

FACOLTA' DI INGEGNERIA

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL
TERRITORIO**

DICAM

(Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali)

TESI DI LAUREA

in

Geologia tecnica LS

**STUDIO DELLA FRANA DI POGGIO ANCISA
(CASTELDELCI, RN): DAL MONITORAGGIO AD UNA
PROPOSTA DI CONSOLIDAMENTO**

CANDIDATO
Eleonora Giulietti

RELATORE
Chiar.mo Prof. Lisa
Borgatti

CORRELATORE
Geol. Claudio
Corrado Lucente

Anno Accademico 2009/2010

Sessione III

Indice

Introduzione	6
Capitolo 1	8
Inquadramento geografico, geologico, geomorfologico	8
1.1 Inquadramento geografico della Val Marecchia	8
1.2 Cenni storici sulla Val Marecchia	9
1.3 Inquadramento geologico e geomorfologico della Val Marecchia	11
1.4 Inquadramento geografico e cenni storici su Casteldelci.....	14
1.5 Inquadramento geologico e geomorfologico della zona oggetto di studio	16
Capitolo 2	19
Descrizione dei fenomeni di dissesto	19
2.1 Il dissesto idrogeologico	19
2.2 Classificazione delle frane	20
2.2.1 Tipologia di movimento	20
2.2.2 Stato, stile e distribuzione di attività	23
2.3 Cause del movimento	26
2.4 Valutazione del rischio frane	27
2.4.1 Definizione del rischio	27
2.4.2 Valutazione della pericolosità	29
2.4.3 Valutazione del danno potenziale.....	31
2.4.4 Valutazione del rischio	31
2.4.5 Prevenzione del rischio	32
2.5 Franosità nelle Marche / Emilia - Romagna	34
2.5.1 Dissesto idrogeologico nella Val Marecchia.....	36
2.5.2 Frane nel Comune di Casteldelci.....	38
Capitolo 3	41
La frana di Poggio Ancisa	41
3.1 Descrizione del fenomeno franoso	41
3.2 Gestione del dissesto idrogeologico a livello regionale	44

3.3 Cronologia e gestione della frana.....	45
3.4 Interventi di emergenza eseguiti	49
3.5 Indagini geognostiche eseguite e monitoraggio	50
Capitolo 4.....	52
Metodi utilizzati per il monitoraggio	52
4.1. Generalità sul monitoraggio.....	52
4.2. Rilievo geologico e geomorfologico	55
4.3. Indagini geognostiche	57
4.3.1. Analisi e classificazione dei campioni con prove di laboratorio.....	60
4.3.2. Resistenza al taglio	63
4.3.3. Prove di taglio diretto	65
4.4. Monitoraggio geotecnico tradizionale.....	66
4.4.1. Strumenti di monitoraggio: inclinometro	66
4.4.2. Strumenti di monitoraggio: piezometro	68
4.5. Prospezione sismica tomografica.....	69
4.6. GPS (<i>Global Positioning System</i>).....	72
4.6.1. Introduzione sul sistema GPS.....	72
4.6.2. Principi di funzionamento del GPS	73
4.6.3. Tecniche di rilievo.....	75
4.6.4. RTK e reti NRTK	76
4.6.5. VRS (<i>Virtual Reference Station</i>).....	78
4.7. GBInSAR	81
4.7.1. Utilizzi del GBInSAR	82
4.7.2. Descrizione dello strumento e sua installazione.....	83
4.7.3. Funzionamento del GBInSAR.....	87
4.8. Verifiche di stabilità all'equilibrio limite.....	94
4.8.1. Metodo ordinario dei conci o di Fellenius.....	100
4.8.2. Metodo di Bishop semplificato	101
4.8.3. Metodo di Janbu semplificato	102
4.8.4. Metodo di Morgenstern - Price	103
Capitolo 5.....	104
Studio della frana di Poggio Ancisa	104
5.1. Evoluzione storica della frana di Poggio Ancisa	104
5.2. Dati pluviometrici di Casteldelci	109

5.3. Monitoraggio geotecnico tradizionale (misure inclinometriche e piezometriche).....	110
5.3.1. Letture Inclinometriche	111
5.3.2. Letture Piezometriche.....	112
5.4. Prospezione sismica tomografica ad onde di compressione (p).....	113
5.5. Risultati delle prove di laboratorio.....	116
5.6. Risultati GPS	117
5.7. Risultati GBInSAR.....	118
Capitolo 6.....	120
Verifiche di stabilità all’equilibrio limite sulla frana di Poggio Ancisa.....	120
6.1. Programma Slide di Rocscience.....	120
6.2. Introduzione alle verifiche di stabilità all’equilibrio limite	121
6.3. Verifiche di stabilità eseguite sulla frana di Poggio Ancisa	123
6.3.1. Verifica A (analisi deterministica – parametri di picco e tavola d’acqua al piano campagna)	124
6.3.2. Verifica B (analisi deterministica – parametri residui e tavola d’acqua al piano campagna).....	125
6.3.3. Verifica C (analisi probabilistica e di sensitività)	127
6.3.4. Verifica D (analisi deterministica – parametri residui e tavola d’acqua abbassata di 15 m rispetto al piano campagna)	132
6.3.5. Verifica E (analisi deterministica – parametri medi e tavola d’acqua abbassata di 15 m rispetto al piano campagna tra una quota di 710 e 700 m s.l.m.).....	134
Capitolo 7.....	135
Proposte di misure di mitigazione del fenomeno franoso	135
7.1. Interventi di consolidamento dei versanti	135
7.2. Interventi di drenaggio	136
7.2.1. Drenaggi superficiali	137
7.2.2. Drenaggi profondi	138
7.3. Primi interventi di risagomatura (previsti dal Servizio Tecnico Bacini Conca Marecchia)	142
7.4. Proposta di un intervento di mitigazione alternativo	144
7.5. Considerazioni sulla proposta di consolidamento del Servizio Tecnico Bacini Conca Marecchia e sulla mia proposta	148
Conclusioni	150
Bibliografia e sitologia	152

Introduzione

Scopo della tesi è fornire una descrizione dettagliata della frana, riattivatasi nel dicembre 2009, a Poggio Ancisa (Casteldelci, RN), e delle fasi di studio e monitoraggio alle quali ho partecipato attivamente, fino a giungere ad una proposta per il consolidamento della zona interessata.

Per prima cosa è stato, quindi, necessario provvedere ad una raccolta dati sia presso l'Ufficio Tecnico del Comune di Casteldelci, che presso il Servizio Tecnico Bacini Conca Marecchia (Regione Emilia-Romagna) di Rimini, che rappresentano gli enti maggiormente coinvolti nella gestione del fenomeno franoso in questione. Inoltre è stato utile, successivamente, raccogliere materiale presso il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e l'Ufficio Tecnico della Provincia di Pesaro e Urbino, e ottenere informazioni tramite i siti del Servizio Geologico Nazionale (ora confluito nel Dipartimento per la Difesa del Suolo, ISPRA) e dell'Autorità di Bacino Interregionale Marecchia-Conca.

A seguito di questa fase preparatoria, ho potuto partecipare a sopralluoghi per il monitoraggio della frana nella fase di intervento detta di post-evento, attraverso i quali è possibile eseguire una caratterizzazione e modellazione della frana, con lo scopo di attuare, in un secondo momento, la progettazione e la realizzazione degli interventi di consolidamento più adatti alla circostanza.

Ho potuto assistere al rilievo con utilizzo di GPS, con tecnica VRS (*Virtual Reference Station*) e al rilievo con GBInSAR (cioè radar ad apertura sintetica da terra).

I risultati ottenuti tramite queste attività di monitoraggio sono stati poi correlati con tutti quelli ricavati, in precedenza, attraverso indagini geognostiche e monitoraggio geotecnico tradizionale.

In particolare, per la frana oggetto di studio, sono stati realizzati, nel mese di settembre 2010, sondaggi a carotaggio continuo per il prelievo di campioni di terreno che poi sono stati sottoposti a prove di laboratorio, nelle quali si sono

determinate le caratteristiche fisiche, granulometriche, geomeccaniche e i limiti di consistenza dei campioni; inoltre, dalla miscela di tutto il terreno prelevato, si è effettuata la prova di costipamento Proctor.

Gli stessi fori di carotaggio sono stati dotati di tubi inclinometrici e piezometrici realizzati sul corpo della frana (le letture sono state eseguite nei mesi di settembre-ottobre-novembre 2010).

Al fine di caratterizzare e verificare lo spessore dei materiali della coltre in dissesto e la consistenza e grado di alterazione e fratturazione del sottostante substrato roccioso, a settembre si è predisposta un'indagine geofisica mediante prospezione sismica a rifrazione.

La correlazione di dati provenienti da tutte le varie fasi del monitoraggio, ha consentito la realizzazione di un modello geologico del versante e, in un secondo momento, l'esecuzione, tramite il software Slide di Rocscience, di verifiche di stabilità all'equilibrio limite.

Il metodo dell'equilibrio limite è di gran lunga il metodo di analisi di stabilità più utilizzato in campo geologico-tecnico e permette di calcolare il coefficiente di sicurezza minimo del pendio, cioè il rapporto fra la resistenza al taglio disponibile e la tensione di taglio mobilitata.

Capitolo 1

Inquadramento geografico, geologico, geomorfologico

1.1. Inquadramento geografico della Val Marecchia

La Val Marecchia è la valle dell'Italia centro-settentrionale tracciata dall'omonimo fiume. È percorsa dalla Via Marecchiese e appartiene, per la maggior parte del suo territorio, all'Emilia-Romagna; ha origine però in Toscana (nella provincia di Arezzo) e lambisce l'estremo nord delle Marche (nei comuni spartiacque di Montecopiolo, Sassofeltrio e Monte Grimano Terme).

Il 15 agosto 2009 l'Alta Val Marecchia è stata distaccata dalle Marche e aggregata all'Emilia-Romagna. Le Marche hanno successivamente proposto ricorso alla Corte costituzionale, ritenendo che il Parlamento avesse indebitamente ignorato il parere negativo della regione; nel luglio 2010 la Corte si è pronunciata sul ricorso giudicandolo infondato.

Il fiume Marecchia nasce dall'Alpe della Luna in Toscana (1454 m s.l.m.) e giunge al mare dopo circa 61 Km di percorso, in prossimità della città di Rimini. Segna il confine fra le Province di Rimini, Arezzo e Pesaro-Urbino e una piccola parte del bacino imbrifero ricade nel territorio della Repubblica di San Marino. L'area totale del bacino, limitato al corso del fiume principale, è di circa 475 Km², mentre quella di tutti i comuni appartenenti alla Val Marecchia, è di circa 1800 km².

Lungo il percorso del fiume Marecchia si incontrano varie località, le maggiori delle quali sono Badia Tedalda, Pennabilli, Talamello, Novafeltria, San Leo, Torriana, Verucchio, Santarcangelo di Romagna e Rimini (Fig. 1.1), cui si aggiungono paesi e frazioni dai nomi legati alle tipicità dei luoghi che sorgevano lungo il fiume: Ponte Presale, Ponte Messa, Molino di Bascio, Ponte Santa Maria Maddalena, Ponte Verucchio, San Martino Dei Mulini.



Fig. 1.1 - Inquadramento geografico dell'area di studio

1.2. Cenni storici sulla Val Marecchia

La Val Marecchia è ricca di luoghi d'interesse storico ed archeologico.

La conformazione geologica della Val Marecchia, collegata alla sua storia medievale, fa sì che i principali nuclei abitati si siano sviluppati sugli stimoli

rocciosi che sono sospesi sul fondo delle valli (fa eccezione la moderna Novafeltria che si trova nella valle).

Da sempre terra contesa e di confine, vanta un patrimonio monumentale e d'arte tra i più singolari d'Italia, ricca come poche altre di mirabili fortezze, di borghi con mura e torri, di splendide chiese, di piccole e grandi storie, legate alle lotte che videro antagoniste le grandi famiglie Montefeltro e Malatesta.

L'Alta Val Marecchia è il cuore antico del Montefeltro: meta e soggiorno, fin dall'antichità, di uomini illustri e famosi, da Dante a San Francesco, da Cagliostro ad Ezra Pound.

Nel medioevo fu un terreno ideale per l'insediamento di rocche e castelli. Proprio al centro della Val Marecchia si staglia la rupe di San Leo, la cui splendida fortezza, opera di Francesco di Giorgio Martini, domina la valle dalla sommità della rupe inaccessibile. Ai suoi piedi si raccoglie il piccolo abitato di origini antichissime, che ha il titolo di città, tutta circondata da pareti a picco. Vi è una sola porta d'ingresso; per essa passò Dante che ricorda San Leo nel suo divino poema.

La città dà il nome alla provincia del Montefeltro essendo essa l'antica Mons Feretrius romana.

A ovest di San Leo si erge la tragica rupe del castello di Maiolo che sprofondò completamente in una notte dell'anno 1700, dopo 40 ore di pioggia diluviante.

Nel fondovalle del Marecchia si trova la moderna cittadina di Novafeltria, nei cui pressi sorge il castello di Talamello, che è un altro di quegli antichi insediamenti della Val Marecchia che ha una storia civile, religiosa e culturale del massimo interesse.

Capoluogo di tutto questo comprensorio montuoso è Sant'Agata Feltria. Simbolo del trascorrere dei secoli è la fiabesca rocca, innestata e quasi sospesa a strapiombo su un ciclopico masso roccioso. Fu ristrutturata dal famoso architetto senese Francesco di Giorgio Martini, quale imprendibile caposaldo, il più settentrionale baluardo del sistema difensivo di Federico di Montefeltro.

A qualche chilometro di distanza si trova il borgo fortificato di Petrella Guidi e di fronte a questo, sull'altra sponda del fiume, sorge Pennabilli, il centro urbano che dà continuità ai due castelli di Penna e Billi unificati nel XIV secolo e appartenuti ai Malatesta che qui trassero le loro origini.

Casteldelci si trova nella collaterale vallata del torrente Senatello, che scende dal massiccio del Monte Fumaiolo.

1.3. Inquadramento geologico e geomorfologico della Val Marecchia

In tutta la Val Marecchia si riconoscono due principali domini strutturali, riferiti a successioni appartenenti a domini paleogeografici distinti:

- a) la “Successione umbro-marchigiano-romagnola” in posizione sostanzialmente autoctona, cioè formata da terreni che si trovano in posizioni immutate o solo leggermente spostate rispetto a quelle originarie di sedimentazione, deposti in un intervallo di tempo che va dal Tortoniano (età compresa tra 11.6 e 7.2 milioni di anni fa) al Messiniano (età che va da 7.2 a 5.3 milioni di anni fa);
- b) la “Coltre della Val Marecchia” in posizione alloctona, cioè composta da terreni la cui formazione è avvenuta in zone assai diverse dalla loro collocazione attuale; essa è costituita da una successione cretacico-terziaria (da 145.5 a 33.9 milioni di anni fa) intensamente deformata (“Liguridi”, così denominata poiché la sua formazione è avvenuta nell'area dell'antico bacino ligure – piemontese) e da una sovrastante successione oligo-miocenica (da 33.9 a 5.3 milioni di anni fa) meno deformata (“Successione epiligure”).

Sulla base dei rapporti con la Coltre della Val Marecchia, l'insieme autoctono può essere ulteriormente suddiviso in:

- una successione “paleoautoctona” rappresentata dalle unità litostratigrafiche deposte precedentemente alla messa in posto della Coltre della Val Marecchia;
- una successione “parautoctona” che ha subito traslazioni maggiori rispetto alla successione paleo autoctona;
- una successione “neoautoctona” deposta al di sopra dei termini alloctoni, successivamente alla loro messa in posto. La parte più esterna della successione neoautoctona è blandamente deformata, mentre nelle porzioni più interne, deposte negli stadi finali della messa in posto dell'alloctono, si presenta più deformata.

Le unità della Coltre della Val Marecchia possono essere suddivise in unità che hanno subito importanti traslazioni (“alloctono”, cioè le Liguridi) e quelle deposte

sulle unità alloctone mentre queste si deformavano (“semialloctono”, cioè la Successione epiligure).

La Coltre della Val Marecchia attualmente costituisce un lembo isolato di formazioni derivate dal Dominio ligure. Le successioni liguri, di età compresa tra il Cretacico e l’Eocene, sono tipicamente costituite da sedimenti bacinali profondi con elementi di rocce di crosta e mantello oceanico provenienti dai settori più interni dell’orogene.

Sono tuttora oggetto di dibattito le modalità di messa in posto della Coltre della Val Marecchia ed i suoi rapporti sia con le unità liguri dell’Appennino settentrionale, sia con i depositi della successione umbro-marchigiano-romagnola. Non esiste un’interpretazione unanimemente accettata sui meccanismi di messa in posto della coltre; le ipotesi variano fra meccanismi di scivolamento gravitativo, meccanismi puramente tettonici, meccanismi misti (tipici delle frane orogeniche). Dibattuta è anche l’interpretazione dei limiti della Coltre. Alcuni autori li considerano primari, cioè quella attualmente osservabile sarebbe approssimativamente l’originaria estensione delle unità alloctone nell’area. Diversamente altri autori considerano l’attuale affioramento della coltre ciò che rimane dopo che il processo erosivo ha smantellato la quasi totalità dei terreni alloctoni, che originariamente coprivano un’area molto più vasta, in continuità con le falde liguri dell’Appennino emiliano (Fig. 1.2).

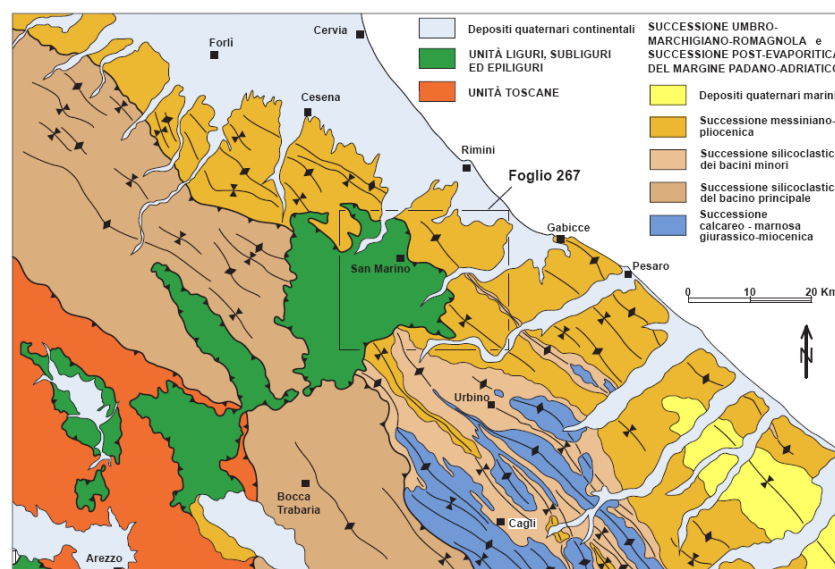


Fig. 1.2 – Schema tettonico dell’area Romagnolo-Marchigiana

Nel territorio di interesse affiorano principalmente terreni appartenenti ai domini Ligure, Epiligure ed al dominio Umbro-Marchigiano-Romagnolo. La Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola (Marnoso-arenacea della Val Marecchia) affiora con caratteristiche diverse sui due lati del Marecchia: a sinistra predomina la componente arenacea mentre a destra quella pelitica. È in corrispondenza di quest'ultima porzione che si concentra un elevato numero di eventi franosi. Il passaggio tra le due litologie è generalmente marcato da contatti tettonici.

La complessa situazione geologica della Val Marecchia è evidenziata anche dalla presenza, nel bacino di sedimentazione della Marnoso-arenacea, di ripetute frane sottomarine che coinvolgevano sia i depositi prevalentemente pelitici (peliti dei "Ghioli di letto") che i depositi delle Liguridi (es. Argille Varicolori della Val Marecchia costituite da argille grigio-nerastre-verdastre e/o rossastre fortemente spiegazzate e tettonizzate) ed in misura minore i blocchi arenaceo-calcarei appartenenti alla successione Epiligure. Proprio ai depositi Epiliguri è legata la morfologia dominante dell'Alta Val Marecchia caratterizzata dall'emergenza, sul paesaggio costituito da un substrato argilloso, di ammassi rocciosi isolati, formati dai litotipi più competenti. Procedendo verso NE si incontrano, sempre intercalati ai terreni liguri, la Formazione Gessoso-solfifera costituita da affioramenti di gesso prevalentemente microcristallino nei pressi di Sapigno e da gesso macrocristallino nei pressi di Torriana – Montebello (questi ultimi depositi stanno ormai scomparendo per l'intensa fratturazione a cui sono stati soggetti), la Formazione a Colombacci costituita da argille grigie con sporadiche intercalazioni arenacee e strati di calcari marnosi e la formazione delle Argille Azzurre Plioceniche. Le due ultime formazioni fanno assumere al paesaggio una tipica morfologia calanchiva.

Dal punto di vista geomorfologico la parte collinare-montana dell'area in esame è contraddistinta dalla presenza di formazioni che, presentando caratteristiche litotecniche ed evoluzione tettonica molto diverse, hanno determinato una grande varietà di forme di paesaggio. Si passa dai pendii dolci e coperti da distese prative in corrispondenza degli affioramenti marnoso-arenacei a versanti ripidi e boscosi in corrispondenza dei calcari appartenenti alla formazione di Monte Morello o di San Marino o addirittura a paesaggi brulli e calanchivi delle zone di affioramento della Argille Varicolori. Un'altra particolare caratteristica che contraddistingue il paesaggio, è la presenza delle rupi scoscese che emergono da un sottofondo

ondulato e che sono divenute sedi dei principali insediamenti antropici. Tra questi ricordiamo i rilievi calcarei di Torriana, Montebello, Verucchio, San Leo e i rilievi arenacei più recenti di Monte Ercole e Monte Benedetto.

La presenza di alti gradienti di pendio e la sovrapposizione di ammassi rocciosi rigidi e fortemente fratturati su litotipi argillosi, facilita l'innescò di fenomeni franosi.

Dal punto di vista geologico-strutturale, l'area appartiene ad una porzione dell'Appennino Settentrionale e la sua evoluzione strutturale è marcata dalle principali fasi tettoniche che hanno determinato la messa in posto della catena appenninica; l'area è dunque caratterizzata da un assetto geomorfologico giovane e uno idrogeologico estremamente instabile. Tutto ciò insieme all'abbondanza di argille in molte delle formazioni affioranti, favorisce lo sviluppo dei dissesti sui versanti e, più in generale, l'erosione accelerata. Alla naturale predisposizione ai dissesti si sono sommati interventi antropici scorretti, che hanno aumentato la frequenza degli eventi e l'entità dei danni.

Sono noti da tempo i numerosi fenomeni franosi caratterizzati sia da crolli e da ribaltamenti delle pareti rocciose, sia dalla mobilizzazione della coltre argillosa a seguito di periodi di piogge persistenti. La presenza di centri abitati proprio in corrispondenza degli affioramenti rocciosi ha permesso di ricostruire nel tempo la correlazione tra periodi piovosi e riattivazione di frane importanti; tra queste si ricordano quella di Sant'Agata, di Perticara e di Maiolo.

1.4. Inquadramento geografico e cenni storici su Casteldelci

Nell'Italia unita il comune di Casteldelci è appartenuto alle Marche (Provincia di Pesaro e Urbino), fino al 15 agosto 2009, quando ne è stato distaccato, congiuntamente ad altri sei comuni dell'Alta Val Marecchia, in attuazione dell'esito di un referendum svolto il 17 e 18 dicembre 2006, per entrare a far parte dell'Emilia-Romagna (Provincia di Rimini).

Casteldelci, quindi, si trova al punto d'incrocio tra tre regioni: Marche, Toscana ed Emilia-Romagna. Nelle sue vicinanze si erge il Monte Fumaiolo (1407 m s.l.m.), da cui nasce il Fiume Tevere. Il territorio comunale si estende prevalentemente sui due versanti della valle del torrente Senatello, affluente di sinistra del Fiume

Marecchia, e ha una superficie di circa 50 km², con quote sul livello del mare da 436 a 1355 m. Gli abitanti risiedono prevalentemente a Casteldelci e nelle frazioni di Schigno, Senatello, Mercato, Giardiniera, Monte Fragheto, Poggio Ancisa e al 31-12-2006 erano 489, per un totale di 212 nuclei familiari.

Casteldelci è già menzionato in documenti del XII secolo, con la definizione di “Casale d’ilice”, dal latino *Castrum Illicis*, letteralmente “fortificazione vicino ai lecci”. Tuttavia reperti di epoca preistorica rinvenuti nella valle suggeriscono che il paese abbia origini molto più antiche. Popolato ininterrottamente nelle varie epoche grazie alla presenza di sorgenti perenni, Casteldelci raggiunse il suo splendore nel Medioevo, quando la sua collocazione geografica favorì l’insediamento di rocche e castelli. Tra questi merita di essere ricordato il castello dei signori della Faggiola, il cui nome, come quello del monte omonimo su cui sorgeva la rocca, presumibilmente era dovuto ai faggi che ancora oggi ricoprono i monti circostanti. Qui nel 1250, nacque il celebre condottiero Ugucione della Faggiola, il fiero capo dei ghibellini d’Italia, signore di Pisa e di Lucca. Secondo una tradizione risalente a Boccaccio, egli avrebbe ospitato nel suo castello Dante Alighieri, che forse in lui vide il “veltro liberatore d’Italia” e forse proprio a lui dedicò la cantica dell’Inferno della Divina Commedia.

