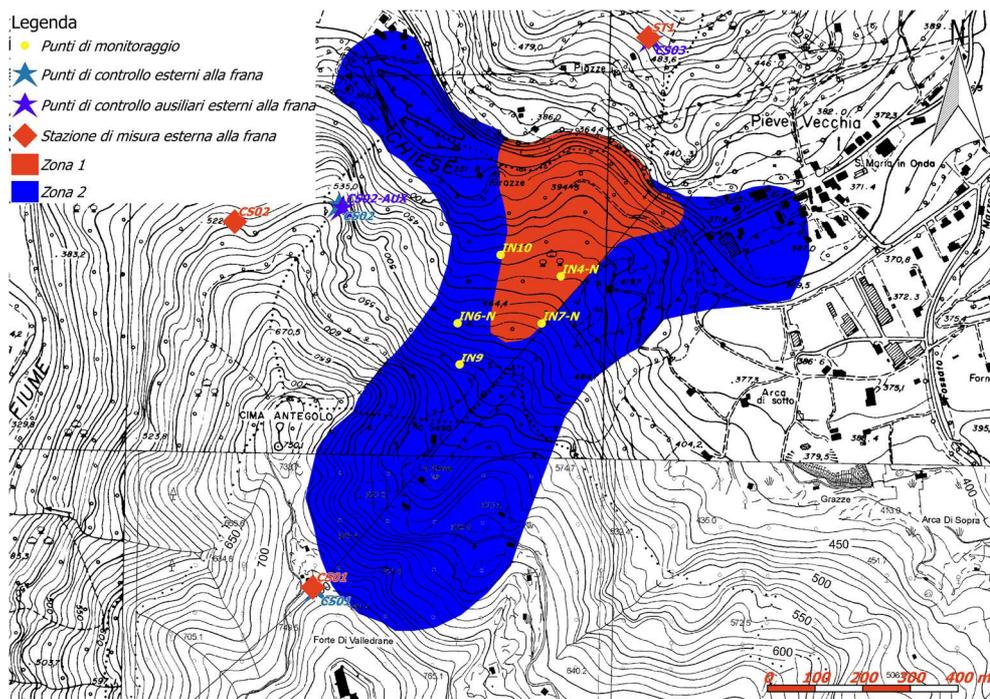


Figura 3.3 – Ubicazione della stazione di misura, dei punti di controllo e dei punti sottoposti a monitoraggio (teste di alcuni tubi inclinometrici) nel rilievo topografico.

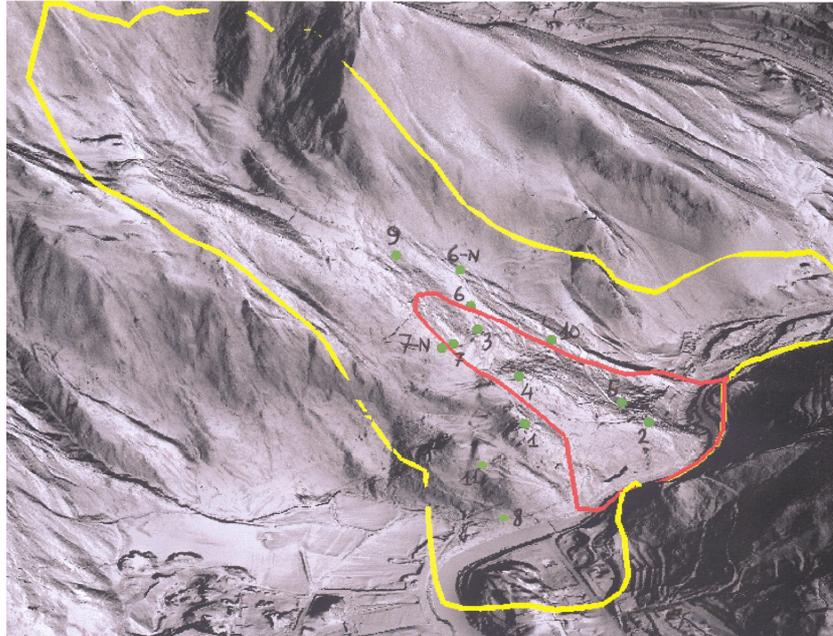


Figura 3.4 – Modello digitale del terreno (DTM) ottenuto dal rilievo LiDar da aereo (Arpa Lombardia, 2010)

3.1.1 - Misure piezometriche

Dato l'intervallo di tempo lungo tra una misura piezometrica manuale e l'altra queste non possono essere tenute in considerazione nell'analisi della loro correlazione con le precipitazioni occorse nell'area in quanto non riuscirebbero a individuare i brevi periodi di picco. Le misure manuali sono, però, utilizzabili per verificare i dati rilevati dai sensori piezometrici automatici.

In questo lavoro si sono quindi analizzate solamente le misure dei sensori piezometrici automatici installati presso i piezometri PZ3, PZ4, PZ6, PZ7, PZ9, PZ10 e PZ11. Eccetto PZ3, sono tutti piezometri di tipo Casagrande con doppio tubo, che rilevano la pressione interstiziale a 2 differenti profondità e quindi, potenzialmente, 2 falde acquifere distinte. Osservando i dati per il periodo 15 Luglio 2011 - 31 Dicembre 2015, si è individuato un andamento ben correlabile tra i livelli dei vari piezometri (vedi Figura 3.5).

I dati rilevati nelle postazioni con doppio sensore mostrano, nel caso di PZ10 e PZ11, la presenza di 2 falde distinte. Nel caso di PZ7 e PZ9 la differenza tra le misure dei 2 sensori è meno marcata, ma data la stratigrafia del corpo di frana è ipotizzabile la presenza di due diverse falde anche in quel caso.

Le falde, infatti, sono localizzate nei livelli più sabbiosi e ghiaiosi compresi all'interno del materiale prevalentemente limoso-argilloso.

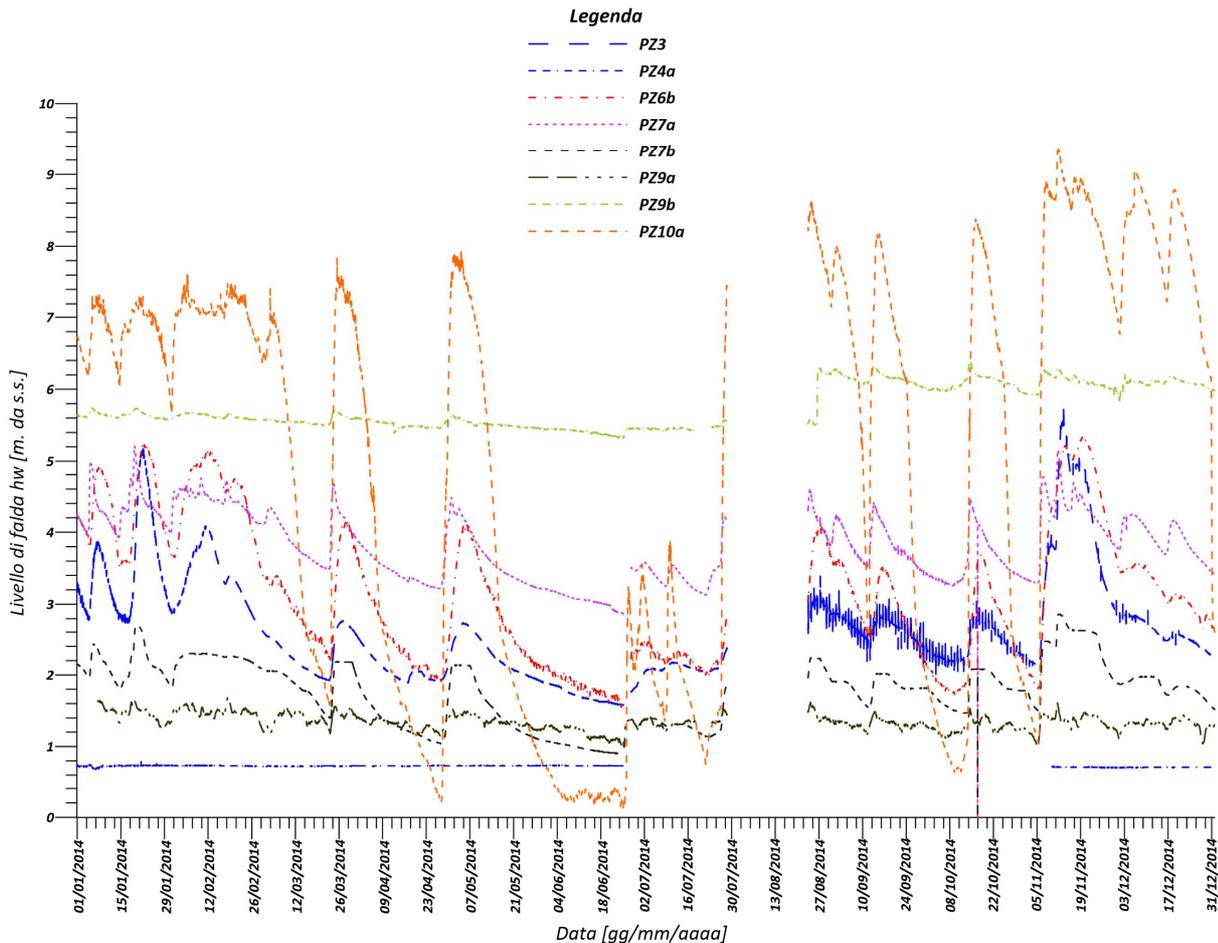


Figura 3.5 – Andamento del livello di falda presso i piezometri con sensore automatico nell'anno 2014.

Il livello di falda è normalizzato rispetto al livello minimo raggiunto nel periodo Luglio 2011 – Dicembre 2015 per rendere più leggibile il grafico.

L'escursione di falda tra il livello minimo e il livello massimo del periodo considerato è superiore a 3m per PZ3, PZ4a, PZ6b, PZ7a, PZ9b, PZ10a e PZ10b. È, invece, minore per PZ7b, PZ9a, PZ11a e PZ11b.

I dati di velocità ottenuti dall'analisi degli spostamenti lungo la superficie di scorrimento rilevata dalla sonda inclinometrica multiparametrica (DMS) presso il tubo inclinometrico IN3, posto in posizione centrale rispetto al corpo di frana, mostrano che i periodi con velocità elevata sono sempre in concomitanza con fasi di falda alta.

3.1.2 - Misure inclinometriche

Le campagne di misure inclinometriche tradizionali effettuate nel periodo 2007-2012 presso tutti i tubi inclinometrici (IN1-IN11) hanno evidenziato una fascia di deformazione basale netta, dello spessore variabile da 1 a 3m sopra la quale il materiale scorre con scarsa

deformazione interna approssimando il comportamento di un corpo rigido (vedi Figura 3.6). Essendo la banda di taglio individuata netta si è ipotizzato che lungo di essa le condizioni di resistenza al taglio siano quelle residue.

L'analisi dei dati provenienti dalle misure inclinometriche tradizionali, effettuata da Arpa Lombardia (2014) ha evidenziato come gli spostamenti in corrispondenza della testa dei piezometri, ossia presso il piano campagna, nella zona superiore e media della frana abbiano direzione prevalente SW-NE e divergano verso i margini della frana nella zona inferiore, al piede. Inoltre, la velocità massima viene raggiunta al piede (vedi Figura 3.7).

I dati della sonda DMS, rilevati tra il 2011 e il 2015, danno una velocità media presso la superficie di scorrimento, posta a 52m di profondità, di 6cm/anno circa con massimo di 20 cm/anno circa in limitati periodi di tempo.

Tuttavia, così come gli spostamenti in corrispondenza del piano campagna, anche gli spostamenti presso la superficie di scivolamento mostrano divergenze del movimento verso l'esterno al piede della frana e l'ordine di grandezza delle velocità è comparabile a quello riguardante il piano campagna.

Per questi motivi il corpo di frana può, ragionevolmente, essere comparato ad un corpo rigido in scorrimento sopra una superficie.

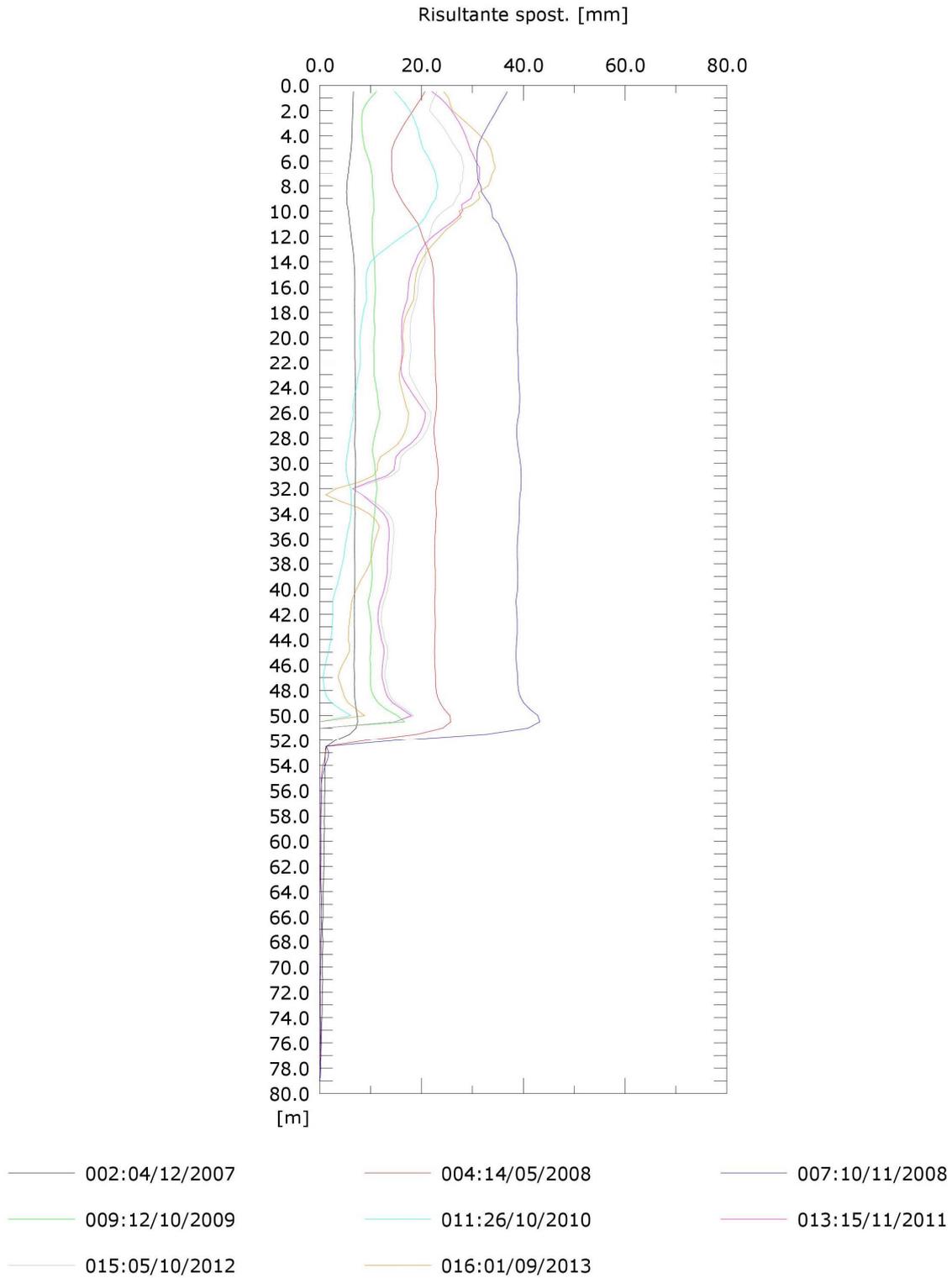


Figura 3.6 – Profilo inclinometrico presso il tubo IN3; relativo alle campagne di misura effettuate nel periodo Dicembre 2007-Settembre 2013 (Arpa Lombardia, 2013)

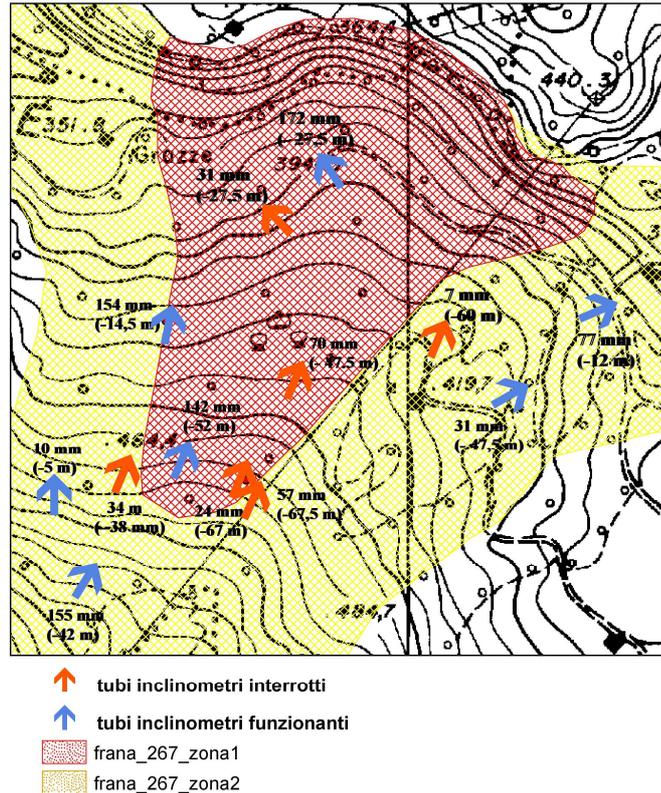


Figura 3.7 - Planimetria del corpo e del piede di frana con indicate, per ogni tubo inclinometrico, la direzione di spostamento, lo spostamento cumulato (sopra) e la profondità della superficie di scorrimento (sotto). Il periodo di riferimento è Dicembre 2007-Aprile 2014. (Arpa Lombardia, 2014)

3.2 - Indagini geognostiche, geofisiche e prove geotecniche sul corpo di frana e modalità di scelta dei parametri del modello

Per caratterizzare il terreno costituente il corpo di frana sono state effettuate varie campagne di indagine, spesso in occasione della realizzazione dei tubi inclinometrici e dei tubi piezometrici, con tale ordine cronologico (Manassero, 2013):

- GEOLAB s.n.c. (1995):

- Indagine geofisica mediante metodo GPR (Ground Penetrating Radar);
- Prelievo superficiale di n.2 campioni di terreno mediante fustella a pareti sottili, su cui sono state effettuate prove di laboratorio per la determinazione della granulometria, dei limiti di Atterberg e dei parametri di resistenza (i.e. n.2 prove di taglio diretto sul campione caratterizzato dal maggior contenuto di argilla).

- SO.GE.TEC s.r.l. (1997):

- Esecuzione di n.3 sondaggi a carotaggio continuo con installazione di n.3 inclinometri (IN1, IN2 e IN3);
- Esecuzione di n.15 prove penetrometriche dinamiche (SPT) in foro;

- Esecuzione di n.2 perforazioni a distruzione di nucleo con installazione di n.2 piezometri a tubo aperto (PZ1 e PZ3).
- **Dott. Geologo GIOVANNI FASSER – Studio di geologia tecnica e ambientale (2003):**
 - Esecuzione di n.1 sondaggio a carotaggio continuo con installazione di n.1 inclinometro (IN8);
 - Esecuzione di n.9 prove penetrometriche dinamiche (SPT) in foro.
- **INGEO s.r.l. (2005-2006):**
 - Esecuzione di n.5 sondaggi a carotaggio continuo con installazione di n.2 inclinometri (IN5, IN7), di n.2 piezometri di Casagrande a doppia cella di misura (PZ4 e PZ6) e di n.1 piezometro di Casagrande a cella singola di misura (PZ2);
 - Esecuzione di n.17 prove penetrometriche dinamiche (SPT) in foro;
 - Esecuzione di n.6 sondaggi a distruzione di nucleo con installazione di n.4 inclinometri (i.e. IN2, IN3, IN4, IN6), di n.1 piezometro Casagrande a cella singola di misura (i.e. PZ5) e di n.1 piezometro Casagrande a doppia cella di misura (i.e. PZ7);
 - Esecuzione di n.4 prove pressiometriche effettuate in corrispondenza delle verticali di indagine 4 e 5;
 - Esecuzione di n.4 stendimenti di tomografia geoelettrica.
- **Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Padova (2006):**
 - Esecuzione di n.32 prove di laboratorio su campioni prelevati in corrispondenza della verticale di indagine PZ4 (vedi Campagna INGEO s.r.l. del 2005-2006) per la determinazione della granulometria e dei limiti di Atterberg.
- **SONDEDILE s.r.l. (2011):**
 - Esecuzione di n.5 sondaggi a carotaggio continuo con installazione di n.3 inclinometri (IN9, IN6-N, IN7-N) e di n.2 piezometri Casagrande a doppia cella di misura (i.e. PZ10, PZ11);
 - Esecuzione di n.5 sondaggi a distruzione di nucleo con installazione di n.4 inclinometri (i.e. IN10, IN11, IN3-N, IN4-N) e di n.1 piezometro di Casagrande a doppia cella di misura (i.e. PZ9);
 - Prelievo di n.3 campioni indisturbati di terreno durante le procedure di perforazione all'interno dei litotipi a maggior contenuto di materiale a grana fine;
 - Prelievo di n.15 campioni rimaneggiati a disturbo limitato;
 - Esecuzione di n.3 prove di permeabilità in foro di tipo Lefranc a carico variabile;
 - Esecuzione di n.2 prove di permeabilità in foro di tipo Lefranc a carico costante;

- Esecuzione di n.3 pozzetti esplorativi tramite escavatore cingolato;
- Prelievo di n.6 campioni indisturbati durante l'esecuzione dei pozzetti esplorativi.

- SOGEA s.r.l. (2011):

- Esecuzione su 12 dei campioni prelevati durante la Campagna di Indagine effettuata da SONDEDILE s.r.l. (2011) sia dai sondaggi che dai pozzetti esplorativi delle seguenti prove di laboratorio: n.8 determinazioni del contenuto naturale d'acqua; n.12 determinazioni del peso di volume; n.12 determinazioni del peso specifico dei granuli; n.12 determinazioni dei limiti di Atterberg; n.12 granulometrie; n.12 aerometrie; n.6 prove edometriche; n.6 prove di taglio anulare; n.6 prove di taglio diretto con scatola di Casagrande.

- SO.GE.TEC s.r.l. (Novembre 2012-Gennaio 2013):

- Indagini di deflusso sotterraneo con traccianti

- ISMGEO s.r.l. (Novembre 2012 – Gennaio 2013):

- Esecuzione su n.8 campioni disturbati prelevati nel periodo Gennaio – Febbraio 2012 dalle carote dei sondaggi effettuati da SONDEDILE s.r.l. (2011) delle seguenti prove di laboratorio: n.8 determinazioni dei limiti di Atterberg; n.8 granulometrie; n.8 aerometrie; n.4 prove di taglio anulare a velocità di deformazione controllata.

Le principali indagini geotecniche effettuate sono state quelle sui campioni prelevati dalle carote estratte nei sondaggi a carotaggio eseguiti in occasione della realizzazione dei tubi inclinometrici e piezometrici.

Le stratigrafie ottenute grazie ai carotaggi eseguiti sono riportate in sondaggi 1 (Figure A1.1-A1.9)

In laboratorio sono stati determinati granulometria, peso dell'unità di volume (γ), peso specifico dei grani (G_s), limiti di Atterberg e contenuto d'acqua, indice dei vuoti, parametri di resistenza al taglio in condizioni drenate (angolo di resistenza al taglio di picco, ϕ_p , e residua, ϕ_r , e coesione c) e parametri di deformabilità.

I valori di maggiore interesse per la tipologia di modello geotecnico che si intende applicare alla frana di Idro sono quelli riguardanti la distribuzione granulometrica con la profondità, il peso di volume del terreno saturo e secco e le caratteristiche di resistenza. I campioni prelevati e sottoposti ad analisi granulometrica hanno evidenziato la presenza di orizzonti con maggior frazione argillosa (18% di media con massimo del 40%) e con angoli di resistenza al taglio residua molto minori rispetto ai campioni con frazione fine minore. Lungo di essi è impostata la banda di taglio su cui il corpo di frana scorre.

Un classico esempio è l'analisi geotecnica effettuata dalla Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Padova (2006) sulla carota estratta in occasione della realizzazione del PZ4.

In Figura 3.8 è rappresentato un profilo stratigrafico con indicate la composizione granulometrica, i limiti di Atterberg e l'indice plastico. Si notano, tra i 39m e i 42m e tra i 49m e i 51m dal piano campagna, degli orizzonti con elevata frazione argillosa e limosa.

In Figura 3.9 è riportato il grafico ottenuto dalla prova di taglio diretto in condizioni drenate effettuata su provini ricostruiti con frazione passante al vaglio n.40 del sondaggio per il piezometro PZ4. I valori di angolo d'attrito in condizioni residue ottenuti sono di 25-29°, relativamente alti a causa della bassa plasticità tipica dei terreni di alterazione. La coesione è nulla.

Manassero (2013), osservando il risultato delle prove di laboratorio condotte da SOGEA s.r.l. (2011) e da ISMGEO s.r.l. (2012-2013) su campioni provenienti dai sondaggi effettuati da SONDENILE s.r.l. ha evidenziato come tali valori di angolo di resistenza al taglio residuo e coesione rientrino nel campo di variabilità dei campioni prelevati in altri sondaggi. I campioni analizzati da SOGEA s.r.l. (2011), a disturbo limitato, sono stati sottoposti a prove di taglio, sia diretto che anulare.

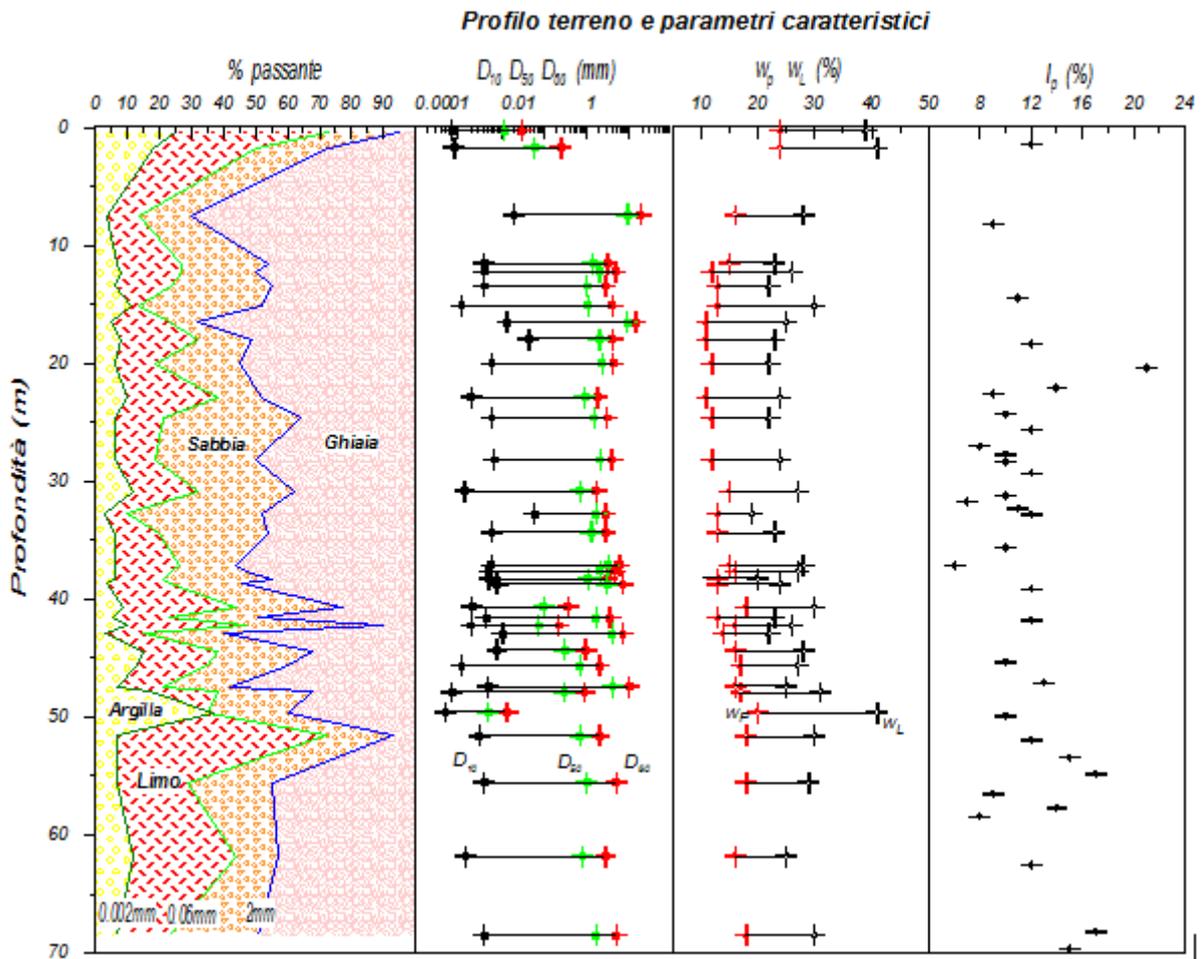


Figura 3.8 – Profilo stratigrafico presso il tubo piezometrico PZ4 con indicate frazioni granulometriche, limiti di Atterberg e indice plastico per ogni livello. (Facoltà di Ingegneria, Università di Padova, 2006)

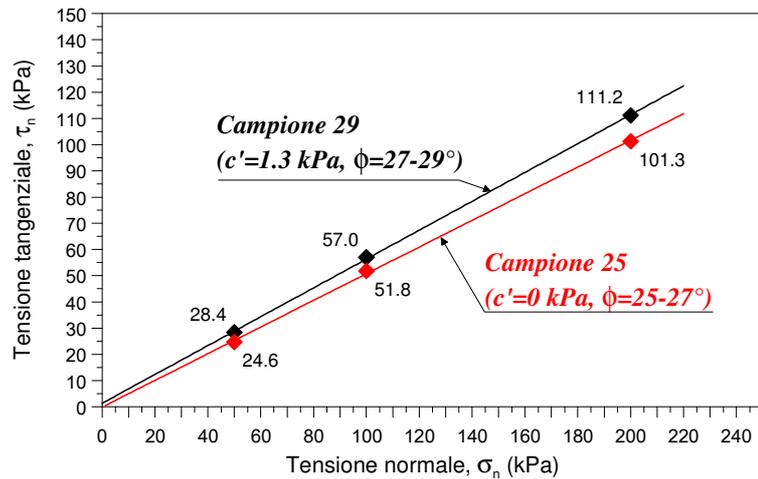


Figura 3.9 – Grafico τ - σ con i risultati delle prove di taglio diretto in condizioni drenate sui provini ricostruiti con frazione passante al vaglio n.40 provenienti dalla carota del sondaggio presso il tubo piezometrico PZ4

Dei campioni ottenuti da ISMGEO s.r.l. (2013) sono stati sottoposti a prove di taglio anulare solo quelli con contenuto di argilla e indice di plasticità maggiori così da ottenere i

minimi angoli di resistenza al taglio e valori di coesione tra quelli di tutto il terreno del corpo di frana.

La Figura 3.10, che riporta l'angolo di resistenza al taglio di picco e residua in funzione della profondità per tutti i campioni analizzati, evidenzia come la resistenza di taglio di picco dei materiali sia compresa tra i 25° e i 30°.

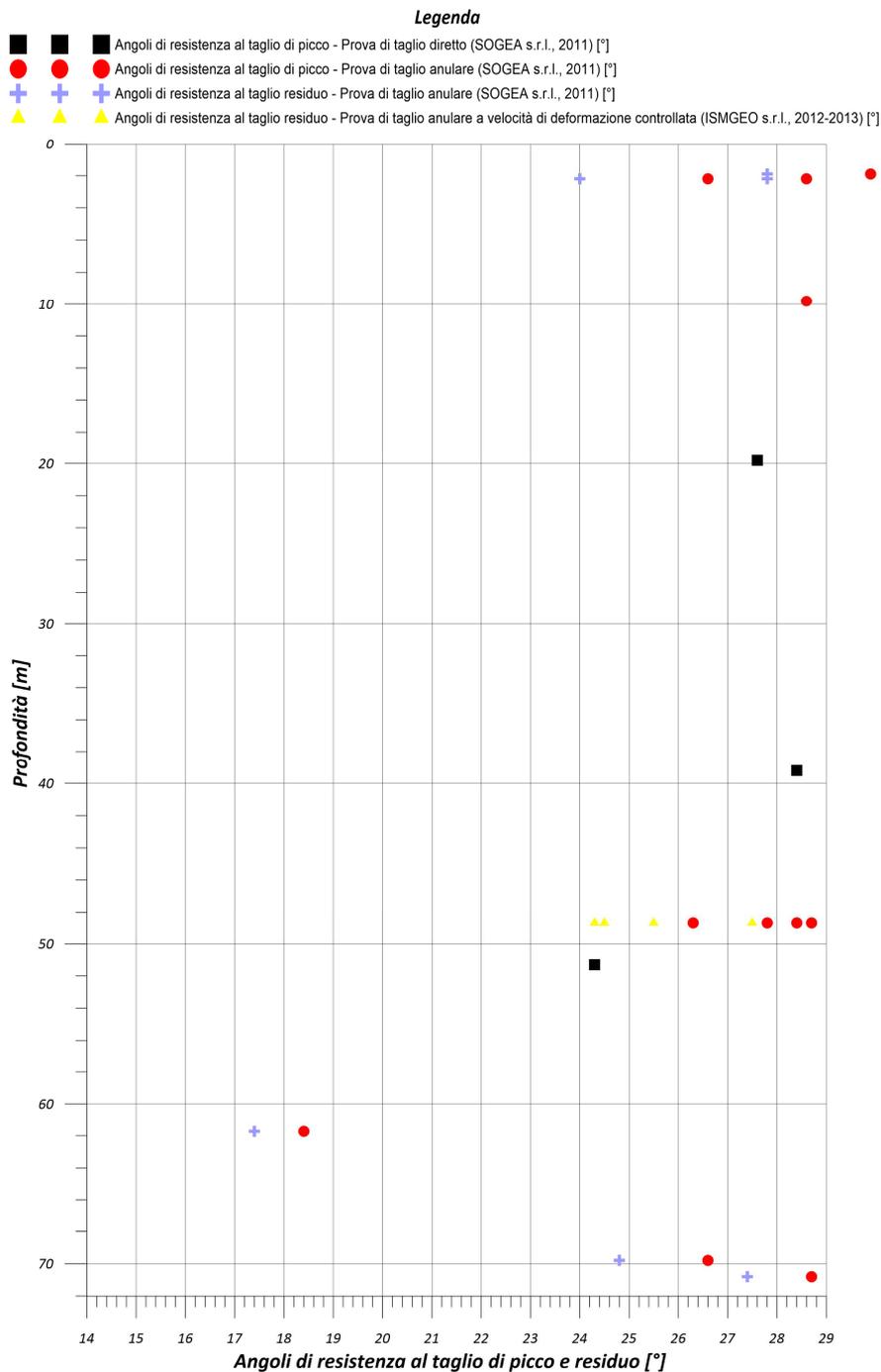


Figura 3.10 - Grafico con gli angoli di resistenza al taglio di picco e residua ottenuti dalle prove di taglio diretto e anulare da SOGEA s.r.l. (2011) e ISMGEO s.r.l. (2012-2013) eseguite su campioni prelevati a varie profondità.

La resistenza al taglio di picco è significativa per i terreni non attraversati dalla banda di taglio, lungo cui la frana scorre e presenta alti valori di spostamenti relativi. Lungo questa banda l'angolo di resistenza in gioco è quello in condizioni residue, che è compreso tra 23° e 28°. Nel Figura 3.11 sono, invece, riportati i valori di coesione, determinati da prove di taglio diretto, e caratterizzanti quindi il criterio di resistenza di picco: sono compresi tra 2 e 6 kPa con picco massimo di 11.1 kPa.

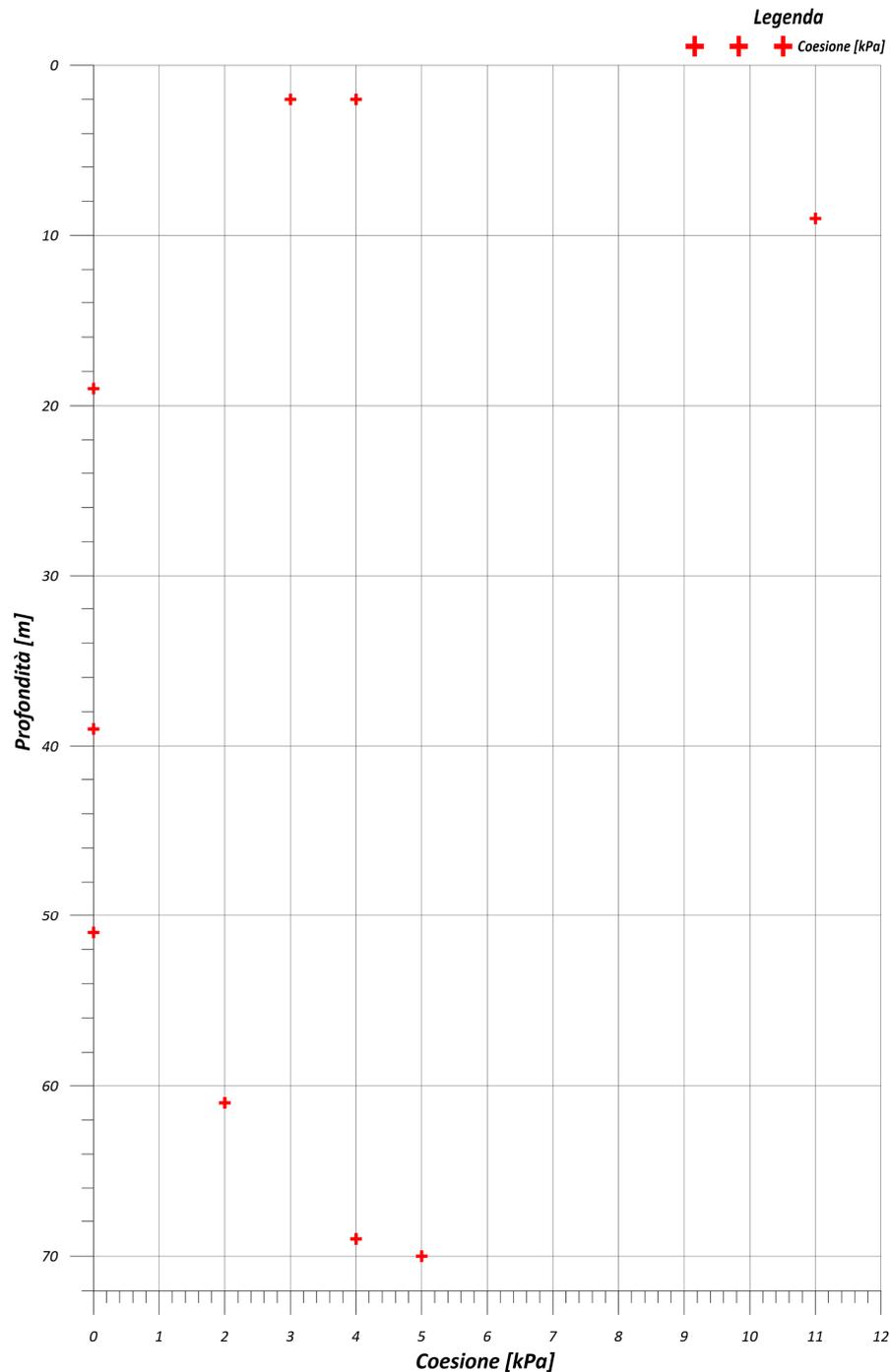


Figura 3.11 – Valori di coesione ottenuti dalle prove di taglio diretto e anulare.

Rispetto gli intervalli degli angoli di attrito individuati per la maggior parte dei campioni, un solo campione presenta angoli di resistenza al taglio in condizioni di picco e residue particolarmente più bassi: con la prova di taglio anulare (SOGEA s.r.l., 2011) si è ottenuto rispettivamente 18.4° e 17.4° . Il campione è stato prelevato alla profondità di 61.75m nel sondaggio IN7-N (SONDENILE s.r.l., 2011) e, da quanto evidenziato dalle successive misure inclinometriche lungo la verticale IN7-N, risulta trovarsi proprio in prossimità della superficie di scorrimento. Esso presenta una frazione argillosa del 39%, più alta cioè di quella di tutti gli altri campioni sottoposti ai test di taglio.

Data tale distribuzione dei parametri di resistenza nei campioni analizzati si può ipotizzare la presenza, all'interno della banda di taglio su cui il corpo di frana scorre, di lenti con contenuto argilloso superiore alla media e quindi con angolo di resistenza in condizioni residue minore rispetto al contorno. Queste lenti argillose, vista la quantità di campioni prelevati e testati, vengono considerate come non rappresentative dell'insieme e il campo di variabilità sopra citato può essere considerato valido.

Data la ridotta velocità di scorrimento media che caratterizza la frana, Manassero (2013) sottolinea che la velocità di taglio imposta nelle prove da SOGEA s.r.l. (2011) e ISMEGEO s.r.l. (2012-2013) risulta troppo alta dato che la resistenza al taglio in condizioni residue dipende anche dalla velocità. Per verificare tale ipotesi sono state eseguite da ISMEO s.r.l. (Gennaio 2013) alcune prove a varie velocità di taglio, diagrammando i risultati in un piano $v_{def}-\phi_{res}$ (Manassero, 2013). La retta di interpolazione (Figura 3.12) evidenzia una riduzione di 2° dell'angolo di resistenza in condizioni residue se la velocità si riduce a valori di 1 mm/mese, cioè comparabile con le velocità di movimento della frana.

Il peso di volume umido è compreso tra 18 e 20 kN/m³; il peso di volume saturo varia tra 20 e 22 kN/m³ e il peso di volume secco è tra 16 e 17kN/m³ (Figura 3.13).

I sondaggi hanno permesso inoltre di ottenere lo spessore del corpo di frana sopra la superficie di scivolamento.

In Appendice 2 (Figure A2.1- A2.4) sono riportati i moduli riassuntivi delle prove di laboratorio svolte su alcuni campioni prelevati dalle carote estratte tramite i sondaggi verticali per la posa dei inclinometrici IN7 e IN9 e dei piezometri PZ10 e PZ11.

Oltre alle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati dalle carote sono state svolte anche prove penetrometriche dinamiche (SPT) (SO.GE.TEC. s.r.l., 1997; Dott. Geol. Giovanni Fasser, 2003; INGEO s.r.l., 2005-2006), indagini geofisiche (geoelettrica) (INGEO s.r.l., 2005-

2006), prove di permeabilità (SONDENILE s.r.l., 2011), prove pressiometriche (INGEO s.r.l., 2005-2006) e indagini idrogeologiche sul deflusso sotterraneo (SO.GE.TEC. s.r.l. 2012-2013). Le prove penetrometriche dinamiche non sono risultate significative a causa della presenza diffusa di ghiaie e ciottoli, anche di dimensioni pluricentriche e metriche, che ha portato la punta a rigetto la maggior parte delle volte (Arpa Lombardia, 2007).

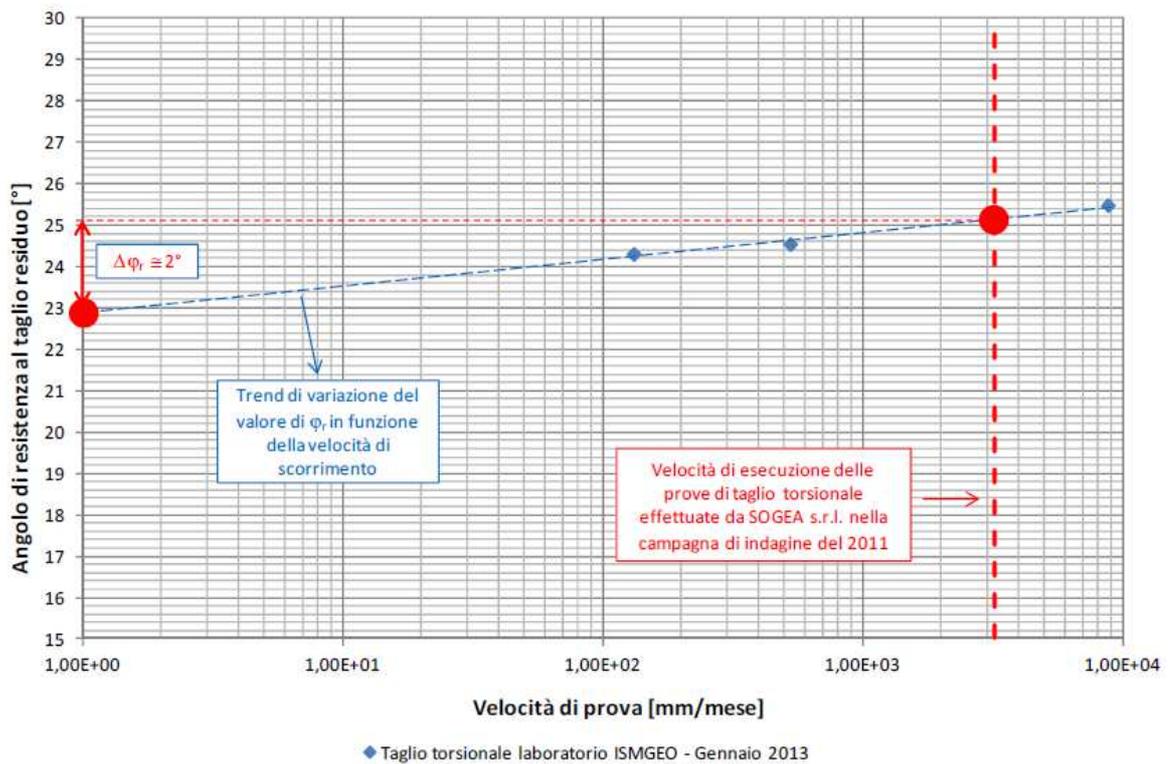


Figura 3.12 – Angolo di resistenza al taglio in condizioni residue in funzione della velocità di taglio applicata nella prova di taglio anulare e la retta di interpolazione. (Manassero, 2013)

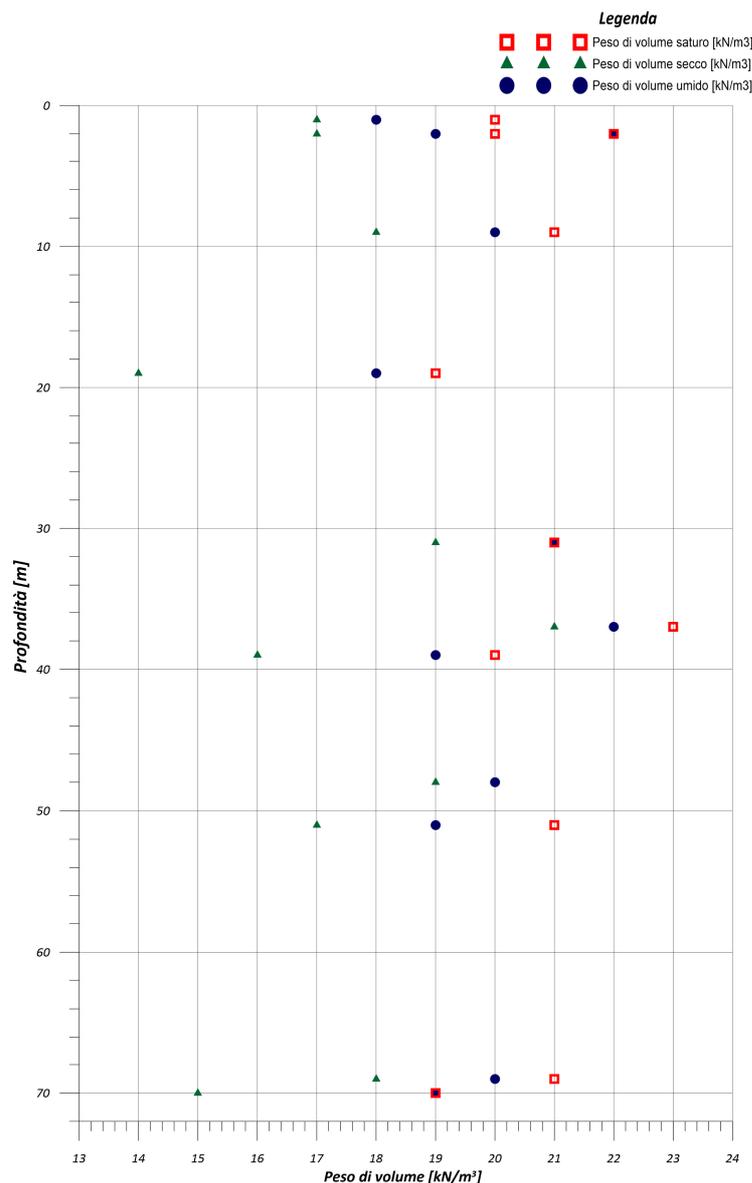


Figura3.13 – Grafico con riportato il peso di volume umido, saturo e secco dei campioni analizzati.

La tomografia elettrica fu eseguita tramite 4 stendimenti (Tabella 3.3 e Figura 3.14), uno longitudinale e due trasversali al versante di frana.

Come si evince dalle sezioni interpretative (vedi Figura A1.10, Figura A1.11, Figura A1.12 e Figura A1.13 in Appendice 1) la resistività apparente del corpo di frana varia relativamente poco, da un minimo di 30 ohm/m ad un massimo di 800 ohm/m con picco di 1300 ohm/m.

L'unico elemento con una certa continuità lineare individuabile è uno 'spartiacque' resistivo nella porzione centrale dello stendimento Idro 3.

Unica altra considerazione è che l'assetto si presenta caotico, come confermato dai sondaggi verticali, senza geometrie ben definite. Le aree che appaiono con basse resistività sono

probabilmente quelle più saturate in acqua; le aree con resistività più elevate si ipotizza, invece, non siano saturate in acque oppure che siano caratterizzate da ghiaie e ciottoli.

La tomografia non ha quindi permesso di caratterizzare meglio il sottosuolo della frana.

