UNIVERSITÀ
DI PAVIA

FACOLTA' DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

TITOLO

Dalle indagini in sito alla simulazione numerica: stabilità di un versante in frana a Belsito (CS) sotto l'azione della pioggia

Candidata: Maria Rita Vazzana

Relatore: Prof. Domenico Gioffrè
Correlatore: Ing. Mariantonietta Ciurleo

A.A. 2025/2026

Sommario

Indice delle immagini 3

Indice delle tabelle 5

Introduzione e scopo della tesi 6

1. Capitolo 1: Le frane 11

1.1 Normativa di riferimento 12

1.2 Classificazione delle frane 15

i. Tipologia di movimento 15

ii. Tipo di materiale 17

iii. Velocità 19

iv. Stato di attività 20

1.3 Nomenclatura della frana 21

1.4 Cause innescanti e fattori predisponenti 24

1.5 Modelli numerici per l'analisi delle frane 25

1.5.1 Metodo dell'equilibrio limite 26

1.5.2 Metodo degli elementi finiti 27

2 Capitolo 2: L'area di studio 29

2.1 Inquadramento geografico e geologico 29

2.2 Inquadramento geomorfologico 33

2.3 Inquadramento nell'ambito del PAI 35

2.4 Analisi storica delle precipitazioni e caratterizzazione idrologica 36

3 Capitolo 3: La frana analizzata 43

3.1 Indagini in sito e test di laboratorio 49

3.2 Modello geologico e geotecnico della frana 54

4 Capitolo 4: La modellazione numerica 58

4.1 Introduzione al software 58

4.1.1 Metodo degli elementi finiti e analisi di stabilità 58
4.2 Definizione del modello geotecnico per le simulazioni numeriche 59
4.2.1 Stratigrafia e proprietà dei materiali 59
4.2.2 Condizioni al contorno 60
4.3 Modellazione delle condizioni idrauliche..... 61
4.3.1 Linea piezometrica 61
4.3.2 Comportamento dei terreni non saturi 62
4.3.3 Parametri di van Genuchten 63
4.3.4 Funzione di precipitazione.....65
4.4 Definizione del modello numerico 66
4.5 Simulazione del primo evento 68
4.5.1 Risultati delle simulazioni 69
4.5.2 Evoluzione delle pressioni interstiziali.....70
4.5.3 Confronto con secondo evento 74
5 CAPITOLO 5: Strategie di mitigazione della frana e valutazione degli interventi 76
5.1 Inquadramento delle strategie di mitigazione del rischio frana..... 77
5.2 Analisi dei principali fattori di instabilità della frana..... 80
5.3 Individuazione delle possibili strategie di intervento 81
5.4 Interventi applicabili al caso di studio..... 82
5.5 Modellazione numerica degli interventi di mitigazione e discussione dei risultati 84
Conclusioni..... 86
Bibliografia e sitografia..... 89
Ringraziamenti 92

Indice delle immagini

Figura 1 Tipologie e percentuali di movimento frane in Italia. 9
Figura 2 Nomenclatura di una frana. 23
Figura 3 - Localizzazione geografica dell'area di studio ed inquadramento geologico. 29
Figura 4 Carta dei fenomeni di instabilità di versante del Comune di Belsito (CS), con localizzazione delle aree in frana oggetto di studio. 34
Figura 5 Cartografia PAI: Carta inventario dei centri abitati instabili – Cartografazione e classificazione dei fenomeni franosi. 36
Figura 6 Precipitazioni giornaliere e cumulata, registrate nel periodo 20/01/2009-01/02/2009. 37
Figura 7– Andamenti temporali delle precipitazioni cumulate: a) a 60, 90 e 120 giorni, relative al 25/01/2009; b) a 18, 24 e 30 mesi, relative al 25/01/2009. 38
Figura 8 Precipitazioni giornaliere e cumulata, registrate nel periodo 04/02/2010-15/02/2010. 38
Figura 9– Andamenti temporali delle precipitazioni cumulate: a) a 60, 90 e 120 giorni, relative al 13/02/2010; b) a 18, 24 e 30 mesi, relative al 13/02/2010 39
Figura 10 Confronto tra i valori storici giornalieri e quelli relativi al 25/01/2009 e al 13/02/2010. 40
Figura 11 Significatività degli eventi del 25/01/2009 e del 13/02/2010 rispetto ai valori storici cumulati a: a) 60 giorni; b) 90 giorni; c) 120 giorni. 41
Figura 12 Significatività degli eventi del 25/01/2009 e del 13/02/2010 rispetto ai valori storici cumulati a: a) 18 mesi; b) 24 mesi; c) 30 mesi. 42
Figura 13 Carta delle frane dell'area di località SURDA (redatta tramite rilevamenti di campagna condotti nel luglio 2010). 44
Figura 14 Documentazione fotografica della frana di località Surda 46
Figura 15 Documentazione fotografica della frana di località Surda (versante esposto ad Ovest, zona Azienda "La Comedil"), relativa al marzo 2010 47
Figura 16 Documentazione fotografica della frana di località Surda (versante esposto ad Ovest, zona Azienda "La Comedil"), relativa al marzo 2010. Foto: A) particolare del fabbricato distrutto e gradini di frana (circa 1.5m) sullo sfondo; B) scarpata di frana principale, lato sinistro; C) scarpata di frana principale, lato destro; D) corpo di frana visto

dall'alto; E) terrazzo di frana, immediatamente a valle della scarpata principale; F) scarpate secondarie e terrazzi da frana, sul tratto di versante in frana esposto a Nord. . 48
Figura 17 Indagini in situ eseguite nel periodo luglio-agosto 2010. 49
Figura 18 Sintesi dell'interpretazione delle indagini in situ. 51
Figura 19 Risultati delle prove di laboratorio. Curve granulometriche e carta di plasticità. 53
Figura 20 Ubicazione della Sezione 7-7' usata per la ricostruzione del modello geologico e geotecnico della frana. 54
Figura 21 Ricostruzione della sezione 7-7’ (sezione di riferimento), della frana analizzata (la cui traccia è riportata in figura Fig. 20). 56
Figura 22 Riproduzione della sezione più rappresentativa con RS2. 61
Figura 23 Estratto immagine RS2 con linea piezometrica. 62
Figura 24 Curva di conducibilità idraulica e curva di ritenzione per lo strato “Sandy loam”. 64
Figura 25 Curva di conducibilità idraulica e curva diritenzione per lo strato “Clayey Silts”. 64
Figura 26 Curva di conducibilità idraulica e curva di ritenzione per lo strato “Loamy Sand”. 64
Figura 27 Curva di conducibilità idraulica e curva di ritenzione per lo strato “Clay”. .. 65
Figura 28 Rainfall function. 66
Figura 29 Funzione di pioggia e giorni analizzati. 67
Figura 30 Andamento delle precipitazioni con identificazione degli eventi analizzati.. 68
Figura 31 Andamento valore SRF. 69
Figura 32 Distribuzione delle pressioni interstiziali nel versante nella simulazione 1. . 70
Figura 33 Distribuzione delle pressioni interstiziali nel versante nella simulazione 2. . 71
Figura 34 Distribuzione delle pressioni interstiziali nel versante nella simulazione 3. . 71
Figura 35 Distribuzione delle pressioni interstiziali nel versante nella simulazione 4. . 71
Figura 36 Distribuzione delle pressioni interstiziali nel versante nella simulazione 5. 72
Figura 37 Andamento del grado di saturazione nel versante nella simulazione 1. 72
Figura 38 Andamento del grado di saturazione nel versante nella simulazione 2. 72
Figura 39 Andamento del grado di saturazione nel versante nella simulazione 3. 73
Figura 40 Andamento del grado di saturazione nel versante nella simulazione 4. 73

Figura 41 Andamento del grado di saturazione nel versante nella simulazione 5. 73
Figura 42 Andamento degli spostamenti simulazione 5- primo evento. 74
Figura 43 Andamento delle precipitazioni secondo evento..... 75
Figura 44 Fasi di costruzione dei dreni suborizzontali. 83
Figura 45 Riproduzione del modello con la presenza di 8 dreni sub-orizzontali. 84

Indice delle tabelle

Tabella 1Sintesi dei principali riferimenti normativi 12
Tabella 2 Tipo di movimento e tipo di materiali (Varnes, 1978). 18
Tabella 3 Materiali che costituiscono la frana (Hungr et al., 2014). 18
Tabella 4 Classi di velocità dei fenomeni franosi (Cruden e Varnes, 1996). 19
Tabella 5 Sintesi delle indagini eseguite 52
Tabella 6 Sintesi della successione stratigrafica e dei parametri geotecnici di riferimento derivati dalle indagini geognostiche e dalle prove di laboratorio. 57
Tabella 7 Proprietà dei materiali 60
Tabella 8 Parametri di Van Genuchten 63
Tabella 9 Parametri di Van Genuchten adottati nel modello. 63
Tabella 10 Configurazioni delle simulazioni numeriche relative al primo evento. 68
Tabella 11 Relazione tra tipologia di fenomeno franoso e principali strategie di mitigazione secondo l'approccio SafeLand 78
Tabella 12 Principali strategie di mitigazione in relazione alle caratteristiche del fenomeno franoso. 81
Tabella 13 Criteri di applicabilità dei drenaggi suborizzontali. 83
Tabella 14 Confronto tra le simulazioni con azioni di mitigazione 85

Introduzione e scopo della tesi

Le frane sono tra i fenomeni naturali più pericolosi a livello mondiale in termini di impatto sull'incolumità pubblica e danni materiali. Queste, infatti, possono causare ingenti perdite di vite umane, danni materiali con la distruzione di beni esposti (tra cui strutture ed infrastrutture) e disastri ambientali legati all'alterazione degli habitat, alla contaminazione delle risorse idriche e alla perdita di suolo fertile con un conseguente enorme impatto economico per la messa in sicurezza del territorio e ripristino dell'ecosistema.

Le frane sono ancora oggi oggetto di studio e analisi da parte di diverse discipline scientifiche come la climatologia, l'idrologia, l'idraulica, la geologia, la geomorfologia, l'idrogeologia e la geotecnica. Questa complessità rende necessario un approccio integrato e multidisciplinare, attraverso il quale le diverse discipline coinvolte possano contribuire alla caratterizzazione dei fenomeni franosi e alla valutazione delle condizioni che ne determinano l'attivazione in quanto ancora difficilmente prevedibili o controllabili.

Tra i fattori che possono innescare questi fenomeni è possibile individuare e distinguere cause di natura antropica o naturale a volte tra loro connesse.

In particolare, tra i fenomeni naturali possiamo citare i terremoti, le attività vulcaniche, lo scioglimento della neve, gli sbalzi termici e le condizioni climatiche estreme come piogge intense e prolungate alternate a periodi di siccità. Questi ultimi sono in parte esasperati dal cambiamento climatico un processo a sua volta fortemente influenzato dalle modifiche apportate dall'uomo all'ambiente. Tra le cause dirette di natura antropica figurano invece i disboscamenti, che riducono la capacità del terreno di assorbire l'acqua compromettendone la stabilità, l'impermeabilizzazione del suolo, gli scavi e l'edificazione in zone a rischio.

Focalizzando l'attenzione solo sulle frane pluvio-indotte, a livello globale è possibile individuare, negli ultimi 50 anni, alcune delle frane più significative in termini di danni e perdite di vite umane:

Frana di Tuve (Göteborg, Svezia) – 30 novembre 1977

La frana di Tuve, verificatasi il 30 novembre 1977 a Göteborg (Svezia), fu innescata da intense precipitazioni che causarono la saturazione dei terreni argillosi e il loro improvviso cedimento, coinvolgendo circa 3–4 milioni di m^3 di materiale. L'evento

provocò 9 vittime, circa 60 feriti, 600 senzatetto, la distruzione di 67 abitazioni e di circa 1 km di infrastrutture stradali, con un impatto economico stimato intorno ai 15 milioni di euro.

1987, Valtellina, Lombardia (Italia)

Nel 1987, in Valtellina (Lombardia), intense precipitazioni innescarono numerosi fenomeni franosi, tra cui la valanga rocciosa dal Monte Zandilla, causando complessivamente 49 vittime e 12 dispersi. L'evento determinò l'evacuazione di circa 20.000 persone e danni diffusi in 162 comuni, configurandosi come una delle più gravi calamità idrogeologiche in Italia nel secondo dopoguerra.

1998, Sarno & Quindici, Campania (Italia)

Nel 1998, nei comuni di Sarno e Quindici (Campania), intensi rovesci pluviometrici innescarono colate rapide di fango e detrito che investirono i centri abitati, causando 161 vittime. L'evento provocò tra l'altro gravi danni al tessuto urbano, con abitazioni e infrastrutture pesantemente compromesse, evidenziando l'elevata vulnerabilità dei versanti antropizzati in condizioni di saturazione dei terreni piroclastici.

2006 – Guinsaugon (Southern Leyte), Filippine

Nel 2006, a Guinsaugon (Southern Leyte, Filippine), intense precipitazioni, aggravate da un evento sismico di magnitudo 2.6, innescarono una frana catastrofica che travolse l'intero villaggio. Il bilancio fu di 1.126 vittime, con la completa distruzione della scuola locale e di numerose abitazioni, configurando uno dei più gravi disastri franosi dell'Asia sud-orientale.

2007 – Chittagong, Bangladesh

Nel 2007, a Chittagong (Bangladesh), i monsoni, aggravati da tagli illegali delle colline, innescarono colate di fango e detriti che seppellirono interi slum. L'evento provocò almeno 128 morti e oltre 150 feriti, evidenziando la combinazione letale tra fattori naturali e pratiche antropiche non controllate.

2008-2010, Calabria (Italia)

Negli inverni 2008-2009 e 2009-2010, l'intera regione Calabria fu colpita da intense precipitazioni. Tali eventi pluviometrici innescarono una diffusa attivazione di dissesti idrogeologici, costituiti prevalentemente da frane superficiali accompagnate da fenomeni di media profondità. I movimenti franosi interessarono un'ampia varietà di litologie affioranti, impattando gravemente su numerosi centri abitati. Le conseguenze sul

territorio furono particolarmente significative con ingenti danni al patrimonio edilizio e alle reti infrastrutturali, l'interruzione delle vie di comunicazione - con conseguente isolamento prolungato di diverse comunità - e una severa ricaduta economica a livello regionale.

2009, Messina (Sicilia, Italia)

Nel 2009, a Messina (Sicilia), intense piogge torrenziali innescarono frane e colate di fango che investirono diverse frazioni. L'evento causò almeno 31 morti e 6 dispersi, 95 feriti, oltre 400 senzatetto, e provocò la distruzione di case e infrastrutture stradali.

A3 Rogliano–Cosenza – 26 gennaio 2009

Il 26 gennaio 2009, sull'autostrada A3 Rogliano–Cosenza, intense precipitazioni su terreni argillosi provocarono una frana che invase la carreggiata. L'evento causò 2 morti, 5 feriti, seppellì un furgone e depositò circa 10.000 m^3 di detriti, interrompendo completamente il traffico.

Alluvioni e frane a Madeira (Portogallo) – 20 febbraio 2010

Il 20 febbraio 2010, a Madeira (Portogallo), un temporale atlantico con precipitazioni eccezionali di circa 75 mm/h provocò alluvioni e frane che devastarono il territorio. L'evento causò 51 morti, la distruzione di ponti e infrastrutture urbane, circa 600 senzatetto e danni stimati intorno a 1 miliardo di euro.

2015 – El Cambray Dos, Guatemala

Nel 2015, a El Cambray Dos (Guatemala), forti piogge su terreni instabili innescarono una massiccia frana di detriti che rase al suolo l'intero villaggio, con accumuli fino a 15 m. L'evento provocò circa 280 morti e decine di dispersi, rappresentando una delle più gravi tragedie franose recenti in America Centrale.

2023, Ischia & nazionale

Nel 2023, in Italia, intense precipitazioni hanno innescato frane che hanno colpito diverse zone tra cui l'isola di Ischia. L'evento ha causato 10 morti, 18 feriti, oltre 1.700 sfollati e danni stimati superiori a 1 miliardo di euro.

2023, Emilia-Romagna

Nel 2023, in Emilia-Romagna, due eventi pluviometrici eccezionali provocarono frane e alluvioni diffuse. L'emergenza causò 11 morti e ingenti danni ad abitazioni e infrastrutture, con perdite complessive stimate a circa 8,6 miliardi di euro a livello regionale.

2024 – Gofa, Etiopia Piogge

Nel 2024, a Gofa (Etiopia), forti piogge stagionali innescarono frane che seppellirono due paesi. L'evento causò 257 morti e 12 feriti, tra cui alcuni soccorritori rimasti vittime di una seconda frana durante le operazioni di emergenza.

2026 – Cosenza, Calabria (Italia)

Nel febbraio 2026, precipitazioni eccezionali legate al ciclone "Nils", con oltre 260 mm di pioggia in 48 ore, generarono diffusi fenomeni di alluvione e frana nella provincia di Cosenza, determinando uno stato di emergenza per isolazioni, cedimenti e rischio di dissesto idrogeologico nelle aree urbane e periurbane.

2026 Niscemi, Sicilia (Italia)

A gennaio 2026, forti piogge persistenti legate alla tempesta "Harry" innescarono un importante scorrimento di terreno a Niscemi (Sicilia), con un fronte di frana di circa 4 km, evacuazioni di oltre 1.000 residenti e danni significativi ad edifici e infrastrutture locali, pur senza vittime dirette grazie alle misure preventive

L'Italia è il Paese europeo maggiormente interessato da fenomeni franosi con oltre 636.000 frane censite interessano un'area di più di 25.100 km^2, pari all'8,3% del territorio nazionale. La Figura 1 mostra il complesso delle frane distinto per tipologia e percentuale di avvenimento (l'ISPRA, Inventario dei fenomeni franosi d'Italia 2025).

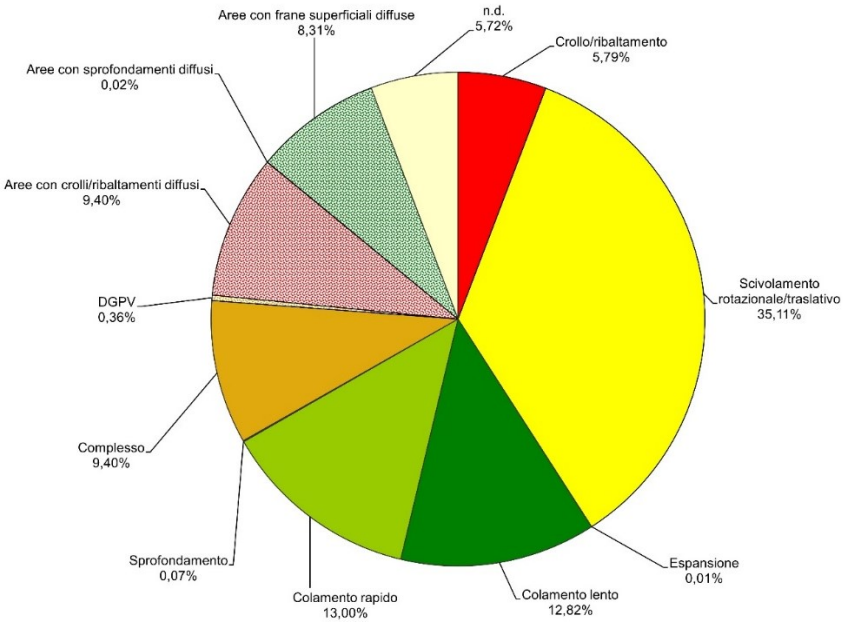


Figura 1 Tipologie e percentuali di movimento frane in Italia.

In questo panorama, la Calabria, per via della sua complessa conformazione geologica e storia tettonica, si colloca tra le regioni a più alto rischio idrogeologico in Italia.
Questa condizione è legata alla complessa evoluzione geologica e geomorfologica del territorio calabrese, caratterizzato dalla presenza di versanti con eleva pendenza, marcata deformazione tettonica e variabilità litologica. In particolare, la frequente presenza di terreni argillosi e argilloso-marnosi, spesso caratterizzati da bassa permeabilità e da proprietà meccaniche fortemente influenzate dalle condizioni di saturazione, contribuisce a rendere numerosi versanti Calabresi maggiormente suscettibili all'instabilità. Questi fattori, associati al verificarsi di eventi pluviometrici intensi e prolungati, possono determinare un incremento delle pressioni interstiziali e una conseguente riduzione della resistenza al taglio dei terreni, favorendo l'attivazione o la riattivazione di fenomeni franosi.
In tale contesto, il presente lavoro di tesi si propone di studiare una frana mediamente profonda a cinematica lenta localizzata nel comune di Belsito (CS). Tale frana risulta rappresentativa di numerose frane simili che interessano la regione in esame, ciò rende lo studio accurato di un solo evento utile nella comprensione di molti fenomeni simili.
L'obiettivo principale del presente elaborato è la ricostruzione del modello geologico e geotecnico del versante e l'analisi delle condizioni che hanno determinato l'attivazione del fenomeno franoso nel 2009, a seguito degli intensi eventi pluviometrici che hanno colpito l'intera regione Calabria, per poi subire una riattivazione nel periodo 2009-2010.
La frana è stata analizzata attraverso indagini in sito e prove di laboratorio, finalizzate alla definizione del modello geologico-tecnico del versante. Nei casi in cui si è riscontrata un'assenza di dati diretti si è fatto riferimento alla letteratura scientifica riguardante materiali con caratteristiche analoghe a quelli interessati dal fenomeno franoso.
Il modello geologico emerso dalle indagini è risultato particolarmente complesso a causa di una stratigrafia articolata e della presenza di faglie e fasce di alterazione. Di conseguenza, si è resa necessaria la definizione di un modello semplificato, con parametri opportunamente calibrati al fine di riprodurre la formazione della superficie di rottura e analizzare il ruolo della pioggia quale fattore innescante. L'analisi numerica è stata condotta attraverso il software RS2 (Rock and Soil 2-dimensional analysis program).

1. Capitolo 1: Le frane

La frana è definita come il movimento di una massa di terra, detrito e/o roccia lungo un versante (Cruden, 1991). I fenomeni franosi rappresentano una delle principali cause dell'evoluzione morfologica dei versanti e costituiscono un significativo fattore di rischio per infrastrutture, edifici e popolazione.

Le frane possono manifestarsi in modo improvviso e rapido oppure evolvere lentamente, rimanendo attive anche per periodi molto lunghi. In letteratura, i fenomeni franosi vengono classificati per tipologia, stato di attività, magnitudo (area, volume o velocità di movimento, tra gli altri), cinematica e materiali coinvolti.

Il fenomeno franoso è il risultato dell'interazione tra diversi fattori predisponenti e innescanti che agendo, sia singolarmente sia in modo combinato tra loro, determinano un raggiungimento progressivo della condizione di instabilità del versante. Lo studio e l'individuazione dei fattori che determinano il meccanismo di dissesto è fondamentale per introdurre delle strategie sia di previsione sia di mitigazione del rischio.

I fattori predisponenti sono l'insieme delle caratteristiche proprie del versante che ne condizionano la stabilità dell'area definendo un sito più o meno suscettibile al verificarsi di un fenomeno franoso.

Tra i fattori che assumono particolare importanza sono individuabili le caratteristiche geologiche e litologiche presenti lungo la stratigrafia, la disposizione degli strati rispetto alla geometria del versante, la presenza di discontinuità, la pendenza del pendio e le varie proprietà geotecniche dei terreni coinvolti. Di particolare importanza si evidenziano anche le condizioni idrologiche del sito, con riferimento alla presenza di falda, alla permeabilità dei terreni coinvolti e alla capacità di rispondere alle pressioni interstiziali.

I fattori scatenanti sono invece imputabili a tutte le condizioni al contorno che determinano il superamento dell'equilibrio del versante, attivando il movimento franoso.

I principali fattori naturali di innesco possono essere imputabili a fenomeni naturali quali le precipitazioni intense e/o prolungate. Queste rappresentano la causa più frequente di riattivazione dei fenomeni superficiali o profondi.

L'infiltrazione dell'acqua nel terreno comporta infatti un incremento di saturazione, un aumento delle pressioni interstiziali e di conseguenza una riduzione della resistenza al taglio lungo le superfici di scorrimento.

Altri fattori naturali possono essere rappresentati da eventi sismici, erosione al piede del versante, variazioni idrauliche.

Le attività antropiche, accanto ai fenomeni naturali, possono contribuire, accelerare o innescare i fenomeni franosi. La presenza di modifiche geometriche attraverso scavi e sbancamenti, incrementi di carichi dovuti alla realizzazione di nuove opere, modifiche idrografiche, impermeabilizzazioni del suolo o variazione della copertura vegetale contribuiscono alla modifica delle condizioni di equilibrio del pendio.

Il verificarsi di una frana, nella maggior parte dei casi, non è attribuibile a un singolo eventi, ma è il risultato di combinazioni di eventi predisponenti e di innesco. Un'area predisposta a instabilità a causa di più fattori predisponenti può permanere in stato stabile per lunghi periodi, fino al verificarsi anche di un solo singolo evento capace di modificare le condizioni iniziali e a contorno esistenti.

Questo è un aspetto significativo per le frane pluvio-indotto, nelle quali fattori combinati tra caratteristiche proprie e eventi meteorici estremi possono determinare attivazione o riattivazione di fenomeni franosi di elevata importanza.

1.1 Normativa di riferimento

Il quadro normativo di riferimento per la gestione del rischio idrogeologico e per la valutazione della stabilità dei pendii in Italia è il risultato di un'evoluzione progressiva, sviluppatasi a partire dalla normativa sulla difesa del suolo e successivamente integrata dalle disposizioni relative alla pianificazione del rischio e dalla normativa tecnica per la progettazione geotecnica. La tabella 1 riporta una sintesi dei principali riferimenti normativi e tecnici.

Tabella 1Sintesi dei principali riferimenti normativi

Riferimento normativo	Anno	Ambito di applicazione	Principali contenuti
Legge 18 maggio 1989, n. 183	1989	Difesa del suolo	Costituisce il riferimento storico per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo e per l'introduzione della pianificazione di bacino. Abrogata dal D.Lgs. 152/2006.

D.L. 11 giugno 1998, n. 180, convertito nella L. 3 agosto 1998, n. 267	1998	Rischio idrogeologico	Introduce misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico e per l'individuazione delle aree a rischio.
D.P.C.M. 29 settembre 1998	1998	Gestione del rischio	Definisce criteri e indirizzi per l'individuazione, la perimetrazione e la classificazione delle aree a rischio idrogeologico e per la programmazione degli interventi di mitigazione.
Piani di Assetto Idrogeologico (PAI)	2000 (L. 365/2000).	Pianificazione territoriale	Individuano e classificano le aree soggette a pericolosità e rischio idrogeologico e definiscono le relative misure di salvaguardia e di mitigazione.
D.M. 17 gennaio 2018 – NTC 2018	2018	Progettazione geotecnica	Stabilisce i criteri per la valutazione della sicurezza delle opere e per lo studio della stabilità dei pendii naturali, inclusa la definizione dei modelli geologico e geotecnico.
Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP.	2019	Applicazione delle NTC 2018	Fornisce istruzioni applicative per la caratterizzazione

			geologica e geotecnica, le indagini, le verifiche di sicurezza e gli interventi di stabilizzazione dei pendii.
UNI EN 1997-1 – Eurocodice 7	2005 + A1:2013	Progettazione geotecnica	Definisce principi e regole generali per la progettazione geotecnica e per la valutazione della sicurezza delle opere.
PrEN 1997-1	2018	Revisione dell'Eurocodice	Rappresenta una fase del processo di revisione dell'Eurocodice 7 e introduce un'impostazione basata, tra gli altri, sui concetti di complessità geotecnica (GCC), classe di conseguenza (CC) e categoria geotecnica (GC).

Come evidenziato nella tabella, il quadro di riferimento comprende sia disposizioni finalizzate alla pianificazione e alla gestione territoriale del rischio idrogeologico, sia norme tecniche specificamente rivolte alla valutazione della sicurezza geotecnica e alla stabilità dei pendii. In particolare, la Legge n. 183/1989 costituisce il punto di partenza dell'evoluzione normativa nazionale, mentre il D.L. n. 180/1998 e il successivo D.P.C.M. 29 settembre 1998 definiscono un sistema maggiormente strutturato per l'individuazione e la gestione delle aree a rischio. A tale quadro si affiancano le NTC 2018 e la relativa Circolare applicativa, che disciplinano gli aspetti propriamente ingegneristici della

valutazione della stabilità nel contesto disciplinare italiano, mentre l'Eurocodice 7 fornisce un riferimento metodologico a livello europeo.

1.2 Classificazione delle frane

La caratterizzazione sistematica di una frana rappresenta il prerequisito fondamentale sia per la pianificazione delle indagini in situ e delle prove di laboratorio, sia per la comprensione dei fattori predisponenti la franosità nonché per la scelta delle strategie di mitigazione più adeguate. Di conseguenza, il primo step nell'analisi delle frane è un'accurata identificazione del cinematismo e del meccanismo di rottura propri del fenomeno in esame.

i. Tipologia di movimento

Numerose sono le classifiche disponibili nella letteratura scientifica (Varnes, 1978; Cruden and Varnes, 1996; Hungr et al., 2014, tra gli altri), tra tutte la classificazione proposta da Varnes (1978), pubblicata in *Landslide Analysis and Control* della National Academy of Sciences, continua ad essere uno dei sistemi di classificazione dei fenomeni franosi maggiormente utilizzati in ambito scientifico per la sua estrema semplicità di utilizzo.