Prima del governo di Ugucione e degli altri signori della Faggiola, che esercitarono il loro potere sin verso il 1400, Casteldelci dipendeva dai vescovi di Montefeltro ed era sotto l’amministrazione di Massa Trabaria. Dopo di loro passò a Guidobaldo da Montefeltro, duca di Urbino, e poi a Cesare Borgia (1502-08), astuto condottiero e modello del Principe ideale di Niccolò Machiavelli. Passò quindi sotto il dominio di Lorenzo Il Magnifico (1517), signore e mecenate della corte fiorentina, e successivamente del Comune di Firenze (1518).

Successivamente ritornò a far parte dello stato urbinato (1522), seguendone le vicende storiche generali del Montefeltro.

Altro importante personaggio storico, legato al passato di Casteldelci, è l’urbinato Girolamo Genga, pittore, architetto e scenografo del Rinascimento italiano, citato da Vasari, allievo di Luca Signorelli e del Perugino negli stessi anni di Raffaello e caposcuola di una schiera di ingegneri militari del Cinquecento che lavorarono dal Portogallo alla Russia. A lui il duca Guidobaldo da Montefeltro concesse la montagna di Casteldelci come ringraziamento della sua fedeltà.

1.5. Inquadramento geologico e geomorfologico della zona oggetto di studio

Il territorio del comune di Casteldelci è costituito da terreni appartenenti alla formazione Marnoso-Arenacea-Romagnola (in posizione autoctona) affioranti nella porzione a NE, al di sopra dei quali è sovrascorsa la coltre gravitativa della Val Marecchia. Il limite, con direzione circa NW-SE, è situato immediatamente a monte di Casteldelci (Fig. 1.3).

La formazione Marnoso-Arenacea-Romagnola rappresenta l'unità torbiditica silicoclastica più antica della successione umbro-marchigiana-romagnola ed è per lo più formata da un'alternanza di arenarie e marne con un rapporto arenite/pelite (A/P) e spessore degli strati variabili; tali variazioni permettono una suddivisione in sottounità litostratigrafiche. Nella zona, quindi, la formazione, sulla base del rapporto arenite/pelite, dello spessore medio degli strati, della composizione delle areniti e della posizione stratigrafica, è suddivisa in quattro membri: Membro di Collina (torbiditi pelitico arenacee silicoclastiche con $A/P = 1/4-1/6$), Membro di Galeata (torbiditi arenaceo pelitiche silicoclastiche con $A/P=1-1/4$), Membro di Corniolo (torbiditi pelitico arenacee con $A/P=1/3-1/4$), Membro di Biserno (torbiditi pelitico arenacee con $A/P=1/4-1/5$) e sono tutti appartenenti al Miocene. Le unità Liguri, che costituiscono la Coltre della Val Marecchia, affioranti in zona sono la Formazione di Sillano, la Formazione di Villa a Radda e la Formazione di Monte Morello.

La formazione di Sillano è caratterizzata da un'alternanza di strati di spessore da decimetrico a metrico di peliti grigie e calcari grigio-verdastri. Le peliti possono talvolta essere policrome, specialmente nella parte basale della formazione, dove diventano predominanti rispetto ai calcari. Localmente sono presenti marne calcaree rosate. La porzione carbonatica è rappresentata da calcareniti torbiditiche a grana fine, calcilutiti in strati da medi a spessi e calcari marnosi con colori che vanno dal grigio al verdastro, ma che spesso possono assumere colore nocciola chiaro. La deposizione della formazione è avvenuta dal Cretaceo superiore all'Eocene inferiore.

La formazione di Villa a Radda è costituita da argille policrome, variabili da un colore rosso a verde a grigio scuro. Alle argilliti policrome si intercalano livelli discontinui di calcareniti, calcilutiti grigie o verdastre, arenarie fini brune, siltiti di colore marrone scuro-rossastro e marne grigio-avana. Localmente le argilliti

risultano profondamente alterate e caoticizzate ed al loro interno sono compresi blocchi di arenarie ofiolitiche e livelli “budinati” di calcari marnosi. La deposizione della formazione è avvenuta dal Cretaceo superiore all’Eocene inferiore.

La formazione di Monte Morello è costituita da un’alternanza di calcari e calcari marnosi, calcareniti torbiditiche e marne. I calcari hanno colore grigio chiaro e strati medi o spessi; la calcareniti presentano talvolta una base microconglomeratica, stratificazione fine e bioturbazione. Le marne e marne calcaree hanno una stratificazione sottile e colori che variano dal nocciola al grigio; localmente sono presenti livelli di calciruditi con nummuliti. Le intercalazioni pelitiche sono date da siltiti ed argilliti siltose di colore grigio scuro, piuttosto fogliettate. La formazione di Monte Morello poggia, tramite un contatto netto, sulla Formazione di Sillano, e localmente direttamente sulle Argille Varicolori, laddove queste sostituiscono lateralmente la suddetta formazione. Sono strati depositi nell’Eocene inferiore-medio.

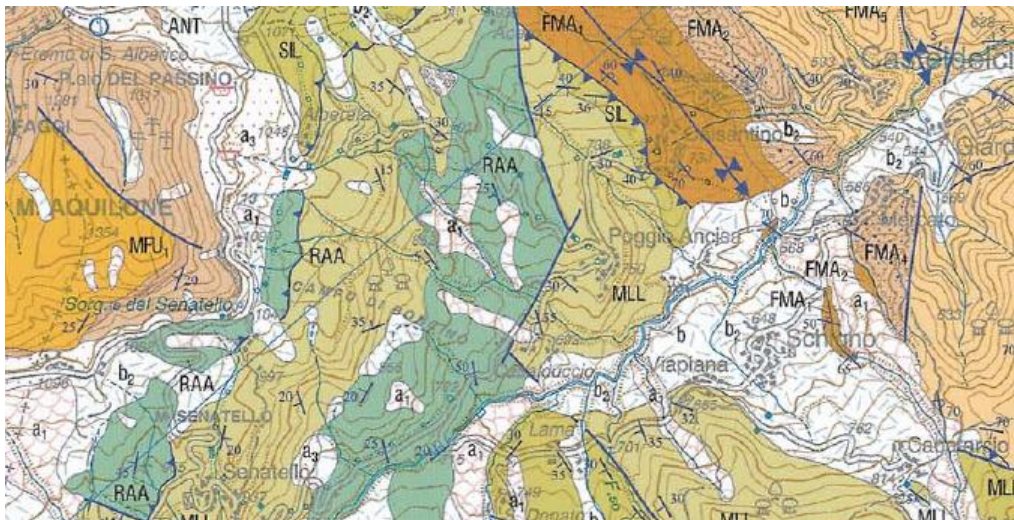


Fig. 1.3 – Stralcio della carta geologica d’Italia (Foglio 278 – Pieve Santo Stefano). La legenda è disponibile al sito www.isprambiente.gov.it

La morfologia della zona è caratterizzata da rilievi ripidi in corrispondenza degli affioramenti della Marnoso-Arenacea (costituiti da torbiditi arenaceo-pelitiche in strati da medi a molto spessi alternate a marne siltose e siltiti), mentre dove affiorano i terreni della coltre della Val Marecchia (unità Liguri) si hanno pendii

più dolci diffusamente interessati da movimenti franosi e forme di erosione calanchiva.

Il torrente Senatello, maggiore affluente di sinistra del Marecchia, attraversa con andamento SW-NE il territorio comunale; esso è caratterizzato da un'elevata portata ed esercita una forte erosione di fondo che causa ed aggrava le condizioni di già precaria stabilità delle porzioni in cui affiorano i terreni della coltre gravitativa.

La maggior concentrazione di dissesti è pertanto localizzata sui versanti della parte alta del bacino del Senatello sia in destra che in sinistra idrografica.

Capitolo 2

Descrizione dei fenomeni di dissesto

2.1. Il dissesto idrogeologico

Col termine dissesto idrogeologico si vuole indicare l'effetto causato da processi geomorfologici che modificano, in tempi più o meno rapidi, il territorio eventualmente interagendo in modo negativo, talvolta persino distruttivo, sui prodotti e sulle attività antropiche presenti sul territorio stesso. Tale definizione non è del tutto corretta poiché, in realtà, le frane così come i processi erosivi accelerati sui versanti e i processi fluviali sono, quasi per la totalità, dei fenomeni naturali, gli stessi che, nella storia geologica del nostro Paese, hanno modellato l'ambiente e il territorio che ci circonda finché esso non ha raggiunto l'attuale conformazione. Tali processi, nel corso degli anni, sono stati influenzati dall'uomo che ha interagito con l'ambiente, talvolta intensificandone l'azione. Tale interazione uomo – ambiente è avvenuta sia a scala locale, apportando modifiche in modo diretto al territorio come, ad esempio, disboscamenti e usi non idonei del suolo, che a scala globale alterando il clima.

Dissesto idrologico significa prima di tutto alterazione dell'idrografia. Questa notoriamente costituisce un sistema elastico, capace di autoregolazione e quindi di ridisegnare nuovi percorsi drenanti al variare delle condizioni naturali. L'uomo, per ridurre la capacità erosiva nei campi o per proteggere le proprie opere edilizie, ne ha fatto un sistema rigido di fossati, ruscelli e rivoli controllati. L'abbandono delle campagne e quindi il venir meno del secolare e minuzioso governo delle

acque, ha innescato la ricerca di un nuovo assetto idrografico e di un nuovo equilibrio attraverso l'accelerazione dell'erosione del suolo, con effetti di frane, smottamenti e colate, di cui la Val Marecchia mostra un vasto e variegato repertorio.

Il disboscamento ha fornito il suo potente contributo. Il bosco da sempre è stato fonte di combustibile di facile reperimento e di materiale da costruzione, ma ha conosciuto un cospicuo ridimensionamento a partire dal Cinquecento, con il crescente sviluppo delle terre coltivate e con l'inasprimento climatico dei secoli successivi. A ciò va collegato il rapido alluvionamento dei corsi d'acqua, il cui carico di fondo sospinto sulla foce, veniva ridistribuito lungo il litorale. Ma l'entità del fenomeno era assai più contenuta del presente, grazie all'attenta cura di ogni colono per la rete drenante che percorreva il podere. Venuta meno quest'opera, continua e meticolosa, si è accelerata l'erosione. Le grandi frane fanno cronaca, oggi come in passato, ma sono molto più disastrose per il territorio quelle piccole e ubiquitarie. Sono queste a colpire con maggiore frequenza le infrastrutture viarie, gli acquedotti, gli elettrodotti, le abitazioni e i fabbricati produttivi. La componente antropica del paesaggio è prevalente anche nella Val Marecchia, e la tecnologia utilizzata è spesso di avanguardia; eppure molte opere edili non nascondono gli effetti della franosità.

Per quel che concerne il dissesto idrogeologico, le frane sono i fenomeni più importanti oggetto di studio, sia perché mettono in movimento notevoli quantità di materiale terrigeno, sia perché esse provocano le conseguenze più importanti e più rilevanti sulle attività dell'uomo.

2.2. Classificazione delle frane

2.2.1. Tipologia di movimento

Il termine frana è generico, in quanto si intende un movimento di massa, di roccia o di terreno, che avviene per gravità verso il basso, lungo un versante. Ogni frana è un evento a sé, nel senso che può essere generata e si può sviluppare a seguito di elementi e situazioni locali molto varie.

Il sistema di classificazione maggiormente utilizzato per descrivere i movimenti franosi è quello proposto da Cruden & Varnes (1996). Tale classificazione si basa, primariamente, sul tipo di movimento e, secondariamente, sulla natura dei materiali coinvolti. In relazione alla tipologia di movimento si distinguono cinque classi principali: crolli, ribaltamenti, scorrimenti (a loro volta suddivisi in traslativi e rotazionali), espandimenti laterali e colate.

Ognuna di queste cinque classi è poi suddivisibile, sulla base del tipo di materiale interessato dal processo franoso (roccia, detrito e terra), in tre sottoclassi.

Crolli (fall): un crollo si realizza attraverso il distacco e la conseguente caduta di una massa di materiale da un pendio molto ripido o da una scarpata. Il materiale discende in caduta libera fino a che non raggiunge il versante, quindi si muove mediante movimenti di rimbalzo e/o rotolamento. Il distacco di materiale si realizza quando la resistenza al taglio, lungo le superfici di frattura preesistenti, non è più in grado di controbilanciare i pesi dei blocchi delimitati dalle fratture stesse.

I crolli possono realizzarsi in roccia, in detrito, e meno frequentemente in terreni limoso sabbiosi, parzialmente cementati.

Sono caratterizzati da alta velocità e scarsi segni premonitori (sono osservabili solo cedimenti nelle zone bordiere e piccole fessure superficiali).

Le frane per crollo si verificano a causa dello scalzamento al piede dei versanti operato dai corsi d'acqua, dal moto ondoso in prossimità delle coste, dall'azione erosiva del vento ma anche a causa di fenomeni di crioclastismo o di sismi.

Ribaltamenti (topple o toppling): tali frane si generano quando si verifica la rotazione, attorno ad un punto posto al di sotto del baricentro della massa interessata, di un blocco di roccia o di detrito, sotto l'azione della forza di gravità, delle pressioni esercitate dai blocchi di materiali adiacenti e della pressione dell'acqua presente nelle fratture. Se il materiale non è frenato da un ostacolo, la frana per ribaltamento può evolvere in una frana per crollo o per scorrimento. Inoltre crollo e ribaltamento si possono riconoscere solo durante la loro fase incipiente. I ribaltamenti possono realizzarsi in roccia o, più raramente, in detrito.

Le cause predisponenti sono di tipo strutturale, mentre le cause innescanti sono crioclastismo, azione radicale, saturazione delle fessure con acqua, sismi, scalzamento alla base.

Scorrimenti o scivolamenti rotazionali (slump): il movimento, rotazionale rispetto a un asse parallelo al versante, avviene lungo una superficie di rottura arcuata concava verso l'alto, per il superamento della resistenza al taglio e può essere di neoformazione o in parte preesistente. Alla superficie di scorrimento principale, spesso sono associate superfici secondarie.

Possono realizzarsi in terreno, in detrito e in rocce tenere e si verificano per progressiva rottura.

Influenti sono le pressioni dell'acqua e le loro oscillazioni, la presenza di sovraccarichi (ad esempio opere antropiche) e l'azione di sismi.

Scorrimenti o scivolamenti traslazionali (slide): il movimento si realizza in corrispondenza di superfici di discontinuità preesistenti quali fratture, superfici di stratificazione, superfici di contatto tra strati con diverse proprietà geotecniche, inclinate nella stessa direzione del pendio.

Possono realizzarsi in roccia, in terreno e in detrito.

Colamenti (flow): si dividono in colamenti in roccia e in terra o detriti e avvengono lungo superfici non visibili che si attivano durante lo scorrimento stesso. Quelli in roccia possono coinvolgere interi versanti; i movimenti del substrato roccioso sono estremamente lenti, continui, simili a quelli di un fluido a elevata viscosità e si realizzano in corrispondenza di rocce caratterizzate da una fratturazione pervasiva oppure sono il risultato di deformazioni plastiche correlate al piegamento delle rocce o al rigonfiamento di porzioni del versante. Le colate di detrito si innescano a seguito di piogge intense, in aree prive di vegetazione. I colamenti di terreni possono essere caratterizzati da contenuti d'acqua e velocità estremamente variabili; maggiore è il contenuto d'acqua, maggiore è la velocità della colata e minore è la densità del materiale.

In questi casi spesso il materiale in frana segue l'andamento di preesistenti solchi di erosione che ne costituiscono l'alveo; a valle, terminato il preesistente impluvio (zona di raccolta naturale delle acque superficiali), il cumulo di frana si

distribuisce a ventaglio sulla porzione di raccordo tra il piede del versante e la successiva zona pianeggiante.

I colamenti lenti sono movimenti a bassa velocità, che coinvolgono terreni ad elevato contenuto argilloso e basso contenuto d'acqua, in versanti non molto ripidi.

I colamenti rapidi sono movimenti a velocità generalmente elevata che interessano perlopiù terreni sciolti in presenza di un significativo contenuto d'acqua.

Espandimenti laterali (spread): si verificano laddove i materiali a comportamento rigido sono sovrapposti a materiali a comportamento plastico. Il movimento di espansione laterale si realizza mediante la formazione di fratture, di trazione e di taglio. Il meccanismo di fratturazione è progressivo.

Cause condizionanti sono l'incremento delle pressioni interstiziali alla base del litotipo a maggiore competenza o l'incremento del carico piezometrico nell'ammasso sovrastante.

Le deformazioni avvengono anche su pendenze molto basse e sono evidenziate dalla disarticolazione e suddivisione in blocchi della roccia sovrastante; non si riconosce né una superficie basale di scorrimento né una zona di deformazione plastica ben definita. Possono verificarsi anche in terre con diverso grado di consolidazione.

2.2.2. Stato, stile e distribuzione di attività

Nello studio di un fenomeno di instabilità è fondamentale, oltre alla individuazione della tipologia del fenomeno, la valutazione dello stato, dello stile e della distribuzione dell'attività del movimento.

Per quanto riguarda lo stato, la frana potrà essere:

- 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 l'ultima volta prima dell'ultimo ciclo stagionale;
- Quiescente: frana inattiva che può essere riattivata dalle sue cause originali;

- Naturalmente stabilizzata: frana inattiva che è stata protetta dalle sue cause originali;
- Artificialmente stabilizzata: frana inattiva che è stata protetta dalle sue cause originali da misure di stabilizzazione;
- Relitta: frana inattiva che si è sviluppata in condizioni geomorfologiche o climatiche considerevolmente diverse dalle attuali.

In base al tipo di dislocazione il fenomeno potrà avere uno stile:

- Singolo: avviene con la mobilitazione di un ammasso unico e secondo un'unica tipologia di movimento;
- Complesso: avviene secondo più tipologie di movimento in sequenza temporale;
- Composito: avviene secondo più tipologie di movimento in fasi successive (tempo1, tempo2) o in parti diverse della massa spostata;
- Successivo: avviene non coinvolgendo la stessa massa in tempi differenti (indipendente);
- Multiplo: avviene con il coinvolgimento di masse già precedentemente dislocate.

In base all'evoluzione spazio-temporale il fenomeno potrà avere una distribuzione:

- Costante: avviene con gradualità e continuità nel tempo, cioè il materiale spostato continua a muoversi senza variazioni apprezzabili;
- Retrogressiva: tende a coinvolgere aree sempre maggiori verso monte spostando la corona di frana;
- In avanzamento: tende a coinvolgere aree sempre maggiori verso valle con differenti superfici di rottura;
- In allargamento: tende al superamento e coinvolgimento dei fianchi della frana;
- In diminuzione: il volume del materiale spostato decresce nel tempo;
- Multidirezionale: la superficie di rottura si estende in due o più direzioni;
- Confinata: la superficie di distacco non si manifesta al piede, dove sono osservabili solo deformazioni.

In una frana è possibile distinguere: una zona di scorrimento, nella quale il materiale mobilizzato si trova a quote inferiori rispetto a quelle dell'originaria superficie del versante, e una zona di accumulo, nella quale il materiale mobilizzato si trova a quote superiori rispetto a quelle della superficie originaria del versante.

Il materiale mobilizzato rappresenta il materiale che si è mosso rispetto alla sua posizione originaria e si è deposto più a valle. Viene suddiviso in corpo principale e in piede della frana.

Nella zona di scorrimento si possono riconoscere (Fig. 2.1):

- la corona (coronamento): è costituita dal materiale non mobilizzato, adiacente alle porzioni più elevate della scarpata principale;
- la scarpata principale: è la zona del versante da cui ha avuto origine il distacco del materiale;
- la superficie di rottura: è la superficie lungo la quale è avvenuto il movimento;
- il corpo principale: è la porzione del corpo di frana che giace al di sopra della superficie di frattura ed è delimitata superiormente dalla scarpata principale e, inferiormente, dal piede della superficie di frattura.

Entro il corpo principale si possono distinguere:

- la testata: è la parte più alta della frana, al contatto con la scarpata principale;
- le scarpate secondarie: sono superfici ripide che interrompono la continuità del materiale franato;
- le fratture longitudinali e/o trasversali: sono indicative di movimenti relativi delle singole porzioni del corpo di frana.

Nella zona di accumulo si possono distinguere:

- la superficie di separazione: rappresenta la superficie lungo la quale si ha il contatto tra il materiale franato e quello sottostante, in posto;
- il piede: rappresenta la porzione del materiale dislocato che si è accumulata a valle del margine inferiore della superficie di rottura;
- l'unghia: margine inferiore, generalmente curvo, del materiale spostato dalla frana, situato alla maggior distanza dalla scarpata principale.

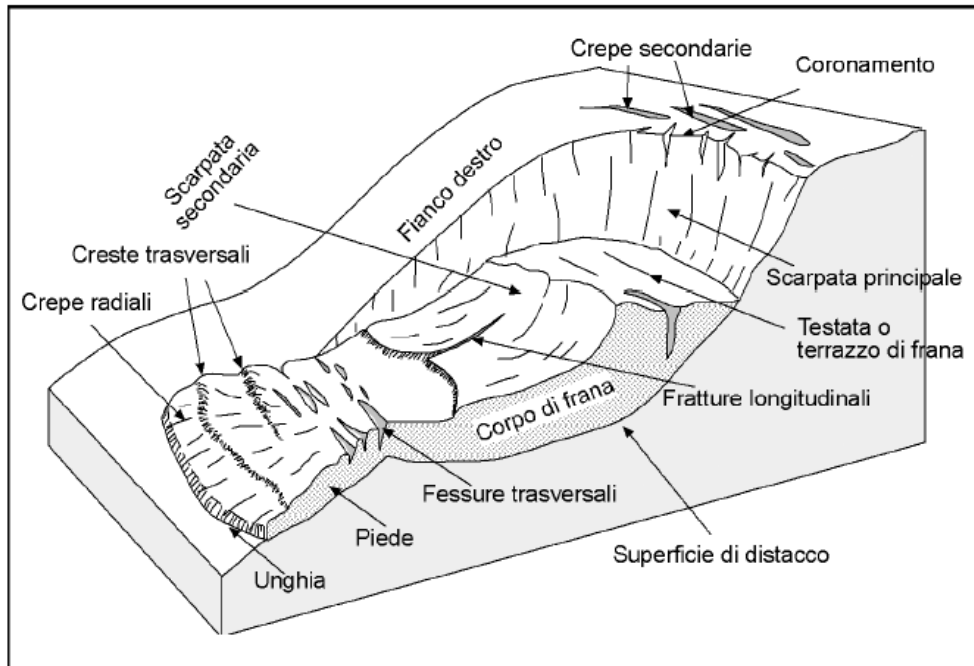


Fig. 2.1 – Schema delle parti di una frana

2.3. Cause del movimento

E' molto importante conoscere le cause che concorrono alla genesi di un fenomeno franoso, sia per scegliere correttamente gli interventi di stabilizzazione, sia per prevenire adeguatamente ulteriori fenomeni di instabilità in aree geologicamente simili.

Tali cause possono essere distinte in:

- cause preparatorie: fattori intrinseci di instabilità legati alle caratteristiche litologiche, strutturali, tessuturali, giaciturali di materiali costituenti il pendio;
- cause scatenanti: agiscono su un pendio intrinsecamente "indebolito" e sono così definite perché innescano il movimento franoso (intense precipitazioni, attività sismiche, ecc.).

I fattori che contribuiscono all'aumento degli sforzi tangenziali mobilitati sono:

- 1) Fattori che asportano il materiale e che diminuiscono il sostegno laterale, come l'erosione al piede di un versante ad opera di corsi d'acqua, l'erosione operata dal moto ondoso e dalle correnti sulle coste, lo scioglimento dei ghiacciai vallivi, l'attività di scavo al piede di un versante, la distruzione di opere di sostegno al piede di un versante;

- 2) Fattori che sovraccaricano il pendio, come la saturazione del terreno ad opera di piogge intense, il peso delle nevicate, l'accumulo di materiale detritico sulla sommità del pendio, la pressione di filtrazione per l'aumento del livello piezometrico, il peso di rilevati stradali, di discariche minerarie e di rifiuti, di edifici, il peso dell'acqua derivante da perdite di condotte idriche, fognature, canali o bacini;
- 3) Fattori che riducono il supporto sotterraneo, come l'attività carsica in rocce carbonatiche, la dissoluzione dei gessi, l'attività mineraria;
- 4) Fattori che causano pressioni laterali, come il congelamento dell'acqua in fessure, il rigonfiamento delle argille;
- 5) Fattori che esercitano sforzi transitori sul terreno, come l'attività vulcanica, l'attività sismica, le esplosioni, il traffico stradale e le macchine vibranti.

I fattori che contribuiscono alla diminuzione della resistenza al taglio del materiale:

- 1) Fattori intrinseci (iniziali), come la natura dei materiali (es. terreni organici), la presenza di terreni contenenti elevate percentuali di argilla o di terreni contenenti minerali lamellari (es. miche), la disposizione delle particelle e la rotondità dei granuli, la giacitura e le caratteristiche delle superfici di stratificazione e di scistosità, la presenza di fratture o faglie, l'alternanza di strati a diversa permeabilità e resistenza, l'orientazione del pendio.
- 2) Fattori esterni (successivi), come le sollecitazioni transitorie (terremoti, attività vulcanica, esplosioni, macchine vibranti), l'alterazione fisica e chimica dei materiali, le variazioni del contenuto d'acqua.

2.4. Valutazione del rischio frane

2.4.1. Definizione del rischio

Il rischio R è definito come “l'entità del danno atteso in una data area e in un certo intervallo di tempo in seguito al verificarsi di un particolare evento calamitoso”.