Tabella 3.3 – Caratteristiche degli stendimenti per la tomografia elettrica. (Arpa Lombardia, 2006)

Nome stendimento	Lunghezza [m]	Profondità massima di investigazione [m]	Spaziatura interlettrodica [m]	Perforazioni di riferimento	Direzione stendimento
IDRO 1	324	60	12	PZ/IN3 (P3) – PZ/IN4 (P4) – PZ/IN1 (P1)	ENE - WSW
IDRO 2	324	60	12	PZ/IN6 (P6) – PZ/IN3 (P3) – PZ/IN7 (P7)	NW-SE
IDRO 3	324	60	12	PZ/IN2 (P2) – PZ/IN8 (PROV1)	NW-SE
IDRO 4	324	60	12	PZ/IN2 (P2) - IN5 (P5)	E-W

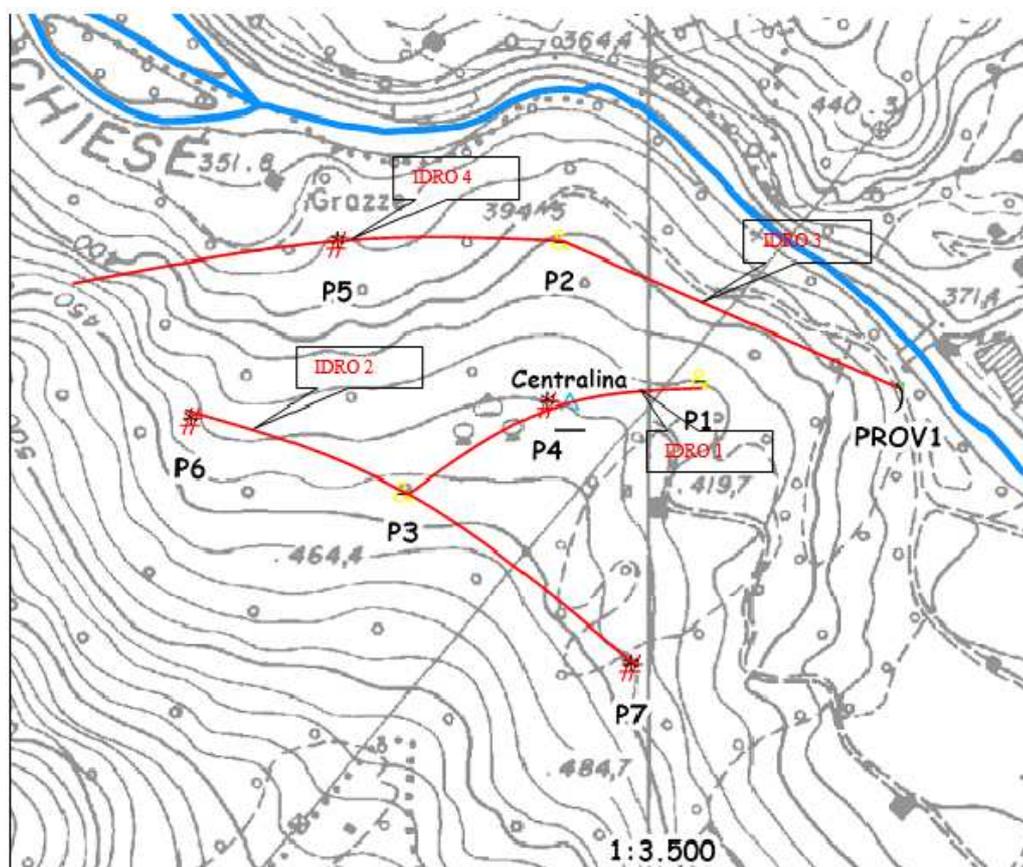


Figura 3.14 – Planimetria con i punti di passaggio degli stendimenti per la tomografia elettrica. (Arpa Lombardia, 2006)

Le prove di permeabilità sono state eseguite presso i pozzi di sondaggio PZ-IN7, PZ-IN9 e PZ-IN10.

Sono state di tipo Lefranc: una a carico variabile nel pozzo PZ-IN7; 2 a carico costante e 1 a carico variabile nel pozzo PZ-IN9; una a carico variabile nel PZ-IN10.

I coefficienti di permeabilità vanno da 10^{-2} cm/s, a profondità superficiali, fino a 10^{-5} cm/s, a profondità elevate (oltre i 50m).

Le prove pressiometriche sono state eseguite presso i fori di sondaggio PZ-IN4 e IN5. L'obiettivo era ricavare il modulo pressiometrico, le curve di espansione pressiometrica, le curve di espansione netta e le curve di fluage. Nel sondaggio PZ-IN4 sono state eseguite alle profondità di 12 e 29 m dal p.c.; nel sondaggio IN5 alle profondità di 12 e 30 m dal p.c. presso livelli di ghiaie e limi.

Le indagini con traccianti sono state condotte per ricostruire il deflusso sotterraneo delle acque, che non è stato possibile determinare tramite i sondaggi verticali, le prove penetrometriche e le indagini geofisiche a causa dell'elevata eterogeneità dell'accumulo di frana.

Ciò che governa la circolazione idrica che si instaura a seguito dell'infiltrazione per disgelo o precipitazioni è la distribuzione spaziale delle frazioni granulometriche di grana maggiore, in cui sono localizzate le falde acquifere sovrapposte che caratterizzano tale frana.

L'obiettivo è stato, tramite l'immissione di un tracciante colorato (soluzione di fluorescina in acqua) all'interno del corpo di frana, determinare le zone di alimentazione, le direttrici di deflusso e stimare la conducibilità idraulica con lo scopo di creare un modello di saturazione (Arpa Lombardia, 2013).

Il tracciante è stato immesso sia dal PZ9, il più a monte dei piezometri, che da un affioramento idrico in località Valledrane. In entrambi i casi l'unico piezometro all'interno del quali i fluorocaptori hanno rilevato il tracciante è stato il PZ1, al piede della frana verso est.

Il modello di saturazione derivato prevede una direttrice di deflusso ipogeo sul lato destro idrografico della frana, a conferma dei risultati delle prove di Lefranc, e un'area di alimentazione ipogea che si estende a monte del corpo di frana in un bacino idrogeologico con superficie 2 volte più ampia rispetto a questo.

3.3 - Considerazioni sulla stabilità della frana

Nel 2008 e nel 2013 sono state effettuate delle analisi di stabilità della frana. Le prime sono state eseguite dai Prof. Ing. P. Simonini (Università degli Studi di Padova) e Ing. F. Giustacchini per un progetto di stabilizzazione del versante per conto del Comune di Idro; le seconde dal Prof. Ing. Mario Manassero (Politecnico di Torino) nell'ambito di uno studio geotecnico della frana commissionato da Arpa Lombardia.

Nel 2008 l'analisi della stabilità ha considerato come livello di falda il massimo rilevato dalla rete piezometrica nel limitato periodo di monitoraggio Ottobre 2005-Dicembre 2007.

È stata utilizzata un'analisi all'equilibrio limite con il metodo di Morgenstern & Price (1965), data una schematizzazione a blocchi della superficie di rottura.

Dato l'assetto stratigrafico caotico del versante e la difficoltà nell'individuare strati omogenei continui il terreno è stato considerato come mezzo omogeneo poroso.

I parametri considerati nell'analisi di stabilità sono stati derivati dalle indagini di laboratorio condotte dall'Università di Padova nel 2006 su campioni prelevati nel sondaggio per il tubo piezometrico PZ3. Questi sono: - peso di volume sotto e sopra falda: $\gamma_{sat} = 18.4 \text{ kN/m}^3$, $\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$;

- angolo di attrito: $\phi = 25^\circ$;

- coesione efficace: $c' = 0 \text{ kPa}$.

La ricerca della superficie di scorrimento con minimo coefficiente di sicurezza è stata limitata in base ai punti di discontinuità dei profili inclinometrici ottenuti dai tubi inclinometrici IN2, IN3, IN4, IN5 e IN7.

Il modello ha confermato l'esistenza di una superficie di scorrimento con grado di sicurezza minimo passante per i punti rilevati e la precarietà dell'equilibrio. Il fattore di sicurezza trovato è infatti 1.03 ed è stato calcolato possa scendere sotto l'unità in caso di innalzamento del livello di falda di qualche metro. In Figura 3.15 è raffigurato una sezione longitudinale della frana con evidenziati la superficie di scorrimento, il corpo di frana e gli inclinometri installati.

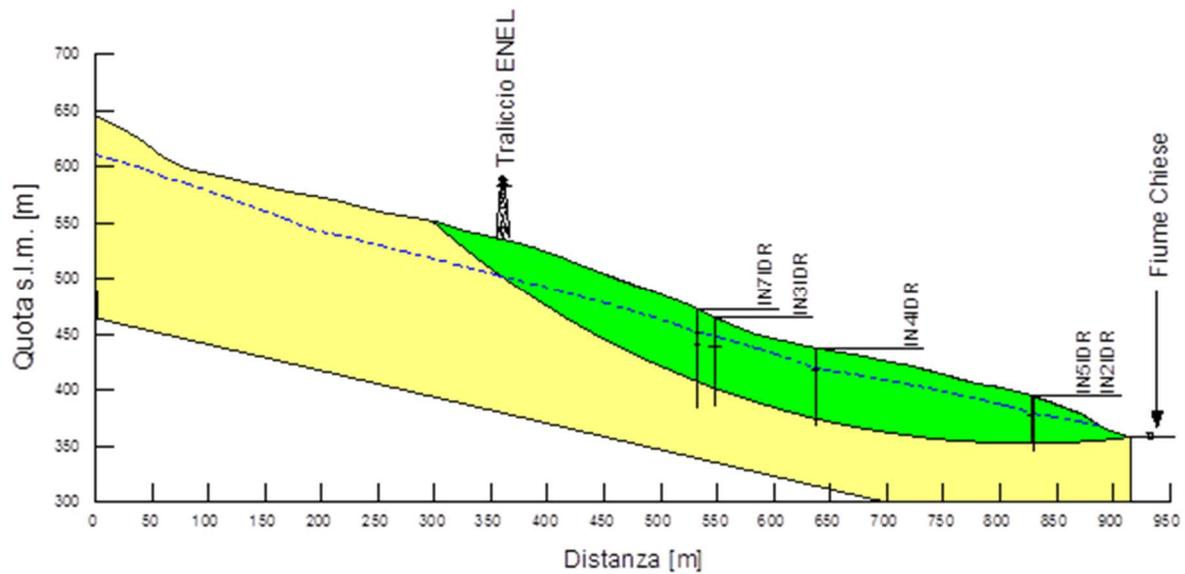


Figura 3.15 – Sezione longitudinale della frana con indicata la superficie di scorrimento e i tubi inclinometrici. (Simonini & Giustacchini, 2008)

Nel modello geotecnico presentato dal Prof. Ing. Mario Manassero nel 2013 per l'analisi di stabilità è stato utilizzato un modello agli elementi finiti. Sulla base dei risultati emersi dai sondaggi e dalle indagini di laboratorio svolte negli anni ha ipotizzato la presenza di una banda di taglio che interseca solo localmente lenti con elevata frazione argillosa e considerato il livello di falda medio dell'acquifero più superficiale.

In Figura 3.16 è raffigurata la sezione di riferimento.

I parametri considerati sono:

- peso di volume sotto e sopra falda: $\gamma_{sat} = 21.0 \text{ kN/m}^3$, $\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$;
- angolo di attrito: $\phi = 23^\circ$;
- coesione efficace: $c' = 0 \text{ kPa}$
- modulo di Young: $E = 15 \text{ MPa}$
- coefficiente di Poisson: $\nu = 0.25$

Il coefficiente di sicurezza ottenuto è di 1.05, molto simile a quello ottenuto nel 2008.

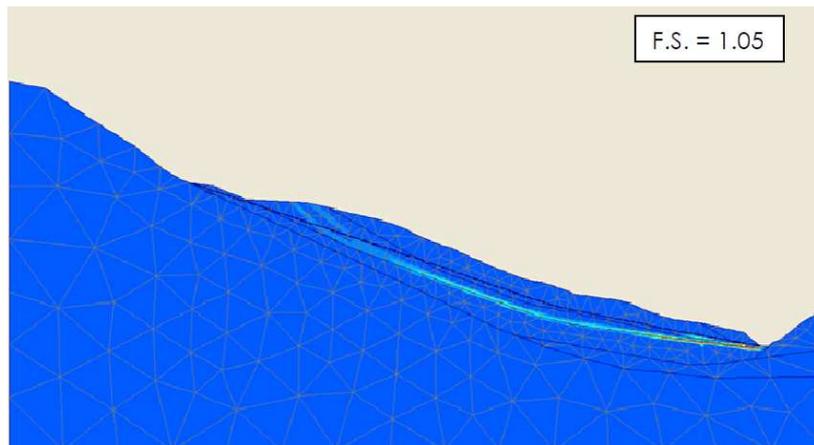


Figura 3.16 – Sezione longitudinale della frana su cui è stata effettuata l'analisi di stabilità. La banda di taglio è raffigurata in bianco e in azzurro. (Manassero, 2013)

Analizzando i dati ottenuti tramite il sensore piezometrico automatico collocato nel piezometro a tubo aperto PZ3, posto approssimativamente al centro della frana, è stato possibile ottenere la variazione nel tempo dello sforzo resistente del terreno.

Si è osservata una differenza tra il livello di falda massimo e il livello di falda minimo di 5.5m (vedi Figura 3.17).

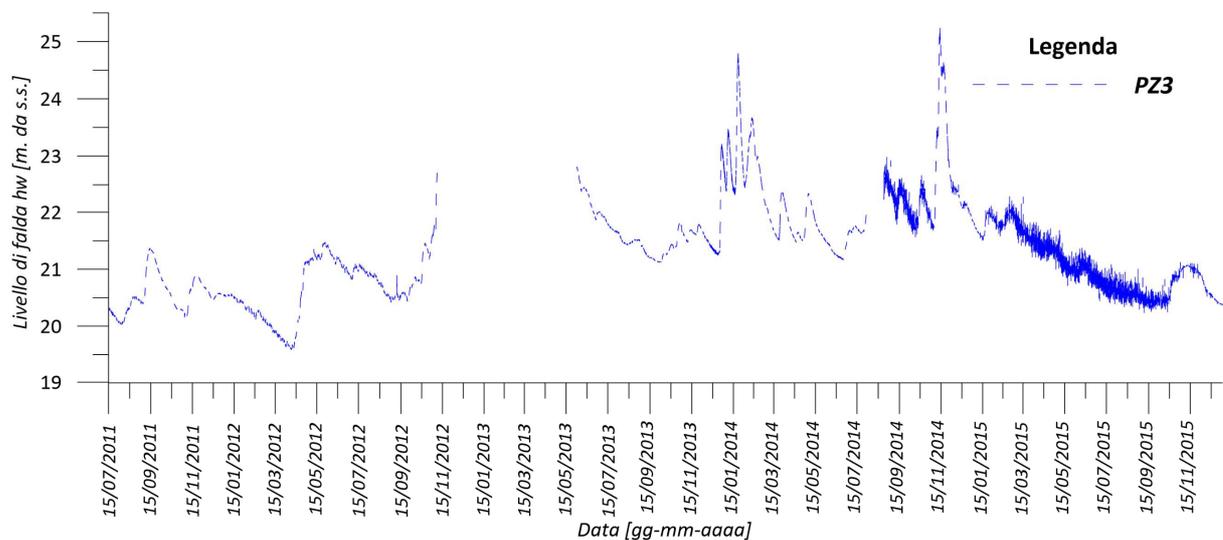


Figura 3.17 – Oscillazioni del livello di falda presso PZ3 nel periodo Luglio 2011-Dicembre 2015. Il livello è espresso in metri sopra la superficie di scorrimento.

Dato un livello di falda medio di circa 21m, sopra la superficie di scorrimento ed il peso di volume parzialmente saturo del terreno del corpo di frana 19kN/m^3 , come assunto dai risultati delle indagini di laboratorio, è stato applicato il principio di Terzaghi per determinare la pressione efficace media agente all'interno di questo.

Lo spessore di frana considerato corrisponde a 52m., la profondità dal piano campagna della superficie di scorrimento rilevata dalla sonda DMS (vedi Figura 3.18).

Il peso di volume dell'acqua è assunto, per approssimazione, uguale a 10kN/m^3 .

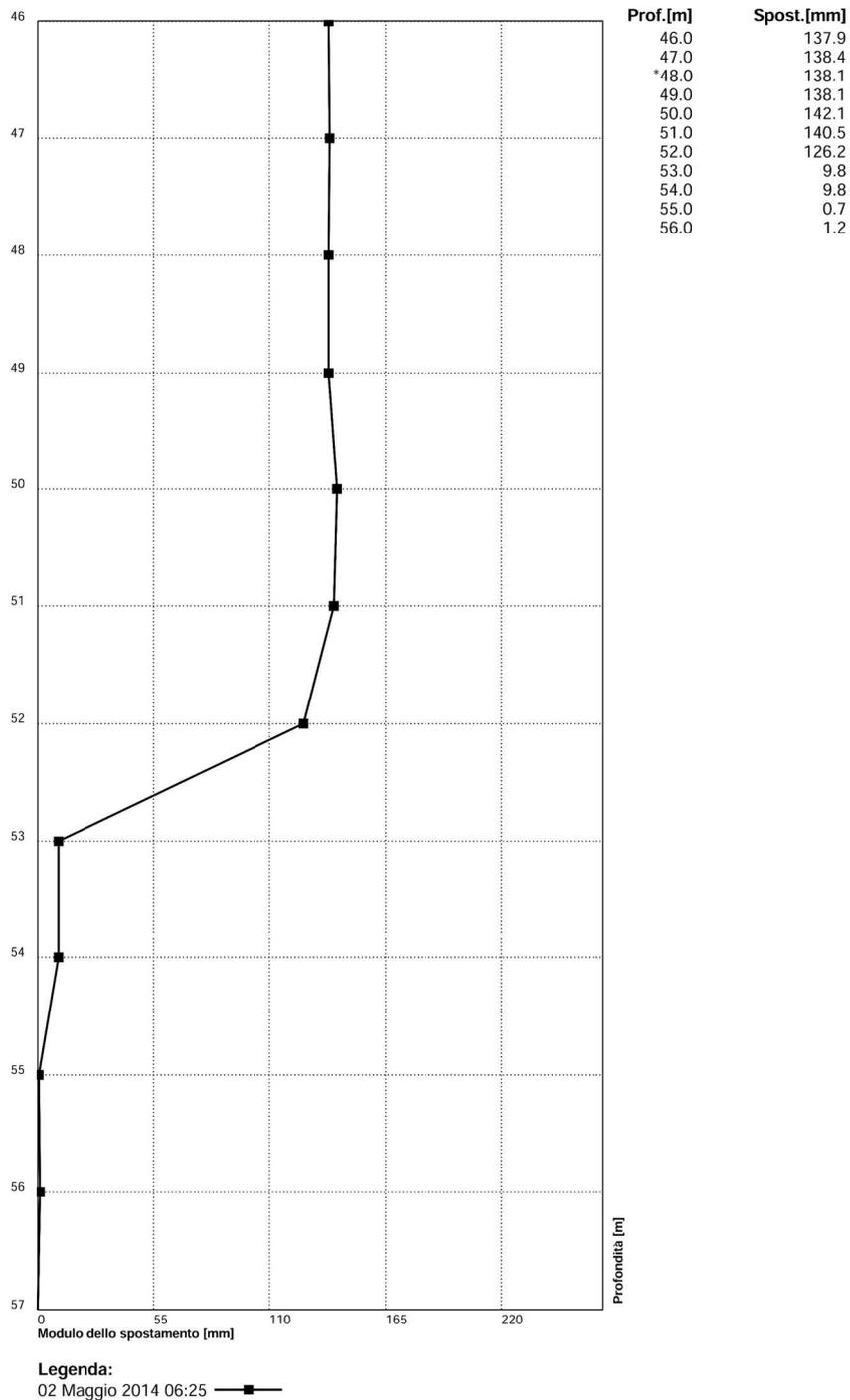


Figura 3.18 – Profilo inclinometrico presso il tubo inclinometrico IN3-N. Spostamento cumulato alle varie profondità nel periodo Luglio 2011-Maggio 2014. Dati ottenuti dalla sonda inclinometrica multiparametrica DMS. (Arpa Lombardia, 2014)

La stima ottenuta tramite il suddetto principio ($\sigma'_v = \gamma h - \gamma_w h_w$) è di 780kPa.

Lo sforzo normale sulla superficie di scorrimento ($\sigma'_n = \sigma'_v \cos \alpha$), data un'inclinazione di 18° della superficie di scorrimento, è di 740kPa.

Lo sforzo resistente del terreno in condizioni di livello di falda medio e con angolo di resistenza residua di 21° è quindi, secondo il criterio di Mohr-Coulomb ($\tau = \sigma'_n \text{tg} \phi_{\text{res}}$) equivalente a 285 kPa.

Considerando l'escursione massima del livello di falda di 5.5m, la variazione della pressione neutra all'interno dell'ammasso detritico ($\Delta p_w = \gamma_w \Delta h_w$) è di 55kPa. Inserendola nel principio di Terzaghi ($\Delta \tau = \Delta \sigma'_n \text{tg} \phi_{\text{res}} = \Delta p_w \text{tg} \phi_{\text{res}}$) si ottiene una variazione dello sforzo resistente del terreno di soli 20kPa circa (vedi Figura 3.19).

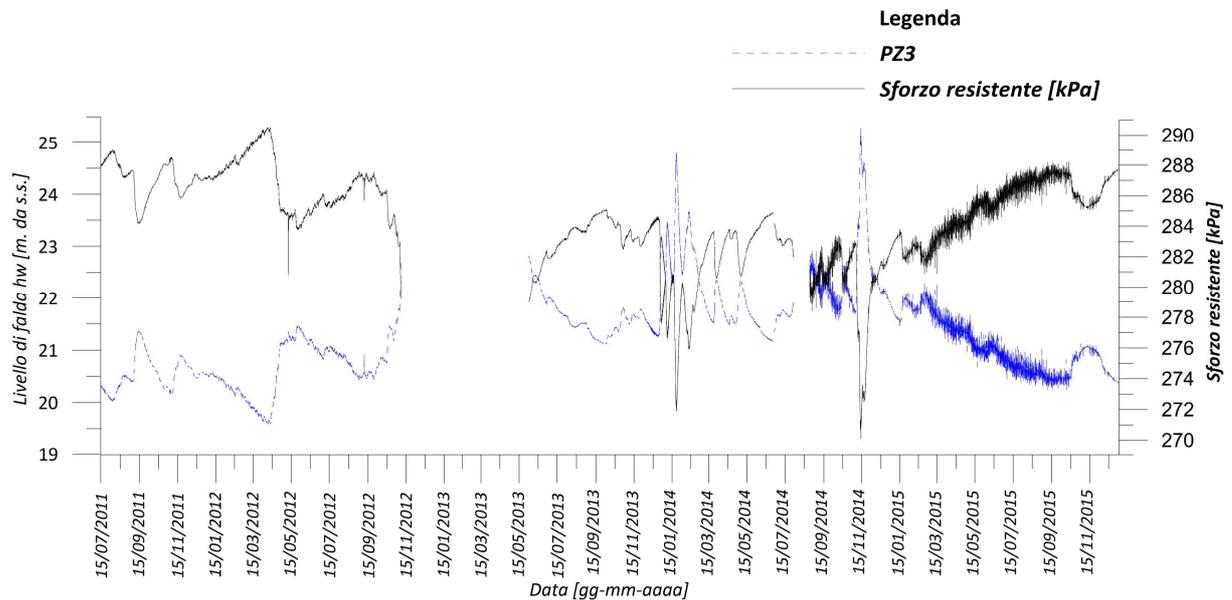


Figura 3.19 – Variazione dello sforzo resistente e del livello di falda presso PZ3 nel periodo Luglio 2011-Dicembre 2015

Data una variazione così esigua e la notevole accelerazione in occasione delle fasi con livello di falda oltre i 3m. dal livello minimo raggiunto nel periodo oggetto di studio si può confermare il delicato equilibrio che caratterizza la frana (vedi Figura 3.20) e che è ben rappresentato dal coefficiente di sicurezza poco superiore all'unità ottenuto coi modelli suddetti.

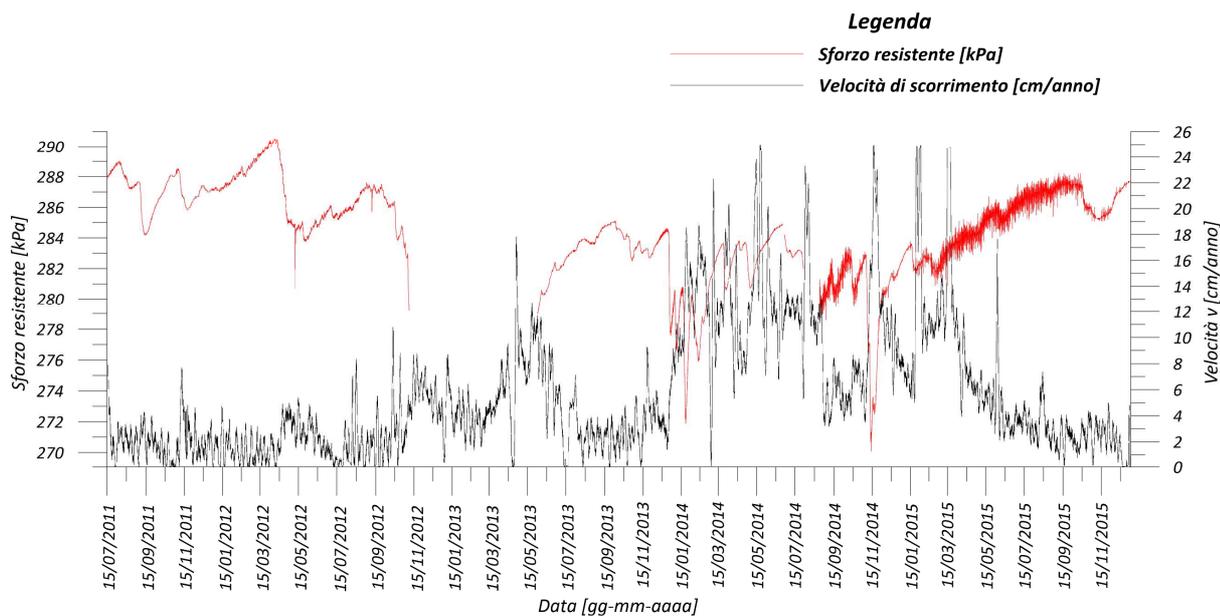


Figura 3.20 – Variazione dello sforzo resistente in funzione della velocità di scorrimento nel periodo Luglio 2011-Dicembre 2015. La velocità di scorrimento è mediata su 24 ore.

3.4-Interventi proposti per la stabilizzazione del versante

Dal 2004, su richiesta dell'amministrazione comunale di Idro, furono proposti da parte del Prof. Ing. Paolo Simonini, della Prof.ssa Ing. Simonetta Cola e del Dott. Francesco Giustacchini, vari progetti di interventi sul corpo di frana ai fini della sua stabilizzazione.

Nel Marzo 2005 venne presentato il progetto preliminare di un gruppo di pozzi drenanti profondi oltre 40 m, muniti di dreni sub-orizzontali su 2 livelli e un sistema di canalizzazione delle acque superficiali. Era prevista la realizzazione di un primo pozzo al piede nella frana, la zona considerata più critica, e la successiva realizzazione di altri 4 pozzi non appena il Comune di Idro avesse avuto la disponibilità economica (Figura 3.21). Ciò al fine di raggiungere un grado di sicurezza che, un solo pozzo non avrebbe potuto garantire. Il progetto prevedeva inoltre la canalizzazione delle acque superficiali secondo due direttrici poste ai lati della porzione centrale. Queste dovevano intercettare tutte le sorgenti che si attivano nei periodi piovosi e le acque di scorrimento superficiale che scendevano dalla porzione centrale del corpo di frana.

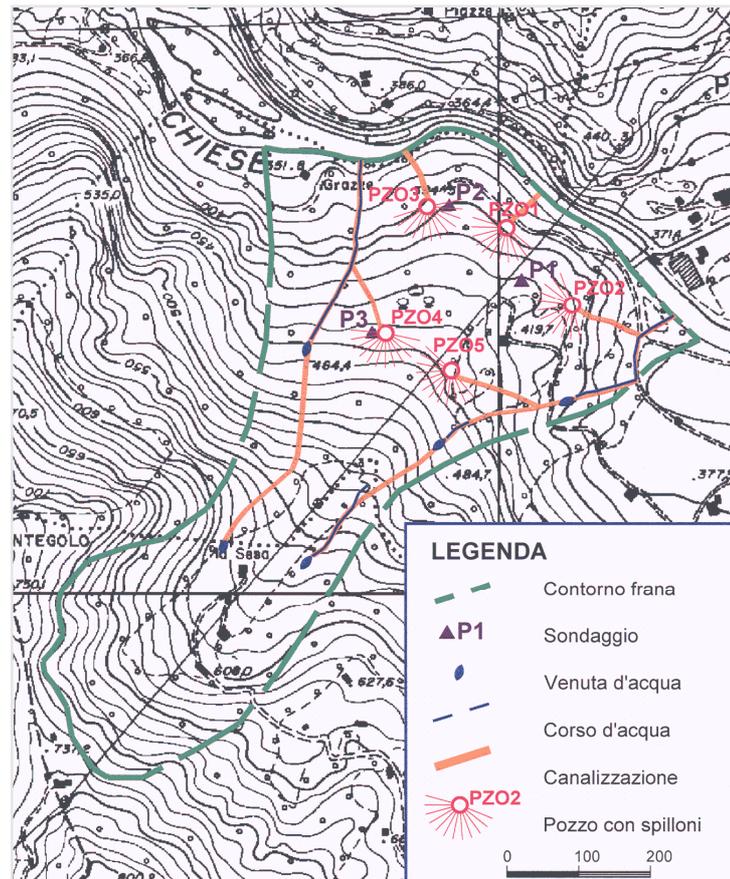


Figura 3.21 – Planimetria delle opere di sistemazione previste nel progetto preliminare (Simonini & Giustacchini, 2005)

A Dicembre 2007, sulla base dei risultati ottenuti col primo sistema di monitoraggio installato da Arpa Lombardia, fu presentato il progetto definitivo. Questo, rispetto al preliminare, collocava il pozzo prototipo (Pozzo 1) e gli altri 4 più a monte, ne manteneva la stessa profondità e aggiungeva un terzo livello a raggiera di dreni sub-orizzontali.

Il pozzo era previsto costruito con un cilindro centrale composto di anelli in calcestruzzo, all'interno del quale si doveva posizionare la scala per manutenzione delle pompe, e il riempimento dell'intercapedine tra anello e parete interna del pozzo col materiale di scavo.

Il fattore di sicurezza del pendio, con la messa in opera del solo pozzo prototipo, sarebbe aumentato da 1.03 a 1.06 e molto di più con gli altri 4 pozzi. L'obiettivo era sempre quello di avere degli interventi che potessero essere modulati nel tempo e realizzati qualora l'amministrazione comunale avesse le disponibilità economiche.

A Marzo del 2008 fu comunque presentata alla Regione Lombardia una soluzione alternativa ai 5 pozzi, altrettanto efficace ma più economica. Questa consisteva nella realizzazione di un cunicolo drenante sotto la superficie di scorrimento della frana e per questo poteva essere adottata solo se la somma necessaria fosse disponibile tutta subito.

Il cunicolo, mostrato in Figura 3.22 sovrapposto ai pozzi drenanti del progetto definitivo del 2007, sarebbe partito dal margine orientale della frana passando ad una profondità maggiore di quella raggiunta dai pozzi ed arrivando poco oltre l'asse longitudinale della frana. La lunghezza prevista era di 450m con una pendenza del 2%, tale da consentire lo smaltimento delle acque senza necessità di pompe.

Nella zona centrale della frana la quota del fondo del cunicolo sarebbe stata di 381m. s.l.m., circa 20m sotto la superficie di scorrimento rilevata nel tubo inclinometrico IN7. Per abbattere il livello di falda era prevista la realizzazione di dreni con passo di 3 m e disposti a raggiera sul settore circolare di ampiezza 45° verso monte. La lunghezza di ogni dreno doveva essere 30-50m e lo sviluppo del tratto drenante 400m.

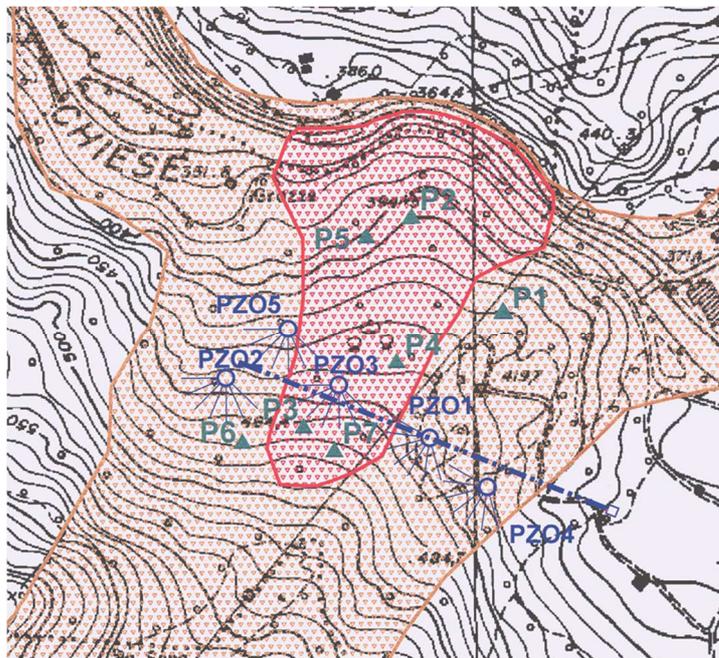


Figura 3.22 – Planimetria delle opere di sistemazione previste nel progetto definitivo (Simonini & Giustacchini, 2007) e delle opere previste dallo studio di fattibilità (Simonini & Giustacchini, 2008)

Per determinare il coefficiente di sicurezza raggiungibile con la realizzazione del cunicolo drenante si è analizzato il regime di filtrazione nel pendio conseguente alla costruzione del cunicolo alla quota di 382m. s.l.m., in posizione intermedia agli inclinometri IN3 e IN4. La pressione piezometrica a questo attribuita è nulla. La distribuzione della linea piezometrica ottenuta vede un calo del livello di falda di ben 25m sulla verticale del cunicolo e di 20m presso IN3 e IN4 (Figura 3.23).

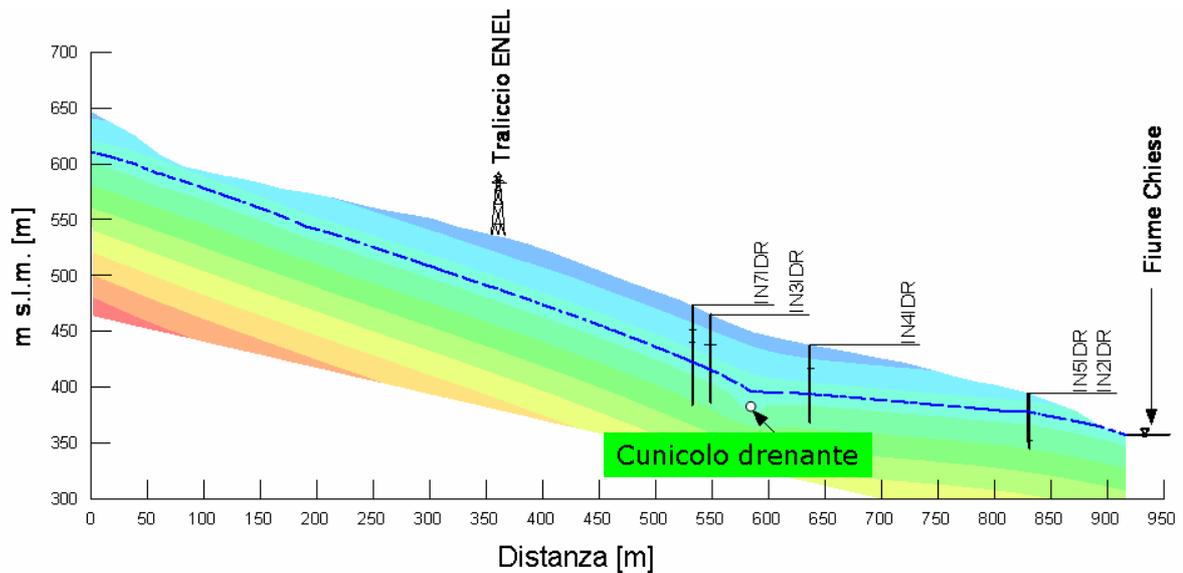


Figura 3.23 - Distribuzione della linea piezometrica in una sezione longitudinale al corpo di frana in seguito alla realizzazione del cunicolo drenante.

Inserendo i nuovi dati piezometrici nel modello per l'analisi di stabilità utilizzato precedentemente (vedi Capitolo 4.3) si è ottenuto un coefficiente di sicurezza di 1.32. Con lo stesso modello si è calcolato anche il coefficiente di sicurezza minimo del versante, ricavabile da un'analisi condotta senza imporre la porzione della linea di scivolamento. Questo è risultato essere 1.31, molto simile a quello che caratterizza la superficie di scorrimento individuata col monitoraggio.

Tali analisi sarebbero state verificate in sede progettuale, ma dimostravano la potenziale efficacia dell'intervento, dato che l'incremento del fattore di sicurezza sarebbe stato molto maggiore di quello ottenibile con la soluzione dei pozzi drenanti.

Inoltre, il costo del cunicolo sarebbe stato minore rispetto al costo del gruppo di pozzi drenanti anche se maggiore rispetto a quello del singolo pozzo prototipo.

La Regione e la Provincia non hanno tuttavia voluto considerare il progetto a causa dei costi eccessivi e hanno imposto di far eseguire solo l'intervento per la captazione e regimazione delle acque superficiali che rientrava nello stanziamento iniziale concesso al Comune di Idro. È stata quindi ripresa l'idea per un drenaggio superficiale tramite canalizzazioni presentata nel progetto preliminare. Il tracciato è stato leggermente modificato sulla base dell'andamento altimetrico del versante emerso dal rilievo LiDar da terra eseguito nell'Aprile 2009. L'obiettivo dell'intervento era intercettare le acque di tutte le sorgenti recapitandole al fiume Chiese tramite canalizzazioni senza disperderle nel terreno circostante.

Tuttavia i progettisti hanno più volte sottolineato che tale intervento non poteva garantire la messa in sicurezza del versante, ma solo una stabilità locale del versante ottenuta evitando l'erosione delle coltri superficiali da parte del ruscellamento selvaggio. Il progetto definitivo, presentato nell'Aprile 2009, prevedeva 2 cunettoni in calcestruzzo (vedi Figura 3.24) rivestiti in pietrame che scendevano sui lati nord-ovest e sud-est della frana, ripercorrendo le due direttrici di allineamento delle emergenze che si osservavano già naturalmente.

Lungo il percorso dei cunettoni era prevista la realizzazione di salti di fondo con lo scopo di rallentare la corrente di fondo e di evitare la deposizione di materiale solido agli sbocchi dei tubi delle trincee, da porre appena a valle dei salti.



Figura 3.24 – Cunettone simile a quelli previsti nel progetto definitivo (Simonini & Giustacchini, 2009)

Per captare le acque che sgorgano dalle sorgenti è stata prevista la realizzazione di trincee drenanti interrato a spina di pesce. Queste sono state concepite come scavi a sezione trapezia riempiti da sabbia medio-grossa pulita avvolta in tessuto geotessile richiuso a sacco con funzione di dreno e filtro. Nella sabbia è stata prevista la posa di una tubazione microfessurata in polietilene ad alta densità di diametro 20cm con funzione di convogliare le acque della sorgente captata fino all'interno del cunettone.

Il tessuto geotessile con all'interno la sabbia sarebbe stato ricoperto con il materiale limo-argilloso proveniente dallo scavo della trincea per proteggere la trincea dall'erosione ad opera delle acque di ruscellamento superficiale e dal rischio di intasamento con materiale fine.

La canalizzazione più lunga e con maggior apporto di acqua previsto era quella posizionata sul lato sud-est. Il suo inizio è stato posto a quota 561.5m s.l.m., in località la Sesa, con sviluppo

planimetrico di circa 750m. Questa zona, come evidenziato nel capitolo precedente, è caratterizzata dal ristagno dell'acqua uscita dalle sorgenti e dalla loro rapida infiltrazione.

Prima dello sbocco nel lago è stata prevista la realizzazione di una vasca di sedimentazione con lo scopo di raccogliere il materiale solido trasportato dall'acqua ed evitare il progressivo interrimento del tratto di fiume a monte della traversa idraulica. La canalizzazione più breve, sul lato nord-ovest, era stata collocata sul lato nord-ovest con inizio a quota 477m s.l.m.

Inoltre, per permettere l'installazione delle canalette, era stata progettata una pista di cantiere sterrata che sfruttava per 1/3 (550m) la "pista dei taglialegna", al piede della frana, utilizzata nel 2005 da INGEO s.r.l. per accedere al punto del sondaggio n.5 (per IN5) lungo il fiume Chiese. L'inizio del tratto di nuova costruzione, che porta nella zona di monte della frana, è stato posto prima della piccola frana di soil slip avvenuta nella primavera 2007 facendo franare verso valle un piccolo tratto della "pista dei taglialegna". La lunghezza totale prevista era di 1600m.

Al termine dei lavori di posa delle canalette principali è stata prevista la trasformazione della pista di cantiere in strada definitiva. Sulla parte alta della strada venne prevista la messa in opera di una canaletta per il convogliamento delle acque che, durante le precipitazioni, ruscellano sul versante e intercettano la strada. In corrispondenza dei tornanti, tramite piccole canalizzazioni in elementi prefabbricati, le acque sarebbero state recapitate alla canalizzazione perimetrale.

In corrispondenza dell'ultimo tornante è stata prevista l'immissione nella canaletta longitudinale della strada di una canalizzazione che si spinge verso nord-ovest fino alla sorgente isolata posta a quota 525m. s.l.m. Le acque provenienti da questa sorgente vengono poi convogliate alla canalizzazione principale in corrispondenza del tornante successivo. A causa della disponibilità economica insufficiente del Comune di Idro il progetto è stato diviso in 2 lotti funzionali. Il primo lotto, ad oggi l'unico realizzato, comprendeva il cunettone in calcestruzzo sul lato sud-est con relative trincee di drenaggio e la strada di cantiere con la relativa canaletta.

La priorità venne data a questa porzione di frana per via del maggior apporto idrico calcolato e per via della posizione delle sorgenti particolarmente favorevole alla reinfiltrazione delle acque nel terreno a causa del ristagno. In Figura 3.25 è illustrata la planimetria dell'area di frana con i vari interventi previsti e l'indicazione del primo lotto funzionale.

A causa della mancanza di fondi, inoltre, da quota 376m s.l.m. fino al fiume Chiese (ultimi 200m) la canaletta non è stata realizzata in calcestruzzo con rivestimento in pietrame, ma lasciato allo stato di scavo senza alcun rivestimento di protezione delle sponde e del fondo.

Non è stata realizzata nemmeno la vasca di sedimentazione.

I lavori sono stati eseguiti tra il 2010 e il 2011.

Ulteriore motivo per tale scelta è la presenza nel P.G.T. del Comune di Idro della previsione di realizzazione di uno svincolo di viabilità locale in quella zona. Si attende, quindi, la realizzazione di questo per poter, eventualmente, modificare il progetto della canaletta, della vasca e del punto di immissione nel fiume prima di realizzarli.

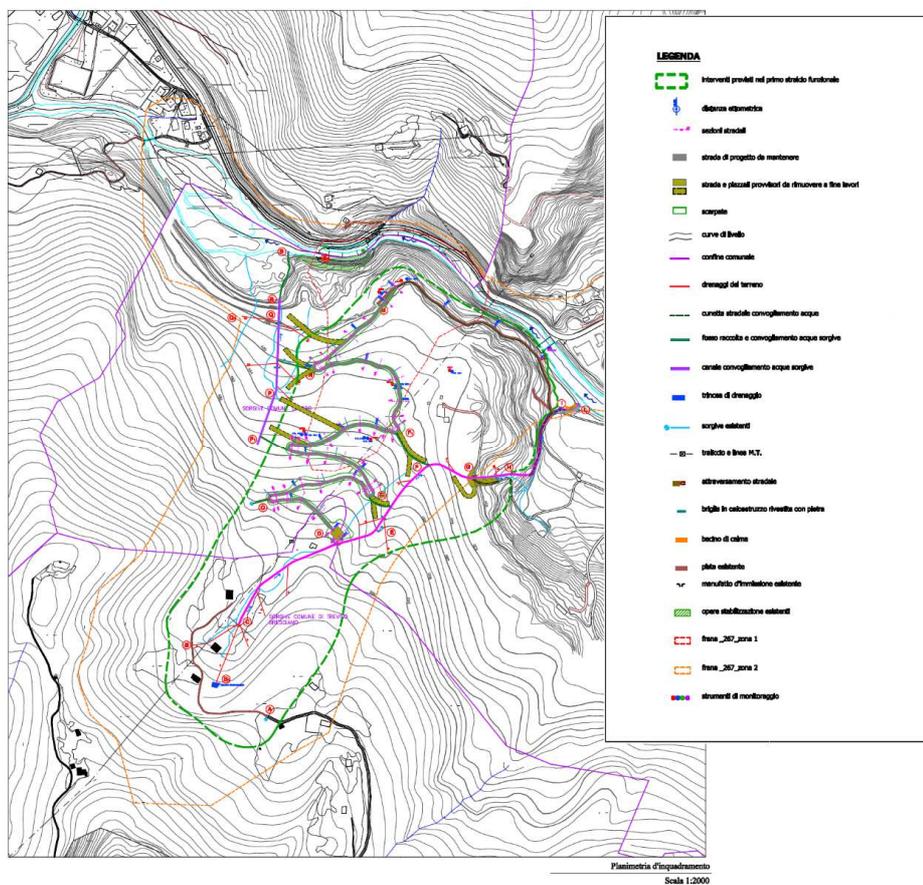


Figura 3.25 – Planimetria degli interventi per la canalizzazione delle acque superficiali. È indicato il primo lotto funzionale, realizzato nel periodo 2010-2011 (Simonini & Giustacchini, 2009)

Dall’analisi dei dati sul livello di falda, sullo spostamento e sulla velocità del corpo di frana del periodo 2011-2015, ottenuti grazie ai sensori piezometrici automatici e alla sonda inclinometrica DMR, installata nel tubo IN3-N, è stato possibile confermare che la frana non ha subito rallentamento in seguito a questo intervento. La velocità media rilevata è stata di

6cm/anno, addirittura maggiore della velocità media di 4.1cm/anno ottenuta calcolata da Manassero (2013).

Nel Luglio 2012 l'Amministrazione Comunale di Idro richiese alla Facoltà di Ingegneria dell'Università di Padova l'analisi dei dati emersi dai Rapporti di Monitoraggio redatti Arpa Lombardia e dallo studio specialistico commissionato al Prof. Ing. Manassero del Politecnico di Torino, ottenuti dal monitoraggio del periodo 2009-2012. Inoltre, venne richiesto di formulare una proposta di intervento per una efficace riduzione del rischio di frana avente caratteristiche di installazione modulare come i progetti del 2005 e del 2007.

Nel Settembre 2012 venne presentata da Prof. Ing. Paolo Simonini, Prof. Ing. Simonetta Cola, Dott. Ing. Francesco Giustacchini e Dott. Ing. Laura Brunori una "Proposta di intervento per la mitigazione del rischio".

La soluzione del cunicolo drenante è stata considerata quella in grado di abbattere maggiormente i livelli di falda, con maggior rapidità di esecuzione e la possibilità di potenziare, in fasi successive, la rete di drenaggio. Tuttavia, a causa dell'elevato impiego economico richiesto fin da subito al Comune di Idro, venne ripresa in considerazione l'ipotesi di intervento del 2005 e del 2008, costituita da elementi modulari eseguibili in diversi momenti con valori relativamente limitati dei singoli importi.

Venne riproposta la rete di pozzi con dreni a raggiera sub-orizzontali, con alcune modifiche di ottimizzazioni possibili grazie alle innovazioni recenti e alla riduzione dei costi di gestione che queste comporterebbero. Inoltre sono state previste 2 varianti.

La prima soluzione proposta è quella che vede pozzi a grande diametro con 2 livelli di dreni sub-orizzontali come nel progetto preliminare. Tuttavia le posizioni dei pozzi indicati nel vecchio progetto come PZO1 e PZO4 sono state modificate sulla base della presenza della nuova strada e dell'entità degli spostamenti ottenuta con il monitoraggio della frana. La porzione est del corpo di frana, infatti, presenta spostamenti molto più modesti della porzione ovest. Inoltre la canaletta costruita nel 2010-2011 permette di evitare l'infiltrazione profonda delle acque aumentando la stabilità locale. I 2 pozzi sopra citati, rispetto al progetto del 2008, sono quindi stati spostati verso ovest.

Inoltre, il numero totale di pozzi è stato ridotto da 5 a 4.

La novità più importante è la sostituzione delle pompe poste al fondo dei pozzi con una condotta di scarico a gravità, installabile con perforazione teleguidata.

Questa tecnica di perforazione è molto costosa e richiede una traiettoria leggermente

curvilinea, ragione per cui i pozzi sono posizioni secondo un allineamento arcuato. Tuttavia permetterebbe di evitare l'installazione delle pompe, di sistemi di sollevamento di queste per la manutenzione, dell'anello in calcestruzzo centrifugato per l'accesso al fondo pozzo tramite scale di servizio e il conferimento di grossi volumi di materiale in scavo. L'intera cavità dei pozzi sarebbe infatti riempita in parte con materiale drenante e in parte col materiale di risulta, riducendo di molto i costi e rendendo la perforazione teleguidata della condotta di scarico a gravità passante per il fondo dei pozzi la soluzione più economica.

Questa non può essere cieca e necessità di un punto di entrata nel corpo di frana e, ovviamente, di uno di uscita. Il primo è stato previsto nei pressi del pilone ENEL e il secondo nella zona occidentale del piede della frana, sul fiume Chiese.

In Figura 3.26 è illustrata la planimetria del corpo di frana con la soluzione proposta. Per permettere la modularità come nei progetti del 2005 e del 2008 è possibile lo scavo di diversi scarichi a gravità, uno per ogni pozzo o uno ogni 2 pozzi.