Tale classificazione si basa su due criteri fondamentali:

- Tipologia di movimento
- Tipologia di materiale coinvolto

Per quanto riguarda la tipologia di movimento, Varnes (1978) distingue sei principali categorie:

- *Caduta (Fall)*

La caduta è caratterizzata dal distacco improvviso di frammenti di roccia o terreno da pareti verticali o sub-verticali, seguito da un movimento prevalentemente controllato dalla gravità. Il materiale può muoversi mediante caduta libera, rimbalzo o rotolamento.

Questo tipo di fenomeno interessa principalmente ammassi rocciosi (*rock fall*), ma può coinvolgere anche terreni sciolti. Le cause predisponenti includono processi di gelo-disgelo, precipitazioni intense, alterazione della roccia, attività antropiche quali scavi ed esplosioni e, più in generale, tutte le condizioni che favoriscono la formazione e la propagazione di discontinuità nell'ammasso roccioso.

Le frane per caduta sono generalmente caratterizzate da elevata velocità e ridotta interazione tra i materiali durante il movimento.

- *Ribaltamento (Topple)*

Il ribaltamento consiste nella rotazione in avanti di masse rocciose o porzioni di terreno attorno a un punto o asse situato al di sotto del baricentro del blocco instabile.

Tale fenomeno è frequentemente associato alla presenza di discontinuità strutturali inclinate verso valle e può essere favorito da erosione al piede del versante, pressione dell'acqua nelle fratture, vibrazioni o azioni sismiche. La velocità del movimento può variare da lenta a molto rapida

- *Scorrimento (Slide)*

Lo scorrimento è caratterizzato dal movimento di una massa di terreno o roccia lungo una superficie di rottura ben definita, sede di intense deformazioni di taglio.

In funzione della geometria della superficie di scorrimento, gli scivolamenti possono essere distinti in:

  - *scorrimenti rotazionali (Rotational Slide)* caratterizzati da una superficie di rottura curva e concava verso l'alto, tipica dei terreni coesivi;
  - *scorrimenti traslazionali (Translational Slide)* caratterizzati da superfici di scorrimento pressoché piane, frequenti in rocce stratificate o materiali granulari poco coesivi.

- *Flusso (Flow)*

Il fenomeno di flusso è un movimento nel quale il materiale coinvolto assume un comportamento assimilabile a quello di un fluido viscoso. Il fenomeno interessa generalmente terreni sciolti saturi d'acqua che scorrono lungo il pendio in maniera continua.

In funzione della granulometria e della natura del materiale coinvolto, si distinguono:

  - *Debris flow*: costituito da una miscela di detriti rocciosi, acqua e terreno;
  - *Mudflow*: caratterizzato prevalentemente da materiali fini quali limi e argille;
  - *Earth flow:* movimento che interessa prevalentemente materiali plastici e coesivi, sviluppandosi su versanti a pendenza da moderata a elevata.

- *Espansione laterale (Lateral Spread)*

L'espansione laterale è caratterizzata da spostamenti prevalentemente orizzontali di masse rigide sovrastanti livelli più deboli e saturi, quali argille sensitive o sabbie fini.

Questo fenomeno è frequentemente associato a processi di liquefazione sismica, durante i quali il terreno perde resistenza al taglio assumendo un comportamento pseudo-fluido.

- *Complessa (Complex Movement)*

Le frane complesse derivano dalla combinazione di due o più tipologie di movimento precedentemente descritte. Un caso tipico è rappresentato da una frana che si innesca inizialmente come scorrimento e successivamente assume caratteristiche di flusso.

ii. Tipo di materiale

La classificazione di Varnes considera inoltre la natura del materiale coinvolto nel fenomeno franoso (Tabella 2). Nello specifico, la frazione solida viene ripartita nelle macro-categorie di roccia e terreno, con quest'ultimo ulteriormente distinto in terra e detrito in base alla granulometria.

Nello specifico, le rocce sono materiali lapidei coerenti e caratterizzati da una struttura definita. I fenomeni associati comprendono prevalentemente crolli, ribaltamenti e scorrimenti. I movimenti risultano generalmente rapidi e possono coinvolgere blocchi di grandi dimensioni.

I detriti sono costituiti da frammenti grossolani (con diametro superiore ai 2 mm) che rappresentano una quota compresa tra il 20% e l'80% della massa complessiva. Tali materiali sono frequentemente coinvolti in colate detritiche, scorrimenti detritici e movimenti complessi. I fenomeni associati possono raggiungere velocità elevate e svilupparsi lungo impluvi e corsi d’acqua.

Le terre comprendono i materiali che hanno grani con diametro inferiore a 2 mm per almeno l'80% del peso totale. Questi materiali sono tipicamente interessati da scorrimenti e colamenti caratterizzati da velocità generalmente medio-basse. Viceversa, si parla di detriti quando la componente grossolana (con diametro superiore ai 2 mm) rappresenta una quota compresa tra il 20% e l'80% della massa complessiva, rimanendo la frazione fine a completamento della miscela.

Tabella 2 Tipo di movimento e tipo di materiali (Varnes, 1978).

TYPE OF MOVEMENT		TYPE OF MATERIAL		
		BEDROCK	ENGINEERING SOILS	
			Predominantly coarse	Predominantly fine
FALLS		Rock fall	Debris fall	Earth fall
TOPPLES		Rock topple	Debris topple	Earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	Rock slide	Debris slide	Earth slide
	TRANSLATIONAL			
LATERAL SPREADS		Rock spread	Debris spread	Earth spread
FLOWS		Rock flow (deep creep)	Debris flow (soil creep)	Earth flow
COMPLEX		Combination of two or more principal types of movement		

Sebbene siano state numerose le classifiche dei fenomeni franosi proposte successivamente da diversi autori, si precisa che i principali tipo di movimenti sintetizzati in tabella 2 sono di uso comune a tutte le altre classifiche successive. Tra tutte, una delle più recenti è la classifica proposta da Hungr et al. (2014), che rivisitando la classificazione originaria proposta da Varnes (1978) introducono ulteriori sottocategorie di fenomeni franosi in base ai terreni coinvolti e agli indici derivanti da prove di laboratorio (se disponibili), Tabella 3.

Tabella 3 Materiali che costituiscono la frana (Hungr et al., 2014).

Material name	Character descriptors (if important)	Simplified field description for the purposes of classification	Corresponding unified soil classes	Laboratory indices (if available)
Rock	Strong	Strong—broken with a hammer		UCS>25 MPa
	Weak	Weak—peeled with a knife		2<UCS<25 MPa
Clay	Stiff	Plastic, can be molded into standard thread when moist, has dry strength	GC, SC, CL, MH, CH, OL, and OH	I_p> 0.05
	Soft			
	Sensitive			
Mud	Liquid	Plastic, unsorted remolded, and close to Liquid Limit	CL, CH, and CM	I_p>0.05 and I_l>0.5
Silt, sand, gravel, and boulders	Dry	Nonplastic (or very low plasticity), granular, sorted. Silt partides cannot be seen by eye	ML	I_p<0.05
	Saturated		SW, SP, and SM	
	Partly saturated		GW, GP, and GM	
Debris	Dry	Low plasticity, unsorted and mixed	SW-GW	I_p<0.05
	Saturated		SM-GM	
	Partly saturated		CL, CH, and CM	
Peat		Organic		
Ice		Glacier		

iii. Velocità

Per quanto riguarda la velocità di movimento, Cruden e Varnes (1996) hanno proposto una classifica basata sulla velocità di propagazione del fenomeno franoso, correlando ciascuna classe ai possibili effetti sul territorio e sulle infrastrutture (Tabella 4).

Tabella 4 Classi di velocità dei fenomeni franosi (Cruden e Varnes, 1996).

Classe	*Descrizione*	*Danni osservabili*	*Velocità tipica*	*Velocità (m/s)*
1	Estremamente lenta	Impercettibile senza strumenti di monitoraggio. Costruzione di edifici possibile con precauzioni.	< 16 mm/anno	
2	Molto lenta	Alcune strutture permanenti possono non essere danneggiate dal movimento.	> 16 mm/anno	$5x10^{-10}$
3	Lenta	Possibilità di intraprendere lavori di rinforzo e restauro durante il movimento. Le strutture meno danneggiabili possono essere mantenute con frequenti lavori di rinforzo se il movimento totale non è troppo grande durante una particolare fase di accelerazione.	> 1,6 m/anno	$5x10^{-8}$
4	Moderata	Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute.	> 13 m/mese	$5x10^{-6}$
5	Rapida	Evacuazione possibile. Distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti.	> 1,8 m/ora	$5x10^{-4}$
6	Molto rapida	Perdita di alcune vite umane. Velocità troppo elevata per permettere l'evacuazione delle persone.	> 3 m/minuto	$5x10^{-2}$
7	Estremamente rapida	Catastrofe di eccezionale violenza. Edifici distrutti per l'impatto del materiale spostato. Molti morti. Fuga impossibile.	> 5 m/s	5

iv. Stato di attività

L'analisi delle fasi di movimento e dello stato di attività costituisce un elemento fondamentale per la caratterizzazione dei fenomeni franosi, poiché consente di descriverne il comportamento evolutivo e di valutarne il potenziale sviluppo nel tempo. La distinzione tra fase di movimento e stato di attività permette infatti di identificare sia il meccanismo evolutivo del fenomeno sia il suo grado di attività, fornendo informazioni essenziali per la valutazione della pericolosità e per la progettazione di eventuali interventi di mitigazione. A tal proposito, Vaunat et al. (1994) e Leroueil et al. (1996) suggeriscono, inoltre, di considerare una matrice a tre dimensioni che, oltre alla tipologia di movimento ed al materiale coinvolto, comprenda una delle seguenti quattro fasi di movimento:

- *Pre-rottura*: fase iniziale in cui si accumulano deformazioni interne senza movimento significativo del materiale.
- *Rottura*: fase in cui il materiale supera la resistenza al taglio e si sviluppa la superficie di scorrimento.
- *Fase di attivazione*: fase in cui la massa di terreno o detrito si muove lungo la superficie di rottura, manifestando il movimento visibile della frana.

Lo stato di attività descrive la condizione evolutiva della frana indipendentemente dalla fase cinematica. Le principali categorie sono:

- *attiva***:** attualmente in movimento;
- *sospesa***:** si è mossa entro l'ultimo ciclo stagionale ma non è attiva attualmente;
- *riattivata:* di nuovo attiva dopo essere stata inattiva;
- *inattiva***:** si è mossa per l'ultima volta prima dell'ultimo ciclo stagionale.

Le frane inattive si possono dividere ulteriormente in:

- *quiescenti*: frane inattive che possono essere riattivate dalle loro cause originarie;
- *naturalmente stabilizzate*: frane inattive che sono state protette dalle loro cause originarie *senza interventi antropici;*
- *artificialmente stabilizzate*: frane inattive che sono state protette dalle loro cause originarie da apposite misure di stabilizzazione;
- *relitte*: frane inattive che si sono sviluppate in condizioni geomorfologiche o climatiche considerevolmente diverse da quelle attuali.

Le frane possono inoltre essere classificate in funzione della profondità della superficie di scorrimento rispetto al piano campagna, distinguendosi in superficiali ($profondità \leq 3m$), mediamente profonde ($3m < profondità \leq 30\ m$) e profonde ($profondità > 30m$).

Le frane mediamente profonde, come quella analizzata nel presente elaborato, presentano generalmente una superficie di scorrimento compresa tra 3 e 30 m di profondità. I materiali coinvolti sono costituiti prevalentemente da terreni alterati, talvolta con interessamento parziale del substrato roccioso.

La velocità del movimento può variare da lenta a rapida in funzione delle caratteristiche geotecniche dei terreni, della morfologia del versante e delle condizioni di saturazione. Tali fenomeni possono interessare porzioni estese del versante e risultano frequentemente associati a infiltrazioni idriche, modificazioni morfologiche, eventi sismici o sovraccarichi antropici.

La velocità del movimento può variare da lenta a rapida in funzione delle caratteristiche geotecniche dei terreni, della morfologia del versante e delle condizioni di saturazione. Tali fenomeni possono interessare porzioni estese del versante e risultano frequentemente associati a infiltrazioni idriche, modifiche morfologiche, eventi sismici o sovraccarichi antropici.

1.3 Nomenclatura della frana

Entrando nel dettaglio di ciascun elemento che costituisce la frana, la terminologia ampiamente adottata per descrivere in modo sistematico la morfologia e l'evoluzione dei fenomeni franosi è stata originariamente proposta da Varnes (1978) e successivamente aggiornata da Cruden e Varnes (1996). Il versante interessato da un fenomeno franoso può essere suddiviso in tre zone principali: *zona di distacco, zona di trasporto (o zona di scorrimento) e zona di accumulo*, ciascuna caratterizzata da specifici elementi morfologici (Fig. 2).

1. *Zona di distacco (Head/Scarp)*

La zona di distacco corrisponde alla parte sommitale del versante da cui ha origine il movimento del materiale. È caratterizzata da rottura e cedimento del terreno e si presenta spesso come una scarpata esposta, chiaramente visibile sulla superficie. In questa zona si distinguono diversi elementi morfologici:

- Coronamento: area più elevata del pendio costituita da materiale sostanzialmente in posto, immediatamente a monte della scarpata principale;
- *Scarpata principale:* superficie ripida che delimita superiormente il corpo di frana e rappresenta il punto di distacco del materiale;
- *Punto sommitale (culmine):* il punto più alto di contatto tra materiale franato e terreno rimasto in posto;
- *Testata*: porzione superiore del corpo di frana a diretto contatto con la scarpata principale.

2. *Zona di trasporto o di scorrimento (Transport zone)*

La zona di trasporto è la porzione intermedia del versante in cui il materiale franato si muove, si estende dal termine della zona di innesco fino all'inizio della zona di accumulo. È caratterizzata da deformazioni interne e movimenti differenziali all'interno del corpo di frana. Gli elementi principali sono:

- *Superficie di scorrimento (sliding surface):* piano lungo il quale avviene il movimento relativo del materiale; può essere planare, curva o irregolare a seconda della meccanica della frana, e costituisce la superficie di riferimento nei metodi di calcolo di stabilità, in particolare nei metodi di equilibrio limite;
- *Corpo principale***:** materiale mobilizzato situato sopra la superficie di scorrimento;
- *Scarpate secondarie:* superfici ripide generate da movimenti differenziali all'interno della massa in movimento;
- *Fianchi:* margini laterali del corpo di frana che delimitano l'area interessata dal movimento.

3. *Zona di deposito (Toe / Depositional zone)*

La zona di deposito si trova nella parte inferiore del versante ed è caratterizzata dal deposito del materiale mobilizzato. Gli elementi principali comprendono:

- *Area inferiore in cui il materiale si deposita.*

- *Superficie di separazione:* contatto tra il materiale franato e il substrato non mobilizzato;
- *Piede della frana:* porzione inferiore del corpo di frana;
- *Unghia (toe)*: porzione più avanzata del deposito di frana, situata alla massima distanza dalla scarpata principale.

All'interno del corpo di frana possono svilupparsi forme secondarie, indicative dei meccanismi di deformazione. Tra queste:

- *Crepe radiali*: fratture legate a condizioni di trazione, tipicamente presenti nella zona di distacco;
- *Creste trasversali*: rilievi dovuti a fenomeni compressivi, che si sviluppano prevalentemente nella zona di accumulo o lungo il corpo della frana.

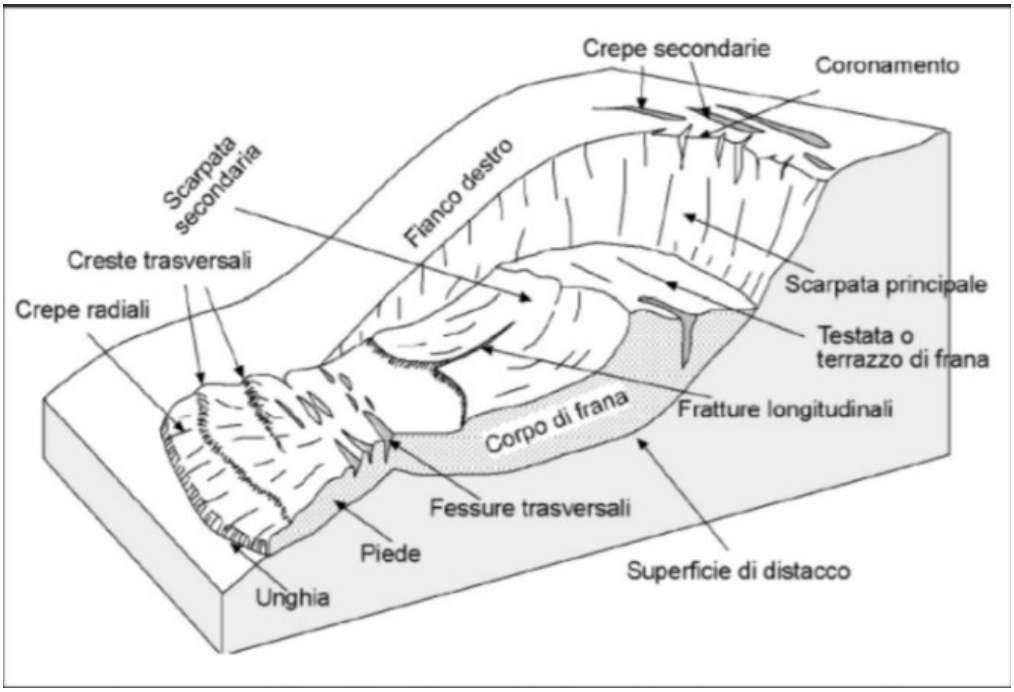


Figura 2 Nomenclatura di una frana.

1.4 Cause innescanti e fattori predisponenti

L'innesco di un fenomeno franoso è il risultato dell'interazione tra fattori predisponenti e cause innescanti agenti a differenti scale spaziali e temporali. Sebbene le caratteristiche geologiche, geomorfologiche e geotecniche del pendio ne determinino la predisposizione al dissesto, il movimento si manifesta quando le tensioni tangenziali agenti lungo una potenziale superficie di scorrimento superano la resistenza al taglio del terreno o della roccia.

Mentre le caratteristiche intrinseche del versante (litologia, discontinuità strutturali, proprietà geotecniche e geometria del pendio) definiscono le condizioni di predisposizione al dissesto, condizionando la localizzazione, la cinematica e il volume potenziale del corpo di frana, le cause innescanti sono gli eventi esterni responsabili del momento esatto del collasso.

Nel presente elaborato di tesi l'attenzione si focalizza esclusivamente sulle frane indotte da pioggia che agisce come principale forzante idrologica. Il regime pluviometrico condiziona la tipologia, la cinematica e la profondità dei movimenti di versante in funzione della relazione tra intensità e durata dell'evento:

- Precipitazioni di elevata intensità e breve durata favoriscono la rapida saturazione degli strati di terreno più superficiali, portando all'annullamento della suzione di matrice (nei terreni parzialmente saturi) e al contemporaneo sviluppo di sovrappressioni neutre positive; tali condizioni sono tipicamente associate all'innesco di frane superficiali e colate detritiche.
- Precipitazioni di bassa intensità ma prolungati nel tempo, uniti alle condizioni di umidità antecedente, consentono una infiltrazione più profonda che determina l'innalzamento della superficie piezometrica e la riattivazione o l'innesco di movimenti franosi profondi.

In entrambi i casi, il processo di infiltrazione dell'acqua modifica lo stato tensionale secondo il principio delle tensioni efficaci di Terzaghi ($\sigma' = \sigma - u$): l'incremento della pressione interstiziale (u) produce una riduzione diretta delle tensioni normali efficaci (σ') e, di conseguenza, della resistenza al taglio disponibile. Inoltre, i cicli ripetuti di saturazione e desaturazione possono indurre nel tempo una progressiva degradazione dei parametri di resistenza, riducendo gradualmente la resistenza a taglio del terreno fino al raggiungimento dello stato limite ultimo.

1.5 Modelli numerici per l'analisi delle frane

In letteratura scientifica non esiste un unico metodo numerico in grado di simulare contestualmente, e con la medesima efficacia, tutte le fasi evolutive di una frana: l'innesco, la propagazione e l'accumulo (o deposito). Poiché le condizioni fisiche e cinematiche del materiale cambiano radicalmente durante l'evoluzione del dissesto, queste fasi vengono generalmente studiate in modo separato, ricorrendo a modelli fisicamente basati alla scala di versante.

La distinzione principale tra i modelli dipende dall'entità degli spostamenti in gioco:

- **Fase di innesco (piccole deformazioni):** Durante questa fase iniziale, il terreno mantiene un comportamento assimilabile a un solido (*solid-like behaviour*) ed è governato dai principi della meccanica del continuo. I metodi utilizzati si basano generalmente sull'approccio Lagrangiano, in cui la griglia di calcolo (che può essere strutturata, come nelle differenze finite, o non strutturata, come negli elementi e volumi finiti) è vincolata al materiale e si deforma solidalmente con esso.
- **Fase di propagazione (grandi deformazioni):** Una volta avvenuta la rottura, la miscela di acqua e terreno fluisce verso valle e le particelle subiscono spostamenti significativi. In questo stadio, l'approccio Lagrangiano andrebbe incontro a severi problemi numerici legati all'eccessiva distorsione della griglia. Per analizzare questa fase si ricorre quindi all'approccio Euleriano (in cui la griglia è fissa nello spazio e la massa vi fluisce attraverso) o a metodi accoppiati Euleriano-Lagrangiani (CEL), volti a combinare i punti di forza di entrambe le formulazioni. Tuttavia, poiché l'applicabilità dei metodi CEL è spesso limitata dagli elevati oneri computazionali, per modellare i problemi a grandi deformazioni la ricerca si sta orientando verso promettenti metodi numerici privi di griglia (*meshless*). Tra questi spiccano il *Material Point Method* (MPM), la *Smooth Particle Hydrodynamics* (SPH), il *Particle Finite-Element Method* (PFEM), il FEMLIP e l'*Element-Free Galerkin* (EFG).

Focalizzando l'attenzione esclusivamente sullo stadio pre-rottura e di rottura, l'analisi della stabilità dei versanti rappresenta lo snodo fondamentale per lo studio dei fenomeni

franosi. Nel corso degli anni sono stati sviluppati numerosi metodi volti a studiare le condizioni di equilibrio limite del pendio, identificare le potenziali superfici di scorrimento e valutare il peso dei principali fattori predisponenti (quali la geometria del versante, le caratteristiche geotecniche dei terreni e le condizioni idrauliche).

I metodi più comunemente usati per l'analisi dell'innesco si suddividono in due macro-categorie:

1. Metodi dell'equilibrio limite (*Limit Equilibrium Methods*, LEM);
2. Metodi numerici al continuo, tra cui spicca il metodo agli elementi finiti (*Finite Element Method*, FEM).

Nonostante la disponibilità di programmi di calcolo sempre più performanti, i metodi dell'equilibrio limite (LEM) costituiscono tuttora il riferimento principale per la pratica professionale, grazie alla possibilità di adottare assunzioni semplificative efficaci e ai ridotti tempi di calcolo.

Tuttavia, il metodo agli elementi finiti (FEM) rappresenta oggi la tecnica maggiormente utilizzata nelle applicazioni geotecniche moderne e avanzate. I metodi numerici, infatti, consentono una descrizione molto più realistica del comportamento meccanico del terreno: superando le semplificazioni dei LEM, permettono di simulare con precisione la distribuzione degli stati tensionali e deformativi all'interno del pendio e di tracciare l'evoluzione progressiva del fenomeno di instabilità fino al momento della rottura.

1.5.1 Metodo dell'equilibrio limite

I metodi all'equilibrio limite studiano l'equilibrio di un corpo rigido, analizzando quindi il pendio e la sua superficie di scorrimento di qualsiasi forma, da cui è possibile calcolare le tensioni da taglio τ e confrontate con la resistenza disponibile τ_s valutata con il criterio di Coulomb. Si ipotizza che il collasso del versante avvenga lungo superfici prefissate di scorrimento o ricercandole attraverso procedure iterative.

I metodi possono essere distinti in funzione del corpo considerato per l'equilibrio, in quanto alcuni utilizzano il corpo rigido altri invece a causa della non omogeneità dividono il corpo in conci considerando l'equilibrio del singolo concio.

La zona instabile viene suddivisa in diversi conci verticali e l'equilibrio viene imposto considerando in ciascun concio le forze agenti.

L'analisi ha come obbiettivo il calcolo del fattore di sicurezza *"Factor of Safety, FS",* ovvero il rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie di scorrimento e le tensioni tangenziali mobilitate.

$$FS > 1 \; Pendio \; stabile$$

$$FS \leq 1 \; Pendio \; instabile$$

Nel corso degli anni sono stati sviluppati diversi metodi di equilibrio limite, tra cui quelli proposti da Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer e Morgenstern-Price. Tra questi, il *metodo semplificato di Bishop (1955)* è uno dei più diffusi. Tale metodo utilizza l'equilibrio dei momenti dell'intera massa e l'equilibrio verticale dei singoli conci, trascurando invece le componenti tangenziali delle forze interconcio. Il fattore di sicurezza viene determinato attraverso una procedura iterativa.

I principali vantaggi dei metodi di equilibrio limite sono rappresentati dalla semplicità di implementazione, dalla rapidità di calcolo e dalla limitata quantità di dati richiesta. Questi però hanno anche dei limiti, tra cui l'impossibilità di descrivere il comportamento deformativo del terreno, la necessità di ipotizzare la geometria della superficie di rottura e la difficoltà nel rappresentare geometrie stratigrafiche particolarmente complesse o condizioni idrauliche variabili nel tempo.

1.5.2 Metodo degli elementi finiti

Il metodo degli elementi finiti (Finite Element Method, FEM) rappresenta uno degli strumenti più avanzati per l'analisi geotecnica dei versanti. A differenza dei metodi di equilibrio limite, non richiede di ipotizzare una superficie di scorrimento, ma consente di determinare la distribuzione degli stati tensionali e deformativi all'interno dell'intero dominio analizzato.

Il terreno viene discretizzato in un insieme di elementi di dimensioni finite connessi tra loro mediante nodi. Ad ogni elemento viene assegnato un modello costitutivo che

descrive il comportamento meccanico del materiale in funzione delle proprietà geotecniche dati come input. La risoluzione delle equazioni dell'equilibrio dà la possibilità di ottenere gli spostamenti, le deformazioni, le tensioni e l'evoluzione delle zone plasticizzate.

Per le analisi di stabilità si utilizza la tecnica dello *Strength Reduction Method (SRM)*, o *Shear Strength Reduction (SSR)***.** Questa consiste nella progressiva riduzione dei parametri di resistenza al taglio del terreno, coesione e angolo di resistenza al taglio , fino a raggiungere le condizioni di collasso numerico. Il fattore di sicurezza è determinato come il rapporto tra i parametri di resistenza iniziali e quelli ridotti al momento della perdita di equilibrio.

Rispetto ai metodi tradizionali, gli elementi finiti consentono di modellare anche geometrie complesse, stratigrafie eterogenee, condizioni idrogeologiche variabili, presenza di discontinuità e comportamento non lineare dei materiali. È possibile ottenere informazioni e sulla distribuzione delle deformazioni e sul meccanismo di evoluzione della superficie di rottura.

2 Capitolo 2: L'area di studio

2.1 Inquadramento geografico e geologico

L'area oggetto di studio è localizzata nel territorio comunale di Belsito, in provincia di Cosenza, nel settore centro-settentrionale della Calabria (Fig. 3).

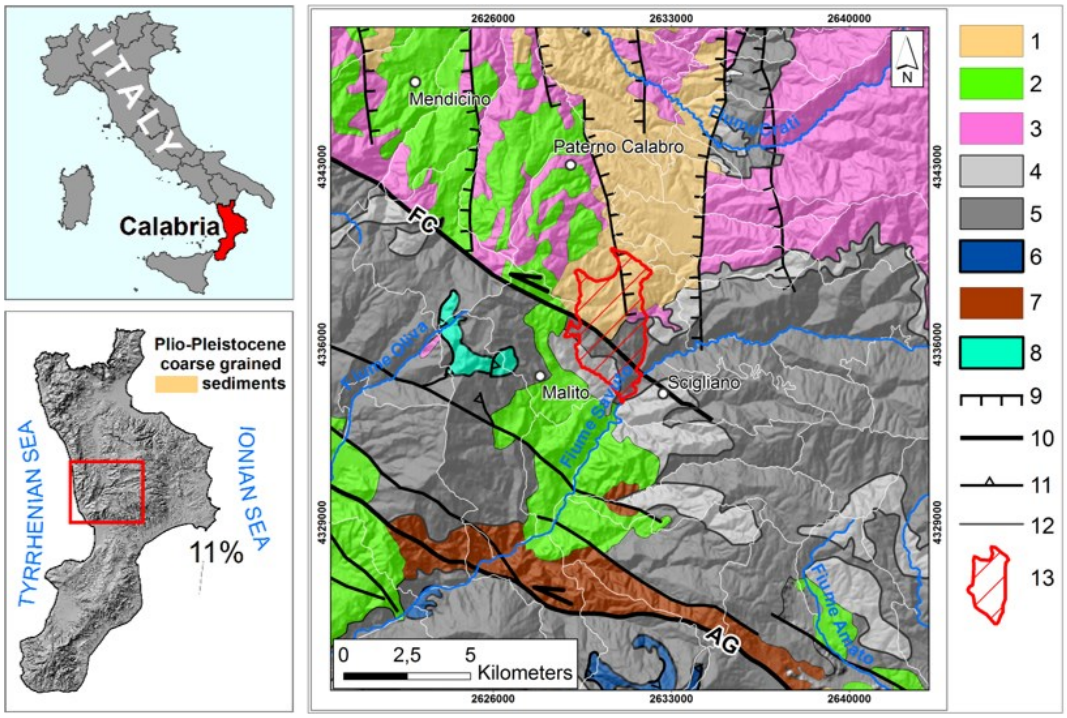


Figura 3 - Localizzazione geografica dell'area di studio ed inquadramento geologico.