Per un dato elemento a rischio l'entità dei danni attesi può essere valutata attraverso:

- Pericolosità (hazard H): è la probabilità che un fenomeno naturale potenzialmente pericoloso o dannoso possa accadere in un determinato periodo di tempo ed in una determinata area. È espressa in termini di probabilità annua ed esprime in modo esplicito il concetto di spazialità e temporalità del fenomeno e solo in modo implicito il concetto di intensità o magnitudo.
- Vulnerabilità (V): è il grado di perdita di un elemento o di un insieme di elementi soggetti a rischio, risultato dell'effetto di un fenomeno naturale di una determinata magnitudo. È espresso in una scala da 0 (nessun danno) ad 1 (completamente danneggiato).
- Elementi a rischio (E): è il valore (che può essere espresso in termini monetari o di numero o quantità di unità esposte) della popolazione, delle proprietà e delle attività economiche inclusi i servizi pubblici a rischio in una data area.

Sotto determinate ipotesi, il rischio può essere espresso semplicemente dalla seguente espressione, nota come “equazione del rischio”:

$$R = H \times V \times E$$

Spesso è difficile giungere ad una stima quantitativa del rischio per la difficoltà della parametrizzazione, in termini probabilistici, della pericolosità e della vulnerabilità e, in termini monetari, degli elementi a rischio.

Allora si può ricorrere a delle sintesi parziali delle informazioni, valutando anziché il rischio totale R, il cosiddetto “rischio specifico” R_s o il “danno” potenziale D.

Rischio specifico (R_s): è il grado di perdita atteso quale conseguenza di un particolare fenomeno naturale. Può essere espresso da:

$$R_s = H \times V$$

Danno (D): esprime l'entità potenziale delle perdite nel caso del verificarsi dell'evento temuto. Sotto determinate ipotesi può essere espresso da:

$$D = V \times E$$

La valutazione del rischio consiste nell'analisi dei rapporti che intercorrono fra i vari fattori di vulnerabilità del territorio e le diverse forme di pericolosità possibili.

Sia la valutazione che la mitigazione del rischio richiedono l'acquisizione di informazioni territoriali sui caratteri geologico-ambientali e su quelli socio-economici dell'area in esame.

2.4.2. Valutazione della pericolosità

Al fine di valutare il rischio connesso all'instabilità dei versanti, è necessario effettuare indagini finalizzate alla valutazione ed alla rappresentazione cartografica del grado di pericolosità connesso con movimenti gravitativi o movimenti di massa.

La valutazione della pericolosità richiede l'analisi dei fattori che determinano le condizioni di instabilità e le mutue interazioni fra questi. Tale valutazione è generalmente complessa e richiede la quantificazione, sia a livello spaziale che temporale, della probabilità che ogni tipologia di evento calamitoso possa verificarsi.

Per la valutazione della pericolosità devono essere redatti una serie di documenti analitici, consistenti in carte tematiche eventualmente associate con banche dati, che contengano i principali elementi previsionali. Tali dati di base possono essere elaborati mediante procedure statistiche o con una valutazione soggettiva, per fornire una Carta di sintesi della pericolosità del territorio.

Inoltre per esplicitare il carattere delle condizioni di instabilità, in funzione dei possibili interventi, è necessario dare indicazioni sulla tipologia dei fenomeni stessi e su alcuni dei loro caratteri geometrici e cinematici (es. area, velocità presunta).

La pericolosità è data da una combinazione di magnitudo e frequenza (probabilità temporale). La magnitudo a sua volta si esprime come combinazione di velocità e volume di materiale coinvolto.

Le cause della franosità sono molteplici, spesso interconnesse fra loro e, in genere, di complessa parametrizzazione. Per l'analisi della franosità su ampia scala è necessario limitarsi all'acquisizione dei dati solo sui principali fattori della franosità.

Oltre alle cause o fattori della franosità, la valutazione della pericolosità deve tenere conto degli effetti del dissesto, ovvero della distribuzione e delle caratteristiche dei fenomeni di instabilità verificatisi in passato o attualmente in corso di evoluzione. Gran parte degli eventi franosi che si verificano sul territorio rappresentano infatti delle riattivazioni, che si succedono con tempi di ritorno irregolari e solo parzialmente prevedibili, di eventi avvenuti in un passato più o meno recente.

In base a tale considerazione si procede a realizzare, alla scala 1:25.000, una cartografia geomorfologica che fornisce le principali indicazioni sulla geometria e sul meccanismo dei fenomeni franosi e sui principali elementi geomorfologici connessi con l'instabilità dei versanti. Si tratta sostanzialmente di un documento di tipo analitico in cui viene registrato lo stato di dissesto del territorio senza fornire alcuna sintesi o interpretazione. Tale Carta sarà realizzata mediante l'acquisizione di dati bibliografici, l'interpretazione delle foto aeree ed il rilevamento diretto sul terreno.

Nella Carta di instabilità dei versanti sono rappresentate quattro classi che definiscono la localizzazione e la pericolosità relativa dei fenomeni di dissesto.

Tali classi sono basate sulla valutazione dei seguenti parametri:

- presenza di fenomeni franosi o erosivi in atto;
- presenza di fenomeni franosi o erosivi quiescenti o inattivi;
- presenza di indicatori geomorfologici che possano rappresentare indizi precursori di fenomeni di instabilità;
- presenza di caratteri fisici del territorio che rappresentino fattori predisponenti di fenomeni di instabilità, quali caratteri litologici, clivometrici e giacaturali nonché caratteri relativi alle coperture detritiche superficiali.

Con i dati a disposizione, si può inoltre far riferimento all'esperienza ed al principio che un dato fenomeno di instabilità avviene con maggiore frequenza laddove si è verificato in passato, per cui il rilevamento di dettaglio delle forme e dei processi che sono stati attivi sul territorio, nonché l'indicazione del loro grado di attività, può consentire una previsione in termini qualitativi della ricorrenza dei fenomeni.

2.4.3. Valutazione del danno potenziale

La vulnerabilità dipende sia dalla tipologia dell'elemento a rischio che dall'intensità del fenomeno franoso e, in pratica, esprime il raccordo fra l'intensità del fenomeno e le sue possibili conseguenze.

Il primo passo necessario per la stima del danno potenziale è l'elaborazione di una scala di intensità dei fenomeni franosi. Una misura dell'intensità di questi può essere data dal prodotto dell'area in frana per la velocità. Quest'ultima in particolare può essere direttamente correlata con i danni potenziali.

Nell'ambito dell'UNESCO è stata di recente proposta una scala di velocità dei fenomeni franosi associata ad una scala dei danni. In genere la stima della velocità dei fenomeni franosi è estremamente problematica; una stima molto approssimata della velocità può essere ottenuta sulla base della tipologia del fenomeno, del materiale coinvolto e del tipo di rottura (neoformazione o riattivazione), elementi che dovrebbero essere messi in evidenza nelle carte dei fenomeni di instabilità dei versanti.

2.4.4. Valutazione del rischio

Per un'analisi preliminare del rischio, il danno potenziale può essere valutato con una metodologia semplificata: si effettua considerando una classificazione schematica del territorio in zone omogenee di urbanizzazione ed utilizzo del suolo. Per ogni zona viene previsto il danno potenziale in base sia alla tipologia di elemento a rischio, compreso il relativo valore, che all'intensità dei fenomeni franosi.

La valutazione del rischio si realizza quindi attraverso il confronto fra le Carte della pericolosità e del danno potenziale. Nelle zone in cui il rischio supera le soglie socialmente accettabili è opportuno prevedere interventi di prevenzione.

Si definisce rischio accettabile (o tollerabile) il rischio connesso con una probabilità di accadimento dell'evento e/o un'entità di danno potenziale compatibili con il quadro sociale, economico e culturale del territorio.

E' piuttosto problematico definire a priori una soglia di rischio accettabile e, ancor più, dei livelli di rischio da impiegare per la zonazione. La scelta di tali livelli

deve essere necessariamente effettuata a livello locale tenendo conto della specificità del quadro socio-economico di ogni zona. Questa differenziazione su base locale determina tuttavia il problema dell'impossibilità del confronto fra Carte del rischio redatte in zone diverse.

2.4.5. Prevenzione del rischio

La prevenzione del rischio comprende le attività volte ad evitare o ridurre al minimo la possibilità che si verifichino danni conseguenti agli eventi franosi. Le attività di prevenzione devono essere programmate per tutte le zone in cui il rischio risulti socialmente non tollerabile, con priorità assoluta per le zone ad alto rischio.

In aree caratterizzate da elevati valori di rischio sono possibili due indirizzi operativi:

- Aumento delle soglie di rischio accettabile: si ottiene con l'informazione, l'installazione di sistemi di allarme, l'uso di mezzi di comunicazione di massa.
- Mitigazione (riduzione) del rischio: l'insieme delle azioni, attuate intervenendo sia in maniera attiva che passiva sul processo in atto e/o modificando le condizioni di vulnerabilità del territorio con misure strutturali e non.

Per la mitigazione sono possibili in generale due strategie:

- Interventi strutturali per ridurre la pericolosità: la probabilità di occorrenza (pericolosità) delle frane, in una determinata zona a rischio, può essere ridotta con due criteri:
 - intervenendo sulle cause predisponenti della franosità, per esempio mediante opere di bonifica e di sistemazione idrogeologica del territorio, oppure attraverso la razionalizzazione delle pratiche agricole o di utilizzo del suolo;
 - intervenendo direttamente sui fenomeni franosi esistenti al fine di prevenire la loro riattivazione o limitare la loro evoluzione, mediante interventi di stabilizzazione.

La stabilizzazione di una frana può realizzarsi attraverso la riduzione delle forze destabilizzanti (es. sagomatura o gradonatura) o l'incremento di quelle

resistenti (drenaggio, trattamento chimico-termico, iniezioni di cemento, chiodature, tiranti, gabbionate, muri di sostegno, palificate, etc.).

Gli interventi strutturali hanno in genere costi elevati giustificabili solo in condizioni di rischio eccezionale (centri abitati, beni monumentali, etc.).

- Interventi non strutturali per ridurre il danno potenziale: il danno potenziale in una determinata zona può essere limitato intervenendo sugli elementi a rischio o sulla loro vulnerabilità.

La riduzione del valore degli elementi a rischio si esplica soprattutto in sede di pianificazione territoriale e di normativa, nell'ambito delle quali possono essere programmate le seguenti azioni:

- evacuazione di aree instabili e trasferimento dei centri abitati franosi;
- interdizione o limitazione dell'espansione urbanistica in zone instabili;
- definizione dell'utilizzo del suolo più consono per le aree instabili (es. prato-pascolo, parchi, etc.).

La vulnerabilità può essere ridotta mediante interventi di tipo tecnico oppure di tipo normativo che riguardino l'organizzazione sociale del territorio. Sono possibili, ad esempio, le seguenti azioni:

- consolidamento degli edifici con conseguente riduzione dell'entità di danneggiamento dell'elemento interessato dalla frana;
- installazione di misure di protezione quali reti o strutture paramassi (parapetti, gallerie, rilevati o trincee), in modo da determinare una riduzione della probabilità che l'elemento a rischio venga interessato dalla frana, senza tuttavia limitare la probabilità di occorrenza di questa;
- messa a punto di sistemi di monitoraggio e di allarme, che consentano un adeguato preannuncio in modo da limitare la probabilità che la vita umana sia vulnerabile all'evento franoso;
- organizzazione di piani di emergenza e di soccorso, al fine di limitare il più possibile i danni prodotti dalla frana.

Gli interventi non strutturali, rispetto a quelli strutturali, presentano una maggiore flessibilità ed un costo relativamente ridotto per cui devono essere comunque promossi nelle zone a rischio elevato.

Le dimensioni della frana condizionano la possibilità di intervenire e l'efficacia dei provvedimenti; è evidente che con grandi frane, che coinvolgono volumi di

terra di milioni di metri cubi, può risultare impossibile intervenire per l'entità degli interventi che si dovrebbero eseguire o per l'elevato costo delle opere in rapporto ai benefici. Con frane medie o piccole le possibilità di intervento sono maggiori e la scelta è anche più facile.

2.5. Franosità nelle Marche / Emilia – Romagna

La zona oggetto di studio rientra nell'IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) delle Marche, redatto nel 2006.

L'analisi dei dati geomorfologici, derivati dalle diverse banche dati utilizzate dal Progetto IFFI Marche, ha permesso di archiviare, per l'intero territorio regionale, 42.522 fenomeni franosi, 39.788 dei quali cartografabili (superficie fenomeno franoso > 1600 m²) e 2735 non cartografabili (superficie fenomeno franoso < 1600 m²). Essi coprono una superficie di 1881,79 km² e rappresentano il 19,41 % dell'intero territorio regionale.

In relazione alle diverse caratteristiche litologiche, strutturali e morfologiche peculiari della regione marchigiana sono riconoscibili differenti tipologie di fenomeni franosi raggruppabili schematicamente in movimenti gravitativi ad evoluzione rapida e lenta.

I primi corrispondono a fenomeni di crollo e *block slides* e sono osservabili in corrispondenza delle dorsali montuose e di versanti ripidi caratterizzati da rocce litoidi prevalentemente calcaree e calcareo-marnose. Questi fenomeni sono presenti principalmente nella provincia di Ascoli Piceno con 443 eventi franosi su 840.

Nelle aree ad alta energia del rilievo sono inoltre frequenti, tra i movimenti franosi a rapida evoluzione, fenomeni tipo *slide*, *debris flow*, *debris avalanche* che interessano depositi eluvio-colluviali e materiali clastici accumulati in fasi morfoclimatiche precedenti.

Sempre nelle aree dei rilievi carbonatici sono frequenti le Deformazioni gravitative Profonde di Versante (DGPV) e fenomeni tipo *lateral spreading* riconoscibili per la presenza di contropendenze, trincee, scarpate e irregolarità dei versanti. Questa tipologia è frequente nelle zone interne del pesarese (84 su un totale di 172).

Nelle zone in cui affiorano sedimenti plio-pleistocenici, prevalentemente pelitici o pelitici-arenacei, caratterizzate da minore acclività, sono diffusissimi i fenomeni franosi ad evoluzione lenta; la tipologia di movimento che prevale è quella del colamento e, subordinatamente, di scoscendimento. In genere questi fenomeni interessano il substrato e le coltri eluvio-colluviali. In queste aree sono assai diffusi anche fenomeni meno profondi quali i soliflussi e le deformazioni plastiche. Nelle zone di impluvio, dove sono riscontrabili notevoli spessori di depositi alterati ed eluvio-colluviali, sono frequenti le colate di fango che si originano in occasione di piogge intense.

Nella figura 2.2 sono mostrate le percentuali delle frane, divise per tipologia di movimento, censite dall'IFFI della Regione Marche.

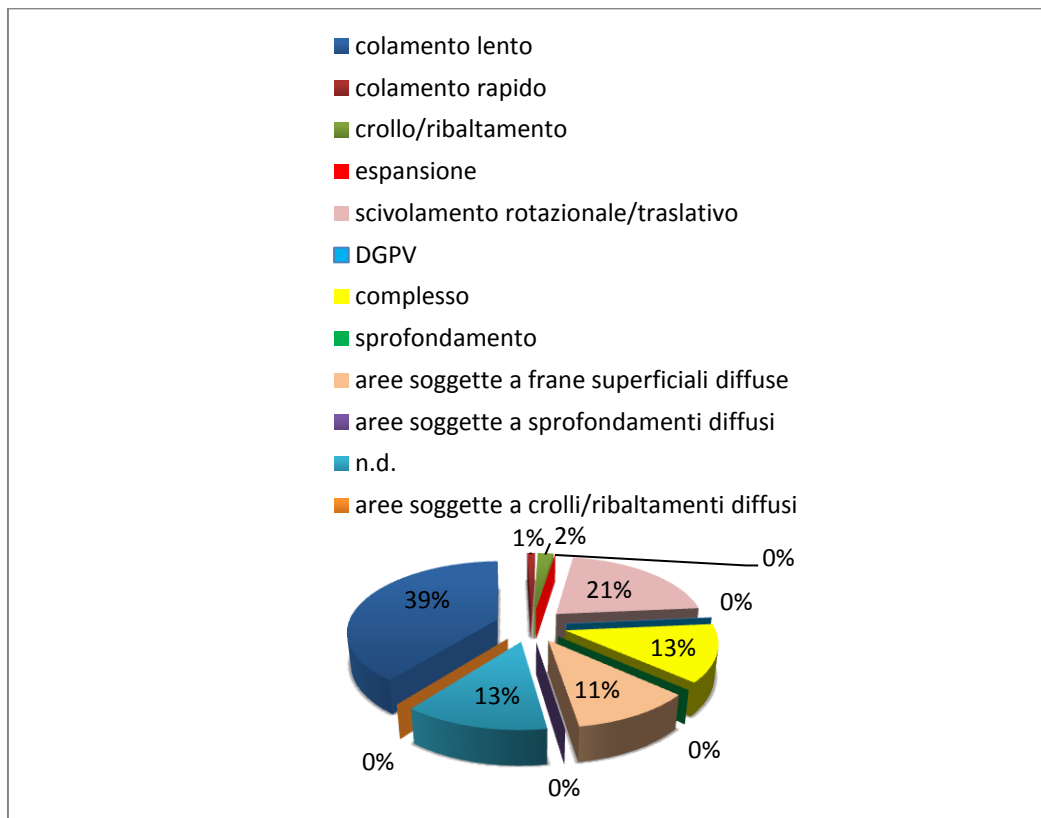


Fig. 2.2 – Percentuale delle frane per tipologia di movimento (IFFI Marche)

I movimenti gravitativi attivi/riattivati/sospesi rappresentano percentualmente una quota predominante dei fenomeni archiviati, sia relativamente a ciascuna tipologia di frana, sia in assoluto rispetto all'intero numero di fenomeni franosi (Fig. 2.3).

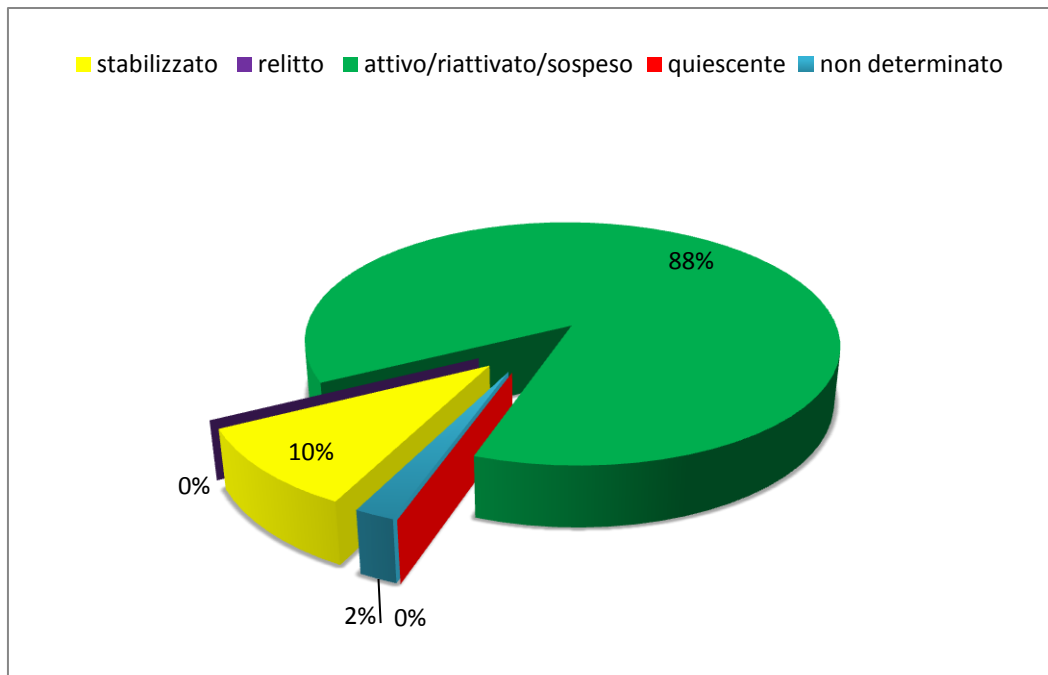


Fig. 2.3 – Percentuale delle frane per stato di attività (IFFI Marche)

L'analisi geologia-frane ha evidenziato, tra le formazioni principalmente interessate dai dissesti, l'arenaria di Monte Senario (IF 83.31%) e la Formazione di monte Morello (IF 56.98%). Ciò può essere imputato alle caratteristiche litologiche e strutturali delle due formazioni. Entrambe infatti costituiscono il complesso epiligure della colata gravitativa della Val Marecchia, affiorando per pochi km², quasi tutti in dissesto. Anche le formazioni caotiche indifferenziate mostrano un elevato indice di franosità, pari al 56.13%, con una notevole frequenza di frane di scorrimento e colamento. Le restanti litologie mostrano valori pressoché stabili intorno al 17%.

2.5.1. Dissesto idrogeologico nella Val Marecchia

Nella parte media e alta della Val Marecchia si verificano tutti i tipi più comuni di frane descritte dalla letteratura geologica, dalle frane di smottamento a quelle di scorrimento, scivolamento e crollo. Gli studi condotti sull'evoluzione dei processi geomorfologici indicano che i terreni argillosi appartenenti alla Coltre della Val Marecchia presentano, a grande scala, un comportamento meno plastico dei litotipi pliocenici (formazione delle Argille Azzurre), mostrando di fatto una più alta percentuale di frane attive e di forme calanchive rispetto a questi ultimi. Nei

litotipi pliocenici assumono maggiore importanza le fenomenologie di tipo plastico, quali creep (lenti smottamenti del suolo) e soliflussi (stati deformativi molto superficiali del suolo) che si attivano in genere dove la pendenza dei versanti supera il 15%.

La ragione di questo comportamento è legata alla presenza, nei terreni appartenenti alla Coltre, sia di livelli marnosi che diminuiscono sensibilmente la plasticità dell'insieme, sia di un'intensa tettonizzazione che ha determinato un assetto giaciturale disordinato e casuale, con una struttura a scaglie non sempre orientate lungo un pendio, secondo i massimi valori di resistenza al taglio. I fenomeni di instabilità e di erosione accelerata possono coinvolgere anche versanti a debole inclinazione; la mobilizzazione della coltre argillosa tende con il tempo a scalzare alla base i rilievi calcarei ed arenacei immersi nella Coltre alloctona minando la loro stabilità.

Dal punto di vista idrogeologico il bacino può ritenersi di modesta permeabilità per la presenza di rocce argillose o arenacee impermeabili. La pur modesta permeabilità del bacino è in parte dovuta alla permeabilità secondaria dei calcari e alla permeabilità dei depositi ghiaiosi - sabbiosi delle alluvioni.

Per quanto riguarda le portate, il fiume Marecchia presenta forti variazioni strettamente influenzate dai regimi pluviometrici ed associate ad un trasporto solido di elevate dimensioni. Di conseguenza, in concomitanza alle intense piogge autunnali o anche primaverili, queste ultime accompagnate anche da disgelo, si possono avere piene brevi ma forti e rovinose, mentre nei periodi estivi siccitosi le portate possono anche essere nulle.

Inoltre nell'Alta Val Marecchia il valore del materiale solido scaricato dai fiumi in mare è assai più elevato del valore medio italiano (la degradazione specifica in Italia è pari a 700 t/km^2 all'anno) e raggiunge il massimo nella parte del bacino del Marecchia a monte di Pietracuta, dove si hanno 4566 t/km^2 per anno, cioè 6.5 volte superiore alla media italiana e 13 volte a quella mondiale. D'altra parte il Marecchia ha una grande superficie erodibile (pari al 57.3%) e sommando questa con quella semierodibile, si raggiunge il 78%. Così si spiega l'alto valore di materiale solido trasportato, che è il più elevato in assoluto dei fiumi italiani tenuti sotto controllo dal Servizio Idrografico del Ministero dei Lavori Pubblici.

Di seguito si riportano le frane della Val Marecchia più importanti, sia per dimensioni che per pericolosità.

Una frana significativa è quella di Sant'Agata Feltria, che nel marzo del 1934 devastò parte dell'abitato. La stessa zona, in base a testimonianze storiche, fu coinvolta da movimenti franosi anche in precedenza nel 1561, nel 1644 e nel 1815.

Un'altra zona che è stata ripetutamente colpita da frane è quella di Perticara dove, oltre ai crolli di massi rocciosi dal monte Perticara, come quello accaduto il 3 settembre 1906, si sono avuti ripetuti scivolamenti di materiali argillosi. Uno di questi è quello che si è verificato il 30 gennaio 1885.

Un altro evento catastrofico, che produsse la distruzione dell'abitato di Maiolo, provocando numerose vittime, si verificò la notte del 29 maggio 1700.

Un anno di eventi franosi violenti fu il 1812. Particolarmente funestata da scoscendimenti fu la zona di Fragheto, nella valle del torrente Senatello.

Merita infine particolare attenzione il rilievo di San Leo che è stato interessato sia da crolli di massi rocciosi dalle sue rupi scoscese, sia da frane nelle zone calanchive argillose alla sua base, specialmente sul lato settentrionale.

Risulta evidente che eventi franosi, che hanno colpito la Val Marecchia nel corso di tempi storici, sono legati sia alla sua costituzione geologica, sia al ritorno ciclico di particolari periodi piovosi legati alle fluttuazioni climatiche a breve (dell'ordine dei decenni) o a lungo periodo (dell'ordine delle centinaia di anni) di cui si ha documentazione per tutto l'emisfero settentrionale.

2.5.2. Frane nel Comune di Casteldelci

Il Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), redatto dall'Autorità di Bacino Conca-Marecchia, ci fornisce un inventario dei dissesti che ci permette di avere informazioni importanti sulla zona circostante la frana di Poggio-Ancisa (Fig. 2.4).