La seconda soluzione proposta prevede, invece, pozzi a piccolo diametro senza dreni sub-orizzontali e, quindi con minor raggio di influenza. Per questo motivo il loro numero è aumentato rispetto alla soluzione precedente. Per ottenere un effetto di drenaggio distribuito di pari efficacia sono state previste 4 linee di drenaggio, ognuna costituita da 6 pozzi. Questi sono posti a distanza ravvicinata con allineamento secondo archi curvilinei per i motivi citati nella prima soluzione.

I 4 scarichi di fondo a gravità sono stati previsti partire tutti in prossimità del traliccio ad alta tensione e del piazzale terminale della strada (540m. s.l.m. circa) e arrivare al piede del versante sul lato occidentale della strada.

In Figura 3.27 è presente la relativa planimetria.

La profondità dei pozzi ipotizzata è di 40m, come quelli a grande diametro, e dovrebbe garantire l'abbattimento del livello medio delle falde di circa 8-10m rispetto a quello attualmente osservato nei piezometri.

Lo scavo dei pozzi prevede l'inserimento diretto di una camicia di ghisa nel pozzo, contemporaneamente alla perforazione. Questo permette di stabilizzare le pareti senza l'utilizzo di fanghi bentonitici, che vanificherebbero l'azione drenante dei pozzi. La camicia viene rimossa nel momento in cui viene effettuato il riempimento, costituito da materiale drenante nella parte inferiore (20m circa) e dal materiale di risulta nella parte superiore.

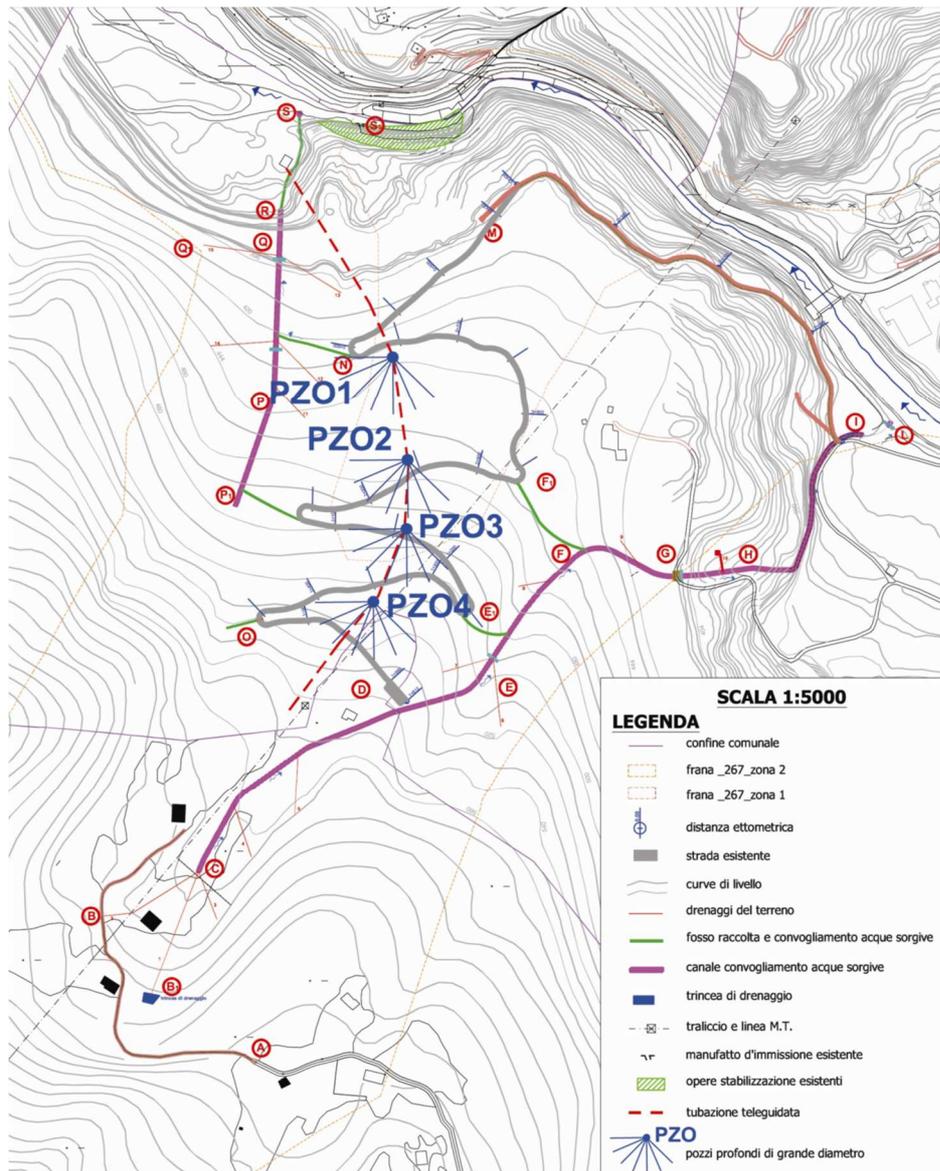


Figura 3.26 – Planimetria delle opere adottando la soluzione a pozzi di drenaggio con grande diametro.

(Simonini, Giustacchini, Brunori, Cola; 2012)

È stata ritenuta importante la realizzazione di uno di questi allineamenti come intervento pilota per valutare la sua efficienza in termini di abbattimento della falda.

Inoltre, per entrambe le soluzioni, le posizioni e le caratteristiche dei pozzi sono solo di massima e necessitano della conferma delle ipotesi fatte.

Il costo di questa seconda soluzione sarebbe minore di quello della soluzione con i classici pozzi a grande diametro.

Nella proposta di intervento che ha illustrato questi due sistemi di drenaggio è stata evidenziata anche la necessità del completamento dei lavori di drenaggio superficiale inseriti nel progetto del 2009 e con avvenuta realizzazione del solo primo lotto. Deve essere realizzata

la canalizzazione sul lato nord-ovest della frana per evitare l'erosione superficiale anche nella zona occidentale del corpo di frana.

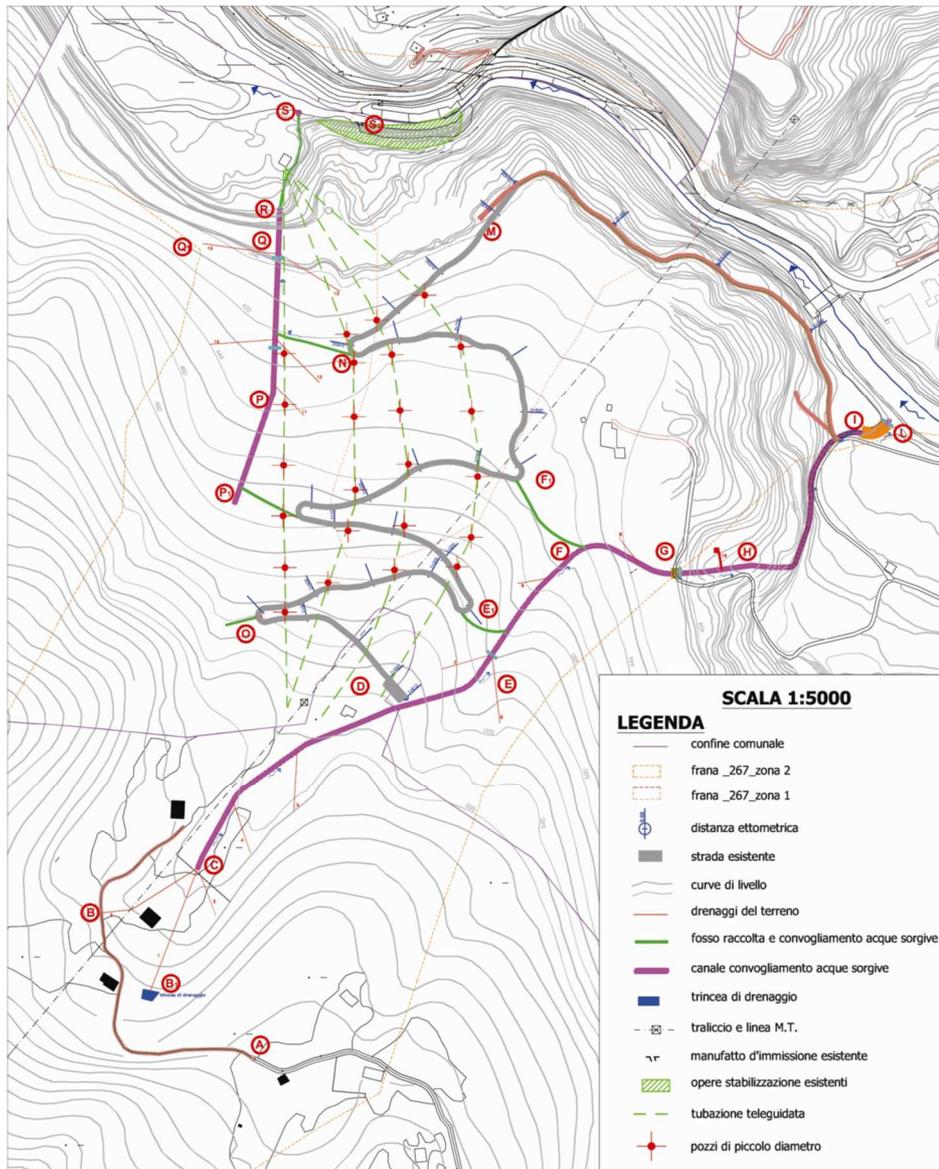


Figura 3.27 - Planimetria delle opere adottando la soluzione a pozzi di drenaggio con piccolo diametro.

(Simonini, Giustacchini, Brunori, Cola; 2012)

Viene inoltre sottolineata la necessità di intervento di manutenzione straordinaria sul muro di sponda in pietrame e calcestruzzo al piede della frana. Questo risulta, infatti, fortemente danneggiato dai movimenti indotti dalla frana (Figura 3.28 e Figura 3.29) negli ultimi anni.

La sua sistemazione non può, però, prescindere dalla realizzazione anche degli altri due interventi proposti. La sola manutenzione straordinaria del muro, a causa del continuo movimento della frana, sarebbe vanificata nel giro di pochi anni, come già accaduto.

Sono state proposte due diverse tipologie di intervento, con diverse tempistiche.

La prima necessità di lunghi tempo di esecuzione lunghi e un grande costo, prevedendo il rifacimento completo del muro. Richiederebbe l'installazione di una linea di micropali sul terrapieno a tergo del muro così da permettere il suo sostentamento nel momento in cui il vecchio muro viene smantellato.



Figura 3.28 – Muro di sponda danneggiato in posizione appena a valle della traversa idraulica.



Figura 3.29 – Dettaglio del muro di sponda con visibile una grossa crepa verticale. (Simonini, Giustacchini, Brunori, Cola; 2012)

Durante questa operazione è prevista l'applicazione progressiva di tiranti in leggera pretensione. Successivamente è prevista la ricostruzione del rivestimento esterno con pietrame a vista ammorsato nella malta cementizia.

La seconda tipologia di intervento proposta richiede tempi e costi minori, garantendo comunque ottimi risultati. Prevede un intervento di "cucitura" (Soil Nailing) delle porzioni laterali del muro, poco fratturate, al terrapieno con chiodi, agganciati alla parete esterna del muro con piastre zincate di ripartizione del carico.

Per la porzione centrale, maggiormente danneggiata, è stata invece prevista la demolizione e la ricostruzione della muratura.

Ad oggi per la stabilizzazione del versante sono state realizzate solamente la canaletta sul lato orientale della frana e a consolidazione con terre armate del versante in sinistra idrografica del fiume Chiese qualche centinaio di metri a valle del muro.

E' in fase avanzata di progetto, invece, la realizzazione di una nuova galleria di bypass sul versante settentrionale della Val Sabbia, in sostituzione della Galleria degli Agricoltori, non più utilizzabile a causa di crolli al suo interno.

La nuova galleria partirà un centinaio di m più a nord-est della attuale e sfocerà nel fiume Chiese 400m circa più a valle dell'attuale, poco prima dell'affluenza nel Chiese del torrente Abbioccolo.

Così facendo sarà possibile far defluire le acque del Lago di Idro anche nel caso del materiale della frana si riversasse nel fiume occludendo parzialmente il suo corso.

Il progetto di questa galleria, sostenuto dalla Regione Lombardia, prevede, al 2012, un costo di circa 40 milioni di Euro, cioè pari a circa 5 volte il costo delle varie soluzioni di sistemazione proposte dal Comune di Idro attraverso i suoi progettisti Prof. Simonini, ing. Giustacchini, Prof. Cola e ing. Brunori.

Capitolo 4 – Analisi dei dati del monitoraggio e di velocità

4.1 - Modalità di scelta dei dati analizzati

Nell'ambito di questo lavoro di tesi, per l'analisi quantitativa dei legami tra i livelli di falda e la velocità di spostamento della frana sono stati considerati i dati provenienti dal piezometro a tubo aperto PZ3 e dalla sonda DMS montata presso il tubo inclinometrico IN3-N.

I 2 strumenti citati sono posizionati al centro del corpo di frana, posizione ritenuta più rappresentativa, e la serie temporale di dati a disposizione va dal luglio 2011 al dicembre 2015 con poche interruzioni al suo interno. Inoltre, la sonda DMS collocata in IN3-N è l'unica a raccogliere in continuo i dati di spostamento, requisito fondamentale per una maggior precisione e per eseguire le analisi programmate.

4.2- Osservazioni generali sulla correlazione tra il livello di falda in PZ3, le precipitazioni e la velocità di scorrimento della frana

Per analizzare le modalità di risposta della falda presso il piezometro PZ3 alle precipitazioni, misurate dal pluviometro posto sulla traversa idraulica, sono state prese in considerazione le precipitazioni orarie. La scelta è motivata dalla possibilità di analizzare sia l'intensità della precipitazione nel breve termine, sia la quantità cumulata per ogni giornata. Si sono considerati quattro diversi periodi, caratterizzati da una diversa altezza del livello di falda medio: (a) i periodi con falda posta oltre 3m sopra il livello minimo assoluto, (b) i periodi con livello di falda tra 2 e 3m sopra il minimo, (c) i periodi con livello di falda tra 1 e 2m sopra il minimo e, infine, (d) i periodi con livello di falda a non più di 1m sopra.

I periodi del gruppo (d) si sono registrati nel 2011 e 2015, anni in cui sono caduti, rispettivamente, 1250mm e 800mm circa di pioggia, cioè quantitativi molto minori rispetto alla norma.

Il 2014 è stato un anno eccezionalmente piovoso, con 2200mm circa di precipitazione cumulata. Il livello di falda si è mantenuto alto anche in estate, mai caratterizzata da lunghi periodi senza precipitazioni. In questo anno il minimo e massimo livello sono stati 1.7m e 5.7m sopra il livello minimo assoluto.

Analizzando la risposta di falda alle precipitazioni si nota che la fase di salita di questa inizia molto spesso in corrispondenza di uno dei picchi di intensità che caratterizzano l'evento.

Nei periodi di tipo (d) (cioè a 19.6-20.6m sopra la superficie di scorrimento) la falda sembra rispondere sempre quando la quantità di pioggia cumulata nel singolo evento supera i 35mm circa, eccetto che in inverno quando la risposta avviene con solo 15mm circa.

Nei periodi di tipo (c) (cioè a 20.6-21.6m sopra la superficie di scorrimento) la falda sale se un evento porta più di 30mm di pioggia circa in primavera e sopra i 25mm circa in autunno.

Nei periodi di tipo (b) (cioè a 21.6m-22.6m sopra la superficie di scorrimento) il livello sale se un evento precipita oltre 20mm circa in inverno e primavera e oltre i 45mm in estate e autunno.

Nei periodi di tipo (a) (cioè oltre 22.6m sopra la superficie di scorrimento) il livello sale se la precipitazione cumulata di un evento è oltre i 35mm.

È importante sottolineare che la serie di dati a disposizione non permette di fare considerazioni sufficientemente affidabili sulla risposta del versante perché il numero di eventi piovosi è insufficiente per permettere un'analisi statistica. Inoltre, per effettuare le stime di cui sopra, è stato considerato l'evento che ha provocato una salita della falda con entità minima di precipitazioni.

La durata della fase di salita della falda varia da poco più di una volta la durata dell'evento piovoso a 3 volte la durata dello stesso. La discesa della falda avviene in un tempo da doppio a triplo rispetto a quello di salita.

La difficoltà nel definire in modo più preciso le modalità di risposta della falda e i tempi di salita e discesa sono dovute probabilmente alla disponibilità di una serie non sufficientemente lunga, ma forse anche alla presenza di un flusso di acque sotterranee proveniente dalla zona di monte esterna al corpo di frana, come già ipotizzato nei Rapporti di Monitoraggio di Arpa Lombardia. Tale flusso potrebbe essere variabile nel tempo e influenzare le modalità di risposta della falda nella posizione analizzata.

A conferma delle ipotesi iniziali, la falda risente in maniera maggiore delle precipitazioni in autunno e inverno, quando la copertura vegetale e l'insolazione sono deboli e l'infiltrazione efficace nel terreno in direzione della falda è quindi maggiore. Negli altri periodi la falda risente molto meno delle precipitazioni salvo durante i prolungati periodi di piogge intense in grado di far infiltrare una quantità d'acqua sufficiente per raggiungere un grado di saturazione che permette all'acqua di fluire verso il basso per effetto della forza di gravità (continuità dell'acqua nei pori).

Una volta considerate degli intervalli di altezza di falda di ampiezza metrica è stato calcolato il valore medio della velocità della frana al loro interno (vedi Tabella 4.1).

In Appendice 3 (Figure A3.1-A3.5) sono riportati dei grafici con l'oscillazione del livello di falda, della velocità e l'intensità oraria delle precipitazioni per ogni anno di monitoraggio e per l'intero periodo Luglio 2011 – Dicembre 2015. I grafici riportano solamente i periodi in cui sono registrati tutti i parametri citati.

Tabella 4.1 – Velocità media per intervallo di altezza di falda

Fascia di livello di falda [m. sopra il livello minimo assoluto]	Livello di falda [m sopra la superficie di scorrimento]	Velocità media [cm/anno]
0.0-1.00	19.59-20.59	1,63
1.01-2.00	20.60-21.59	4,36
2.01-3.00	21.60-22.59	9,21
3.01-4.00	22.60-22.59	12,01
>4.00	> 22.60	15,31

4.3 - Modelli più utilizzati

L'obiettivo dello studio delle frane lente è predire la loro velocità e il loro spostamento in base allo sforzo mobilizzato. Quest'ultimo è dipende dal peso dal terreno presente sopra la superficie di scorrimento, influenzato dalla litologia e dal livello di falda. Questo varia col tempo e, nel caso di un terreno con una buona permeabilità, è direttamente correlato con le precipitazioni.

Di seguito saranno esaminati vari modelli trovati in bibliografia che calcolano la velocità e lo spostamento cumulato di una frana dati il livello di falda, dei parametri geotecnici del terreno e dei coefficienti di calibrazione.

È stato visto anche il lavoro di Conte et al. (2016), che hanno proposto un modello che correla direttamente le precipitazioni con la velocità e lo spostamento.

Per ottenere la soluzione questi modelli richiedono diversi dati geotecnici caratteristici della shear zone e del corpo di frana e solo alcuni di questi dati possono essere determinati sperimentalmente con un buon indice di affidabilità. Esistono modelli complessi che richiedono un gran numero di dati, spesso non disponibili direttamente a causa della poca precisione degli strumenti di monitoraggio o della difficoltà di raccogliere campioni rappresentativi per le prove di laboratorio. Alcuni parametri vengono determinati con processi di calibrazione basandosi sui dati di velocità, spostamento e livello di falda rilevati nel tempo

dagli inclinometri e piezometri installati per il monitoraggio.

I modelli semplificati prendono in considerazione meno parametri, quasi tutti facilmente determinabili in sito o in laboratorio.

Questi ultimi sono quindi più facilmente e velocemente applicabili rispetto a quelli complessi. Un'altra ipotesi semplificativa comunemente adottata nei modelli è il considerare il corpo di frana come un blocco rigido, che subisce deformazioni interne molto limitate e che scorre lungo un piano inclinato parallelo alla superficie del versante (schema di pendio indefinito) e con spostamenti concentrati in una banda di taglio spessa qualche decina di centimetri. Tale schematizzazione è valida per quasi tutte le frane lente attive da lungo tempo e che hanno già maturato elevati spostamenti.

4.3.1 - Sforzi agenti e equazioni di velocità considerate dai modelli

Tutti i modelli che correlano l'altezza del livello di falda con la velocità di scorrimento si basano sulla determinazione della velocità di scorrimento tramite l'equilibrio degli sforzi agenti, tenendo conto della resistenza data dalla viscosità, come descritto da Angeli et al. (1996) e Corominas et al. (2005).

Gli sforzi in gioco sono:

- lo sforzo di taglio resistente del terreno:

$$\tau_r = c + N' \tan \phi'_{res} = c + (\sigma - p_w) \tan \phi'_{res}$$

(1)

dove:

c: coesione

N': sforzo efficace agente sulla superficie di scorrimento

ϕ'_{res} : angolo di resistenza al taglio residuo

$\sigma = \gamma h \cos^2 \alpha$: sforzo totale

$p_w = \gamma_w h_w \cos^2 \alpha$: pressione interstiziale

γ_w : peso di volume dell'acqua

γ : peso di volume del terreno

h: spessore del corpo di frana

h_w : altezza della falda sopra la superficie di scorrimento

α : inclinazione della superficie da scorrimento

- lo sforzo di taglio mobilizzato:

$$\tau_g = \gamma h \sin \alpha \cos \alpha \quad (2)$$

- la resistenza viscosa:

$$\tau_v = \eta \cdot \frac{v}{z}$$

- (3)

dove

η : coefficiente di viscosità

v: velocità di scorrimento della frana

z: spessore della banda di taglio (shear zone)

Se la velocità è costante l'equazione di moto è:

$$\tau_g - \tau_r - \tau_v = ma = 0 \quad (4)$$

$$\text{e, quindi, } \tau_v = \tau_g - \tau_r \quad (5)$$

dove

m: massa totale della frana

a: accelerazione della frana

La velocità di scorrimento è, quindi, definibile secondo la legge di Bingham:

$$v = z \frac{\tau_v}{\eta} = \frac{\tau_g - \tau_r}{\eta_d} \quad (6)$$

Dove:

η_d : viscosità dinamica

oppure secondo Vulliet e Hutter (1988), come evidenziato anche da molti altri autori con test di laboratorio e in sito, come:

$$v = \frac{\tau_v^b}{\eta_0} = \frac{(\tau - \tau_0)^b}{\eta_0} \quad (7)$$

Dove:

b: esponente di potenza

η_0 : coefficiente di viscosità intrinseca.

4.3.2 – Modello con pendio indefinito e un ostacolo al piede

Il modello proposto da Puzrin & Schmid (2012), come gli altri modelli, adotta lo schema geometrico di un pendio indefinito, tuttavia presuppone un ostacolo al piede della frana che vincola lo scorrimento del materiale lungo la superficie di rottura. Presuppone che il corpo di frana prima di incontrare l'ostacolo abbia accumulato uno spostamento significativo sopra la superficie di rottura e, quindi, si trovi in condizioni di resistenza residua. In questo modo può

assumere la velocità della frana come costante prima di incontrare l'ostacolo al piede. Se le tensioni all'interno della frana, al contatto con l'ostacolo, oltrepassano la spinta passiva P_p massima che il terreno può esercitare senza spostare l'ostacolo la frana ricomincia a muoversi. La velocità dopo il cedimento dell'ostacolo sarà costante, ma minore della velocità iniziale prima di incontrarlo.

I parametri noti sono c' , φ' , γ , α , h , h_w , di cui l'altezza di falda h_w è l'unico variabile nel tempo. Oltre a questi, ai fini della stima di spinta attiva e spinta passiva, prevede la determinazione della lunghezza longitudinale della superficie di scorrimento (L) e la determinazione dell'altezza media di falda sulla sezione di testa e sulla sezione di base del corpo di frana (rispettivamente h_t e h_b).

Data la tipologia di modellizzazione la frana è assunta avere caratteristiche geotecniche e velocità uniformi.

Il comportamento del corpo di frana è considerato di tipo visco-plastico, caratterizzato da una resistenza al taglio in condizioni residue:

$$\tau^* = \tau_r + \eta v \quad (8)$$

dove:

τ^* : resistenza al taglio totale

La frana ricomincia a muoversi, dopo un periodo di stabilizzazione apparente, se viene superata la spinta passiva P_p mobilitabile dal terreno e, quindi, se il coefficiente di sicurezza F.S. diventa minore di 1:

$$F. S. = \frac{P_p}{P_0 + (\tau_g - \tau_r)L} = \frac{P_p}{P_0 + \{\gamma h s \sin \alpha - [(\gamma h - \gamma_w h_w) \cos \alpha \tan \phi_{res}]\}L} \quad (9)$$

Dove:

P_0 : Spinta agente su tutte le sezioni del corpo frana prima della stabilizzazione.

P_p : Spinta passiva, opposta dall'ostacolo alla spinta P_0

La velocità v con la quale la frana ricomincerà a muoversi dopo l'apparente stabilizzazione sarà minore della velocità iniziale, che la caratterizzava prima di questa.

A partire dall'equazione di equilibrio:

$$P_p - P_0 = (\tau^* - \tau_g)L = (\tau_r + \eta v - \tau_g)L \quad (10)$$

si ha:

$$v = \frac{1}{\eta} \cdot \left[\tau_g - \tau_r - \left(\frac{P_p - P_0}{L} \right) \right] \quad (11)$$

Il parametro che si ottiene tramite calibrazione è la viscosità η , mediante la formula inversa:

$$\eta = \frac{1}{v_{media}} \cdot \left[\tau_g - \tau_r - \left(\frac{P_p - P_0}{L} \right) \right] \quad (12)$$

dove:

v_{media} : velocità media di scorrimento.

La spinta P_0 agente nella fase precedente la stabilizzazione è stata assunta uguale alla spinta attiva P_a agente sulla sezione di testa e calcolata in questo modo:

$$P_0 = P_a = \frac{1}{2} \cdot (\gamma h_t^2 - \gamma_w h_{wt}^2) \cdot K_a = \frac{1}{2} \cdot (\gamma h_t^2 - \gamma_w h_{wt}^2) \cdot \left\{ \cos \alpha \cdot \left[1 + 2 \tan^2 \phi_p - 2 \cdot \sqrt{(1 + \tan^2 \phi_p) \cdot (\tan^2 \phi_p - \tan^2 \alpha)} \right] \right\} \quad (13)$$

dove:

h_t : profondità della superficie di scorrimento presso la sezione di testa

h_{wt} : altezza di falda sopra la superficie di scorrimento presso la sezione di testa

K_a : coefficiente di spinta attiva, secondo l'equazione elaborata da Puzrin & Sterba (2006).

La spinta passiva agente sulla sezione a ridosso dell'ostacolo é:

$$P_p = \frac{1}{2} \cdot (\gamma h_b^2 - \gamma_w h_{wb}^2) \cdot K_p = \frac{1}{2} \cdot (\gamma h_b^2 - \gamma_w h_{wb}^2) \cdot \left\{ \cos \alpha \cdot \left[1 + 2 \tan^2 \phi_p + 2 \cdot \sqrt{(1 + \tan^2 \phi_p) \cdot (\tan^2 \phi_p - \tan^2 \alpha)} \right] \right\} \quad (14)$$

dove:

h_b : profondità della superficie di scorrimento presso la sezione di base

h_{wb} : altezza di falda sopra la superficie di scorrimento presso la sezione di base

K_p : coefficiente di spinta passiva, secondo l'equazione elaborata da Puzrin & Sterba (2006).

4.3.3 – Modelli che considerano un pendio indefinito

Angeli et al. (1996), Cola et al. (2016), Corominas et al. (2005) e Ranalli et al. (2010) hanno ripreso le equazioni (6) e (7), ricavando τ_v e reinserendole in:

$$\tau_g - \tau_r - \tau_v = m \alpha \quad (15)$$

Cola et al. (2016) hanno utilizzato l'equazione (7) (Vulliet & Hutter); Angeli et al. (1996), Corominas et al. (2005), Ranalli et al. (2010) hanno utilizzato l'equazione (6) (Bingham).

Corominas et al. (2005) per predire la velocità e lo spostamento cumulato della frana oggetto dello studio parallelamente al modello di Bingham ha utilizzato anche un modello simile, basato su una legge di potenza simile come struttura a quella del modello consigliato da Vulliet

et al. (1988). I risultati ottenuti con i 2 modelli sono molto simili tra loro e vicini ai dati osservati col monitoraggio. I parametri ottenuti tramite calibrazione sono η_d e x , esponente della legge di potenza. I parametri fissi, ottenuti dai test in sito e in laboratorio, sono c' , φ' , γ , α e D . Ranalli et al. (2010) ha utilizzato la legge di Bingham, considerando però più intervalli di tempo differenti all'interno del periodo di monitoraggio. All'interno di ognuno di questi intervalli di tempo considerati i parametri β_0 , v_0 , φ_0' e C , da calibrare, assumono valori differenti. β_0 , dipendente da γ_w , γ_{sat} (peso di volume del terreno saturo), d e D , rappresenta un valore di soglia che governa il movimento o meno della frana in base al valore assunto da β . v_0 è la velocità della frana all'inizio dell'intervallo considerato. φ_0' è l'angolo di resistenza al taglio residua, in questo modello non derivata da prove di laboratorio. C è il coefficiente di viscosità dinamica, assunto come costante in tutti gli intervalli di tempo considerati a differenza degli altri parametri. Anche α , come in tutti i modelli considerati, è considerata costante.

Angeli et al. (1996) considerarono pochi parametri: c' , φ' , γ , α e D come costanti, facilmente determinabili in sito e in laboratorio, e η_d come valore da determinare tramite tentativi (trial & error). Inoltre, per ottenere migliori risultati, nel modello sono state incluse due soglie di pressione neutra. Sotto la inferiore il movimento si interrompe, sopra la superiore la frana si riattiva.

Van Asch et al. (2007) hanno utilizzato per studiare la relazione velocità-spostamento che caratterizza la frana di La Valette l'equazione (6). z e $\tau - \tau_0$ sono stati considerati come parametri determinabili direttamente dai dati di monitoraggio e dalle prove di laboratorio (nel caso di z), mentre b e η_0 sono stati calibrati tramite back-analysis, basandosi sui dati osservati o ottenuti da test di taglio diretto. I dati ottenuti da back-analysis sono stati ritenuti più affidabili. Nel caso in esame gli autori hanno notato come i parametri b e η_0 siano diversi per le fasi di salita e di discesa della falda a causa della velocità e accelerazione maggiori nelle fasi di salita. Attribuiscono tale differenza al verificarsi di condizioni non drenate durante il fenomeno di scivolamento.

Il modello elaborato da Cola et al. (2016) per ottenere la velocità di spostamento utilizza l'equazione (7) (Vulliet & Hutter). I parametri c' , φ' , γ , α , h e h_w , altezza della falda, sono noti e, eccetto h_w , costanti. La viscosità dinamica η_d e il coefficiente della legge di potenza b sono invece non determinabili direttamente. Per ottenerli il modello sfrutta i dati di velocità raccolti col monitoraggio nell'arco di qualche anno e le proprietà dei logaritmi. Inserendo l'equazione (7) nell'equazione (15) si ottiene:

$$\gamma h \sin \alpha \cos \alpha - c' + \gamma h \cos^2 \alpha \tan \phi_{res} - \gamma_w h_w \cos^2 \alpha \tan \phi_{res} - (\eta_0 v)^{\frac{1}{b}} = \frac{\gamma h a}{g}$$

e, quindi:

$$v = \eta_0 \cdot (\gamma h \sin \alpha \cos \alpha - c' + \gamma h \cos^2 \alpha \tan \phi_{res} - \gamma_w h_w \cos^2 \alpha \tan \phi')^b \quad (16)$$

Applicando i logaritmi in base 10 a entrambi i termini si ottiene:

$$\log v = \log \eta_0 + b \cdot \log(\gamma h \sin \alpha \cos \alpha - c' + \gamma h \cos^2 \alpha \tan \phi_{res} - \gamma_w h_w \cos^2 \alpha \tan \phi') \quad (17)$$

In questa equazione gli unici due termini non costanti sono la velocità v e l'altezza di falda h .

Può quindi essere ridotta nella forma:

$$Y' = q + bX' \quad (18)$$

dove Y' è il logaritmo della velocità v , X' il logaritmo dell'altezza falda h_w , q il logaritmo della viscosità intrinseca e b il coefficiente della legge di potenza.

Questa equazione rappresenta una retta, con intercetta sull'asse X' q e coefficiente angolare b .

I dati di velocità e altezza della falda relativi a varie fasi di salita e di discesa della falda ottenuti dal monitoraggio vengono quindi inseriti in un grafico $\log v$ - $\log h$, da cui si ricavano i coefficienti η_0 e b .

Analogamente a quanto osservato da Van Asch et al.(2007), nel caso della frana del Tessina, si osserva che non esiste un'unica retta in grado di interpolare i vari dati v - h presenti. È necessario creare varie rette di interpolazione sia per le fasi di salita che per le fasi di discesa, ma si è osservato che queste possono essere classificate in 3 famiglie, indicate come a , b e c , all'interno delle quali le rette di interpolazione hanno tutte la stessa orientazione e sono, quindi, parallele tra loro. Inoltre, sono individuate tre soglie che caratterizzano un diverso comportamento delle fasi di salita e discesa, chiamate F3, F2 e F1.

La soglia F3 segna la transizione dai segmenti della famiglia c alle rette della famiglia b . Se durante la fase di salita questa non viene superata i punti appartenenti alla fase di discesa ricadono lungo lo stesso segmento di tipo b della fase di salita.

Se, invece, durante la fase di salita viene superata i punti della fase di discesa seguono inizialmente un segmento di tipo c , comportando un momentaneo aumento della velocità di

scorrimento. Successivamente, intercettata la soglia F3 i punti si allineano su di un segmento di tipo b parallelo a quello della fase di salita, ma sopra di esso.

La soglia F2, analogamente, segna la transizione dai segmenti di tipo b ai segmenti di tipo a nella fase di discesa, seguendo un comportamento identico a quello descritto per la soglia F3.

La soglia F1 segna il passaggio dalla famiglia di segmenti di tipo a quella di segmenti di tipo b nella fase di salita.

A differenza di quanto osservato da Van Asch et al.(2007) applicando il modello alla frana di La Valette, nel caso della frana del Tessina la velocità nella fase di discesa risulta uguale o maggiore della velocità nella fase di salita. Questo è probabilmente dovuto ad un avvallamento a monte lungo la superficie di scorrimento che accumula.

Il problema dell'allineamento dei punti relativi alla velocità e all'altezza di falda durante le fasi di salita e discesa di quest'ultima sono causati, come evidenziato sia da Van Asch et al. (2007) che da Cola et al. (2016), molto probabilmente legato alla semplificazione della geometria della frana ad un pendio indefinito, con inclinazione della superficie di falda, spessore del corpo di frana e peso di volume del terreno costanti.

Si può notare come Van Asch et al. (2007) abbiano utilizzato solamente l'equazione (6) senza inserirla nell'equazione di moto (15) a differenza degli altri autori.

Questi, infatti, inseriscono l'equazione di velocità (6) o (7) all'interno dell'equazione (15) e calibrano i coefficienti sull'intero intervallo di tempo dei dati a disposizione (Puzrin & Schmid, 2012; Corominas et al., 2005; Angeli et al., 1996) o su più piccoli intervalli distinti (Ranalli et al., 2010; Cola et al., 2016).

4.4 - Risorse a disposizione e parametri geotecnici adottati per la modellazione

I dati di monitoraggio con acquisizione continua che Arpa Lombardia ha fornito per questo lavoro sono quelli raccolti dai sensori piezometrici automatici posti nei tubi piezometrici PZ3, PZ4a, PZ4b, PZ6b, PZ7a, PZ7b, PZ9a, PZ9b, PZ10a, PZ10b, P11a e PZ11b (vedi Tabella 4.1); dalla sonda inclinometrica modulare (DMS) con acquisizione automatica dei dati posta nel tubo inclinometrico IN3-N e dalle sonde inclinometriche installate nei tubi inclinometrici IN9, IN10 e IN11 (vedi Tabella 4.2). Inoltre, sono a disposizione le misure piezometriche e termometriche ottenute dalla stazione meteorologica installata sulla traversa idraulica.

Le misure piezometriche sono riferite a periodi di tempo variabili all'interno del quinquennio 2011-2015, coperto quasi interamente solamente dal sensore piezometrico posto nel tubo piezometrico aperto PZ3.

Le misure inclinometriche della sonda DMS coprono l'intero periodo Luglio 2011 (data di installazione)-Dicembre 2015.

Le misure inclinometriche raccolte dalle sonde fisse coprono il periodo Agosto 2012-Dicembre 2014.

I dati pluviometrici e termometrici appartengono al periodo 2010-2015.

Si sceglie di applicare i modelli di calcolo avendo come base per la loro calibrazione una serie di dati il più lunga possibile raccolti nello stesso periodo di tempo e presso la stessa posizione. Inoltre, è selezionata una posizione del corpo di frana all'interno della zona a rischio idrogeologico di livello 2, il massimo attribuito alla frana di Idro.

I dati utilizzati sono quelli ottenuti dal sensore piezometrico presso il tubo PZ3 e dalla sonda inclinometrica multiparametrica DMS montata presso il tubo inclinometrico IN3-N; oltre che i dati pluviometrici.

Entrambi coprono il periodo Luglio 2011-Dicembre 2015.

Il dato di velocità di scorrimento della frana è derivato dai dati di spostamento misurati dal modulo n.4 della sonda DMS, posto alla profondità della superficie di scorrimento.

I dati di spostamento grezzi presentano oscillazioni fino a ± 0.2 mm molto frequenti e qualche aumento o diminuzione istantanea di più di 1mm.

Si ritiene perciò necessario filtrare i dati tramite MatLab.

Prima di eseguire il filtraggio dei dati, sono manualmente eliminati gli sbalzi istantanei di spostamento più rilevanti sommando o sottraendo il valore assoluto dello sbalzo, rispettivamente, negativo o positivo a tutti i dati seguenti il verificarsi di questo (vedi Figura 4.1).

Successivamente il filtraggio è eseguito su tutta la serie di dati di spostamento a disposizione eseguendo un algoritmo implementato in linguaggio MatLab (vedi Figura A3.6 in Appendice 3). Questo individua la presenza di oscillazioni del dato caratterizzate da una frequenza costante, attribuibili alla sensibilità dello strumento di misura, e le elimina.

Il filtraggio rende il dato di spostamento più regolare pur mantenendo l'andamento generale analogo a quello del dato grezzo, come mostrato in Figura 4.2.

Lo spostamento cumulato filtrato presenta, tuttavia, tratti in diminuzione della durata di qualche giorno. Questo comportamento è attribuibile ad oscillazioni periodiche del dato misurato causate da errori sistematici che il filtraggio non ha permesso di eliminare.

La velocità viene calcolata su intervalli di 1h, 3h, 5h, 6h, 12h, 24h, 48h, 72h, 7gg, 14gg e 30gg. I periodi più rappresentativi tra quelli utilizzati per il calcolo sono stimati essere 1h, 6h, 24h, 48h e 7gg.

Come visibile in Figura 4.3 e Figura 4.4 le velocità calcolate sullo spostamento filtrato presentano oscillazioni molto meno accentuate di quelle calcolate sullo spostamento non filtrato.

La velocità mediata su 1h, 6h presenta, tuttavia, ancora oscillazioni notevoli, tali da non permettere l'applicazione dei modelli.

La velocità mediata sulle 24h coglie meglio l'andamento generale e presenta i cambi di pendenza ad istanti di tempo analoghi a quelli delle velocità mediate su intervalli più brevi.

La velocità mediata sui 7gg è molto più costante delle altre e permette solamente di determinare la velocità media della frana nel lungo termine in quanto non coglie i picchi di velocità massima e minima.

Nell'applicazione dei modelli la velocità presa come riferimento è quella mediata sulle 24 ore.

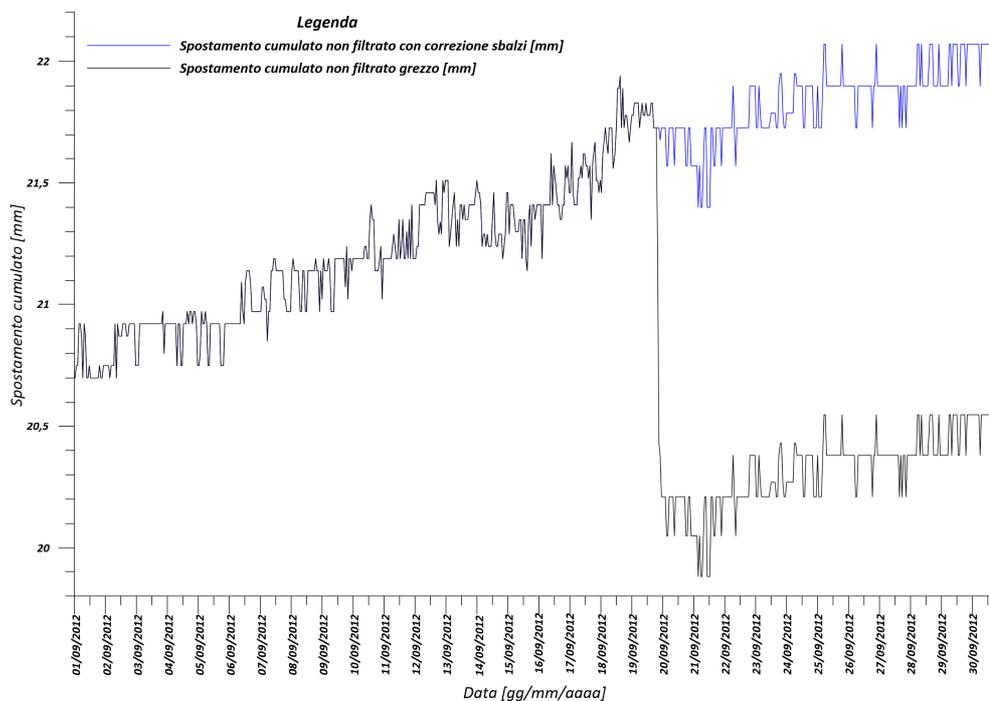


Figura 4.1 – Andamento dello spostamento cumulato grezzo senza e con la correzione degli sbalzi istantanei in un periodo campione di 30 giorni.

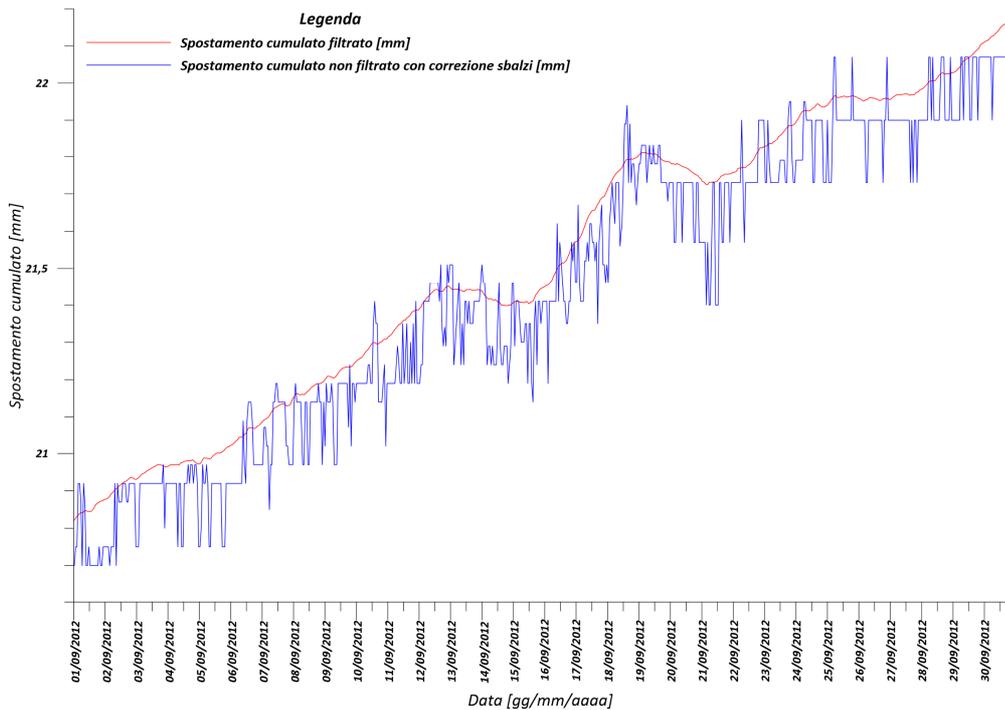


Figura 4.2 – Andamento dello spostamento cumulato grezzo con la correzione degli sbalzi istantanei e dello spostamento cumulato filtrato in un periodo campione di 30 giorni

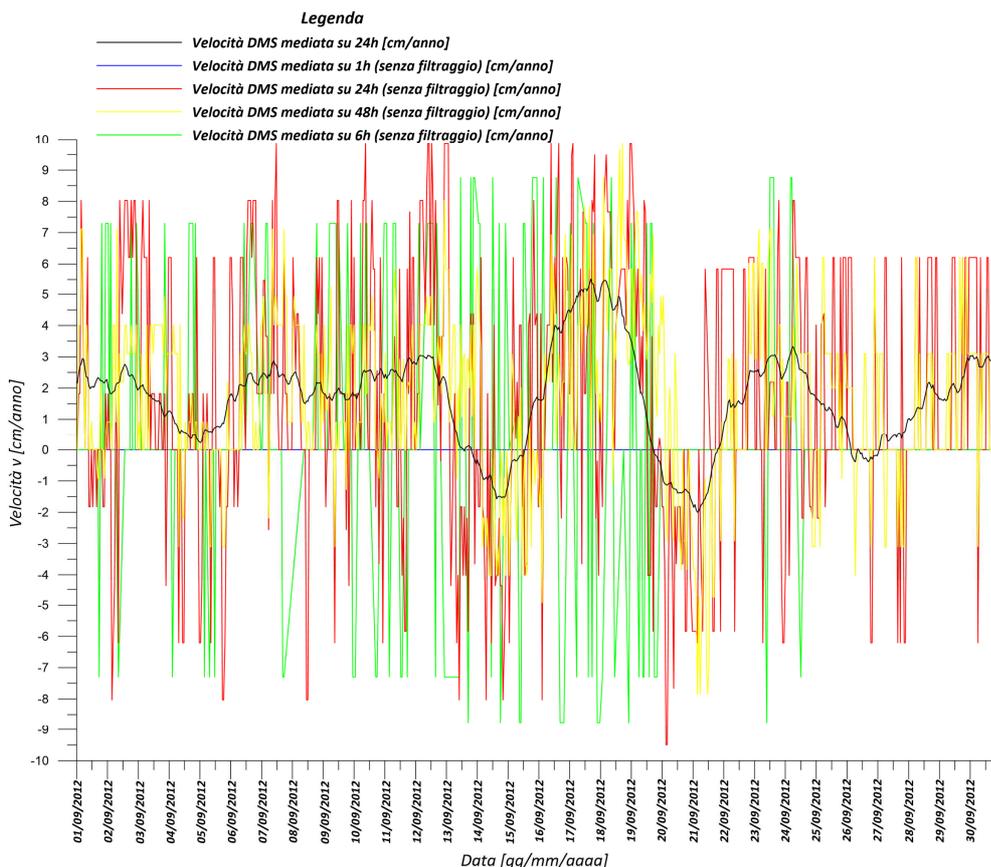


Figura 4.3 – Andamento della velocità mediata su vari intervalli temporali a partire dai dati di spostamento cumulato grezzo con correzione degli sbalzi istantanei in un periodo campione di 30 giorni. I dati di velocità mediati sugli intervalli temporali di 1h e 6h presentano valori massimi e minimi di circa ± 200 cm/anno e sono qui eliminati per poter utilizzare la scala dell'asse verticale qui scelta, maggiormente rappresentativa dell'andamento generale. Viene sovrapposto la velocità mediata su 24h derivata dallo spostamento filtrato.

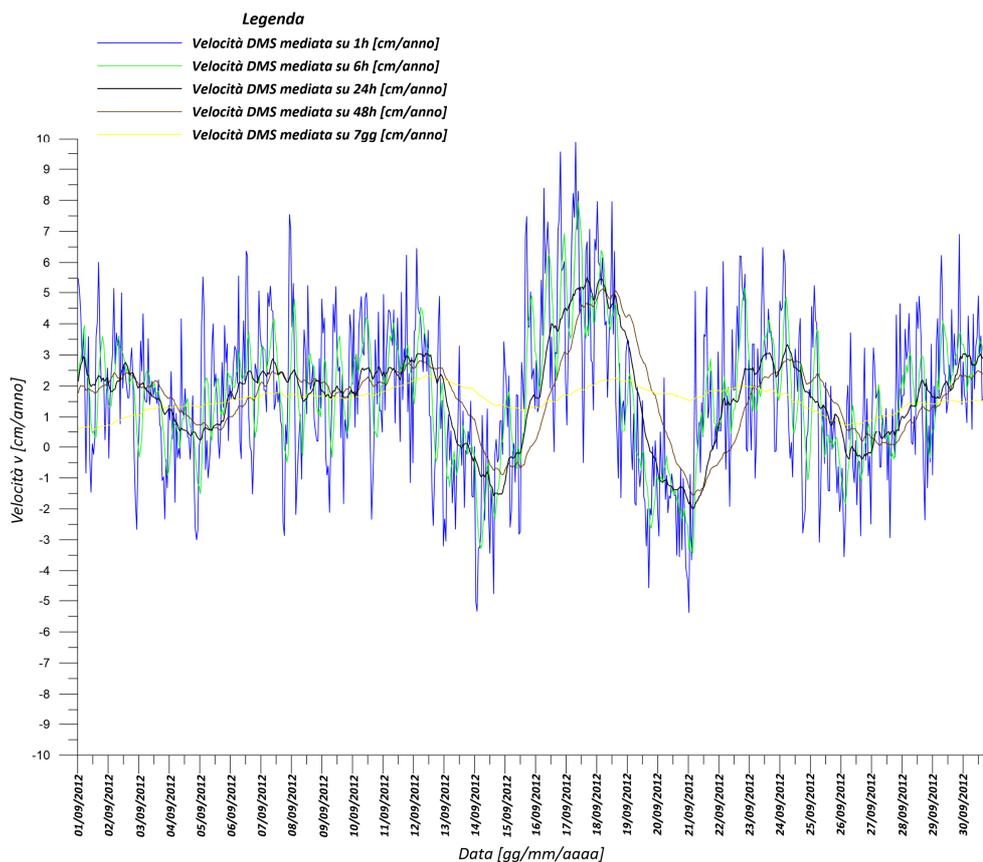


Figura 4.4 – Andamento della velocità mediata su vari intervalli temporali a partire dai dati di spostamento cumulato filtrato con correzione degli sbalzi istantanei in un periodo campione di 30 giorni.