Legenda: 1) depositi del Pliocene medio-Pleistocene medio; 2) deposti del Miocene superiore-Pliocene inferiore; 3) paragneiss (Paleozoico); 4) ortogneiss (Paleozoico); 5) scisti e metapeliti (Paleozoico-Mesozoico); 6) ofioliti (Titoniano-Necomiano); 7) resti di basamento in zona di taglio (Paleozoico-Mesozoico); 8) dolomie e metacalcari (Trias superiore-Lias); 9) faglia normale; 10) faglie trascorrenti; 11) thrust transpressivi; 12) vecchi overthrust; 13) Comune di Belsito.

Il territorio si sviluppa in un contesto collinare caratterizzato da versanti con acclività variabile e da una morfologia fortemente condizionata dall'assetto geologico e geomorfologico locale.

Dal punto di vista altimetrico, l'area presenta quote comprese tra circa 200 e 600 m s.l.m. ed è inserita nel bacino idrografico del fiume Crati. Le condizioni morfologiche e geologiche dei versanti, unitamente alle caratteristiche climatiche dell'area, favoriscono

lo sviluppo di fenomeni di instabilità gravitativa, documentati da numerosi eventi franosi verificatisi nel corso degli anni.

L'area ricade inoltre in una zona a elevata pericolosità sismica, aspetto che assume particolare rilevanza nelle analisi di stabilità dei versanti e nella progettazione degli interventi di mitigazione del rischio.

L'area di studio si trova, infatti, in un'area di transizione tra un'importante zona di faglia trascorrente sinistra, orientata NO-SE e di rilevanza regionale a sud, e il Graben del Crati a nord (Fig. 3). Questa zona di faglia (Van Dijk et al., 2000; Tansi et al., 2007) ha influenzato significativamente l'evoluzione della Calabria settentrionale e, più in generale, dell'Arco Calabro, dissecando l'orogenesi originaria, che consisteva in falde alpine sovrascorse sulla Catena Appenninica durante l'Oligocene fino al Miocene inferiore (Amodio Morelli et al., 1976; Thomson, 1994; Van Dijk et al., 2000). Nello specifico, la "zona di taglio" (shear zone) comprende tre principali faglie trascorrenti sinistre: la Faglia di Falconara-Carpanzano (FCF), la Faglia di Amantea-Gimigliano (AGF) e la Faglia di Lamezia-Catanzaro (LCF), disposte en échelon con una sovrapposizione verso destra (Tansi et al., 2007) (Fig. 3).

L'alta Valle del Crati fa parte di un esteso bacino sedimentario sviluppatosi durante il Plio-Pleistocene, allineato assialmente lungo la Calabria settentrionale (Lanzafame e Tortorici, 1981). La sequenza sedimentaria che riempie il bacino della Valle del Crati è costituita da depositi terrigeni plio-pleistocenici, con spessore e distribuzione variabili da sud a nord. Nelle sezioni centrali e meridionali del bacino, la base di questa sequenza è formata da rocce cristallino-metamorfiche della Catena Costiera (Messina et al., 1994) e da sequenze tortoniano-messiniane, correlate con gli affioramenti lungo il margine occidentale della Calabria. I depositi miocenici rappresentano il riempimento di bacini sedimentari formatisi a partire dal Tortoniano inferiore e coinvolti in una tettonica distensiva durante il Plio-Pleistocene. Questi depositi si rinvengono sia nelle depressioni tettoniche meridionali dell'alta Valle del Crati, sia alle quote più elevate dell'attuale Catena Costiera. La sequenza miocenica è costituita da una successione terrigena basale trasgressiva sulle unità cristallino-metamorfiche (Spadafora, 1990; Morrone, 1991; Mastandrea et al., 2002), caratterizzata da facies alluvionali e di delta-conoide. I conglomerati basali sono tipicamente poco cementati, di colore rossastro, scarsamente classati e composti da clasti metamorfici e cristallini. Gradualmente, questi conglomerati

passano verso l'alto a sabbie stratificate e debolmente cementate, principalmente arcosiche, che diventano bioturbate con strati pelitici intercalati ai livelli superiori.
La seconda sequenza comprende depositi carbonatico-terrigeni, facenti parte di una piattaforma carbonatica mista in contatto discordante con le sabbie sottostanti. Le calcareniti appartengono alla "Formazione dei Calcari di Mendicino", che affiora appena a ovest dell'area di Belsito. Queste calcareniti sono composte principalmente da packstone, con subordinati boundstone e wackestone, e contengono facies indicative di banchi corallini in acque relativamente profonde (Mastandrea et al., 2002). Sopra l'unità calcarenitica, in contatto leggermente discordante, si trova un'unità argilloso-siltosa (Romeo e Tortorici, 1980; Morrone, 1991; Mastandrea et al., 2002). Al di sopra dell'unità argillosa compare l'unità carbonatica (Spadafora, 1990), costituita prevalentemente da calcari micritici intercalati a marne e siltiti di colore da grigio a giallastro (Calcare di Base). La successione continua con argille e gessi, seguiti da conglomerati e arenarie. Nel settore meridionale della Valle del Crati e nella Catena Costiera, la sequenza messiniana è stata completamente erosa. Nel settore meridionale della Valle del Crati, questa sequenza è ricoperta, con una transizione rapida e discordante, da sabbie, conglomerati e argille siltose del Pleistocene inferiore (Romeo e Tortorici, 1980).
I depositi pleistocenici sono caratterizzati da conglomerati continentali disorganizzati, sostenuti dalla matrice, e da sabbie a stratificazione incrociata che diventano più fini verso le aree distali. Queste associazioni di facies rappresentano sistemi deposizionali deltizi. Lo spessore complessivo dei depositi nella zona depocentrale è di circa 1000 metri. Questi depositi sono segnati da discontinuità stratigrafiche che indicano una progressiva deformazione e un basculamento delle unità sottostanti verso i quadranti orientali (Lanzafame e Zuffa, 1976). Inoltre, lungo l'attuale fascia pedemontana della Catena Costiera affiorano resti di conoidi alluvionali, la cui composizione riflette le unità attualmente esposte nella Catena Costiera. L'intersezione tra queste conoidi e i depositi di riempimento della Valle del Crati (delta di Gilbert), insieme alla composizione dei loro clasti, suggerisce che questi depositi alluvionali siano successivi allo smembramento dei corpi deltizi (Colella et al., 1987).
Dal punto di vista strutturale, il comune di Belsito segna la transizione tra la zona a trascorrenza sinistra orientata NO-SE, che termina in corrispondenza della faglia di Falconara-Carpanzano (che attraversa la porzione centrale del territorio comunale), e il

Graben del Crati, delimitato da faglie dirette con orientazione N-S (Fig. 3). Queste faglie dirette ad andamento N-S sono associate a una fase tettonica distensiva, con assi di massima estensione orientati ESE-ONO, persistente dal Pliocene superiore fino a tutto il Pleistocene, e tuttora attiva.

Dal punto di vista geologico, l'area di Belsito è caratterizzata da rocce metamorfiche paleozoiche appartenenti a tre diverse unità tettoniche, impilate l'una sull'altra e ricoperte in discordanza da successioni sedimentarie mio-pliocenico-quaternarie. L'unità tettonica più profonda è l'Unità dei Bagni (Unità degli Scisti e Metapeliti), che affiora diffusamente in tutta la porzione centrale e meridionale del territorio comunale, in particolare sulla sponda destra del fiume Savuto (Fig. 3). Questa unità è costituita principalmente da filladi di colore grigio scuro o plumbeo, localmente intercalate con metarenarie a grana fine di colore giallo-brunastro o bruno-verdastro e quarziti, con metabasiti a grana fine intercalate in via subordinata.

In contatto tettonico tramite sovrascorrimento, l'Unità dei Bagni è sormontata dall'Unità di Castagna (Unità degli Ortogneiss), che affiora prevalentemente nell'estrema porzione sud-occidentale del territorio comunale, sulla sponda sinistra del torrente Stupino e in limitati affioramenti nei pressi del centro storico di Belsito. Questa unità è composta principalmente da ortogneiss biotitici, localmente con granato e moscovite, da grana fine a grana grossa, spesso cataclastici, moscovitici e ricchi in biotite-moscovite. L'unità comprende inoltre scisti moscovitico-granatiferi, scisti quarzitici e scisti sericitico-albitici con granato. In questa unità sono inoltre diffusi leucosomi aplitico-pegmatitici.

Infine, l'Unità di Polia-Copanello (prevalentemente paragneiss), anch'essa in contatto tettonico per sovrascorrimento, si sovrappone alle unità precedentemente descritte ed è esposta in un'area limitata a nord-est del centro storico di Belsito. È composta da gneiss a biotite-granato-sillimanite con struttura a bande. L'aspetto più comune di queste litologie è l'alternanza di livelli chiari quarzoso-feldspatici, localmente con grandi granati, e livelli scuri a biotite-sillimanite. Le bande di gneiss leucosomatico hanno spessore decimetrico. Queste rocce sono generalmente fratturate e fortemente alterate, il che conferisce loro un colore bruno-rossastro in affioramento.

In appoggio discordante sulle unità metamorfiche paleozoiche, affiorano nella porzione centro-meridionale del territorio comunale conglomerati del Miocene medio-superiore con clasti poligenici ben arrotondati di natura cristallina, immersi in una grossolana

matrice sabbiosa. Questi litotipi sono generalmente ben compattati (localmente cementati) e possiedono buone proprietà geotecniche.

I conglomerati miocenici sono ricoperti, nella parte sud-occidentale dell'area comunale, da calcareniti bianco-giallastre, localmente stratificate, corrispondenti al Miocene superiore. Queste calcareniti, facenti parte della "Formazione dei Calcari di Mendicino", sono costituite principalmente da packstone, con subordinati boundstone e wackestone. Le facies all'interno di questa unità suggeriscono lo sviluppo di banchi corallini in acque relativamente profonde (Mastandrea et al., 2002). Lo spessore complessivo delle rocce calcarenitiche è tipicamente inferiore a 50 metri. La calcarenite presenta caratteristiche variabili a seconda del contenuto fine terrigeno o della presenza di clasti cristallini grossolani. In alcuni casi, la roccia è altamente porosa, mentre in altri la matrice interstiziale domina sulla componente granulare, determinando una maggiore compattezza. Alla scala dell'affioramento, la calcarenite si presenta generalmente moderatamente cementata e fratturata.

La sequenza miocenica è sormontata da sedimenti argillosi grigio-verdastri, esposti nelle porzioni occidentali dell'area di studio. Questi sono costituiti da argille siltose con intercalazioni di sabbie arenacee e lenti di gesso di modesto spessore.

I depositi pleistocenici nell'area sono caratterizzati da conglomerati continentali disorganizzati, sostenuti dalla matrice, e da sabbie a stratificazione incrociata, che diventano più fini nelle zone distali. Queste facies descrivono sistemi deposizionali deltizi. I depositi conglomeratico-sabbiosi del Pleistocene inferiore presentano un tipico colore bruno-rossastro e sono composti da ciottoli eterogenei e di dimensioni variabili, da arrotondati a sub-arrotondati. Questi litotipi sono generalmente da moderatamente a ben compattati.

Infine, depositi eluvio-colluviali sciolti, che riempiono le depressioni morfologiche, si trovano sui pendii e sulle superfici pianeggianti, mentre depositi alluvionali sono presenti lungo i corsi d'acqua principali (rispettivamente il torrente Iassa, il torrente Stupino e il fiume Savuto).

2.2 Inquadramento geomorfologico

Nel corso delle stagioni invernali 2008-2009 e 2009-2010 il territorio comunale di Belsito è stato interessato dall'attivazione di numerosi fenomeni franosi, alcuni dei quali caratterizzati da significativa estensione areale (Fig. 4).

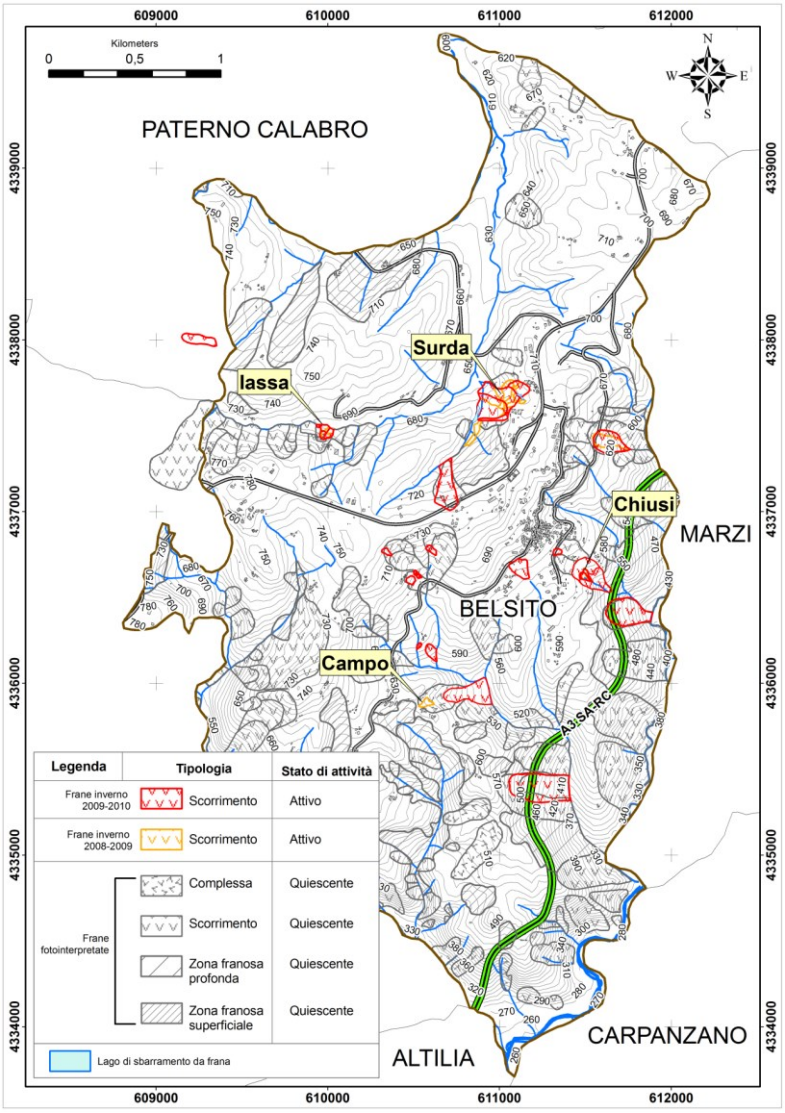


Figura 4 Carta dei fenomeni di instabilità di versante del Comune di Belsito (CS), con localizzazione delle aree in frana oggetto di studio.

La cartografia tematica illustra nel dettaglio la distribuzione spaziale, la tipologia e lo stato di attività dei fenomeni franosi che interessano l'area.

Dall'esame della carta si evidenziano frane attive e quiescenti. In particolare, i movimenti franosi verificatisi negli inverni 2008-2009 e 2009-2010 sono classificati come "scorrimenti attivi". I fenomeni riferibili all'inverno 2009-2010 risultano i più diffusi e si concentrano in settori specifici del territorio, principalmente nelle località Surda, Chiusi, Campo e in prossimità del centro abitato di Belsito. I dissesti ascrivibili all'inverno 2008-2009, seppur arealmente meno estesi, si localizzano in zone adiacenti o parzialmente sovrapposte a quelle mobilitatesi nell'anno successivo (come si evince nei pressi di Surda

e Campo), denotando una persistenza dell'instabilità e un'evoluzione progressiva e continua dei cinematismi.

Il contesto territoriale è inoltre caratterizzato da una diffusa vulnerabilità geomorfologica pregressa, testimoniata dalla presenza di numerosi corpi franosi storici, cartografati mediante fotointerpretazione e classificati in stato "quiescente". Tali fenomeni fungono da substrato di debolezza per l'intero assetto di versante e comprendono frane di tipologia complessa, scorrimenti e ampie zone franose (sia a cinematica profonda che superficiale) che dominano il settore nord-occidentale in direzione di Paterno Calabro.

Un elemento geomorfologico di singolare rilevanza, strettamente connesso alle recenti evoluzioni del versante, è rappresentato dalla presenza di un lago di sbarramento da frana, situato nel settore nord-occidentale in prossimità della località Iassa. La genesi di tale invaso è direttamente imputabile all'ostruzione dell'impluvio naturale da parte del materiale detritico mobilizzato durante gli eventi parossistici degli inverni 2008-2010, i quali hanno alterato significativamente l'idrografia locale.

2.3 Inquadramento nell'ambito del PAI

Il Piano di Assetto Idrogeologico (PAI), che riguarda tutto il territorio regionale, comprende le aree in frana (PsAI-rf) e quelle alluvionali (PsAI-ra).

Facendo riferimento al PsAI-rf del Comune di Belsito (CS) e più precisamente alla "Carta Inventario dei Centri Abitati Instabili", si evince il territorio in esame è interessato da movimenti franosi di varia tipologia e cinematica. Nello specifico, le frane cartografate nel territorio comunale, sono rappresentate in prevalenza da: scorrimenti, classificati, da un punto di vista dello stato di attività, quiescenti; da un fenomeno complesso, anch'esso quiescente; da zone franose profonde quiescenti, quest'ultime localizzate in prevalenza lungo i versanti su cui è stata realizzata l'Autostrada A3, SA-RC (Fig. 5).

Facendo riferimento a località Surda che è stata interessata dall'attivazione e riattivazione di due importanti frane nel biennio di riferimento, si riscontra che analizzando la "Carta inventario dei centri abitati instabili" del PAI, località Surda non presenta frane così come località Iassa (Fig. 5), mentre località Chiusi e località Campo mostrano frane già individuate e riportate nella cartografia PAI (Fig. 5).

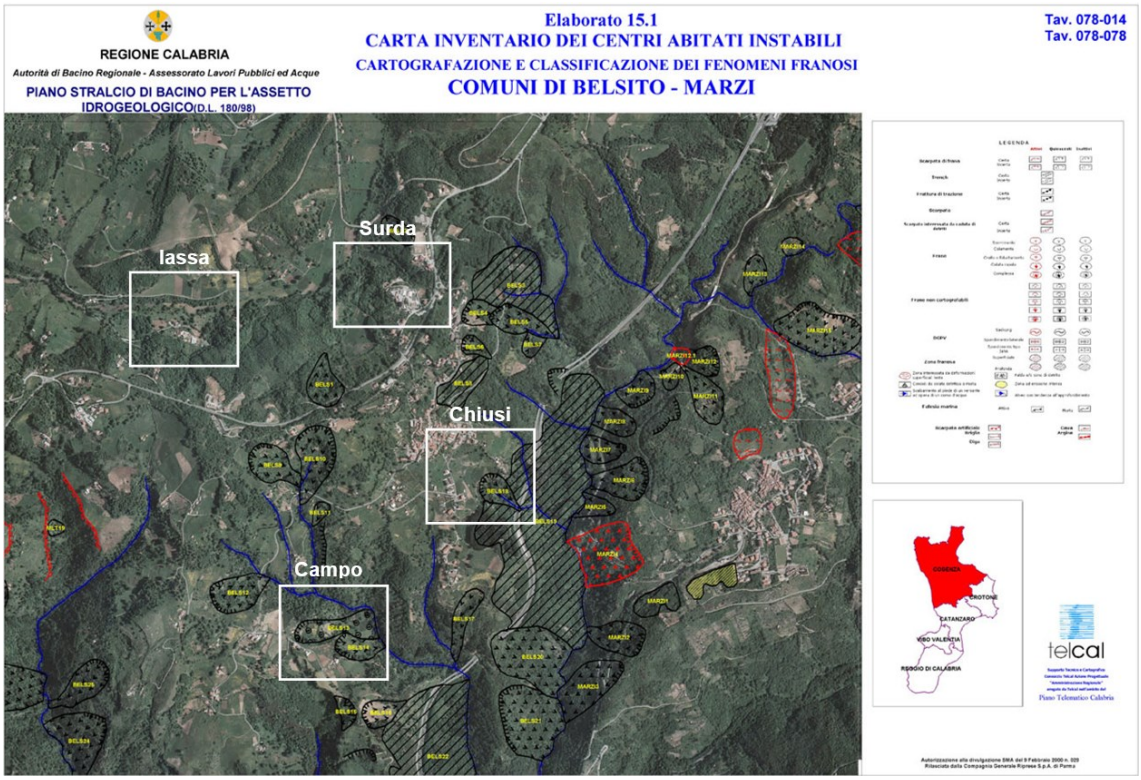


Figura 5 Cartografia PAI: Carta inventario dei centri abitati instabili – Cartografazione e classificazione dei fenomeni franosi.

2.4 Analisi storica delle precipitazioni e caratterizzazione idrologica

L'analisi idrologica è stata svolta al fine di caratterizzare i singoli eventi pluviometrici e le precipitazioni cumulate su diverse scale temporali, in corrispondenza di notizie di mobilizzazione di fenomeni di instabilità di versante. In particolare, per il comune di Belsito (CS), le notizie di mobilizzazioni di fenomeni franosi, sono riconducibili a due eventi principali, il primo nella seconda metà del mese di gennaio del 2009 e il secondo nella prima metà del mese di febbraio 2010.

Per l'analisi delle piogge misurate al suolo sono stati presi in considerazione principalmente i dati registrati dal pluviometro di Rogliano (CS), appartenente alla rete gestita dal Centro Funzionale Multirischi dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Calabria (Arpacal) (www.cfcalabria.it). Per riempire eventuali brevi buchi presenti nella serie storica della stazione di Rogliano e per permettere quindi una corretta analisi delle piogge cumulate su più mesi, sono stati anche utilizzati i dati registrati dal pluviometro di Parenti (CS).

Evento 20/01/2009-01/02/2009

Questo evento pluviometrico si colloca alla fine di un intenso periodo di pioggia che ha caratterizzato il periodo autunno-inverno del 2008-2009. In particolare, la stazione di Rogliano, nel mese di gennaio 2009, ha registrato solo 6 giorni su 31, con assenza di fenomeni.

In figura 6 è riportata l'analisi pluviometrica dell'evento, con rappresentazione delle precipitazioni giornaliere, delle relative precipitazioni cumulata e della massima giornaliera registrate durante l'evento stesso.

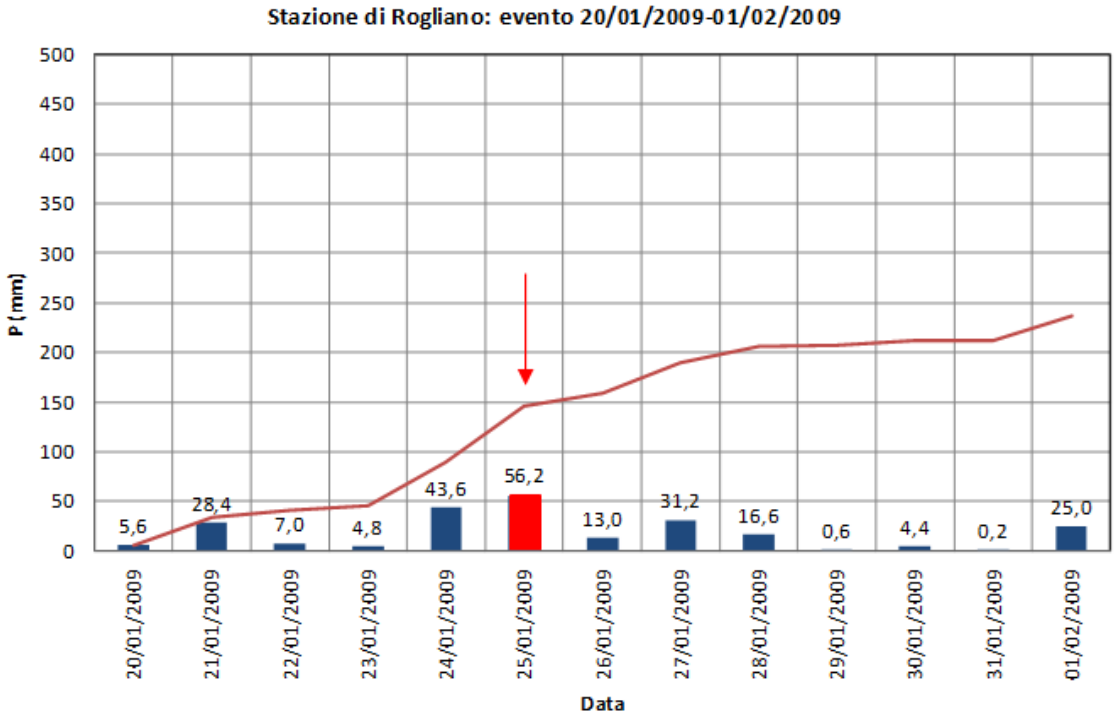


Figura 6 Precipitazioni giornaliere e cumulata, registrate nel periodo 20/01/2009-01/02/2009.

L'elemento rosso e la freccia rossa indicano rispettivamente la massima pioggia giornaliera e la data in corrispondenza della quale si sono attivati fenomeni franosi nel territorio di Belsito (nello specifico le frane di Surda, Iassa, Campo e Chiusi).

Per quanto concerne le precipitazioni cumulate su più ampie scale temporali, l'analisi è stata svolta considerando le cumulate sia nel breve (60, 90 e 120 giorni) sia nel lungo periodo (18, 24 e 30 mesi) rispetto al 25/01/2009, data in corrispondenza della quale si è registrata la mobilizzazione di varie frane nel territorio del Comune di Belsito. In particolare, in figura 7 sono riportati gli andamenti temporali delle cumulate relative ai due periodi individuati.

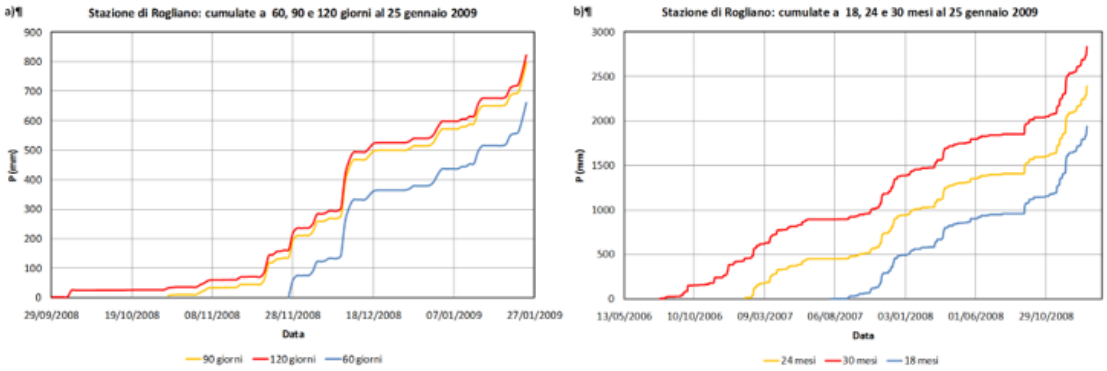


Figura 7– Andamenti temporali delle precipitazioni cumulate: a) a 60, 90 e 120 giorni, relative al 25/01/2009; b) a 18, 24 e 30 mesi, relative al 25/01/2009.

Evento 04/02/2010-15/02/2010

Anche questo evento pluviometrico si colloca alla fine di un intenso periodo di pioggia che ha interessato l'intero territorio regionale nel periodo autunno-inverno del 2009-2010. In figura 8 è riportata l'analisi pluviometrica dell'evento, con rappresentazione delle precipitazioni giornaliere, delle relative precipitazioni cumulate e della massima giornaliera, registrate durante l'evento.

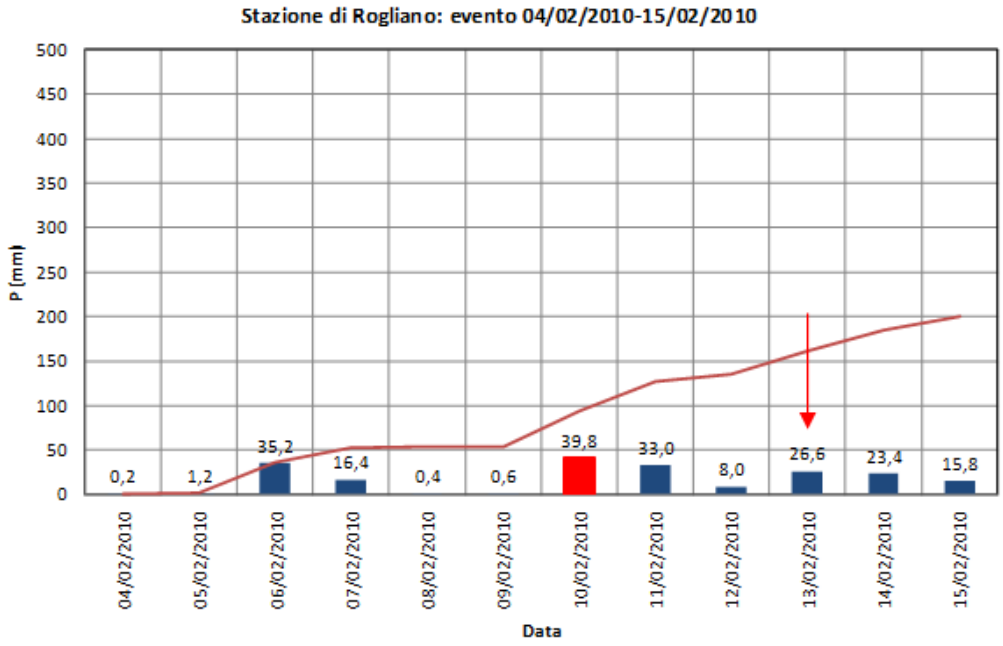


Figura 8 Precipitazioni giornaliere e cumulata, registrate nel periodo 04/02/2010-15/02/2010.