I dissesti più significativi si trovano a:

- Casteldelci: i movimenti franosi sono riconducibili a scivolamenti, dovuti alla forte azione erosiva condotta dal torrente Senatello e da altri corsi d'acqua minori alla base dei versanti.
- Mercato: l'abitato è posto su terreni costituiti da argille marnose inglobanti blocchi lapidei. I dissesti sono classificabili come scivolamenti di terra e detrito, imputabili alle scadenti caratteristiche geotecniche delle argille e alla forte erosione esercitata dal corso d'acqua alla base del versante.
- Cà Balduccio: il versante su cui insiste l'abitato è costituito da un complesso detritico argilloso, con blocchi calcareo-arenacei; l'area insiste su una paleo frana, testimoniata dalla presenza di avvallamenti e contropendenze lungo il versante. Il dissesto è ascrivibile a frana per scivolamento, reso attivo da fenomeni erosivi esercitati dal Senatello e dal fosso Cà Balduccio.
- Giardiniera: dal punto di vista geologico l'area è costituita dalla Formazione Marnoso-Arenacea, mentre i depositi superficiali sono caratterizzati prevalentemente da limi argillosi. Il versante interessato dal fenomeno è situato in destra idrografica del Senatello, che esercita, anche in questo tratto, una decisa azione erosiva; esso coinvolge direttamente le condutture acquedottistiche e fognarie, la strada comunale, minacciando in evoluzione regressiva alcuni edifici. L'infiltrazione di acque provenienti dalla rottura delle condutture acquedottistiche fognarie tende ad alimentare il fenomeno.
- Schigno: l'abitato, situato sul versante destro del Senatello, sorge su una vasta paleofrana che si estende dal crinale fino all'alveo del Senatello stesso che ne erode il piede determinando continue riattivazioni. Il movimento del fianco destro della frana, attraversata da un rio in forte erosione nonostante le opere realizzate, ha danneggiato la strada provinciale ed eroso le spalle del ponte che lo attraversa. Segni meno evidenti di movimento si hanno in corrispondenza degli abitati di Schigno e Catabargio (situato a monte di Schigno).

L'abitato è posto su terreni costituiti da argille marnose inglobanti blocchi lapidei appartenenti alla Formazione di Sillano e su detriti di falda; l'acclività del versante in alcuni tratti è piuttosto accentuata, con diffusi movimenti gravitativi attivi. Quasi in corrispondenza del crinale, a monte di Catabargio, è visibile la vasta nicchia di distacco di una frana antica la cui zona di accumulo, costituita da depositi detritici ed eluvio-colluviali è localizzata a valle dell'abitato di Schigno. La frana che interessa gli abitati di Schigno e

Catabargio è classificabile di tipo complesso dato da scivolamenti rotazionali e traslativi che si evolvono in colate più a valle; i tributari del Senatello e il Senatello stesso incidono profondamente il versante e la base del corpo franoso. L'evoluzione del dissesto potrebbe coinvolgere ulteriormente l'alveo del Senatello, in parte già deviato dal piede di frana. Al 2004 (quando è stato redatto il PAI) le zone attive della frana sono localizzate lungo il corso d'acqua che scorre a destra dell'abitato, ed in corrispondenza del piede, rimobilizzato a causa dell'azione erosiva del Senatello.

Una frana importante si è manifestata nel 1914, mentre riattivazioni consistenti si sono registrate dal 1988 in poi, coinvolgendo pesantemente la strada provinciale e minacciando direttamente gli abitati di Schigno e Catabargio, e una centralina per la produzione di energia elettrica sita in località Molino di Schigno.

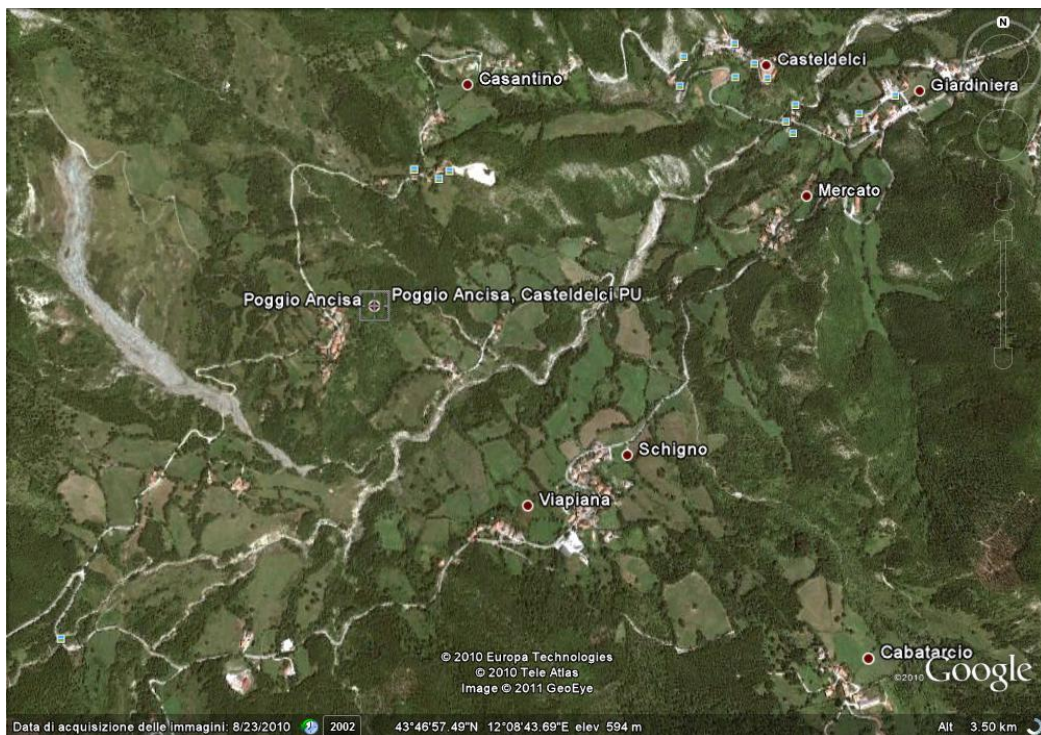


Fig. 2.4 – Foto aerea dell'area in esame, al 23 agosto 2010

Per ridurre l'azione erosiva del Senatello sono state realizzate delle briglie lungo il suo corso tra Molino del Raso e Cà dei Bonci, lungo il fosso del Poggio, affluente sinistro del Senatello, tra Cà Balduccio e Poggio Ancisa, lungo il fosso Faticato affluente destro del Senatello, a valle di Schigno, a monte della strada provinciale.

Capitolo 3

La frana di Poggio Ancisa

3.1. Descrizione del fenomeno franoso

Il territorio della provincia di Rimini, così come quello di tutta la Regione Emilia-Romagna, è stato colpito, tra dicembre 2009 e gennaio 2010, da un'eccezionale ondata di mal tempo caratterizzata da abbondanti precipitazioni, anche a carattere nevoso, che hanno innescato numerosi movimenti franosi e, conseguentemente, causato gravi danni alle infrastrutture pubbliche e alle attività produttive.

La frana di Albereta – Poggio Ancisa si è manifestata in forma parossistica in data 27 dicembre 2009, a seguito delle abbondanti precipitazioni meteoriche, occorse nei giorni 22 e 23 dicembre 2009, e al repentino innalzamento delle temperature che ha provocato lo scioglimento del manto nevoso accumulatosi in precedenza. Si tratta della riattivazione di un preesistente dissesto, ampiamente noto e riportato nella cartografia geologica e geomorfologica ufficiale della Regione Marche e nella carta dell'Inventario del Dissesto PAI 2008.

A partire dalla data del 27 dicembre 2009, il movimento franoso è rimasto costantemente attivo (con una probabile breve sospensione nel periodo estivo del 2010), subendo nel tempo diverse accelerazioni che hanno interessato sia la nicchia che il corpo di colata.

Dal documento di segnalazione del movimento franoso del Servizio Tecnico Bacini Conca e Marecchia (Regione Emilia-Romagna) di Rimini si ottengono le seguenti informazioni.

L'area interessata dal dissesto è caratterizzata dall'affioramento di litologie prevalentemente argillose ascrivibili principalmente alla formazione di Villa a Radda e in subordine alla Formazione di Monte Morello (Foglio 278 Pieve Santo Stefano, scala 1:50.000), che generalmente presentano proprietà geomeccaniche scadenti, tanto da conferire ai versanti interessati una elevata predisposizione a franamenti. Non a caso, l'area del dissesto in oggetto si colloca all'interno di una zona ad elevato indice di franosità. Nella cartografia geologica e geomorfologica ufficiale della Regione Marche (sez. 278020 Casteldelci) l'area è cartografata come frana di colamento e frana in evoluzione, mentre nella carta dell'Inventario del Dissesto PAI 2008 il corpo di frana è riconosciuto come frana attiva.

La frana di Albereta – Poggio Ancisa interessa il territorio del comune di Casteldelci, nel versante in sinistra idrografica del torrente Senatello, affluente di sinistra del fiume Marecchia. Il dissesto occupa tutta la fascia di versante che parte da quota 900 m s.l.m. e arriva ad interessare l'alveo del torrente Senatello, coinvolgendo sia la strada vicinale Poggio Ancisa – Albereta, sia la strada comunale “Fonte del Frate”, che collega l'abitato di Poggio Ancisa con la località di Cabatuccio.

Il corpo di frana riattivatosi a seguito del suddetto evento meteo è il risultato di un movimento di versante di tipo complesso (da terminologia usata da Cruden & Varnes, 1996; il termine esprime lo stile di attività della frana caratterizzata dalla combinazione di due o più tipi di movimento che avvengono in sequenza temporale e comunque direttamente correlati).

Nelle fasi iniziali è stato possibile distinguere nel senso di movimento tre zone a diverso cinematismo (Fig. 3.1):

1. Una zona apicale di nicchia attualmente collocata ad una quota di circa 900 m, che è il risultato di un tipico movimento rotazionale con un fronte al coronamento piuttosto ampio, largo all'incirca 150 m.
2. Una zona intermedia, a valle della nicchia di frana, dove si è sviluppata una colata, che occupa per intero l'area di impluvio preesistente, a formare un tipico canale di frana per una larghezza pari a circa 80 m.
3. Una zona terminale coincidente con il piede della frana caratterizzata dalla presenza di terreni fortemente scompaginati e saturi (costituiscono il preesistente accumulo di frana non consolidato), che vengono rimobilizzati dal

carico e dalla relativa spinta ad opera della colata soprastante, determinando uno scorrimento di tipo traslativo, che evolve in colata anche molto liquida. Nelle fasi successive a quella di riattivazione anche la parte terminale assumerà le connotazioni di una colata riversandosi in massa sulla suddetta strada e invadendo l'alveo del Fosso del Poggio anche nella porzione di valle.

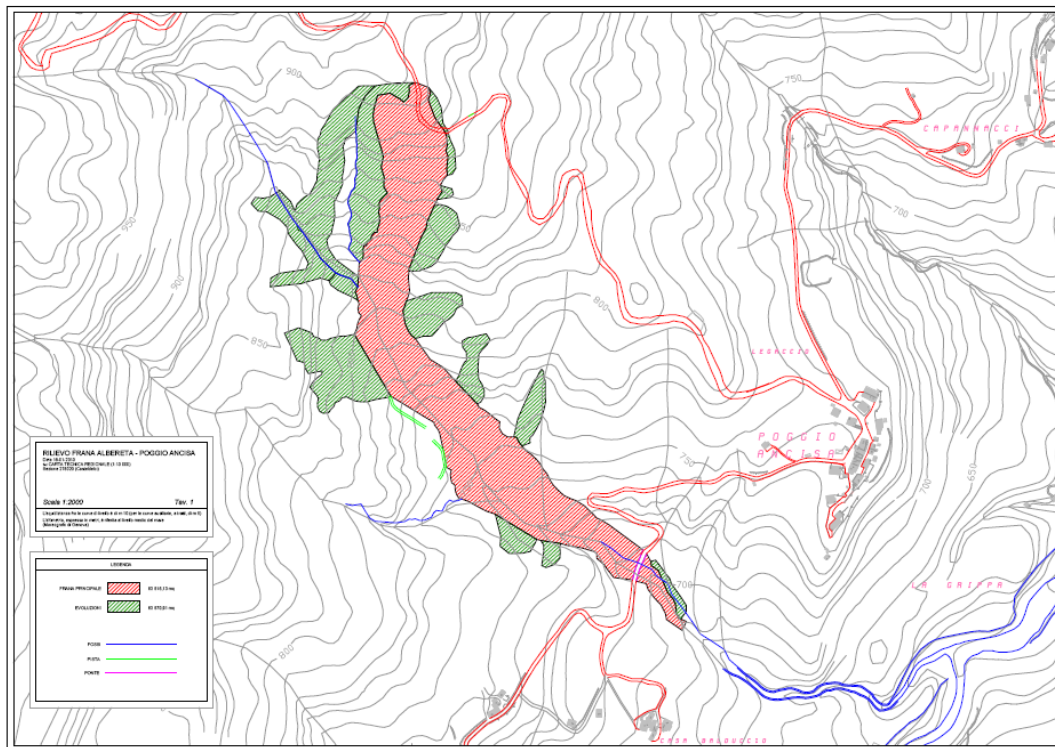


Fig. 3.1 – Carta schematica della frana

Si riportano ora dei dati morfometrici che sono immediatamente successivi alla fase parossistica di gennaio 2010.

La frana ha notevoli dimensioni, soprattutto in lunghezza (980 m fino ad arrivare alla strada comunale ormai ampiamente coperta da detrito e 1400 fino al piede); mentre ha una larghezza limitata, anche se si tratta di una frana in allargamento sia nella zona di nicchia che nella zona centrale del corpo di frana (la larghezza media è di 85 m e al piede è di 44 m).

Si è stimata una superficie totale di 83.500 m² per la frana principale e complessivamente 160.000 m² sommando la frana principale e sue probabili aree di evoluzione (movimenti accessori laterali); il volume stimato è, invece, 500.000 m³ per la frana principale e 900.000 m³ per la frana più le evoluzioni recenti (movimenti accessori laterali).

La porzione intermedia e quella terminale del corpo di frana sono confinate dal Fosso del Poggio sul fianco destro e da un fosso secondario su quello sinistro (Fig. 3.2).



Fig. 3.2 – Foto con vista del corpo centrale e del piede della frana

3.2. Gestione del dissesto idrogeologico a livello regionale

Come prima operazione, si rende necessario effettuare una ricognizione del fenomeno tramite sopralluoghi e rilievi del dissesto con lo scopo di:

- Individuare la tipologia di dissesto;
- Individuare gli elementi a rischio (abitazioni, strade, servizi);
- Valutare i danni e verificare il pericolo per la pubblica incolumità.

In seguito si stabilisce una decisione di intervento in funzione delle operazioni svolte in precedenza. L'intervento può essere:

- Di urgenza (Art 146 DPR 554/99): non c'è pericolo immediato per la pubblica incolumità, ma danni gravi alle infrastrutture.

In questo caso si ricorre al Pronto Intervento ex DLgs 1010/48 per il ripristino della funzionalità della infrastruttura danneggiata.

- Di somma urgenza (Art 147 DPR 554/99): estremo pericolo per la pubblica incolumità e/o per le infrastrutture esistenti (vedi anche Art. 10 LR 1/2005).

Occorrono opere provvisorie che rimuovano l'immediato pericolo a tutela del bene esposto; queste, in genere, non risolvono le cause del dissesto, perciò saranno necessari successivi interventi di consolidamento.

Le fasi di intervento in frane di colata possono essere:

- In emergenza, con evento in corso (come è successo per la frana oggetto di studio): si attuano opere provvisorie quali deviazione e allontanamento acque, deviazione della colata, riduzione e asportazione di volumi di terra, sistemazioni morfologiche, pulizia dell'alveo e delle sponde di fossi;
- Post-evento: in questo caso si opera facendo indagini geognostiche e monitoraggi, si esegue una caratterizzazione e modellazione della frana, si attua una progettazione e realizzazione degli interventi di consolidamento (drenaggi, risagomature, paratie, gabbionate etc.).

Tenuto conto della velocità di avanzamento della frana (nelle fasi più acute anche dell'ordine del metro/ora) e dei volumi coinvolti si configurerebbe uno scenario di rischio di occlusione del torrente Senatello e la formazione di un invaso di sbarramento che a sua volta causerebbe:

1. Interessamento dell'abitato di Molino di Schigno.
2. Scalzamento al piede della frana di Schigno, su cui insiste l'omonimo abitato, anche se questa è un'eventualità remota e comunque risolvibile con l'impiego di mezzi meccanici.

Gli ulteriori possibili interventi (da contemplare solo nel caso di ostruzione del Senatello) sono:

- Deviazione dei principali corsi d'acqua che alimentano la mobilità della frana;
- Deviazione della colata (intervento di emergenza).

3.3. Cronologia e gestione della frana

Per quanto riguarda la frana di Poggio Ancisa la prima documentazione ufficiale, che ho potuto recuperare, risale al dicembre 2009 quando la frana ha subito una riattivazione e sono partite le prime segnalazioni dei cittadini al Comune.

Da studi e sopralluoghi eseguiti dal Servizio Tecnico Bacini Conca Marecchia di Rimini con la collaborazione di tecnici del Comune di Casteldelci, ho potuto ottenere delle indicazioni sulla cronologia e gestione della frana nella fase iniziale. Per ottenere maggiori informazioni sul movimento franoso ho effettuato diversi sopralluoghi (a partire dal mese di ottobre) e ho raccolto dati presso l'Ufficio Tecnico del Comune di Casteldelci, il Servizio Tecnico dei Bacini Conca e Marecchia, il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, l'Ufficio Tecnico della Provincia di Pesaro e Urbino, il Servizio Geologico Nazionale (ora confluito nel Dipartimento per la Difesa del Suolo, ISPRA) e l'Autorità di Bacino Interregionale Marecchia-Conca.

La cronologia degli eventi di frana e dei sopralluoghi è la seguente:

22 e 23 dicembre 2009: le abbondanti precipitazioni meteoriche e lo scioglimento del manto nevoso dovuto al repentino innalzamento delle temperature hanno innescato una riattivazione del movimento franoso.

28-29 dicembre 2009: si ha la segnalazione dei danni da parte dell'Ufficio Tecnico del Comune di Casteldelci dopo aver effettuato un primo sopralluogo che ha mostrato la riattivazione della frana con coinvolgimento delle sedi stradali. È stato riscontrato che la strada comunale in località Albereta (strada che corre lungo la zona di nicchia della frana) è stata interessata da movimenti gravitativi di notevole entità che hanno provocato deformazioni della sede stradale, con rotture e distacchi in continua evoluzione, tanto che, in questa data, è stato possibile solo un precario ripristino del transito. Si ritiene a rischio anche la strada comunale Fonte del Frate-Poggio Ancisa che, in località Fosso del Poggio, potrebbe essere investita dai movimenti, con conseguente interruzione dei collegamenti tra località Cà Balduccio e Poggio Ancisa.

24 dicembre 2009 – 7 gennaio 2010: si è registrato un sistematico avanzamento della massa in frana di circa 10 m al giorno nelle fasi di maggiore mobilità, sulla base di allineamenti di capisaldi.

2 gennaio 2010: è stato eseguito un sopralluogo da parte di un tecnico del Servizio Tecnico Bacini Conca e Marecchia, per la verifica dello stato di dissesto, alla presenza di amministratori e tecnici del Comune e della Protezione Civile Provinciale di Rimini.

7 gennaio 2010: stesura del verbale di somma urgenza dopo ulteriore sopralluogo da parte di tecnici del Comune. Si è constatato che il materiale franato è avanzato fino alla strada comunale in località Fosso del Poggio pregiudicandone la transitabilità e la pubblica incolumità e che il movimento franoso è in continua evoluzione. Inoltre si è accertato lo sbarramento della sezione del tubo di attraversamento del Fosso del Poggio che interseca la stessa strada comunale. Si è ritenuto, quindi, necessario intervenire con somma urgenza per: riaprire la sezione del tubo per far defluire le acque, portare a smaltimento i detriti derivanti dal movimento franoso, pulire i cigli stradali eliminando i cumuli di detriti, abbattere e rimuovere le piante nei casi che costituiscano pericolo per la circolazione e per la pubblica incolumità, transennare le parti di strada non transitabili, predisporre le opere necessarie per la salvaguardia della pubblica incolumità. Si è incaricata perciò una ditta del luogo dell'effettuazione delle operazioni e degli interventi previsti.

8 gennaio 2010: intervento dei mezzi meccanici per consentire il deflusso delle acque e impedire l'invasione della carreggiata stradale.

11 gennaio 2010: l'occlusione del tubo sotto la strada ha reso necessario la creazione di un fosso di scolo sulla carreggiata.

12-14 gennaio 2010: è stata realizzata una pista di accesso lungo il fianco destro idrografico, per il controllo ed il mantenimento del deflusso delle acque al fine di evitare ristagni.

14 gennaio 2010: parte della strada è stata occupata dal corpo di frana, i mezzi meccanici continuano a regolare il deflusso delle acque ove possibile; il Fosso del Poggio è diventato pensile e scorre nella zona mediana del corpo di frana.

18 gennaio 2010: la massa in frana continua ad incombere sulla strada che nel frattempo ha subito lievi cedimenti; parte del materiale viene spostato ai lati della frana e in un'area appositamente predisposta sul fianco sinistro, al fine di controllare il passaggio della colata e favorire la capacità di smaltimento del fosso a valle. Ovviamente si continua ad assicurare il deflusso delle acque.

22 gennaio 2010: la colata della frana è scesa circa 300 m sotto la strada; nel tratto di fosso a valle della strada è stato eseguito un intervento di pulizia dell'alveo e delle sponde al fine di eliminare i tronchi d'albero e rami che potrebbero essere una potenziale causa di ostruzione.

Fine gennaio 2010: le nevicate provocano il momentaneo arresto del movimento.

Febbraio - giugno 2010: non ci sono state sostanziali variazioni nella zona di nicchia rispetto alle fasi precedenti, mentre si sono registrati movimenti diffusi nel corpo di frana (colata). Il limite inferiore della colata è avanzato ulteriormente entro l'alveo del Fosso del Poggio. Il materiale più diluito dalle acque è arrivato sino al Torrente Senatello.

Luglio – agosto 2010: è la fase in cui la frana può ritenersi momentaneamente sospesa. Si registra, in questa fase, comunque una forte attività erosiva del Fosso del Poggio, soprattutto nella parte a monte della strada comunale.

Settembre – ottobre 2010: la ripresa dell'attività è avvenuta in nicchia con sostanziale arretramento della linea di coronamento sia verso monte (retrogressione), che ai lati (allargamento). Si sono manifestati colamenti accessori nella zona di nicchia che si sono uniti all'accumulo principale a valle.

15 ottobre 2010: ho effettuato il primo sopralluogo sulla frana con la partecipazione della Prof. Borgatti e del Dott. Geol. Lucente del Servizio Tecnico Bacini Conca e Marecchia, per prendere visione del fenomeno e fare una raccolta fotografica sia dell'area di nicchia che del piede. Ho potuto anche visionare delle carote effettuate tramite sondaggi nella zona di piede della frana.

4 novembre 2010: ho eseguito un secondo sopralluogo al quale hanno partecipato anche tecnici del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, dove ho assistito all'infissione di capisaldi, ubicati a monte del coronamento e ai fianchi della nicchia, per la realizzazione di rilievi tramite GPS e ho potuto osservare direttamente delle misurazioni GPS con la tecnica VRS. Allo stato attuale sono state effettuate 4 campagne di misura degli spostamenti superficiali, di cui sono in corso le elaborazioni.

3 dicembre 2010: ho avuto un colloquio con la geometra Grifoni del Servizio Tecnico del Comune di Casteldelci che mi ha fornito tutta la documentazione cartacea e fotografica delle prime fasi di intervento.

14 dicembre 2010: è stato fatto un altro sopralluogo per effettuare un rilievo GPS ma lo strumento, in tale data, non funzionava. In un secondo momento ci siamo occupati di scegliere un luogo idoneo per il posizionamento del radar da terra (GBInSAR); questo sito si trova in località Lamone che rappresenta la migliore posizione per offrire una visione frontale della frana e per garantire la minore presenza di ostacoli lungo la direzione di vista dello strumento.

Ottobre – dicembre 2010: l'attività si trasferisce al resto della colata che subisce una forte accelerazione a valle della strada comunale (che continua a essere sepolta da una coltre spessa ben oltre 5 metri) laddove il materiale viene reso più fluido a causa delle acque del Fosso del Poggio. Nel tratto immediatamente a valle della strada si è venuta a creare una marcata scarpata per separazione della parte di colata maggiormente diluita. Tale massa diluita, nel suo movimento verso valle, ha subito, prima dell'imbocco di una strettoia naturale (per la presenza di litologie più competenti), un rigonfiamento con sollevamento dell'alveo del Fosso del Poggio ed una pendenza evidente verso la sponda in destra idrografica. L'ostacolo ha causato la deviazione di parte del deflusso (acqua e detrito) nei sottostanti terreni agricoli, in un'area relativamente pianeggiante, dove avviene la deposizione del detrito, mentre le acque, in parte incanalate in veri e propri solchi, ritornano nel naturale impluvio.

12 gennaio 2011: ho assistito all'installazione nel luogo prescelto del radar GBInSAR e alla sua prima messa in funzione. Il sistema radar è stato disinstallato dal sito il giorno 7 febbraio 2011 ed è attualmente in corso l'elaborazione dei dati.

Gennaio 2011: si sono registrati movimenti parziali nella zona di nicchia. Le nevicate a fine gennaio hanno provocato il momentaneo rallentamento del movimento.