4.5 - Applicazione del modello di Vulliet & Hutter con calibrazione differenziata alla frana di Idro

Avendo a disposizione i dati di spostamento, altezza di falda e pluviometrici per un lungo periodo di tempo si analizzano questi parallelamente.

L'obiettivo è calibrare i parametri η e b del modello in oggetto su delle fasi di salita o discesa della falda ben distinguibili e sulla velocità di scorrimento tenuta durante queste fasi.

Sulla base dei risultati esposti nel capitolo 3.2, l'angolo di resistenza al taglio in condizioni residue da inserire nei modelli di previsione della velocità di scorrimento è stato assunto uguale a 21° . Questa scelta è motivata dal fatto che la velocità media della frana è di poche decine di millimetri all'anno e, di conseguenza, è condivisibile la scelta di ridurre di 2° dell'angolo di resistenza misurato con le prove di taglio anulare a velocità maggiori, come fatto anche da Manassero (2013).

La coesione, essendo la frana in condizioni di resistenza residua, è nulla.

Il peso di volume umido è stato scelto pari a 19kN/m^3 , valore medio misurato nelle prove in laboratorio. Il peso di volume dell'acqua è 9.81kN/m^3 .

Lo spessore del corpo di frana presso l'inclinometro IN3-N è stato posto a 52m, come dimostrato sia dalle campagne inclinometriche manuale effettuate nel vicino IN3, sia dai dati di spostamento rilevati nel tempo dalla sonda DMS inserita nel tubo inclinometrico IN3-N. L'angolo di inclinazione del piano di scorrimento presso il tubo inclinometrico IN3 è stato posto a 18°, sulla base della sezione creata da Manassero (2013), visibile in Figura 4.5. I dati qui sopra esposti sono ricapitolati in Tabella 4.2

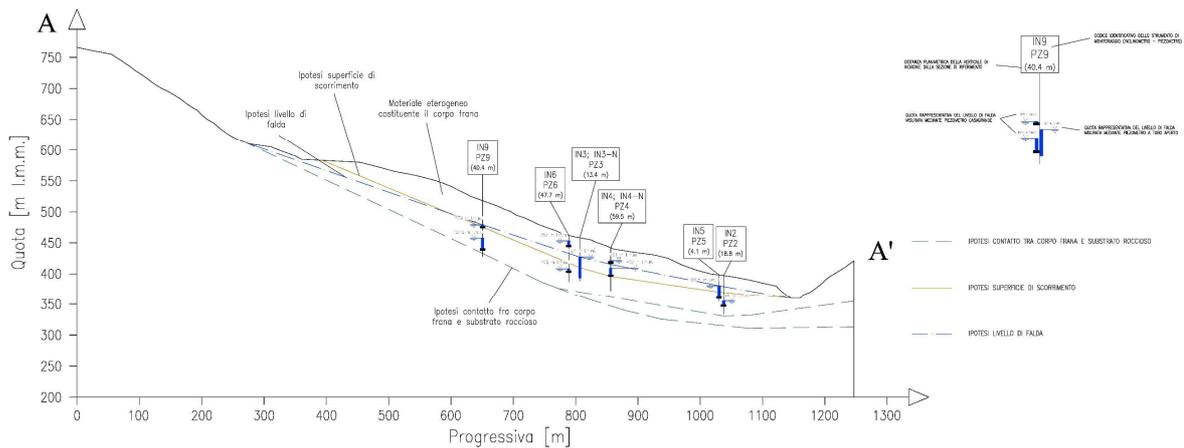


Figura 4.5 - Sezione longitudinale utilizzata da Manassero(2013) per l'analisi di stabilità

Tabella 4.2 – Parametri geotecnici utilizzati per il calcolo della velocità di scorrimento tramite i modelli scelti

Parametro	Simbolo	Valore
Angolo di resistenza al taglio in condizioni residue	Φ_{res} [°]	21
Peso di volume umido del terreno	γ [kN/m ³]	19
Peso di volume dell'acqua	γ_w [kN/m ³]	9,81
Coesione	c' [kPa]	0
Spessore massa	h [m]	52
Inclinazione piano scivolamento	α [°]	18

La velocità di scorrimento è stata ottenuta a partire dallo spostamento, rilevato dalla sonda inclinometrica multiparametrica DMS ogni 60 minuti. Come ricordato nel capitolo 4.1, la sonda è costituita da moduli della lunghezza di 1m ciascuno che rilevano lo spostamento della porzione di tubo inclinometrico in cui è posizionato. Il tratto monitorato dai moduli è stato selezionato con il fine di includere le zone di maggior deformazione individuate con le misure inclinometriche manuali, effettuate nel periodo Agosto 2007-Novembre 2008 presso il tubo inclinometrico IN3 (vedi Figura 4.6).

A conferma delle misure manuali, la sonda DMS ha individuato la superficie di scorrimento principale a 52m. dal piano campagna circa. Tale valore rappresenta lo spessore del corpo di

frana presso il tubo inclinometrico in esame ed è utilizzato come riferimento per il calcolo della tensione instabilizzante agente all'interno del corpo di frana nel corso del tempo.

Analogamente a quanto effettuato da Cola et al. (2016) si procede alla calibrazione del coefficiente di viscosità η e del coefficiente b individuando delle fasi di salita e di discesa della falda e osservando il comportamento della velocità di scorrimento durante queste.

Le fasi di salita e di discesa scelte sono tutte caratterizzate da una risposta della falda netta alle precipitazioni con escursione significativa ($>0.5\text{m.}$)

Le fasi di salita e discesa della falda scelte si collocano in occasione di:

- eventi particolarmente intensi e con notevoli precipitazioni cumulate avvenuti in autunno o inverno dopo, rispettivamente, estati o autunni piovosi;
- eventi piovosi molto rilevanti dopo periodi secchi lunghi almeno 1 settimana;
- più eventi consecutivi intervallati da pochi giorni senza precipitazioni.

L'obiettivo è individuare eventuali comportamenti differenziati.

Gli eventi scelti per la prima categoria sono:

- 1) 05/09/2011-13/09/2011 (fase di salita)
- 2) 28/10/2012-07/11/2012 (fase di salita)
- 3) 05/11/2014-18/11/2014 (fase di salita)
- 4) 23/11/2014-28/11/2014 (fase di discesa)

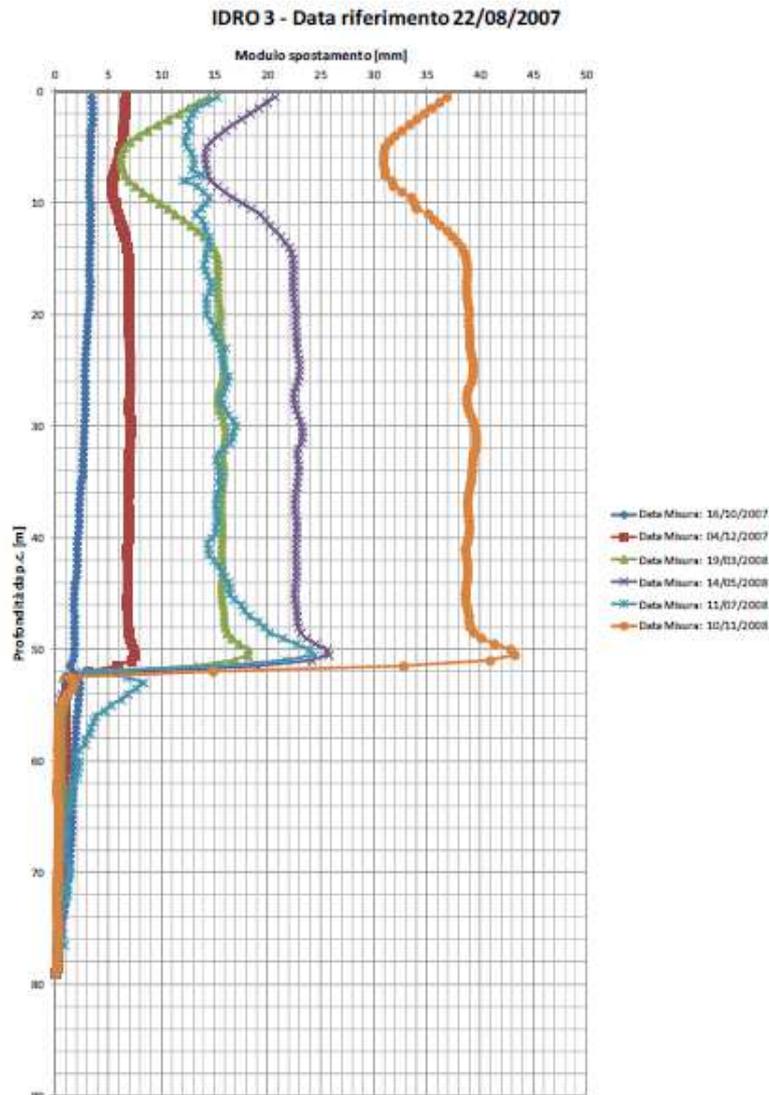


Figura 4.6 – Profilo inclinometrico presso il tubo inclinometrico IN3 con le misure derivate dalle campagne di misura eseguiti nel periodo Ottobre 2007-Novembre 2008. (Manassero, 2013)

Gli eventi scelti per la seconda categoria sono:

- 1) 11/04/2012-21/04/2012 (fase di salita)
- 2) 26/12/2013-29/12/2013 (fase di salita)

Gli eventi scelti per la terza categoria sono:

- 1) 18/01/2014-22/01/2014 (fase di salita)
- 2) 05/02/2014-07/02/2014 (fase di salita)
- 3) 08/01/2014-10/01/2014 (fase di discesa)
- 4) 22/01/2014-27/01/2014 (fase di discesa)
- 5) 23/02/2014-26/02/2014 (fase di discesa)

Nelle Figure 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 sono riportati gli andamenti tempo-postamento/velocità di scorrimento relativi ai periodi sopra citati.

Questi evidenziano un aumento della velocità spesso concomitante con l'innalzamento del livello di falda, ma il dato non si presenta pulito.

Il notevole disturbo presente possiede due diverse frequenze: una dell'ordine di 12 ore circa e l'altra dell'ordine di 7 giorni circa.

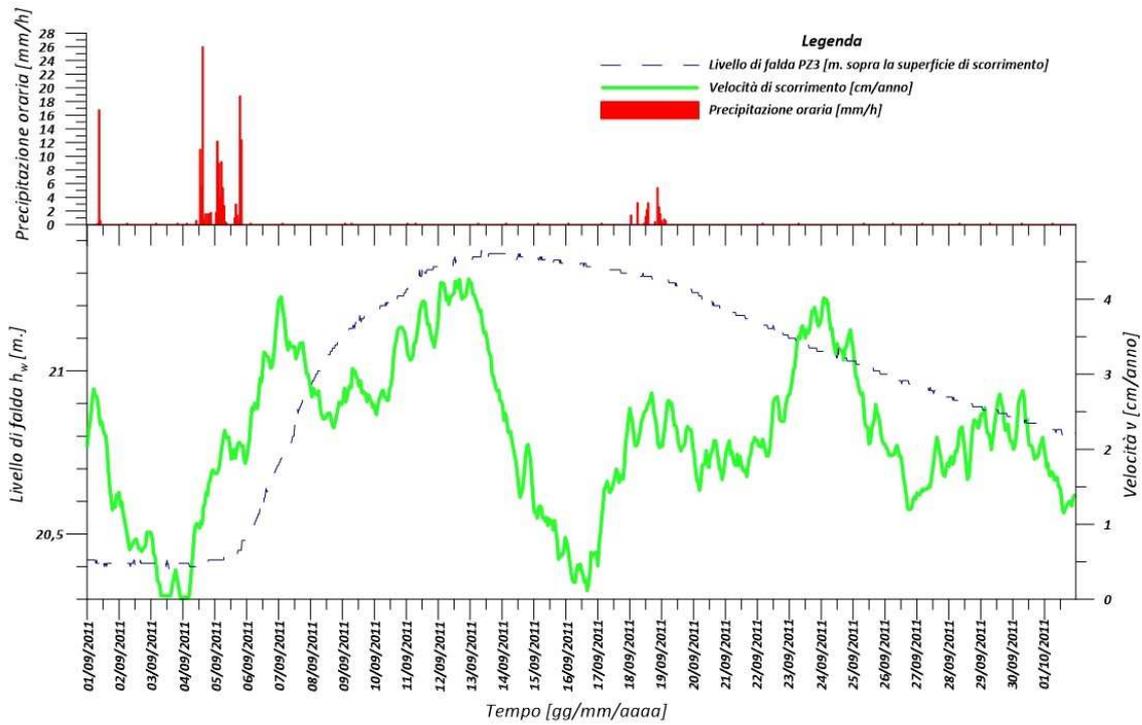


Figura 4.7 - Fase di salita del periodo 5 – 13 Settembre 2011.

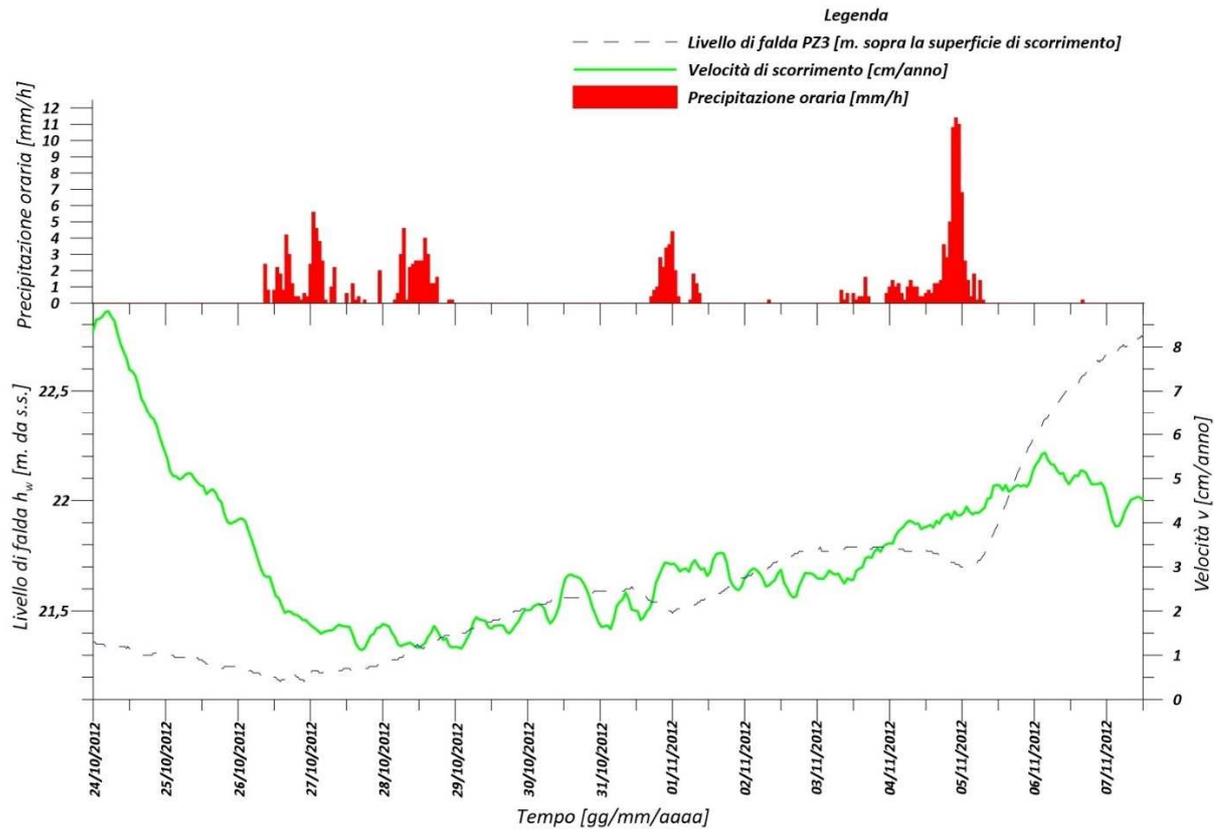


Figura 4.8 - Fase di salita del periodo 28 Ottobre - 7 Novembre 2012.

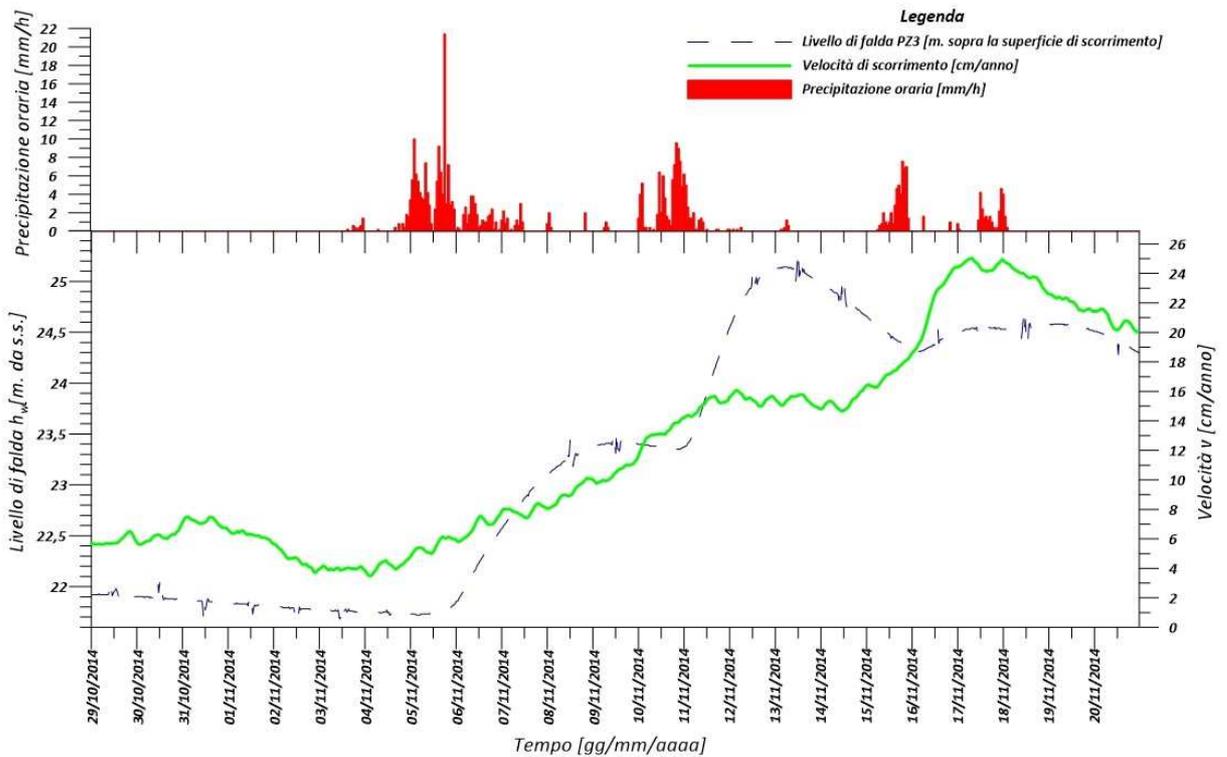


Figura 4.9 - Fase di salita del periodo 5-18 Novembre 2014

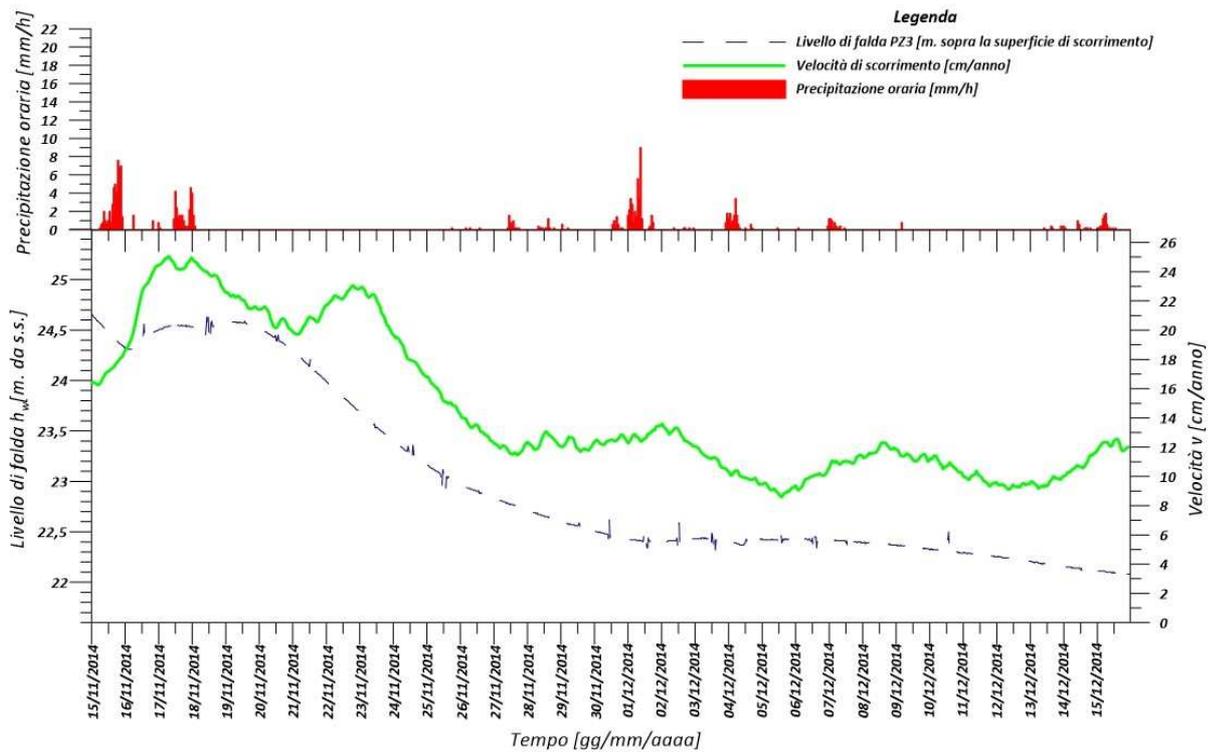


Figura 4.10 - Fase di discesa del periodo 23-28 Novembre 2011.

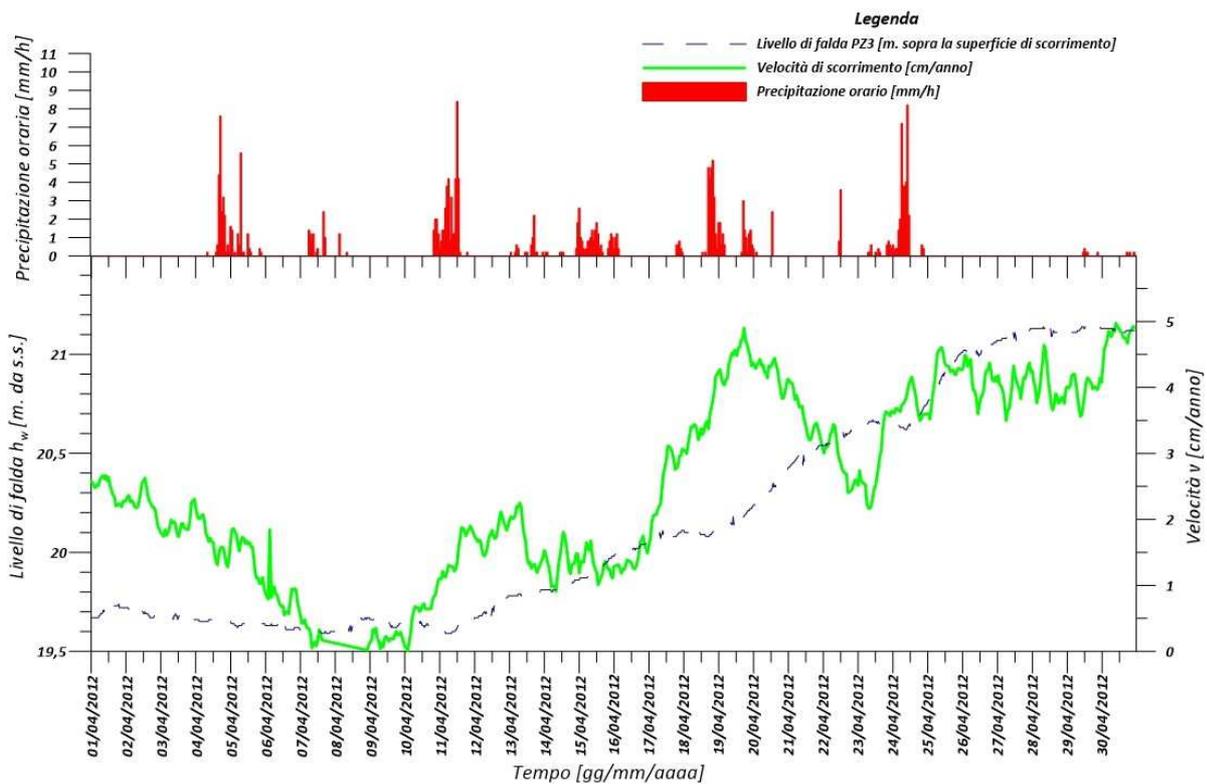


Figura 4.11 - Fase di salita del periodo 11-21 Aprile 2012.

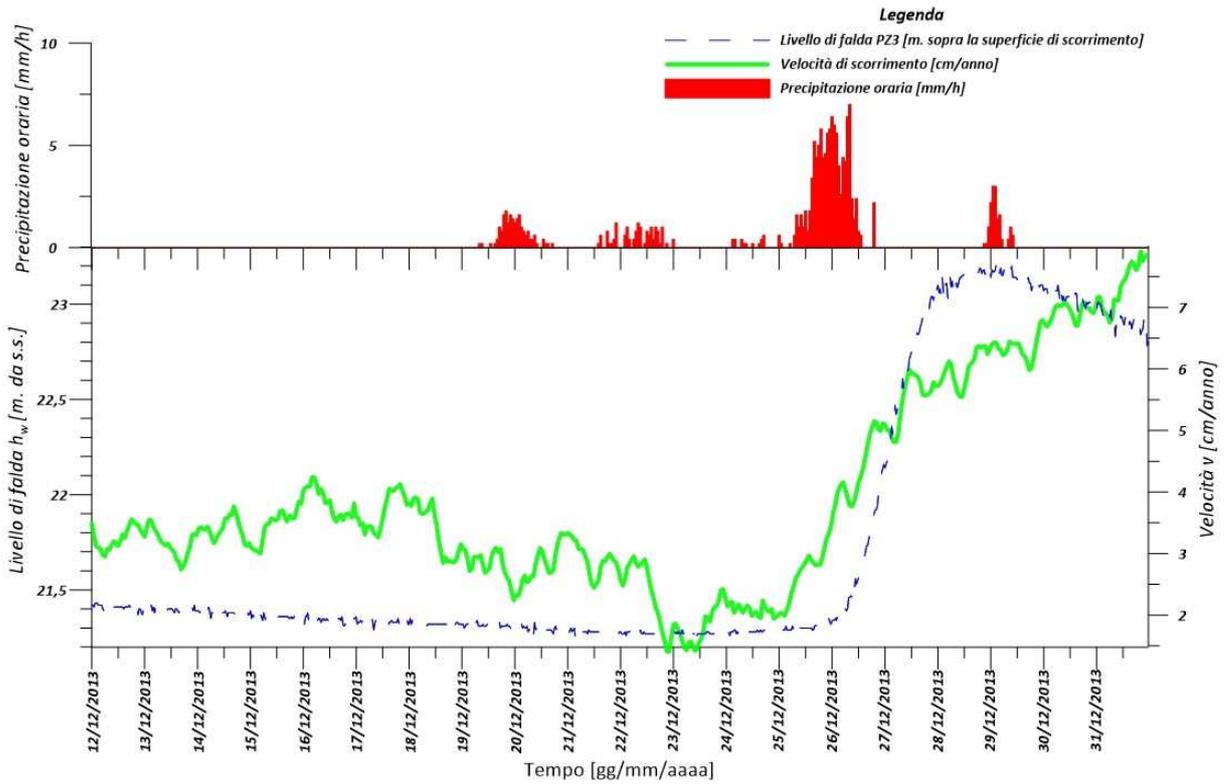


Figura 4.12 - Fase di salita del periodo 26-29 Dicembre 2013.

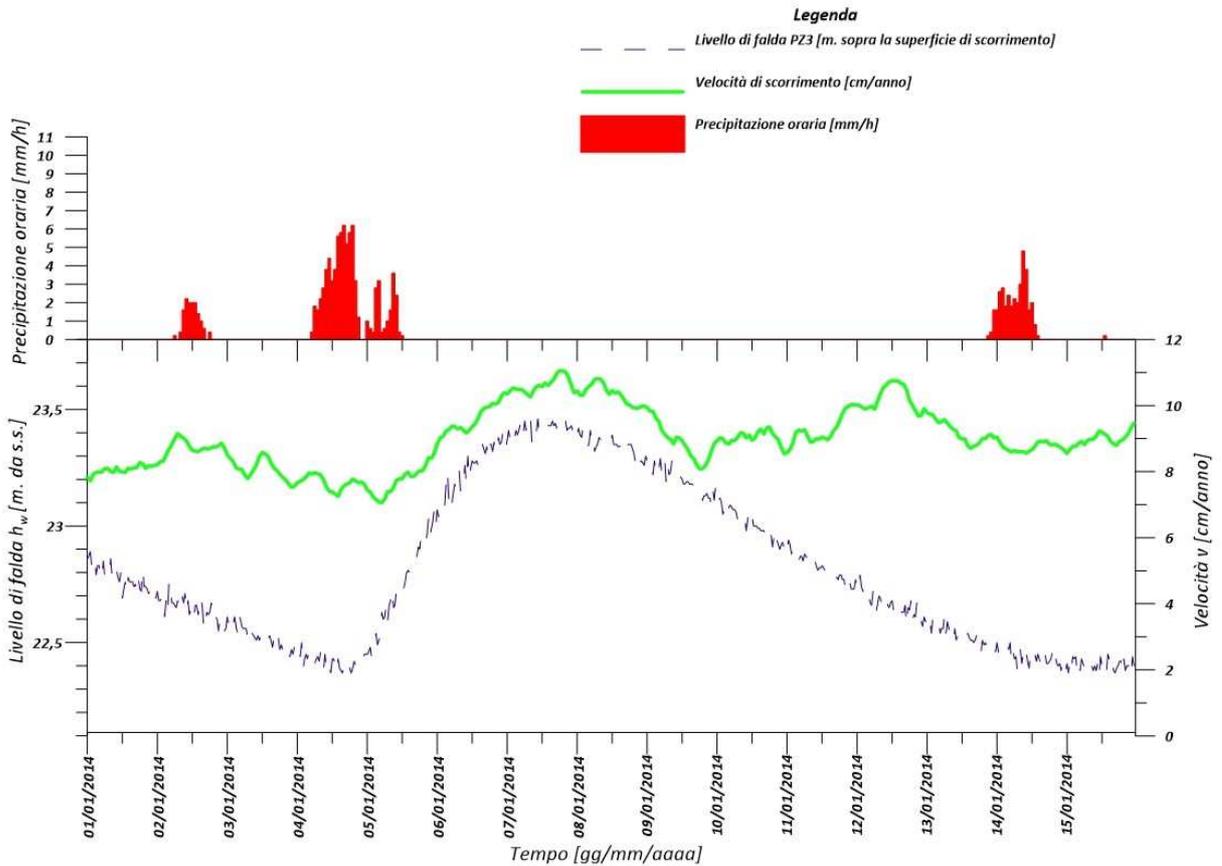


Figura 4.13 - Fase di discesa del periodo 8-10 Gennaio 2014.

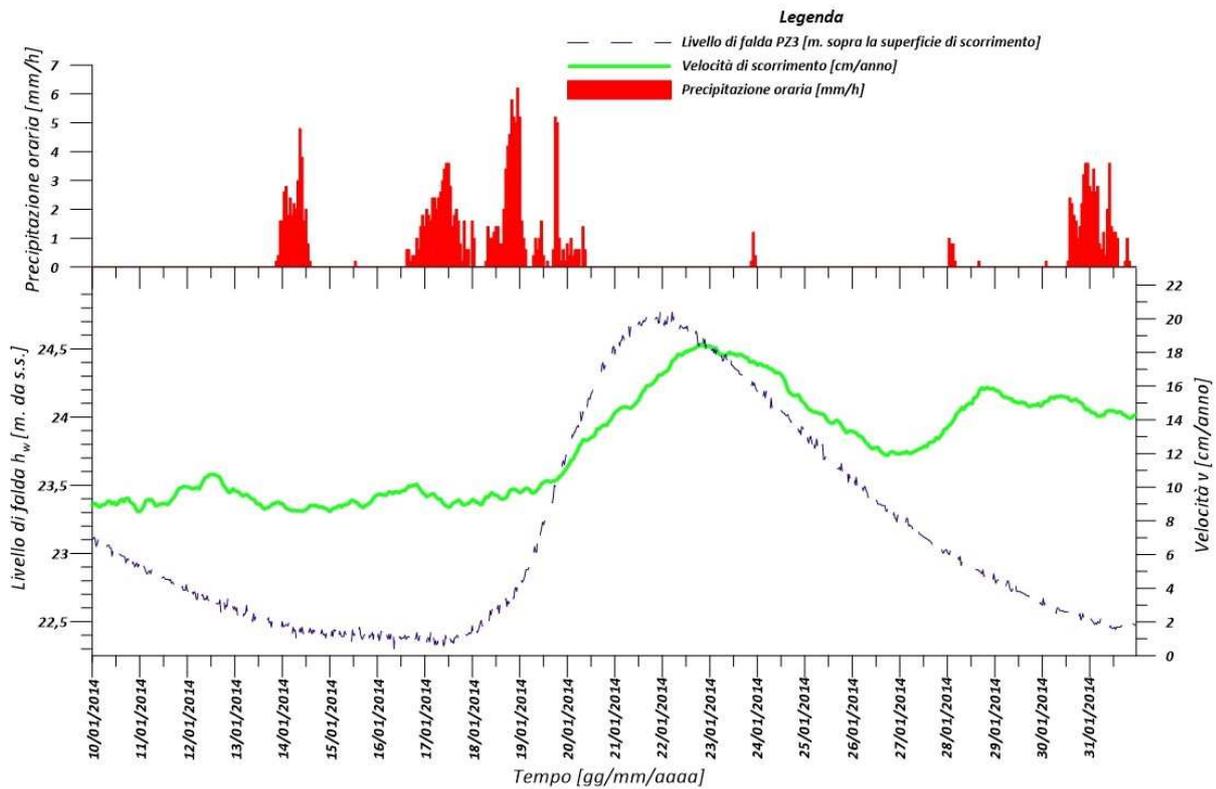


Figura 4.14 – Fase di salita del periodo 18-22 Gennaio 2014 e conseguente fase di discesa del periodo 22-27 Gennaio 2011.

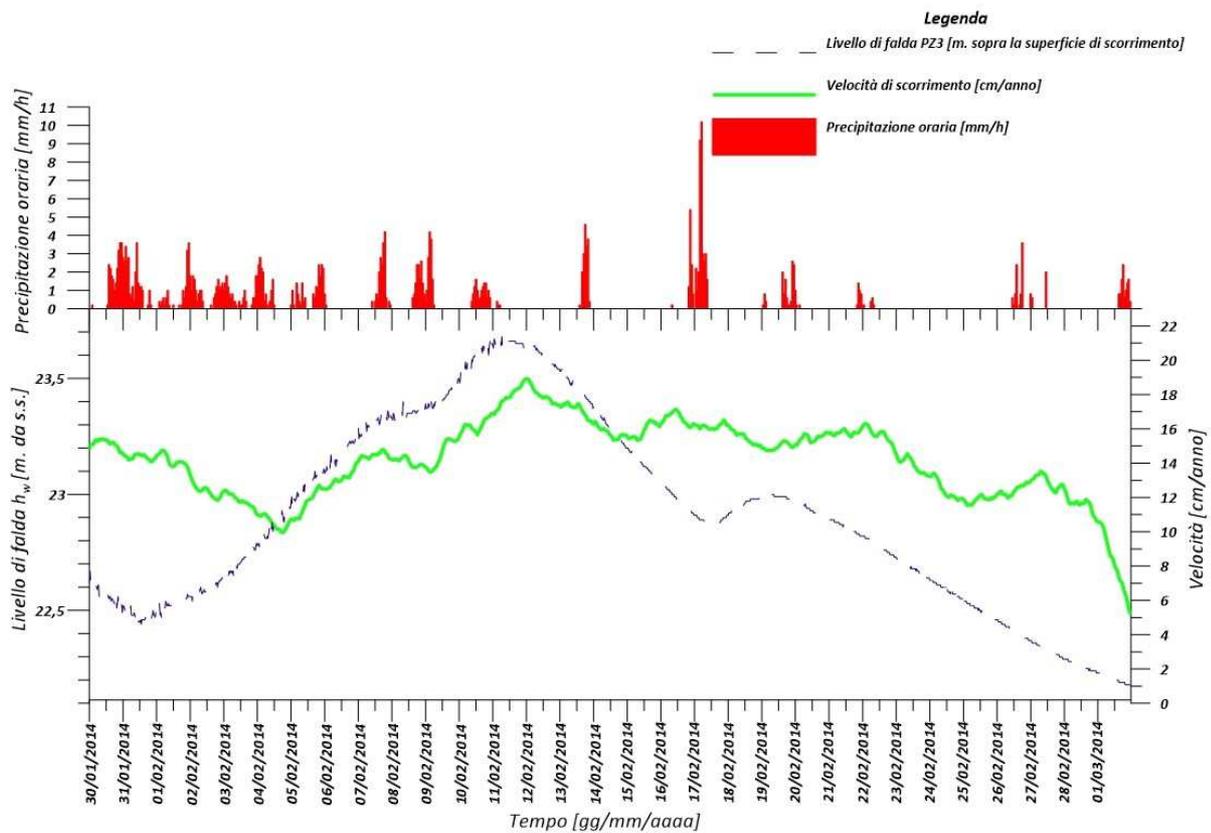


Figura 4.15 - Fase di salita del periodo 5-7 Febbraio 2014 e conseguente fase di discesa del periodo 3-27 Febbraio 2013.

Dato che è difficile credere che una frana maturi spostamenti negativi (verso monte) e la presenza di una frequenza quasi costante di oscillazione della velocità, è lecito supporre che la causa di tale oscillazione sia data da errori strumentali, errori che il filtraggio dei dati grezzi di spostamento non è stato sufficiente a correggere.

Per ovviare a questo errore, al fine di individuare dati significativi si è deciso di considerare solamente le fasi con contemporanea salita o contemporanea discesa sia della falda che della velocità. I singoli intervalli presi in considerazione all'interno di tali fasi presentano un intervallo temporale massimo di 4 giorni.

I dati di velocità e altezza di falda relativi a questi brevi periodi sono riportati in Figura 4.16, in un grafico con scala doppio-logaritmica.

A differenza di quanto ottenuto da Cola et al. (2016), i punti pur raggruppandosi su tratti rettilinei tra loro paralleli, non presentano una netta transizione tra queste.

Altro problema che si può notare è un'eccessiva variabilità del coefficiente angolare, equivalente al coefficiente b della legge di Vulliet-Hutter, e uno scarso indice R^2 delle rette di interpolazione delle fasi di salita e discesa considerate.

Si può, tuttavia, individuare una scarsa dipendenza tra velocità e altezza di falda quando questa assume valori inferiore a 22m circa, evidenziata dalla quasi verticalità delle fasi di salita e di discesa nel grafico in Figura 4.16.

Probabilmente il motivo dell'esito negativo dell'applicazione di questo modello è la scarsa qualità dei dati di velocità derivati dagli spostamenti registrati dalla sonda DMS. A causa delle oscillazioni periodiche a bassa frequenza, infatti, si suppone che la velocità misurata non aumenti e cali seguendo il reale andamento della velocità di frana.

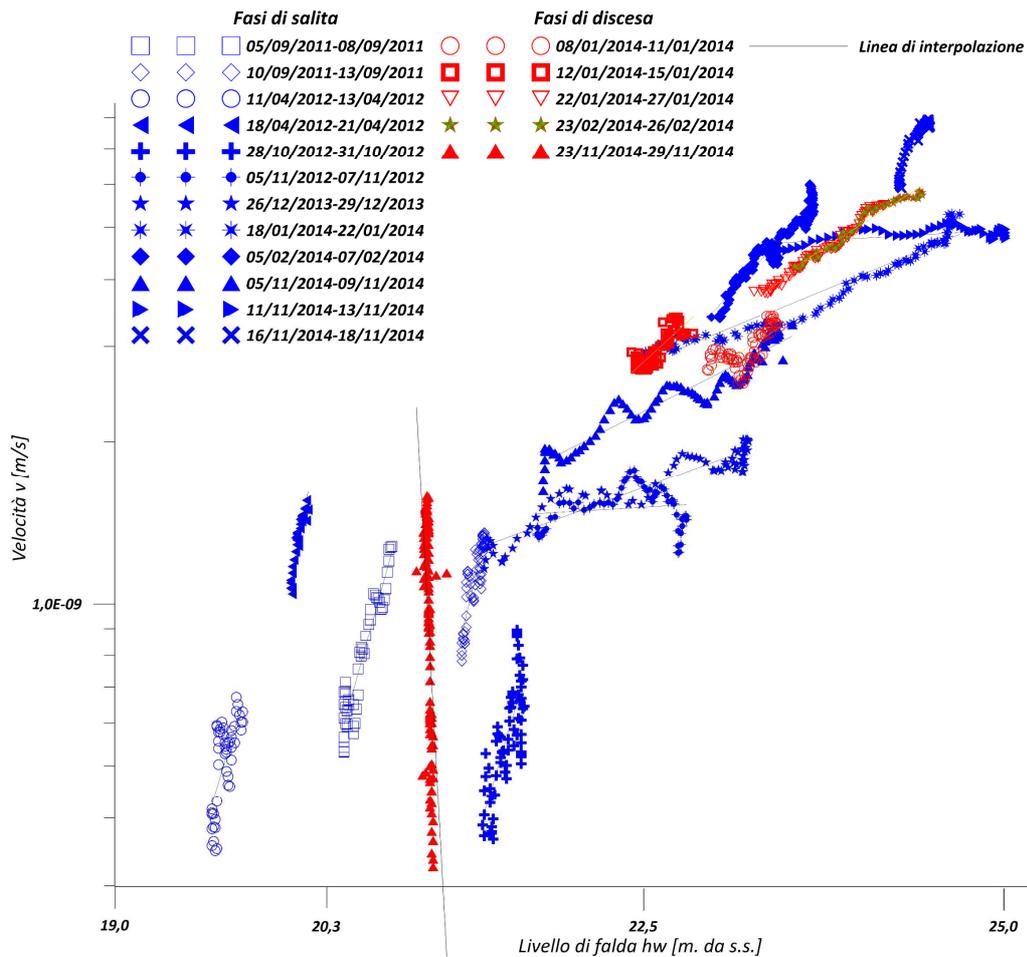


Figura 4.16 - Grafico logv-logh comprendente le fasi di salita e discesa della falda e della velocità di discesa selezionate. Le fasi di salita sono indicate con simboli di colore blu; le fasi di discesa sono indicate con simboli di colore rosso.

4.6 - Applicazione di un modello a pendio indefinito

Per correlare la velocità di scorrimento all'altezza di falda nella frana di Idro si è provato ad applicare un modello a pendio indefinito, che sfrutta una legge di velocità simile a quella di Bingham come nel caso del modello di Puzrin & Schmid.

Per l'applicazione del modello di Puzrin & Schmid, fu considerata la stessa sezione longitudinale del corpo di frana utilizzata per l'analisi di stabilità. La posizione della falda fu desunta dai livelli medi misurati nei tubi piezometrici PZ2, PZ3, PZ4, PZ5, PZ6 e PZ9 (nel caso dei piezometri di Casagrande a doppia cella, i livelli adottati erano quelli della falda superiore) e come profondità della superficie di scorrimenti quelle rilevate presso i tubi inclinometrici IN3, IN3-N, IN4, IN4-N, IN5 e IN9 (Figura 4.5).

I parametri per la calibrazione del modello di Puzrin & Schmid e, quindi, per la determinazione del coefficiente di viscosità η , vennero ottenuti sfruttando l'intero insieme dei dati citati sopra, raccolti nel periodo Agosto 2007- Marzo 2013.

I dati di velocità degli inclinometri furono ricavati dai risultati delle campagne inclinometriche manuali condotte nel periodo 2007-2013 e, solo per il periodo Luglio 2011-Marzo 2013, le misure inclinometriche in continuo fornite dalla sonda inclinometrica multiparametrica DMS. Per questo modello a pendio indefinito si sono utilizzate unicamente le misure piezometriche automatiche fornite dal sensore piezometrico posto nel piezometro a tubo aperto PZ3 e le misure inclinometriche in continuo fornite dalla sonda DMS, disponibili per il periodo Luglio 2011 - Dicembre 2015.

Considerata la grande variabilità pluviometrica in questo periodo e l'intervallo notevole di dati inclinometrici a misura automatica si ritiene che la calibrazione sfrutti dati rappresentativi del comportamento della frana di Idro.

Per ottenere il coefficiente di viscosità η , unico parametro per la calibrazione del modello, si utilizzata tale relazione:

$$\eta = \frac{1}{v_{media}} \cdot (\tau_g - \tau_r) = \frac{1}{v_{media}} \{ \gamma h s e n \alpha - [(\gamma h - \gamma_w h_w) \cdot \cos \alpha \tan \phi_{res}] \}$$

Dove:

v_{media} : velocità media rilevate dalla sonda DMS nel periodo Luglio 2011-Dicembre 2015 in corrispondenza della superficie di scorrimento

La velocità media relativa all'intero periodo di acquisizione considerata per ottenere il parametro η è la media delle velocità mediate su 1h, che risulta molto simile a quella delle velocità mediate su intervalli di tempo maggiori.

Per ottenere la velocità di scorrimento prevista per ogni istante si utilizza la formula inversa, ponendo come η il valore ricavato dalla calibrazione:

$$v = \frac{1}{\eta} \{ \gamma h s e n \alpha - [(\gamma h - \gamma_w h_w) \cdot \cos \alpha \tan \phi_{res}] \}$$

In Figura 4.17 è visibile l'andamento dell'altezza di falda, della velocità di scorrimento data dalla sonda DMS e della velocità di scorrimento prevista tramite il modello a pendio indefinito per l'intero periodo Luglio 2011-Dicembre 2015.

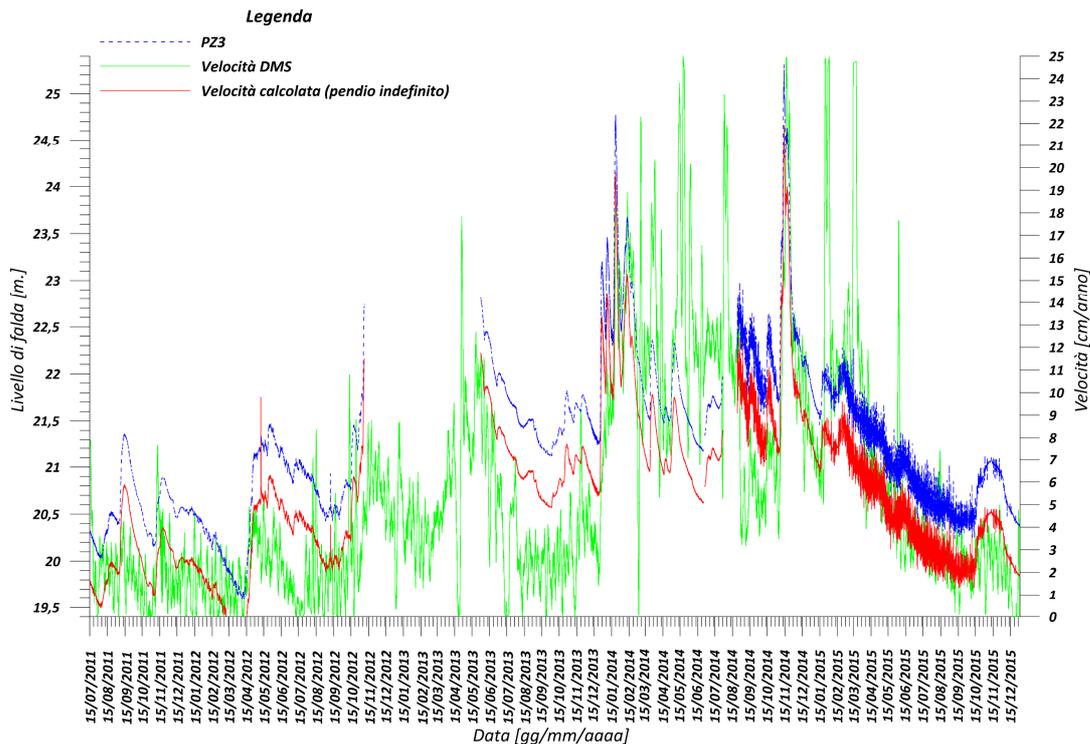


Figura 4.17 - Andamento di livello di falda, velocità misurata dalla sonda DMS (mediata su 24h) e velocità calcolata con il modello a pendio indefinito.

Per determinare un indice di successo della previsione si calcola la differenza tra la velocità calcolata e la velocità misurata per ogni istante e si calcola la moda e la mediana dell'insieme delle soluzioni delle differenze.

In questo caso la moda è 1.90 cm/anno e la mediana è 3.4 cm/anno. La previsione non può, quindi, dirsi soddisfacente.