L'elemento rosso e la freccia rossa indicano rispettivamente la massima pioggia giornaliera e la data in corrispondenza della quale si sono rimobilizzati i fenomeni franosi (nello specifico le frane di Surda, Iassa, Campo e Chiusi), nel territorio comunale di Belsito.

Per quanto concerne le precipitazioni cumulate su più ampie scale temporali, l'analisi è stata svolta considerando le cumulate sia nel breve (60, 90 e 120 giorni) che nel lungo periodo (18, 24 e 30 mesi) rispetto al 13/02/2010, data che coincide con fenomeni di rimobilizzazione dei movimenti franosi. In particolare, in figura 9 sono riportati gli andamenti temporali delle cumulate nel breve e nel lungo periodo.

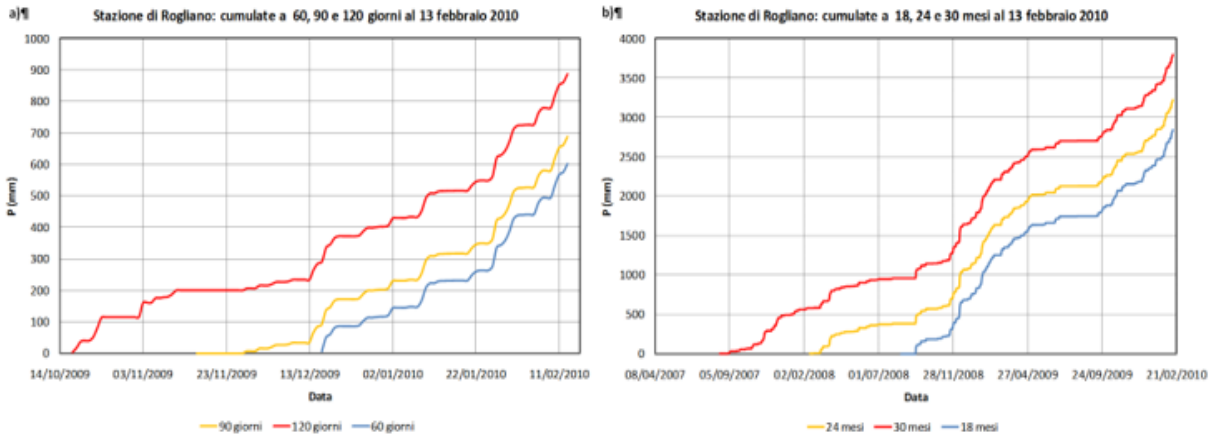


Figura 9– Andamenti temporali delle precipitazioni cumulate: a) a 60, 90 e 120 giorni, relative al 13/02/2010; b) a 18, 24 e 30 mesi, relative al 13/02/2010

.

Confronto tra i risultati ottenuti e la serie storica

Al fine di caratterizzare l'eccezionalità degli eventi pluviometrici esaminati, è stato effettuato un confronto tra i valori giornalieri e cumulati relativi al 25/01/2009 e al 13/02/2010, con i corrispondenti valori che si sono registrati nella stazione di Rogliano a partire dal 1923 (Fig. 10).

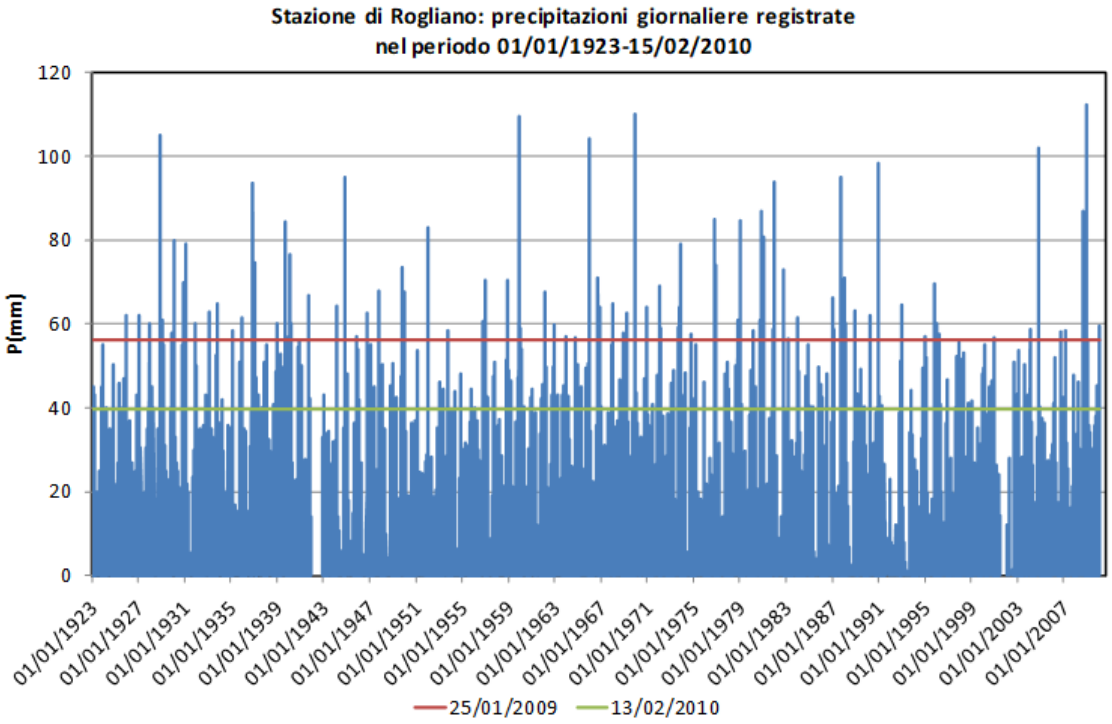


Figura 10 Confronto tra i valori storici giornalieri e quelli relativi al 25/01/2009 e al 13/02/2010.

Dall'analisi dei risultati si evince come, per le precipitazioni giornaliere e le aggregazioni relative al breve periodo, riportate in figura 11 , entrambi gli eventi sono significativi mentre, considerando la aggregazioni relative al lungo periodo riportate in figura 12, è evidente come le precipitazioni del 25/01/2009 sono nella media di quelle registrate in passato, al contrario di quelle relative al 13/02/2010 che risultano invece essere eccezionali, anche perché risentono delle precipitazioni dell'autunno-inverno 2008-2009.

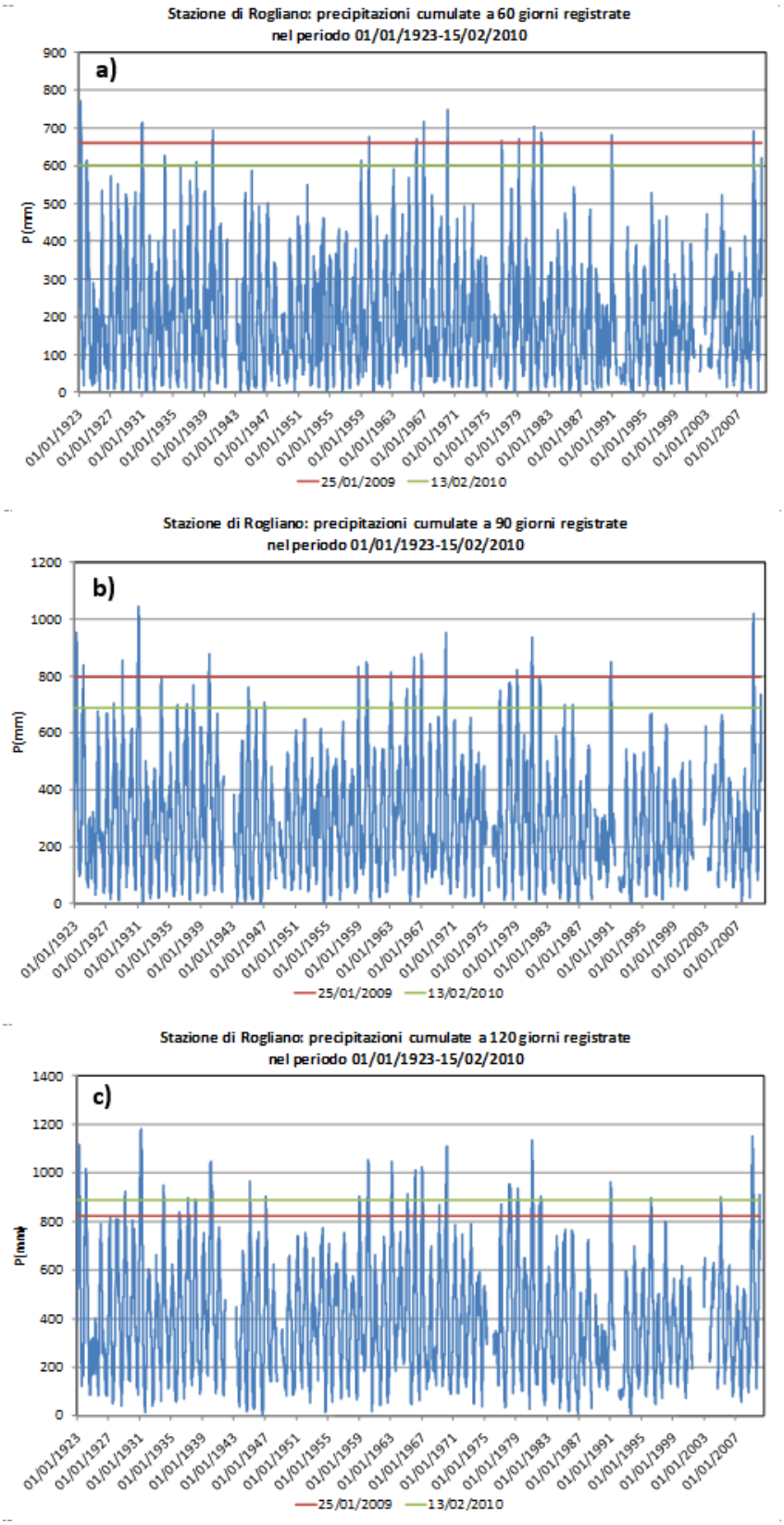


Figura 11 Significatività degli eventi del 25/01/2009 e del 13/02/2010 rispetto ai valori storici cumulati a: a) 60 giorni; b) 90 giorni; c) 120 giorni.

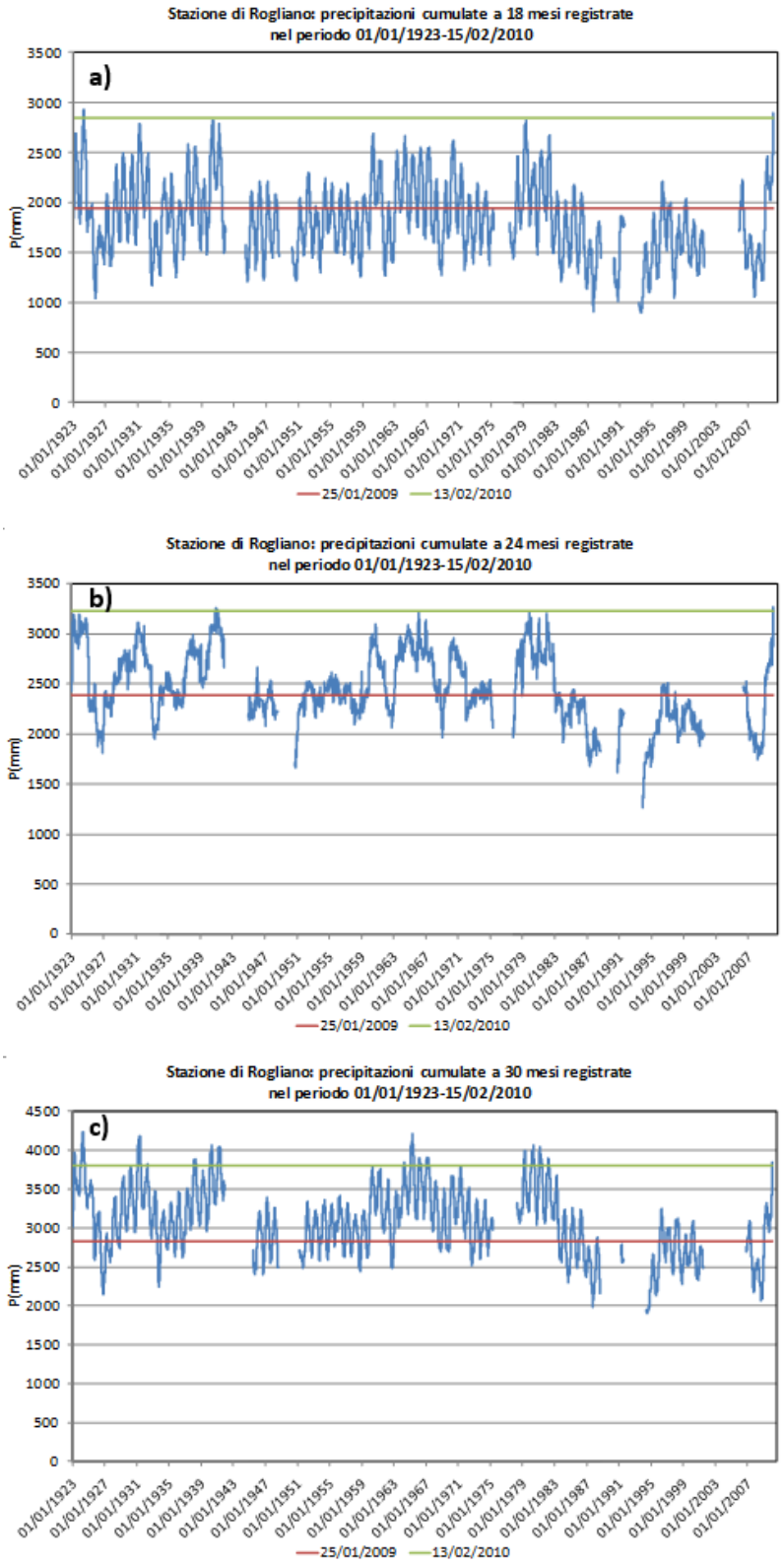


Figura 12 Significatività degli eventi del 25/01/2009 e del 13/02/2010 rispetto ai valori storici cumulati a: a) 18 mesi; b) 24 mesi; c) 30 mesi.

3 Capitolo 3: La frana analizzata

Nel contesto delle frane che hanno interessato il comune di Belsito nel biennio 2008-2010, la presente tesi di laurea focalizza l'attenzione su una delle frane di località Surda ritenuta rappresentativa dei fenomeni di scorrimento che hanno interessato l'intero territorio comunale. Nel complesso in località Surda si sono attivate due frane principali, una ha interessato il versante esposto a Sud-Ovest (zona Ristorante-Pizzeria "L'Ostaria"), l'altra, di dimensioni molto più grandi, il versante esposto ad Ovest (zona fabbricati Azienda "La Comedil"), Figura 13. Sebbene entrambe le frane siano state cartografate e studiate tramite indagini in sito e prove di laboratorio, l'attenzione si focalizza solo sulla frana di maggiori dimensioni che ha lambito i fabbricati "La Comedil". Tale frana è stata oggetto di due diverse campagne di indagine in situ condotte nel biennio 2009-2010, le quali hanno fornito una dettagliata documentazione geologica, morfologica e geotecnica. Le indagini hanno avuto inizio nel 2009 e si sono concluse nel 2010, periodo in cui il fenomeno franoso si è riattivato manifestandosi nella sua totale estensione. È stato analizzato ogni singolo aspetto relativo alla caratterizzazione della frana ed i risultati ottenuti da ciascuna campagna di indagine sono stati integrati al fine di delineare un quadro completo e rigoroso del dissesto in esame.

Il fenomeno di instabilità, che interessa un'area di circa 4,5 ettari, si configura attualmente come un sistema morfologicamente complesso. Esso è caratterizzato da un movimento franoso principale moderatamente profondo, con una profondità della superficie di scorrimento, stimata su base geomorfologica, intorno ai 30 metri. Tale movimento può essere classificato tipologicamente come uno scorrimento rotazionale in terra evoluto, che transita a colata nella porzione inferiore del versante. A questo cinematismo principale si sovrappongono corpi franosi relativamente più superficiali (Figura 13).

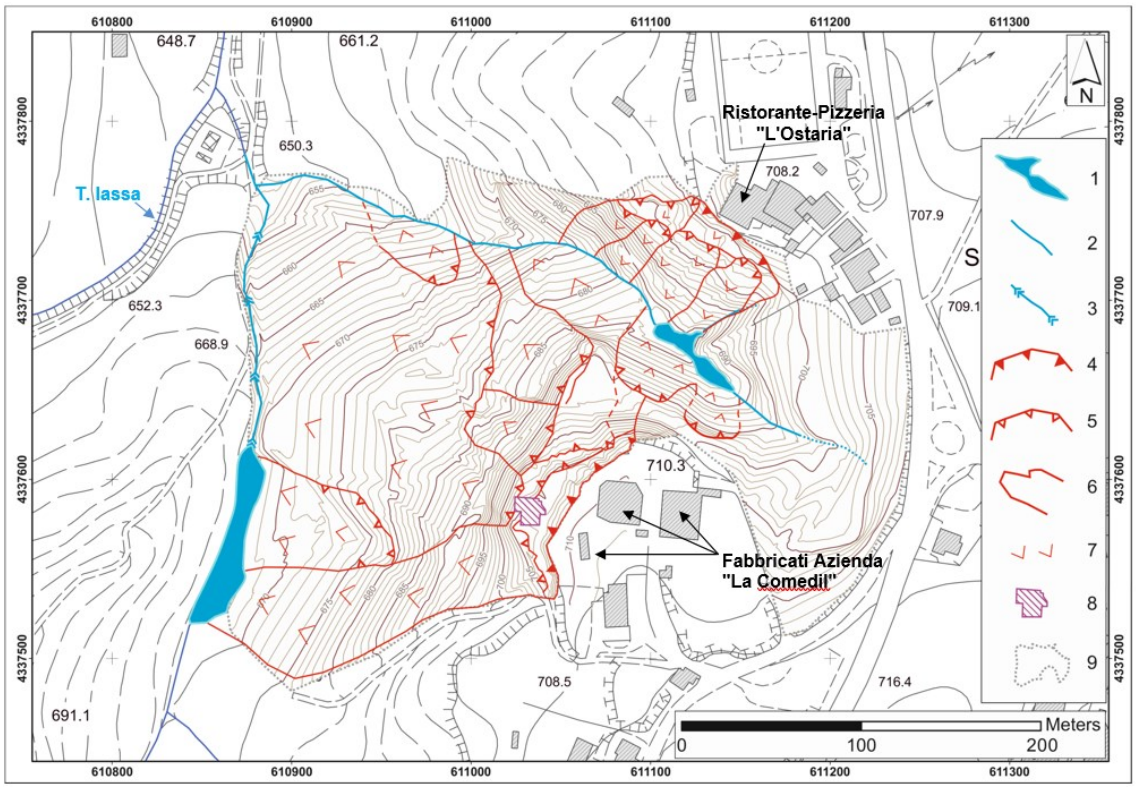


Figura 13 Carta delle frane dell'area di località SURDA (redatta tramite rilevamenti di campagna condotti nel luglio 2010).

Legenda: 1) laghetti da frana; 2) fosso in approfondimento; 3) fosso in forte approfondimento; 4) corona di frana principale attiva; 5) corona di frana secondaria attiva; 6) limite corpo di frana attivo; 7) scorrimento attivo; 8) fabbricato coinvolto nel movimento e completamente distrutto; 9) limite rilievo topografico effettuato tramite GPS.

Una porzione significativa del fenomeno franoso si sviluppa sul versante esposto a ovest, dove, oltre alla marcata scarpata, il movimento franoso principale esibisce limiti laterali netti e ben definiti (Figura 13). La scarpata principale, caratterizzata da un'altezza variabile tra i 15 e i 20 metri, si è originata nel gennaio 2009 a seguito della fase parossistica dell'evento, presentandosi con un profilo sub-verticale e leggermente concavo (Fig. 14, foto A e B). Nel settore a monte della scarpata principale si sono innescati fenomeni di arretramento regressivo, i quali hanno determinato la formazione di due scarpate sub-parallele aventi un'altezza media di circa 1,5 metri (Figura 15 e Figura 16).

A partire dalla scarpata principale originaria, procedendo verso sud-est, la prima scarpata retrogressiva si rinviene a circa 6 metri dal ciglio e taglia in due un preesistente edificio in muratura (Fig. 15, foto E); la seconda scarpata, che definisce il limite di massimo

arretramento del fenomeno franoso, presenta un'inclinazione di circa 75° e un andamento pseudo-lineare. Essa si è sviluppata compiutamente nel marzo 2010 e attualmente lambisce i fabbricati della ditta "La Comedil", distando circa 8 metri dall'edificio più prossimo (Fig. 15, foto B e D). Tale scarpata si prolunga verso nord-est (in direzione di valle), generando un gradino decimetrico in corrispondenza della viabilità sterrata esistente, per poi proseguire verso l'impluvio naturale e terminare nel medesimo punto (Fig. 16, foto F). A valle della strada sterrata, il limite della frana risulta obliterato da fenomeni di dissesto più superficiali, svincolati dal cinematismo principale (Fig. 13).

I rilevamenti geomorfologici condotti sul campo hanno evidenziato, a valle della scarpata principale e nella porzione medio-inferiore del corpo di frana, la presenza di elementi morfologici caratteristici (rigonfiamenti, depressioni contropendenti, fratture, scarpate secondarie longitudinali e trasversali, ristagni idrici) che denotano un lento e continuo scorrimento della massa di terra verso l'impluvio di valle.

Inoltre, sul versante esposto a ovest, la massa instabile, durante la fase parossistica del gennaio 2009, è collassata dislocandosi verso valle fino a raggiungere e colmare l'incisione valliva (per un'altezza superiore a 15 metri), determinando l'ostruzione del corso d'acqua. Tale evento ha originato un lago di sbarramento (Fig. 13), che attualmente presenta un'estensione longitudinale di circa 100 metri, una larghezza massima di 20 metri e una profondità massima stimabile in 3 metri. A seguito dell'innesco del fenomeno, le acque che alimentavano il reticolo idrografico preesistente, ormai sbarrato dai detriti, hanno abbandonato l'alveo originario venendo deviate lungo il limite dell'accumulo di frana; esse hanno così scavato un nuovo percorso in corrispondenza di una viabilità sterrata, la quale appare oggi profondamente incisa dal deflusso idrico (Fig. 13).

Le acque di scorrimento defluiscono attualmente verso nord-nordest, dove confluisce altresì l'impluvio che raccoglie le acque del bacino insistente sul versante della Pizzeria; entrambi i corsi si immettono, poco più a nord, nel Torrente Iassa (Fig. 13).

Nel complesso, il profilo longitudinale del versante in dissesto si presenta concavo nella porzione apicale e convesso in quella medio-inferiore. Le principali caratteristiche morfometriche del fenomeno franoso, considerato nella sua globalità, sono così sintetizzabili: pendenza media 14°; pendenza massima (area di scarpata) 28°; quota media della corona 709 m s.l.m.; quota del piede 670 m s.l.m.; dislivello totale (corona-piede) circa 40 m; lunghezza media (versante nord-ovest) 200 m; larghezza media (sezione

mediana del corpo di frana) 250 m; spessore massimo (stimato su base geomorfologica) tra 15 e 20 m; area in frana circa 45.000 m²; volume presunto circa 700.000 m³.



Figura 14 Documentazione fotografica della frana di località Surda

Foto: A) fabbricato in muratura danneggiato, ubicato sul ciglio della scarpata; B) scarpata principale, vista dalla sua terminazione sinistra; C) accumulo di frana (nella parte bassa del versante in corrispondenza dell'asse centrale della frana) con risalita di materiale sul versante opposto; D) accumulo di frana nella parte più a sud dell'area interessata dall'instabilità, con sbarramento del corso d'acqua; E), accumulo di frana sul lato nord del versante; F) laghetto di frana da sbarramento.



Figura 15 Documentazione fotografica della frana di località Surda (versante esposto ad Ovest, zona Azienda "La Comedil"), relativa al marzo 2010

Foto: A) vista frontale della frana; B) scarpata di neoformazione, immediatamente a monte della scarpata esistente; C) proseguimento verso Sud della scarpata di neoformazione; D) particolare della scarpata di neoformazione; E) scarpata esistente parzialmente modellata ed arretrata (rispetto alla situazione del gennaio 2009), la quale ha determinato la distruzione del fabbricato in muratura presente.



Figura 16 Documentazione fotografica della frana di località Surda (versante esposto ad Ovest, zona Azienda "La Comedil"), relativa al marzo 2010. Foto: A) particolare del fabbricato distrutto e gradini di frana (circa 1.5m) sullo sfondo; B) scarpata di frana principale, lato sinistro; C) scarpata di frana principale, lato destro; D) corpo di frana visto dall'alto; E) terrazzo di frana, immediatamente a valle della scarpata principale; F) scarpate secondarie e terrazzi da frana, sul tratto di versante in frana esposto a Nord.

3.1 Indagini in sito e test di laboratorio

Sulla frana oggetto di studio sono state eseguite diverse indagini in sito (Figura 17) e prove di laboratorio. La figura 17 sintetizza tutte le indagini eseguite e disponibili per la frana in esame sia quelle relative alla campagna d'indagine speditiva effettuata nel 2009 sia quelle relative alla campagna d'indagine più ampia effettuata nel 2010.

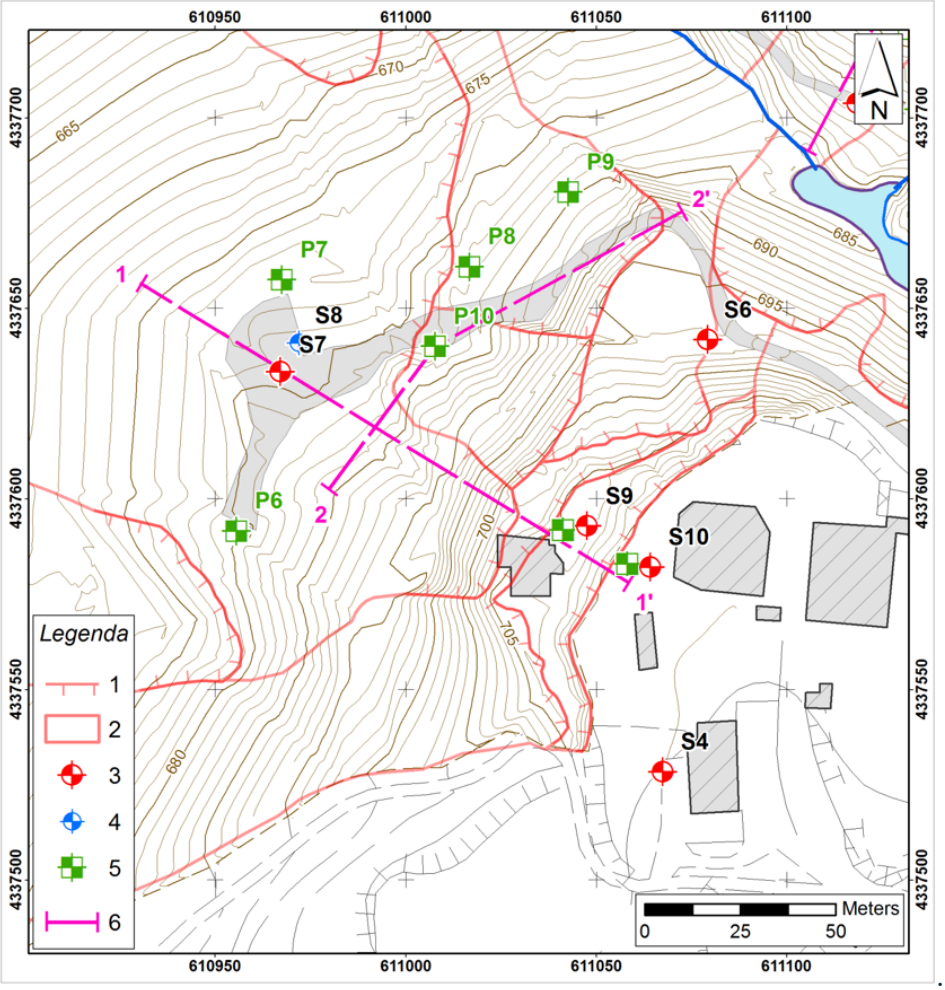


Figura 17 Indagini in situ eseguite nel periodo luglio-agosto 2010.

Legenda: 1) scarpata di frana; 2) limite del corpo di frana; 3) sondaggio a carotaggio continuo attrezzato con inclinometro; 4) sondaggio a distruzione di nucleo attrezzato con piezometro; 5) prova penetrometrica dinamica pesante (DPSH); 6) tomografia elettrica.

Sono stati eseguiti sei sondaggi meccanici a carotaggio continuo, sette prove penetrometriche dinamiche (DPSH), un'analisi multicanale delle onde di superficie (MASW) e due tomografie elettriche , il tutto riportato in figura 17. I sondaggi perforati all'interno del corpo di frana sono l'S6, l'S7, l'S8 e l'S9. In particolare, l'S6 è localizzato

lungo il fianco destro della frana, l'S7 e l'S8 si trovano nella porzione centrale del corpo franoso e l'S9 è ubicato su un recente terrazzo fluviale alla base della corona di frana (Fig. 17). Il sondaggio S8 è stato eseguito a distruzione di nucleo fino a una profondità di 20 metri. I sondaggi S4 e S10 sono stati realizzati all'esterno del corpo di frana (Fig. 17).