3.4. Interventi di emergenza eseguiti

Come già ricordato, il 7 gennaio 2010 sono stati avviati i primi interventi d'urgenza per limitare gli effetti distruttivi della frana durante la sua fase parossistica durata diversi giorni e per scongiurare l'occlusione del Fosso del Poggio.

Le opere provvisorie sono consistite in:

- deviazione e allontanamento acque;
- deviazione della colata;
- riduzione e asportazione di volumi di terra;
- sistemazioni morfologiche;
- pulizia dell'alveo e delle sponde del Fosso del Poggio.

A seguito della fase (ottobre – dicembre 2010) che ha visto la divagazione di parte della colata dall'alveo del Fosso del Poggio a monte di una strettoia naturale del Fosso del Poggio, si è intervenuti con mezzi meccanici per arginare l'esondazione (Fig. 3.3). Tale intervento è stato necessario per impedire una tracimazione in massa (acqua + detrito) che avrebbe potuto minacciare anche la stabilità, di per sé già precaria, del versante in destra idrografica del Fosso del Poggio, con il rischio di ampliare le dimensioni del dissesto e incrementare gli effetti negativi sugli elementi a rischio: fabbricati privati, condotta di alimentazione centralina idroelettrica, torrente Senatello (a rischio occlusione).

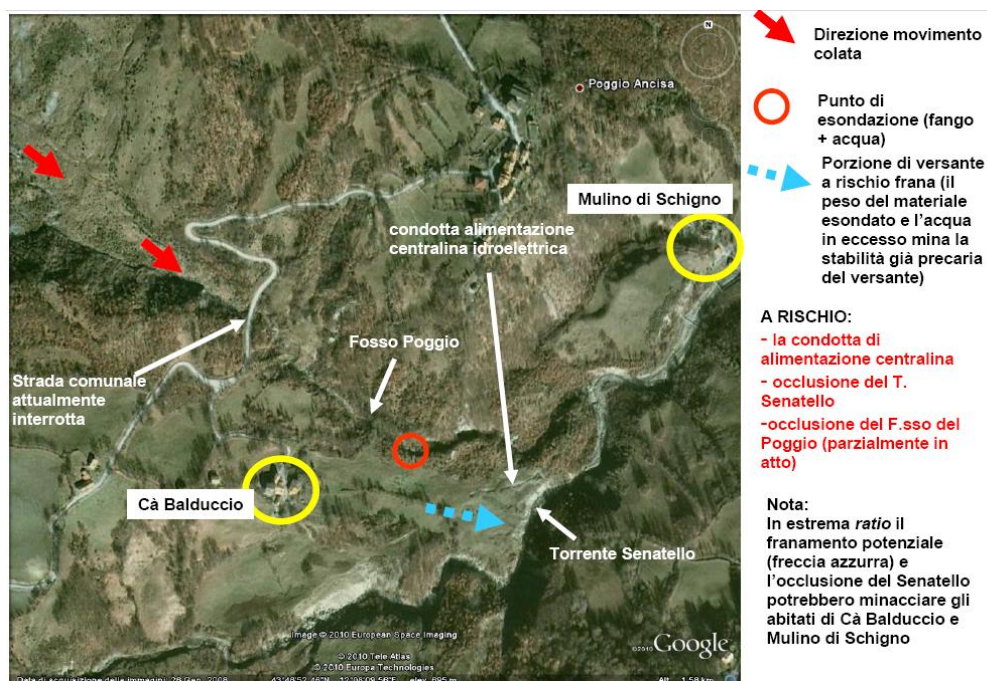


Fig. 3.3 - Mappa degli elementi a rischio (foto aerea da Google Earth);

Fonte: Servizio Tecnico Bacini Conca Marecchia

3.5. Indagini geognostiche eseguite e monitoraggio

Le indagini geognostiche eseguite (“05907. *Indagini Geognostiche preliminari sulla frana di Albereta – Poggio Ancisa finalizzate alla mitigazione del rischio e al ripristino della viabilità comunale “Fonte del Frate”, in comune di Casteldelci*”) hanno avuto inizio in data 06/09/2010 e sono state ultimate in data 02/12/2010.

Sono stati eseguiti 2 sondaggi a carotaggio continuo attrezzati con inclinometro e piezometro a tubo aperto, 1 sondaggio a distruzione attrezzato con piezometro a tubo aperto, prove di laboratorio, 6 linee sismiche a rifrazione con tecnica tomografica per complessivi 1140 m.

Sono in corso di valutazione i volumi coinvolti mediante l'ausilio di rilevamento GPS, che, stante la continua evoluzione del fenomeno, deve essere puntualmente aggiornato. I dati raccolti sono in via di elaborazione.

È stato eseguito anche il monitoraggio inclinometrico e piezometrico, che è momentaneamente sospeso per danneggiamento della strumentazione travolta dalla colata (novembre 2010).

Dal 12 gennaio all'8 febbraio 2011 la frana è stata oggetto di monitoraggio anche mediante radar da terra (GBInSAR), posato sul versante opposto in località Lamone e rivolto verso la nicchia della frana. I dati raccolti sono in via di elaborazione.

I dettagli e i risultati delle indagini geognostiche e del monitoraggio saranno discussi in seguito (cap. 5).

Capitolo 4

Metodi utilizzati per il monitoraggio

4.1. Generalità sul monitoraggio

Per studiare correttamente la stabilità di un versante occorre avere quanti più dati possibili a riguardo; molte delle informazioni che risultano utili a tal fine si possono ottenere mediante un'osservazione continua nel tempo del fenomeno di dissesto che vogliamo analizzare. Per raggiungere tale scopo occorre predisporre un sistema che permetta, per l'appunto, l'acquisizione di misure quali la profondità e la forma della superficie del movimento franoso per valutarne il volume, la collocazione spazio-temporale di eventuali movimenti in atto, gli aspetti idrogeologici del sito ecc. Tale sistema è un cosiddetto sistema di monitoraggio.

Per monitoraggio si intende l'osservazione diretta dell'evoluzione di una grandezza variabile nel tempo, quantificata in situ mediante opportuni strumenti di misura di vario tipo.

Gli scopi del monitoraggio sono molteplici, ma si evidenziano soprattutto quelli di:

- *prevenzione*: la grandezza viene misurata nel tempo per prevedere l'evoluzione futura di un potenziale fenomeno non voluto poiché potrebbero verificarsi conseguenze catastrofiche;
- *sorveglianza*: si tratta di un sistema diretto di visualizzazione di alcune grandezze critiche o di segnalazione di eventi già avvenuti;

- *verifica*: la grandezza viene misurata con lo scopo di valutare l'efficacia di un intervento o di indagarne gli effetti.

Prima di procedere nella progettazione di un sistema di monitoraggio, è importante conoscere, mediante indagini preventive, il fenomeno in esame o il suo comportamento ed aver formulato delle ipotesi sulla possibile evoluzione; solo conoscendo queste informazioni è possibile predisporre un sistema di monitoraggio in grado di raccogliere il maggior numero di informazioni utili possibili.

La realizzazione di un piano di monitoraggio prevede varie fasi ovvero:

- esame dei dati geologici e geologico-tecnici disponibili;
- programmazione;
- scelta del modello di riferimento;
- valutazione delle grandezze da controllare;
- scelta degli strumenti di misura;
- ubicazione dei punti di misura;
- scelta delle frequenze di lettura e delle modalità di acquisizione;
- acquisizione, elaborazione ed archiviazione dei dati;
- interpretazione.

Nel caso in cui nel piano di monitoraggio sia previsto anche un sistema premonitore o di allerta, nella programmazione occorre individuare i livelli di intervento, le misure preventive e i soggetti che le devono attuare.

Riassumendo, possiamo affermare che un sistema di monitoraggio è composto delle seguenti unità:

- strumenti di misura;
- sistema di acquisizione dei dati;
- sistema di trasferimento dei dati dal punto di acquisizione a quello di utilizzo;
- sistema di elaborazione ed archiviazione dei dati.

In particolare, per una frana sarà necessario sia lo studio geologico di carattere generale per una zona sufficientemente ampia, sia dettagliato dell'area più direttamente coinvolta.

È anche opportuno, e talvolta necessario, lo studio geomorfologico e idrogeologico, da svolgere a mezzo di accurati rilievi sul terreno e con l'analisi di foto aeree.

È poi importante la delimitazione planimetrica della frana e la determinazione del suo spessore: la delimitazione planimetrica si ottiene attraverso foto aeree, rilievi topografici e il rilievo geomorfologico. La determinazione dello spessore si può ricavare con metodi diretti a mezzo di inclinometri, o con metodi indiretti, che cercano di individuare discontinuità o superfici di minore resistenza sulla base dei caratteri strutturali e delle caratteristiche meccaniche dei terreni e ancora con metodi geofisici. Si deve osservare che spesso la determinazione del corpo di frana in estensione, ma specialmente in profondità, è piuttosto difficile.

Fatta la delimitazione planimetrica è necessario procedere alla caratterizzazione del corpo di frana cercando di definire la stratigrafia, la litologia dei materiali, i loro caratteri strutturali e le loro proprietà fisico meccaniche, con particolare riguardo alla resistenza al taglio.

La caratterizzazione si effettua mediante i normali mezzi di indagine, tuttavia le difficoltà che si incontrano sono spesso rilevanti: infatti solo in pochi casi i movimenti franosi interessano ambienti geomorfologicamente semplici e facili da caratterizzare, mentre di solito, sulla base dei dati che si raccolgono nelle diverse fasi di studio, è necessario modificare il piano di indagini.

Prevalentemente si ricorre a sondaggi meccanici e a indagini geofisiche e quest'ultime devono essere di vario tipo per ottenere una migliore interpretazione dei dati raccolti.

Per la determinazione delle proprietà meccaniche si eseguono prove in situ e prove di laboratorio; la scelta del tipo di prove e delle modalità esecutive deve essere fatta con particolare accortezza in relazione alla natura dei terreni. Di conseguenza anche la valutazione dei risultati delle prove in situ e in laboratorio deve procedere attraverso un'adeguata analisi critica.

Nella caratterizzazione del corpo di frana quasi sempre la determinazione della situazione dell'acqua costituisce una delle fasi fondamentali, in quanto le condizioni di deflusso dell'acqua assumono un ruolo determinante nella stabilità

del sistema. Purtroppo questa valutazione presenta spesso notevoli difficoltà in relazione alla natura dei terreni che costituiscono il corpo di frana e le zone adiacenti, alla presenza di più falde e all'entità delle loro escursioni nel tempo.

L'indagine deve essere svolta per mezzo di sondaggi eseguiti con adeguata accuratezza ed esperienza, con prove di permeabilità in foro di sondaggio e con la posa in opera di piezometri, scelti opportunamente tra i vari tipi disponibili in relazione alla natura dei terreni e ai primi dati raccolti sulle falde durante l'esecuzione dei sondaggi. Abbastanza di frequente i piezometri vengono messi in opera dopo l'evento franoso e le misure vengono eseguite per un tempo limitato, perciò la valutazione della situazione dell'acqua nel terreno risulta difficoltosa, e in sede di analisi di stabilità, porta a formulare, a favore della sicurezza, ipotesi molto gravose.

Un aspetto del fenomeno franoso da studiare, quando possibile, riguarda la sua cinematica, che può essere individuata a mezzo di un esame periodico del sito da parte di tecnici esperti e a mezzo di misure di spostamenti puntuali superficiali e profondi.

Per i movimenti superficiali si utilizzano prevalentemente i procedimenti topografici (GPS); sono possibili anche i rilevamenti da aereo, che però oltre ad essere costosi, sono ovviamente più significativi quando si hanno spostamenti notevoli.

Mentre per le misure di spostamenti di punti profondi vengono usati gli inclinometri.

In seguito verranno analizzati i metodi con cui è stato condotto il monitoraggio, a partire da settembre 2010, sulla frana di Poggio Ancisa. Ho posto più attenzione sulle tecniche di monitoraggio attraverso GPS e GBInSAR, in quanto sono quelle che ho avuto la possibilità di seguire personalmente dall'inizio della mia tesi.

4.2. Rilievo geologico e geomorfologico

Il rilievo geologico deve consentire l'acquisizione delle seguenti informazioni:

- distribuzione delle unità litostratigrafiche affioranti (formazioni) con eventuale suddivisione in membri;

- assetto tettonico dell'area (giaciture degli strati o delle superfici di scistosità, pieghe, sovrascorrimenti, faglie principali);
- discontinuità minori (faglie secondarie, fratture, fasce milonitiche o cataclastiche di ridotta estensione);
- litotipi, materiale di riempimento e strutture associate alle dislocazioni (brecce di faglia etc.);
- distribuzione delle eventuali unità stratigrafico-strutturali affioranti; raccolta sistematica di campioni di roccia rappresentativi, con eventuale esecuzione di sezioni sottili, per la caratterizzazione mineralogico-petrografica e cronostratigrafica.

Il rilievo geomorfologico deve rappresentare, in base allo studio svolto sul territorio, le forme che caratterizzano la superficie topografica raffigurando i caratteri morfologici dell'area. Inoltre, si devono interpretare l'origine e le cause delle forme individuate, in funzione dei processi geomorfologici (endogeni ed esogeni), passati e presenti, che le hanno generate; deve essere individuata la sequenza cronologica, con particolare distinzione fra le forme attive e quelle non attive. Le informazioni così assunte devono delineare un quadro completo delle caratteristiche geomorfologiche del territorio studiato ed offrire le basi per prevederne l'evoluzione futura.

In particolare il rilievo deve portare all'acquisizione e mappatura, con opportuna simbologia, delle seguenti principali informazioni di pertinenza geomorfologica:

- caratteristiche dei depositi connessi alla degradazione meteorica delle rocce affioranti, differenziati sia su base litologica che su base genetica;
- situazioni di dissesto idrogeologico quali fenomeni franosi, aree in erosione accelerata, aree soggette a caduta massi, aree di esondazione etc. ed evoluzione nel tempo degli stessi;
- elementi relativi al reticolo idrografico;
- pendenza dei versanti e dimensioni degli elementi morfologici cartografati etc.;
- caratteristiche delle aree prevalentemente sottoposte a processi di erosione e di quelle dominate da processi di deposizione;
- elementi di natura tettonica, selezionati in base a criteri geomorfologici, considerando la loro incidenza sulle forme del rilievo;

- forme in evoluzione per processi attivi o riattivabili;
- forme non più in evoluzione e non più riattivabili, nelle condizioni morfoclimatiche attuali, sotto l'azione dello stesso processo morfogenetico principale.

4.3. Indagini geognostiche

Diversamente da altre discipline dell'ingegneria civile, in cui la scelta della geometria di progetto e delle proprietà dei materiali da costruzione è parte integrante del progetto stesso, in geotecnica non sono note a priori:

- La sequenza dei terreni nel sottosuolo (stratigrafia);
- La condizione della falda acquifera;
- Le proprietà dei materiali.

Questo, e l'estrema variabilità dei terreni e delle situazioni naturali, rende indispensabile l'esecuzione di indagini geognostiche.

Più in particolare, la finalità delle indagini è:

- Individuare la natura e la disposizione stratigrafica dei terreni e delle rocce costituenti il sottosuolo;
- Definire il regime delle acque sotterranee;
- Individuare le proprietà dei vari terreni presenti nel sottosuolo (Fig. 4.1); le proprietà sono:
 - fisiche (assortimento granulometrico, porosità, contenuto d'acqua, peso dell'unità di volume etc.);
 - meccaniche (compressibilità, deformabilità, resistenza a rottura etc.);
 - idrauliche (permeabilità).

MEZZI D'INDAGINE

FINALITÀ	MEZZI	
PROFILO STRATIGRAFICO	DIRETTI	INDIRETTI
	POZZI	INDAGINI GEOFISICHE
	TRINCEE	PROVE PENETROMETRICHE STATICHE (CPT)
	CUNICOLI SONDAGGI	
PROPRIETÀ MECCANICHE	IN LABORATORIO	IN SITO
	PROVE SU CAMPIONI INDISTURBATI	PROVE PENETROMETRICHE STATICHE (CPT)
		PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE (SPT)
		PROVE SCISSOMETRICHE
		PROVE DILATOMETRICHE
		PROVE DI CARICO SU PIASTRA PROVE GEOFISICHE (CH, DH, SASW)
PROPRIETÀ IDRAULICHE	IN LABORATORIO	IN SITO
	PROVE DI PERMEABILITÀ SU CAMPIONI INDISTURBATI	PROVE DI PERMEABILITÀ IN FORI DI SONDAGGIO, POZZI
REGIME IDRAULICO	IN LABORATORIO	IN SITO
		INSTALLAZIONE E MISURE CON PIEZOMETRI

Fig. 4.1 – Schema sui possibili mezzi utilizzati per le indagini geognostiche

Gli scopi delle indagini sono:

- ricostruire il profilo stratigrafico mediante l'esame dei campioni estratti (rimaneggiati ed indisturbati) = sondaggio stratigrafico;
- prelevare campioni indisturbati per la determinazione in laboratorio delle proprietà fisiche e meccaniche = sondaggio geotecnico;
- consentire rilievi e misure sulle acque sotterranee;
- consentire l'esecuzione di prove in sito per la valutazione delle proprietà geotecniche del terreno in sede.

I sondaggi hanno diversi vantaggi tra cui:

- possibilità di attraversare qualsiasi terreno, anche a grande profondità e sotto falda;
- tempi e costi di esecuzione relativamente contenuti (rispetto agli scavi);
- possibilità di eseguire indagini anche in mare o in fiume;
- semplicità delle operazioni di occlusione del foro.

Gli svantaggi però sono:

- pericolo di non riconoscere eventuali strati di terreno di modesto spessore;
- difficoltà di campionamento in terreni a grana grossa incoerenti;
- impossibilità di eseguire prove in sito a grande scala;
- possibile disturbo o mascheramento dei terreni per penetrazione del fluido di perforazione, dilavamento, caduta di detriti sul fondo.

La perforazione a rotazione è il metodo di scavo attualmente più diffuso non solo per la realizzazione di pozzi per acqua, ma anche per piezometri e pozzi petroliferi.

Anche per il caso oggetto di studio, i sondaggi sono stati realizzati con questa tecnica.

La perforazione è realizzata per il movimento rotatorio dell'utensile di perforazione (scalpello) che è posto alla fine della batteria di perforazione. L'asta di perforazione superiore è collegata alla testa motrice che imprime il movimento rotatorio.

Si possono distinguere metodi con carotiere che si utilizza quando si vuole ottenere un campione di terreno o roccia per avere una corretta stratigrafia o compiere analisi di laboratorio (geotecniche o chimiche) e metodi a distruzione di nucleo con fanghi di perforazione (si scava a sezione piena mediante lo scalpello disgregando completamente il terreno).

Come precisazione si può far notare la distinzione tra carota e campione: in campo geotecnico un campione si differenzia dalla carota in quanto è prelevato con accorgimenti atti a conservare il più possibile le caratteristiche originali (umidità, plasticità, consistenza, coesione etc.) e permettere l'esecuzione di prove più sofisticate del semplice riconoscimento (prove di compressibilità, triassiali, di permeabilità). Quindi essenzialmente si definiscono operazioni di carotaggio quelle che permettono la definizione della stratigrafia, operazioni di campionamento quelle che permettono il prelievo (con differenti gradi di disturbo) di tratti isolati di terreno da sottoporre ad analisi di laboratorio. Questa distinzione, però, è formalmente corretta solo in determinati casi perchè in realtà alcuni campioni si prelevano dalle carote, altri con appositi campionatori e in alcuni casi le carote stesse possono essere considerate come campioni.

Nella frana di Poggio Ancisa si è utilizzato un carotiere per prelevare sia carote che campioni; questi ultimi sono poi stati sottoposti a varie prove di laboratorio che ora andremo ad illustrare.

4.3.1. Analisi e classificazione dei campioni con prove di laboratorio

Per introdurre le diverse prove di laboratorio impiegate sui campioni prelevati dal corpo di frana (i cui risultati saranno illustrati nel cap. 5), si riportano ora dei concetti di analisi e classificazione delle terre.

Un campione di terra schematicamente può essere rappresentato diviso nelle tre fasi che lo compongono: solida, liquida e gassosa.

Il volume del solido è indicato con V_s , quello dell'acqua con V_w e quello dei gas con V_g . Poiché le relazioni tra V_w e V_g cambiano al variare delle condizioni dell'acqua nel terreno così come al variare dei carichi, è conveniente indicare tutto il volume non occupato dalle particelle solide o volume dei vuoti con V_v .

Il peso dell'acqua è indicato con la sigla P_w , quello delle particelle solide con P_s e il peso totale con P .

Se allora il volume totale viene indicato con V , la porosità è definita da:

$$n = V_v / V$$

ed è espressa frequentemente in percentuale. Più spesso si fa riferimento all'indice dei vuoti:

$$e = V_v / V_s$$

rapporto nel quale al denominatore figura il volume del solido che è sempre una costante.

Una delle proprietà più importanti, soprattutto per le terre a grana fine, è il contenuto naturale di acqua w , definito da:

$$w = P_w / P_s$$

in cui P_w è il peso dell'acqua e P_s il peso del materiale solido essiccato a 105°C. I terreni sotto la falda freatica, ed alcuni terreni fini sopra la falda freatica, sono allo stato saturo, mentre la maggior parte dei terreni sopra la falda freatica ha i vuoti riempiti in parte di aria e in parte di acqua. Anche alcuni terreni sommersi possono avere piccole quantità di aria o gas.

Il grado di saturazione è definito da:

$$S_r\% = V_w / V_v$$

Pertanto il terreno può trovarsi sia nella situazione trifase che in quella bifase con i vuoti riempiti solo da acqua (terreno saturo $S_r = 100\%$), o solo da aria (terreno asciutto $S_r = 0\%$).

Il peso dell'unità di volume γ è una delle più importanti proprietà fisiche di un terreno ed è definito da:

$$\gamma = P / V$$

dove P è il peso totale e V è il volume totale. Se il terreno è saturo il peso unitario viene indicato con γ_{sat} ; se è asciutto con γ_d dato da:

$$\gamma_d = P_s / V$$

Il peso unitario dell'acqua è indicato con:

$$\gamma_w = P_w / V_w$$

e il peso unitario del terreno immerso con:

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

Si ha poi il peso specifico dei grani:

$$G_s = \gamma_s / \gamma_w$$

La presenza di acqua nei vuoti del terreno influenza principalmente i terreni a grana fine, come argille e limi. Ne consegue che è importante conoscere la quantità d'acqua presente in un terreno e confrontare questo contenuto con alcuni valori importanti del contenuto d'acqua, valori che in un certo modo costituiscono i limiti del comportamento del terreno.

I limiti di Atterberg sono dei contenuti d'acqua, determinati in laboratorio con procedure standardizzate, che rappresentano abbastanza bene dei passaggi critici di comportamento del terreno.

Se si fa variare in aumento con continuità il contenuto d'acqua w , si vede che lo stato del terreno argilloso passa da quello di solido fragile a quello di semisolido, quindi a quello plastico e infine a quello fluido. A queste variazioni continue di stato possiamo abbinare una risposta della variazione deformazionale del terreno.

Il contenuto d'acqua che separa il passaggio dal solido fragile al semisolido è detto limite di ritiro w_s , quello dal semisolido al plastico limite di plasticità w_p e quello dallo stato plastico allo stato fluido limite di liquidità w_L ; la differenza fra

il limite di liquidità e il limite di plasticità è detto indice di plasticità $I_P = w_L - w_P$ e indica il campo di contenuto d'acqua nel quale il terreno è allo stato plastico.

Il limite di liquidità w_L si determina a mezzo dell'apparecchio di Casagrande, ed è il contenuto d'acqua per il quale il solco tracciato con apposita spatola sulla terra, posta in un cucchiaino, si richiude dopo 25 cadute.

Il limite di plasticità w_P viene determinato formando per rotolamento dei cilindri che raggiungono un diametro di circa 3mm, ed è il contenuto d'acqua corrispondente al formarsi delle prime screpolature.

La consistenza del terreno è misurata dall'indice di consistenza:

$$I_c = w_L - w / I_P$$

o dall'indice di liquidità:

$$I_L = (w - w_P / I_P) = 1 - I_c$$

Un sistema di classificazione rappresenta un linguaggio di comunicazione tra tecnici e costituisce un metodo sistematico per suddividere il terreno in gruppi e sottogruppi, in accordo con il suo probabile comportamento. Le proprietà da usare per la classificazione devono essere indipendenti dalle condizioni di sollecitazione e da quelle ambientali; ricadono fra queste proprietà la granulometria, principalmente per le terre a grana grossa, e i limiti di Atterberg principalmente per le terre a grana fine.

La granulometria è la distribuzione percentuale dei grani di un campione di terreno secondo le dimensioni, ed è rappresentata con una curva dove la percentuale, p%, di materiale più fine di una certa dimensione è riportata in ordinata in scala naturale, mentre il corrispondente diametro dei granuli D in millimetri, è riportato in ascissa in scala logaritmica. La granulometria è determinata con l'analisi meccanica, a mezzo di vagli e setacci con maglie unificate, per il materiale a grana grossa e con il metodo del densimetro per il materiale a grana fine.

Attualmente vi sono due sistemi di classificazione usati su scala mondiale nell'ingegneria civile: il sistema di classificazione USCS, riportato in Italia nelle raccomandazioni AGI, e il sistema AASHTO.

Il sistema USCS è stato sviluppato da Casagrande e in questo sistema le terre a grana grossa sono classificate sulla base della granulometria, mentre quelle a grana fine sulla base delle caratteristiche di plasticità.

4.3.2. Resistenza al taglio

La resistenza al taglio sulle aree di contatto tra le particelle è proporzionale alla forza che le spinge l'una contro l'altra, e la possiamo pertanto considerare una forza di attrito.