4.7 - Applicazione di due modelli basati su una legge lineare e una legge esponenziale

Sulla base della bibliografia relativa alla previsione della velocità di una frana, è stato scelto di adottare una legge lineare e una legge esponenziale per predire la velocità della frana di Idro.

La legge lineare è del tipo:

$$v = ah_w + b$$

Dove:

a,b: coefficienti derivati dalla calibrazione.

Tale legge lineare è riconducibile alla legge di Bingham e al modello con pendio indefinito.

Svolgendo quest'ultimo si ottiene infatti:

$$v = \frac{(\tau_g - \tau_r)}{\eta} = \frac{1}{\eta} \{ \gamma h s e n \alpha - (\gamma h - \gamma_w h_w) \cdot \cos \alpha \tan \phi_{res} \}$$

$$= \frac{1}{\eta} \gamma h s e n \alpha - \frac{\gamma h}{\eta} \cos \alpha \tan \phi_{res} + \frac{\gamma_w}{\eta} h_w \cos \alpha \tan \phi_{res} = b + a h_w$$

Dove:

$$a = \frac{\gamma_w}{\eta} \cos \alpha \tan \phi_{res} \quad e \quad b = \frac{1}{\eta} \gamma h s e n \alpha - \frac{\gamma h}{\eta} \cos \alpha \tan \phi_{res}$$

I coefficienti a e b sono ricavati da una calibrazione svolta prendendo in considerazione coppie del tipo $v_{media} - h_w$ media dove:

v_{media} : velocità di scorrimento media mensile o trimestrale

h_w media: altezza di falda sopra la superficie di scorrimento media mensile o trimestrale

Tali coppie di valori sono posti in un grafico v-h e interpolati da una retta (vedi Figura 4.18 e Figura 4.19).

In Figura 4.18, relativa alla calibrazione su base mensile, nella porzione del grafico relativa ad un livello di falda oltre i 21.5m dalla superficie di scorrimento, si possono individuare due zone con punti lontani dalla retta di interpolazione, una sopra la retta e una sotto.

La prima contiene punti relativi a mesi in cui la velocità di scorrimento della frana è stata particolarmente elevata, ossia Febbraio 2014, Maggio 2014, Giugno 2014, Luglio 2014, Novembre 2014 e Marzo 2015.

La seconda presenta i punti relativi alla seconda metà del 2013, disposti secondo una traiettoria arcuata, e a Settembre 2014. Tutti questi sono caratterizzati da una velocità misurata particolarmente bassa rispetto ai periodi limitrofi e a periodi con altezza di falda simile.

Come visibile in Figura 4.18, la velocità presso l'inclinometro IN3-N si annulla con un livello di falda di 19.5m, evento che nel periodo di monitoraggio non si è mai verificato.

La velocità prevista con la legge lineare con calibrazione mensile e calibrazione trimestrale è visibile, rispettivamente, nei grafici nelle Figure 4.20 e 4.21, in confronto con la velocità rilevata dalla sonda DMS.

La moda delle differenze tra velocità prevista e velocità reale è di 0.1 cm/anno per la velocità prevista con calibrazione mensile e di -2.5 cm/anno con la calibrazione trimestrale. La mediana è, invece, rispettivamente, 0.7 cm/anno e -1.9 cm/anno.

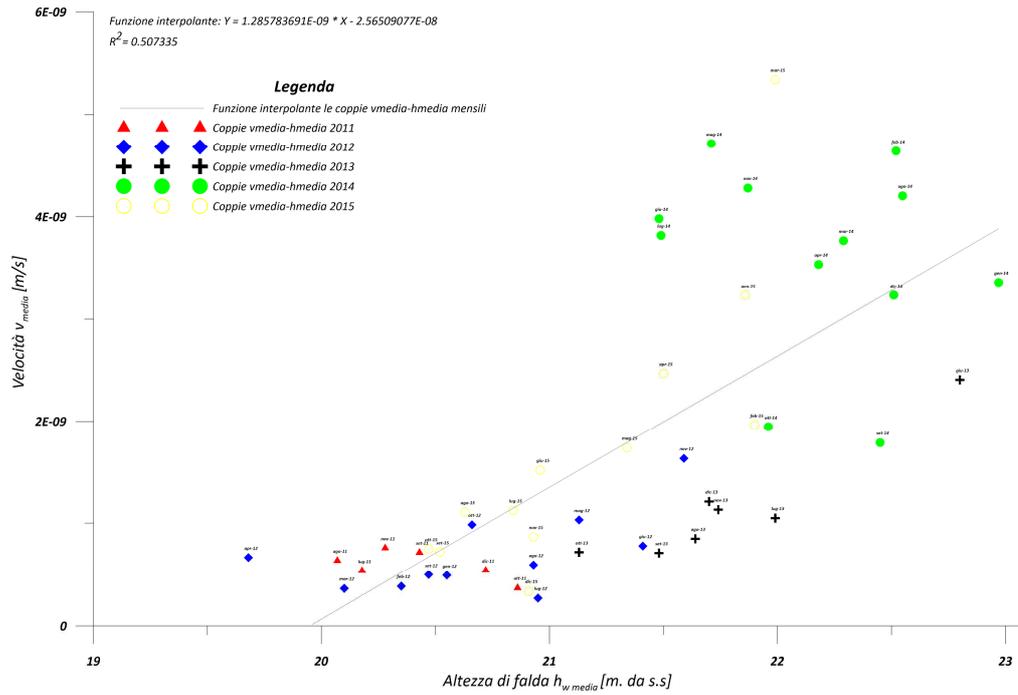


Figura 4.18 – Grafico di calibrazione riportante i punti dati dalle coppie v_{media}-h_{wmedia} per ogni mese del periodo Luglio 2011- Dicembre 2015. Sono riportate la retta di interpolazione, la sua equazione e l'indice R².

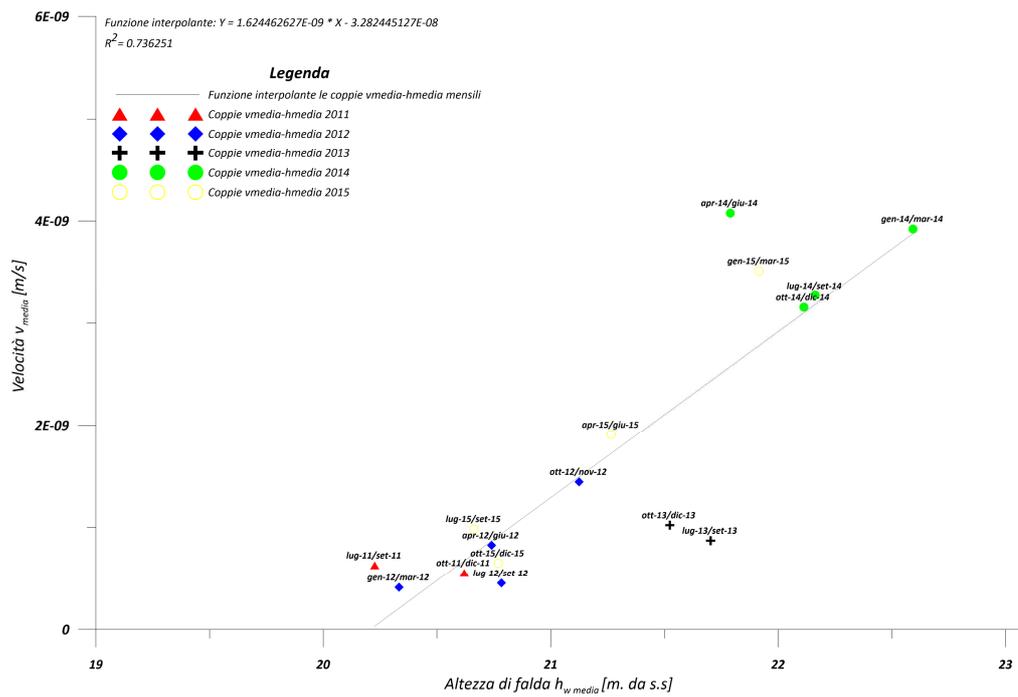


Figura 4.19 – Grafico di calibrazione riportante i punti dati dalle coppie v_{media}-h_{wmedia} per ogni trimestre del periodo Luglio 2011-Dicembre 2015. Sono riportate la retta di interpolazione, la sua equazione e l'indice R².

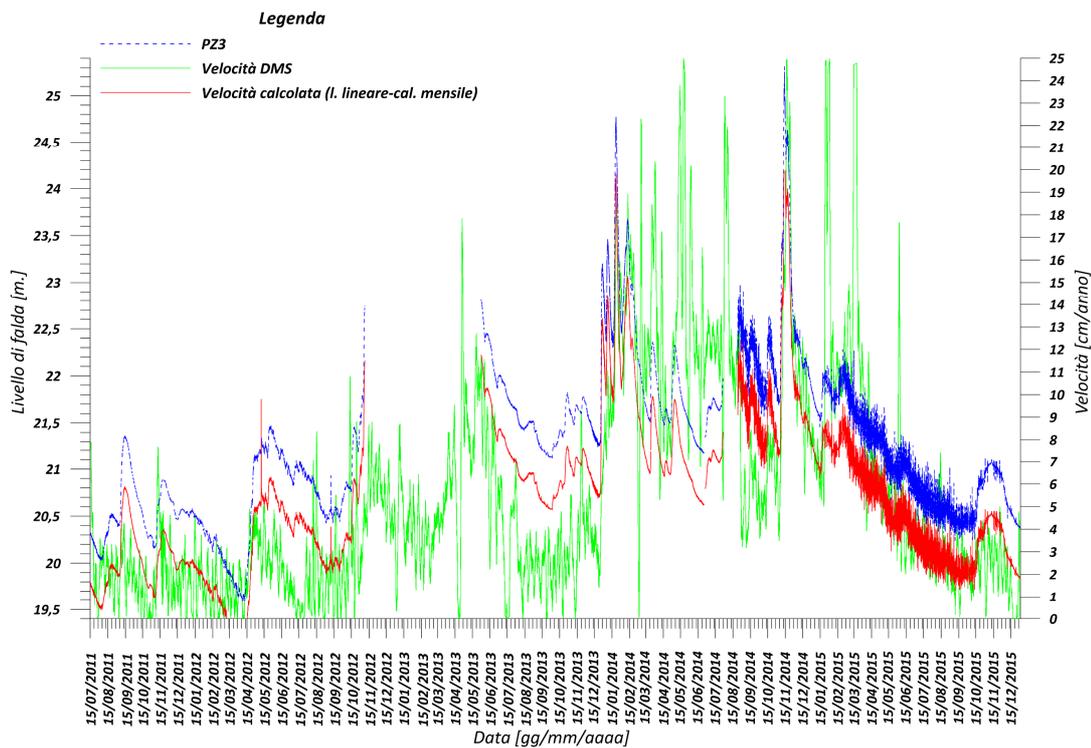


Figura 4.20 – Andamento di livello di falda, velocità misurata dalla sonda DMS (mediata su 24h) e velocità calcolata con la legge lineare e la calibrazione mensile

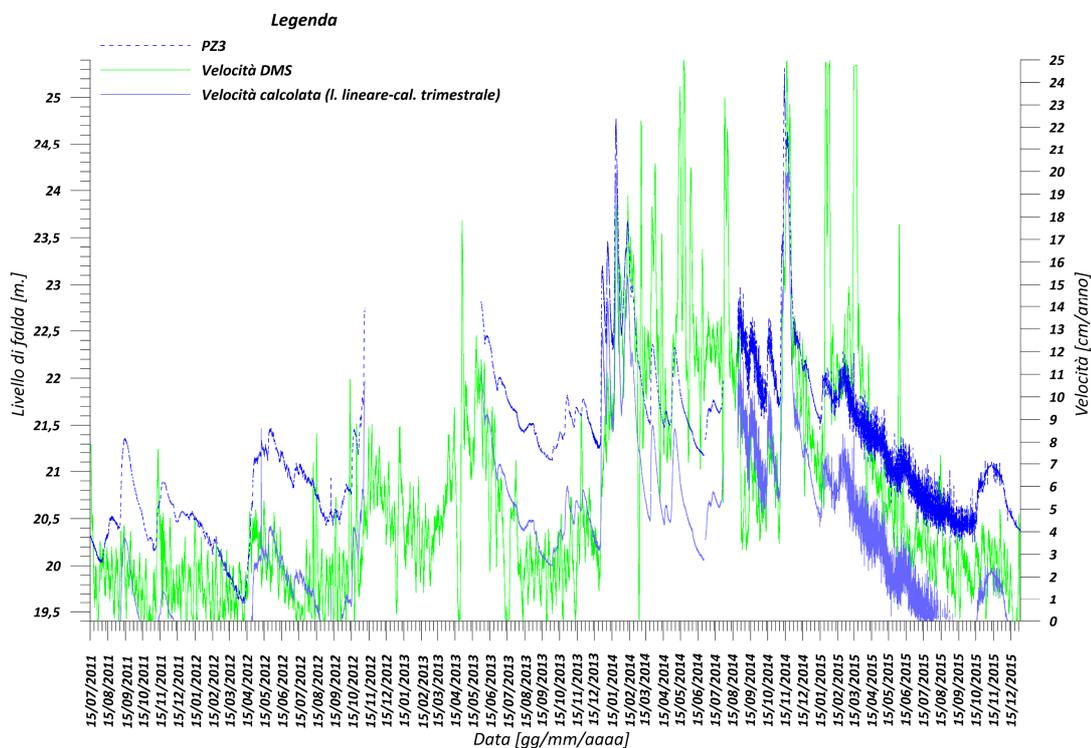


Figura 4.21 – Andamento di livello di falda, velocità misurata dalla sonda DMS (mediata su 24h) e velocità calcolata con la legge lineare e la calibrazione trimestrale.

La legge esponenziale utilizzata è analoga a quella del modello di Vulliet & Hutter (1988). La sua equazione è:

$$v = ah_w^b$$

Dove:

a,b: coefficienti di calibrazione

La calibrazione è stata effettuata utilizzando le medie mensili e trimestrali, analogamente a quanto svolto per la legge lineare.

I coefficienti a e b sono ricavati dalla funzione di interpolazione, di carattere esponenziale.

In Figura 4.22 e in Figura 4.23 sono visibili i grafici in scala logaritmica per entrambe le calibrazioni.

In Figura 4.24 e Figura 4.25 sono riportati i grafici con la velocità predetta tramite la legge esponenziale con calibrazione mensile e tramite quella con calibrazione trimestrale.

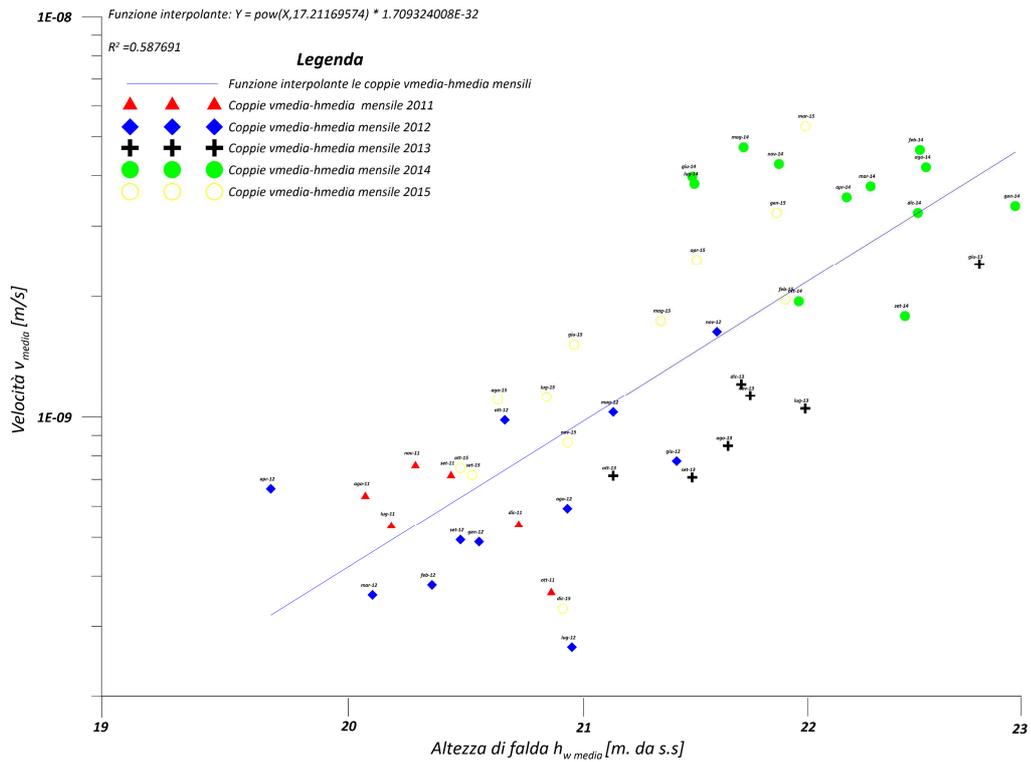


Figura 4.22 – Grafico di calibrazione con assi in scala logaritmica riportante i punti dati dalle coppie v_{media} - $h_{w media}$ per ogni mese del periodo Luglio 2011-Dicembre 2015. Sono riportate la funzione di interpolazione, la relativa equazione e l'indice

R^2 .

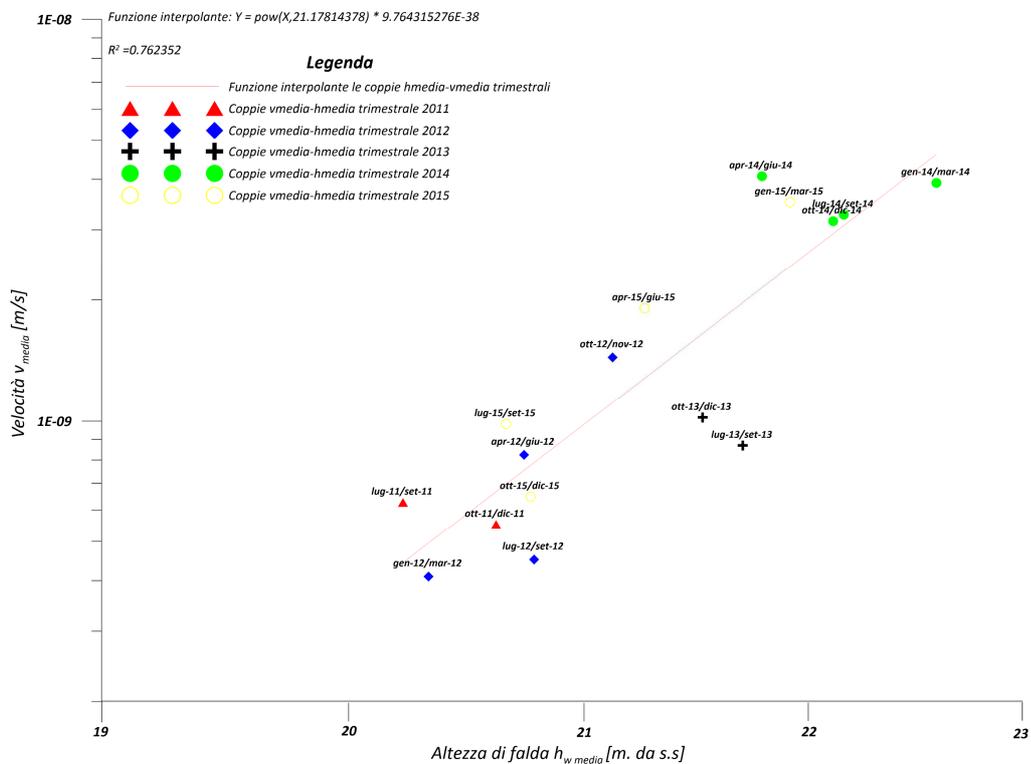


Figura 4.23 – Grafico di calibrazione con assi in scala logaritmica riportante i punti dati dalle coppie v_{media} - $h_{w media}$ per ogni trimestre del periodo Luglio 2011-Dicembre 2015. Sono riportate la funzione di interpolazione, la relativa equazione e

l'indice R^2 .

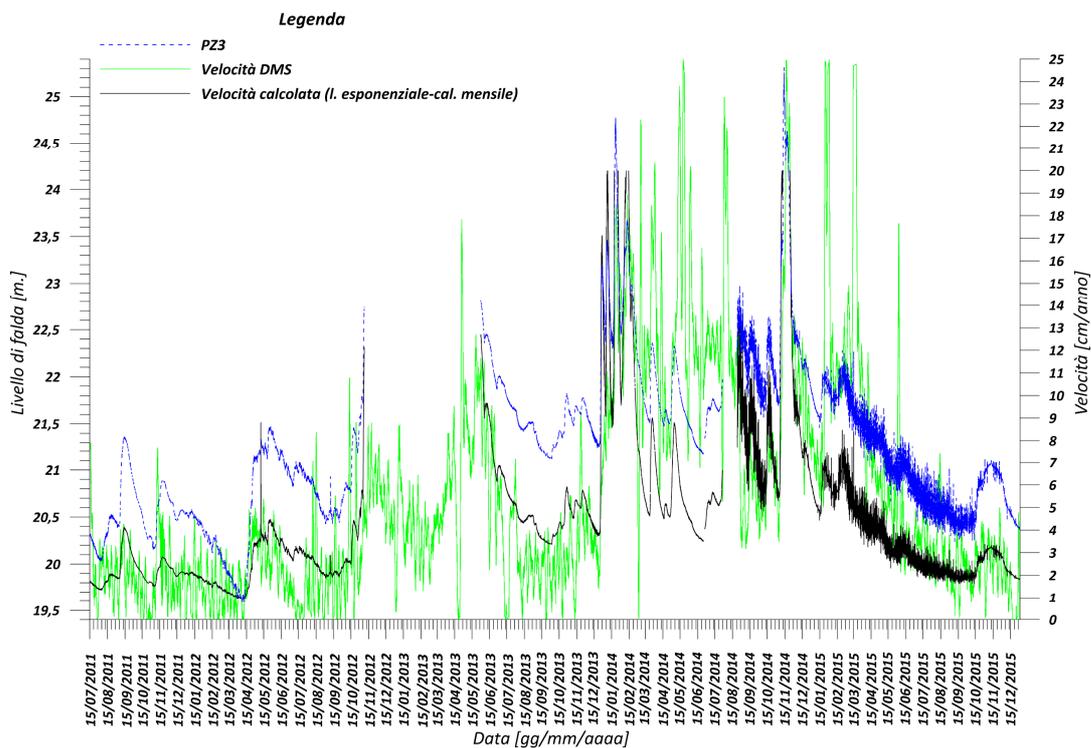


Figura 5.24 - Andamento di livello di falda, velocità misurata dalla sonda DMS (mediata su 24h) e velocità calcolata con la legge esponenziale e la calibrazione mensile.

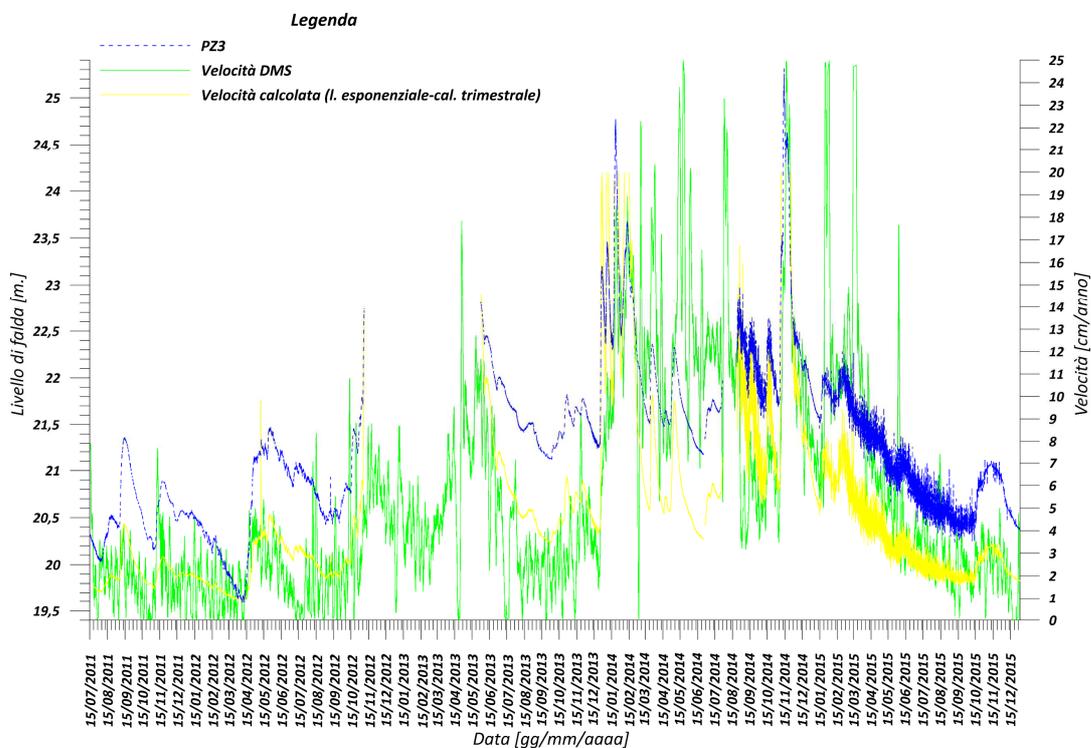


Figura 4.25 - Andamento di livello di falda, velocità misurata dalla sonda DMS (mediata su 24h) e velocità calcolata con la legge esponenziale e la calibrazione trimestrale.

La moda delle soluzioni delle differenze tra velocità calcolata e velocità misurata è di 0.8 cm/anno per la calibrazione su base mensile e di 0.4 cm/anno per quella su base trimestrale. La mediana è, rispettivamente, 0.1 cm/anno e 0.6 cm/anno.

4.8 - Valutazione dell'affidabilità dei modelli applicati

Le 3 tipologie di modello applicato sono esposte in Figura 4.26 tramite un grafico che comprende la velocità prevista da tutti i modelli.

In Tabella 4.3 sono riportati il coefficiente di viscosità η utilizzato per l'applicazione del modello a pendio indefinito modificato e i coefficienti a e b utilizzati per la legge lineare e la legge esponenziale.

Nel caso delle leggi lineare e esponenziale sono, inoltre, riportati i coefficienti di determinazione R^2 delle rette di interpolazione da cui sono derivati i coefficienti a e b.

Tabella 4.3 – Tabella con riportati i valori dei parametri di calibrazione dei modelli applicati e l'indice di determinazione delle rette di interpolazione utilizzate per la calibrazione dei modelli basati su legge lineare ed esponenziale.

	η	a	b	R^2
Legge con pendio indefinito	$1.2 \cdot 10^{10}$			
Legge lineare con calibrazione mensile		$1.29 \cdot 10^{-9}$	$-2.56 \cdot 10^{-8}$	0.51
Legge lineare con calibrazione trimestrale		$1.62 \cdot 10^{-9}$	$-3.28 \cdot 10^{-8}$	0.74
Legge esponenziale con calibrazione mensile		$1.71 \cdot 10^{-32}$	17.21	0.59
Legge esponenziale con calibrazione trimestrale		$9.76 \cdot 10^{-38}$	21.18	0.76

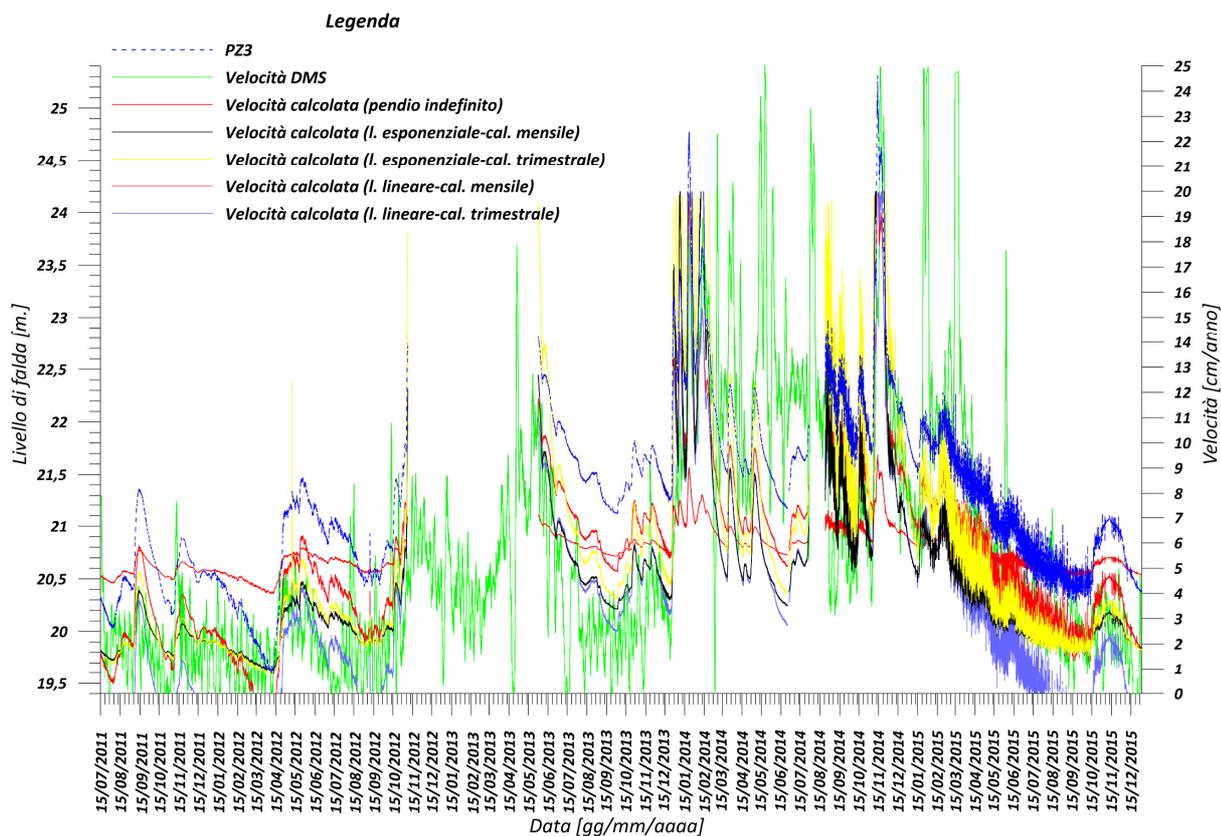


Figura 4.26 - Andamento della velocità misurata dalla sonda DMS (mediata su 24h), delle velocità calcolate con le leggi esposte e del livello di falda.

In Tabella 4.4 sono riportati i valori della mediana e della moda delle differenze tra velocità calcolata e velocità misurata per tutti i modelli applicati.

Tabella 4.4 – Tabella riportante i valori della mediana dell'insieme di risultati delle differenze tra la velocità calcolata e la velocità misurata

	Moda [cm/anno]	Mediana [cm/anno]
Legge con pendio indefinito	3.4	1.9
Legge lineare con calibrazione mensile	0.1	0.7
Legge lineare con calibrazione trimestrale	-2.5	-1.9
Legge esponenziale con calibrazione mensile	0.8	0.10
Legge esponenziale con calibrazione trimestrale	0.4	0.6

In Figura 4.27 è riportato un grafico con la differenza tra velocità calcolata dai vari modelli e velocità misurata dalla sonda DMS per tutto il periodo di riferimento.

Osservando Tabella 4.4 e Figura 4.27 è possibile determinare che i modelli basati, rispettivamente, su legge lineare con calibrazione mensile e su legge esponenziale con calibrazione mensile e trimestrale sono i più affidabili.

La loro affidabilità è molto alta in tutto il periodo analizzato eccetto, come visibile in Figura 4.26 e Figura 4.27, nei periodi Gennaio-Luglio 2014 e Febbraio-Marzo 2015.

Questi due periodi sono quelli in cui la velocità di scorrimento della frana ha raggiunto il picco, corrispondente ad un valore di 25 cm/anno circa. Come visibile in alto a destra nei grafici in Figura 4.18 e Figura 4.22, molti di questi mesi sono rappresentati da punti lontani dalla retta di interpolazione ottenuta con la calibrazione dei parametri a e b.

Lo stesso problema è visibile nei grafici in Figura 4.19 e Figura 4.22 e affligge, quindi, la velocità calcolata da tutti i modelli basati su legge lineare o esponenziale applicati.

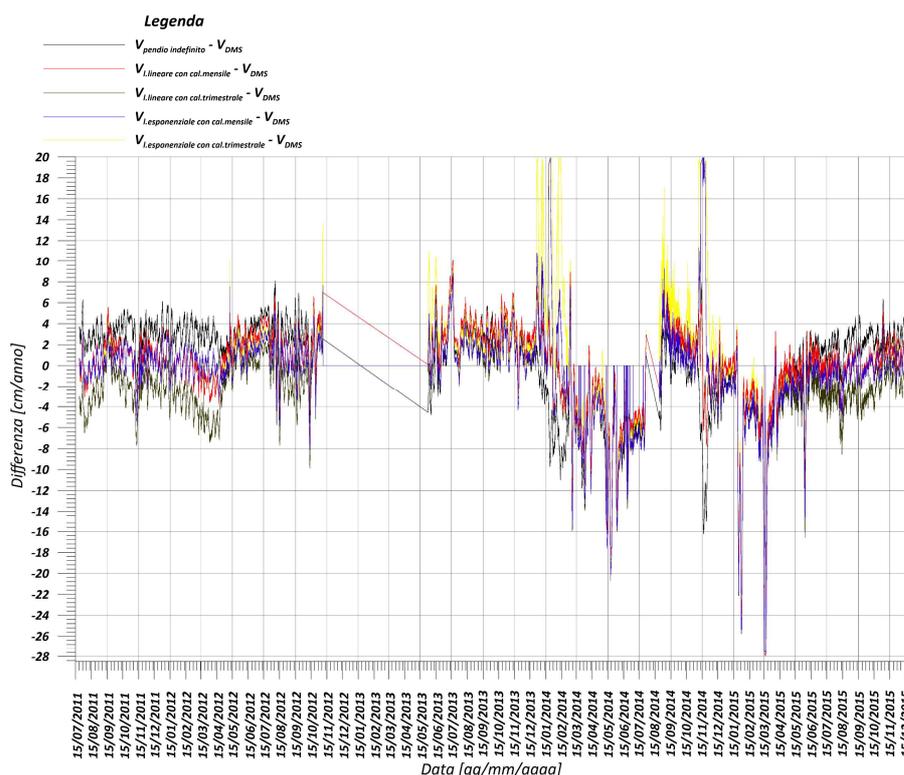


Figura 4.27 – Differenza tra velocità calcolata e velocità misurata (mediata su 24h) nel periodo di riferimento.

La causa della cattiva previsione in quei periodi è la notevole anomalia del dato di velocità misurata rispetto ai periodi circostanti e la scarsità di situazioni con velocità simile.

In Tabella A3.1 e Tabella A3.2, all'interno dell'Appendice 3, si trovano le altezze di falda e le velocità medie mensili e trimestrali.

Manassero (2013) ha posto 2 soglie di velocità: una di pre-allarme e una di allarme. La prima è di 15.7cm/anno e la seconda di 31.5cm/anno. Come si può vedere nel grafico di Figura 4.26, la prima è superata più volte nel corso del 2014, eccezionalmente piovoso, mentre la seconda non è mai superata né nel 2014 né negli altri anni.

4.9 - Considerazioni sulla precisione delle sonde inclinometriche

La sonda inclinometrica DMS utilizzata per calcolare la velocità a partire dallo spostamento cumulato è composta da più moduli della lunghezza di 1m ciascuno (vedi Figura 4.28 e Figura 4.29).

I moduli, di forma tubolare e in acciaio inox, contengono un sensore inclinometrico biassiale e sono uniti tra loro da giunti flessibili 2D a costituire una sorta di catena. Questi sono realizzati con una gomma rinforzata ad alta rigidità torsionale, tale da mantenere l'orientazione originale dei moduli rispetto al sistema di riferimento assiale del sensore inclinometrico



Figura 4.28 – Catena inclinometrica DMS 2D avvolta su di una spira, pronta per l'installazione.

(da Lovisolo, 2014)



Figura 4.29 – Installazione della colonna DMS presso il tubo inclinometrico IN3-N della frana di Idro. Arpa Lombardia, 2011)

durante la fase di installazione nel tubo inclinometrico, il fissaggio al fondo e la vita operativa (Lovisolò, 2003). La resistenza alla torsione che i giunti oppongono non impedisce alla catena inclinometrica di piegarsi come una spina dorsale, accomodando le deformazioni del foro di sondaggio causate dall'evoluzione del dissesto; la resistenza alla trazione (20kN) impedisce di spezzarsi, salvo estremo allungamento.

Il sensore inclinometrico inserito all'interno dei moduli è fissato alla superficie interna di questi in corrispondenza delle loro basi tramite un centralizzatore in poliuretano (Lovisolò, 2005).

In Figura 4.30 si può vedere il profilo della colonna inclinometrica DMS.

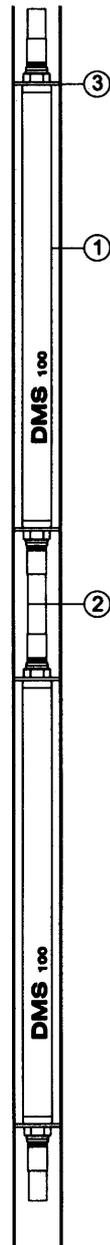


Figura 4.30 – Profilo della colonna DMS 2D: 1) Modulo in acciaio inox; 2) Giunzione flessibile; 3) Centralizzatore in poliuretano (da Lovisolo et al., 2005)

In Figura 4.31 è presente un disegno che mostra il comportamento della colonna DMS con la deformazione.

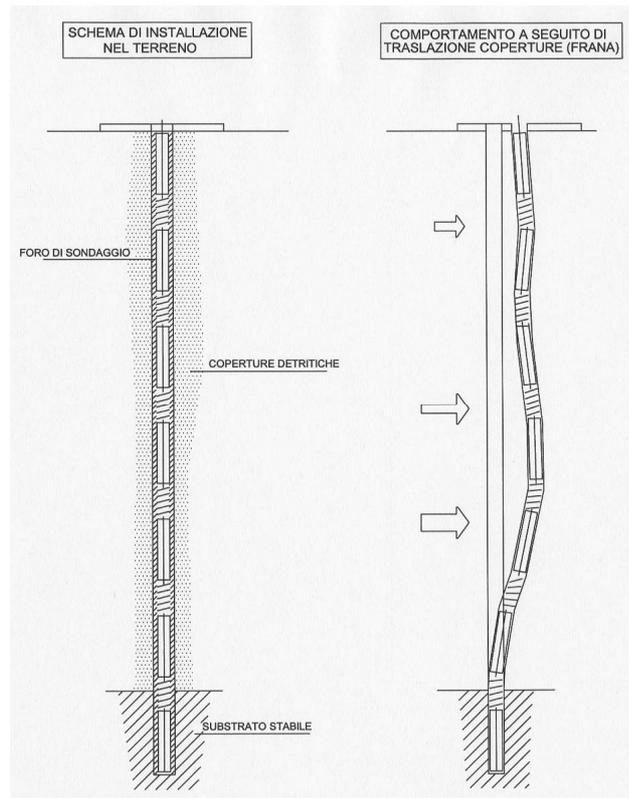


Figura 4.31 – Comportamento della sonda con la messa in opera (Lovisolo, 2011)

Al centro della colonna passa un cavo che collega i sensori installati nei moduli alla superficie, dove è posta l'unità di acquisizione.

Questa interroga i moduli 1 volta/minuto e, al termine di ogni ora, calcola la media di tutte le misure raccolte in quel periodo (Faletto et al., 2011) e la trasmette alla centrale di controllo in modalità GSM, inoltrando degli avvisi di allarme agli enti di protezione civile preposti nel caso di superamento di certe soglie di spostamento.

I dati vengono inviati al centro di monitoraggio dove i dati sono gestiti tramite 3 software (csgsrl.eu) (vedi Figura 4.32):

- DMS Guardian: Software 'sentinella' che si occupa delle operazioni automatiche, ossia lo scaricamento dei dati provenienti dall'unità di acquisizione, la loro memorizzazione e il loro caricamento nel server C.S.G. per rendere i dati accessibili tramite DMS Ew;
- GeoMaster: Software che comunica direttamente con la colonna inclinometrica, permettendo di definire la modalità di acquisizione, memorizzazione, elaborazione e trasmissione dei dati da parte dell'unità di acquisizione. A questa lo si collega tramite cavo oppure col server C.S.G tramite la rete.

- DMS Ew: Software per l'analisi dei dati che permette di visualizzare i dati di spostamento, velocità e accelerazione di ogni singolo nodo della colonna in ogni istante di acquisizione. Permette inoltre di vedere lungo l'intero profilo inclinometrico lo spostamento cumulato e differenziale sia totale che nelle due direzioni N-S e E-W. Questi dati possono essere elaborati o modificati e confrontati con le soglie di allarme.

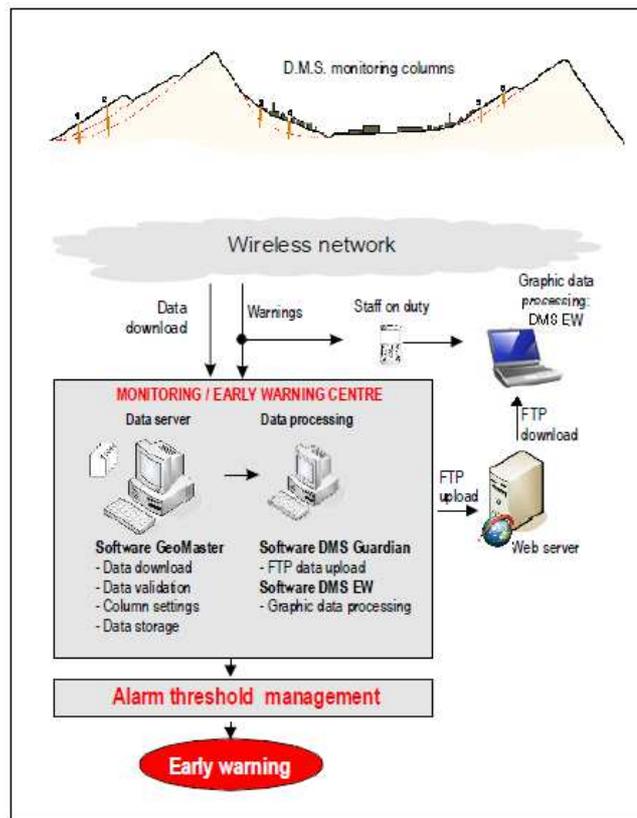


Figura 4.32 – Funzionamento del sistema di acquisizione e gestione dei dati rilevati dalla sonda DMS e del sistema di allerta. (Olivieri et al., 2012)

Lovisolò et al. (2005) hanno stimato l'accuratezza nella stima della posizione dell'ultimo modulo della sonda rispetto al modulo sommitale, prossimo alla superficie, su una lunghezza di 29m con moduli di lunghezza 1m.

Questa è risultata essere $\pm 0.5\text{mm}$ e, quindi, $\pm 0.002\text{mm/m}$.

Il confronto con l'accuratezza ottenuta da Mikkelsen et al. (2003), Dunnicliff & La Fonta (2001) e La Fonta & Beth (2002) tramite test su sonde inclinometriche tradizionali (Mikkelsen et al., 2003) e inclinometri fissi (Dunnicliff & La Fonta, 2001; La Fonta & Beth, 2002) (vedi Figura 4.33) dimostra un notevole aumento dell'accuratezza.

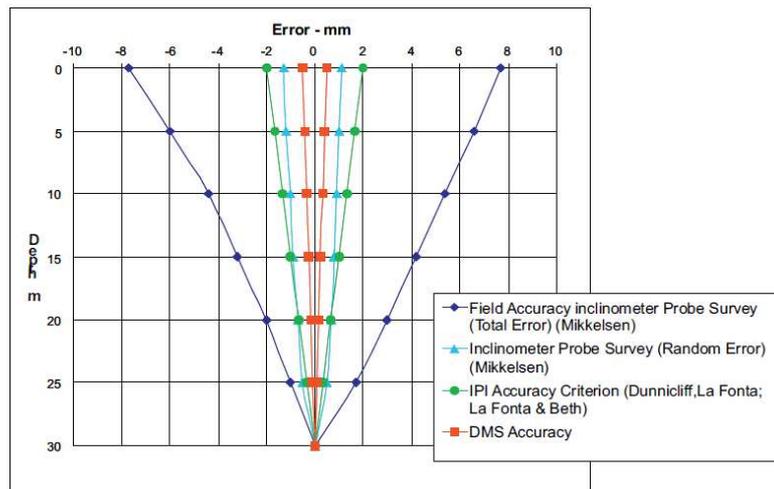


Figura 4.33 – Confronto dell'accuratezza in funzione della profondità tra la sonda DMS e gli inclinometri fissi e mobili.

(Olivieri et al., 2005)

Secondo Mikkelsen (2003), nello svolgimento delle misure inclinometriche tradizionali gli errori di misura sono suddivisibili in errore casuale ed errore sistematico.

L'errore casuale è costante per ogni campagna di misura e aumenta con il quadrato del numero di misure, permettendo la correzione mediando i risultati di più misure consecutive.

L'errore sistematico non è costante per ogni campagna di misura e aumenta aritmeticamente col numero di misure, attribuendogli quindi un peso maggiore nell'errore totale. Esso è costituito da vari fattori: il bias shift, il sensitivity drift, l'errore di rotazione e l'errore di posizionamento.

Il primo, il più comune, è dovuto alla differenza tra i risultati delle misure lungo lo stesso asse con rotazione tra l'una e l'altra della sonda di 180° gradi, ed è facilmente correggibile successivamente alla misura sommando un valore costante ad una delle 2 misure.

Il secondo, meno comune, consiste in una diminuzione della sensibilità della sonda nel tempo ed è correggibile con una nuova calibrazione dello strumento.

Il terzo è dovuto alla deformazione nel tempo del tubo inclinometrico e, quindi, delle guide A-B e C-D incise su di esso, deformazione tale da influenzare lo spostamento misurato, non più relativo alla direzione iniziale di una certa coppia di guide.

Il quarto, più difficile da correggere, si verifica nel momento in cui il tubo inclinometrico subisce deformazioni verticali, variando la lunghezza rispetto alla misura di zero.

Con l'utilizzo di una sonda fissa o di una colonna inclinometrica è possibile eliminare alcuni di questi errori sistematici, permanendo solamente il sensitivity drift oltre agli errori casuali.

Le specifiche tecniche della sonda DMS danno una risoluzione di 0.05° , una accuratezza di 0.02mm/m e una ripetibilità di $\pm 0.02^\circ$ (Lovisolò et al., 2005; Lovisolò, 2014).

Lo spostamento cumulato misurato dalla sonda in un breve periodo di tempo dove si suppone sia costante, come visibile in Figura 4.1 e in Figura 4.2, è interessato da una variazione attorno al valore medio di $\pm 0.2\text{mm}$.

Questo notevole disturbo potrebbe essere dovuto all'errore di linearità o all'errore di quantizzazione.

Il primo potrebbe essersi verificato a causa di una non corretta calibrazione della sonda in laboratorio prima della messa in opera. Questa è eseguita con una tavola rotante di Moore, con una camera climatica che varia la temperatura e con un test che varia la pressione cui è sottoposto l'inclinometro (Lovisolò, 2014).

Il secondo è legato alla scarsa risoluzione del convertitore analogico-digitale presente nell'unità di acquisizione installata in superficie vicino al tubo inclinometrico.

La sonda DMS è stata quindi confrontata con altri due modelli, messi in opera su altre due frane lente: la sonda inclinometrica fissa da foro OG310F, prodotta da OTR-Geo, e la colonna inclinometrica MUMS, prodotta da ASE.

La sonda OG310F è stata messa in opera presso la frana del Tessina e, osservando quanto riportato da Cola et al. (2016), la variabilità della velocità derivata dai dati non filtrati di spostamento ottenuti è minore di circa un ordine di grandezza rispetto a quella presente nei dati di Idro (vedi Figura 4.34).

Questa minor variabilità ha permesso di ottenere un dato di velocità derivata da spostamento filtrato più definito rispetto a quello ottenuto con i dati della frana di Idro.

Come visibile in Figura 4.35, la velocità di scorrimento, pur presentando una leggera oscillazione, mostra un'ottima corrispondenza con la fase di salita e la fase di discesa del livello di falda.

La catena inclinometrica MUMS (Modular Underground Monitoring System) è simile alla sonda DMS perché composta come una catena, lungo la quale sono posti più alloggiamenti per sensori inclinometrici, capaci di rilevare lo spostamento lungo un intero tubo inclinometrico.