Nello specifico, tutti i sondaggi evidenziano la presenza di due formazioni predominanti, ricoperte da materiale di riporto a profondità variabili (Fig. 18). In particolare, la formazione conglomeratico-sabbiosa, di colore bruno-rossastro e moderatamente addensata, viene rilevata da una profondità minima di 2,5 metri fino a una profondità massima di 20,5 metri. Al di sotto di tale formazione, si registra un passaggio stratigrafico in discordanza tra la formazione conglomeratica pleistocenica e l'unità carbonatica del Miocene superiore, la quale è costituita prevalentemente da calcari micritici bianco-giallastri, con intercalazioni di marne bianco-giallastre, argille siltose con lenti sabbiose grigio-verdastre e argille foliate verdastre.

Il sondaggio S10, ubicato all'esterno del corpo di frana (Fig. 17), conferma sostanzialmente la successione stratigrafica già individuata attraverso le indagini eseguite all'interno della massa franosa.

Le prove penetrometriche dinamiche (DPSH 7 e 10) (Figura 18B), eseguite nella porzione centrale del corpo di frana, evidenziano essenzialmente tre livelli: uno strato più superficiale sciolto; un livello intermedio moderatamente addensato; e uno strato profondo più addensato, correlabile al più rigido "substrato conglomeratico-sabbioso".

Le restanti tre prove (DPSH 6, 8 e 9), ubicate in prossimità delle verticali DPSH 7 e 10, rivelano la presenza di un quarto livello al di sopra del substrato, verosimilmente imputabile a conglomerati sabbiosi addensati (Fig. 18 B). Tale strato presenta tuttavia un basso numero di colpi e una scarsa resistenza alla punta. Ciò si traduce in caratteristiche meccaniche nettamente inferiori rispetto ai livelli adiacenti.

I risultati delle indagini sismiche MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) confermano la presenza di due principali sismo-strati distinti: un livello superficiale caratterizzato da velocità delle onde di taglio (Vs) inferiori a 300 m/s, e un livello intermedio individuato da valori di Vs compresi tra 300 e 400 m/s. A circa 20 m di profondità, i valori di Vs mostrano una transizione da circa 400 m/s a valori superiori a 550 m/s, testimoniando la presenza dello strato di substrato (Fig. 18C).

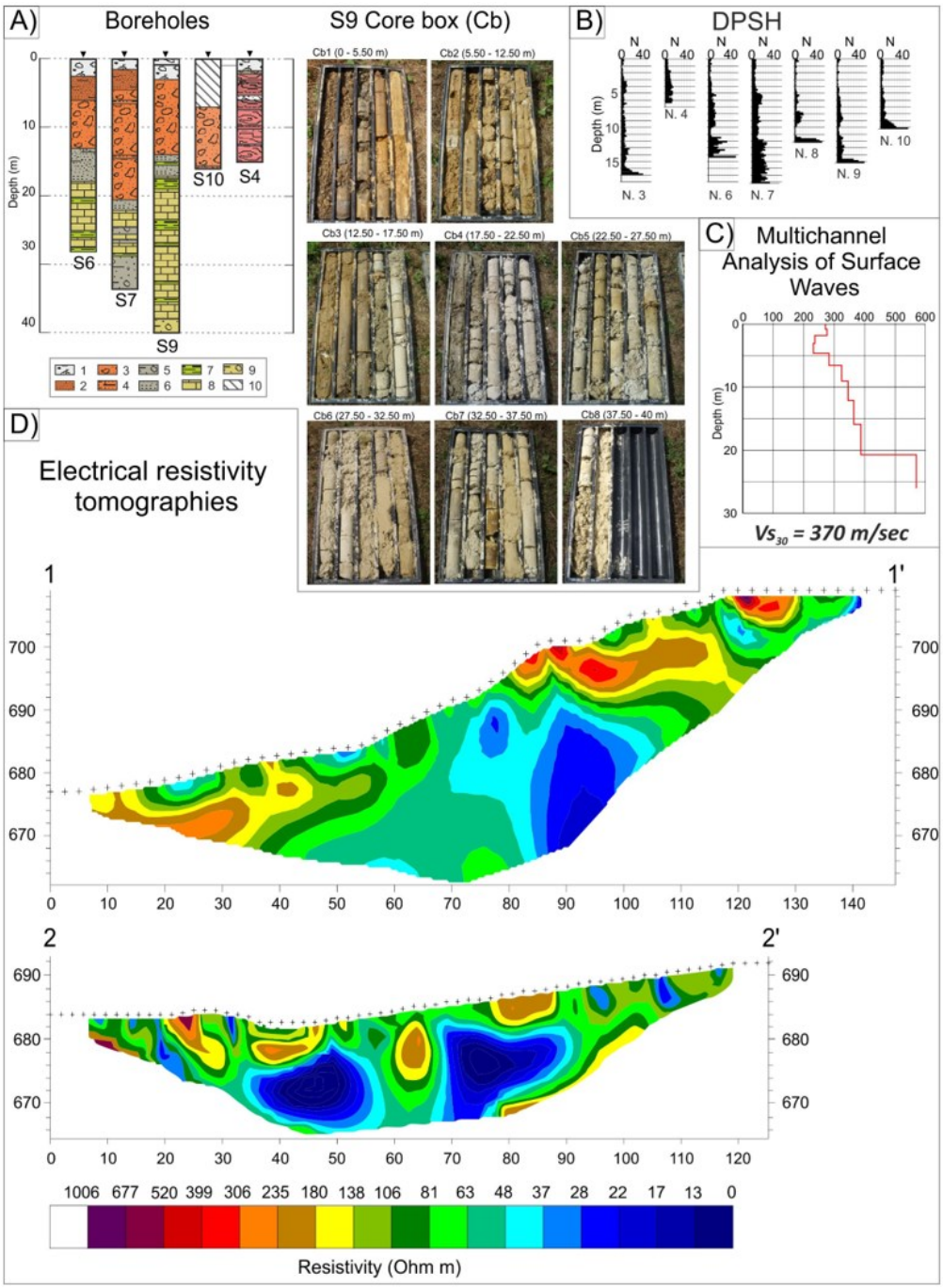


Figura 18 Sintesi dell'interpretazione delle indagini in situ.

A) Sondaggi a carotaggio continuo; B) Prove penetrometriche dinamiche pesanti (DPSH); C) Analisi multicanale delle onde di superficie; D) Modelli di resistività derivati dall'interpretazione della tomografia elettrica (profilo longitudinale 1-1' e profilo trasversale 2-2') eseguiti sul versante in frana (versante esposto a ovest, in prossimità dei fabbricati della ditta "La Comedil").

I risultati ottenuti dalle due indagini SR (sezioni di resistività), di cui una longitudinale al corpo di frana della lunghezza di 150 m e l'altra trasversale della lunghezza di 120 m, consentono di individuare due differenti strati in funzione delle variazioni dei valori di

resistività (Fig. 18D). In particolare, la sezione longitudinale evidenzia: i) una zona di contatto, leggermente immersa verso monte, tra i conglomerati sabbiosi pleistocenici (con valori di resistività compresi tra 63 e 399 Ohm m) e l'unità calcarea del Miocene superiore (con valori di resistività compresi tra 0 e 48 Ohm m); ii) uno strato caratterizzato da valori di resistività variabili tra 48 e 306 Ohm m, localizzato nella porzione medio-inferiore della sezione (verosimilmente costituito da detrito di frana).

Le indagini condotte sul versante interessato dal movimento franoso, sviluppatosi a valle dei fabbricati della ditta "La Comedil", hanno delineato un assetto geologico e geotecnico estremamente articolato, contraddistinto da una marcata eterogeneità litologica. La Tabella 5 sintetizza le indagini precedentemente descritte e spazialmente localizzate in Figura 17, specificandone la massima profondità (o estensione) raggiunta e le relative finalità. L'ultima riga della medesima tabella, inoltre, riporta le profondità a cui è stato eseguito il prelievo dei campioni indisturbati (classe Q5) che oscilla tra i 6,00 m e i 23 m circa.

Tabella 5 Sintesi delle indagini eseguite

Tipologia di indagine	**N. prove**	**Profondità/Estensione**	**Finalità**
Sondaggi geognostici	6	16–40 m	Definizione stratigrafia e monitoraggio
Prove penetrometriche DPSH	5	10,2–18,2 m	Caratterizzazione geotecnica dei terreni
Tomografie elettriche	2	120 m e 150 m	Ricostruzione assetto geoelettrico
MASW	1	fino a 30 m	Classificazione sismica del sottosuolo
Campioni indisturbati	4	6,0–22,9 m	Prove geotecniche di laboratorio

Da ogni campione sono stati ricavati dei provini, successivamente sottoposti a prove di laboratorio per la determinazione delle proprietà indice, ad analisi granulometriche e a prove di taglio diretto. Dal punto di vista granulometrico, i campioni prelevati dalla formazione conglomeratica pleistocenica sono classificati come sabbie limose con occasionali intervalli argillosi, con una componente variabile da ghiaiosa a sabbioso-ghiaiosa. I campioni prelevati a profondità maggiori, all'interno dell'unità calcarea del Miocene superiore – nello specifico nei livelli marnosi – sono classificati come limi sabbiosi con argilla.

Sulla base della distribuzione granulometrica e in accordo con il Sistema Unificato di Classificazione delle Terre (USCS), i terreni campionati dalla formazione conglomeratica pleistocenica sono stati classificati prevalentemente come sabbie limose (SM) con una frazione fine inorganica a media plasticità (Figura 19). I terreni prelevati dall'unità calcarea del Miocene superiore, specificamente nei livelli marnosi, sono stati classificati in prevalenza come limi a bassa plasticità (ML). I valori del limite di liquidità (LL) sono risultati compresi tra il 36% e il 49%, mentre quelli relativi all'indice di plasticità (PI) tra il 6,9% e il 13,3% (Figura 19).

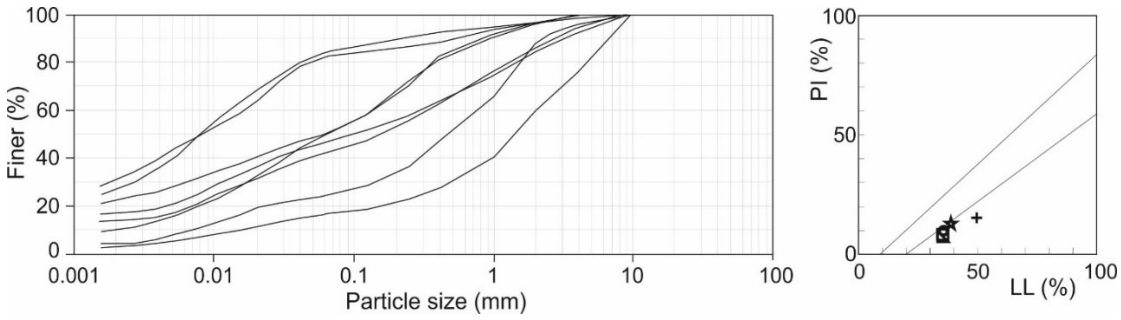


Figura 19 Risultati delle prove di laboratorio. Curve granulometriche e carta di plasticità.

Per quanto riguarda le proprietà indice, i terreni classificati come SM hanno evidenziato che: il contenuto d'acqua, w, varia dal 12,5% al 23,2%; il peso di volume naturale (γ) è compreso tra un minimo di 18,2 kN/m³ e un massimo di 20,9 kN/m³, con un valore medio di 19,6 kN/m³.

Per i campioni classificati come ML, sono state osservate le seguenti proprietà indice: il contenuto d'acqua, w, varia dal 16,7% al 28,8%; il limite di liquidità, LL, è compreso tra il 36,7% e il 49,2%; il limite di plasticità, WP, è compreso tra il 25,6% e il 32,7%; l'indice

di plasticità, PI, varia dal 10% al 16,5%; il peso di volume naturale (γ) è compreso tra un minimo di 18,6 kN/m³ e un massimo di 20,5 kN/m³, con un valore medio di 19,6 kN/m³. Per quanto concerne le proprietà meccaniche, sono stati determinati esclusivamente i valori di picco. Nello specifico, la coesione varia da un minimo di 1,473 kPa a un massimo di 10,407 kPa, con una media di 5,940 kPa per le sabbie limose (SM) rinvenute nell'unità conglomeratica, mentre risulta pari a 19,901 kPa per i limi inorganici (ML) rinvenuti nell'unità calcarea del Miocene superiore. Riguardo all'angolo di resistenza al taglio di picco, esso è compreso tra un minimo di 27,12° e un massimo di 35,65° (valore medio di 31,38°) per i terreni SM appartenenti alla formazione conglomeratico-sabbiosa pleistocenica, ed è pari a 23,20° per i terreni ML rinvenuti nelle marne dell'unità calcarea del Miocene superiore.

3.2 Modello geologico e geotecnico della frana

Il modello geologico è stato ricostruito basandosi sulla sezione 7-7', lungo la quale è ubicata la maggior parte delle indagini *in situ* (Fig. 20).

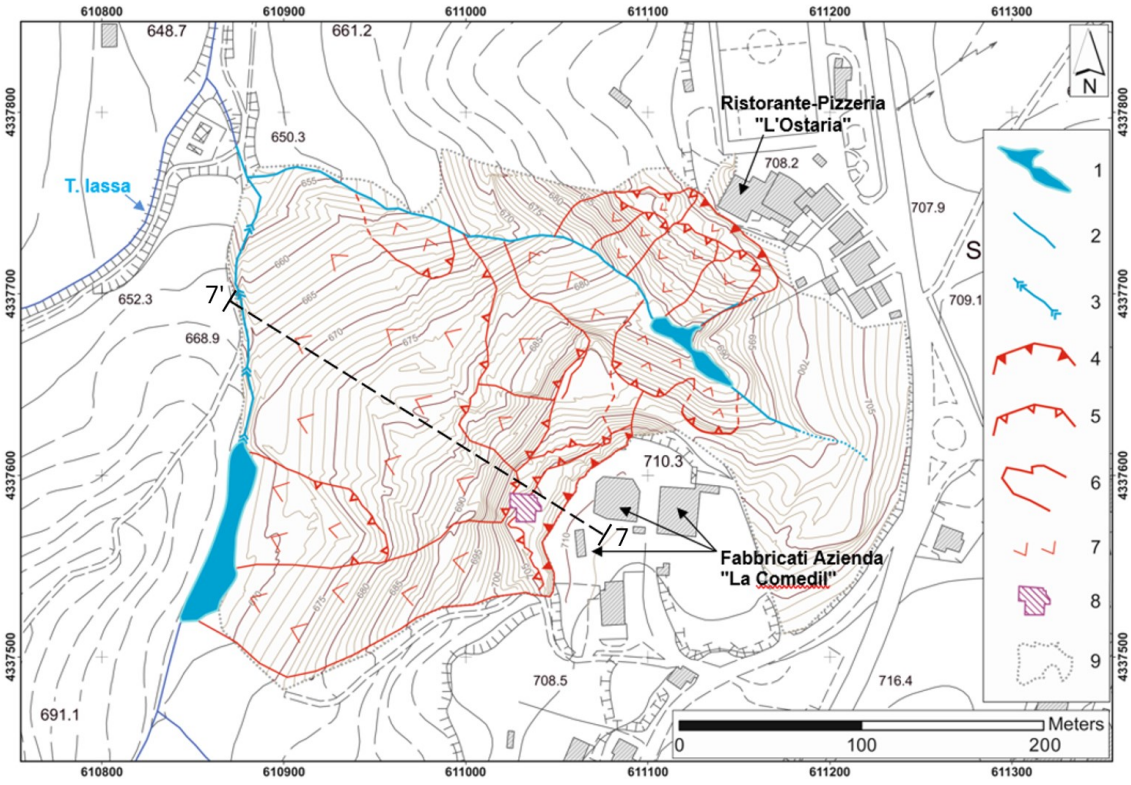


Figura 20 Ubicazione della Sezione 7-7' usata per la ricostruzione del modello geologico e geotecnico della frana.

Dal punto di vista geologico, tale sezione mostra i conglomerati sabbiosi pleistocenici sovrapposti all'unità calcarenitico-marnosa del Miocene (Fig. 21).
Nella porzione superiore della sezione, i conglomerati sabbiosi – i quali si spingono fino a circa 10 metri di profondità – sono ricoperti da circa 3 metri di materiale di riporto. Nella porzione medio-inferiore del versante, a valle della scarpata, lo spessore dei conglomerati aumenta in modo significativo, raggiungendo in alcune aree della sezione profondità superiori a 25 metri. In questo spessore sono compresi i terreni mobilizzati dalla frana, costituiti principalmente da ghiaie e ciottoli immersi in una matrice sabbioso-limosa. In determinate posizioni, il solo materiale detritico di frana raggiunge spessori superiori a 10 metri. Nei sondaggi S7 e S9, al di sotto dei conglomerati è stata intercettata l'unità calcareo-marnosa, la quale prosegue fino a fondo foro. Questa unità è composta da un'alternanza di calcari e marne bianco-giallastri, argille laminate di colore verde e livelli sabbiosi e/o ghiaiosi grigi.
La successione stratigrafica, come chiaramente evidenziato dai rilievi diretti, è dislocata da due faglie dirette ad andamento Nord-Sud e ribassate verso Ovest, già individuate tramite indagini sul campo e analisi di foto aeree. Una prima faglia è localizzata immediatamente a valle dei fabbricati della ditta "La Comedil", e in corrispondenza di tale elemento si colloca la scarpata attiva principale della frana. Una seconda faglia è stata individuata nella zona dell'impluvio (Fig. 21).
Considerando, in sintesi, gli elementi geomorfologici di instabilità emersi dai rilievi e le indicazioni desumibili dalle indagini geotecniche, all'interno della sezione riportata sono state inizialmente ipotizzate alcune superfici di scorrimento completamente sviluppate e attive. Tali superfici, la cui cinematica e geometria sono state successivamente validate dai dati derivanti dal monitoraggio (mediante misure inclinometriche degli spostamenti), risultano di tipo prevalentemente rotazionale e si sviluppano all'interno della formazione dei conglomerati sabbiosi pleistocenici, in prossimità del contatto con i calcari marnosi miocenici (Fig. 21). Quest’ultima formazione funge da limite impermeabile per la circolazione idrica sotterranea; ne consegue che, a seguito di eventi meteorici particolarmente intensi o prolungati, la soprastante formazione conglomeratica può andare incontro a una completa saturazione. Tale dinamica si è probabilmente concretizzata durante l'inverno 2008-2009, allorquando le intense precipitazioni

abbattutesi sull'area in esame hanno determinato l'innalzamento del livello di falda fino al piano campagna e, conseguentemente, la mobilizzazione dei terreni.

In merito alla possibile evoluzione del dissesto, non è da escludere un'ulteriore tendenza regressiva del movimento franoso attivo, con il potenziale coinvolgimento dei fabbricati della ditta "La Comedil" situati a monte, nelle immediate vicinanze della scarpata.

Infine, dal punto di vista strutturale, il modello di resistività relativo alla sezione 1-1', localizzata proprio lungo la sezione 7-7' volutamente scelta come sezione per la ricostruzione del modello geologico e geotecnico, evidenzia la presenza di una dislocazione tettonica – ascrivibile a una faglia diretta – con valori di resistività compresi tra 63 e 37 Ohm m (Fig. 21). Tale assetto strutturale trova peraltro conferma nel dato stratigrafico restituito dai sondaggi S7 e S9, ubicati rispettivamente a valle e a monte della sezione medesima.

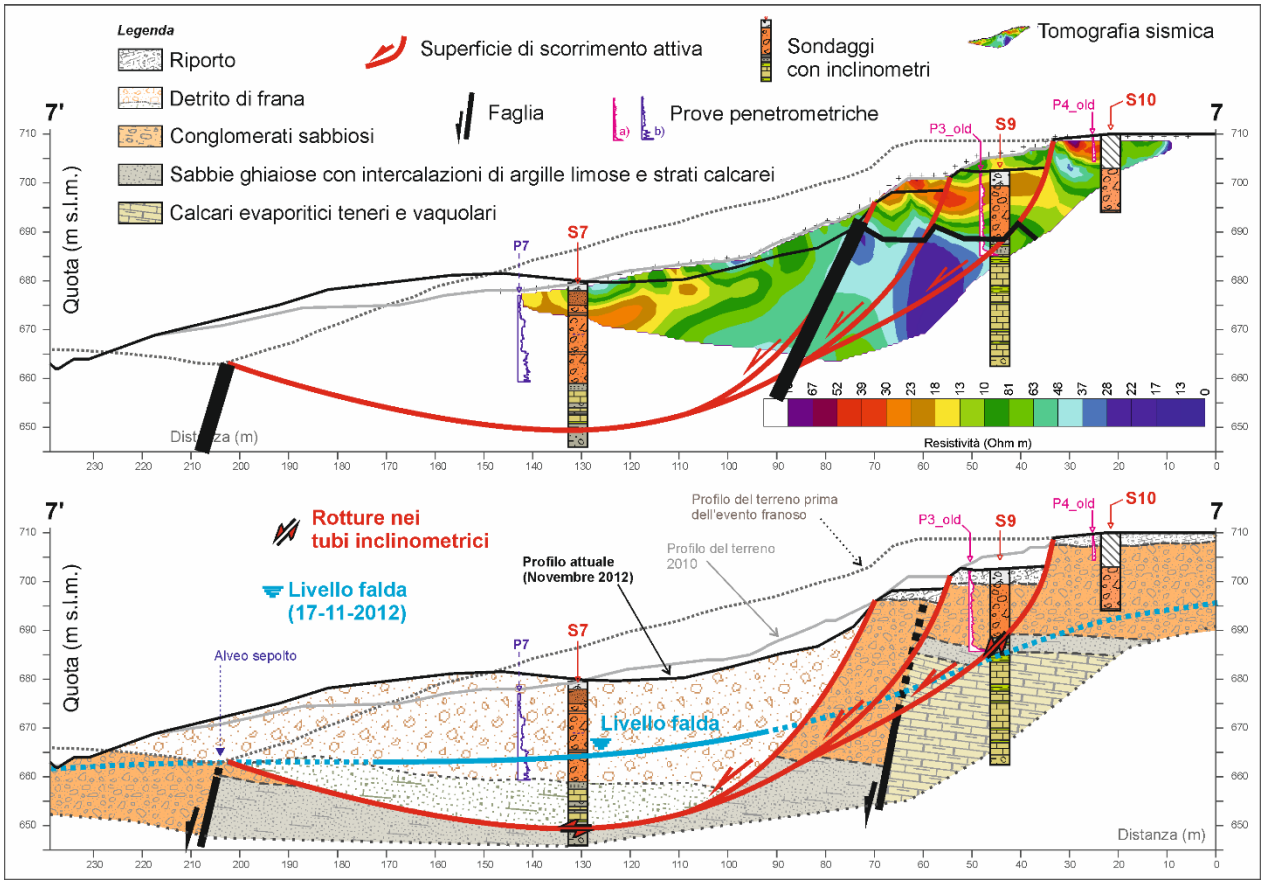


Figura 21 Ricostruzione della sezione 7-7' (sezione di riferimento), della frana analizzata (la cui traccia è riportata in figura Fig. 20).

Legenda: 1) riporto; 2) detrito di frana; 3) conglomerati sabbiosi; 4) calcari evaporitici con intercalazioni di argille fogliettate; 6) ortogneiss; 7) faglia; 8) superfici di scorrimento ipotizzate; 9) sondaggi a carotaggio continuo, attrezzati con inclinometri; 10) prove penetrometriche DPSH.

Per quanto concerne la caratterizzazione geotecnica dei terreni, la Tabella 6 sintetizza i parametri geotecnici dedotti dalle prove di laboratorio per i diversi strati indagati.

Tabella 6 Sintesi della successione stratigrafica e dei parametri geotecnici di riferimento derivati dalle indagini geognostiche e dalle prove di laboratorio.

Strato geotecnico	**Caratterizzazione granulometrica**	**Profondità indicativa**	**Sondaggi di riferimento**	**Descrizione litologica**	**stratigrafia geologica**	**γnat (kN/m³)**	**γs (kN/m³)**	**c' (kPa)**	**φ' (°)**
Terreno di riporto e depositi detritico-colluviali	Sabbia, limo e materiale eterogeneo di riporto	0 – 3/4,5 m	S6 (0–2,5 m), S7 (0–4,5 m), S9 (0–3 m)	Terreno di riporto e depositi detritico-colluviali superficiali	Riporto e detrito di frana	19,6	26,4	—	21,7–24,5
Depositi limo-sabbiosi	Limi sabbiosi con componente argillosa	3/4,5 – 6/14,5 m	S6 (2,5–6 m), S7 (6–14,5 m)	Limi sabbiosi plastici, da sciolti a mediamente addensati	Sabbie ghiaiose con intercalazioni di argille limose e strati calcare	19,6	26,4	1,5–10,4	27,1–31,9
Conglomerati sabbiosi pleistocenici	Sabbie e ghiaie cementate	6 – 20/22 m circa	S6 (6–13 m), S8 (0–20 m), S9 (3–14 m), S10 (0–16 m)	Conglomerati sabbiosi mediamente addensati o addensati	Conglomerati sabbiosi	19,6	26,4	5,9 (medio)	31,4 (medio)
Substrato carbonatico alto-miocenico (calcari e marne)	Roccia carbonatica con livelli marnosi	>13–22 m	S6 (13–28 m), S7 (20,5–33,5 m), S9 (14–40 m)	Calcari micritici con intercalazioni marnose e argillose	Calcari evaporitici teneri e vacuolari	18,6	26,7	19,9	23,2

4 Capitolo 4: La modellazione numerica

4.1 Introduzione al software

La modellazione numerica del versante è stata effettuata mediante il software **RS2**, sviluppato da Rocscience, basato sul metodo degli elementi finiti (Finite Element Method, FEM) e specificamente orientato alla modellazione bidimensionale di problemi di ingegneria geotecnica.

RS2 consente di analizzare il comportamento di terreni e ammassi rocciosi mediante la simulazione dello stato tensionale e deformativo del mezzo, permettendo di affrontare problematiche quali la stabilità dei pendii, gli scavi, le opere di sostegno e gli interventi di consolidamento. Il software consente inoltre di considerare condizioni idrauliche variabili e fenomeni di flusso in mezzi saturi e non saturi, risultando particolarmente adatto allo studio di versanti nei quali le condizioni di precipitazione e di infiltrazione possono influenzare significativamente il comportamento geotecnico.

Nel presente studio, RS2 è stato utilizzato per analizzare l'evoluzione delle condizioni di stabilità del versante in relazione alla variazione delle condizioni idrologiche, con particolare riferimento agli eventi pluviometrici considerati significativi.

4.1.1 Metodo degli elementi finiti e analisi di stabilità

Il metodo degli elementi finiti consente di rappresentare il dominio fisico mediante una discretizzazione costituita da un insieme finito di elementi connessi tra loro attraverso nodi. All'interno di ciascun elemento, il campo degli spostamenti viene approssimato mediante opportune funzioni di forma definite a partire dagli spostamenti nodali.

La discretizzazione permette quindi di trasformare il problema continuo in un sistema discreto di equazioni, la cui soluzione consente di determinare lo stato tensionale e deformativo del modello.

Nel presente studio il versante è stato rappresentato come un continuo equivalente, assumendo che le proprietà meccaniche assegnate ai diversi materiali possano descrivere il comportamento macroscopico delle unità geotecniche presenti.

Per la valutazione della stabilità è stata utilizzata la tecnica della riduzione della resistenza al taglio *(Shear Strength Reduction, SSR).* Il metodo consiste nel ridurre progressivamente i parametri di resistenza al taglio dei materiali mediante un fattore di riduzione, indicato come *Strength Reduction Factor (SRF).*

Per un materiale descritto secondo il criterio di Mohr-Coulomb, la resistenza viene progressivamente ridotta secondo:

$$c_{rid} = \frac{c}{SRF}$$

$$tan_{\varphi rid} = \frac{tan_{\varphi}}{SRF}$$

Dove c rappresenta la coesione e φ l'angolo di resistenza a taglio.

L'analisi viene ripetuta per valori crescenti di SRF fino al raggiungimento della condizione di collasso o della mancata convergenza della soluzione numerica. Il valore critico di SRF associato alla condizione di collasso rappresenta il fattore di sicurezza numerico.

4.2 Definizione del modello geotecnico per le simulazioni numeriche

Il modello numerico è stato costruito a partire dalla ricostruzione del profilo topografico del versante elaborata con autocad e successivamente importata in RS2 come geometria di input.

La discretizzazione del dominio è stata realizzata mediante mesh uniforme costituita da elementi triangolari a 6 nodi.

4.2.1 Stratigrafia e proprietà dei materiali

Sulla base della caratterizzazione geologica e geotecnica descritta nel capitolo precedente, a ciascuna delle quattro unità litotecniche identificate sono stati attribuiti i relativi parametri geomeccanici. Nello specifico, procedendo dal piano campagna in profondità, il modello stratigrafico del versante risulta così articolato:

- Sabbia limosa
- Marna
- Terreno poco alterato cementato
- Roccia

A ciascuno strato sono stati quindi assegnati i relativi parametri derivanti dalla caratterizzazione effettuata. Questi sono riportati in tabella 7 in ordine di profondità.

Tabella 7 Proprietà dei materiali

Strato di terreno	**1° Strato Sabbia limosa**	**2° Strato Marna**	**3° Strato Terreno poco alterato cementato**	**Roccia**
Peso per unità di volume secco [kN/m^3]	20	19	19	22
Porosità	0.35	0.35	0.5	0.5
Modulo elastico [MPa]	6	6	20	20
Modulo di Poisson	0.35	0.35	0.3	0,3
Criterio di rottura	Mohr-Coulomb			
Tipo di materiale	Plastico			
Coesione di picco [kPa]	6	20	1	50
Angolo di resistenza al taglio]	31	23	38	40
Comportamento insaturo	Metodo di singola sollecitazione efficace (Bishop)		None	
Permeabilità [m/s]	1.25e-5	5.5e-8	4e-5	5.5e-7

4.2.2 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono state definite imponendo il vincolo degli spostamenti alla base del modello e limitando gli spostamenti orizzontali lungo i bordi laterali, così da riprodurre il comportamento del terreno indisturbato circostante ed evitare effetti di bordo durante le simulazioni numeriche. Questo è stato possibile grazie all'inserimento di due tipi di vincolo:

- Carrelli disposti sul lato orizzontale per impedire che il dominio trasli orizzontalmente e lasciare non vincolato lo spostamento verticale;
- cerniere disposte lungo il confine verticale per evitare gli spostamenti verticali e orizzontali.