Sui punti di contatto tra le particelle, per alcuni tipi di terra, si sviluppano delle forze di adesione che rientrano tra le azioni reciproche tra le particelle e quindi contribuiscono alla formazione della resistenza al taglio delle terre.

Coulomb già nel 1773 propose, per i mezzi granulari, la relazione tra la tensione di taglio e la tensione normale:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg}\Phi$$

nella quale $\operatorname{tg}\Phi$ esprime il coefficiente di attrito.

Φ è l'angolo di resistenza a taglio che è una caratteristica propria del terreno; esso misura la capacità che ha il terreno di opporsi allo scorrimento lungo una superficie, ma solamente in presenza di componenti di forza perpendicolari alla superficie stessa (quale è ad esempio la forza di gravità).

La resistenza al taglio di un terreno è dovuta quindi a due componenti principali:

- l'attrito che si esercita nelle superfici di contatto tra i grani;
- l'interconnessione, che tiene conto di come le particelle di terreno sono disposte; essa dipende a sua volta: dalla forma delle particelle, dalla loro disposizione spaziale e dalla distribuzione granulometrica delle particelle stesse.

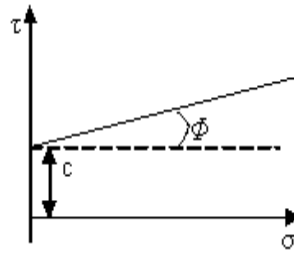
Nel momento in cui un terreno viene rimaneggiato si cambia la distribuzione spaziale dei granelli, quindi si riduce l'effetto dell'interconnessione, (si può arrivare ad annullarlo del tutto) e si tiene conto solo dell'attrito, di conseguenza si riduce il valore dell'angolo di resistenza al taglio; si parla in questo caso di resistenza a taglio ultimo (e si avrà l'angolo di attrito residuo Φ_r).

Per i mezzi coerenti Coulomb propose che ad equilibrare il taglio oltre all'attrito figurasse anche una resistenza detta coesione che si manifesta anche a tensione

normale nulla. La relazione di prima si riscrive nella forma:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg}\Phi$$

rappresentata nella seguente figura:



La svolta decisiva nello studio della resistenza al taglio si ebbe però solamente quando si scoprì che la differenza fondamentale tra le caratteristiche di resistenza al taglio e di comportamento delle sabbie e delle argille, dipendeva non tanto dalle diverse proprietà d'attrito delle particelle quanto dall'enorme differenza di permeabilità.

La chiarificazione di questo fatto ebbe inizio con la scoperta da parte di Terzaghi del principio delle tensioni efficaci, cioè il principio per il quale le forze che agiscono su un elemento di terreno possono essere divise in due parti: quelle che sono trasmesse direttamente da grano a grano o pressioni efficaci (σ'), e quelle che agiscono attraverso il fluido che riempie i vuoti o pressioni neutre (u). Allora la pressione totale σ sarà data da: $\sigma = \sigma' + u$

Quindi la relazione di Coulomb viene modificata nella forma:

$$\tau = c' + (\sigma - u) \operatorname{tg}\Phi' = c' + \sigma' \operatorname{tg}\Phi'$$

nella quale c' e Φ' sono espressi in termini di pressioni efficaci.

In questa nuova forma la relazione di Coulomb-Terzaghi ha assunto validità per una grande varietà di materiali e condizioni di carico.

Il problema venne ulteriormente chiarito associando alla relazione di Coulomb il criterio di rottura di Mohr $\tau = f(\sigma)$ secondo cui si ha rottura quando la tensione di taglio sul piano di rottura diventa una funzione della tensione normale a quel piano; questo criterio è espresso dalla relazione:

$$\sigma_1 - \sigma_3 / 2 = f [(\sigma_1 + \sigma_3)/2]$$

che indica che la rottura ha luogo quando il raggio del cerchio di Mohr delle tensioni $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ è funzione della semisomma delle tensioni principali maggiori e minori $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$, cioè della distanza del centro di questo cerchio dall'origine.

4.3.3. Prove di taglio diretto

Nelle prove di taglio diretto la rottura viene raggiunta nel provino provocando il taglio secondo un piano prestabilito e lo stato tensionale è di tipo edometrico. In questa classe rientrano vari tipi di prove, ma la più usata è quella eseguita con lo strumento di Casagrande, costituito da due telai sovrapposti di cui uno è scorrevole rispetto all'altro; il provino può essere a base quadrata o cilindrico. Il provino è contenuto nei due telai e si applica ad esso uno sforzo di compressione N e attraverso un telaio uno sforzo orizzontale T . La terra si rompe per un valore di T secondo il piano di separazione tra i due telai. Conoscendo N e T e la sezione A del campione si possono determinare i corrispondenti valori di $\sigma = N / A$ e di $\tau = T / A$ con A considerata costante nel corso della prova. Ripetendo la prova per vari campioni con diversi valori di N si ricavano i corrispondenti valori di rottura τ_f (sforzo di taglio alla rottura) e quindi si può tracciare la $\tau_f = c + \sigma \operatorname{tg}\Phi$.

La prova viene condotta a velocità di scorrimento orizzontale controllata misurando il valore di T al crescere dello spostamento. Si può quindi tracciare il diagramma τ -spostamento per diversi valori di N e quindi determinare il valore massimo di τ_f . Questa prova presenta alcuni difetti, quali la distribuzione disuniforme delle tensioni, l'impossibilità di controllare il drenaggio e la diminuzione della superficie di taglio durante la prova.

I valori della resistenza cui si è fatto riferimento riguardano il valore massimo della resistenza al taglio.

Quando la prova è prolungata fino a raggiungere valori molto elevati di deformazione, si osserva una diminuzione della resistenza fino al raggiungimento di un valore indicato come resistenza residua.

Per determinare la resistenza residua, ed i valori di Φ_r corrispondenti, si può ricorrere all'apparecchio di taglio diretto e a quello di taglio torsionale; nella prova di taglio diretto, per arrivare ad una stabilizzazione dei valori della resistenza residua, può essere necessario eseguire 15-20 cicli di andata e ritorno della deformazione di taglio.

La diminuzione della resistenza di picco fino a quella residua nelle argille è legata principalmente al fenomeno di dilatanza, al riorientamento delle particelle nella zona di rottura e alla distruzione di eventuali legami di cementazione.

4.4. Monitoraggio geotecnico tradizionale

4.4.1. Strumenti di monitoraggio: inclinometro

Gli inclinometri sono strumenti utilizzati per misurare la deviazione della verticalità.

Nell'applicazione al monitoraggio dei movimenti di versante, le misure inclinometriche consentono di individuare: la cinematica del movimento (direzione e verso), la presenza o meno di superfici di scorrimento ben definite e la loro geometria (la profondità del piano di scivolamento), lo spostamento orizzontale di alcuni punti significativi del pendio in relazione alla profondità, e la sua variazione nel tempo.

Tipicamente si monitorano frane profonde e superficiali lente, ma possono essere utilizzati anche in frane veloci, però con una breve durata del tubo nel tempo (esistono alternative).

Il sistema inclinometrico è costituito da:

- un tubo di alluminio anodizzato o materiale plastico, detto tubo inclinometrico, dotato di quattro scanalature longitudinali disposte lungo il perimetro a 90° l'una dall'altra. Tale tubo viene installato all'interno di un foro di sondaggio, realizzato in corrispondenza della verticale che interessa monitorare, e vincolato al terreno mediante una miscela cemento-bentonite in modo tale che esso possa deformarsi seguendo i movimenti del terreno;
- una sonda inclinometrica, costituita da un corpo cilindrico dotato di due coppie di rotelline, che scorrendo all'interno delle guide hanno la funzione di impedire che la sonda ruoti attorno al proprio asse, mantenendo l'asse all'interno del piano verticale definito dalla coppia di guide. All'interno della sonda inclinometrica è installato un trasduttore che consente di registrare in ogni istante l'inclinazione dell'asse dello strumento rispetto alla verticale;
- il cavo di collegamento fra la sonda e la centralina, con riportati dei riferimenti termosaldati ogni mezzo metro; serve per calare la sonda alle varie profondità e per effettuare il collegamento elettrico;

- la centralina di acquisizione (normalmente l'acquisizione è a mano ma esistono sistemi digitali), che rileva i valori di misura rendendoli disponibili all'elaboratore;
- inoltre è necessario avere la sonda testimone che viene calata nel tubo prima di effettuare la misura reale per verificare la percorribilità del tubo stesso.

Per l'esecuzione delle misure, dopo aver calato la sonda nel tubo inclinometrico, fino a raggiungere il fondo del tubo, si aspetta che lo strumento raggiunga le condizioni di equilibrio termico con il fluido presente nel tubo (ciò è essenziale per garantire la stabilità e l'accuratezza della misura), quindi si procede al recupero della sonda, arrestandone la risalita ad intervalli regolari di 0.5-1.0 m per rilevare l'inclinazione della sonda, coincidente con quella del tubo inclinometrico nel punto di misura. La prima misura, detta lettura zero, viene utilizzata come riferimento per tutte le letture successive. Con la lettura di zero si ottiene la prova della verticalità, anche per accertare l'accettabilità dell'installazione che deve essere entro il campo di misura della sonda.

Le letture possono essere fatte su due o su quattro guide, ogni metro o ogni mezzo metro, in funzione del grado di precisione richiesta dal contesto e dagli obiettivi del monitoraggio.

La lettura dell'azimut è utile per completezza dell'informazione sul comportamento del corpo di frana, in particolare per determinare il verso del movimento o le direzioni di più movimenti sovrapposti.

Una volta estratta la sonda, le misure vengono ripetute, con le stesse modalità, sulla stessa coppia di guide ruotando la sonda di 180°.

La frequenza di letture, così come l'accuratezza nell'acquisizione, sono funzione del contesto in cui si esegue il monitoraggio.

Le misure vengono trasformate in spostamenti orizzontali e dal confronto delle misure alle varie quote si ricavano l'entità, la direzione e il verso dello spostamento.

La precisione di questo strumento è, generalmente, dell'ordine dei millimetri su 30 m di profondità.

Nel caso della frana di Poggio Ancisa, è stato posizionato un inclinometro nel foro di sondaggio a valle cioè S_v . Le misure effettuate verranno analizzate in seguito (cap. 5).

4.4.2. Strumenti di monitoraggio: piezometro

La misura in sito della pressione interstiziale riveste una importanza fondamentale nella analisi della maggior parte dei problemi di ingegneria geotecnica. Gli strumenti e le tecniche impiegate si differenziano tra loro a seconda delle caratteristiche del terreno nel quale vengono installati. In particolare si distinguono:

- a) piezometri a tubo aperto;
- b) piezometri a cella porosa, tipo Casagrande;
- c) celle piezometriche

I piezometri a tubo aperto (Norton), del tipo impiegati nella frana di Poggio Ancisa, sono strumenti che si utilizzano per la misurazione di livelli idrici in falda e di pressioni. Questi strumenti consistono in un elemento poroso collegato ad una o due tubazioni connesse alla superficie in modo da poter raggiungere condizioni di equilibrio idrostatico con la falda circostante; tale elemento viene infisso nel terreno in perforazioni appositamente realizzate. Il funzionamento è basato sul principio dei vasi comunicanti.

I piezometri a tubo aperto sono costituiti da una tubazione metallica o in PVC, dotata di una sezione terminale forata e ricoperta generalmente da un filtro in geotessile, che viene piazzata alla profondità desiderata (quella dove si vuole conoscere la misura della pressione) mediante una perforazione di sondaggio.

Vanno posti in opera entro un foro rivestito con una tubazione provvisoria, di diametro utile pari almeno al doppio del diametro dei tubi di misura adottati. Una volta eseguita la pulizia del foro, si inserisce la colonna fino a fondo foro; quindi si procede all'immissione, nell'intercapedine colonna - tubazione, di materiale granulare (sabbia, sabbia - ghiaietto), in modo da realizzare un filtro poroso attorno al tratto di colonna fenestrato.

Tale operazione va eseguita ritirando la tubazione provvisoria mano a mano che si procede con l'immissione dall'alto del materiale filtrante, curando di controllare la quota di questo con idonei sistemi di misura. Il bordo inferiore della tubazione dovrà sempre trovarsi al di sotto della quota raggiunta dal materiale di riempimento.

Al termine della formazione del filtro, si procede all'esecuzione di un tappo impermeabile di circa 1 metro di altezza, formato generalmente da palline di bentonite o argilla opportunamente pestellate, per separare la zona filtrante dal tratto di foro superficiale e garantire l'isolamento idraulico.

In superficie, si provvede quindi ad eseguire un idoneo pozzetto per il contenimento e la protezione della testa del piezometro.

La misura si esegue lasciando che l'acqua presente all'interno del tubo si metta in equilibrio con quella presente all'interno del terreno e misurando con una sondina (freatimetro) la profondità della superficie libera all'interno del tubo piezometrico, dopo il raggiungimento delle condizioni di equilibrio.

Dal momento che il diametro tipico dei piezometri a tubo aperto è relativamente grande (50 mm), il raggiungimento delle condizioni di equilibrio richiede tempi di attesa considerevoli anche in terreni a permeabilità non particolarmente bassa. La misura è molto veloce e semplice da eseguire, ma il limite è rappresentato dall'elevato intervallo di tempo necessario perché lo strumento segnali variazioni, specialmente in terreni poco permeabili.

Nel caso della frana di Poggio Ancisa, sono stati posizionati due piezometri nei fori di sondaggio a monte (S_m) e a valle (S_v). Le misure effettuate verranno analizzate in seguito (cap. 5).

4.5. Prospezione sismica tomografica

La tecnica di prospezione sismica a rifrazione prevede la misura dei tempi di propagazione delle onde di compressione (P) e/o di taglio (S) tra il punto di energizzazione in superficie (shot) e vari punti di ricezione (geofoni), disposti sulla superficie topografica.

L'analisi della velocità di propagazione delle onde elastiche nel sottosuolo, longitudinali (V_p) e/o trasversali (V_s), ottenuta conoscendo la distanza shot-ricevitore ed il relativo tempo di arrivo dell'impulso sismico (velocità=spazio/tempo), consente di rilevare in sintesi le proprietà fisiche e meccaniche dei terreni, poiché i valori di V_p e/o V_s sono proporzionali al grado di compattezza dei mezzi percorsi.

L'elaborazione dei dati e le relative rappresentazioni cartografiche, in questo caso, sono state effettuate tramite tecnica analitica tomografica.

L'analisi tomografica, nella quale cioè il sottosuolo della sezione sismica viene suddiviso in minime celle analitiche, consente un'elaborazione più di dettaglio in termini di velocità particellari dell'intero ammasso, permettendo di distinguere mediante rappresentazioni a countour line di isovelocità anche intorni minimi con caratteristiche differenziate per variazioni di consistenza, grado di alterazione, petrografia, granulometria o addensamento.

Quindi, le prospezioni geosismiche a rifrazione, specialmente quelle con tecnica tomografica, mediante la delineazione particolareggiata di aree di discontinuità fisica, possono validamente contribuire alla definizione dello stato di resistenza del materiale, all'individuazione di correlazioni stratigrafico-geomeccaniche e a significative ricostruzioni geomorfologiche.

Riguardo inoltre alla correlazione con i contatti litostratigrafici individuati nei sondaggi geomeccanici, l'identificazione dei livelli o settori, rilevati dalla prospezione geosismica con tecnica tomografica, dipende dal grado di effettiva omogeneità dello spessore litostratigrafico. Cioè molto spesso interferiscono, con effetti opposti, fenomeni di cementazione o di disaddensamento al tetto e/o al letto dello strato geologico, i quali causano rispettivamente un innalzamento e un abbassamento dei valori particellari di velocità sismica, per cui non necessariamente devono coincidere livelli di discontinuità fisica e semplici delimitazioni geologiche. Anzi la prospezione geosismica a rifrazione, specialmente quella con tecnica tomografica, grazie al suo estremo dettaglio analitico, può mettere in luce importanti effetti di anisotropia laterale, anche entro uno stesso livello litostratigrafico, indicati da significative variazioni vertico-laterali dei valori di velocità di propagazione delle onde elastiche, che evidenziano stati particolari di degradazione, non sempre individuabili direttamente dalle

analisi litologiche e geotecniche relative ai limitati prelievi nei punti di perforazione.

Le operazioni di campagna, per consentire l'elaborazione tomografica più di dettaglio, sono analoghe a quelle per rifrazione standard anche se, per i rilievi di sismica tomografica, il numero di registrazioni che vengono realizzate è assai superiore, per consentire di avere a disposizione una quantità di dati tale da coprire, con la giusta geometria dei raggi, e in maniera omogenea, l'intera sezione sismica, in tutti i settori e fino alle profondità adeguate, senza lasciare tratti scoperti o disomogenei.

Viene eseguito il posizionamento dei geofoni sul terreno, si collegano questi tramite morsetti bipolari al cavo elettrico e quest'ultimo al sismografo, si verificano i segnali via radio tra apparato di energizzazione e di ricezione, e infine si realizzano alcuni shot di prova allo scopo di tarare i parametri di acquisizione dello strumento di registrazione dati.

L'elaborazione delle sezioni mediante analisi tomografica viene effettuata per avere un maggior dettaglio in termini di consistenza dell'ammasso e per raggiungere maggiori profondità d'investigazione, sopperendo quindi alla comune mancanza di rifrattori significativi.

La prima procedura di elaborazione tomografica consiste nella ricerca della geometria di percorso dei raggi sismici da ogni punto di energizzazione a ciascun geofono collegato che ha registrato l'impulso proveniente da quello stesso punto.

Si realizzano quindi rappresentazioni (elaborati cartografici) in sezione verticale, mediante mappature a campiture di colore ed a contour line, della distribuzione areale dei parametri geofisici relativi alla velocità delle onde di compressione e/o di taglio.

I risultati delle prove sismiche sulla frana di Poggio Ancisa sono riportati in seguito (cap. 5).

4.6. GPS (*Global Positioning System*)

4.6.1. Introduzione sul sistema GPS

I sistemi di radio-navigazione tramite satelliti artificiali hanno lo scopo di consentire all'utente che sia dotato di un opportuno ricevitore radio, di individuare la propria posizione, la propria velocità e di conoscere con elevata precisione l'istante di tempo in cui avviene la ricezione.

Sebbene in questi ultimi anni la metodologia satellitare sia stata, forse erroneamente, identificata con la metodologia GPS, stiamo assistendo ad un'evoluzione continua dei sistemi (GALILEO sistema europeo, GLONASS sistema russo e GPS), e quindi ci si sta dirigendo, lentamente, ma inevitabilmente, ad una concezione più ampia del rilievo stesso tanto che, già oggi, sembra scorretto parlare di rilievo GPS in luogo di un più appropriato rilievo definito come GNSS (Global Navigation Satellite System) per intendere il complesso dei Sistemi di Navigazione esistenti.

Il sistema Global Positioning System è un sistema di radionavigazione satellitare statunitense operato dalla US Air Force. Il Governo degli Stati Uniti fornisce 2 livelli di servizio GPS: il Precise Positioning Service (PPS), destinato esclusivamente ad utenti privilegiati (militari) e lo Standard Positioning Service (SPS), meno accurato del precedente, fornito liberamente a tutti gli utenti civili.

Segmento utente a parte, il sistema per il resto è costituito da 2 principali segmenti: quello spaziale e quello terrestre di controllo.

La componente spaziale del sistema GPS è costituita da 24 satelliti operativi disposti in 6 piani orbitali ognuno dei quali ne contiene 4. I piani orbitali hanno un'inclinazione rispetto all'equatore di 55° , l'altezza orbitale è di 20200 km ed il periodo orbitale di ogni satellite è di circa 1 ora e 58 minuti.

Tutti i satelliti trasmettono i propri segnali, caratterizzandoli con un particolare codice di identificazione, alle stesse due frequenze L1 ed L2. I satelliti adottati sono a tre assi stabilizzati, sono dotati di pannelli solari e di una batteria per i periodi di eclissi e sono equipaggiati fra l'altro con un orologio atomico.

La componente terrestre del sistema GPS, denominata 'Componente di Controllo', consiste di una stazione di controllo principale, usualmente indicata

con l'acronimo MCS (Master Control Station), di una stazione di controllo di back up (BMCS), di 6 stazioni di monitoraggio, ognuna delle quali indicata con la sigla MS (Monitor Station) e di 4 antenne di terra, note singolarmente con la sigla GA (Ground Antenna).

Le principali attività svolte dalla MCS sono:

- a. Valutare la validità dei dati provenienti dalle stazioni di monitoraggio;
- b. Registrare le prestazioni nel tempo del sistema GPS;
- c. Stimare l'errore negli orologi atomici a bordo dei satelliti;
- d. Calcolare le orbite percorse sulla base delle misure eseguite dalle stazioni di monitoraggio e fare una previsione dell'orbita che ciascun satellite avrà nelle ore successive;
- e. Valutare le reali effemeridi di ogni satellite;
- f. Costruire per ogni satellite il 'messaggio di navigazione', che sarà poi divulgato dal satellite stesso agli utenti.

Ogni 'messaggio di navigazione' è trasmesso dall'antenna di terra che lo invia al satellite interessato.

Il messaggio di navigazione GPS-SPS ricevuto da ogni satellite della costellazione contiene le seguenti informazioni: clock del satellite, sue effemeridi, almanacco della costellazione GPS, informazioni sull'offset tra tempo GPS ed UTC e parametri di correzione per il ritardo ionosferico.

4.6.2. Principi di funzionamento del GPS

Nota la traiettoria del satellite e la legge del moto con la quale il satellite percorre l'orbita, di conseguenza è nota la posizione del satellite ad ogni istante. Per questo il ricevitore risulta collegato a punti fissi, e la sua posizione può essere calcolata con una sorta di intersezione spaziale, se i satelliti sono in numero sufficiente. Dal punto di vista strettamente geometrico sarebbero sufficienti tre satelliti contemporaneamente in vista al ricevitore per poterne determinare la posizione. In realtà le incognite del problema non sono solo le tre coordinate che definiscono la posizione spaziale del centro dell'antenna del ricevitore nel sistema di riferimento adottato, ma, ad ogni istante, si aggiunge una quarta incognita cioè l'offset

dell'orologio del ricevitore dall'orologio satellitare che è un orologio atomico di alta stabilità. In conclusione per determinare la propria posizione il ricevitore deve acquisire contemporaneamente segnali da almeno quattro satelliti.

Questa tecnica, basata sulla misura di un intervallo di tempo (pseudo-range) su un numero sufficiente di satelliti, si chiama posizionamento assoluto del ricevitore, che può avvenire anche in tempo reale.

Il sistema GPS prevede la realizzazione ed il mantenimento di una "scala dei tempi" denominata GPST (GPS Time): su questo tempo vengono sincronizzati gli orologi atomici collocati a bordo dei satelliti.

I satelliti emettono dei segnali elettromagnetici modulati in modo tale da riportare l'indicazione dell'istante GPST nel quale la porzione di segnale è stata emessa; i segnali così marcati sono acquisiti dall'antenna di appositi ricevitori che sono in grado di riconoscere l'istante di emissione di ogni porzione, in quanto sono in grado di confrontare il segnale ricevuto da un particolare satellite con una replica dello stesso segnale realizzata al loro interno.

È possibile così determinare il tempo trascorso tra l'emissione di una porzione del segnale da parte del satellite e la sua ricezione da parte del ricevitore sulla superficie della terra.

La misura del tempo di trasmissione risente della mancata sincronizzazione dell'orologio del ricevitore con quello del satellite, per cui lo pseudo range è falsato da un errore dovuto agli orologi.

Supponendo nota la velocità di propagazione del segnale, la durata della propagazione può essere tradotta in termini di distanze; questa lunghezza viene chiamata anch'essa pseudo-range.

Tutte le componenti del segnale sono controllate dagli orologi atomici cioè oscillatori; questi producono la frequenza fondamentale del sistema nella banda L, cioè $f_0=10.23$ MHz. Da questa frequenza sono derivati due segnali, denominati portanti L1 e L2 che hanno frequenze multiple di quella fondamentale cioè L1 ha $f_1=1575.42$ MHz ed L2 ha $f_2=1227.60$ MHz. La misura della fase del segnale pervenuto da un numero sufficiente di satelliti, su due o più ricevitori in funzione contemporaneamente, consente di determinare in post-processamento la posizione relativa dei ricevitori.

I codici, invece, sono segnali che consistono in una successione di valori binari generati con una particolare frequenza legata alla frequenza fondamentale f_0 . Il codice viene modulato in fase sulla portante che è una semplice senoide: ad ogni cambiamento di stato del codice la portante subisce uno sfasamento di 180° . Modulando la portante con un codice, rimane marcata sulla portante un'informazione riguardo il tempo di emissione perché quando si riceve una certa successione di sfasamenti e si conosce il codice, allora si sa quando questo è stato emesso.

Il segnale GPS è modulato con due codici: codice C/A e codice P(Y).

Nel satellite viene costruito un segnale assai complesso: il messaggio di navigazione viene modulato su entrambe le frequenze, come pure il codice P, mentre il codice destinato all'uso anche civile C/A è modulato solo sulla L1.

4.6.3. Tecniche di rilievo

I rilievi possono essere distinti:

- dal punto di vista del movimento:
 - Rilievo statico: se i ricevitori stazionano sempre nello stesso punto;
 - Rilievo cinematico: se almeno un ricevitore si muove durante l'acquisizione.
- Dal punto di vista delle elaborazioni:
 - In tempo reale: quando i calcoli per la determinazione delle incognite possono essere eseguiti immediatamente dopo l'acquisizione dei dati, e quindi già durante il rilievo di campagna;
 - In post-processamento: quando le elaborazioni sono eseguite dopo aver ultimato le misure di campagna e generalmente dopo aver raccolto i dati di più ricevitori.
- Dal punto di vista del tipo di posizione:
 - Posizionamento assoluto: fornisce le coordinate del ricevitore;
 - Posizionamento differenziale: fornisce le coordinate del ricevitore calcolate tramite le correzioni fornite da un punto fisso in posizione nota nel sistema;

- Posizionamento relativo: fornisce la base, cioè la distanza tra una coppia di ricevitori operanti contemporaneamente.