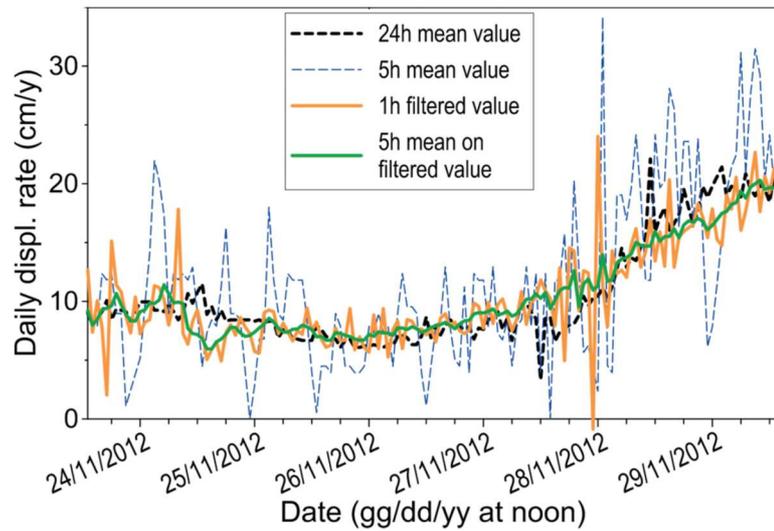


Figura 4.34 – Andamento della velocità mediata su 1h, 5h e 24h presso la frana del Tessina. (Cola et al., 2016)

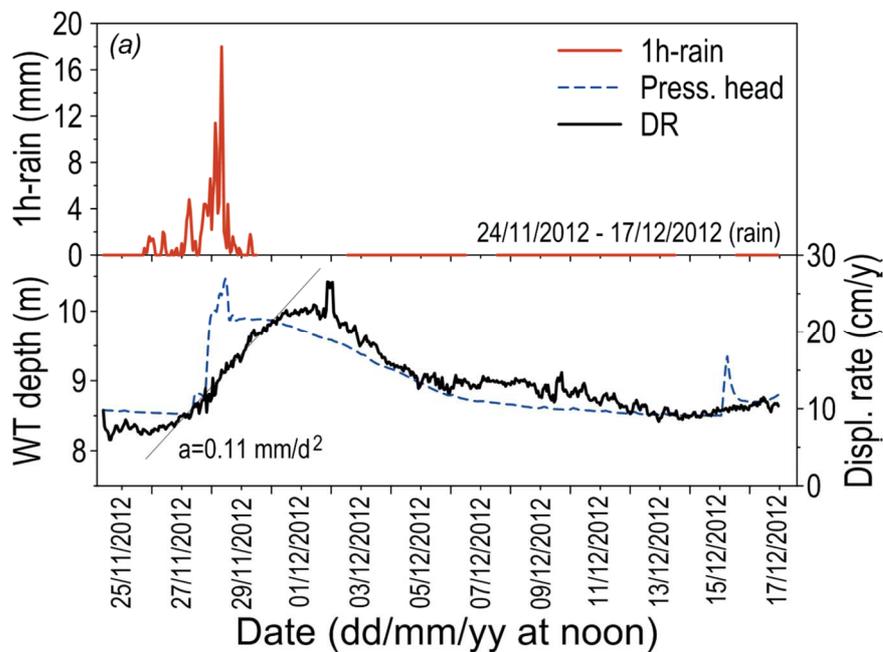


Figura 4.35 – Correlazione tra velocità di scorrimento e altezza di falda in occasione di un evento piovoso di notevole entità sulla frana del Tessina. (Cola et al., 2016)

Tale colonna può montare nodi essenzialmente di 2 tipi, in base ai sensori contenuti:

- Tilt Link: è inserito un sensore MEMS - Micro Electro Mechanical Sensor, costituito da un accelerometro 3D, un magnetometro 3D e un termometro;
- Tilt Link HR 3D: oltre al sensore MEMS, vi è inserita anche una cella elettrolitica e un altro sensore di temperatura.

L'accelerometro e il magnetometro permettono, rispettivamente, di definire la posizione del sensore rispetto alla direzione di accelerazione gravitazionale, ossia la verticale, e la sua orientazione rispetto al nord magnetico (Segalini et al., 2015).

La cella elettrolitica misura l'inclinazione di un nodo rispetto all'orizzontale e permette di ottenere un'accuratezza nella misura di spostamento, migliore rispetto a quella che otterrebbe il solo sensore MEMS (vedi Tabella 4.5).

In Figura 4.36 è mostrato il principio di funzionamento di una catena MUMS composta da nodi di tipologia Tilt Link.

In Figura 4.37 e Figura 4.38 sono mostrate delle sezioni, rispettivamente, dei nodi Tilt Link e Tilt Link HR 3D.

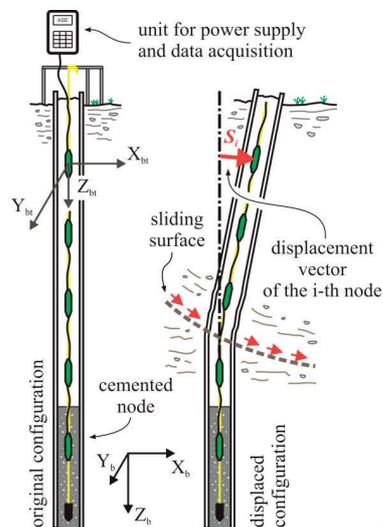


Figura 4.36 – Configurazione della colonna inclinometrica MUMS subito dopo l'installazione nel tubo inclinometrico e una volta che la frana ha deformato il tubo. Sono visibili il sistema di riferimento gravitazionale dei nodi e il vettore spostamento. (aseltid.eu)

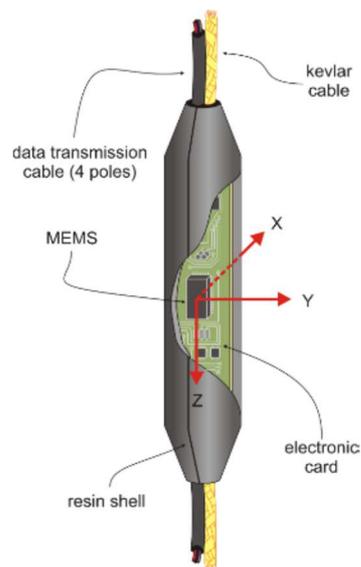


Figura 4.37 – Sezione di nodo Tilt Link con sensore MEMS. (aseltid.eu)

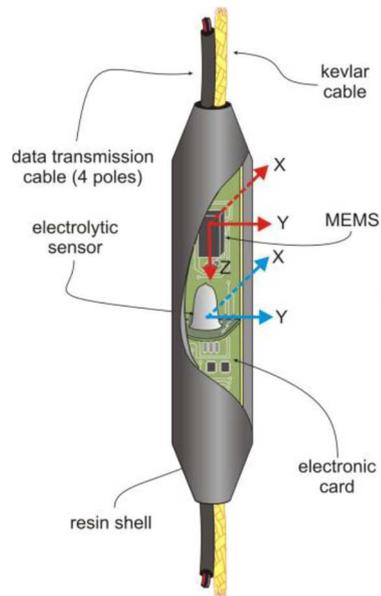


Figura 4.38 – Sezione di nodo Tilt Link HR 3D con sensore MEMS e cella elettrolitica. (aseltd.eu)

I nodi hanno una lunghezza ridotta, 12.5cm, e sono collegati tra loro da una corda in kevlar con resistenza alla trazione di 15kN e un cavo che permette di trasmettere i dati rilevati ad un datalogger posto in superficie.

I nodi possono essere posti a distanza variabile e gli ultimi 3/4 sono fissati sul fondo del tubo inclinometrico, posizionato nel substrato stabile, tramite una miscela cementizia (Segalini et al., 2015).

Ogni nodo fornisce lo spostamento rappresentativo della porzione di substrato compresa tra i punti medi del cavo superiore inferiore (aseltd.eu).

La calibrazione eseguita in laboratorio consiste in 3 tipologie di test: il confronto tra la deformazione misurata dalla catena stessa e quella rilevata con tecniche di fotogrammetria; un test a larga scala con la MUMS in una macchina per tilt test; taratura della risposta con la variazione della temperatura e con il restringimento del rivestimento in resina dei nodi (Segalini et al., 2013; Carri et al., 2015).

Tramite la calibrazione, i dati grezzi che la sonda fornisce presentano un errore sistematico ridotto.

Grazie alla cementazione degli ultimi nodi, le variazioni del segnale in uscita da essi dopo l'installazione si possono considerare con certezza come dovuti alla deriva della sensibilità (sensitivity drift).

Questo rumore si può sopporre costante per i nodi di una stessa catena, prodotti assieme e sottoposti alle stesse condizioni ambientali in sito, e viene quindi utilizzato per correggere la deriva (drift) di sensibilità di tutti i nodi tramite MatLab (Segalini et al., 2015).

Una catena MUMS è stata installata sopra il coronamento della frana di Boschetto (Parma), posizione monitorata per individuare eventuali movimenti precursori di una nuova attivazione della frana con estensione verso monte (Carri et al., 2016; Carri et al., 2015; Segalini et al., 2015). Grazie alla buona calibrazione e alla riduzione del rumore e della deriva di sensibilità, il dato finale di spostamento ottenuto è risultato abbastanza concorde con il comportamento del livello di falda (vedi Figura 4.39).

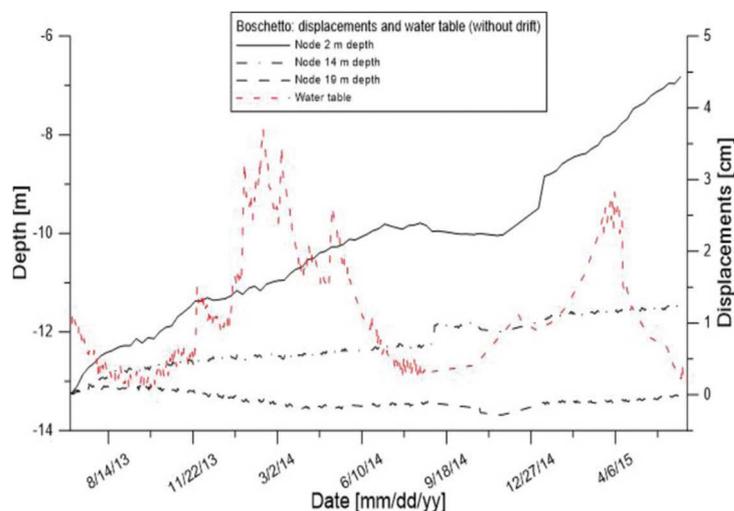


Figura 4.39 – Spostamento cumulato nel tempo da 3 nodi di una catena MUMS con installati nodi Tilt Link e misura del livello piezometrico presso la frana di Boschetto (Parma). (Carri et al., 2016)

Considerando le specifiche tecniche delle tre sonde inclinometriche esposte (Giuffredi et al., 2003; Lovisolo et al., 2014; Lovisolo et al., 2005; otr-geo.it; aseltd.eu), riassunte in Tabella 4.5, e visti i risultati di monitoraggi eseguiti con queste, si può evidenziare la grande versatilità delle colonne inclinometriche DMS e MUMS e la alta risoluzione della sonda inclinometrica fissa OG310F e del suo convertitore analogico-digitale.

La colonna MUMS è caratterizzata da un’ottima calibrazione in laboratorio prima della messa in opera in sito e dall’eliminazione del rumore e della deriva di sensibilità grazie alla cementazione dei nodi terminali.

La colonna DMS pur non essendo utile per l’analisi della velocità sul brevissimo termine (ore), fornisce dei buoni dati di spostamento e velocità sul medio e lungo termine, tali da consentire

un'ottima previsione della velocità basando i modelli sulla velocità media di lunghi periodi di tempo.

Tabella 4.5 – Confronto tra le specifiche tecniche salienti delle 3 tipologie di strumenti inclinometrici considerati

	DMS	OTR	MUMS Tilt Link	MUMS Tilt Link 3D
Fondo scala	±20°	±15°	±2g	±25°
Risoluzione	0.005°	0.001°	0.244g	0.003°
Accuratezza	0.002mm/m	\	0.2mm/m	0.02mm/m
Ripetibilità	±0.02°	\	±1%	±0.1°
Deriva termica	\	<0.02°/°C	±1%	±0.1°
Convertitore A/D	15 bit	16 bit	14 bit	16 bit

Conclusioni e sviluppi futuri

L'oggetto principale di studio, ossia il calcolo della velocità di scorrimento della frana in funzione dell'altezza di falda, è stato eseguito con maggior successo utilizzando dei modelli basati su una legge lineare e una legge esponenziale, con calibrazione dei relativi parametri eseguita sfruttando le medie mensili di altezza di falda e velocità ottenute grazie al monitoraggio.

Analizzando la velocità calcolata in base a questo per il periodo su cui è stata effettuata la calibrazione, l'errore che si ottiene è di circa 1 cm/anno, considerato accettabile.

Il lavoro eseguito - senza successo - nel tentativo di applicare un modello e una procedura di calcolo simile a quella di Cola et al. (2016) ha, tuttavia, permesso di individuare un problema di disturbo del dato spostamento grezzo, non risolvibile con la modalità di filtraggio utilizzata. Come esposto, la causa ipotizzata risiede probabilmente nella qualità della catena inclinometrica utilizzata o nel convertitore analogico-digitale del datalogger.

Sono state individuate altre due sonde inclinometriche, utilizzate per il monitoraggio di altre frane, che sembrano presentare un disturbo del dato fornito più limitato.

Nei prossimi lavori di aggiornamento della strumentazione di monitoraggio è previsto il recupero delle sonde inclinometriche fisse biassiali collocate nei tubi inclinometrici n.9, n.10 e n.11 mal funzionanti e la loro sostituzione con ricollocamento nei tubi n.9, n.10 e n.12.

Questi saranno tutti di nuova perforazione a fianco di quella già esistente, eccetto l'ultimo, caratterizzato da una nuova perforazione, ma in posizione diversa rispetto a quelle già effettuate in passato.

Le quote di collocamento saranno a cavallo della superficie di deformazione nota o da definire tramite campagne di misura tradizionale da eseguire nei primi mesi (tubo n.12).

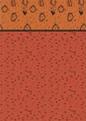
Inoltre sarà installato un datalogger con una scheda di conversione analogico/digitale caratterizzata da ben 24bit.

L'obiettivo secondario, ossia lo studio della correlazione temporale tra le piogge, la salita della falda, la sua escursione verticale e la velocità di scorrimento, ha evidenziato una notevole variabilità di questa.

Si ritiene che nei prossimi anni, grazie ad una più lunga serie temporale pluviometrica e di velocità di scorrimento sarà possibile eseguire un'analisi più puntuale.

Una serie temporale maggiore di dati consentirà anche una riduzione dell'errore del modello di calcolo della velocità.

Appendice 1

STRATIGRAFIA				Postazione: P2 I Pagina 2				
COMMITTENTE: ARPA Lombardia		CANTIERE : Paleofrana		MACCHINA: MAIT T-9				
LOCALITA': Idro (BS)		DATA: 03-05/01/2006		METODO PERE.: CAR. CONT.				
QUOTA INIZ.: P.C.		PROFONDITA': 63.50 m						
p.c.	Profondità		Colonna Stratigraf.	Descrizione dei terreni	R.Q.D	Livello Falda	Prove Pressiom.	SPT
	Q.rel. (m)	Spess. (m)			%	Quota	Quota	Quota N° colpi a: Punta aperta c: Punta chiusa
		32.30		Limo sabbioso con ghiaia di colore rosso-bruno mediamente addensato; presenti numerosi trovanti di natura siltitica e calcarenitica tra 2.00-4.00, tra 8.00-12.00, 16.00-20.00 metri				
		33.00		Limo sabbioso con ghiaia e ciottoli siltitici mediamente addensato.				
		35.00						
		37.00		Limo con ghiaia e qualche ciottolo debolmente argillosa di colore rossastro e a tratti grigio-verde scuro mediamente addensato.				
		40.00						
		45.00						
		50.00		Limo con ghiaia e ciottoli debolmente sabbioso addensato.				
		55.00		Limo sabbioso e ghiaioso con trovanti siltitici e calcarenitici mediamente addensato.				
		60.00						
m				Continua				

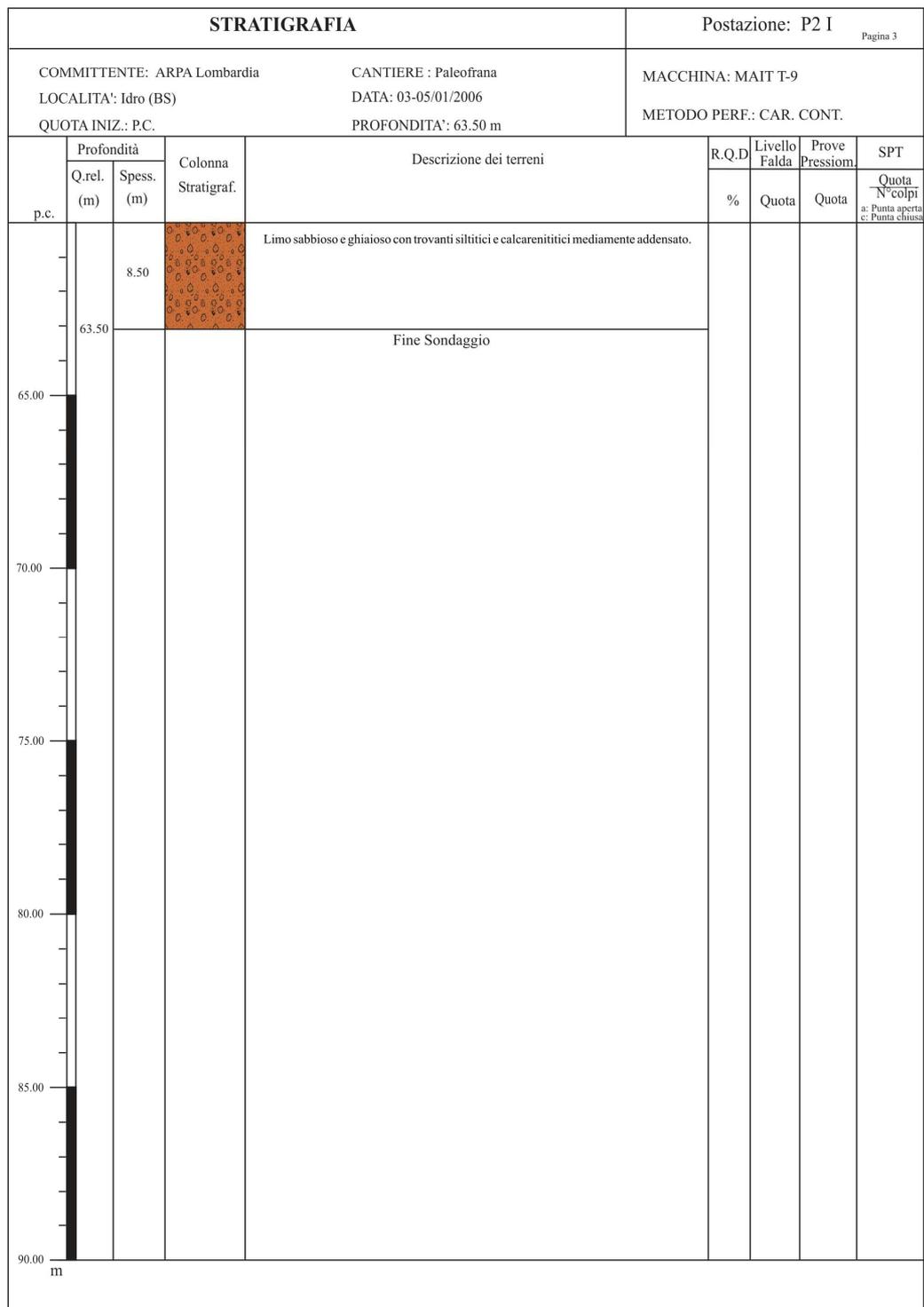


Figura A1.1 – Stratigrafia ottenuta dal sondaggio verticale realizzato per la posa del tubo inclinometrico IN2. (INGEO s.r.l., 2006)

STRATIGRAFIA				Postazione: P4 P Pagina 1									
COMMITTENTE: ARPA Lombardia		CANTIERE : Paleofrana		MACCHINA: MAIT T-9									
LOCALITA': Idro (BS)		DATA: 14-17/11/2005		METODO PERF.: CAR. CONT.									
QUOTA INIZ.: P.C.		PROFONDITA': 70 m											
p.c.	Profondità		Colonna Stratigraf.	Descrizione dei terreni	R.Q.D	Livello Falda	Prove Pressiom.	SPT					
	Q.rel. (m)	Spess. (m)			%	Quota	Quota	Quota N°colpi a: Punta aperta c: Punta chiusa					
5.00	0.40	0.40		Limo argilloso di colore rossastro con resti vegetali.									
		2.60		Limo argilloso di colore rossastro a media plasticità, debolmente ghiaioso e ciottoloso [CL].									
		3.00		Ghiaia e ciottoli siltitici e calcarenitici eterometrici, a spigoli vivi, con limo argilloso rossastro [GC].									
		4.00		Limo argilloso rossastro con ghiaia e ciottoli eterometrici sparsi; plasticità media [CI].									
		7.00		Limo argilloso rossastro con ghiaia e ciottoli eterometrici sparsi; plasticità media [CI].									
		8.80	0.40	Trovante calcarenitico grigio-rossastro a granulometria grossolana.					85%				
		9.20	0.10	Trovante di siltite rossastra.									
		9.30	1.30	Trovante di calcarenite grigio scuro con sfumature rossastre a granulometria medio-grossa e venature di calcite cristallina bianca; presente un livello calcerudítico.									
		10.00	10.60						Limo sabbioso debolmente argilloso di colore rossastro con ghiaia e ciottoli siltitici e calcarenitici sparsi (dmax= 5-6 cm) [CL].			12.00	
			4.80										
		15.40	0.80						Trovante di calcarenite di colore grigio con venature di calcite cristallina bianca e zonature calcerudítiche.	50%			
		16.20							Sabbia con limo da debolmente argilloso e a luoghi argilloso, di colore rossastro, con abbondante ghiaia e ciottoli sparsi, eterometrici di natura prevalentemente siltitica e subordinatamente calcarenitica. Plasticità da molto debole a nulla. Stato di addensamento medio. A partire da 18.00 metri materiale molto umido [SC]. Tra 24.00 - 24.50 e 25.50 - 26.50 ghiaia con sabbia limosa debolmente argillosa di colore rossastro da mediamente addensato ad addensata [GM]. Falda acquifera presente tra 18.00 e 25.00 metri circa.				18.00-18.45 20-32-38 (c)
		17.00											
	28.00	1.00		Limo sabbioso da debolmente argilloso ad argilloso con ghiaia e ciottoli sparsi debolmente plastico [ML].				24.00-24.33 10-42-R (c)					
	29.00	3.60					29.00						
30.00	Continua												

STRATIGRAFIA				Postazione: P4 P Pagina 2				
COMMITTENTE: ARPA Lombardia		CANTIERE : Paleofrana		MACCHINA: MAIT T-9				
LOCALITA': Idro (BS)		DATA: 14-17/11/2005		METODO PERF.: CAR. CONT.				
QUOTA INIZ.: P.C.		PROFONDITA': 70 m						
p.c.	Profondità		Colonna Stratigraf.	Descrizione dei terreni	R.Q.D	Livello Falda	Prove Pressiom.	SPT
	Q.rel. (m)	Spess. (m)			%	Quota	Quota	Quota N° colpi a: Punta aperta c: Punta chiusa
		3.60		Limo sabbioso con ghiaia e ciottoli debolmente argilloso, di colore rossastro, da mediamente addensato a d addensato [ML]. Presenti livelli dell'ordine del centimetro di limo argilloso rossastro [CL].				
	32.60	0.40		Ghiaia siltitica sabbioso-limosa di colore rossastro [GM].				
	33.00	0.50		Limo sabbioso con ghiaia e ciottoli, debolmente argilloso, di colore rossastro, da mediamente addensato ad addensato [ML].				
	33.50	0.70		Trovante di siltite rossastra a struttura sottilmente laminata.				
	34.20			Sabbia limosa debolmente argillosa con ghiaia e ciottoli sparsi, eterometrici, di colore rossastro [SC].				
	35.00	1.20		Limo sabbioso debolmente argilloso addensato con ghiaia eterometrica sparsa [ML].				
	35.40	1.30		Limo sabbioso debolmente argilloso addensato con ghiaia eterometrica sparsa [ML].				
	36.70	0.30		Ghiaia limosa rossastra [GM].				
	37.00			Limo con sabbia debolmente argillosa con ghiaia e ciottoli sparsi di colore rossastro, mediamente addensato [ML].				
	38.60	1.60		Limo con sabbia debolmente argillosa con ghiaia e ciottoli sparsi di colore rossastro, mediamente addensato [ML].				
	40.00	2.00		Ghiaia limosa e sabbiosa debolmente argillosa, da mediamente addensata ad addensata, di colore rossastro [GM].				
	40.60	0.30		Limo sabbioso di colore giallognolo addensato [ML].				
	40.90	1.10		Ghiaia e ciottoli siltitici grigio-scuro con limo sabbioso grigiastro-verdognolo da mediamente addensato ad addensato [GM]. Materiale bagnato.				
	42.00	0.30		Limo sabbioso giallognolo e verdognolo chiaro debolmente ghiaioso molto addensato, [ML].				
	42.30			Limo sabbioso giallognolo e verdognolo chiaro debolmente ghiaioso molto addensato, [ML].				
	43.40	1.10		Ghiaia e ciottoli in matrice limosa e sabbiosa di colore grigio chiaro, spigolosa, addensata. Presenti clasti calcarenitici grigio scuri. [GM]. Materiale bagnato.				
	45.00	5.20		Limo sabbioso e/o con sabbia debolmente argilloso grigio chiaro e a tratti rossastro, con ghiaia di varie dimensioni, spigolosa, di natura siltitica grigio scura; materiale da addensato a molto addensato [ML].				
	48.60	1.40		Limo con sabbia, argilloso, di colore grigio chiaro con tratti rossastri con ghiaia grigio scura di natura siltitica; materiale molto addensato [CL].				
	50.00	50.00		Limo argilloso, a tratti sabbioso, rossastro con ghiaia e ciottoli sparsi eterometrici e a spigoli vivi di natura siltitica debolmente plastico [CL].				
	55.00	20.00						
	60.00							

Continua

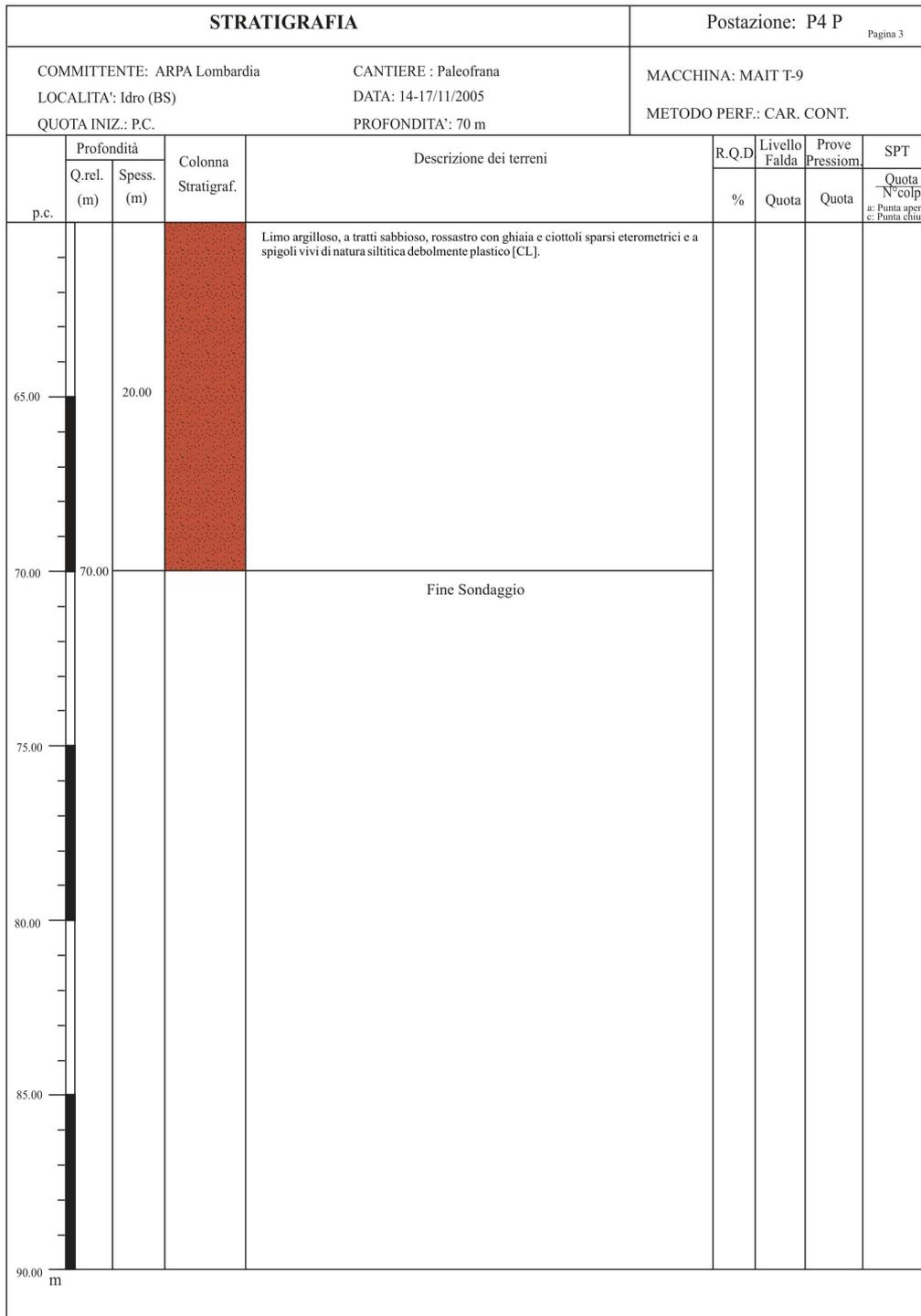


Figura A1.2 – Stratigrafia ottenuta dal sondaggio verticale realizzato per la posa del tubo piezometrico PZ4. (INGEO s.r.l., 2005)

STRATIGRAFIA						Postazione: P5 I		
COMMITTENTE: ARPA Lombardia		CANTIERE : Paleofrana		MACCHINA: MAIT T-9			Pagina 1	
LOCALITA': Idro (BS)		DATA: 10-12/01/2006		METODO PERF.: CAR. CONT.				
QUOTA INIZ.: P.C.		PROFONDITA': 43 m						
p.c.	Profondità		Colonna Stratigraf.	Descrizione dei terreni	R.Q.D.	Livello Falda	Prove Pressiom.	SPT
	Q.rel. (m)	Spess. (m)			%	Quota	Quota	Quota N° colpi a: Punta aperta c: Punta chiusa
	0.10	0.10		Terreno vegetale di colore bruno di natura limo-sabbioso.				
		2.50		Limo sabbioso di colore bruno-rossastro con ghiaia eterometrica, debolmente argilloso, poco addensato; presente debole plasticità [CL].				2.00-2.20 9-R (c)
	2.60	0.60		Trovante di siltite di colore grigiastro.				
	3.20	1.20		Limo sabbioso bruno, ghiaioso e mediamente addensato; plasticità media [ML].				
	4.40	0.30		Trovante di siltite grigio-rossastro a granulometria fine.				
5.00	4.70	2.30		Limo con ghiaia, sabbioso mediamente addensato di colore bruno a tratti rossastra; presenti ciottoli siltitici di colore rosa [ML].				
	7.00	0.60		Trovante di siltite rossastra a granulometria fine e a struttura laminata.				
	7.60	0.60		Ghiaia di natura siltitica eterometrica e a spigoli vivi di colore rossastra, limosa. [GM].				
	8.20	0.10		Trovante di siltite rossastra.				
	8.30	0.50		Ghiaia con limo, sabbiosa, di colore rossastro poco addensata [GM]				9.00-9.45 21-31-39 (c)
	8.80	1.70		Limo sabbioso, con ghiaia, debolmente argilloso; presente qualche ciottolo sparso di siltite rossastra di diametro medio di 5-6 cm [CL].				
10.00	10.50	0.50		Ghiaia con limo debolmente sabbiosa, di colore rossastro e mediamente addensata [GM].				
	11.00	0.25		Trovante di siltite di colore rossastro a grana fine e a struttura laminata sottilmente.				
	11.25	1.05		Ghiaia con limo debolmente sabbiosa di colore rossastro, mediamente addensato; i clasti sono di natura siltitica, eterometrica e spigolosi [GM].			12.00	
	12.30	1.30		Limo con ghiaia sabbioso, mediamente addensato; presente qualche ciottolo siltitico tra 13.40 13.60 [ML].				
	13.60	1.10		Ghiaia e ciottoli siltitici, limosa di colore rossastro [GM].				
	14.70	0.30		Trovante di siltite di colore rossastro a grana fine.				
15.00	15.00	1.00		Limo con ghiaia sabbioso di colore rossastro, addensato [ML].				15.00-15.33 29-48-R (c)
	16.00	0.10		Trovante di siltite di colore rossastro a grana fine.				
	16.10	0.90		Limo con ghiaia debolmente sabbiosa di colore rossastro, mediamente addensato [ML].				
	17.00	1.00		Ghiaia limosa e sabbiosa mediamente addensata, di colore rossastro [GM].				
	18.00	1.20		Limo sabbioso con ghiaia e blocchi siltitici di colore rossastro e mediamente addensato [ML].				
	19.20	0.80		Ghiaia e ciottoli siltitici bruno rossastri con limo sabbioso addensato [GM].				
20.00	20.00	0.50		Trovante di siltite di colore rossastro a grana fine.				
	20.50	0.90		Ghiaia con limo, sabbiosa, di colore rossastro, mediamente addensata [GM].				
	21.40	2.00		Ghiaia e ciottoli di natura siltitica, con limo, sabbiosa di colore rossastro e a luoghi grigio verdognolo, addensata. Livello limoso ghiaioso tra 22.20 22.60 metri. [GM]				22.00-22.05 R (c)
	23.40	0.50		Limo sabbioso con ghiaia siltitica, di colore rossastro e grigio, mediamente addensato [ML].				
	23.90	0.60		Trovante di siltite di colore rossastro.				
	24.50	0.50		Limo con ghiaia, sabbioso, mediamente addensato di colore grigio chiaro [ML].				
25.00	25.00	0.10		Ghiaia limosa di colore grigio chiaro, mediamente addensato [GM].				
	25.10	0.70		Limo ghiaioso e sabbioso di colore grigio con sfumature rossastre, addensato [ML].				
	25.30	0.30		Ghiaia limosa e sabbiosa mediamente addensata [GM].				
	25.60	1.60		Limo con ghiaia, sabbioso, di colore grigio-verdognolo, da mediamente addensato ad addensato [ML].				
	27.20	0.40		Ghiaia limosa di colore grigio chiaro mediamente addensata [GM].				27.50-27.71 29-R (c)
	27.60	1.20		Limo con ghiaia, sabbioso e debolmente argilloso tra 28.40 e 28.80, debolmente ciottoloso, di colore grigio chiaro tendente al rosso verso il basso, addensato [ML-CL].				
	28.80	1.20		Limo sabbioso e ghiaioso debolmente ciottoloso, di colore rossastro mediamente addensato [ML].				
	30.00						30.00	

Continua

STRATIGRAFIA				Postazione: P5 I Pagina 2				
COMMITTENTE: ARPA Lombardia		CANTIERE : Paleofrana		MACCHINA: MAIT T-9				
LOCALITA': Idro (BS)		DATA: 10-12/01/2006		METODO PERF.: CAR. CONT.				
QUOTA INIZ.: P.C.		PROFONDITA': 43 m						
p.c.	Profondità		Colonna Stratigraf.	Descrizione dei terreni	R.Q.D	Livello Falda	Prove Pressiom.	SPT
	Q.rel. (m)	Spess. (m)			%	Quota	Quota	Quota N° colpi a: Punta aperta c: Punta chiusa
		5.50		Limo con ghiaia debolmente ciottoloso e a luoghi debolmente argilloso, di colore rossastro da mediamente addensato ad addensato verso il basso [ML-CL].				
35.00	35.50	0.60		Limo con ghiaia e ciottoli sabbioso, addensato, di colore grigio e rossastro; presenti clasti sparsi di natura arenacei di colore ocra giallognolo per fenomeni di alterazione [ML].				
	36.10	2.50		Limo con ghiaia e ciottoli, sabbioso, addensato di colore rossastro [ML].				
	38.60	0.40		Trovante di siltite.				
	39.00							
40.00		3.20		Limo con ghiaia e ciottoli siltitica, sabbioso, di colore grigio, addensato; presenti clasti sparsi di natura arenacei di colore ocra giallognolo per fenomeni di alterazione [ML].				
	42.20	0.80		Limo con ghiaia e ciottoli debole argilloso di colore rossastro, addensato [CL].				
	43.00			Fine Sondaggio				
	45.00							
	50.00							
	55.00							
	60.00							

Figura A1.3 – Stratigrafia ottenuta dal sondaggio verticale realizzato per la posa del tubo inclinometrico IN5. (INGEO s.r.l., 2006)

STRATIGRAFIA				Postazione: P6 P				
COMMITTENTE: ARPA Lombardia		CANTIERE : Paleofrana		MACCHINA: MAIT T-9				
LOCALITA': Idro (BS)		DATA: 15-21/10/2005		METODO PERF.: CAR. CONT.				
QUOTA INIZ.: P.C.		PROFONDITA': 75 m						
p.c.	Profondità		Colonna Stratigraf.	Descrizione dei terreni	R.Q.D	Livello Falda	Prove Pressiom.	SPT
	Q.rel. (m)	Spess. (m)			%	Quota	Quota	Quota N°colpi a: Punta aperta c: Punta chiusa
		3.60		Silt argilloso di colore rossastro da debolmente a mediamente consistente, di plasticità media, con ghiaia eterometrica e subordinati ciottoli spigolosi, sparsi.				
	3.60	0.90		Blocco di siltite argillosa a laminazione sottile di colore rosso-bruno.				
	4.50	5.70		Silt argilloso rossastro debolmente consistente e a media plasticità con abbondante ghiaia e ciottoli sparsi.				8.00-8.26 22-R (c)
	10.20	0.20		Blocco lapideo di siltite rossastra.				
	10.40	2.00		Silt argilloso rossastro con al luoghi argilla prevalente, mediamente consistente e mediamente plastico con abbondante ghiaia eterometrica sparsa.				
	12.40	5.10		Ghiaia e ciottoli siltitici-argillosi di colore rossastro e raramente grigio scuri, in abbondante matrice siltosa e argillosa. Presenti rari clasti calcarenitici grigio scuri.				15.00-15.37 32-40-R (c)
	17.50	17.00		Silt argilloso debolmente sabbioso di colore rossastro, di consistenza media e a debole plasticità con ghiaia e ciottoli spigolosi sparsi a litologia siltitica e calcarenitica. Localmente diviene prevalente la frazione argillosa e a tratti quella ghiaiosa dove il materiale a grana fine finge da legante (21.50-23.20/24.00-25.00/27.00-28.50/30.00-31.00/33.00-34.50 mt).				20.00-20.45 12-25-44 (c)
	30.00							

Continua

STRATIGRAFIA				Postazione: P6 P Pagina 2				
COMMITTENTE: ARPA Lombardia		CANTIERE : Paleofrana		MACCHINA: MAIT T-9				
LOCALITA': Idro (BS)		DATA: 15-21/10/2005		METODO PERE: CAR. CONT.				
QUOTA INIZ.: P.C.		PROFONDITA': 75 m						
p.c.	Profondità		Colonna Stratigraf.	Descrizione dei terreni	R.Q.D	Livello Falda	Prove Pressioni	SPT
	Q.rel. (m)	Spess. (m)			%	Quota	Quota	Quota N° colpi a: Punta aperta c: Punta chiusa
		17.00		Silt argilloso debolmente sabbioso di colore rossastro, di consistenza media e a debole plasticità con ghiaia e ciottoli spigolosi sparsi a litologia siltitica e calcarenitica. Localmente diviene prevalente la frazione argillosa e a tratti quella ghiaiosa dove il materiale a grana fine funge da legante (21.50-23.20/24.00-25.00/27.00-28.50/30.00-31.00/33.00-34.50 mt).				32.00-32.04 R (c)
35.00	34.50	0.50		Blocco di arenaria siltitica rossastro.				
	35.00	0.90		Silt argilloso rossastro debolmente consistente con abbondante ghiaia eterometrica e ciottoli sparsi.				
	35.90	0.60		Blocco di siltite argillosa rossastro a lamine sottile.				
	36.50	0.70		Silt argilloso rossastro debolmente consistente con ghiaia.				
	37.20	0.40		Blocco siltitico rossastro.				
	37.60	0.90		Silt argilloso rossastro debolmente plastico con ghiaia.				
	38.50	0.50		Blocco di siltite rossastra laminata.				
40.00	39.00			Silt argilloso, localmente argilla con silt, debolmente sabbiosa, di colore rossastro, mediamente plastico con abbondante ghiaia e ciottoli. Presenti frammenti ghiaiosi arenaci grigiastri e ocra-giallognoli alterati. Rari clasti calcarenitici				45.00-45.21 29-R (c)
		16.40						
		55.40		Silt argilloso di colore brunastro, sabbioso, poco consistente con ghiaia e ciottoli di natura siltitica-arenacea di colore rossastro e ocra-giallognoli per fenomeni di alterazione. Debole plasticità.				
	57.00	1.60						
		7.00		Sabbia siltosa e argillosa di colore rosso-brunastro, da debolmente a per nulla plastica con ghiaia e subordinati ciottoli. Presenti clasti arenaci ocra-giallognoli per fenomeni di alterazione e rari clasti calcarenitici grigiastri.				
60.00								

Continua

STRATIGRAFIA				Postazione: P6 P				
COMMITTENTE: ARPA Lombardia		CANTIERE : Paleofrana		MACCHINA: MAIT T-9				
LOCALITA': Idro (BS)		DATA: 15-21/10/2005		METODO PERF.: CAR. CONT.				
QUOTA INIZ.: P.C.		PROFONDITA': 75 m						
p.c.	Profondità		Colonna Stratigraf.	Descrizione dei terreni	R.Q.D %	Livello Falda Quota	Prove Pressiom. Quota	SPT N° colpi
	Q.rel. (m)	Spess. (m)						
		7.00		Sabbia siltosa e argillosa di colore rosso-brunastro, da debolmente a per nulla plastica con ghiaia e subordinati ciottoli. Presenti clasti arenaci oca-giallognoli per fenomeni di alterazione e rari clasti calcarenitici grigiastri.				
	64.00	7.30		Sabbia siltosa brunastra debolmente argillosa a plasticità nulla con ghiaia.				
	70.00	3.70		Silt argilloso sabbioso di colore rosso-bruno, di consistenza media con ghiaia e ciottoli sparsi.				
	71.30							
	75.00			Fine Sondaggio				
	80.00							
	85.00							
	90.00							

Figura A1.4 – Stratigrafia ottenuta dal sondaggio verticale realizzato per la posa del tubo piezometrico PZ6. (INGEO s.r.l., 2005)



Committente: ARPA LOMBARDIA	Certificato n° 530/11
Località: Lago d'Ildro (Bs)	Verbale di accettazione n° 22/11
Il direttore del laboratorio Dott. Davide Cosentino	Lo sperimentatore Dott. P. Okely
	Data esecuzione: 23-25/05/2011
	Data emissione: 06/09/2011
	Sondaggio: P6-I-N

φ mm	R v	A r	S s	I	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	prove in foro	Standard Penetration Test m S.P.T.	Test N	RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	Cass.
					1											Terreno di riporto costituito da : limo argilloso debolmente sabbioso, consistente, umido, marrone rossastro. Presenti frustuli vegetali e ciottoli siltitici molto cementati.	
					2												
					2,2											Siltite, mediamente cementata, di colore rossastro, con struttura laminare, asciutta.	1
					3												
					3,0												
					3,7											Blocco di arenaria, di colore grigio rossastro, con struttura granulare medio fine, compatta, da fratturata a molto fratturata, con fratture riempite da calcite.	
					4												
					5												
					6												
					7												
					8												
					9												
					10												
					11												
					12												
					13												
					14												
					15												
					16												
					17												
					18												
					19												
					20												
					21												
					22												
					23												
					24												



Committente: ARPA LOMBARDIA		Certificato n° 530/11
Località: Lago d'Idro (Bs)		Verbale di accettazione n° 22/11
Il direttore del laboratorio Dott. Davide Cosentino	Lo sperimentatore Dott. P. Okely	Data esecuzione: 23-25/05/2011
		Data emissione: 06/09/2011
		Sondaggio: P6-I-N

ø mm	R v	A r	I s	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	PreL. % 0 --- 100	prove in foro	Standard Penetration Test m S.P.T.	Test N	RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	Cass.
				25											<p>Siltite, di colore rossastro, mediamente cementata, con struttura laminare, da molto frantumata a frantumata. Presente materiale detritico di riempimento costituito da limo argilloso a da clasti poligenici (argillitici, arenacei e calcarei). Tutto il livello si presenta da umido a molto umido e molto concistente. Presenti ciottoli di natura calcarea da 8.40m a 8.50m. Da 26.50m presenti numerosi inclusi millimetrici e centimetrici di natura gessifera e di colore biancastro. Da 39.20m a 39.50m trovante siltitico, molto cementato, con struttura laminare, di colore rossastro - vinaccio.</p>	5
				26												
				27												
				28												
				29												
				30												6
				31												
				32												
				33												
				34												
				35												
				36												
				37												
				38												
				39												
				40												
				41												
				42												
				43												
				44												
				45												
				46												
				47												
				48												



Committente: ARPA LOMBARDIA										Certificato n° 530/11					
Località: Lago d'Idro (Bs)										Verbale di accettazione n° 22/11					
Il direttore del laboratorio Dott. Davide Cosentino					Lo sperimentatore Dott. P. Okely					Data esecuzione: 23-25/05/2011					
										Data emissione: 06/09/2011					
										Sondaggio: P6-I-N					
Ø mm	R v	A r	I s	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	prove in foro	Standard Penetration Test m S.P.T.	RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	Cass.
				49										Siltite, di colore rossastro, mediamente cementata, con struttura laminare, da molto fratturata a frantumata. Presente materiale detritico di riempimento costituito da limo argilloso a da clasti poligenici (argillitici, arenacei e calcarei). Tutto il livello si presenta da umido a molto umido e molto consistente. Presenti ciottoli di natura calcarea da 8.40m a 8.50m. Da 26.50m presenti numerosi inclusi millimetrici e centimetrici di natura gessifera e di colore biancastro. Da 39.20m a 39.50m trovante siltitico, molto cementato, con struttura laminare, di colore rossastro - vinaccio.	10
				50											
				51											
				52											
				53									53,0	Siltite rossastra, con struttura debolmente laminare, molto cementata, molto fratturata, a luoghi frantumata, con fratture riempite da materiale detritico limoso - argilloso. Le fratture si presentano aperte e beanti, quelle aperte riempite da calcite.	11
				54											
				55											
				56											
				57									57,0	Calcarea debolmente marnosa, di colore grigio - verdastro, con struttura da compatta a poco laminata, molto fratturato, con fratture aperte e con inclinazione di circa 45°.	12
				58											
				59											
101				60									60,0		

Al termine della perforazione il foro è stato attrezzato con tubazione inclinometrica in alluminio fino a fondo foro. La cementazione dello strumento è stata eseguita con l'iniezione di miscela ternaria ACQUA-CEMENTO-BENTONITE-SABBIA, pompandola dal fondo foro in risalita a bassa pressione. Installato chiusino di protezione in ferro con lucchetto. Utilizzato carotiere doppio da 53.20m a 60.00m. Utilizzata corona diamantata da 55.00m a 60.00m.

Decreto di concessione n° 57211 del 05-11-2007, per il rilascio dei certificati relativi alle prove geotecniche sui terreni (settore C), ai sensi dell'art. 8 D.P.R. 246.