La figura 22 riportata di seguito mostra un estratto dell'immagine del modello implementato in rs2 in cui è possibile contraddistinguere, in base alla tipologia di colore associato ad ogni materiale, la stratigrafia e i vincoli inseriti lungo il perimetro.

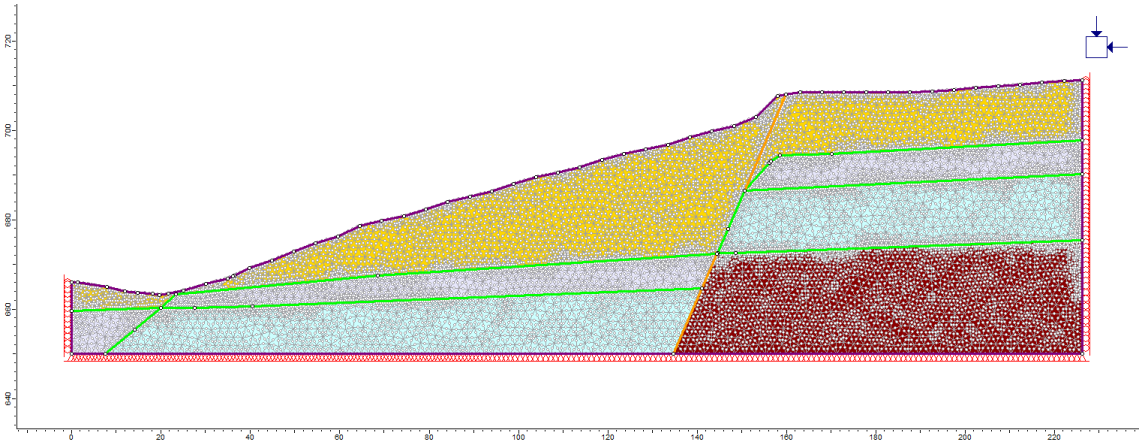


Figura 22 Riproduzione della sezione più rappresentativa con RS2.

4.3 Modellazione delle condizioni idrauliche

4.3.1 Linea piezometrica

Nel modello numerico è stata integrata la superficie piezometrica rappresentativa dell'assetto idrogeologico del versante. L'andamento di tale superficie è stato ricostruito a partire da alcune misure freatimetriche disponibili, acquisite successivamente all'evento di frana. Tali rilievi puntuali sono stati assunti come vincoli di ancoraggio per tracciare il profilo della piezometrica lungo l'intero versante, consentendo di definire la distribuzione iniziale delle pressioni interstiziali all'interno del dominio di calcolo. La linea piezometrica così ricostruita è riportata in Figura 23.

Questo stato idraulico iniziale costituisce il punto di partenza per la successiva analisi in regime transitorio, volta a valutare la risposta del pendio sotto l'azione degli eventi meteorici.

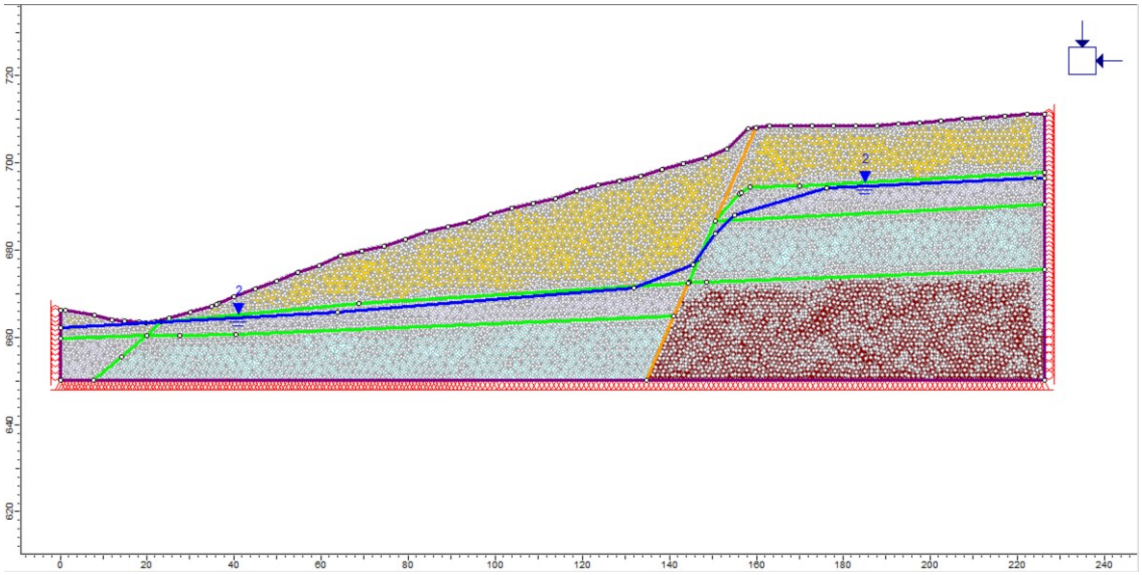


Figura 23 Estratto immagine RS2 con linea piezometrica.

4.3.2 Comportamento dei terreni non saturi

Per rappresentare il comportamento idraulico dei terreni in condizioni di parziale saturazione è necessario associare a ciascuno strato la propria *Soil Water Characteristic Curve (SWCC*), che descrive la relazione tra il contenuto volumetrico d'acqua e la suzione matriciale.

La curva di ritenzione idrica del terreno (SWCC) rappresenta la relazione tra due dei principali parametri idrologici del terreno, ovvero la pressione interstiziale ("u") e il contenuto d'acqua volumetrico ("w" o "θ"). Tale relazione risulta fondamentale per la caratterizzazione del comportamento idraulico dei terreni non saturi e per la valutazione delle variazioni del regime idrico nel tempo.

L'equazione di Van Genuchten rappresenta una delle formulazioni maggiormente utilizzate per la ricostruzione delle SWCC a partire dai dati sperimentali. Tale formulazione, consente infatti di descrivere in modo efficace il comportamento idrologico di terreni caratterizzati da differenti proprietà tessiturali, pedologiche e fisiche. L'equazione proposta da Van Genuchten è la seguente:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha|h|)^n)^m}$$

$$m = (1 - \frac{1}{n})$$

dove θs e θr rappresentano rispettivamente il contenuto d'acqua in condizioni di totale saturazione e il contenuto d'acqua residuo, mentre α e n sono i parametri di interpolazione della curva di ritenzione.

4.3.3 Parametri di van Genuchten

Nel presente studio, in assenza di dati sperimentali, la stima dei parametri idraulici è stata condotta utilizzando i valori riportati in Tabella 8, tratti da Vogel et al. (2001).

Tabella 8 Parametri di Van Genuchten

Average values of VGM soil hydraulic parameters for 12 major soil textural groups according to Carsel and Parrish, 1988 [3]

Texture	θ_r (m^3/m^3)	θ_s (m^3/m^3)	α (1/cm)	n	K_s (cm/day)
(1) Sand	0.045	0.430	0.145	2.68	712.80
(2) Loamy sand	0.057	0.410	0.124	2.28	350.20
(3) Sandy loam	0.065	0.410	0.075	1.89	106.10
(4) Loam	0.078	0.430	0.036	1.56	24.96
(5) Silt	0.034	0.460	0.016	1.37	6.00
(6) Silt loam	0.067	0.450	0.020	1.41	10.80
(7) Sandy clay loam	0.100	0.390	0.059	1.48	31.44
(8) Clay loam	0.095	0.410	0.019	1.31	6.24
(9) Silty clay loam	0.089	0.430	0.010	1.23	1.68
(10) Sandy clay	0.100	0.380	0.027	1.23	2.88
(11) Silty clay	0.070	0.360	0.005	1.09	0.48
(12) Clay	0.068	0.380	0.008	1.09	4.80

Le curve caratteristiche dei terreni utilizzate nel modello di RS2 sono pertanto definite dai seguenti parametri:

Tabella 9 Parametri di Van Genuchten adottati nel modello.

Terreno	α **[1/m]**	n **[-]**
Sandy loam	7.5	1.89
Clayey Silts	0.5	1.09
Loamy sand	12.4	2.28
Clay	0.8	1.09

Questi parametri, già presenti all'interno della libreria di RS2, definiscono le curve caratteristiche di ritenzione idrica dei diversi materiali, espresse in termini di contenuto d'acqua relativo e permeabilità relativa. Tali curve descrivono la variazione delle proprietà idrauliche dei terreni in funzione della suzione matriciale e costituiscono uno degli elementi fondamentali per la simulazione del comportamento idraulico del versante in condizioni non sature.

- *Sandy loam*

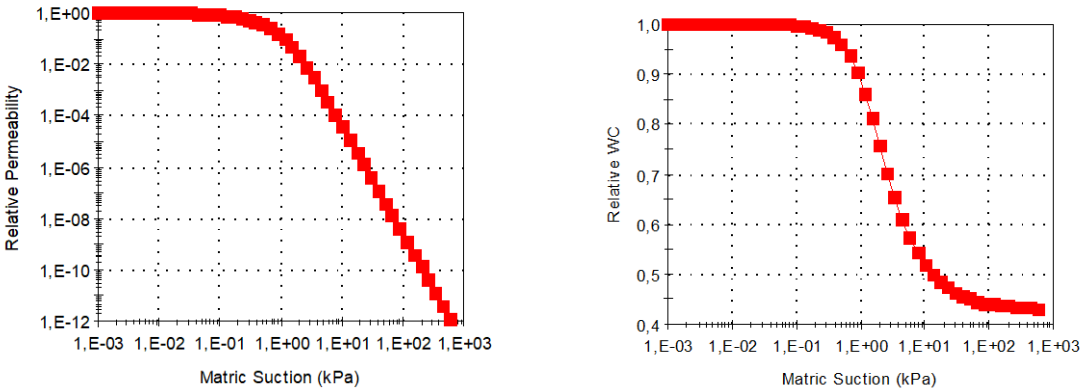


Figura 24 Curva di conducibilità idraulica e curva di ritenzione per lo strato "Sandy loam".

- *Clayey Silts*

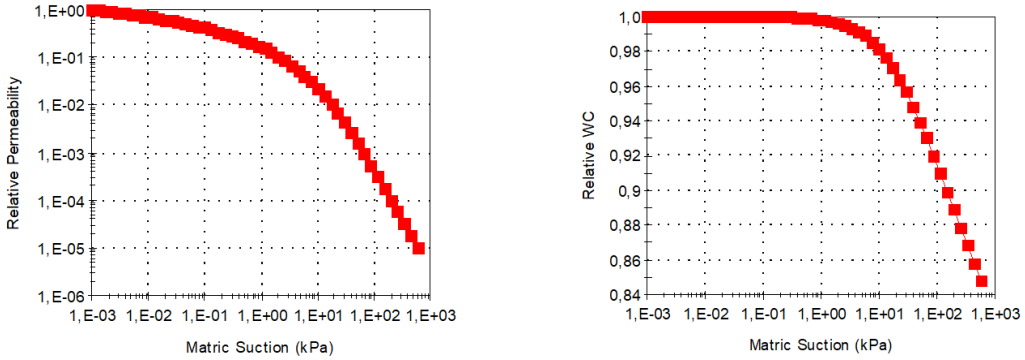


Figura 25 Curva di conducibilità idraulica e curva diritenzione per lo strato "Clayey Silts".

- Loamy sand

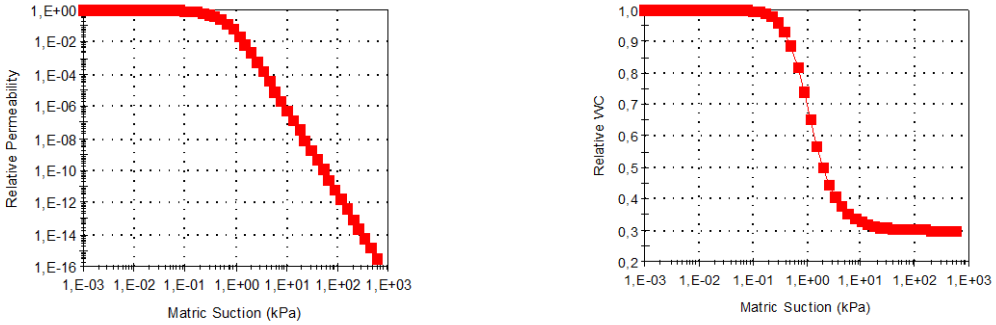


Figura 26 Curva di conducibilità idraulica e curva di ritenzione per lo strato "Loamy Sand".

- *Clay*

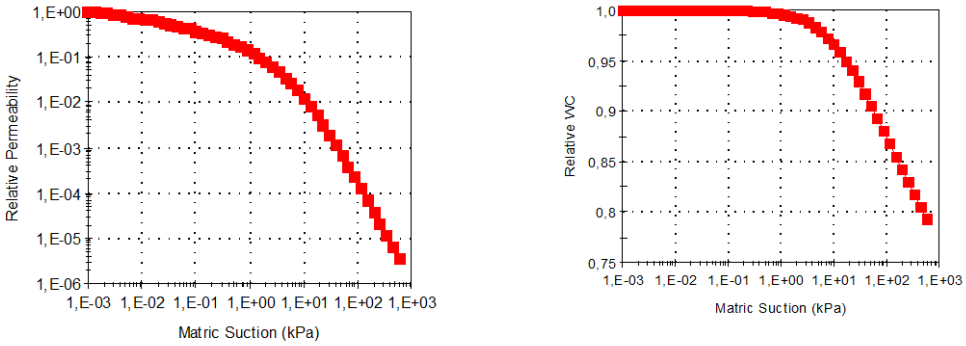


Figura 27 Curva di conducibilità idraulica e curva di ritenzione per lo strato "Clay".

4.3.4 Funzione di precipitazione

Per simulare l'evoluzione temporale delle condizioni idrologiche del versante è stata inoltre implementata in RS2 una funzione di precipitazione definita *Rainfall Function*, costruita a partire dai dati pluviometrici registrati presso la stazione meteorologica di Rogliano (cod. 3000) e messi a disposizione da ARPACAL.

La funzione espressa in m/giorno è stata definita considerando un primo intervallo temporale compreso tra 0 e 1825 giorni, corrispondente a cinque anni, durante il quale è stato assegnato un valore di flusso negativo, al fine di riprodurre una lieve condizione di suzione del terreno e consentire il raggiungimento di uno stato idraulico iniziale coerente e rappresentativo delle condizioni antecedenti agli eventi meteorici analizzati.

Successivamente sono stati inseriti i valori di precipitazione registrati nei 69 giorni antecedenti l'evento del 25/01/2009. La scelta di tale intervallo temporale deriva dalle analisi pluviometriche illustrate nel Capitolo 2, dalle quali è emerso come le precipitazioni antecedenti abbiano svolto un ruolo determinante nell'incremento del contenuto d'acqua del terreno e, conseguentemente, nelle condizioni di stabilità del versante. La funzione è stata infine estesa fino a comprendere il secondo evento verificatosi il 13/02/2010, consentendo di simulare la successione temporale degli eventi meteorici considerati significativi per l'analisi.

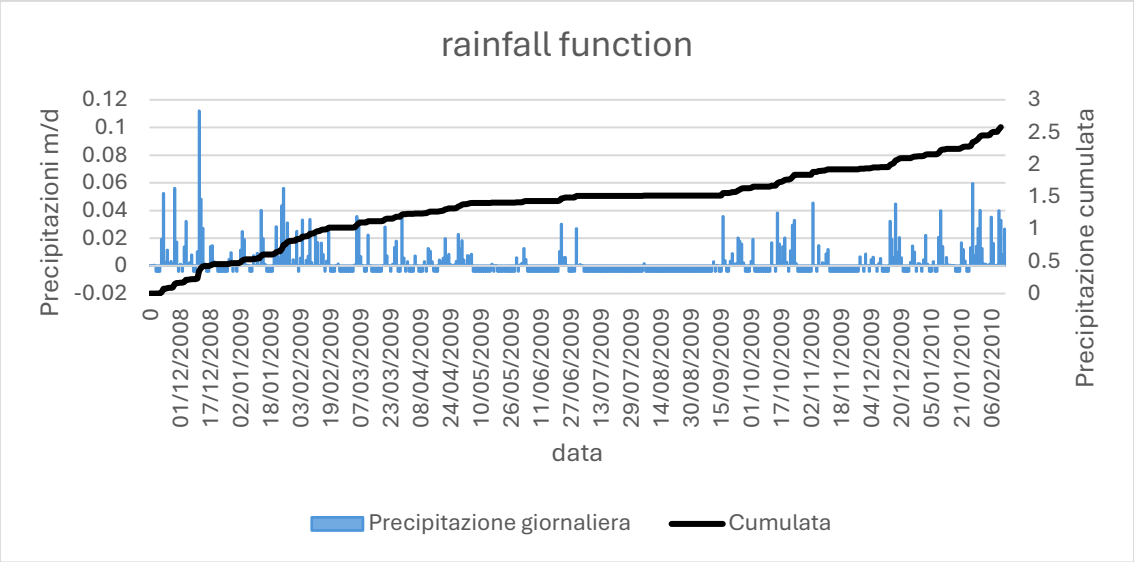


Figura 28 Rainfall function.

4.4 Definizione del modello numerico

Nella definizione del modello numerico, si è reso necessario calibrare alcuni parametri geotecnici, in particolare la coesione, per garantire la convergenza delle simulazioni numeriche. Tale calibrazione è stata effettuata in considerazione della complessità geologica del sito e delle inevitabili semplificazioni introdotte nella modellazione numerica.

Una volta definita la geometria, assegnate le proprietà geotecniche e idrauliche dei materiali e impostate le condizioni al contorno, sono state eseguite le simulazioni numeriche finalizzate alla valutazione della risposta del versante in differenti condizioni idrologiche.

Le simulazioni sono state suddivise mediante differenti *stage*, ciascuno associato a una specifica condizione idraulica e temporale calcolando il valore dello Strength Reduction Factor (SRF) in corrispondenza dei diversi eventi di pioggia evidenziati in figura 29.

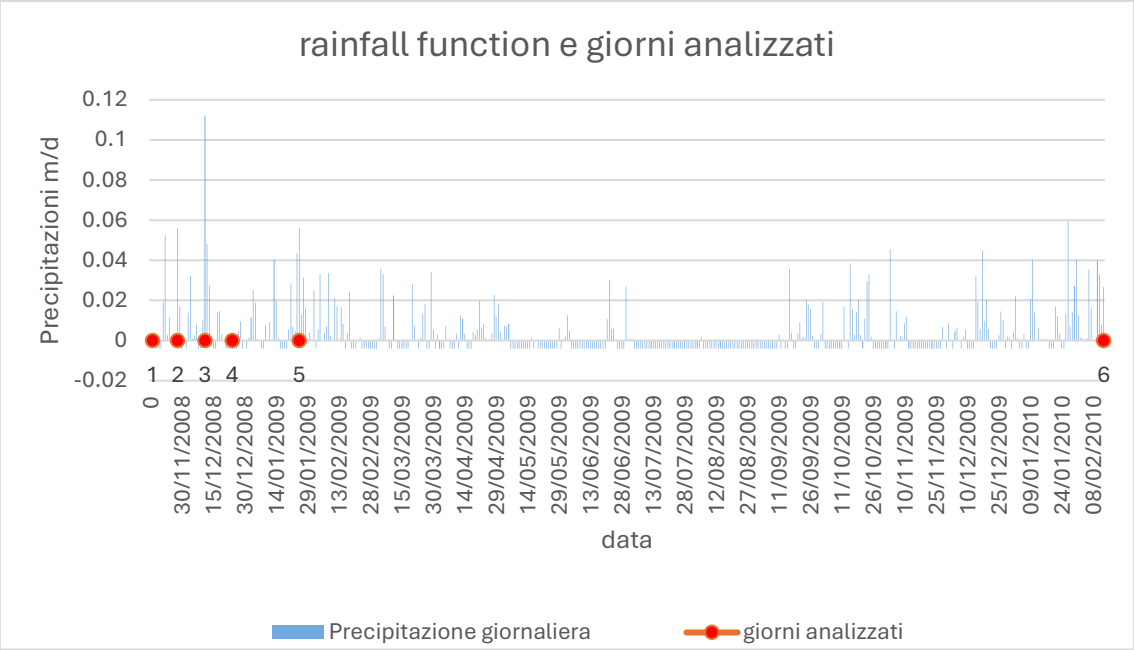


Figura 29 Funzione di pioggia e giorni analizzati.

In particolare, sono state considerate:

- *Stage 1 – Fase Iniziale- Initial Static Water*

La fase iniziale, denominata **"***Initial Static Water***"**, è stata utilizzata per definire lo stato idraulico iniziale del modello sulla base della linea piezometrica impostata.

In questa condizione il versante risulta stabile e costituisce lo stato di riferimento per le successive simulazioni.

- *Stage 2 – Stazionaria - Steady*

Successivamente è stata introdotta una fase di durata pari a *1825 giorni*, corrispondente a cinque anni, denominata **"***Steady".*

Durante tale fase è stato imposto un flusso pari a 0,0000356 m/d, con l'obiettivo di ottenere una condizione idraulica iniziale stabilizzata prima dell'applicazione della successione degli eventi meteorici. Questo ha consentito di simulare una corretta saturazione del terreno prima dell'analisi successiva.

- *Stage 3 – Rainfall/Dry*

Nella fase successiva sono stati simulati i diversi eventi pluviometrici selezionati dalla Rainfall Function.

A seconda dell'intervallo temporale analizzato, sono state considerate condizioni di *Rainfall*, corrispondenti alla presenza di precipitazione, oppure condizioni *Dry,* corrispondenti ai periodi privi di precipitazione individuati nella figura 29.

4.5 Simulazione del primo evento

Per l'analisi del primo evento sono state eseguite diverse simulazioni, modificando gli intervalli temporali considerati in modo da analizzare l'evoluzione della risposta del versante durante le fasi di precipitazione e nei successivi periodi di asciutta.

Complessivamente sono state eseguite *cinque simulazioni numeriche*, caratterizzate dalle configurazioni riportate in tabella 10:

Tabella 10 Configurazioni delle simulazioni numeriche relative al primo evento.

Simulazione	Durata/periodo	Condizione analizzata
1	1825-5 anni	Initial Static Water + Steady
2	1837-12 giorni	Dry
3	1850-25 giorni	Rainfall
4	1865-40 giorni	Dry
5	1895-primo evento	Rainfall

La figura 30 mostra l'andamento delle precipitazioni relative al primo evento, con l'indicazione dei giorni scelti per effettuare le analisi. Sono stati selezionati, i picchi di pioggia e periodi di asciutta più prolungati, al fine di analizzare come l'evento meteorico si ripercuote sulle condizioni idrologiche.

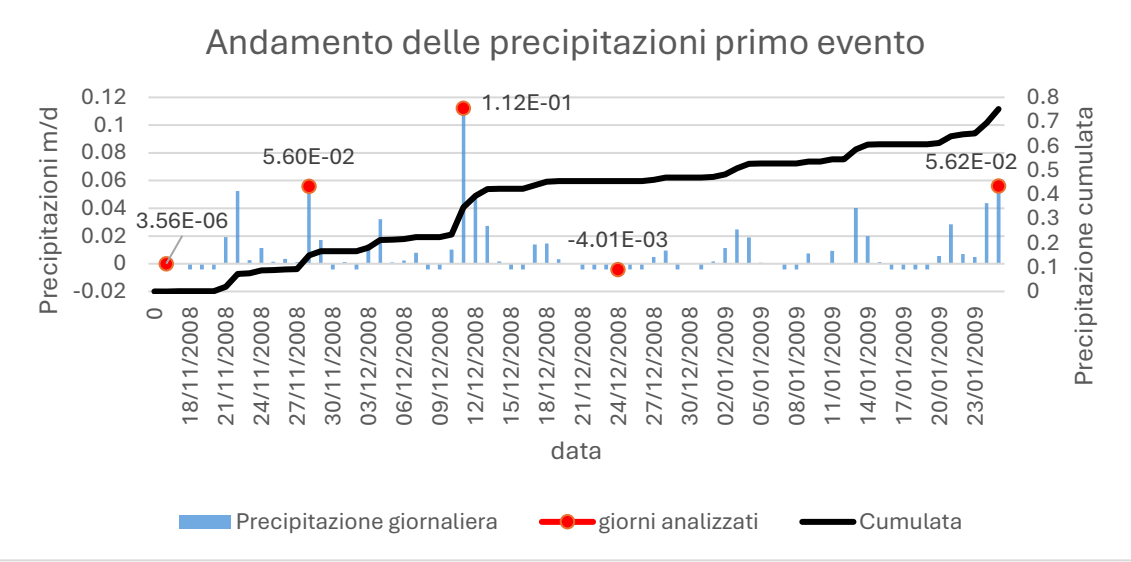


Figura 30 Andamento delle precipitazioni con identificazione degli eventi analizzati.

4.5.1 Risultati delle simulazioni

I risultati ottenuti dalle simulazioni hanno evidenziato come gli eventi meteorici particolarmente intensi verificatisi nei periodi precedenti all'evento franoso abbiano determinato una progressiva riduzione del SRF in prossimità del primo innesco. E' stato possibile quindi analizzare la relazione tra l'andamento delle precipitazioni e la variazione nel tempo del SRF, valutando la risposta del versante agli eventi meteorici.

Nella figura 31 è riportato l'andamento del SRF.

È possibile osservare una marcata diminuzione del fattore di sicurezza in corrispondenza degli eventi caratterizzati da un incremento delle precipitazioni. Successivamente alla riduzione iniziale, il valore del SRF tende a mantenersi per lo più costante nel periodo immediatamente antecedente all'innesco dell'evento franoso, periodo caratterizzato da poche o nulle precipitazioni. Tale comportamento suggerisce che gli eventi pluviometrici più intensi abbiano avuto un ruolo significativo nella progressiva riduzione delle condizioni di stabilità del versante, fino al raggiungimento di un valore caratterizzante l'instabilità del versante.

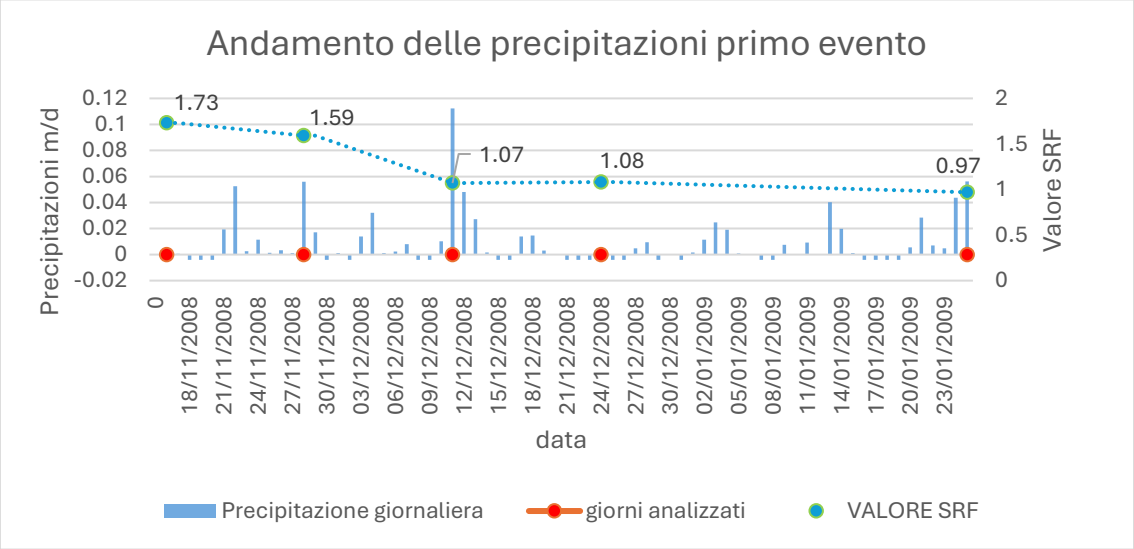


Figura 31 Andamento valore SRF.

4.5.2 Evoluzione delle pressioni interstiziali

La distribuzione delle pressioni interstiziali nello stage considerato evidenzia una progressiva variazione delle condizioni idrauliche all'interno del versante. Questo è dovuto ai vari periodi di asciutto e di piogge che hanno caratterizzato l'arco temporale preso in esame. Le pressioni maggiormente elevate si concentrano nelle porzioni più profonde del modello, mentre verso la superficie si osservano valori progressivamente inferiori. In particolare, durante i periodi di pioggia, l'infiltrazione dell'acqua nel terreno determina un progressivo aumento delle pressioni interstiziali negative, con valori che possono avvicinarsi allo zero nelle zone maggiormente interessate dall'infiltrazione. Al contrario, durante i periodi asciutti, l'evaporazione e il drenaggio favoriscono il ristabilirsi di condizioni caratterizzate da una maggiore suzione, con conseguente diminuzione della pressione interstiziale.