4.6.4. RTK e reti NRTK

Il rilievo RTK (*Real Time Kinematic*, rilievo GPS cinematico in tempo reale), implementato da diversi anni da quasi tutti i costruttori GPS, è un rilievo effettuato con due ricevitori, uno fisso, denominato base (o *master*), ed uno mobile, denominato *rover*. I due ricevitori devono essere collegati tramite radiomodem o telefono cellulare.

Il ricevitore *master*, posto in un punto opportuno, acquisisce la propria posizione e trasmette un segnale RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*, commissione tecnica per i servizi marini degli Stati Uniti). Il segnale RTCM contiene le cosiddette correzioni, ovvero dei parametri, principalmente atmosferici, essenziali per il posizionamento RTK.

Il ricevitore *rover* è, come dice la parola, un ricevitore mobile, che acquisisce la propria posizione attraverso il calcolo della base *master-rover* (si usano quindi misure di fase) e attraverso le correzioni RTCM inviate dal ricevitore *master*. In questo modo, tramite opportuni calcoli, risolve le ambiguità del rilievo (correzione iono-troposferica, numero intero delle ambiguità, errore dell'orologio), con precisione caratteristica di 1 cm + 1 ppm. Il tempo necessario per il fissaggio delle ambiguità varia con la distanza, ed è tipicamente di 1 minuto per distanze inferiori al chilometro, quindi è possibile evitare il post-processamento ed ottenere la posizione del ricevitore già in campagna.

La possibilità di rilevare punti GPS tramite un sistema base-*rover* è condizionata da diversi aspetti, tra cui la distanza: per distanze superiori ai 20 Km, infatti, il fissaggio delle ambiguità risulta complicato, inoltre le radio hanno una copertura tipica di 3 km, rendendo necessario l'uso di un telefono GSM per il collegamento in caso di distanze maggiori.

Inoltre, il sistema di riferimento di un rilievo RTK dipende dalla posizione del ricevitore *master*, ed è dunque necessario rilevare una serie di punti noti (almeno due per ogni posizione del *master*), per ottenere un rilievo in un sistema di riferimento opportuno.

La precisione è centimetrica, come per il rilievo cinematico post processato, ma bisogna limitare la distanza entro i 10 km per ottenere queste precisioni.

Per servire in modalità RTK zone vaste occorrerebbe disporre di più *master* a distanza opportuna, dell'ordine di 20 km, e l'utente in campagna dovrebbe riferirsi al *master* più vicino.

Allora si è passati da stazioni di riferimento autonome a stazioni interoperanti tra loro (reti NRTK cioè *network real time kinematic*).

Nascono così le stazioni permanenti, che devono sempre e comunque essere inquadrare in un sistema di riferimento. Se, in prima battuta, le stazioni permanenti sono state identificate solo come “base per un *rover*”, con il concetto di rete, si è assistito ad un progressivo movimento alla tecnica “*real time* con approccio di rete”, identificabile, nel senso più ampio possibile del termine, con l'acronimo NRTK.

Le stazioni permanenti in posizione nota, tracciano i satelliti in vista e trasferiscono automaticamente i dati verso il centro di controllo.

Un software residente nel centro di controllo riceve in *real time* i dati acquisiti, esegue un controllo di qualità dei dati, calcola gli effetti sistematici (ionosfera, correzioni orbitali e degli orologi,..) per tutti i satelliti, esegue la modellazione dei sistematismi su tutta l'area e gestisce la disseminazione delle correzioni all'utenza.

La produttività di una rete NRTK dipende da una serie di fattori come il fissaggio delle ambiguità tra stazioni permanenti, il calcolo delle correzioni, l'invio delle correzioni e la ricezione da parte del *rover*.

Per le modalità di rilievo in RTK, a causa della necessità di brevi distanze tra ricevitori base e *rover*, le reti di stazioni di riferimento devono essere molto fitte.

Recentemente i servizi di posizionamento basati su reti permanenti di ricevitori GPS (e più in generale GNSS) sono diventati una realtà in ambito internazionale, in Italia, purtroppo, la situazione pare più complessa poiché lo sviluppo di tali strutture e, di conseguenza, dei servizi offerti, segue un andamento caotico poiché viene lasciato all'iniziativa di singole unità (Università, Regioni, Enti e Collegi locali, ecc..) senza, almeno fino al 2006, un progetto unico ed omogeneo.

Una delle naturali evoluzioni dell'utilizzo di una rete di stazioni permanenti può essere riconosciuta nel loro utilizzo per il posizionamento di precisione in tempo reale, a tal proposito possiamo notare che numerose sono le esperienze che in Italia vanno realizzandosi, visti anche i considerevoli vantaggi che queste strutture consegnano ad un'utenza tecnica.

Per tali motivi l'utenza tecnica ha la necessità di comprendere quali siano i limiti, i benefici e le problematiche legate all'utilizzo di tali sistemi che, indiscutibilmente, hanno come vantaggio diretto una riduzione dei costi dei rilievi. Se omogeneamente dislocate sul territorio e dotate di sistemi di comunicazione dati adeguati, le reti di stazioni permanenti possono costituire il supporto ideale per chi opera in tempo reale e, in alcuni casi, per applicazioni statiche su vaste aree.

Per la realizzazione di tali servizi sono state sviluppate diverse soluzioni, nel corso degli anni, che si differenziano da un lato per la metodologia con cui vengono stimati i modelli di correzione (approcci differenziati, approcci non differenziati) e dall'altro per il modo in cui sono inviate le correzioni al ricevitore mobile (Modello a griglia delle correzioni, stazioni master e stazioni ausiliari, stazioni virtuali, etc.).

La mancanza, in Italia, di un organismo centrale come una Commissione Geodetica Nazionale ha fatto sì che la realtà principale in cui sviluppare i progetti per l'installazione di reti di stazioni permanenti fosse il livello regionale. E' infatti a tale livello che si trovano molti esempi di strutture di stazioni permanenti che sono diventate operative nel corso degli ultimi anni in Italia.

4.6.5. VRS (*Virtual Reference Station*)

VRS è l'acronimo di *Virtual Reference Station* (Stazione di riferimento virtuale) ed è una metodologia di rilievo RTK.

Il sistema VRS nasce per supplire alle limitazioni del rilievo RTK, come la copertura limitata ed il sistema di riferimento.

La realizzazione di stazioni virtuali può essere eseguita in due modi differenti, sia nella modalità di realizzazione che di precisioni raggiungibili:

- Un centro di controllo (*master*), note le osservazioni nelle stazioni permanenti della rete, interpola le correzioni nella posizione approssimata del ricevitore mobile (*rover*), ovvero in una stazione virtuale teoricamente molto vicina alla sua posizione reale. Questo sistema richiede una comunicazione a due vie tra il *rover* e il *master*: il *rover* invia al *master* la sua posizione approssimata (via messaggi NMEA), e dal *master* riceve delle correzioni “personalizzate”.
- Il *master*, note le osservazioni nelle stazioni permanenti della rete, interpola le correzioni in un numero limitato di stazioni virtuali, disposte sul territorio in modo da infittire la rete. Il *rover* applica le correzioni della stazione di riferimento (reale o virtuale) più vicina. Questo sistema è di più semplice gestione, non essendo più necessario conoscere nel *master* la posizione approssimata del *rover*. Le precisioni raggiunte sono tuttavia inferiori.

Le VRS utilizzano gli standard RTCM per la trasmissione delle correzioni. La modalità a due vie è, almeno al momento attuale, la più diffusa, e il meccanismo di funzionamento può essere spiegato come segue.

Il *rover* invia al centro di controllo, dove è installato il software GPSnet, un messaggio NMEA (*National Marine Electronics Association*) con la propria posizione approssimativa attraverso una connessione telefonica.

Per avere una corretta modellazione dei parametri troposferici per la quota della stazione *rover* e, al tempo stesso, ottenere una rapida inizializzazione, è necessario il posizionamento differenziale del *rover*, quindi il centro di controllo accetterà la posizione e risponderà inviando in questa prima fase le correzioni di codice (RTCM) al *rover*.

Appena ricevute il *rover* calcola la propria posizione in DGPS e, tramite NMEA, invia questa definitiva e corretta posizione al centro di controllo.

Avendo così definito la posizione della stazione virtuale, ha inizio la spedizione dei dati in continuo utilizzando il formato RTCM e le nuove correzioni sono calcolate come se fossero provenienti da una stazione di riferimento collocata accanto al *rover*.

La seconda modalità operativa, invece, che consiste nel definire una serie di stazioni virtuali di raffittimento di posizione fissa, è di più semplice realizzazione e non richiede una comunicazione a due vie. In questo caso il *rover* impiega le

correzioni fornite dalla stazione reale o virtuale più vicina ed effettua un rilievo RTK in modalità standard. In questo caso le risorse computazionali e trasmissive richieste al server GPS sono complessivamente inferiori rispetto alla modalità VRS basata sulla definizione di una stazione virtuale per ciascun utente, ma a causa di un inevitabile peggioramento nella qualità delle correzioni, non più ottimizzate per la posizione del punto di misura, si osserva un peggioramento in termini di precisione e nei tempi di inizializzazione.

La comunicazione delle stazioni permanenti con il centro di controllo, e con l'utente finale avviene con metodi che dipendono da vari fattori tra cui sicuramente la quantità dei dati da trasmettere, dal tipo di comunicazione richiesta (bi o monodirezionale).

Molte reti di stazioni permanenti, per il loro funzionamento, possono integrare vari sistemi di trasmissione, a seconda delle necessità specifiche dei propri utenti e del territorio servito.

Le stazioni permanenti e il centro di controllo comunicano sostanzialmente in due modalità:

- con connessione diretta via rete telefonica
- con connessione intranet o internet.

I principali vantaggi del VRS sono dati dalla velocità di fissaggio delle ambiguità, poiché la stazione di riferimento risulta prossima al *rover*, e dal sistema di riferimento, che è dato dalla posizione delle stazioni di riferimento ed è dunque compatibile con la rete IGM95.

Dal punto di vista del rilievo, la precisione di una parte per milione è data dalla capacità del ricevitore *master* di determinare i parametri di correzione atmosferica (ritardo troposferico e ritardo ionosferico, errore delle effemeridi dei satelliti, correzione degli orologi) in una zona limitrofa, e di trasmettere queste informazioni al *rover*.

I parametri di correzione atmosferica sono strettamente dipendenti dal sito ed inoltre hanno una particolare caratteristica: essi dipendono fortemente dalla posizione sulla superficie terrestre, ovvero, come si dice in termine tecnico, sono spazialmente correlati.

È possibile, tramite una rete di stazioni permanenti, la modellazione di questi parametri al fine di definire un “ambiente” univoco per il rilievo GPS su di un’area vasta.

Il particolare vantaggio di questa procedura risiede nella modellizzazione molto avanzata dei parametri di correzione iono-troposferici, che permette di creare un ambiente univoco, nel senso specificato prima, anche ad interdistanza tra le stazioni della rete di 70 Km. L’onere computazionale è a carico del centro di calcolo, che dovrà essere opportunamente dimensionato per gestire le stazioni e gli utenti connessi.

L’accuratezza planimetrica attesa è di 1-2 cm quando la distanza tra le stazioni di riferimento della rete è di circa 70 km. Va comunque preso in considerazione il fatto che la distanza tra le stazioni di riferimento dipende anche dalla collocazione geografica della rete. Per esempio, aree soggette ad elevata attività ionosferica, richiederebbero una rete più fitta.

Perché suggeriamo di non utilizzare *baseline* superiori a 70 Km?

La spiegazione è semplice: non ci sarebbe alcun problema per il software per quanto riguarda la modellizzazione degli errori in una rete con *baseline* maggiori ma, il problema è sul lato del *rover*: la tecnologia *rover* dei produttori di sistemi RTK non sarebbe in grado di lavorare a tali distanze in RTK garantendo le stesse accuratezze (1-2 cm) o affidabilità. Numerosi test hanno confermato questo problema.

Quindi in conclusione, avendo delle *baseline* nell’intera rete GPS poco più lunghe di 70 km, non ci sarebbero grandi problemi per i ricevitori *rover* ma per aver dati sicuri ed avere la stessa accuratezza all’interno di tutta la rete suggeriamo di utilizzare *baseline* tra le stazioni di riferimento più corte di 70 km (quando la regione è abbastanza pianeggiante). In situazioni più tortuose viene suggerita una distanza di circa 50 km (fonte: www.trimble.com).

4.7. GBInSAR

Radar è l’acronimo di *RADio Detection And Ranging*: è uno strumento in grado di rilevare la presenza di oggetti e di misurare la distanza tra l’apparecchio e un oggetto.

Negli anni '90 e negli ultimi anni, un grosso sforzo è stato fatto per lo sviluppo di nuovi sistemi per il monitoraggio delle frane e, in particolare, una tecnica più delle altre ha visto un grande interesse: l'interferometria SAR (*Synthetic Aperture Radar*).

Questa tecnica di telerilevamento, chiamata con l'acronimo generale di InSAR, è stata impiegata per la misurazione di deformazioni del suolo dal 1990, grazie allo sviluppo di specifiche tecniche di elaborazione dati quali la convenzionale Interferometria differenziale SAR (DInSAR) e, più recentemente, le tecniche multi-interferogramma DInSAR come i *Permanent Scatterers* (PS), la *small baseline subset* (SBAS) e la *Interferometric Point Target Analysis* (IPTA). Queste tecniche possono essere utilizzate per elaborare i dati SAR recuperati da sensori installati a bordo di satelliti o da sensori installati su sistemi a terra.

I due diversi approcci sono:

- l'interferometria differenziale SAR spaziale (SB-DInSAR);
- l'interferometria SAR a terra (GB-InSAR).

4.7.1. Utilizzi del GBInSAR

Il radar a terra ad apertura sintetica con tecnica interferometrica (GBInSAR) è un innovativo metodo di telerilevamento che consente una misura molto accurata di spostamenti di terra su vaste aree. Si usa una combinazione di attrezzature e metodi che possono generare mappe raster bidimensionali degli spostamenti (e/o velocità) di un pendio irradiato, da una posizione remota, con onde elettromagnetiche coprendo una superficie di diversi km² e ottenendo una precisione sub-millimetrica (equivalente o addirittura migliore della tradizionale strumentazione geotecnica e topografica). Le mappe di uscita sono fatte da migliaia e decine di migliaia di pixel, ognuna con la sua serie temporale di spostamenti. La sua capacità di fornire misure di spostamento con precisione sub-millimetrica su aree larghe fino a qualche chilometro quadrato, in combinazione con l'alta frequenza di acquisizione temporale, con una risoluzione al suolo di un paio di metri e con la sua capacità di monitorare anche i movimenti relativamente veloci, sono certamente le ragioni principali che contribuiscono alla sua attrattiva. Questa grande quantità di informazioni e la distribuzione spaziale dei dati sono in

genere fortemente utili per la comprensione dei fenomeni, per il monitoraggio in tempo reale, e, infine, per il processo decisionale.

Il monitoraggio periodico con GBInSAR dei fenomeni franosi rappresenta un approccio promettente per la valutazione a lungo termine delle condizioni di instabilità, specialmente in quelle aree dove proprietà e infrastrutture sono esposte a rischio.

Inoltre, il monitoraggio GBInSAR durante le emergenze, ha dimostrato di essere uno strumento estremamente utile per gli scopi della protezione civile. I dati forniti dal sistema definiscono un quadro chiaro del meccanismo della frana e consentono la definizione, con alta precisione, dei confini del movimento di massa e dell'evoluzione del movimento nello spazio e nel tempo. Durante le emergenze il sistema può essere utilizzato dalle autorità pubbliche per definire le misure temporanee per ridurre e gestire il rischio e per elaborare piani di emergenza, che di solito sono procedure condizionate dall'incertezza dell'evoluzione a breve termine del fenomeno.

Il monitoraggio con questa tecnica può essere eseguito:

- ✓ su terreni: per frane, cedimenti, miniere a cielo aperto, assestamenti del terreno e degli edifici in seguito ad opere ingegneristiche, pendii vulcanici, ghiacciai, spostamenti di tunnel.
- ✓ su strutture: per ponti, dighe, torri o beni culturali.

4.7.2. Descrizione dello strumento e sua installazione

L'apparecchiatura GBInSAR prodotta da IDS (Ingegneria dei Sistemi, Pisa, Italia) è costituita da un radar portatile che scorre lungo una rotaia durante le sue misurazioni.

Questo sistema, chiamato IBIS ha due tipi di applicazioni che possono essere suddivise in:

- Applicazioni di monitoraggio statico: misura spostamenti lenti (configurazione S e L)
- Applicazioni di monitoraggio dinamico: misura di vibrazioni o di spostamenti temporanei (configurazione S)

Il sistema utilizzato nel nostro caso è l'IBIS-L, ed è particolarmente adatto per applicazioni di monitoraggio di strutture e di terreni, con l'obiettivo di rilevare spostamenti in lunghi periodi di tempo.

I componenti principali dello strumento sono:

- modulo sensore: questo genera, trasmette e riceve il segnale elettromagnetico. Il modulo sensore è installato sullo scanner lineare: il movimento del sensore sullo scanner lineare permette l'uso della tecnica SAR per ottenere un'immagine bidimensionale dello scenario. Questo modulo è dotato di un'interfaccia USB per il collegamento con il PC di controllo e un'interfaccia per il modulo di posizionamento;
- *Linear Scanner*: costituito da un binario, lungo il quale un cursore viene spostato passo-passo sotto il controllo di un motore;
- Il PC portatile: installato con il software di gestione del sistema. Questo è usato per configurare i parametri di acquisizione, per gestire le misure e visualizzare i risultati in tempo reale;
- Alimentazione: si alimenta il sistema attraverso una batteria o con una fonte di energia esterna.

Il modulo sensore è illustrato in figura 4.2:

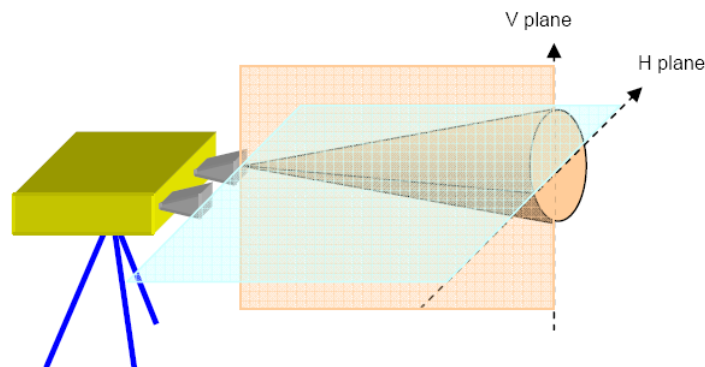


Fig. 4.2 – Modulo sensore e fascio dell'antenna del GBInSAR

Con il termine lobo principale dell'antenna (o fascio) si intende la zona angolare entro il quale l'antenna concentra la maggior parte della potenza di cui è fornita. Il lobo principale di un'antenna può essere schematicamente rappresentato come un tronco di cono con una base ellittica, dove il vertice del cono è posizionato in corrispondenza dell'antenna. La base del cono è ellittica dato che le antenne

hanno, in genere, fasci con diverse ampiezze angolari nel piano verticale (V) e in quello orizzontale (H).

Il sistema IBIS-L a banda Ku (banda con frequenza 17.1 – 17.3 GHz) è dotato di due antenne identiche IBIS-H20 che hanno le seguenti ampiezze caratteristiche del fascio:

Banda Ku	piano orizzontale	piano verticale
-3 dB	17°	15°
-10 dB	34°	45°

Per il sistema a banda X (banda con frequenza 10.5 – 10.6 GHz) le ampiezze caratteristiche del fascio sono:

Banda X	piano orizzontale	piano verticale
-3 dB	15°	15°
-10 dB	27°	25°

Lo scanner lineare è costituito da:

- Un binario lungo 2,5 m coperto con fogli di alluminio;
- Un carrello mosso lungo il binario da un motore passo-passo, con un massimo spostamento di 2 m;
- Un sistema di fissaggio ed elevazione da installare sul carrello.

Il sistema di fissaggio ed elevazione è il supporto per il sensore e permette al principale fascio dell'antenna di essere orientato verso l'area da osservare.

Lo scanner lineare viene utilizzato per spostare il sensore lungo il binario ortogonalmente alla direzione irradiante (asse dell'antenna). L'orientamento dello scanner lineare dovrebbe essere scelto in funzione dello scenario da misurare e della larghezza del fascio di antenna, questo per assicurarsi che l'intero scenario ricada all'interno del campo di visuale dello strumento.

Per il monitoraggio a lungo termine lo strumento deve essere posizionato su una base stabile di calcestruzzo, orizzontale, con dimensioni minime di 2000 mm x 800 mm x 200 mm (lunghezza, larghezza e spessore). Queste sono le dimensioni minime che offrono spazio sufficiente per orientare correttamente lo scanner lineare e per fornire una base sufficientemente solida in cemento. Per la facilità di installazione e uso, la base deve avere una altezza di circa 600-700 mm.

Il sistema di fissaggio dello scanner lineare a terra è stato progettato per permettere che esso possa essere accuratamente riposizionato in modo rapido e

semplice. Sono stati usati supporti speciali per permettere la rimozione e il riposizionamento dello strumento con una precisione sub-millimetrica. In caso di movimenti franosi lenti questo consente che lo strumento possa essere usato a intervalli, per un periodo di alcuni mesi, senza doverlo lasciare posizionato all'aperto per l'intero periodo.

Infatti possono essere usati due diversi modi di installazione:

- 1) installazione per indagine unica;
- 2) installazione per indagine periodica.

Il primo caso è una tipica installazione di sicurezza dove lo strumento è montato e lasciato in sede per la durata della fase d'emergenza. Nel secondo caso si suppone di reinstallare periodicamente lo strumento e unire qualsiasi nuova indagine con le precedenti. L'installazione periodica è più adatta per rilevare frane in lento movimento durante la loro fase dormiente.

L'installazione del sistema richiede circa 2 ore di lavoro e la procedura può essere suddivisa in due parti:

- a) Installazione dello scanner lineare;
- b) Installazione del sensore e connessione dei moduli.

La procedura inizia con una prima ispezione del sito, durante la quale deve essere stabilita la localizzazione per l'installazione, e termina con l'installazione dello scanner lineare.

Le caratteristiche di una buona posizione del radar sono le seguenti:

- essere in direzione dello spostamento da misurare;
- disporre di spazio sufficiente per operare in sicurezza e per permettere il posizionamento dello scanner lineare, del modulo di alimentazione e il movimento degli operatori;
- essere facilmente accessibile per il trasporto dello strumento visto il suo peso;
- avere un alimentatore esterno. Se questo è impossibile, sarà necessario fornire un generatore di corrente.

Da un punto di vista applicativo, il sensore deve rilevare in modo che lo scenario di interesse ricada all'interno del fascio dell'antenna. Pertanto, la distanza a cui lo strumento deve essere posizionato e la sua inclinazione devono essere scelte in funzione del fascio di antenna che si utilizza.

Il sistema IBIS-L offre i seguenti vantaggi rispetto ai sistemi di monitoraggio attualmente disponibili (GPS, estensimetri, inclinometri etc.):

- Permette all'operatore di eseguire il monitoraggio remoto della zona (telerilevamento), senza la necessità di accedere all'area per installare sensori o obiettivi ottici;
- Fornisce una mappa degli spostamenti pressochè continua di tutta la zona. Il sistema IBIS-L misura simultaneamente tutti gli spostamenti di tutta la zona illuminata dal fascio di antenna, che può coprire fino a centinaia di migliaia di metri quadrati;
- Misura direttamente gli spostamenti del territorio di interesse quasi in tempo reale ed ha un tempo di acquisizione delle immagini dell'ordine di 5 minuti.
- Misura gli spostamenti direttamente, non come una quantità derivata, e con una precisione fino a 0.1 mm;
- Può essere usato sia di giorno che di notte e in quasi tutte le condizioni atmosferiche;
- Non richiede la presenza continua di un operatore e può essere controllato da connessione wireless.

Questa possibilità di eseguire anche il controllo a lunga distanza, senza bisogno di installare sensori, significa che le indagini possono essere eseguite anche quando:

- L'area di interesse non è accessibile;
- L'area di interesse è particolarmente grande e, pertanto, richiederebbe molti sensori in situ.

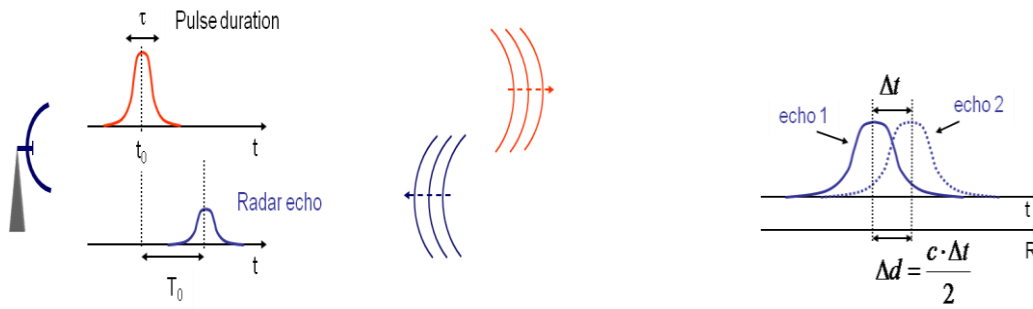
Inoltre, quando l'attività di monitoraggio è tenuta a garantire la sicurezza delle persone nelle situazioni di emergenza, la possibilità di effettuare il monitoraggio a distanza può essere essenziale per la tutela della vita.