Normativa : A.G.I. 1977

Rilievo del livello dell'acqua nel corso della perforazione

Giorno	23/05/11														
Ora	sera														
Livello dell'acqua (m)	22,75														
Prof. perforazione(m)	27,00														
Prof. rivestimento(m)	21,00														

Figura A1.5 – Stratigrafia ottenuta dal sondaggio verticale realizzato per la posa del tubo inclinometrico IN6-N. (SONDENILE s.r.l., 2011)

STRATIGRAFIA				Postazione: P7 I				
COMMITTENTE: ARPA Lombardia		CANTIERE : Paleofrana		MACCHINA: MAIT T-9				
LOCALITA': Idro (BS)		DATA: 01-14/12/2005		METODO PERF.: CAR. CONT.				
QUOTA INIZ.: P.C.		PROFONDITA': 90 m						
p.c.	Profondità		Colonna Stratigraf.	Descrizione dei terreni	R.Q.D	Livello Falda	Prove Pressiom.	SPT
	Q.rel. (m)	Spess. (m)			%	Quota	Quota	Quota N° colpi a: Punta aperta c: Punta chiusa
	0.40	0.40		Limo con sabbia di colore rossastro con ghiaia, blocchi e subordinati ciottoli eterometrici sparsi, spigolosi, di natura siltitica e calcarenitica, mediamente addensato [ML].				
	1.00	0.60		Ghiaia limosa con ciottoli, eterometrica, di natura siltitica e calcarenitica di colore bruno-rossastro [GM].				
	1.50	0.50		Trovante di calcarenite fratturata bruno-rossastro con venature bianche di calcite cristallina.				
	3.00	3.00		Ghiaia limo-sabbiosa con ciottoli eterometrica, di colore bruno rossastro, di natura siltitica e calcarenitica, da mediamente addensata ad addensata. Presente un vuoto tra 2.30-2.50 metri. [GM]				
	4.50	0.50		Trovante di calcarenite fratturata di colore grigio-brunastro con vene calcistiche bianche, carotabile a blocchetti informi e dischetti.				
	5.00	0.15		Limo sabbioso rossastro con ghiaia siltitica sparsa, mediamente addensato [ML].				
	5.15	0.15		Trovante di calcarenite grigiastro carotabile a blocchetti informi.				
	5.30	0.55		Limo sabbioso di colore rossastro con abbondante ghiaia eterometrica, a spigoli vivi, mediamente addensato [ML].				
	5.85	0.20		Trovante di calcarenite grigio-brunastro.				
	6.00	0.40		Limo sabbioso di colore rossastro, mediamente addensato con ghiaia eterometrica sparsa, a spigoli vivi [ML].				
	6.40	0.40		Trovante di calcarenite fratturata carotabile a blocchetti informi.				
	6.80	0.40		Limo sabbioso di colore rossastro con abbondante ghiaia e ciottoli di varie dimensioni e di natura calcarenitica e siltitica, da mediamente addensata ad addensata. A luoghi ghiaia con limo sabbioso. [ML GM].				8.00-8.45 19-22-29 (c)
	10.00	10.00		Trovante calcarenitico molto fratturato di colore bruno-grigiastro con venature bianche di calcite cristallina.				
	11.20	1.20		Limo sabbioso con ghiaia e ciottoli eterometrici, a spigoli vivi, mediamente addensato [ML].				
	13.00	1.80		Ghiaia ciottolosa eterometrica, a spigoli vivi, con limo sabbioso di colore rossastro [GM].				13.50-13.55 R (c)
	14.40	1.40		Trovante siltitico di colore chiaro divenuto sabbia fine con il carotaggio.				
	15.00	0.60		Limo sabbioso con ghiaia di siltite, di colore rossastro, a luoghi debolmente ciottoloso, da mediamente addensato ad addensato [ML].				18.00-18.45 20-32-38 (c)
	20.00	5.00		Trovante di siltite di colore rossastro a lamine sottili.				
	20.50	0.50		Limo con sabbia/sabbioso debolmente argilloso, con ghiaia di varie dimensioni sparsa, a spigoli vivi, di natura prevalentemente siltitica [ML]; a luoghi strati di ghiaia limosa rossastro (tra 23.00-23.50, 26.00-26.50, 28.00-28.30) [GM].				
	25.00	12.00						
	30.00							

Continua

STRATIGRAFIA				Postazione: P7 I Pagina 2				
COMMITTENTE: ARPA Lombardia		CANTIERE : Paleofrana		MACCHINA: MAIT T-9				
LOCALITA': Idro (BS)		DATA: 01-14/12/2005		METODO PERF.: CAR. CONT.				
QUOTAINIZ.: P.C.		PROFONDITA': 90 m						
p.c.	Profondità		Colonna Stratigraf.	Descrizione dei terreni	R.Q.D	Livello Falda	Prove Pressiom.	SPT
	Q.rel. (m)	Spess. (m)			%	Quota	Quota	Quota N° colpi a: Punta aperta c: Punta chiusa
		12.00		Limo con sabbia/sabbioso debolmente argilloso, con ghiaia di varie dimensioni sparsa, a spigoli vivi, di natura prevalentemente siltitica [ML].				
		32.50		Ghiaia e ciottoli siltitici limoso-sabbiosa, di varie dimensioni, a spigoli vivi, mediamente addensata [GM].				
		34.00		Limo sabbioso, debolmente argilloso, con ghiaia di varie dimensioni di colore bruno-rossastro, da addensato a molto addensato; i clasti ghiaiosi sono a spigoli vivi e di natura prevalentemente siltitica; materiale asciutto. [CL].				
		35.00						
		40.00						
		43.70		Ghiaia con limo sabbioso di colore rossastro addensata [GM].				
		44.60		Limo sabbioso e ghiaioso, debolmente argilloso di colore rosso-bruno, mediamente				
		45.00						
		47.50		Ghiaia ciottolosa e sabbiosa con limo di colore rossastro addensata; materiale molto umido [GM].				
		50.00						
		51.50		Limo con sabbia e ghiaia, ciottoloso, da addensato a molto addensato verso il basso, di colore bruno-rossastro. I clasti ghiaiosi e ciottolosi sono prevalentemente siltitici e subordinatamente calcarenitici. Materiale da poco umido a secco verso il basso.				
		55.00						
		58.50		Trovante di siltite di colore rosa chiaro.				
		58.80		Limo sabbioso con ghiaia di varie dimensioni e a spigoli vivi, di colore rossastro e grigiastro, addensato [ML].				
		60.00						

Continua

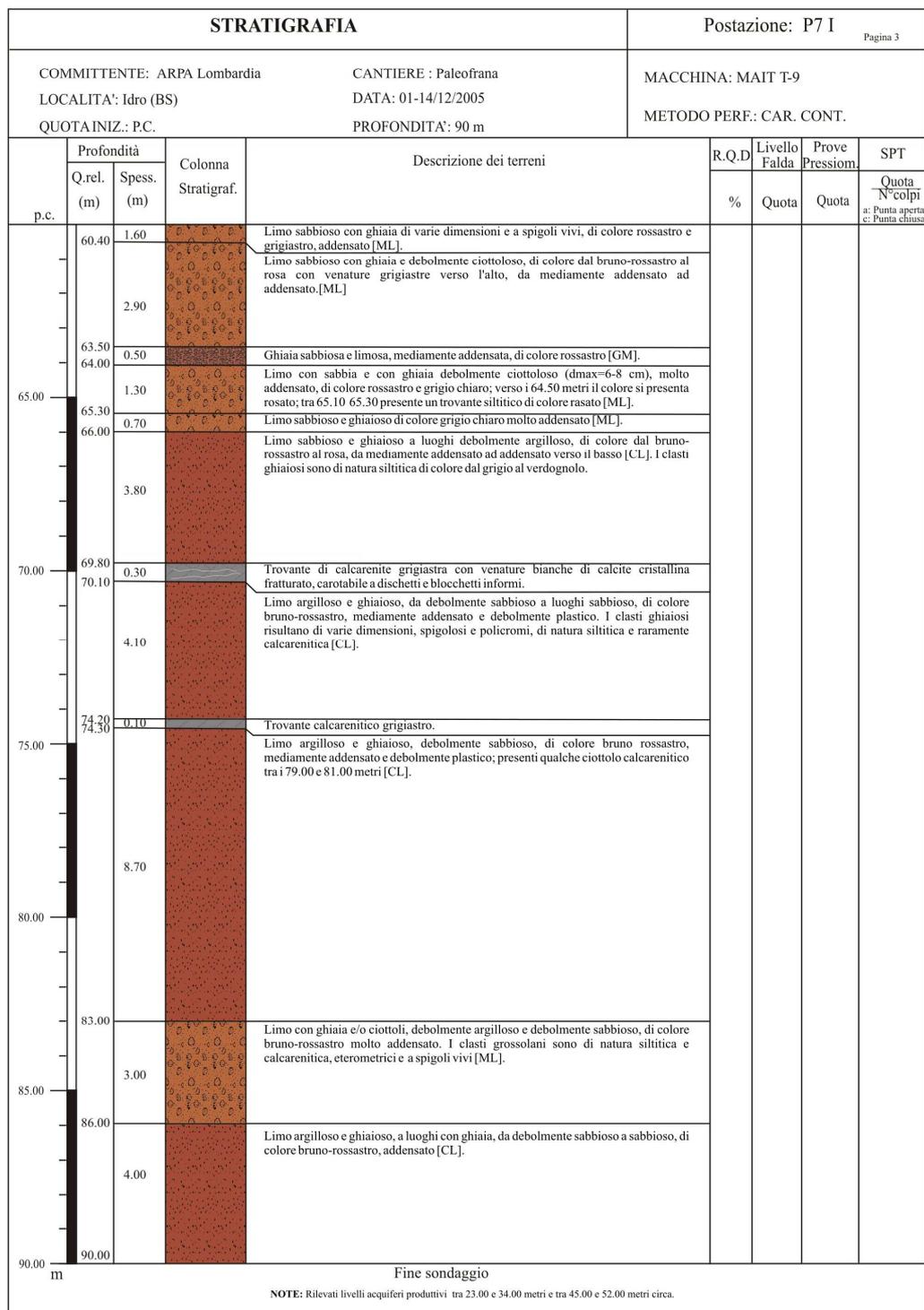


Figura A1.6 – Stratigrafia ottenuta dal sondaggio verticale realizzato per la posa del tubo inclinometrico IN7. (INGEO s.r.l., 2005)



Committente: ARPA LOMBARDIA	Certificato n°: 532/11
Località: Idro (Bs)	Verbale di accettazione n° 22/11
Il direttore del laboratorio Dott. Davide Cosentino	Data esecuzione: 03-17/05/2011
	Data emissione: 06/09/2011
	Sondaggio: P9-I
Lo sperimentatore Dott. P. Okely	

ø mm	R v	A r	I	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	prove in foro	Standard Penetration Test m	S.P.T. N	RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	Cass.
				1									1.0		Materiale di riporto : ghiaia e ciottoli in matrice limoso - sabbiosa, asciutta, molto addensata. I clasti e i ciottoli sono di natura arenacea e siltitica, da sub angolari a sub arrotondati, biancastri e rossastri.	1
				2		A) Rim < 2.50 2.90										
				3											Limo argilloso con ghiaia, da aciuato a poco umido, da molto consistente a duro, di colore rossastro. I clasti della frazione ghiaiosa sono di origine siltitica e argillitica, laminati, rossastri e grigio scuri, sub angolari . Presenti numerosi ciottoli siltitici con Ømax 6-7 cm Da 3.00m a 3.30m trovante siltitico, struttura laminare, mediamente cementato, rossastro. Da 7.20m a 7.30m ciottoli argillitici, struttura laminare, fratturati.	2
				4												
				5												
				6												
				7												
				8											3	
				9		B) Rim < 9.50 10.00										
				10												
				11											4	
				12		C) Rim < 11.70 12.00										
				13											5	
				14												
				15												
				16		D) Rim < 16.00 16.50										
				17									17.0			
				18										6		
				19		E) Rim < 19.50 20.00										
				20											7	
				21												
				22											8	
				23												
				24											6	
				25												
				26											7	
				27												
				28		F) Rim < 27.70 28.00							27.0	Blocco di arenaria, di colore grigio rossastra, con struttura granulare medio fine, da alterato a molto alterato, da fratturato a frantumato, con fratture riempite da calcite. La frazione frantumata presenta una matrice limo - argillosa, di colore rossastra, dura, poco umida - asciutta.	6	
				29												
				30									29.5	Siltite a luoghi argillite, rossastre, con struttura da laminare a compatta, da fratturata a molto fratturata, con fratture riempite da calcite, a luoghi frantumata con riempimento di matrice limo - argillosa, di colore rossastra. A luoghi sono presenti livelli di silt argilloso. Tutto lo strato si presenta da asciutto a poco umido, di colore rossastro e ocra, con livelli siltitici verdastri.	7	
				31		G) Rim < 31.30 31.60										
				32											8	
				33												
				34											8	
				35												
				36											8	



Committente: ARPA LOMBARDIA	Certificato n°: 532/11
Località: Idro (Bs)	Verbale di accettazione n°: 532/11
Il direttore del laboratorio Dott. Davide Cosentino	Data esecuzione: 03-17/05/2011
Lo sperimentatore Dott. P. Okely	Data emissione: 06/09/2011
	Sondaggio: P9-I

ø mm	R v	A r	I s	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	prove in foro	Standard Penetration Test S.P.T.	Test N	RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	Cass.
				37		H) Rim < 37,00 37,50									Siltite a luoghi argillite, rossastre, con struttura da laminare a compatta, da fratturata a molto fratturata, con fratture riempite da calcite, a luoghi frantumata con riempimento di matrice limo - argillosa, di colore rossastro. A luoghi sono presenti livelli di silt argilloso.	8
				38												
				39												
				40												
				41												
				42												
				43												
				44												
				45												
				46												
				47												
				48												
				49												
				50												
				51												
				52												
				53												
				54												
				55												
				56												
				57												
				58												
				59												
				60												
				61												
				62												
				63												
				64												
				65												
				66												
				67												
				68												
				69												
				70												
				71												
				72												



Committente: ARPA LOMBARDIA										Certificato n°: 532/11										
Località: Idro (Bs)										Verbale di accettazione n°: 22/11										
Il direttore del laboratorio Dott. Davide Cosentino					Lo sperimentatore Dott. P. Okely					Data esecuzione: 03-17/05/2011										
										Data emissione: 06/09/2011										
										Sondaggio: P9-I										
ø mm	R v	A r	I s	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Precl. % 0 --- 100	prove in foro	Standard Penetration Test m	S.P.T.	Est. N	RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	Cass.			
				73	[Lithology pattern: wavy lines]											Siltite a luoghi argillite, rossastre, con struttura da laminare a compatta, da fratturata a molto fratturata, con fratture riempite da calcite, a luoghi frantumata con riempimento di matrice limo - argillosa, di colore rossastra. A luoghi sono presenti livelli di silt argilloso. Tutto lo strato si presenta da asciutto a poco umido, di colore rossastro e ocre, con livelli siltitici verdastri.	15			
				74																
				75																
				76																
				77																
				78																
				79																
				80																
				81																
				82																
				83																
				84																
				85																
				86											85,1			Substrato costituito da calcare debolmente marnoso, di colore grigio - verdastro, con struttura da compatta a debolmente laminata, fratturata, con fratture riempite da calcite, a luoghi frantumata con riempimento di matrice limoso - argillosa. La famiglia principale di fratture ha inclinazione 45°.		
				87																
				88																
				89																
				90											90,0					

Al termine della perforazione il foro è stato attrezzato con tubazione inclinometrica in alluminio fino a fondo foro. La cementazione dello strumento è stata eseguita con l'iniezione di miscela ternaria ACQUA-CEMENTO-BENTONITE-SABBIA, pompandola dal fondo foro in risalita a bassa pressione. Il carotiere doppio è stato utilizzato alle quote : 13.00m-15.00m; 16.20m-19.00m; 27.00m-27.70m; 29.00m-34.00m; 35.00m-37.40m; 59.90m-60.40m; 88.00m-90.00m. Recupero fallito di campione indisturbato a quota 8.00m. Sono state effettuate tre prove di permeabilità di tipo Lefranc. Installato chiusino di protezione carrabile in ghisa.

Decreto di concessione n°: 57211 del 05-11-2007, per il rilascio dei certificati relativi alle prove geotecniche sui terreni (settore C), ai sensi dell'art. 8 D.P.R. 246.

Normativa : A.G.I. 1977

Rilievo del livello dell'acqua nel corso della perforazione

Giorno	03/05/11	04/05/11	10/05/11	12/05/11					
Ora	sera	mattina	sera	sera					
Livello dell'acqua (m)	20,85	22,10	27,50	assente					
Prof. perforazione(m)	22,50	22,50	45,00	72,00					
Prof. rivestimento(m)	21,00	21,00	45,00	61,50					

Figura A1.7 – Stratigrafia ottenuta dal sondaggio verticale realizzato per la posa del tubo inclinometrico IN9. (SONDENILE s.r.l., 2011)



Committente: ARPA LOMBARDIA	Certificato n° 535/11
Località: Idro (Bs)	Verbale di accettazione n° 22/11
Il direttore del laboratorio Dott. Davide Cosentino	Lo sperimentatore Dott. P. Okely
	Data esecuzione: 27-30/06/2011
	Data emissione: 06/09/2011
	Sondaggio: P10-Pz

φ mm	R v	A f	Pz	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	PreL. % 0 --- 100	prove in foro	Standard Penetration Test m S.P.T.	Test N	RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	Cass.
				1											<p>Argilla debolmente marnosa, a luoghi limosa, da dura a poco cementata, da asciutta ad umida, di colore rossastro. Presenti abbondanti clasti, ciottoli e rari blocchi di matrice siltitica, con struttura laminare, di dimensioni da centimetriche a decimetriche, di colore da rossastro a verdastro (Livello Caoticizzato). Da 35.00m a 36.90m e da 37.00m a 37.40m presenti livelli (blocchi) di calcare debolmente marnoso, di colore grigio e rossastro, con struttura compatta, da fratturato a frantumato, con fratture riempite da calcite e da materiale detritico di natura argilloso limosa, sub orizzontali. Presente ciottolo di natura gessifera, biancastro da 36.80m a 36.90m. Da 38.00m a 38.50m presenti clasti e ciottoli di natura calcareo arenacea, in debole matrice limosa, angolari. Da 41.00m a 41.70m presente blocco siltitico rossastro, con strie verdastre, struttura debolmente laminata, fratturato, con fratture meccaniche sub orizzontali.</p>	1
				2												
				3												
				4												
				5												
				6												2
				7												
				8												
				9												
				10												
				11												
				12												
				13												3
				14												
				15												
				16												
				17												
				18												
				19												
				20												
				21												
				22												
				23												
				24												5



Committente: ARPA LOMBARDIA		Certificato n°: 535/11
Località: Idro (Bs)		Verbale di accettazione n° 22/11
Il direttore del laboratorio Dott. Davide Cosentino		Data esecuzione: 27-30/06/2011
Lo sperimentatore Dott. P. Okely		Data emissione: 06/09/2011
		Sondaggio: P10-Pz

ø mm	R v	A f	S	Pz	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	prove in foro	Standard Penetration Test m S.P.T.	Test N	RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	Cass.
					25											Argilla debolmente marnosa, a luoghi limosa, da dura a poco cementata, da asciutta ad umida, di colore rossastro. Presenti abbondanti clasti, ciottoli e rari blocchi di matrice siltitica, con struttura laminare, di dimensioni da centimetriche a decimetriche, di colore da rossastro a verdastro (Livello Caoticizzato).	5
					26						Letranc CV					Da 35.00m a 36.90m e da 37.00m a 37.40m presenti livelli (blocchi) di calcare debolmente marnoso, di colore grigio e rossastro, con struttura compatta, da fratturato a frantumato, con fratture riempite da calcite e da materiale detritico di natura argilloso limosa, sub orizzontali.	6
					27											Presente ciottolo di natura gessifera, biancastro da 36.80m a 36.90m.	
					28											Da 38.00m a 38.50m presenti clasti e ciottoli di natura calcareo arenacea, in debole matrice limosa, angolari.	
					29		D) Dis	29,50 29,90								Da 41.00m a 41.70m presente blocco siltitico rossastro, con strie verdastre, struttura debolmente laminata, fratturato, con fratture meccaniche sub orizzontali.	7
					30												
					31												
					32												
					33												
					34												
					35												
					36												
					37												
					38												
					39		1) Maz	39,00 39,40									
					40												
					41												
					42												
					43												
					44												
					45												
					46												
					47												
					48												



Committente: ARPA LOMBARDIA										Certificato n° 535/11						
Località: Idro (Bs)										Verbale di accettazione n° 22/11						
Il direttore del laboratorio Dott. Davide Cosentino					Lo sperimentatore Dott. P. Okely					Data esecuzione: 27-30/06/2011						
										Data emissione: 06/09/2011						
										Sondaggio: P10-Pz						
ø mm	R v	A r	Pz s	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	prove in foro	Standard Penetration Test m S.P.T.	Test N	RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	Cass.
				49											Argilla debolmente marnosa, a luoghi limosa, da dura a poco cementata, da asciutta ad umida, di colore rossastro. Presenti abbondanti clasti, ciottoli e rari blocchi di matrice siltitica, con struttura laminare, di dimensioni da centimetriche a decimetriche, di colore da rossastro a verdastro (Livello Caoticizzato). Da 35.00m a 36.90m e da 37.00m a 37.40m presenti livelli (blocchi) di calcare debolmente marnoso, di colore grigio e rossastro, con struttura compatta, da fratturato a frantumato, con fratture riempite da calcite e da materiale detritico di natura argilloso limosa, sub orizzontali.	10
				50												
				51												
				52												
				53												
				54												
				55											Presente ciottolo di natura gessifera, biancastro da 36.80m a 36.90m. Da 38.00m a 38.50m presenti clasti e ciottoli di natura calcareo arenacea, in debole matrice limosa, angolari. Da 41.00m a 41.70m presente blocco siltitico rossastro, con strie verdastre, struttura debolmente laminata, fratturato, con fratture meccaniche sub orizzontali.	11
				56												
				57												
				58												
				59												
				60												
				61												
				62												
				63												
				64												
				65												

Eseguita n°1 prova di permeabilità di tipo Lefranc.
Nel foro sono state installate n°2 Piezometri tipo Cella Casagrande, rispettivamente a quota 54.00m da p.c. e 31.00m da p.c.
Utilizzato doppio carotiere con corona diamantata per un totale di metri 20.50.
Installato chiusino di protezione in ghisa carrabile.

Decreto di concessione n° 57211 del 05-11-2007, per il rilascio dei certificati relativi alle prove geotecniche sui terreni (settore C), ai sensi dell'art. 8 D.P.R. 246.

Normativa : A.G.I. 1977

Rilievo del livello dell'acqua nel corso della perforazione

Giorno	28/06/11	29/06/11							
Ora	mattina	mattina							
Livello dell'acqua (m)	33,50	assente							
Prof. perforazione(m)	38,00	54,00							
Prof. rivestimento(m)	36,00	51,00							

Figura A1.8 - Stratigrafia ottenuta dal sondaggio verticale realizzato per la posa del tubo piezometrico PZ10. (SONDEDILE s.r.l., 2011)



Committente: ARPA LOMBARDIA	Certificato n°: 537/11
Località: Idro (BS)	Verbale di accettazione n°: 22/11
Il direttore del laboratorio Dott. Geol. D. Cosentino	Lo sperimentatore Dott. Geol. P. Okely
	Data esecuzione: 11-15.07.2011
	Data emissione: 06/09/2011
Sondaggio: P11-Pz	

ø mm	R v	A r	Pz s	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T.		RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE
										S.P.T. N	S.P.T.			
				1										Terreno rimaneggiato costituito da limo argilloso debolmente sabbioso fine con clasti centimetrici di origine siltitica e calcarea, umido, molto consistente, di colore rossastro.
				2										
				3										Trovante di origine siltitica, con struttura laminata, fratturato, in debole matrice limosa.
				4										Argilla limosa con ghiaia, umida, molto consistente, rossastra.
				5										Argilla debolmente sabbiosa fine, con clasti centimetrici, umida, molto consistente, di colore rossastro, con livelli verdastri.
				6										Clasti di natura siltitica e calcarea, subangolari. Presenti diffusi ciottoli e blocchi di natura siltitica, con struttura laminata, fratturati e frantumati, con riempimenti di calcite.
				7										Tra 20.50 m e 21.00 m, blocco di natura arenacea.
				8										
				9		1) Maz < 9,00 9,50								
				10										
				11										
				12										
				13										
				14		2) Maz < 14,00 14,50								
				15										
				16										
				17										
				18										
				19										
				20										
				21										
				22										
				23										
				24										



Committente: ARPA LOMBARDIA	Certificato n° 537/11
Località: Idro (BS)	Verbale di accettazione n° 22/11
Il direttore del laboratorio Dott. Geol. D. Cosentino	Data esecuzione: 11-15.07.2011
	Data emissione: 06/09/2011
	Sondaggio: P11-Pz
Lo sperimentatore Dott. Geol. P. Okely	

φ mm	R v	A r	S	Pz	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T.		RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE
											S.P.T.	N			
					25										<p>Argilla debolmente sabbiosa fine, con clasti centimetrici, umida, molto consistente, di colore rossastro, con livelli verdastri. Clasti di natura siltitica e calcarea, subangolari. Presenti diffusi ciottoli e blocchi di natura siltitica, con struttura laminata, fratturati e frantumati, con riempimenti di calcite. Tra 20.50 m e 21.00 m, blocco di natura arenacea.</p>
					26										
					27										
					28										
					29										
					30										
					31										
					32										
					33										
					34										
					35										
					36										
					37										
					38										
					39										
					40										
					41										
					42										
					43										
					44										
					45										
					46										
					47										
					48										



Committente: ARPA LOMBARDIA	Certificato n°: 537/11
Località: Idro (BS)	Verbale di accettazione n° 22/11
Il direttore del laboratorio Dott. Geol. D. Cosentino	Data esecuzione: 11-15.07.2011
Lo sperimentatore Dott. Geol. P. Okely	Data emissione: 06/09/2011
	Sondaggio: P11-Pz

ø mm	R v	A r	Pz s	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T.		RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	
										S.P.T.	N				
101															
				49											Argilla debolmente sabbiosa fine, con clasti centimetrici, umida, molto consistente, di colore rossastro, con livelli verdastri. Clasti di natura siltitica e calcarea, subangolari. Presenti diffusi ciottoli e blocchi di natura siltitica, con struttura laminata, fratturati e frantumati, con riempimenti di calcite. Tra 20.50 m e 21.00 m, blocco di natura arenacea.
				50											
				51											
				52											
				53											
				54											
				55											
				56											
				57											
				58											
				59											
				60											
				61											
				62											
				63											
				64											
				65											
															65,0

Durante la perforazione tra 20.00 m e 21.00 m, tra 27.00 m e 28.00 m, tra 31.50 m e 32.20 m, tra 37.50 m e 38.00 m, tra 51.70 m e 52.10 m e tra 54.50 m e 55.00 m, è stato utilizzato il doppio carotiere T6 (diametro 101 mm) fornito di corona diamantata.

Prelevati n°2 Campioni indisturbati tipo Mazier.

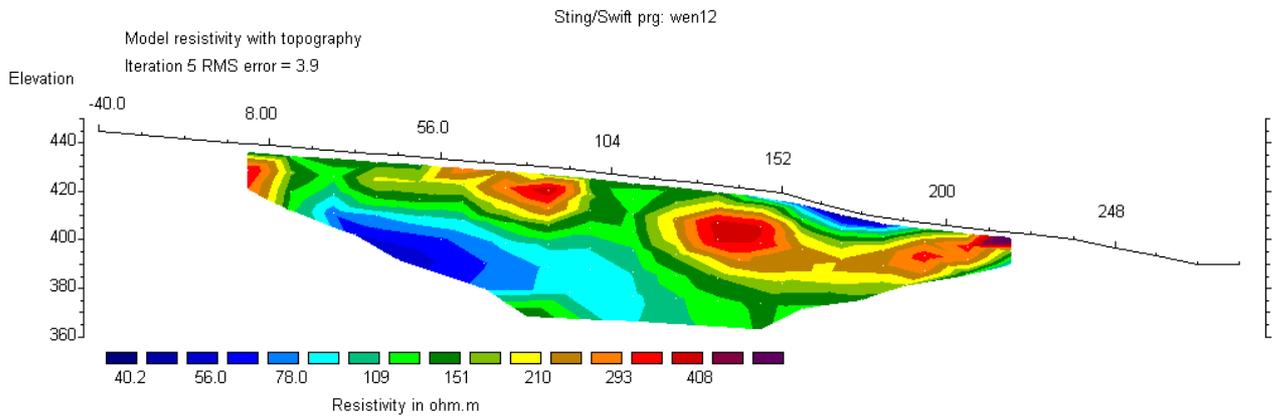
Al termine della perforazione sono state installate n°2 celle di Casagrande (1.5"), rispettivamente alla profondità di 57.00 m dal p.c. e 21.00 m dal p.c.

Installato chiusino di protezione in ferro con lucchetto.

Decreto di concessione n°: 57211 del 05-11-2007, per il rilascio dei certificati relativi alle prove geotecniche sui terreni (settore C), ai sensi dell'art. 8 D.P.R. 246.

Normativa : A.G.I. 1977

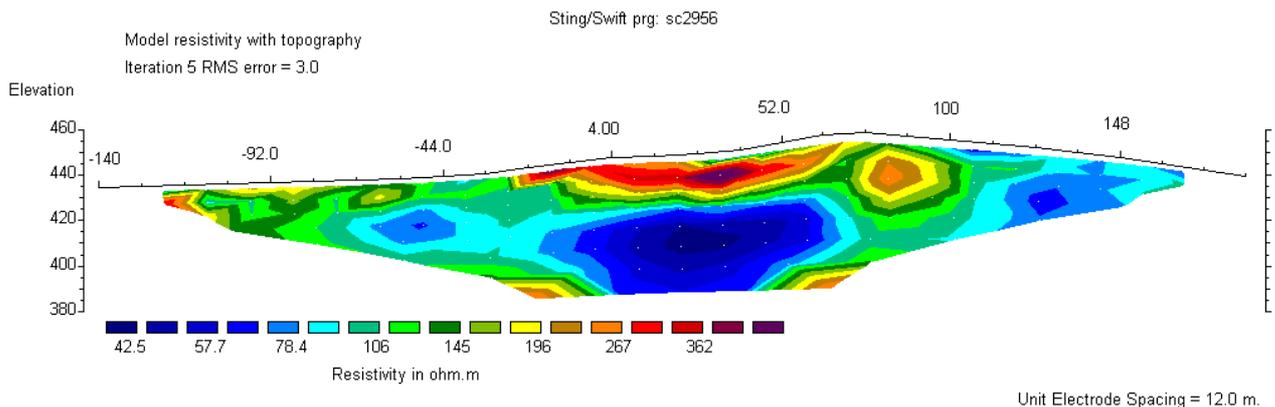
Figura A1.9 – Stratigrafia ottenuta dal sondaggio verticale realizzato per la posa del tubo piezometrico PZ11. (SONDENILE s.r.l., 2011)



Horizontal scale is 34.11 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.68
First electrode is located at -40.0 m.
Last electrode is located at 284.0 m.

idro1 p3-p4-p1

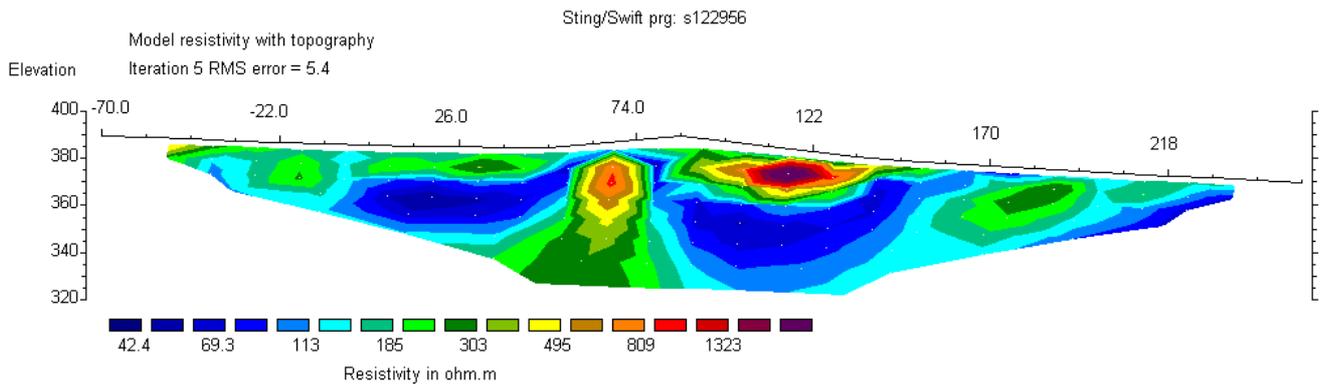
Figura A1.10 – Sezione derivata dalla tomografia elettrica eseguita presso lo stendimento Idro 1. (INGEO s.r.l., 2005-2006)



Horizontal scale is 34.11 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.64
First electrode is located at -140.0 m.
Last electrode is located at 184.0 m.

idro2 p6-p3-p7

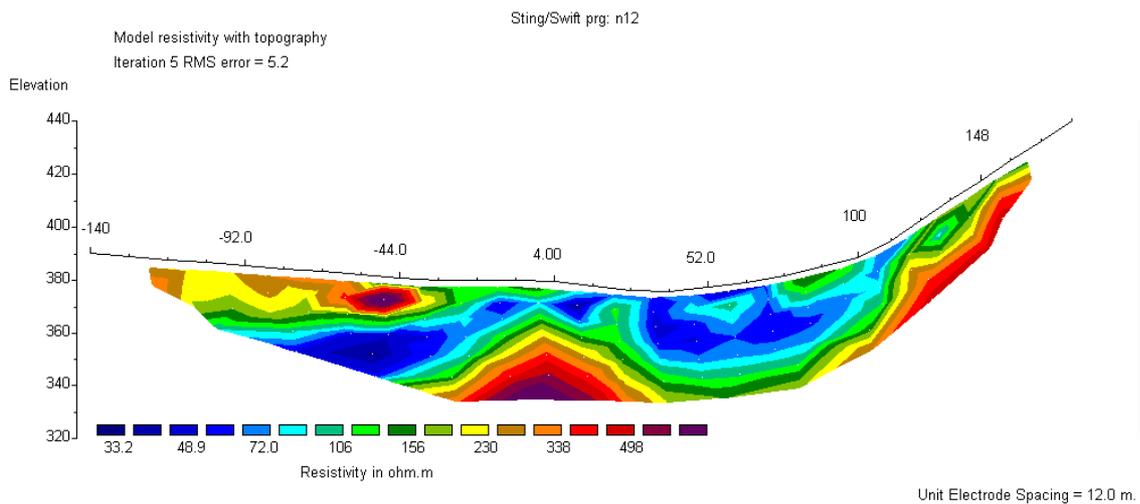
Figura A1.11 – Sezione derivata dalla tomografia elettrica eseguita presso lo stendimento Idro 2. (INGEO s.r.l., 2005-2006)



Horizontal scale is 34.11 pixels per unit spacing
 Vertical exaggeration in model section display = 0.64
 First electrode is located at -70.0 m.
 Last electrode is located at 254.0 m.

idro 3 p2-inclinometro

Figura A1.12 – Sezione derivata dalla tomografia elettrica eseguita presso lo stendimento Idro 3. (INGEO s.r.l., 2005-2006)



Horizontal scale is 34.11 pixels per unit spacing
 Vertical exaggeration in model section display = 0.83
 First electrode is located at -140.0 m.
 Last electrode is located at 184.0 m.

idro 4 p2-p5-montagna quota 440

Figura A1.13 – Sezione derivata dalla tomografia elettrica eseguita presso lo stendimento Idro 4. (INGEO s.r.l., 2005-2006)

Appendice 2

a)

COMMITTENTE: Arpa Lombardia			
RIFERIMENTO: Idro (BS)			
SONDAGGIO: P7	CAMPIONE: A	PROFONDITA': m	61.5-62.0

MODULO RIASSUNTIVO

CARATTERISTICHE FISICHE

Umidità naturale	13,4	%
Peso di volume		kN/m ³
Peso di volume secco		kN/m ³
Peso di volume saturo		kN/m ³
Peso specifico	2,76	
Indice dei vuoti		
Porosità		%
Grado di saturazione		%
Limite di liquidità	38,6	%
Limite di plasticità	25,5	%
Indice di plasticità	13,1	%
Indice di consistenza	1,92	
Passante al set. n° 40	NO	
Limite di ritiro		%
Classif. CNR-UNI		

ANALISI GRANULOMETRICA

Ghiaia	0,7	%
Sabbia	35,2	%
Limo	24,2	%
Argilla	39,9	%
D 10		mm
D 50	0,018505	mm
D 60	0,051647	mm
D 90	0,349534	mm
Passante set. 10	99,3	%
Passante set. 40	92,9	%
Passante set. 200	64,1	%

PERMEABILITA'

Coefficiente k	cm/sec
----------------	--------

COMPRESSIONE

σ	kPa	σ Rim	kPa
----------	-----	--------------	-----

SCISSOMETRO

τ	kPa	τ	kPa
--------	-----	--------	-----

TAGLIO TORSIONALE

Prova consolidata-lenta					
c Picco	2,4	kPa	ϕ Picco	18,4	°
c Res	0,1	kPa	ϕ Res	17,4	°

COMPRESSIONE TRIASSIALE

C.D.	c_d	kPa	ϕ_d	°
C.U.	c'_{cu}	kPa	ϕ'_{cu}	°
	c_{cu}	kPa	ϕ_{cu}	°
U.U.	c_u	kPa	ϕ_u	°

PROVA EDOMETRICA

σ kPa	E kPa	Cv cm ² /sec	k cm/sec
6,3 ÷ 12,5	455	0,000357	7,70E-08
12,5 ÷ 25,0	519	0,000326	6,16E-08
25,0 ÷ 50,0	711	0,000373	5,15E-08
50,0 ÷ 100,0	1410	0,000524	3,64E-08
100,0 ÷ 200,0	2543	0,000572	2,21E-08
200,0 ÷ 400,0	5042	0,000515	1,00E-08
400,0 ÷ 800,0	10502	0,000460	4,29E-09

Argilla con sabbia limosa, di colore rossastro.

b)

COMMITTENTE: Arpa Lombardia		
RIFERIMENTO: Idro (BS)		
SONDAGGIO: P7	CAMPIONE: B	PROFONDITA': m 70.6-71.0

MODULO RIASSUNTIVO

CARATTERISTICHE FISICHE

Umidità naturale	19,8	%
Peso di volume	19,1	kN/m ³
Peso di volume secco	15,9	kN/m ³
Peso di volume saturo	19,9	kN/m ³
Peso specifico	2,72	
Indice dei vuoti	0,672	
Porosità	40,2	%
Grado di saturazione	79,8	%
Limite di liquidità	38,4	%
Limite di plasticità	27,1	%
Indice di plasticità	11,3	%
Indice di consistenza	1,65	
Passante al set. n° 40	NO	
Limite di ritiro		%
Classif. CNR-UNI		

ANALISI GRANULOMETRICA

Ghiaia	27,0	%
Sabbia	27,4	%
Limo	17,1	%
Argilla	28,5	%
D 10		mm
D 50	0,145831	mm
D 60	0,525620	mm
D 90	7,897217	mm
Passante set. 10	73,0	%
Passante set. 40	58,1	%
Passante set. 200	45,6	%

PERMEABILITA'

Coefficiente k	cm/sec
----------------	--------

COMPRESSIONE

σ	kPa	σ Rim	kPa
----------	-----	--------------	-----

SCISSOMETRO

τ	kPa	τ	kPa
--------	-----	--------	-----

TAGLIO TORSIONALE

Prova consolidata-lenta			
c Picco	5,7	kPa	ϕ Picco 28,7 °
c Res	0,6	kPa	ϕ Res 27,4 °

COMPRESSIONE TRIASSIALE

C.D.	c_d	kPa	ϕ_d	°
C.U.	c'_{cu}	kPa	ϕ'_{cu}	°
	c_{cu}	kPa	ϕ_{cu}	°
U.U.	c_u	kPa	ϕ_u	°

PROVA EDOMETRICA

σ kPa	E kPa	Cv cm ² /sec	k cm/sec
6,3 ÷ 12,5	931	0,000228	2,40E-08
12,5 ÷ 25,0	873	0,000225	2,53E-08
25,0 ÷ 50,0	1123	0,000283	2,47E-08
50,0 ÷ 100,0	1495	0,000414	2,71E-08
100,0 ÷ 200,0	2747	0,000463	1,65E-08
200,0 ÷ 400,0	6392	0,000681	1,04E-08
400,0 ÷ 800,0	12312	0,000579	4,61E-09

Argilla con sabbia e ghiaia, debolmente limosa, di colore grigio.

3
25030

Software SGEO - Mod. 2011

a)

COMMITTENTE: Arpa Lombardia		
RIFERIMENTO: Idro (BS)		
SONDAGGIO: P9	CAMPIONE: A	PROFONDITA': m 2.0-2.4

MODULO RIASSUNTIVO

CARATTERISTICHE FISICHE

Umidità naturale	11,7	%
Peso di volume	19,1	kN/m ³
Peso di volume secco	17,1	kN/m ³
Peso di volume saturo	20,8	kN/m ³
Peso specifico	2,81	
Indice dei vuoti	0,611	
Porosità	37,9	%
Grado di saturazione	53,8	%
Limite di liquidità	44,9	%
Limite di plasticità	28,1	%
Indice di plasticità	16,8	%
Indice di consistenza	1,98	
Passante al set. n° 40	NO	
Limite di ritiro		%
Classif. CNR-UNI		

ANALISI GRANULOMETRICA

Ghiaia	62,1	%
Sabbia	20,6	%
Limo	8,7	%
Argilla	8,6	%
D 10	0,008331	mm
D 50	6,846786	mm
D 60	10,472610	mm
D 90	21,301880	mm
Passante set. 10	37,9	%
Passante set. 40	27,0	%
Passante set. 200	17,3	%

PERMEABILITA'

Coefficiente k	cm/sec
----------------	--------

COMPRESSIONE

σ	kPa	σ_{Rim}	kPa
----------	-----	----------------	-----

SCISSOMETRO

τ	kPa	τ	kPa
--------	-----	--------	-----

TAGLIO TORSIONALE

Prova consolidata-lenta					
c Picco	3,5	kPa	ϕ Picco	26,6	°
c Res	0,2	kPa	ϕ Res	24,0	°

COMPRESSIONE TRIASSIALE

C.D.	c_d	kPa	ϕ_d	°
C.U.	c'_{cu}	kPa	ϕ'_{cu}	°
	c_{cu}	kPa	ϕ_{cu}	°
U.U.	c_u	kPa	ϕ_u	°

PROVA EDOMETRICA

σ kPa	E kPa	Cv cm ² /sec	k cm/sec
6,3 ÷ 12,5	216	0,000193	8,76E-08
12,5 ÷ 25,0	360	0,000182	4,96E-08
25,0 ÷ 50,0	498	0,000218	4,30E-08
50,0 ÷ 100,0	1011	0,000589	5,71E-08
100,0 ÷ 200,0	2217	0,000523	2,31E-08
200,0 ÷ 400,0	4543	0,000439	9,48E-09
400,0 ÷ 800,0	9950	0,000677	6,67E-09

Ghiaia sabbiosa, in scarsa matrice limoso argillosa, di colore violaceo.

1
25020

Software SGEO - Mod. 2011

b)

COMMITTENTE: Arpa Lombardia			
RIFERIMENTO: Idro (BS)			
SONDAGGIO: P9	CAMPIONE: B	PROFONDITA': m	9.5-10.0

MODULO RIASSUNTIVO

CARATTERISTICHE FISICHE

Umidità naturale	10,3	%
Peso di volume	20,3	kN/m ³
Peso di volume secco	18,4	kN/m ³
Peso di volume saturo	21,4	kN/m ³
Peso specifico	2,73	
Indice dei vuoti	0,456	
Porosità	31,3	%
Grado di saturazione	61,6	%
Limite di liquidità	38,9	%
Limite di plasticità	28,7	%
Indice di plasticità	10,2	%
Indice di consistenza	2,81	
Passante al set. n° 40	NO	
Limite di ritiro		%
Classif. CNR-UNI		

ANALISI GRANULOMETRICA

Ghiaia	37,2	%
Sabbia	26,2	%
Limo	17,1	%
Argilla	19,5	%
D 10		mm
D 50	0,481387	mm
D 60	1,503797	mm
D 90	10,597180	mm
Passante set. 10	62,8	%
Passante set. 40	48,9	%
Passante set. 200	36,6	%

PERMEABILITA'

Coefficiente k	cm/sec
----------------	--------

COMPRESSIONE

σ	kPa	σ_{Rim}	kPa
----------	-----	----------------	-----

SCISSOMETRO

τ	kPa	τ	kPa
--------	-----	--------	-----

TAGLIO DIRETTO

Prova consolidata-lenta			
c	11,1	kPa	ϕ 28,6 °
c Res		kPa	ϕ_{Res} °

COMPRESSIONE TRIASSIALE

C.D.	c_d	kPa	ϕ_d	°
C.U.	c'_{cu}	kPa	ϕ'_{cu}	°
	c_{cu}	kPa	ϕ_{cu}	°
U.U.	c_u	kPa	ϕ_u	°

PROVA EDOMETRICA

σ kPa	E kPa	Cv cm ² /sec	k cm/sec

Ghiaia sabbiosa, in matrice argilloso limosa, di colore rossastro.

c)

COMMITTENTE: Arpa Lombardia			
RIFERIMENTO: Idro (BS)			
SONDAGGIO: P9	CAMPIONE: E	PROFONDITA': m	19.5-20.0

MODULO RIASSUNTIVO

CARATTERISTICHE FISICHE

Umidità naturale	26,9	%
Peso di volume	18,6	kN/m ³
Peso di volume secco	14,7	kN/m ³
Peso di volume saturo	19,2	kN/m ³
Peso specifico	2,75	
Indice dei vuoti	0,834	
Porosità	45,5	%
Grado di saturazione	88,5	%
Limite di liquidità	46,6	%
Limite di plasticità	28,2	%
Indice di plasticità	18,4	%
Indice di consistenza	1,07	
Passante al set. n° 40	NO	
Limite di ritiro		%
Classif. CNR-UNI		

ANALISI GRANULOMETRICA

Ghiaia	29,6	%
Sabbia	26,8	%
Limo	19,2	%
Argilla	24,4	%
D 10		mm
D 50	0,170037	mm
D 60	0,694643	mm
D 90	5,737349	mm
Passante set. 10	70,4	%
Passante set. 40	56,0	%
Passante set. 200	43,6	%

PERMEABILITA'

Coefficiente k	cm/sec
----------------	--------

COMPRESSIONE

σ	kPa	σ_{Rim}	kPa
----------	-----	----------------	-----

SCISSOMETRO

τ	kPa	τ	kPa
--------	-----	--------	-----

TAGLIO DIRETTO

Prova consolidata-lenta			
c	0,0	kPa	ϕ 27,6 °
c Res		kPa	ϕ_{Res} °

COMPRESSIONE TRIASSIALE

C.D.	c_d	kPa	ϕ_d	°
C.U.	c'_{cu}	kPa	ϕ'_{cu}	°
	c_{cu}	kPa	ϕ_{cu}	°
U.U.	c_u	kPa	ϕ_u	°

PROVA EDOMETRICA

σ kPa	E kPa	C_v cm ² /sec	k cm/sec

Ghiaia con sabbia, in matrice argillosa debolmente limosa, di colore rossastro.

3
25022

Software SGEO - Mod. 2011

d)

COMMITTENTE: Arpa Lombardia			
RIFERIMENTO: Idro (BS)			
SONDAGGIO: P9	CAMPIONE: G	PROFONDITA': m	31,3-31,6

MODULO RIASSUNTIVO

CARATTERISTICHE FISICHE

Umidità naturale	13,8	%
Peso di volume	21,7	kN/m ³
Peso di volume secco	19,1	kN/m ³
Peso di volume saturo	21,9	kN/m ³
Peso specifico	2,74	
Indice dei vuoti	0,408	
Porosità	29,0	%
Grado di saturazione	92,3	%
Limite di liquidità	39,1	%
Limite di plasticità	27,4	%
Indice di plasticità	11,7	%
Indice di consistenza	2,17	
Passante al set. n° 40	NO	
Limite di ritiro		%
Classif. CNR-UNI		

ANALISI GRANULOMETRICA

Ghiaia	44,9	%
Sabbia	13,3	%
Limo	14,8	%
Argilla	27,0	%
D 10		mm
D 50	0,667237	mm
D 60	2,695430	mm
D 90	10,186080	mm
Passante set. 10	55,1	%
Passante set. 40	48,4	%
Passante set. 200	41,8	%

PERMEABILITA'

Coefficiente k	cm/sec
----------------	--------

COMPRESSIONE

σ	kPa	σ_{Rim}	kPa
----------	-----	----------------	-----

SCISSOMETRO

τ	kPa	τ	kPa
--------	-----	--------	-----

TAGLIO DIRETTO

Prova consolidata-lenta			
c	kPa	ϕ	°
c Res	kPa	ϕ_{Res}	°

COMPRESSIONE TRIASSIALE

C.D.	c_d	kPa	ϕ_d	°
C.U.	c'_{cu}	kPa	ϕ'_{cu}	°
	c_{cu}	kPa	ϕ_{cu}	°
U.U.	c_u	kPa	ϕ_u	°

PROVA EDOMETRICA

σ kPa	E kPa	Cv cm ² /sec	k cm/sec

Ghiaia in matrice argillosa, di colore rossastro.

e)

COMMITTENTE: Arpa Lombardia
RIFERIMENTO: Idro (BS)
SONDAGGIO: P9 CAMPIONE: H PROFONDITA': m 37.0-37.5

MODULO RIASSUNTIVO

CARATTERISTICHE FISICHE

Umidità naturale	6,0	%
Peso di volume	22,8	kN/m ³
Peso di volume secco	21,5	kN/m ³
Peso di volume saturo	23,5	kN/m ³
Peso specifico	2,76	
Indice dei vuoti	0,260	
Porosità	20,6	%
Grado di saturazione	64,3	%
Limite di liquidità	41,2	%
Limite di plasticità	26,0	%
Indice di plasticità	15,2	%
Indice di consistenza	2,31	
Passante al set. n° 40	NO	
Limite di ritiro		%
Classif. CNR-UNI		

ANALISI GRANULOMETRICA

Ghiaia	19,9	%
Sabbia	28,8	%
Limo	19,9	%
Argilla	31,4	%
D 10		mm
D 50	0,063358	mm
D 60	0,245081	mm
D 90	7,035712	mm
Passante set. 10	80,1	%
Passante set. 40	64,7	%
Passante set. 200	51,3	%

PERMEABILITA'

Coefficiente k	cm/sec
----------------	--------

COMPRESSIONE

σ	kPa	σ_{Rim}	kPa
----------	-----	----------------	-----

SCISSOMETRO

τ	kPa	τ	kPa
--------	-----	--------	-----

TAGLIO DIRETTO

Prova consolidata-lenta			
c	kPa	ϕ	°
c Res	kPa	ϕ_{Res}	°

COMPRESSIONE TRIASSIALE

C.D.	c_d	kPa	ϕ_d	°
C.U.	c'_{cu}	kPa	ϕ'_{cu}	°
	c_{cu}	kPa	ϕ_{cu}	°
U.U.	c_u	kPa	ϕ_u	°

PROVA EDOMETRICA

σ kPa	E kPa	Cv cm ² /sec	k cm/sec

Argilla con sabbia, debolmente ghiaioso limosa, di colore violaceo.

5
25024

Software SGEO - Mod. 2011

Figura A2.2 – Moduli riassuntivi riguardo le prove di laboratorio eseguite su campioni provenienti dal sondaggio per IN9; in a) risultati delle prove eseguite su di un campione prelevato tra 2.0 e 2.4m dal p.c., in b) risultati delle prove eseguite su di un campione prelevato tra 9.5 e 10.0 m dal p.c., in c) risultati delle prove eseguite su di un campione prelevato tra 19.5 e 20.0 m dal p.c., in d) risultati delle prove eseguite su di un campione prelevato tra 31.3 e 31.6m dal p.c., in e) risultati delle prove eseguite su di un campione prelevato tra 37.0 e 37.5 m dal p.c. (SOGEA s.r.l., 2011)

a)



AZIENDA CON
SISTEMA DI GESTIONE QUALITA'
UNI EN ISO 9001:2008
CERTIFICATO DA CERTIQUALITY

Certificazione Ufficiale - Settore « A » - Prove di laboratorio sui terreni
AUTORIZZAZIONE MINISTERO INFRASTRUTTURE E TRASPORTI
Decreto 52027/5-11-2007 - DPR 246/1993 - Circolare 7618/STC/2010

COMMITTENTE: Arpa Lombardia
RIFERIMENTO: Idro (BS)
SONDAGGIO: P10 CAMPIONE: 1 PROFONDITA': m 39.0-39.4

MODULO RIASSUNTIVO

CARATTERISTICHE FISICHE

Umidità naturale	19,8	%
Peso di volume	19,9	kN/m ³
Peso di volume secco	16,6	kN/m ³
Peso di volume saturo	20,4	kN/m ³
Peso specifico	2,76	
Indice dei vuoti	0,629	
Porosità	38,6	%
Grado di saturazione	87,1	%
Limite di liquidità	33,3	%
Limite di plasticità	Non plastico	
Indice di plasticità		
Indice di consistenza		
Passante al set. n° 40	SI	
Limite di ritiro		%
Classif. CNR-UNI		

ANALISI GRANULOMETRICA

Ghiaia	19,7	%
Sabbia	33,8	%
Limo	21,9	%
Argilla	24,6	%
D 10		mm
D 50	0,104108	mm
D 60	0,255692	mm
D 90	4,560567	mm
Passante set. 10	80,3	%
Passante set. 40	64,9	%
Passante set. 200	46,5	%

PERMEABILITA'

Coefficiente k	cm/sec
----------------	--------

COMPRESSIONE

σ	kPa	σ_{Rim}	kPa
----------	-----	----------------	-----

SCISSOMETRO

τ	kPa	τ	kPa
--------	-----	--------	-----

TAGLIO DIRETTO

Prova consolidata-lenta			
c	0,0	kPa	ϕ 28,4 °
c _{Res}		kPa	ϕ_{Res} °

COMPRESSIONE TRIASSIALE

C.D.	c _d	kPa	ϕ_d	°
C.U.	c' _{cu}	kPa	ϕ'_{cu}	°
	c _{cu}	kPa	ϕ_{cu}	°
U.U.	c _u	kPa	ϕ_u	°

PROVA EDOMETRICA

σ kPa	E kPa	Cv cm ² /sec	k cm/sec

Sabbia argilloso limosa, debolmente ghiaiosa, di colore marrone.