La configurazione del campo di pressione risulta condizionata dalla posizione della superficie piezometrica e dalle caratteristiche di permeabilità assegnate ai differenti materiali. Le figure 32 – 36 mostrano l'andamento delle pressioni interstiziali ottenute dalle diverse simulazioni. Dai risultati grafici riportati nelle figure si osserva come le pressioni interstiziali varino in funzione dell'evento di pioggia o periodo di asciutta. Durante gli eventi di precipitazione si registra, infatti, un incremento delle pressioni interstiziali seguita da una diminuzione nei periodi di asciutta. Per ciascuna simulazione è inoltre riportato anche il valore del SRF così da avere effettiva evidenza del legame tra evoluzione delle condizioni idrologiche e stabilità del versante.

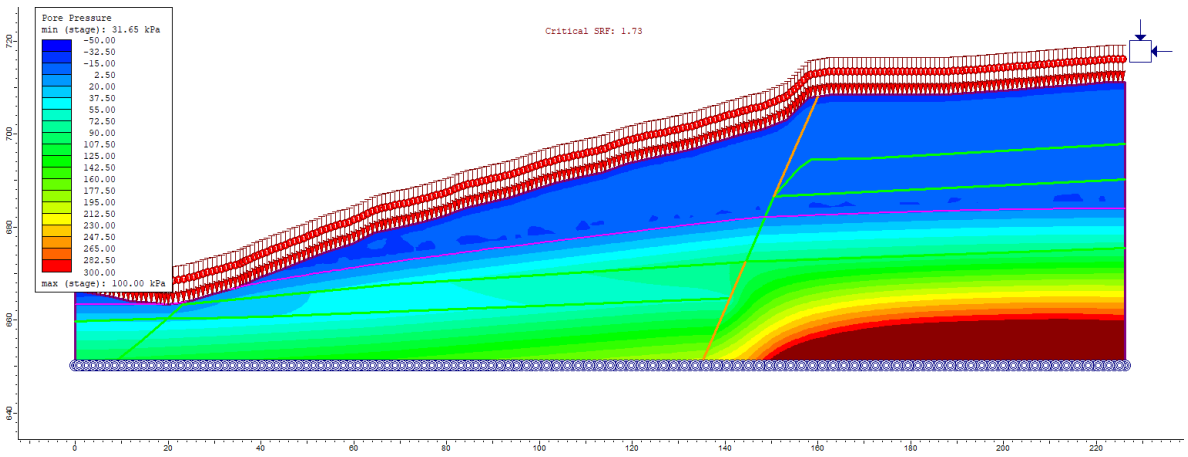


Figura 32 Distribuzione delle pressioni interstiziali nel versante nella simulazione 1.

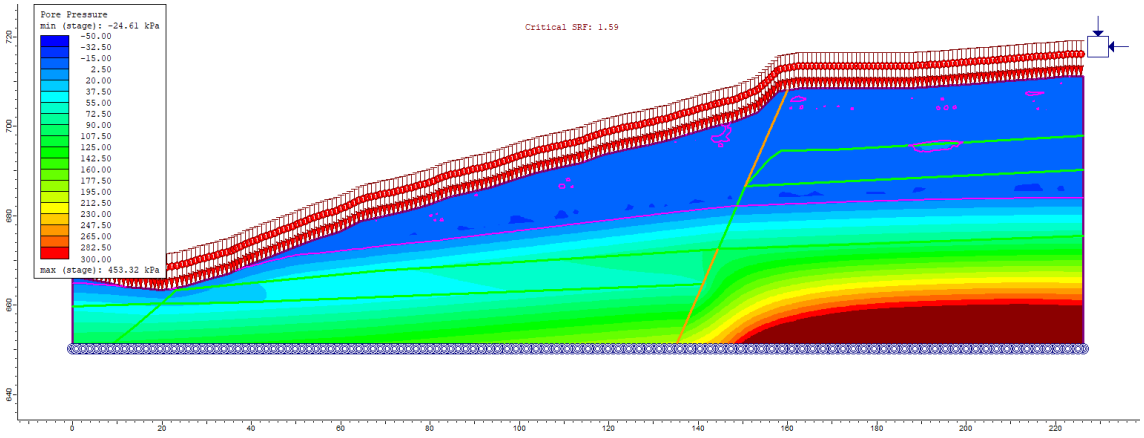


Figura 33 Distribuzione delle pressioni interstiziali nel versante nella simulazione 2.

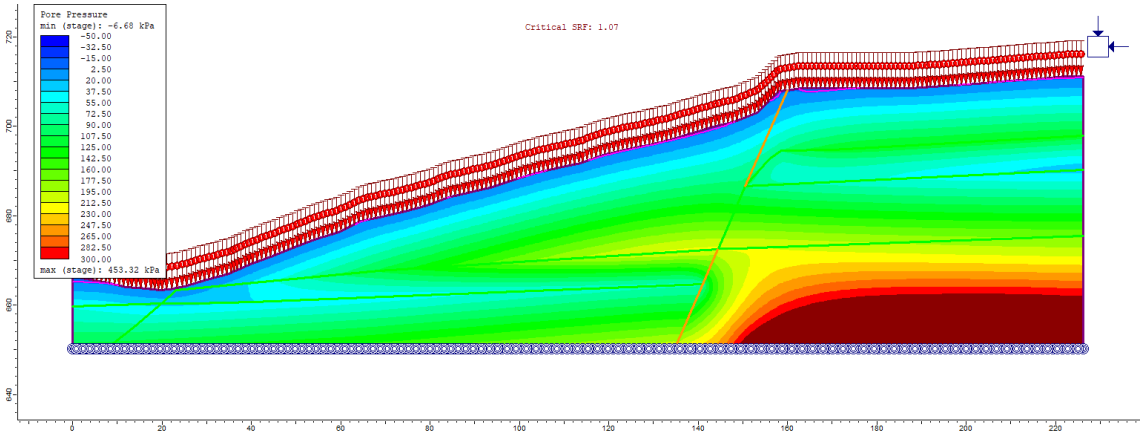


Figura 34 Distribuzione delle pressioni interstiziali nel versante nella simulazione 3.

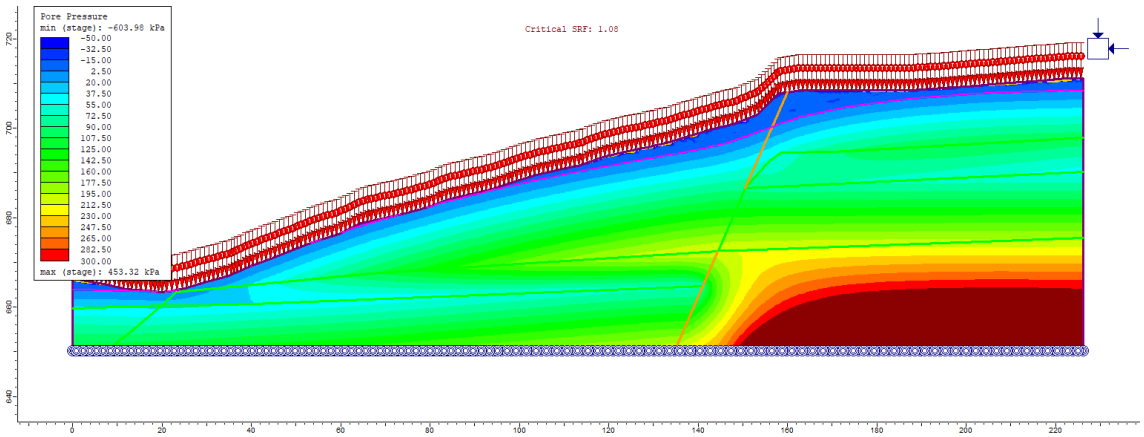


Figura 35 Distribuzione delle pressioni interstiziali nel versante nella simulazione 4.

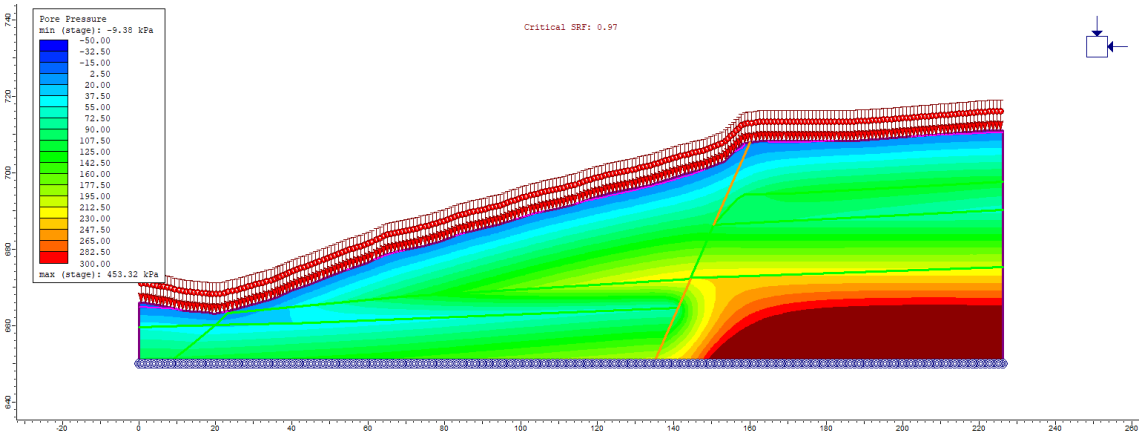


Figura 36 Distribuzione delle pressioni interstiziali nel versante nella simulazione 5.

È interessare valutare anche l'andamento grafico emerso dai risultati delle simulazioni del valore di saturazione, riportando le figure 37-41, da cui emerge come anche questo sia influenzato dagli eventi meteorici.

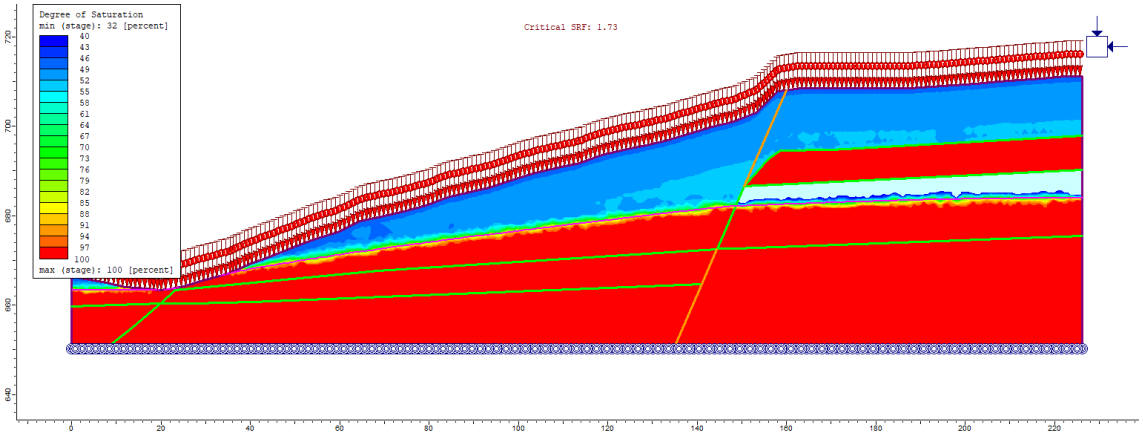


Figura 37 Andamento del grado di saturazione nel versante nella simulazione 1.

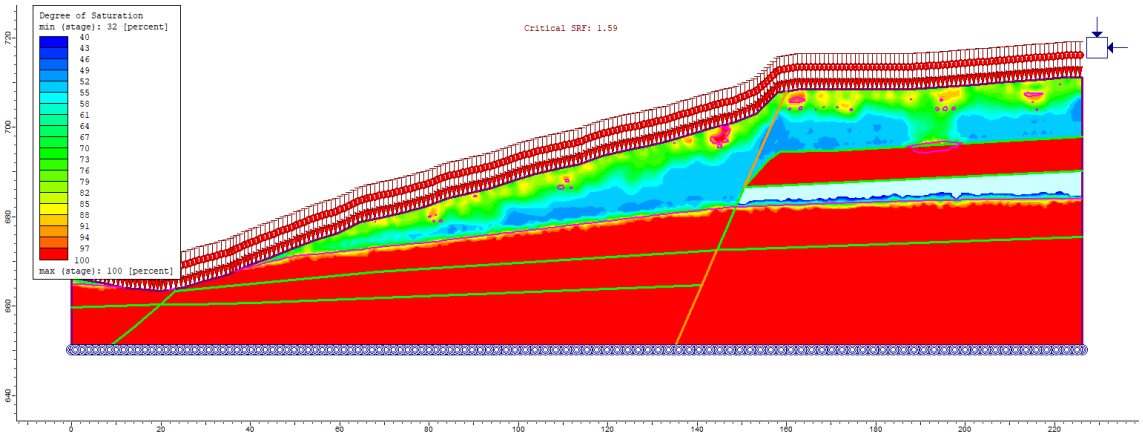


Figura 38 Andamento del grado di saturazione nel versante nella simulazione 2.

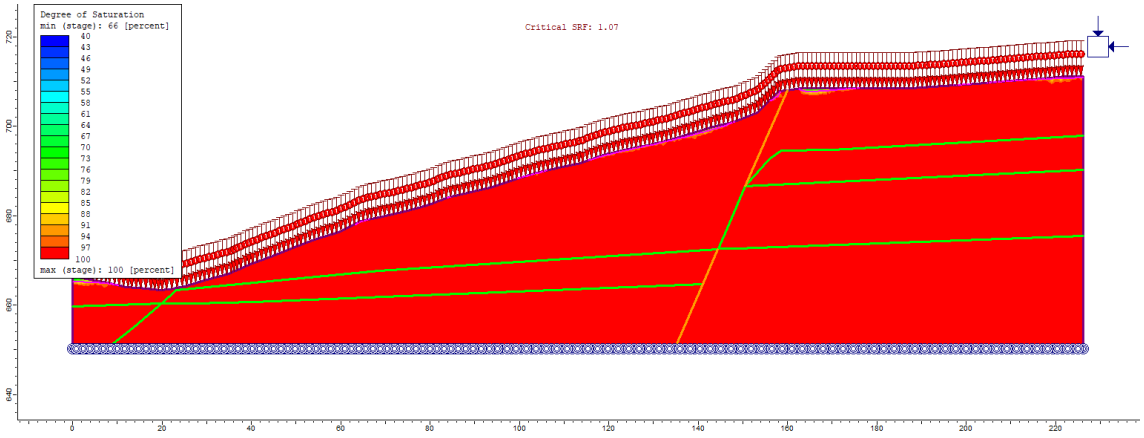


Figura 39 Andamento del grado di saturazione nel versante nella simulazione 3.

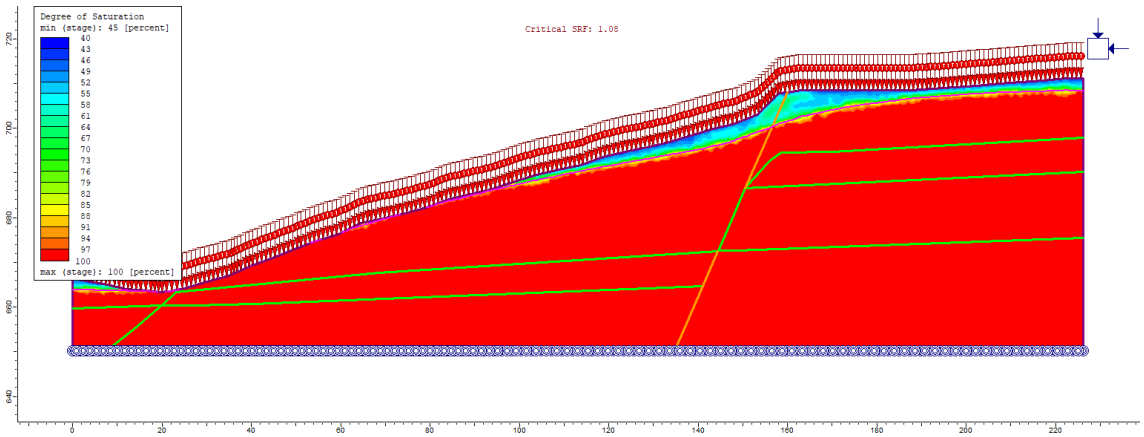


Figura 40 Andamento del grado di saturazione nel versante nella simulazione 4.

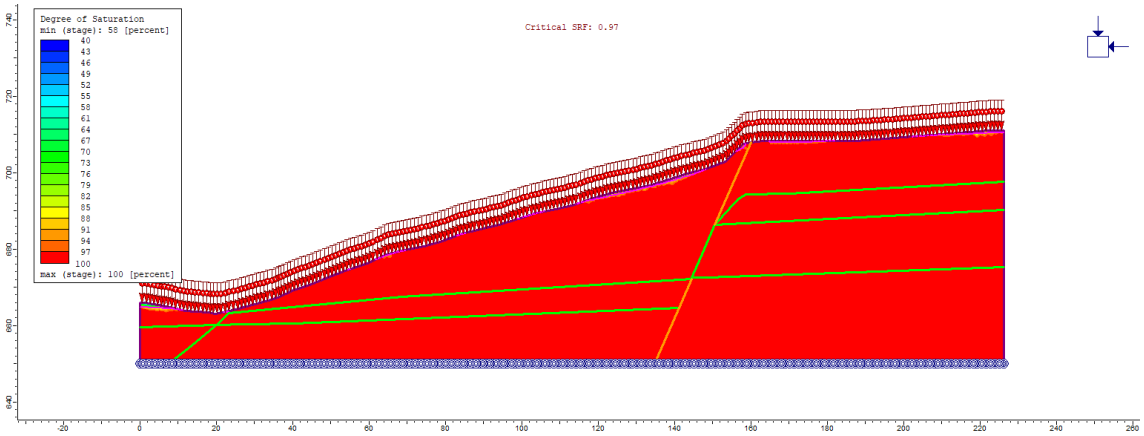


Figura 41 Andamento del grado di saturazione nel versante nella simulazione 5.

Infine, è utile riportare la figura 42 come estratto del risultato della simulazione 5, caratterizzata da instabilità con SRF=0.97, attraverso il quale è possibile individuare, con la rappresentazione corredata dalle frecce che indicano la direzione degli spostamenti lungo versante, la massa interessata dallo spostamento lungo il versante.

È opportuno precisare, che con il modello ricostruito e le simulazioni numeriche condotte con la tecnica della Shear Strength Reduction (SSR), non è stato possibile individuare con affidabilità la superficie di rottura con la sua profondità confrontabile con quella reale. In particolare, nella simulazione relativa al primo evento, il modello raggiunge una condizione di instabilità per un valore di SRF = 0.97 ma riducendo i parametri di resistenza al taglio non è stato possibile definire in modo univoco la profondità della superficie di scorrimento. Questo è riconducibile anche alla complessità della stratigrafia reale, la cui ricostruzione nel modello geotecnico ha inevitabilmente comportato una semplificazione rispetto a quanto presente in sito.

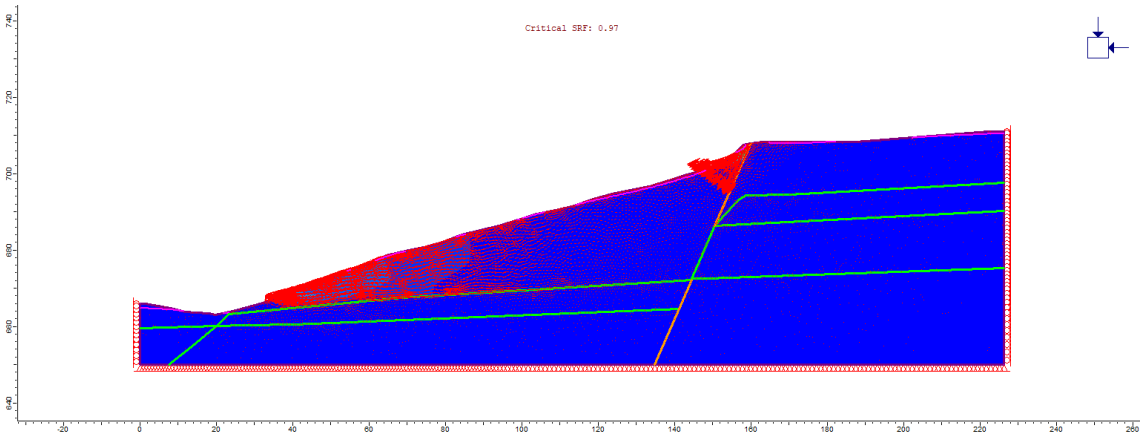


Figura 42 Andamento degli spostamenti simulazione 5- primo evento.

4.5.3 Confronto con secondo evento

L'assenza di rilievi topografici successivi al primo innesco del fenomeno franoso non ha consentito una riprofilatura del versante antecedente la riattivazione così da poter eseguire delle simulazioni con il profilo reale. Le simulazioni hanno quindi mantenuto invariata la geometria del modello, variando unicamente condizioni idrologiche e quindi l'arco temporale dell'evento meteorico da considerare. Per tenere conto del degrado del materiale a seguito del primo evento di frana, è stata inoltre ridotta la coesione del primo strato, simulando in questo modo un terreno con una resistenza a taglio ridotta. Dalla simulazione si è ottenuto un valore di SRF pari a 0.98. Tale valore risulta, seppur in modo minimo, superiore rispetto a quello ottenuto nel primo innesco (SRF=0.97) e questo risulta coerente con le condizioni idrologiche considerate, in quanto, così come mostrato in figura 43, i valori di picco delle precipitazioni sono inferiori, seppur intese rispetto all'evento eccezionale che ha generato il primo innesco.

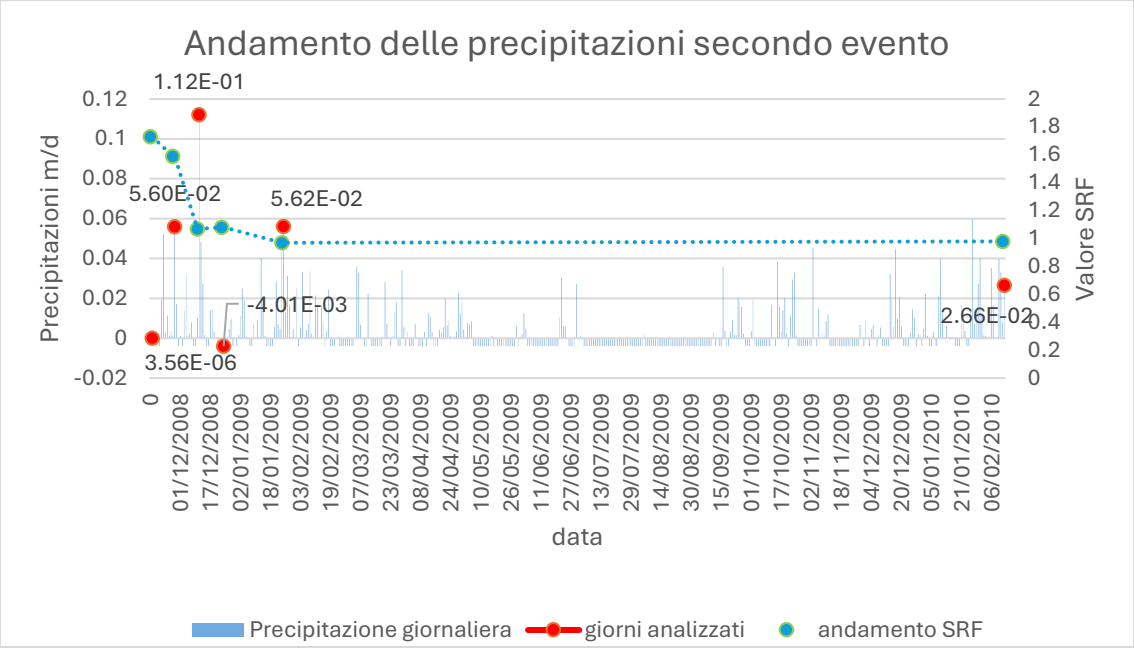


Figura 43 Andamento delle precipitazioni secondo evento.

5 CAPITOLO 5: Strategie di mitigazione della frana e valutazione degli interventi

Nel 2009 è stato avviato un progetto portato a termine nel 2012, denominato *SafeLand – Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies*, finalizzato allo sviluppo di un quadro metodologico per la valutazione quantitativa del rischio associato ai fenomeni franosi e alla definizione di strategie di gestione e mitigazione del rischio applicabili a differenti tipologie di frana.

Il rischio è stato valutato come il risultato dell'interazione tra la *pericolosità associata al fenomeno franoso*, la *vulnerabilità* degli elementi esposti e la loro *esposizione.* La gestione del rischio non riguarda quindi esclusivamente la stabilizzazione del versante, ma comprende anche tutte quelle azioni finalizzate a ridurre la probabilità di accadimento del fenomeno, a limitarne le conseguenze e gestire il rischio residuo.

Nel contesto del presente caso di studio, l'attenzione è rivolta principalmente alla riduzione della pericolosità, attraverso interventi in grado di modificare le condizioni che controllano la stabilità del versante.

Analizzare contestualmente questi elementi consente di definire il rischio associato al fenomeno e valutare possibili strategie di interventi per ridurlo al minimo. Il progetto SafeLand pone inoltre particolare attenzione alle incertezze presenti nelle diverse fasi della valutazione, considerando tra gli altri aspetti, l'incertezza associata alla geometria della superficie di scorrimento, ai parametri geotecnici, ai meccanismi di innesco, alla frequenza degli eventi e alla risposta degli elementi esposti.

Nell'ambito di SafeLand, le misure di mitigazione possono essere suddivise in tre categorie principali:

- *Misure Strutturali*: agiscono direttamente sul fenomeno franoso o sulle sue conseguenze attraverso interventi di tipo ingegneristico, quali sistemi di drenaggio, opere di regimazione delle acque, opere di sostegno e stabilizzazione, interventi di protezione superficiale, barriere e opere di contenimento;
- *Misure non strutturali*: finalizzate principalmente alla riduzione delle conseguenze attraverso strumenti quali la pianificazione territoriale,

la regolamentazione dell'uso del suolo, il monitoraggio, i sistemi di allerta precoce, l'informazione della popolazione, la preparazione all'emergenza e la definizione delle procedure di evacuazione;

- *Misure di trasferimento del rischio*: comprendono strumenti che non eliminano direttamente la pericolosità, ma spostano in parte le conseguenze economiche del rischio da un soggetto a un altro come le assicurazioni;

La scelta della strategia di mitigazione non dipende quindi esclusivamente dall'efficacia tecnica della singola opera, ma deve tenere conto anche delle caratteristiche specifiche del fenomeno, delle condizioni del sito, dei costi, degli aspetti ambientali e sociali, delle incertezze associate alla valutazione e del rischio residuo.

La *Toolbox of landslide mitigation measures* sviluppata nell'ambito di SafeLand è stata utilizzata come riferimento metodologico per l'individuazione delle possibili strategie di mitigazione. La scelta degli interventi da analizzare nel caso di studio è stata successivamente effettuata sulla base delle caratteristiche specifiche del versante, dei principali fattori di instabilità e dei risultati della modellazione numerica che hanno dato forza all'ipotesi dell'evento pluviometrico come causa principale di innesco della frana.

5.1 Inquadramento delle strategie di mitigazione del rischio frana

La scelta delle misure di mitigazione è effettuata in funzione delle caratteristiche del fenomeno franoso e dei principali fattori che influenzano la sua evoluzione. Nell'ambito del progetto SafeLand, le strategie di intervento sono infatti analizzate in relazione alle differenti tipologie di movimento, considerando il meccanismo di instabilità, la profondità della superficie di scorrimento, la mobilità della massa e i principali fattori predisponenti e innescanti.

In presenza di fenomeni di scorrimento, soprattutto quando caratterizzati da superfici di scorrimento profonde, gli interventi possono essere orientati principalmente alla modifica delle condizioni idrauliche del versante e all'incremento delle forze resistenti. La riduzione dell'infiltrazione delle acque meteoriche attraverso la regimazione superficiale e la diminuzione delle pressioni interstiziali mediante sistemi di drenaggio rappresentano, in questo caso, misure particolarmente rilevanti. Per i movimenti più superficiali, l'azione dell'acqua può essere associata anche a fenomeni di erosione e alla perdita di resistenza

degli strati più prossimi alla superficie, rendendo significativi gli interventi di protezione superficiale e di controllo del flusso d'acqua.

La tabella 11 riporta una sintesi tra la tipologia di fenomeno, il principale fattore di instabilità e eventuali strategie di mitigazione da adottare. La suddivisione permette di individuare come la combinazione di più interventi possano contribuire alla mitigazione di fenomeni diversi. La scelta dell'intervento deve infatti essere effettuata considerando le caratteristiche specifiche del sito e il meccanismo che determina l'instabilità.

Tabella 11 Relazione tra tipologia di fenomeno franoso e principali strategie di mitigazione secondo l'approccio SafeLand

Tipologia di fenomeno	**Principali fattori di instabilità**	**Ruolo delle precipitazioni**	**Strategie di mitigazione prevalenti**
Scorrimenti superficiali	Saturazione dello strato superficiale, erosione, riduzione della resistenza	Infiltrazione e incremento del contenuto d'acqua possono favorire la perdita di stabilità dello strato superficiale	Regimazione delle acque superficiali, drenaggio, protezione superficiale, stabilizzazione dello strato superficiale
Scorrimenti profondi	Incremento delle pressioni interstiziali, condizioni piezometriche, geometria del versante e resistenza al taglio	Le precipitazioni prolungate possono determinare l'innalzamento della falda e la riattivazione del movimento	Drenaggio profondo, regimazione delle acque, modifica della geometria, opere di sostegno e rinforzo
Colate di terra	Elevato contenuto d'acqua, perdita di resistenza e mobilizzazione della massa	L'acqua può favorire sia l'innesco sia la successiva mobilizzazione del materiale	Controllo delle acque, drenaggio, stabilizzazione della zona di distacco, contenimento e deviazione
Debris flows / colate detritiche	Elevata disponibilità di materiale mobilizzabile, deflusso superficiale e forte mobilità	Eventi meteorici intensi possono generare elevati deflussi e mobilizzare materiale detritico	Regimazione delle acque, opere di intercettazione, contenimento e deviazione, sistemi di monitoraggio e allerta

Crolli e ribaltamenti	Discontinuità dell'ammasso roccioso, condizioni geometriche e perdita di equilibrio dei blocchi	Le precipitazioni possono contribuire al deterioramento e alla riduzione della resistenza lungo le discontinuità	Stabilizzazione locale, chiodature e ancoraggi, protezioni superficiali, barriere e opere di intercettazione
Fenomeni complessi o compositi	Combinazione di differenti meccanismi di instabilità	Le precipitazioni possono agire contemporaneamente su differenti meccanismi	Combinazione di interventi di drenaggio, stabilizzazione, contenimento, monitoraggio e allerta

La Tabella 11 evidenzia come il controllo del flusso dell'acqua assuma un ruolo chiave per diverse tipologie di fenomeno, nonostante sia studiato e applicato con modalità e obiettivi differenti. Nei fenomeni superficiali l'intervento può essere principalmente indirizzato alla limitazione dell'infiltrazione e dell'erosione, mentre negli scorrimenti profondi risulta maggiormente importante la riduzione delle pressioni interstiziali e il controllo delle condizioni piezometriche. Nei fenomeni caratterizzati da elevata mobilità, invece, la gestione dell'acqua deve essere affiancata da misure finalizzate a limitare la propagazione della massa e le conseguenze sugli elementi esposti.

Per il caso di studio analizzato, il controllo delle condizioni idrologiche rappresenta il principale ambito di intervento. In particolare, la riduzione delle pressioni interstiziali costituisce l'obiettivo principale dell'intervento di drenaggio successivamente analizzato mediante modellazione numerica.

Considerata la presenza della componente di colata nella porzione inferiore del versante, eventuali interventi di contenimento o protezione possono essere considerati come misure complementari, finalizzate principalmente alla riduzione delle conseguenze del movimento.

Questa distinzione consente di separare gli interventi direttamente valutati attraverso il modello numerico da quelli che, pur applicabili, non sono stati oggetto delle simulazioni presentate con il presente studio.

In particolare, considerato l'impatto delle precipitazioni nell'evoluzione del fenomeno analizzato, è stato ipotizzato principalmente l'utilizzo di misure finalizzate al controllo delle acque superficiali e sotterranee e alla conseguente riduzione delle pressioni

interstiziali verificando l'effetto sulle condizioni di stabilità del versante grazie al modello agli elementi finiti sviluppato con RS2.

5.2 Analisi dei principali fattori di instabilità della frana

La scelta delle possibili strategie di mitigazione è stata effettuata a partire dalle caratteristiche geologiche, geotecniche e idrologiche del sito, descritte nel Capitolo 3 e successivamente utilizzate per la costruzione del modello numerico descritto nel Capitolo 4.

Le condizioni idrologiche del versante sono state l'elemento chiave nell'individuazione delle cause scatenanti l'instabilità della frana.

Dal punto di vista geotecnico, la presenza di terreni prevalentemente sabbioso-limosi e conglomeratici, caratterizzati da differenti condizioni di addensamento, determina una significativa variabilità delle proprietà meccaniche all'interno del versante. Il secondo strato definito come unità marnosa sottostante costituisce un livello a minore permeabilità, favorendo quindi l'accumulo delle acque all'interno dello strato sovrastante. In occasione di precipitazioni intense o prolungate, così come dimostrato nel capitolo 4 con la modellazione con RS2, questa configurazione può determinare un incremento del contenuto d'acqua e del livello piezometrico, con conseguente aumento delle pressioni interstiziali e riduzione delle tensioni efficaci.

L'analisi del fattore di sicurezza del versante ha dimostrato come le precipitazioni, valutate attraverso la "rainfall function", antecedenti all'evento del gennaio 2009 hanno contribuito alla progressiva modifica delle condizioni idrologiche del versante, favorendo quindi il raggiungimento di condizioni prossime alla saturazione in corrispondenza del periodo nel quale si è osservata l'attivazione del fenomeno e la conseguente riattivazione del movimento nell'anno successivo.

Sulla base di tali risultati, sono stati individuati 3 fattori come principali da tenere in considerazione nella definizione delle strategie di mitigazione:

- la gestione delle acque superficiali e sotterranee;
- la geometria del versante e eventuale stabilizzazione della massa instabile;
- la necessità di controllare l'evoluzione del fenomeno nel tempo.

5.3 Individuazione delle possibili strategie di intervento

L'individuazione dell'intervento di mitigazione è stata effettuata considerando quanto esposto nel paragrafo 5.2 e quindi: la tipologia di movimento osservata, i principali fattori responsabili dell'instabilità e gli obiettivi che possono essere perseguiti mediante le differenti misure previste nell'ambito del progetto SafeLand, sintetizzate nella tabella 11. La Tabella 12 riassume le principali categorie di intervento potenzialmente applicabili alle caratteristiche del fenomeno analizzato.

Tabella 12 *Principali strategie di mitigazione in relazione alle caratteristiche del fenomeno franoso.*

Caratteristica del fenomeno	**Fattore di instabilità**	**Obiettivo della mitigazione**	**Tipologia di intervento**	**Principali misure**
Scorrimento rotazionale profondo	Incremento delle pressioni interstiziali	Riduzione delle pressioni dell'acqua	Strutturale	Drenaggio profondo
Scorrimento rotazionale	Infiltrazione delle acque meteoriche	Riduzione dell'infiltrazione	Strutturale	Regimazione e drenaggio delle acque superficiali
Scorrimento rotazionale	Geometria del versante	Aumento del margine di stabilità	Strutturale	Riprofilatura e rimodellamento del versante
Movimento profondo	Ridotta resistenza al taglio	Incremento delle forze resistenti	Strutturale	Opere di sostegno e sistemi di rinforzo
Arretramento della scarpata	Evoluzione regressiva	Limitazione dell'evoluzione del dissesto	Strutturale	Stabilizzazione della zona di corona
Colata nella porzione inferiore	Elevata mobilità della massa	Limitazione delle conseguenze	Strutturale	Opere di contenimento e intercettazione
Presenza di edifici in prossimità della scarpata	Esposizione degli elementi a rischio	Riduzione delle possibili conseguenze	Non strutturale/strutturale	Monitoraggio, allerta e protezione

Evoluzione temporale del fenomeno	Incertezza sulla riattivazione	Individuazione tempestiva dei movimenti	Non strutturale	Monitoraggio e sistemi di allerta precoce

Dalla tabella 12 emerge come una singola tipologia di intervento possa agire su più fronti e cause di innesco dell'instabilità e allo stesso tempo come nella mitigazione di un fenomeno complesso, come quello analizzato, si potrebbe valutare la possibilità di combinare più tipologie di interventi.

5.4 Interventi applicabili al caso di studio

L'intervento individuato per mitigare il meccanismo che innesca l'instabilità del versante consiste nella realizzazione di drenaggi suborizzontali. Tale misura avrebbe tuttavia carattere puramente dimostrativo: è stata inserita per mostrare come questa tipologia di intervento possa essere implementata nel modello numerico. Nel caso in esame, infatti, i drenaggi non possono essere considerati risolutivi, poiché la profondità della superficie di scorrimento ne limita l'efficacia. Per ottenere un incremento significativo del margine di sicurezza, essi andrebbero associati a una riprofilatura del versante, volta ad addolcire le zone di maggiore pendenza a monte. La scelta del drenaggio suborizzontale deriva principalmente dal ruolo assunto dalle condizioni idrologiche nell'evoluzione del fenomeno. Secondo la scheda di applicabilità della misura "Sub-horizontal drains (conventional drilling)", riportata in Tabella 13, tale intervento risulta indicato per scivolamenti caratterizzati da superfici di scorrimento profonde, nei quali la riduzione delle pressioni interstiziali può contribuire a migliorare le condizioni di stabilità.

Tabella 13 Criteri di applicabilità dei drenaggi suborizzontali.

MITIGATION THROUGH REDUCTION OF HAZARD			
4 MODIFYING THE GROUNDWATER REGIME - DEEP DRAINAGE			
4.3 SUB-HORIZONTAL DRAINS (CONVENTIONAL DRILLING)			
APPLICABILITY			
Class	**Descriptor**	**Rating**	**Notes**
Type of movement (Cruden & Varnes, 1996)	Falls	2	Horizontal drains are used to stabilize deep slides essentially characterized by circular slip surface and with a high slope angle of the ground surface.
	Topples	2	
	Slides	6	
	Spreads	2	
	Flows	4	
Material	Earth	4	They are adopted in fine-grained soils and in fissured rocks as well.
	Debris	8	
	Rock	4	
Depth of movement	Superficial (< 0.5 m)	0	The horizontal drain system is suitable for deep slip surfaces.
	Shallow (0.5 to 3 m)	2	
	Medium (3 to 8 m)	6	
	Deep (8 to 15 m)	6	
	Very deep (> 15 m)	4	
Rate of movement (Varnes, 1978)	Moderately to fast	2	The steady-state condition is attained some time after drainage construction (i.e. at the long term) in fact after drain installation, a transient phenomenon of equalization of pore pressures occurs. Drains are completely effective after such a delay and they represent the suitable mitigation measure for very slow landslides.
	Slow	6	
	Very slow	8	
	Extremely slow	8	
Groundwater	Artesian	4	This system is suitable for deep freatic water table.
	High	6	
	Low	8	
	Absent	0	
Surface water	Rain	4	Horizontal drains are not suitable to drain shallow water.
	Snowmelt	4	
	Localized	0	
	Stream	0	
	Torrent	0	
	River	0	
Maturity		7	Technique and design process are well established and widely used in suitable conditions.
Reliability		6	Necessary to flush the pipes with high pressure water jets for good operation. The most frequent problems are: fouling, deterioration of the final collector, changing of the water path.
Implementation		6	Difficult to have good installation of the pipe, especially if very long; it is good practice to drill the hole slightly inclined to allow gravity drainage.
Typical Cost		7	Lless costly than other types of stabilization works and suitable for a large number of cases, especially when the landslide is very deep and structural measures are not effective..

Nella figura 44 si riportano delle immagini in cui vengono mostrate le fasi di costruzione dei dreni suborizzontali.



Figura 44 Fasi di costruzione dei dreni suborizzontali.

5.5 Modellazione numerica degli interventi di mitigazione e discussione dei risultati

L'efficacia dell'inserimento dei dreni sub-orizzontali è stata valutata mediante il modello numerico sviluppato in RS2 e descritto nel Capitolo 4 confrontando differenti configurazioni in termini di numero e di lunghezza dei dreni.

L'intervento di drenaggio è stato simulato grazie all'inserimento di strumenti opportunamente calibrati con il programma RS2 nello stage in cui viene simulata la pioggia che è stata identificata come possibile fattore di innesco. Il modello numerico ha consentito di analizzare diverse configurazioni di drenaggio, tramite l'inserimento di dreni suborizzontali in diverse posizioni lungo il versante e di valutare l'influenza del numero, della lunghezza e della posizione dei dreni sulle condizioni di stabilità del versante.

Le configurazioni sono caratterizzate dalla presenza di 2,4,6 e 8 dreni con lunghezze di infissione pari a 5 m e 10 m e un'inclinazione fissa posta al 10% corrispondente ad un angolo pari a 5° rispetto all'orizzontale nel punto prescelto lungo il versante. A titolo esemplificativo si riporta la figura 45 in cui sono presenti 8 dreni di lunghezza pari a 10 m.

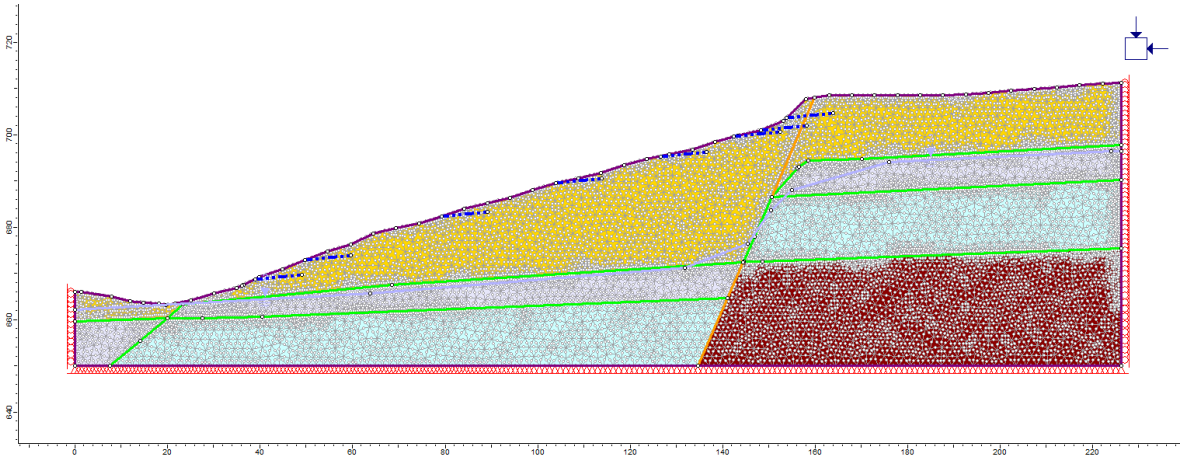


Figura 45 Riproduzione del modello con la presenza di 8 dreni sub-orizzontali.

La Tabella 14 sintetizza quindi i principali risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche.

Tabella 14 Confronto tra le simulazioni con azioni di mitigazione

numero dreni	valore SRF	
	lunghezza infissione 5m	lunghezza infissione 10m
Configurazione 2 dreni	0.98	0.98
Configurazione 4 dreni	1.06	1.17
Configurazione 6 dreni	1.07	1.19
Configurazione 8 dreni	1.07	1.2

Il confronto dei risultati ottenuti in termini di SRF permette di valutare l'effetto della configurazione del sistema di drenaggio sulla stabilità del versante. In particolare, il confronto tra i valori di SRF consente di verificare, con scopo puramente dimostrativo, se l'aumento del numero dei dreni, della loro posizione e della loro profondità di infissione determini una variazione delle condizioni di stabilità.

Nel complesso, le simulazioni evidenziano quindi come il drenaggio suborizzontale possa rappresentare una misura efficace per modificare le condizioni idrologiche del versante in esame incrementando il margine di stabilità.

Conclusioni

Il presente elaborato di tesi ha avuto come scopo principale quello di analizzare l'influenza degli eventi pluviometrici sulla stabilità del versante interessato dalla frana di località Surda, nel comune di Belsito (CS), con particolare attenzione al comportamento dei terreni in condizioni parzialmente sature. Le frane pluvio-indotte rappresentano una delle principali cause di dissesto idrogeologico in Calabria, dove l'assetto tettonico, la variabilità litologica e la diffusa presenza di terreni a bassa permeabilità rendono i versanti particolarmente suscettibili all'instabilità.

La frana analizzata è caratterizzata da uno scorrimento rotazionale in terra, mediamente profondo (circa 30 m) e a cinematica lenta, che interessa un'area di circa 4,5 ettari. Il fenomeno si è attivato nel gennaio 2009 e si è riattivato nel febbraio 2010, a seguito di intensi eventi pluviometrici che hanno colpito la regione.

Dopo un inquadramento normativo e classificativo dei fenomeni franosi e un inquadramento geologico, geomorfologico e pianificatorio (PAI) dell'area, è stata condotta un'analisi storica delle precipitazioni sui dati della stazione di Rogliano (cod. 3000, serie dal 1923). Le cumulate a breve e lungo periodo sono state confrontate con la serie storica, per valutare l'eccezionalità dei due eventi di pioggia che hanno determinato l'innesco e la riattivazione della frana.

La ricostruzione del modello geologico e geotecnico è stata effettuata sulla base delle indagini disponibili, costituite da sondaggi, prove DPSH, MASW, tomografie elettriche e prove di laboratorio.

I parametri geotecnici utilizzati nel modello numerico sono stati definiti sulla base dei risultati delle indagini e delle prove di laboratorio disponibili, integrati, laddove necessario, da valori stimati e calibrati per la modellazione numerica.

L'analisi numerica è stata eseguita mediante il software RS2, utilizzando il metodo degli elementi finiti e la tecnica della riduzione della resistenza al taglio. Per la simulazione del comportamento dei terreni non saturi sono state utilizzate le curve di ritenzione idrica secondo il modello di Van Genuchten. Le precipitazioni registrate presso la stazione di Rogliano sono state inserite nel modello attraverso una specifica “Rainfall Function”, così da poter analizzare la variazione nel tempo delle condizioni idrologiche del versante.

Le simulazioni relative al primo evento hanno evidenziato una progressiva riduzione del valore di SRF in corrispondenza degli eventi di precipitazione più intensi. E’ stato inoltre

osservato un aumento delle pressioni interstiziali all'interno del versante. Nei periodi caratterizzati da assenza di precipitazioni, le pressioni interstiziali hanno mostrato una progressiva diminuzione. I risultati ottenuti evidenziano quindi come la risposta del versante sia fortemente condizionata dalla successione degli eventi meteorici e dalle condizioni idrologiche antecedenti.

Le precipitazioni che hanno preceduto l'evento del gennaio 2009 hanno determinato una progressiva evoluzione delle condizioni di saturazione del terreno, favorendo l'incremento delle pressioni interstiziali e contribuendo alla conseguente riduzione della stabilità del versante.

Per l'analisi della fase di riattivazione del 2010, in assenza di un rilievo topografico aggiornato successivo alla prima rottura, il modello è stato sviluppato mantenendo la geometria originaria del versante. Tuttavia, sono state introdotte opportune modifiche sia alle condizioni di carico idrologico, utilizzando il regime pluviometrico ricostruito a partire dai dati registrati dalla stazione di Rogliano, sia ai parametri di resistenza al taglio del terreno, ridefiniti per tenere conto delle variazioni geotecniche indotte dalla precedente fase di attivazione del fenomeno franoso.

Sulla base dei risultati ottenuti, sono state successivamente analizzate alcune possibili strategie di mitigazione della frana. La selezione degli interventi più idonei è stata condotta sulla base di valutazioni ingegneristiche supportate dalle indicazioni fornite nell'ambito del progetto SafeLand. Considerato il ruolo delle precipitazioni e delle pressioni interstiziali nel controllo delle condizioni di stabilità del versante, l'intervento di mitigazione analizzato mediante il software RS2 ha previsto l'installazione di dreni suborizzontali. Tale misura ha carattere prevalentemente dimostrativo, essendo finalizzata a mostrare come questo tipo di intervento possa essere implementato nel modello numerico; data la profondità della superficie di scorrimento, essa non può infatti essere considerata risolutiva se non associata a una riprofilatura del versante. Sono state esaminate diverse configurazioni progettuali, variando sia il numero sia la lunghezza dei dreni. I risultati delle simulazioni hanno evidenziato un incremento progressivo del valore di SRF all'aumentare dell'efficacia del sistema di drenaggio. In particolare, la configurazione costituita da 2 dreni di lunghezza pari a 5 m non ha infatti consentito il raggiungimento di una condizione di stabilità pur determinando un miglioramento rispetto alla configurazione priva di drenaggi. In tale configurazione, infatti, il valore di

SFR è risultato pari a 0.98. Incrementando il numero di dreni a otto e mantenendo invariata la lunghezza di 5 m, il valore di SRF ha raggiunto 1,07, indicando un sensibile miglioramento delle condizioni di stabilità, sebbene ancora prossimo alla soglia critica.
Un ulteriore incremento delle prestazioni del sistema è stato osservato aumentando la lunghezza dei dreni a 10m. In questo caso, per tutte le configurazioni analizzate, caratterizzate da un numero di dreni variabile da 2 a 8, è emerso un miglioramento in termini di valore di SRF e di conseguenza una condizione di stabilità del versante. La configurazione più efficace, costituita da 8 dreni lunghi 10 m ha consentito di raggiungere un valore di SRF pari a 1,20.
Il confronto tra le diverse configurazioni analizzate evidenzia quindi come sia il numero sia la lunghezza dei dreni influenzino le condizioni di stabilità del versante.
In conclusione, i risultati ottenuti mostrano il ruolo fondamentale delle precipitazioni e delle condizioni idrologiche nell'evoluzione della frana di località Surda. La modellazione numerica ha permesso di analizzare la variazione delle pressioni interstiziali e delle condizioni di stabilità in relazione agli eventi pluviometrici considerati, individuandoli come principali fattori scatenanti del fenomeno.
Le simulazioni degli interventi di drenaggio hanno evidenziato invece come la riduzione delle pressioni interstiziali possa determinare un miglioramento delle condizioni di stabilità del versante.

Bibliografia e sitografia

- Prof. Ing. Gioffrè Domenico Appunti del corso "LANDSLIDE MODELING AND MITIGATION STRATEGIES".
- Dott. Luigi Borrelli, Relazione Geologica, 2010.
- Amodio-Morelli, L., Bonardi, G., Colonna, V., Dietrich, D., Giunta, G., Ippolito, F., Liguori, V., Lorenzoni, S., Paglionico, A., Perrone, V., Piccarreta, G., Russo, M., Scandone, P., Zanettin-Lorenzoni, E., & Zuppetta, A. (1976). L'arco calabro-peloritano nell'orogene appenninico-maghrebide. Memorie della Società Geologica Italiana, 17, 1–60.
- Lanzafame, G., & Tortorici, L. (1981). La tettonica recente della Valle del Fiume Crati (Calabria): Recent tectonics in River Crati Valley (Calabria, Italy). Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 4(1), 11–21.
- van Dijk, J. P., Bello, M., Brancaleoni, G. P., Cantarella, G., Costa, V., Frixa, A., Golfetto, F., Merlini, S., Riva, M., Torricelli, S., Toscano, C., & Zerilli, A. (2000). A regional structural model for the northern sector of the Calabrian Arc (southern Italy). Tectonophysics, 324(4), 267–320.
- Thomson, S. N. (1994). Fission track analysis of the crystalline basement rocks of the Calabrian Arc, southern Italy: Evidence of Oligo-Miocene late-orogenic extension and erosion. Tectonophysics, 238(1–4), 331–352.
- Tansi, C., Muto, F., Critelli, S., & Iovine, G. (2007). Neogene-Quaternary strike-slip tectonics in the central Calabrian Arc (Southern Italy). Journal of Geodynamics, 43(3), 393–414. https://doi.org/10.1016/j.jog.2006.10.006
- https://www.irpi.cnr.it/focus/impatto-dei-cambiamenti-climatici-sulle-frane/.
- www.cfcalabria.it
- Rocscience Inc., "Unsaturated soil Mechanics" (2022).
- https://www.rocscience.com/.
- ISPRA, Inventario dei fenomeni franosi d'Italia 2025.
- Varnes, D. J. (1978). *Slope Movement Types and Processes*. In: Schuster, R.L., Krizek, R.J. (eds) Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington, D.C.

- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslide types and processes*. In: Turner, A. K., & Schuster, R. L. (Eds.), Landslides: Investigation and Mitigation**,** Transportation Research Board Special Report 247.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). *The Varnes classification of landslide types, an update*. Landslides, 11, 167–194.
- Cruden, D.M., & Varnes, D.J. (1996). *Landslide Types and Processes*. In: Turner, A.K. & Schuster, R.L. (Eds.), Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, Washington D.C.
- Fell, R. (1994). *Landslide Risk Assessment and Acceptable Risk*. Canadian Geotechnical Journal, 31(2).
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). *The Varnes Classification of Landslide Types, an Update*. Landslides, 11.
- Hutchinson, J.N. (1988). *General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology*. Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Vol. 1, pp. 3–35.
- Varnes, D.J. (1978). *Slope Movement Types and Processes*. In: Schuster, R.L. & Krizek, R.J. (Eds.), Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board, Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington D.C.,
- Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Calabria (ARPACAL). Centro Funzionale Multirischi della Calabria. Dati pluviometrici delle stazioni di Rogliano (CS) e Parenti (CS). Disponibile su https://www.cfcalabria.it
- Autorità di Bacino Regionale della Calabria. Piano per l'Assetto Idrogeologico (PAI). Carta Inventario dei Centri Abitati Instabili del Comune di Belsito (CS).
- Borrelli, L., & Pagnotta, A. Carta geomorfologica e inventario delle frane del Piano Strutturale Associato dei Comuni di Altilia, Belsito, Malito, Marzi, Paterno Calabro e Santo Stefano di Rogliano. Relazione geomorfologica.
- Calcaterra D., Parise M. (2010). "Weathering in the crystalline rocks of Calabria, Italy, and relationships to landslides." Geological Society Engineering Geology Special Publication.

- SafeLand (2012). Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies. Final Report Summary, European Commission, FP7, Grant Agreement No. 226479.
- SafeLand (2011). Toolbox of landslide mitigation measures. Deliverable D5.2, Rev. No. 1, SafeLand– Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies.
- SafeLand (2012) .Compendium of tested and innovative structural, non-structural and risk-transfer mitigation measures for different landslide types. Deliverable D5.1, Rev. 2, SafeLand – Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies.

Ringraziamenti

Un traguardo raggiunto consente sempre di tirare le somme del percorso che ci si lascia alle spalle. Questo in particolare, mi ha permesso di riscoprirmi come donna, professionista e madre. Ci sono stati tanti momenti in cui ho rischiato di vacillare ma con gli anni ho imparato che il tempo sa darci molte delle risposte di cui abbiamo bisogno e che, talvolta, le cose arrivano al momento giusto, quando tutto sembra finalmente trovare il proprio posto.

Questo capitolo conclusivo lo dedico a poche persone, ma davvero speciali. Proprio come un albero ha bisogno di radici forti e di cure costanti per affrontare le intemperie, anche noi abbiamo bisogno di imparare a lasciare andare ciò che ci appesantisce, per poter oscillare sotto la forza del vento senza spezzarci.

Come la ginestra, capace di crescere anche nei luoghi meno favorevoli e di piegarsi al vento senza arrendersi, anch'io ho imparato a resistere alle avversità, guardando in faccia la realtà e affrontandola con umiltà e fermezza, anche nei momenti in cui mollare sarebbe stato più semplice.

Al mio Angelo custode Celeste, che mi ha insegnato che la vita è imprevedibile, che si può esistere anche per un istante ed essere amati per una vita intera.

A mio figlio, che in così poco tempo mi ha insegnato a riorganizzare i programmi senza indugio né preoccupazione, mostrandomi che la vita è ancora tutta da scoprire e assaporare, a qualsiasi età. Mi ha insegnato che il tempo è una concezione astratta, che si può essere indipendenti e, allo stesso tempo, totalmente dipendenti da qualcuno, e che forse il bello sta proprio in questo. Mi hai insegnato che si può pensare di essere preparati a tutto, di saper affrontare ogni cosa nel migliore dei modi, eppure ritrovarsi, a volte, completamente impreparati. Ci sono lezioni che si possono apprendere soltanto vivendo, accettando gli errori non come sconfitte, ma come punti di partenza per imparare a conoscersi e a scoprirsi.

A te, marito mio, devo dire grazie per essermi stato accanto, anche se a volte non sono riuscita a esprimere pienamente le mie ansie e le mie paure, tu hai saputo tenermi per mano con fermezza, accompagnandomi in questo nostro percorso senza mai permettere che il senso di solitudine prendesse spazio nella mia mente. Abbiamo affrontato insieme ogni momento e ho imparato ad affidarmi a te, persino a lasciarmi cadere all'indietro, certa che ci saresti stato tu a sorreggermi. Ci sei tu ad accarezzarmi in silenzio, perché so

che le parole non sono mai state il tuo punto di forza, eppure tante volte sei riuscito a dirmi tutto senza parlare, credendo in me anche quando io stessa non mi sentivo all'altezza.

A mia madre, che mi ha insegnato che le distanze sono spesso soltanto ostacoli che esistono nella nostra mente e che, a volte, il solo sapere di esserci l'una per l'altra è sufficiente a darci sicurezza. Mi hai insegnato che quando tutto il mondo guarda la donna che sono diventata e i traguardi che con il tempo ho raggiunto, tu continui a vedere prima di tutto tua figlia, riconoscendone i bisogni ancora prima che sia io stessa a saperli riconoscere.

A mio padre che mi ha insegnato che non bisogna accettare che qualcuno decida per noi senza lottare, che non bisogna piegarsi MAI alle scelte altrui e che, a volte, ci vuole tempo perché ciò che siamo possa emergere, ma credere in qualcosa ci permette di vederla realizzata, prima o poi.

A mia sorella, grazie per avermi fatto capire che si può affrontare con il sorriso qualsiasi difficoltà e che a volte i limiti sono solo nella nostra testa e bisogna imparare a conoscerli per domarli.

A mio fratello, grazie per essere una presenza silenziosa ma costante, perché a volte il solo sapere che ci sei mi trasmette tranquillità.

Ad Erika e Alessandro, grazie per avermi fatto capire che la famiglia non è necessariamente definita da un legame di sangue, ma da qualcosa che va oltre: la presenza, l'affetto e la scelta di esserci, gli uni per gli altri ognuno a modo proprio.

Alla mia amica Antonietta Maria, grazie perché negli anni non hai mai smesso di credere in me e nelle mie capacità più di quanto a volte abbia fatto io stessa.

Al mio professore nonché correlatore, con Lei si chiude il cerchio del mio percorso. Grazie per avermi spinta a non accontentarmi mai e a cercare sempre di dare il massimo.

Alla mia correlatrice Mariantonietta, grazie per avermi accompagnata in questo lungo percorso di crescita personale e professionale.

In fine, a me stessa, per non aver mai smesso di puntare in alto, di credere nelle mie possibilità e di ricordare che ogni traguardo non rappresenta una fine, ma una nuova rinascita.