7
25026

Software SGEO - Mod. 2011

c)

COMMITTENTE: Arpa Lombardia
RIFERIMENTO: Idro (BS)
SONDAGGIO: P10 CAMPIONE: E PROFONDITA': m 51.1-51.5

MODULO RIASSUNTIVO

CARATTERISTICHE FISICHE

Umidità naturale	10,3	%
Peso di volume	19,8	kN/m ³
Peso di volume secco	17,9	kN/m ³
Peso di volume saturo	21,2	kN/m ³
Peso specifico	2,75	
Indice dei vuoti	0,505	
Porosità	33,5	%
Grado di saturazione	56,1	%
Limite di liquidità	38,2	%
Limite di plasticità	26,9	%
Indice di plasticità	11,3	%
Indice di consistenza	2,47	
Passante al set. n° 40	NO	
Limite di ritiro		%
Classif. CNR-UNI		

ANALISI GRANULOMETRICA

Ghiaia	17,8	%
Sabbia	27,2	%
Limo	21,0	%
Argilla	34,0	%
D 10		mm
D 50	0,032975	mm
D 60	0,156827	mm
D 90	4,650311	mm
Passante set. 10	82,2	%
Passante set. 40	67,1	%
Passante set. 200	55,0	%

PERMEABILITA'

Coefficiente k	cm/sec
----------------	--------

COMPRESSIONE

σ	kPa	σ_{Rim}	kPa
----------	-----	----------------	-----

SCISSOMETRO

τ	kPa	τ	kPa
--------	-----	--------	-----

TAGLIO DIRETTO

Prova consolidata-lenta			
c	0,0	kPa	ϕ 24,3 °
c Res		kPa	ϕ_{Res} °

COMPRESSIONE TRIASSIALE

C.D.	c_d	kPa	ϕ_d °
C.U.	c'_{cu}	kPa	ϕ'_{cu} °
	c_{cu}	kPa	ϕ_{cu} °
U.U.	c_u	kPa	ϕ_u °

PROVA EDOMETRICA

σ kPa	E kPa	Cv cm ² /sec	k cm/sec
50,0 ÷ 100,0	5196	0,002146	4,05E-08
100,0 ÷ 200,0	8128	0,002661	3,21E-08
200,0 ÷ 400,0	8842	0,001839	2,04E-08
400,0 ÷ 800,0	18958	0,001326	6,86E-09
800,0 ÷ 1600,0	32810	0,001294	3,87E-09
1600,0 ÷ 3200,0	60843	---	---

Argilla sabbioso limosa, debolmente ghiaiosa, di colore violaceo.

1
25028

Software SGEO - Mod. 2011

Figura A2.3 – Moduli riassuntivi riguardo le prove di laboratorio eseguite su campioni provenienti dal sondaggio per PZ10; in a) risultati delle prove eseguite su di un campione prelevato tra 39.0 e 39.4 m dal p.c., in b) risultati delle prove eseguite su di un campione prelevato tra 1.8 e 2.1 m dal p.c., in c) risultati delle prove eseguite su di un campione prelevato tra 51.1 e 51.5 m dal p.c. (SOGEA s.r.l., 2011)

COMMITTENTE: Arpa Lombardia
RIFERIMENTO: Idro (BS)
SONDAGGIO: P11 CAMPIONE: B PROFONDITA': m 1.9-2.4

MODULO RIASSUNTIVO

CARATTERISTICHE FISICHE

Umidità naturale	12,1	%
Peso di volume	22,2	kN/m ³
Peso di volume secco	19,8	kN/m ³
Peso di volume saturo	22,3	kN/m ³
Peso specifico	2,71	
Indice dei vuoti	0,340	
Porosità	25,4	%
Grado di saturazione	96,7	%
Limite di liquidità	39,5	%
Limite di plasticità	Non plastico	
Indice di plasticità		
Indice di consistenza		
Passante al set. n° 40	NO	
Limite di ritiro		%
Classif. CNR-UNI		

ANALISI GRANULOMETRICA

Ghiaia	36,6	%
Sabbia	32,2	%
Limo	11,8	%
Argilla	19,4	%
D 10		mm
D 50	0,712126	mm
D 60	1,538837	mm
D 90	8,678021	mm
Passante set. 10	63,4	%
Passante set. 40	43,4	%
Passante set. 200	31,2	%

PERMEABILITA'

Coefficiente k	cm/sec
----------------	--------

COMPRESSIONE

σ	kPa	σ_{Rim}	kPa
----------	-----	----------------	-----

SCISSOMETRO

τ	kPa	τ	kPa
--------	-----	--------	-----

TAGLIO TORSIONALE

Prova consolidata-lenta			
c Picco	4,1	kPa	ϕ Picco 28,6 °
c Res	0,2	kPa	ϕ Res 27,8 °

COMPRESSIONE TRIASSIALE

C.D.	c_d	kPa	ϕ_d	°
C.U.	c'_{cu}	kPa	ϕ'_{cu}	°
	c_{cu}	kPa	ϕ_{cu}	°
U.U.	c_u	kPa	ϕ_u	°

PROVA EDOMETRICA

σ kPa	E kPa	Cv cm ² /sec	k cm/sec
6,3 ÷ 12,5	916	Non calc.	- - -
12,5 ÷ 25,0	710	0,000320	4,42E-08
25,0 ÷ 50,0	972	0,000375	3,78E-08
50,0 ÷ 100,0	1455	0,000381	2,57E-08
100,0 ÷ 200,0	2456	0,000688	2,75E-08
200,0 ÷ 400,0	5304	0,000626	1,16E-08
400,0 ÷ 800,0	10930	0,001195	1,07E-08

Ghiaia con sabbia, in matrice argilloso limosa, di colore marrone rossastro.

8
25027

Software SGEO - Mod. 2011

Figura A2.4 – Modulo riassuntivo delle prove di laboratorio eseguite su un campione prelevato tra 1.9 e 2.4 m dal p.c., provenienti dal sondaggio per PZ11. (SOGEA s.r.l., 2011)



Via Pastrengo, 9 - 24068 Seriate (Bg) -
tel. 035 303120 - fax 035 290388 - Email:
ismgeo@ismgeo.it

**PROVA DI TAGLIO ANULARE - Resistenza
massima e residua: diagr. t/s**

Concessione Ministeriale Decreto n° 55126 del 12 luglio 2006 - Settori A, B e C

rev.	data emiss.	sperimentatore	direttore
0	08/01/2013	Angeloni	Saccenti

Normativa di riferimento: ASTM D6467

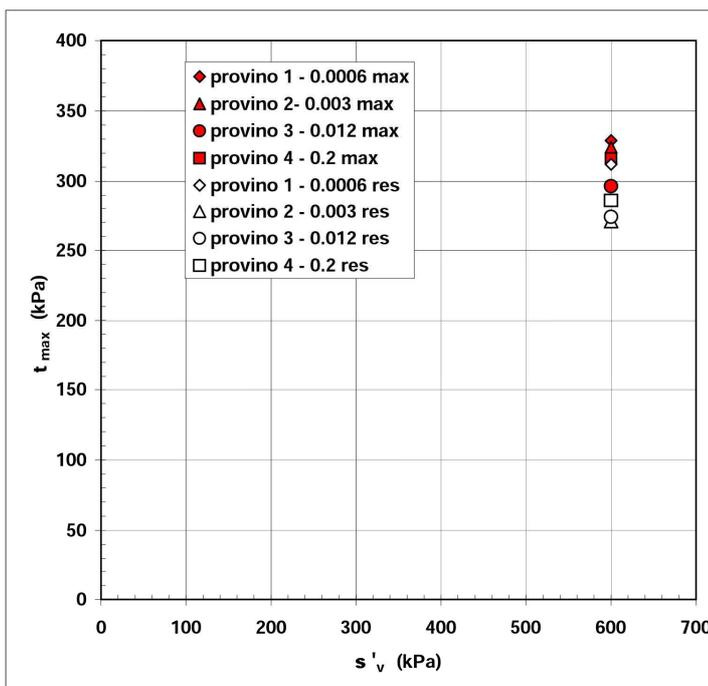
N° certificato di prova:

N° verbale di accettazione: 081/2012

Committente:	ARPA
Cantiere:	FRANA IDRO
Sondaggio:	S1
Campione:	I9
Profondità prova [m]:	48.6 - 48.8
Prova:	Rs CK0D
Provino:	1 2 3 4
Data prova:	08/11/2012

Dati generali dei provini

Provino	Profondità	Dati iniziali					Dati a fine consolidazione					Valori di picco			Valori residui		Rottura		Metodo di preparazione - tipo di materiale
		A	H	g	w	g_s	s'_v	H	e_v	q_d	dfc	t_{max}	d_h	e_v	t	d_h	v	dfr	
-	m	cm ²	mm	kN/m ³	%	kN/m ³	kPa	mm	%	kN/m ²	h	kPa	mm	%	kPa	mm	mm/m	ore	-
1	48.70	30.6	20.0	20.00	5.0	19.05	600	16.6	16.9	22.92	4	329	4.0	2.37	312	25	0.0006	714	Compattazione umida all'umidità naturale
2	48.70	30.6	20.0	20.00	5.0	19.05	600	17.6	11.8	21.60	4	324	3.1	2.42	271	27	0.0030	158	
3	48.70	30.6	20.0	20.00	5.0	19.05	600	17.0	15.0	22.40	4	297	4.0	2.17	274	26	0.0120	38	
4	48.70	30.6	20.0	20.00	5.0	19.05	600	17.7	11.4	21.50	4	316.3	5.0	2.32	286	28	0.2000	2	



Legenda:

- A = area del provino
- H = altezza del provino
- g = peso di volume umido
- w = contenuto d'acqua
- g_s = peso di volume secco
- s'_v = tensione efficace
- e_v = deformazioni
- t = sforzo di taglio
- d = spostamento
- v = velocità di rottura
- dfc = durata consolidazione
- dfr = durata fase di rottura
- Subscritto 'h' = orizzontale
- Subscritto 'v' = verticale
- Subscritto 'MAX' = MASSIMO

Note:

Figura A2.5 – Modulo riguardante le prove di taglio anulare a velocità di deformazione controllata eseguite su campioni disturbati prelevato tra 48.6 e 48.8 m dal p.c., provenienti dal sondaggio n .1 eseguito da SOGEA s.r.l. nel 2012. (ISMEGEO s.r.l.)

Appendice 3

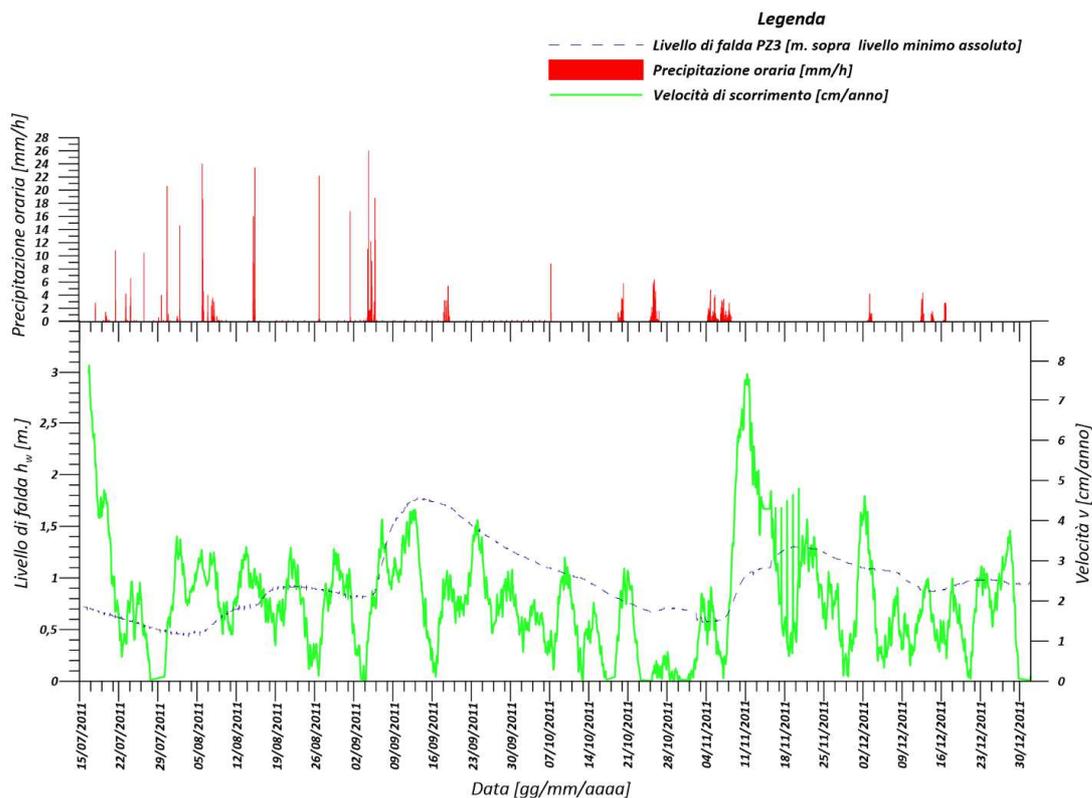


Figura A3.1 – Andamento del livello di falda, della velocità di scorrimento e dell'intensità delle precipitazioni nel periodo 15 Luglio – 31 Dicembre 2011.

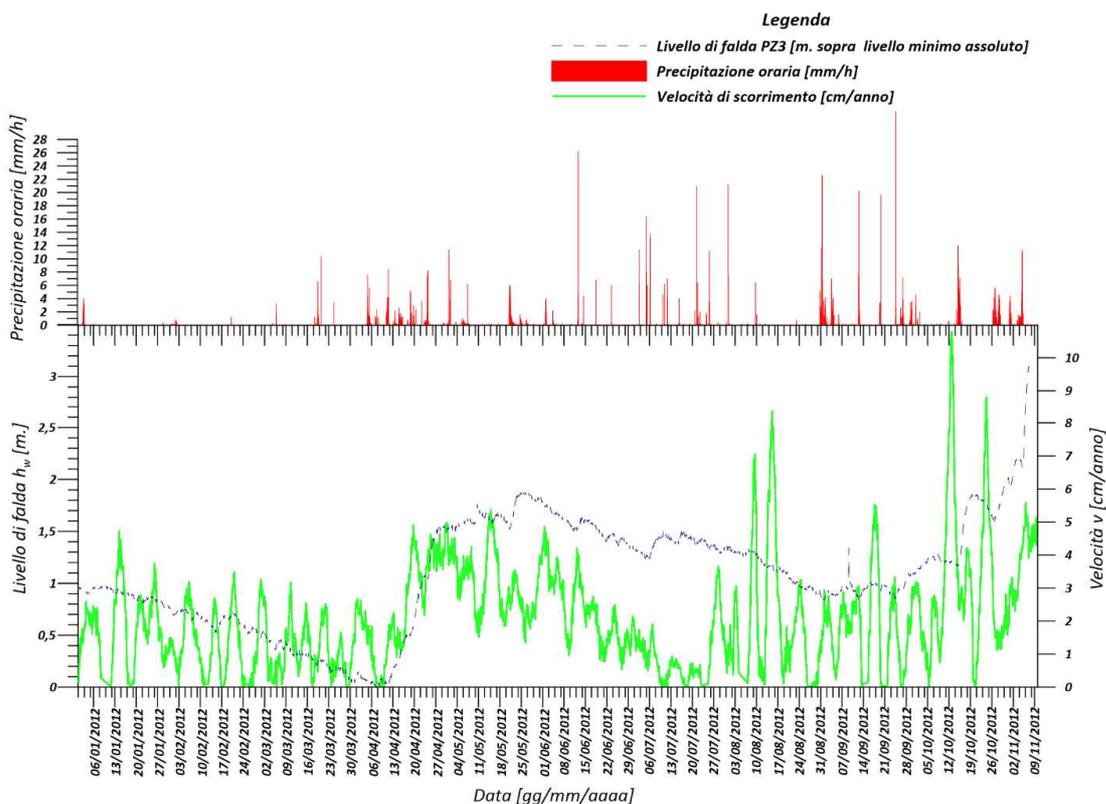


Figura A3.2 – Andamento del livello di falda, della velocità di scorrimento e dell'intensità delle precipitazioni nell'anno 2012.

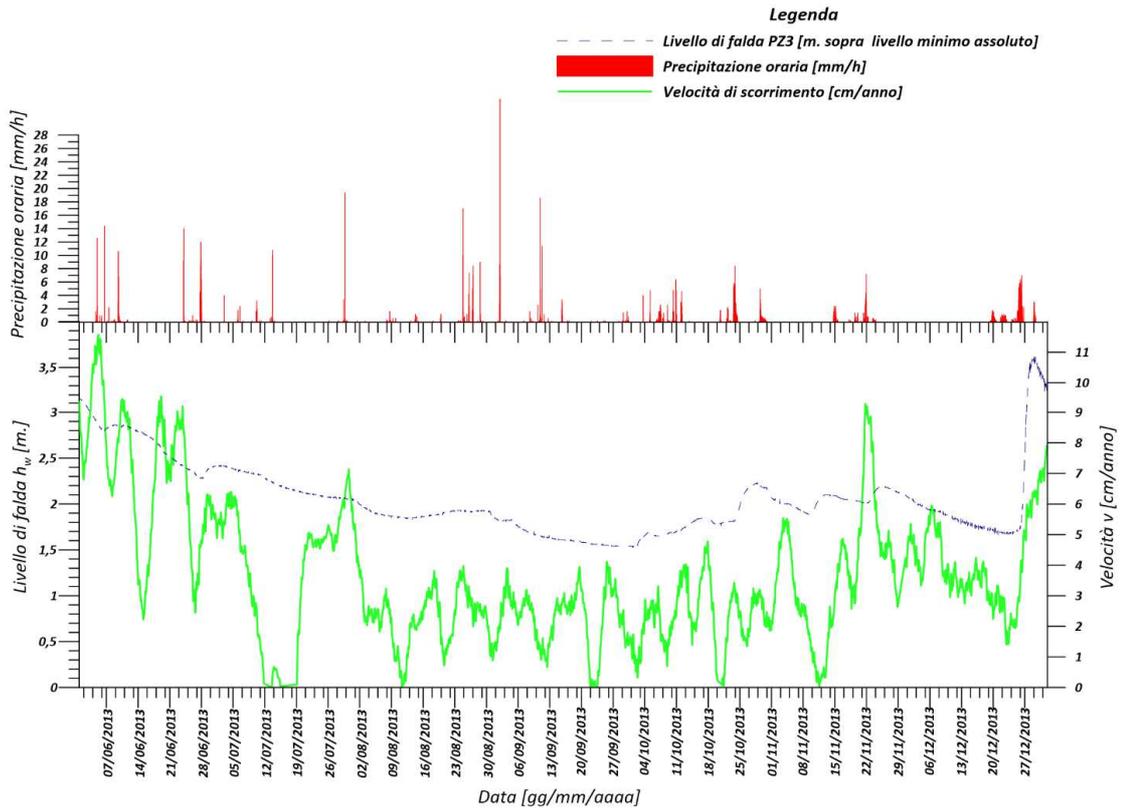


Figura A3.3 – Andamento del livello di falda, della velocità di scorrimento e dell'intensità delle precipitazioni nel periodo 1 Giugno – 31 Dicembre 2013.

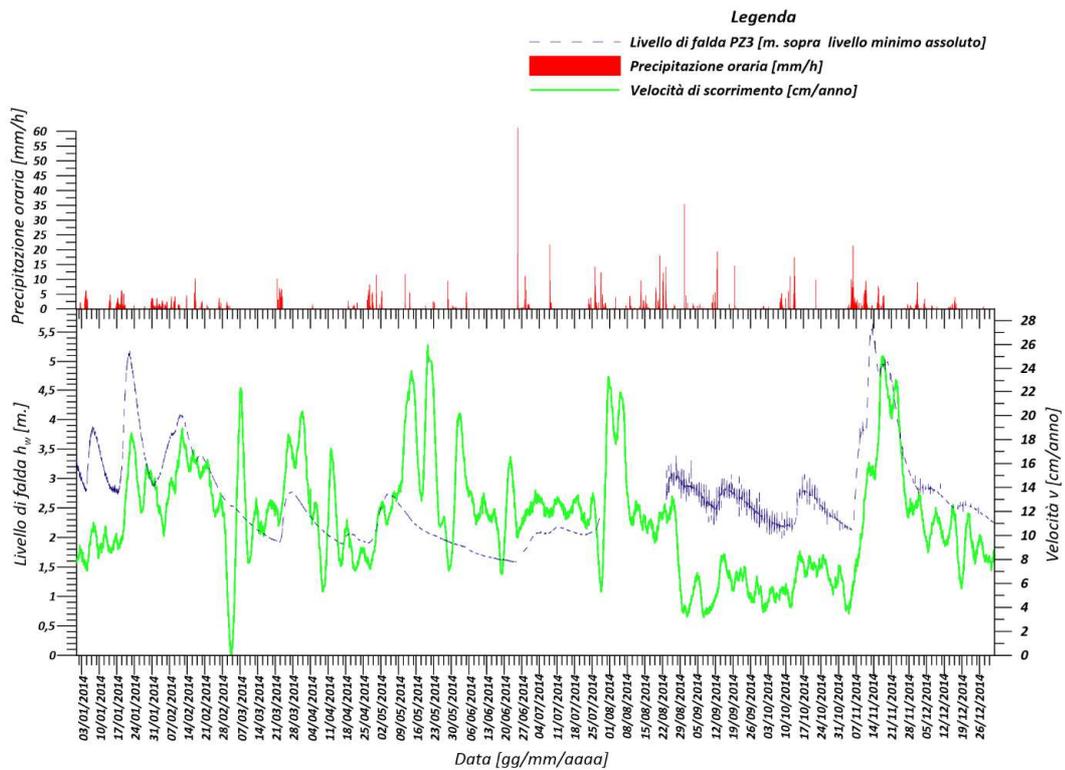


Figura A3.4 – Andamento del livello di falda, della velocità di scorrimento e dell'intensità delle precipitazioni nell'anno 2014.

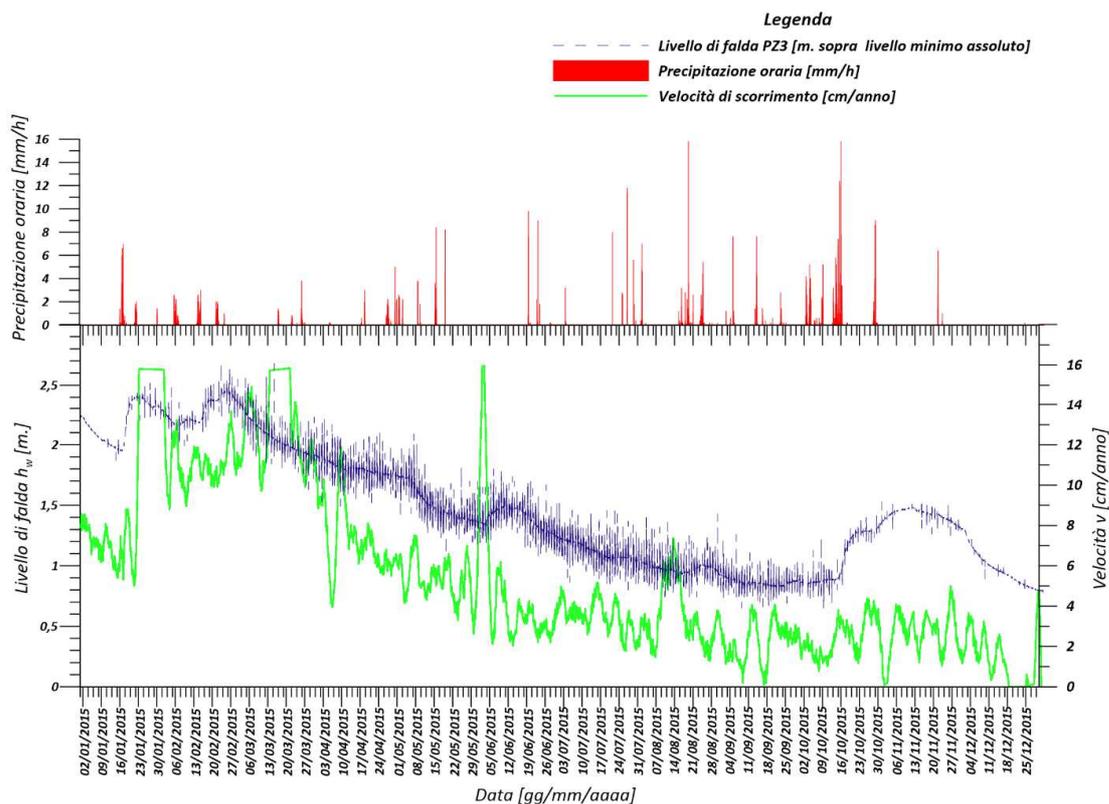


Figura A3.5 – Andamento del livello di falda, della velocità di scorrimento e dell'intensità delle precipitazioni nell'anno 2015.

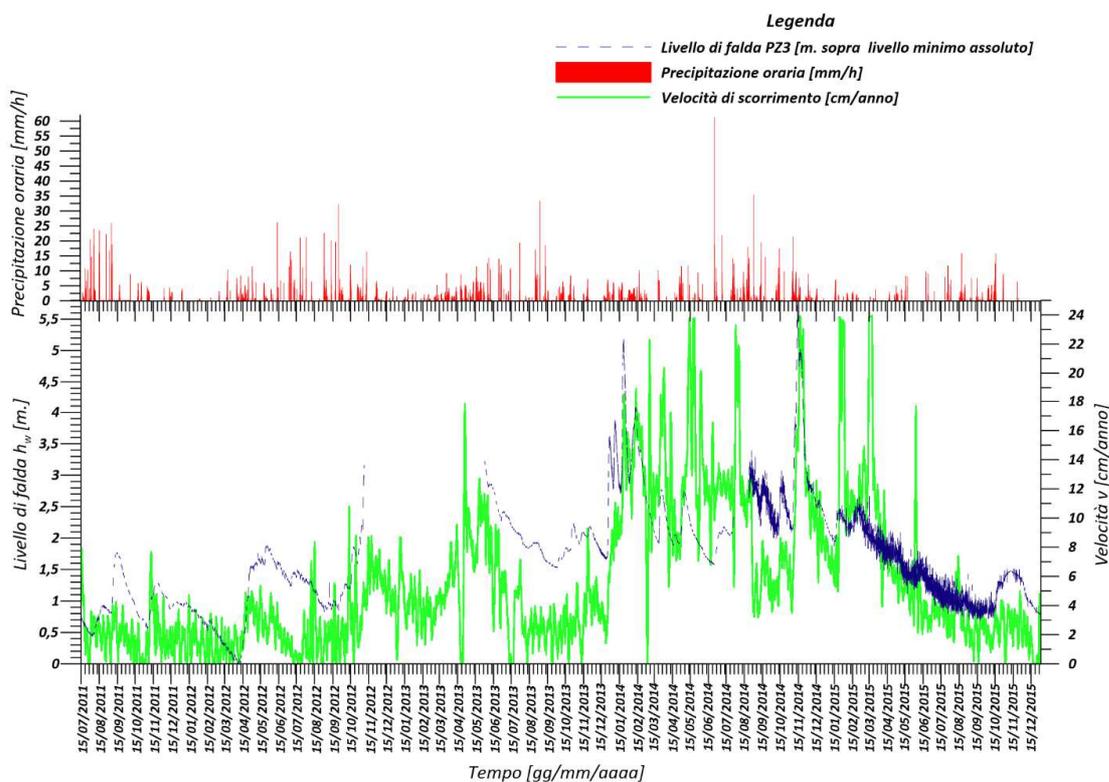


Figura A3.5 – Andamento del livello di falda, della velocità di scorrimento e dell'intensità delle precipitazioni per il periodo 15 Luglio 2011 – 31 Dicembre 2015.

```

clc

% download

Data=load('Spostamento_filtr.txt');

dt=0.5;% 1 anno

%unità di misura= "mm"

%y=segnale originario

%yr=y senza salti nella velocità

y=Data(:,2);

l=isnan(y);

y2=y;

y2(l)=0;

yd=diff([0; y2]);

% Salto = massima variazione accettata da definire in base ai dati

salto=0.3;

yd=min(yd,salto);

yd=max(yd,-salto);

yd(1)=y(1);

yr=cumsum(yd);

%yr(l)=NaN;

T=1:length(y);

%Td=1:length(y)-1;

plot(T,y,'--',T,yr);

title('tolto i salti')

%%smussare come fitting

ys=mmob(yr,5);

ys=diff(ys);

Ts=(1:size(ys))+2;

T=Data(:,1);

```

```

%divido il segnale in tante serie di pari lunghezza (4 settimane=24*7*4)

L1=length(yr);

PERMEDIA=24*7/dt;

NSerie=((L1-mod(L1,PERMEDIA))/(PERMEDIA));

%creo unamatrice con N serie

DD=zeros(PERMEDIA,NSerie);

DD(:)=yr(1:(L1-mod(L1,PERMEDIA)));

figure(1)

for i=1:NSerie

    DD(:,i)=DD(:,i)-mean(DD(:,i));

end

tM=2:PERMEDIA;

plot(1:PERMEDIA,nanmean(DD,2))

yM=diff(nanmean(DD,2));

yM=yM-mean(yM);

figure(2)

%spettro del segnale finestra temporale

Ly=length(yM);

df=1/PERMEDIA;

Ys=fftshift(fft(yM));

Pyy = Ys.* conj(Ys) / length(Ys);

if mod(Ly,2) %even

    f = 1/dt*[-Ly/2:Ly/2-1]/Ly;

else %odd

    f = 1/dt*[-(Ly-1)/2:(Ly-1)/2]/Ly;

end

h=plot(f,Pyy);

set(gca,'xLim',[0 0.5])

%spettro del segnale corretto e derivato - finestra spettrale

```

```

figure(3)

dt=1;

%[P1,P2,F]=psd(ys-mean(ys),256,1/dt,hanning(128),10,0.95); %overlapping 102 punti su 1024

%plot(F,P1*dt,F,P2*dt),plt14,grid

h = spectrum.welch('Hann',256,0); %10 = percentuale di overlapping

H=psd(h,yd-mean(yd),'Fs',1/dt,'CenterDC',true,'ConfLevel',0.95);

plot(H.Frequencies,H.Data,H.Frequencies,H.ConfInterval)%plt14

grid

set(gca,'XLim',[0 0.5])

set(gca,'XTick',[0 1./[24 12 8 3 2]],'XTickLabel',{'0','1/24','1/12','1/8','1/3','1/2'})

xlabel('Frequency (1/h)')

ylabel('(cm^2/h)') % (cm/h)^2/df=m^2/h^2/(1/h)

%spettro del segnale smussato. finestra spettrale

figure(4)

dt=1;

%[P1,P2,F]=psd(ys-mean(ys),256,1/dt,hanning(128),10,0.95); %overlapping 102 punti su 1024

%plot(F,P1*dt,F,P2*dt),plt14,grid

h = spectrum.welch('Hann',256,0); %10 = percentuale di overlapping

H=psd(h,ys-mean(ys),'Fs',1/dt,'CenterDC',true,'ConfLevel',0.95);

plot(H.Frequencies,H.Data,H.Frequencies,H.ConfInterval)%plt14

grid

set(gca,'XLim',[0 0.5])

set(gca,'XTick',[0 1./[24 12 8 3.5 2]],'XTickLabel',{'0','1/24','1/12','1/8','1/3.5','1/2'})

xlabel('Frequency (1/h)')

ylabel('(cm^2/h)') % (m/h)^2/df=m^2/h^2/(1/h)

%%filtro i segnali sotto le 24 ore

Fs=1;

h=fdesign.lowpass('Fp,Fst,Ap',1/100,1/50,0.1,Fs);

d=design(h,'equiripple'); %Lowpass FIR filter

```

```

yf=filtfilt(d.Numerator,1,ys); %zero-phase filtering

figure(5)

plot(1:length(yf),cumsum(yf),T,y);

figure(7)

plot((1:length(yf))/24,yf*24*365)%plt14

grid

title('Low-pass filtered velocity')

xlabel('time (days)')

ylabel('velocity (cm/y)')

set(gca,'XTick',[0:30:length(yf)]

t=2:length(yf)+1;

yfc=cumsum(yf);

%%filtro i segnali prima della media mobile sotto le 24 ore

Fs=1;

h=fdesign.lowpass('Fp,Fst,Ap',1/100,1/50,0.1,Fs);

d=design(h,'equiripple'); %Lowpass FIR filter

yf0=filtfilt(d.Numerator,1,yd); %zero-phase filtering

figure(8)

plot(1:length(yf0),cumsum(yf0),T,y);

```

Figura A3.6 – Codice MatLab utilizzato per il filtraggio dei dati grezzi di spostamento cumulato

Tabella A3.1 – Tabella con i valori medi dell'altezza di falda h_w e della velocità v , espressa in cm/anno e in m/s, per ogni mese del periodo Luglio 2011-Dicembre 2015. Per il periodo Dicembre 2012-Maggio 2013 le misure piezometriche non sono state disponibili e, quindi, non è stato possibile riportare i punti relativi a livello di falda e velocità per quei mesi.

Mese	Media altezza di falda h_w [m]	Media velocità v [cm/anno]	Media velocità v [m/s]
lug-11	20,2	1,7	5,3E-10
ago-11	20,1	2,0	6,3E-10
set-11	20,4	2,3	7,1E-10
ott-11	20,9	1,1	3,6E-10
nov-11	20,3	2,4	7,6E-10
dic-11	20,7	1,7	5,4E-10
gen-12	20,6	1,5	4,9E-10
feb-12	20,4	1,2	3,8E-10
mar-12	20,1	1,1	3,6E-10
apr-12	19,7	2,1	6,6E-10
mag-12	21,1	3,2	1,0E-09
giu-12	21,4	2,4	7,8E-10
lug-12	21,0	0,8	2,7E-10
ago-12	20,9	1,9	5,9E-10
set-12	20,5	1,6	4,9E-10
ott-12	20,7	3,1	9,8E-10
nov-12	21,6	5,2	1,6E-09
giu-13	22,8	7,6	2,4E-09
lug-13	22,0	3,3	1,1E-09
ago-13	21,6	2,7	8,5E-10
set-13	21,5	2,2	7,1E-10
ott-13	21,1	2,3	7,1E-10
nov-13	21,7	3,6	1,1E-09
dic-13	21,7	3,8	1,2E-09
gen-14	23,0	10,6	3,4E-09
feb-14	22,5	14,6	4,6E-09
mar-14	22,3	11,9	3,8E-09
apr-14	22,2	11,2	3,5E-09
mag-14	21,7	14,9	4,7E-09
giu-14	21,5	12,6	4,0E-09
lug-14	21,5	12,0	3,8E-09
ago-14	22,5	13,3	4,2E-09
set-14	22,5	5,6	1,8E-09
ott-14	22,0	6,1	1,9E-09
nov-14	21,9	13,5	4,3E-09

dic-14	22,5	10,2	3,2E-09
gen-15	21,9	10,2	3,2E-09
feb-15	21,9	6,2	2,0E-09
mar-15	22,0	16,8	5,3E-09
apr-15	21,5	7,8	2,5E-09
mag-15	21,3	5,5	1,7E-09
giu-15	21,0	4,8	1,5E-09
lug-15	20,8	3,5	1,1E-09
ago-15	20,6	3,5	1,1E-09
set-15	20,5	2,3	7,2E-10
ott-15	20,5	2,4	7,5E-10
nov-15	20,9	2,7	8,7E-10
dic-15	20,9	1,0	3,3E-10

Tabella A3.2 – Tabella con i valori medi dell'altezza di falda h_w e della velocità v , espressa in cm/anno e in m/s, per ogni trimestre del periodo Luglio 2011-Dicembre 2015. Per il periodo Dicembre 2012-Maggio 2013 le misure piezometriche non sono state disponibili, di conseguenza la media relativa a Ottobre e Novembre 2012 è bimestrale e non è riportata la media relativa al solo mese di Giugno 2013.

Trimestre	Media altezza di falda h_w [m]	Media velocità v [cm/anno]	Media velocità v [m/s]
lug-11/set-11	20,2	2,0	6,3E-10
ott-11/dic-11	20,6	1,7	5,5E-10
gen-12/mar-12	20,3	1,3	4,1E-10
apr-12/giu-12	20,7	2,6	8,2E-10
lug-12/set-12	20,8	1,4	4,5E-10
ott-12/nov-12	21,1	4,5	1,4E-09
lug-13/set-13	21,7	2,7	8,7E-10
ott-13/dic-13	21,5	3,2	1,0E-09
gen-14/mar-14	22,6	12,4	3,9E-09
apr-14/giu-14	21,8	12,9	4,1E-09
lug-14/set-14	22,2	10,3	3,3E-09
ott-14/dic-14	22,1	9,9	3,2E-09
gen-15/mar-15	21,9	11,1	3,5E-09
apr-15/giu-15	21,3	6,0	1,9E-09
lug-15/set-15	20,7	3,1	9,8E-10
ott-15/dic-15	20,8	2,0	6,5E-10

Bibliografia

- Angeli M.G., Gasparetto P., Menotti R.M., Pasuto A., Silvano S. "A visco-plastic model for slope analysis applied to a mudslide in Cortina d'Ampezzo, Italy." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 29.3 (1996): 233-240.
- Ballini A., La Rocca L., Mannucci G. "Rapporto preliminare sullo stato di monitoraggio della frana in sinistra idrografica del fiume Chiese – Comune di Idro." Arpa Lombardia (2006)
- Ballini A., La Rocca L., Mannucci G. "Rapporto sul monitoraggio della frana in sinistra idrografica del fiume Chiese – Comune di Idro" Arpa Lombardia (2007)
- Barna G. "Rapporto sul monitoraggio della frana in sinistra idrografica del fiume Chiese – Comune di Idro." Arpa Lombardia (2014)
- Barna G., Mannucci G. "Rapporto sul monitoraggio della frana in sinistra idrografica del fiume Chiese – Comune di Idro." Arpa Lombardia (2010)
- Barna G., Mannucci G. "Rapporto sul monitoraggio della frana in sinistra idrografica del fiume Chiese – Comune di Idro." Arpa Lombardia (2011)
- Barna G., Mannucci G. "Rapporto sul monitoraggio della frana in sinistra idrografica del fiume Chiese – Comune di Idro." Arpa Lombardia (2013)
- Berruti G. "Geologia del territorio bresciano: itinerari geologici dal pedemonte al passo del Gavia." (1981).
- Bhat D.R, Bhandary N.P., Yatabe R., Tiwari R.C. "Residual-state creep test in modified torsional ring shear machine: methods and implications." *International Journal of Geomate* 1.1 (2011): 39-43.
- Bianchi A., Boni A., Callegari E., Casati P., Cassinis G., Comissoli G., Dal Piaz G.B., Desio A., Giuseppetti G., Martina E., Passeri L.D., Sassi F.P., Zanettin B., Zirpoli G. "Carta geologica d'Italia alla scala 1:100000 – Foglio 34 "Breno" con relative note illustrative" Servizio Geologico d'Italia (1971)

- Boni, A. & Cassinis G. "Carta geologica delle Prealpi Bresciane a Sud dell'Adamello alla scala 1:50.000 con relative note illustrative" *Atti Ist. Geol* (1972): 4-5.
- Cadrobbi M., Pasa A., Trevisan L., Bianchi A., Cavinato A., Colbertaldo D., Dal Piaz G.B., Dal Piaz G. "Carta geologica d'Italia alla scala 1:100.000 - Foglio 35 "Riva del Garda" con relative note illustrative" Sezione Geologica dell'Ufficio Idrografico del Magistrato delle Acque (1948)
- Calderini F., Mannucci G. "Rapporto finale sul monitoraggio della frana in sinistra idrografica del fiume Chiese – Comune di Idro." Arpa Lombardia (2008)
- Cancelli A., Cancelli P., Tassi T. "Nuove opere di regolazione per la messa in sicurezza del Lago d'Idro – Progetto definitivo – Relazione geologica." (2012)
- Carri A., Chiapponi L., Giovanelli R, Segalini A. "Integrated analysis of data collected by an innovative monitoring system and results of a 3D numerical model in Boschetto landslide." *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice. Proceedings of the 12th International Symposium on Landslides* (2016): 579-585
- Carri A., Chiapponi L., Giovanelli R., Spiaggiari L., Segalini A. "Improving Landslide Displacement Measurement through Automatic Recording and Statistical Analysis." *Procedia Earth and Planetary Science* 15 (2015): 536-541.
- Castellarin A., Cantelli L., Fesce A.M., Selli L. "Alpine compressional tectonics in the Southern Alps. Relationships with the N-Apennines." *Annales tectonicae* Vol.6. No.1. 1992.
- Cola S., Gabrieli F., Marcato G., Pasuto A., Simonini P. "Evolutionary behaviour of the Tessina landslide." *Rivista italiana di Geotecnica* 50.1 (2016): 51-70.
- Conte E., Donato A., Troncone A. "A simplified method for predicting rainfall-induced mobility of active landslides." *Landslides* (2016):1-11.
- Cornforth D.H. "Landslides in practice: *Investigation, analysis, and remedial/preventative options in soils.*" *John Wiley & Sons Inc. - Hoboken New Jersey* (2005)
- Corominas J., Moya J., Ledesma A., Lloret A., Gili J.A. "Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain)." *Landslides* 2.2 (2005): 83-96.

- Cruden D.M. & Varnes D.J. "Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes." *Transportation research board special report 247* (1996).
- Di Maio C., Vassallo R., Vallario M. "Plastic and viscous shear displacements of a deep and very slow landslide in stiff clay formation." *Engineering Geology* 162 (2013): 53-66.
- Di Maio C., Vassallo R., Vallario M., Pascale S., Sdao F. "Structure and kinematics of a landslide in a complex clayey formation of the Italian Southern Apennines." *Engineering Geology* 116.3 (2010): 311-322.
- Dunicliff, J., and J-G. La Fonta. "In-place Inclinometers-A Significant Test Program." *Geotechnical News Vancouver* 19.1 (2001): 33-34.
- Faletto, Corrado, Enzo Novello, and Paolo Tible. "The Case History of the Bagnaschino Landslide, from Early Warning to Site Specific Rainfall Threshold." *Landslide Science and Practice* (2013): 537-542.
- Garzanti E., Gnaccolini M., Jadoul F. "Anatomy of semiarid coastal system. The Upper Carnian of Lombardy (Italy)." *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia* 101.1 (1995): 1736.
- Gelmini M. "Rapporto sintetico della nona campagna di misura topografica." Arpa Lombardia (2015)
- Giuffredi F., Zanolini L., Foglino L. "Application of a new integrated multi-parametric monitoring system for the analysis of micro-movements in the civil protection activities: an example." *Proceedings of the sixth international symposium on field measurements in geomechanics, Balkema, FMGM Oslo* (2003).
- Griffini L. "Progetto preliminare per la realizzazione della nuova galleria di bypass – Relazione geologica." (2007)
- Hungr O., Leroueil S., Picarelli L. "The Varnes classification of landslide types, an update." *Landslides* 11.2 (2014): 167-194.
- INGEO S.r.l. "Indagini geognostiche, geofisiche e prove geotecniche con installazione di strumentazione e suo rilevamento strumentale nell'area di frana nel Comune di Idro (BS) in sinistra del fiume Chiese." Arpa Lombardia (2006)
- ISMGEO S.r.l. "Prove geomeccaniche di laboratorio". Arpa Lombardia (2013)

- Iverson R.M. "Regulation of landslide motion by dilatancy and pore pressure feedback." *Journal of Geophysical Research - Earth Surface* 110.F2 (2005).
- Jamaludin, S., Abdullah C.H., Jaafar K.B. "Monitoring of slow moving landslide at 46th km of Simpang Pulai–Gua Musang highway, Malaysia." *Proceedings of 11th international symposium on landslides and 2nd North American symposium on landslides* (2012).
- La Fonta, J.G. & M.B.Beth. "In place inclinometers, a significant test program." *SolData France* (2002).
- Lovisolo M. "Monitoraggio differenziale di stabilità mediante sistemi multiparametrici in place DMS." Università di Milano Bicocca (2011)
- Lovisolo M. "Colonne di monitoraggio multiparametrico DMS per la gestione dell'Early Warning in frana." 9a Riunione del Gruppo di Geologia informatica - Sezione della Società Geologica Italiana (2014)
- Lovisolo M., Ghirotto S., Scardia G. "The use of Differential Monitoring Stability (DMS) for remote monitoring of excavation and landslide movements." *Proceedings of the Sixth International Symposium on Field Measurements in Geomechanics – Oslo* (2003).
- Lovisolo, M., and A. Della Giusta. "Precision of DMS columns from real time in-place measurements and improvement in micro-movements analysis with early warning function." *WIT Transactions on Modelling and Simulation* 41 (2005).
- Manassero M. "Modello geotecnico dell'area di frana in sinistra idrografica del fiume Chiese – Comune di Idro(BS)." (2013)
- Mannucci G., Ballini A., Calderini F., La Rocca L. "Il monitoraggio geologico ed idrogeologico; Progetto Idro (BS)" *Una nuova geologia per la Lombardia - Milano* (2008)
- Mikkelsen P.E. "Advances in inclinometer data analysis." *Symposium on Field Measurements in Geomechanics FMGM* (2003).
- Moore P.L. & Iverson N.R. "Slow episodic shear of granular materials regulated by dilatant strengthening." *Geology* 30.9 (2002): 843-846.
- Olivieri, W., M. Lovisolo, and G. B. Crosta. "Continuous geotechnical monitoring for alert thresholds and hazard management." *ISL, NASL* (2012).

- Penta F. "Lame e creep." *Rivista italiana di Geotecnica* 7.2 (1960): 74-67.
- Puzrin A. M. & Sterba I. "Inverse long-term stability analysis of a constrained landslide." *Géotechnique* 56.7 (2006): 483-489.
- Puzrin A.M. & Schmid A. "Evolution of stabilised creeping landslides." *Géotechnique* 62.6 (2012): 491-501.
- Ranalli M., Gottardi G., Medina-Cetina Z., Nadim F. "Uncertainty quantification in the calibration of a dynamic viscoplastic model of slow slope movements." *Landslides* 7.1 (2010): 31-41.
- Schulz W.H., McKenna J.P., Kibler J.D., Biavati G. "Relations between hydrology and velocity of a continuously moving landslide—evidence of pore-pressure feedback regulating landslide motion?." *Landslides* 6.3 (2009): 181-190.
- Segalini A. & Carini C. "Underground landslide displacement monitoring: a new MMES based device." *Landslide science and practice* (2013): 87-93.
- Segalini A., Chiapponi L., Drusa M., Pastarini B. "New inclinometer device for monitoring of underground displacements and landslide activity." *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina* 4 (2014): 58-61
- Simonini P. & Giustacchini F. "Analisi di fattibilità per un intervento di stabilizzazione della frana di Idro mediante cunicolo drenante." (2008)
- Simonini P., Giustacchini F. "Interventi di consolidamento della sponda sinistra del fiume Chiese - Progetto preliminare." (2009)
- Simonini P., Giustacchini F., Brunori P., Cola S. "La frana di Idro: proposta di intervento per la mitigazione del rischio." (2012)
- SONDENILE S.r.l. "Indagini geognostiche, prove geotecniche, prelievo di campioni con installazione di strumentazione di monitoraggio nell'area di frana nel comune di Idro, sinistra del fiume Chiese (BS)." Arpa Lombardia (2011)
- Stark T. & Hussain M. "Drained residual strength for landslides." *Proceedings of GeoFlorida2010* (2010): 3217-3226.

- van Asch Th. W.J., Van Beek L. P. H., Bogaard T.A. "Problems in predicting the mobility of slow-moving landslides." *Engineering geology* 91.1 (2007): 46-55.
- Varnes D.J. "Slope movement types and processes." *Transportation Research Board Special Report* 176 (1978).
- Vassallo R., Grimaldi G.M., C. Di Maio. "Pore water pressures induced by historical rain series in a clayey landslide: 3D modeling." *Landslides* 12.4 (2015): 731-744.
- Vulliet L. & Hutter K. "Viscous-type sliding laws for landslides." *Canadian Geotechnical Journal* 25.3 (1988): 467-477.
- Xu Q., Lu H., Ran J., Li W., Sun X. "Field monitoring of groundwater responses to heavy rainfalls and the early warning of the Kualiangzi landslide in Sichuan Basin, southwestern China." *Landslides* (2016): 1-16.
- Zhi M., Shang Y., Zhao Y., Lu Q., Sun H. "Investigation and monitoring on a rainfall-induced deep-seated landslide." *Arabian Journal of Geosciences* 9.182 (2016): 1-13

Sitografia

- www.aseltd.eu/documentation
- www.csgsrl.eu/index.html

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare la Prof.ssa Cola per l'interessante argomento di tesi propostomi e l'aiuto datomi.

Un grande ringraziamento va anche al Centro di Monitoraggio Geologico di Arpa Lombardia e, in particolare, al Dott. Geol. Luca Dei Cas e al Dott. Geol. Andrea Pavan per aver concesso i dati necessari allo svolgimento del lavoro di tesi.

Ringrazio i miei compagni di corso e amici Carlo, Michele, Laura, Ingrid, Cristina, Stefania e Debora per la compagnia, i bei momenti e il supporto in questi 5 anni di studio.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, sempre pronta a sostenermi in questi anni e negli ultimi mesi.