4.7.3. Funzionamento del GBInSAR

Il funzionamento del GBInSAR è basato sulle seguenti tecniche:

- SAR (*Synthetic Aperture Radar*);
- SF-CW (*Stepped Frequency – Continuous Wave*);
- Interferometria;

Principio di funzionamento dell'impulso radar:



L'equazione per la determinazione della distanza radar-bersaglio è:

$$\Delta d = \frac{c \cdot \Delta t}{2}$$

Dove:

c : è la velocità della luce;

Δt : è l'intervallo di tempo tra l'arrivo dell'onda 1 e l'arrivo dell'onda 2.

La tecnica di funzionamento SF-CW permette al sistema IBIS di ottenere un'immagine unidimensionale dello scenario di interesse ad alta risoluzione a distanza grazie alla trasmissione di una serie di onde elettromagnetiche di lunga durata (*Continuous Wave*) a frequenze diverse (*Stepped Frequency*).

Il sistema IBIS-L combina la tecnica SF-CW con il SAR per ottenere un'immagine bidimensionale della zona illuminata dal fascio di antenna, con risoluzione in-range (lungo la direzione del fascio dell'antenna) e cross-range (ortogonalmente alla direzione del fascio dell'antenna).

Utilizzando questa tecnica, il sistema può raggiungere una risoluzione in distanza (in-range) di 75 cm in modo indipendente dalla massima distanza misurabile.

La risoluzione a distanza al suolo Δx (o risoluzione cross-range), cioè la capacità di distinguere due obiettivi al suolo, è garantita attraverso l'uso della tecnica SAR che, grazie al movimento del sensore lungo il binario, offre una risoluzione angolare di 4.5 mrad per il sistema di banda Ku o 7.1 mrad per quello di banda X. Questa risoluzione dipende dall'angolo di visualizzazione del sensore (α) e dalla risoluzione a distanza (Δr) (Fig. 4.3); da una semplice proiezione geometrica si ha:

$$\Delta x = \frac{\Delta r}{\cos \alpha} = \frac{\Delta r \cdot R}{X}$$

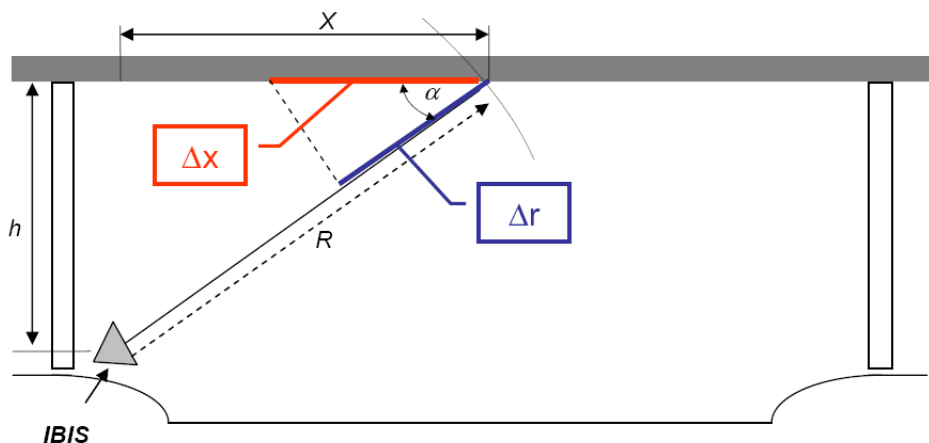


Fig. 4.3 – Risoluzione al suolo (cross-range)

L'uso della tecnica SF-CW permette di conservare la stessa risoluzione a distanza anche se la distanza dallo scenario aumenta: ogni pixel di risoluzione (range bin cioè la risoluzione di tutta l'area) è considerato come se fosse un sensore di spostamento virtuale (Fig. 4.4).

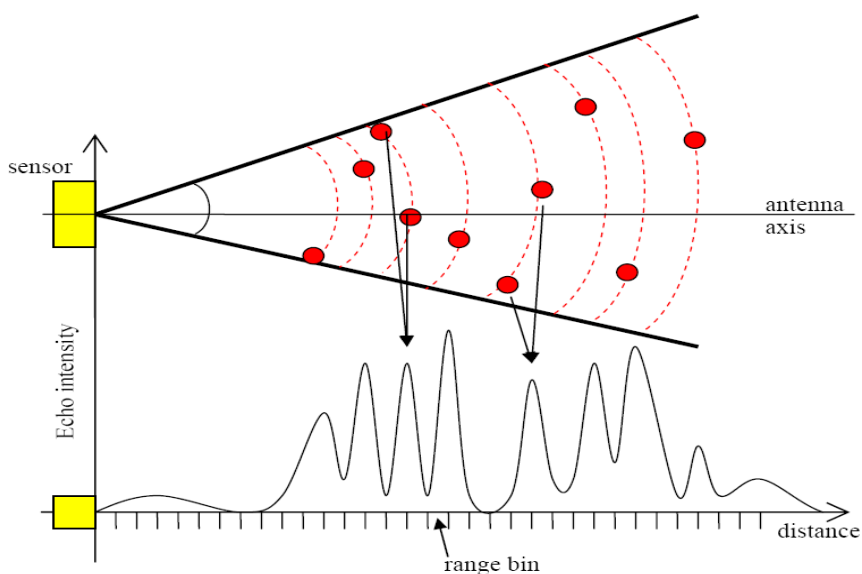


Fig. 4.4 – Sensori di spostamento virtuali

La combinazione di risoluzione in-range e cross-range porta a una immagine radar organizzata come pixel di dimensioni:

- Dimensione in-range: 0.75 m
- Dimensione cross-range: 4.5 o 7.1 mrad per la distanza.

La figura 4.5 mostra un esempio di una griglia di risoluzione.

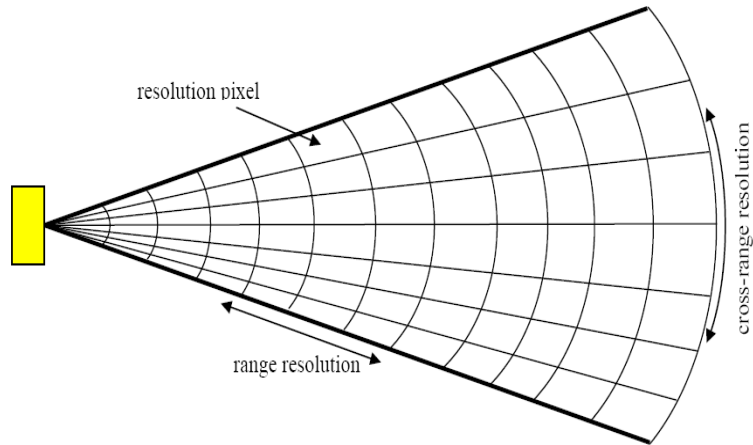


Fig. 4.5 – Griglia di risoluzione

La risposta di ogni pixel di risoluzione contiene:

- L'ampiezza del segnale di eco, legata alla riflettività dello scenario all'interno del pixel;
- La fase del segnale di eco, legata alla distanza tra il sensore e il pixel.

La mappa viene normalmente visualizzata su un diagramma cartesiano (x, y), in cui i pixel non corrispondono ai pixel di risoluzione.

L'interferometria è una tecnica radar che consente di misurare lo spostamento di un oggetto confrontando le informazioni di fase delle onde elettromagnetiche riflesse dall'oggetto colpito in istanti diversi di tempo. In generale, le onde elettromagnetiche riflesse da un oggetto differiscono in termini di informazione di fase, in base alle variazioni nella posizione dell'oggetto rispetto alla sorgente di emissione e alle variazioni nella ricezione delle onde elettromagnetiche.

La misura di spostamento (d) dell'oggetto in esame deriva dall'informazione di variazione di fase ($\Delta\varphi$), misurata dal sensore radar nei vari momenti di acquisizione. La misura di spostamento e la misura di variazione di fase sono legate dalla seguente relazione:

$$d = -\frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta\varphi = -\frac{\lambda}{4\pi} \cdot (\varphi_2 - \varphi_1)$$

Bisogna ricordare che il sistema misura contemporaneamente lo spostamento radiale di tutti i pixel della zona illuminata dal fascio di antenna.

Confrontando le informazioni di fasi dalle immagini 1 e 2, il sistema può misurare lo spostamento radiale di tutti i pixel che compongono l'area illuminata dal fascio di antenna del sistema.

La figura 4.6 illustra il principio di funzionamento alla base della tecnica interferometrica.

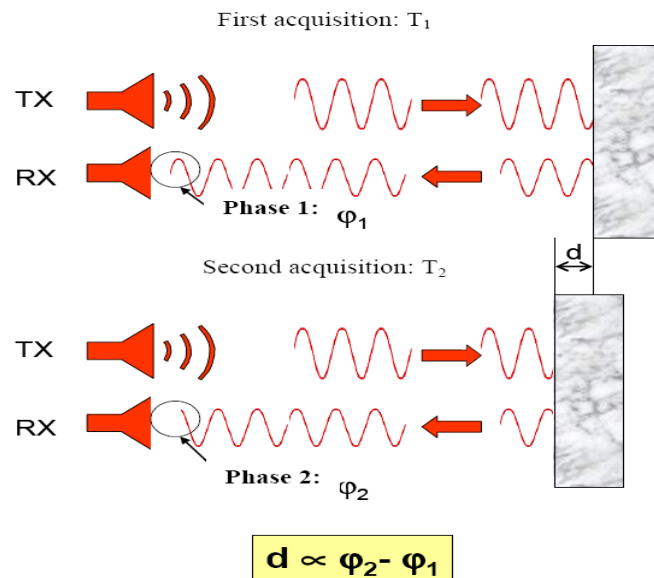


Fig. 4.6 – Funzionamento della tecnica interferometrica

L'ambiguità di fase determina il massimo spostamento misurabile tra due consecutive acquisizioni a: $d = \pm \frac{\lambda}{4} = 4.38 \text{ mm}$

Si ha \pm in quanto lo spostamento può essere in direzione dello strumento, come in figura 4.6, o in direzione opposta.

È importante sottolineare che il sistema è in grado di misurare gli spostamenti lungo la direzione della vista, cioè gli spostamenti nella direzione che unisce lo strumento con il pixel sullo scenario (Line of Sight, LOS).

La figura 4.7 illustra l'uso del sistema per monitorare cedimenti del terreno.

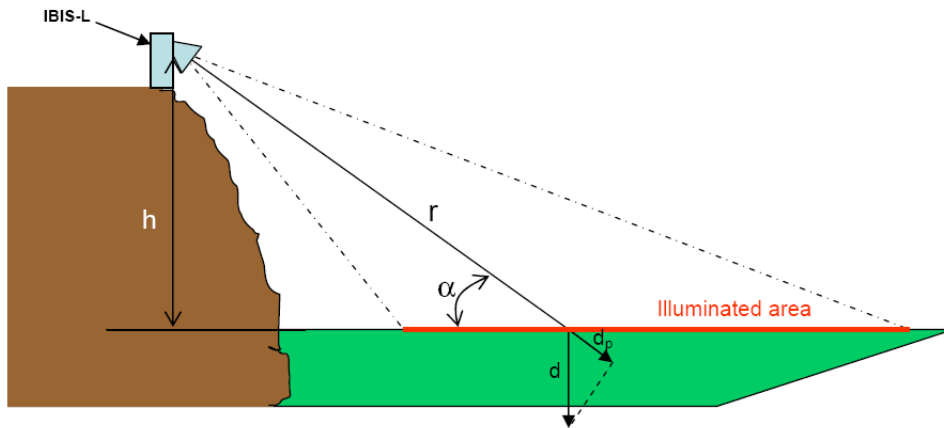


Fig. 4.7 – Uso di IBIS-L per monitorare i cedimenti

Il sistema misura lo spostamento dp (spostamento radiale), da cui si può trovare l'effettivo punto di spostamento d , facendo alcune considerazioni geometriche:

$$dp = d \cdot \text{sen}\alpha$$

tuttavia, poiché $h = r \cdot \text{sen}\alpha$, si ha che:

$$d = dp \frac{r}{h}$$

Il valore di spostamento misurato con la tecnica interferometrica ha una precisione che dipende dall'intensità dell'eco registrato per un dato range bin (nel caso unidimensionale) o pixel (in caso bidimensionale), o meglio, la precisione dipende dal rapporto segnale/rumore del punto preso in considerazione. La precisione teorica dello strumento può essere anche di un millesimo di millimetro. Per ovvi motivi pratici, questa precisione non è mai realmente possibile, ma nel migliore dei casi, può essere raggiunta una precisione di 0.1 mm quando si misurano delle frane.

In teoria, non ci sono limiti per quanto riguarda la massima distanza osservabile. Tutto dipende della modalità di propagazione delle onde elettromagnetiche, le quali riducono la densità di potenza del quadrato della distanza percorsa. Ciò significa che più si va lontano dal sensore, più è basso il rapporto segnale/rumore dei segnali ricevuti. Da un punto di vista operativo, ciò significa che la distanza massima osservabile dipende dalla riflettività dello scenario e dalla precisione richiesta dalla misura. In realtà, la risposta dello scenario può essere migliorata con l'installazione di riflettori artificiali in punti specifici da monitorare. Questo

migliora il rapporto segnale/rumore dovuto alla perfezionata riflettività del bersaglio.

Dal momento che la tecnica radar si avvale della propagazione delle onde elettromagnetiche, le misure effettuate sono influenzate dalle condizioni ambientali, che sono principalmente i valori di temperatura e di umidità dell'aria. L'influenza delle condizioni ambientali non può essere ignorata quando si eseguono misure statiche nel corso di un lungo periodo di tempo, soprattutto per quelle effettuate in una grande distanza, come nel caso del monitoraggio delle frane. In questo caso, i tempi di funzionamento sono comparabili con il tempo di variazione delle condizioni atmosferiche. Questi effetti ambientali producono spostamenti virtuali nelle rilevazioni radar, dovuti interamente alla variazioni delle condizioni ambientali, tra un'immagine e la successiva. È necessario correggere questo effetto confrontando lo spostamento dell'intero scenario con lo spostamento virtuale di alcuni punti fissi. Una tecnica di correzione (costituita da algoritmi complessi che combinano, filtrano e confrontano le immagini), se ben applicata, può permettere di ottenere una precisione, nel correggere gli spostamenti virtuali dovuti alle variazioni atmosferiche, dell'ordine di pochi decimi di millimetro.

La prestazione del sistema IBIS dipende, quindi, dal tipo di configurazione utilizzata e dalle condizioni operative di misura (soprattutto legate alla riflettività della superficie sotto inchiesta). Comunque le migliori caratteristiche di performance possono essere definite come segue:

→ Per il sistema di banda Ku:

- Massima distanza operativa: 4000 m;
- Risoluzione delle immagini a distanza: 0.75m;
- Risoluzione angolare: 4.3 mrad;
- Precisione nella misurazione degli spostamenti nella direzione di visualizzazione: 0.1 mm (per punti con una buona riflettività e a seconda dell'impatto della variazione atmosferica sulla misura).

→ Per il sistema di banda X:

- Massima distanza operativa: 4000 m;
- Risoluzione delle immagini a distanza: 1.5m;
- Risoluzione angolare: 7.1 mrad;

- Precisione nella misurazione degli spostamenti nella direzione di visualizzazione: 0.1 mm (per punti con una buona riflettività e a seconda dell'impatto della variazione atmosferica sulla misura).

L'elaborazione dei dati del sistema può essere effettuata utilizzando due procedure differenti:

- 1) Procedura di Real-Time (RT);
- 2) Procedura ottimizzata (OPT).

La prima procedura si propone di ottenere dati utili nel minor tempo possibile. Questo è il caso di una situazione di emergenza quando la protezione civile ha urgente bisogno di conoscere gli spostamenti della frana o le velocità per il processo decisionale. La seconda procedura utilizza i dati raccolti in un lasso di tempo più lungo e un criterio più selettivo. Le procedure ottimizzate trovano la loro applicazione "lontano dalla fase di emergenza", quando la priorità è l'affidabilità dei dati. Quando la velocità di spostamento è relativamente elevata (dell'ordine di mm/giorno), non è essenziale un'analisi raffinata e anche la procedura in tempo reale fornisce risultati sensati.

4.8. Verifiche di stabilità all'equilibrio limite

Quando il piano campagna non è orizzontale, come nel caso dei pendii naturali o delle scarpate artificiali, le tensioni di taglio indotte dalle forze gravitazionali tendono a smuovere il terreno stesso lungo potenziali superfici di scorrimento.

Se sussiste l'equilibrio, la resistenza al taglio, mobilitabile lungo ogni possibile superficie, supera le tensioni tangenziali indotte dalla gravità. Quest'ultima non costituisce però l'unica causa che induce i movimenti. Forze destabilizzanti sono introdotte dai terremoti, dalle oscillazioni di falda che producono variazioni dello stato tensionale e della resistenza disponibile, dalle forze di filtrazione che giocano un ruolo più importante di quello normalmente attribuito.

L'analisi di stabilità dei pendii viene normalmente affrontata con metodi all'equilibrio limite globale che studiano le condizioni di equilibrio di volumi di terreno delimitati inferiormente da superfici di scorrimento. L'analisi è limitata a detti volumi, senza esaminare lo stato tensionale e deformativo dell'intero pendio,

valutando il solo stato tensionale lungo le potenziali superfici di scorrimento che limitano inferiormente i volumi presi in esame e lungo le quali viene definito il coefficiente di sicurezza allo scorrimento.

Il metodo dell'equilibrio limite è di gran lunga il metodo di analisi di stabilità più utilizzato in campo geologico-tecnico.

In generale, il calcolo di una soluzione all'equilibrio limite si svolge in tre fasi:

- 1) Si individua un meccanismo arbitrario di collasso del versante e si traccia una superficie di scorrimento di tentativo; essa può consistere di una qualsiasi combinazione di linee rette o curve assemblate tra loro in modo da riprodurre il meccanismo di rottura ipotizzato.
- 2) Si calcola l'equilibrio statico della massa risolvendo le forze o i momenti e calcolando la resistenza mobilizzata lungo la superficie predefinita.
- 3) Si esamina l'equilibrio statico rispetto ad un'altra superficie fino a trovare il cinematico critico per il problema in esame.

In pratica, il metodo consiste nel calcolo delle forze agenti lungo una superficie di scorrimento predefinita e delle resistenze disponibili lungo la stessa superficie. La condizione di equilibrio limite è verificata quando le forze agenti uguagliano quelle resistenti: in questo caso lo stato tensionale medio lungo la superficie di scorrimento giace sull'involuppo di rottura del terreno ed il versante si trova sul punto di collasso.

Il metodo dell'equilibrio limite si basa sulle seguenti assunzioni:

- la massa di terreno è considerata perfettamente rigida;
- la rottura del versante avviene per scorrimento di una massa di terreno lungo una superficie;
- al momento della rottura, la resistenza del terreno viene completamente mobilizzata lungo l'intera superficie.

Tali assunzioni permettono una risoluzione agevole e rapida dei problemi di stabilità, ma introducono alcune importanti limitazioni che fanno del metodo dell'equilibrio limite uno strumento insufficiente per riprodurre in dettaglio il comportamento meccanico del versante.

La verifica di stabilità si conduce, quindi, esaminando un certo numero di possibili superfici di scivolamento per ricercare quella per la quale si ha il minimo

rapporto fra la resistenza al taglio disponibile e la tensione di taglio mobilitata. Il valore di questo rapporto costituisce il coefficiente di sicurezza del pendio cioè:

$$F_S = \frac{\text{resistenze disponibili}}{\text{resistenze mobilizzate}} = \frac{\tau_R}{\tau_m}$$

Dove:

τ_R : resistenza al taglio media disponibile lungo la superficie di scorrimento;

τ_m : tensione di taglio media mobilitata, ossia lo sforzo tangenziale medio che equilibra il peso del volume di terreno e degli eventuali carichi applicati lungo la superficie di scorrimento.

Per un'analisi in termini di tensioni efficaci, le resistenze disponibili τ_R possono essere espresse dal criterio di rottura di Mohr-Coulomb in condizioni drenate:

$$\tau_R = c' + (\sigma - u) \operatorname{tg} \phi'$$

Per un'analisi in termini di tensioni totali, le resistenze disponibili sono date invece dal criterio di rottura di Mohr-Coulomb in condizioni non drenate:

$$\tau_R = c_u$$

Come si può notare, le pressioni dell'acqua non sono richieste in questo tipo di analisi.

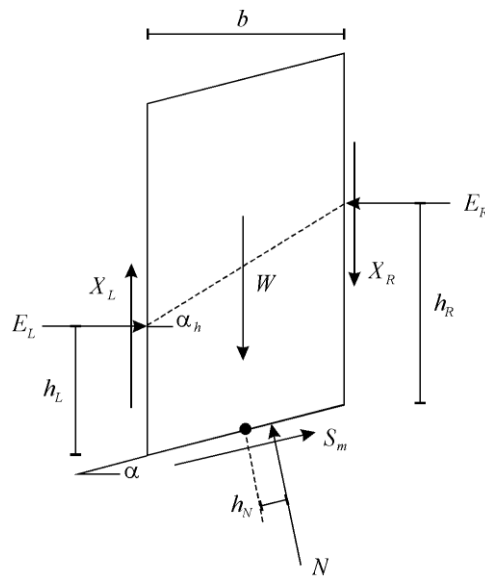
L'entità delle forze di taglio agenti si ricava combinando l'equazione del fattore di sicurezza F_S e quella delle resistenze disponibili in termini di condizioni drenate (in tensioni efficaci):

$$S_m = \frac{\tau_R \beta}{F_S} = \frac{c' \beta + (N - u \beta) \operatorname{tg} \phi'}{F_S}$$

La superficie critica è quella caratterizzata dal minimo valore del coefficiente di sicurezza. La ricerca della superficie critica viene condotta in modo diverso in funzione delle condizioni geomorfologiche, litologiche, geomeccaniche e di stabilità del sito.

Con i metodi dell'equilibrio limite globale si tendono a valutare, in termini discreti, lo stato tensionale all'interno della massa e lungo la superficie di scorrimento (curvilinea). In generale, la massa di terreno presa in considerazione è compresa tra il piano campagna e la superficie di rottura (ipotizzata o reale) e viene suddivisa in un numero discreto di conci o strisce verticali.

Le forze agenti su un generico concio i-esimo sono rappresentate in figura:



Dove:

W = peso totale del concio di larghezza b e altezza h ;

N = forza totale normale alla base del concio;

S_m = forza di taglio agente (mobilizzata) alla base di ogni concio;

E = forza normale interconcio;

X = forza di taglio interconcio;

α = angolo di inclinazione della base del concio;

β = lunghezza della base del concio.

Le equazioni della statica che possono essere usate per determinare le forze in gioco (N , S_m) sono tre:

→ Equilibrio delle forze verticali: $\sum F_v = 0$

→ Equilibrio delle forze orizzontali: $\sum F_h = 0$

→ Equilibrio dei momenti: $\sum M = 0$

Derivandole per un singolo concio si ha:

Equilibrio delle forze verticali:

$$-W + (X_L - X_R) + N \cos \alpha + S_m \sin \alpha = 0$$

Equilibrio delle forze orizzontali:

$$(E_L - E_R) - N \sin \alpha + S_m \cos \alpha = 0$$

Equilibrio dei momenti:

$$E_L h_L - E_R h_R + X_L \frac{b}{2} + X_R \frac{b}{2} - N h_N = 0$$

Se dividiamo la massa in n conci abbiamo: n equazioni di equilibrio delle forze orizzontali, n equazioni di equilibrio delle forze verticali, n equazioni di equilibrio dei momenti, n equazioni del fattore di sicurezza per un totale di $4n$ equazioni.

Abbiamo però le seguenti incognite: n valori della risultante N , n valori di h_N (il punto di applicazione di N non è noto), n valori di S_m , sforzo di taglio agente alla base del concio, $n - 1$ valori di X ($X_R^i = X_L^{i+1}$ per il principio di azione-reazione, ed inoltre le forze interconco esterno per il primo ed ultimo concio sono pari a zero), $n - 1$ valori di E (vale lo stesso discorso fatto per le X), $n - 1$ valori di h (il punto di applicazione di E non è noto), 1 Fattore di sicurezza F_S per un totale di $6n - 2$ incognite.

Il problema è quindi indeterminato e sono necessarie delle assunzioni.

Quelle comunemente adottate riguardano:

- a. il punto di applicazione della forza N , assunta al centro della base del concio (elimino così n incognite);
- b. l'inclinazione delle forze interconco.

Se l'inclinazione delle forze interconco è considerata nota si ha:

$$\frac{X}{E} = \text{costante} = \lambda f(x)$$

Ho quindi un'altra equazione ed il numero totale di equazioni diventa $5n$. Avendo eliminato n incognite con la prima assunzione ed aggiunto l'incognita λ con la seconda, si arriva a $5n - 1$ incognite complessive. Il problema è così sovradeterminato di 1.

Nella formulazione generale del metodo dell'equilibrio limite vengono utilizzate 4 equazioni, tre che esprimono l'equilibrio del concio ed una che permette di esprimere lo sforzo di taglio S_m come rapporto tra forza resistente e fattore di sicurezza:

- 1) Equilibrio delle forze verticali di ogni concio già vista sopra e da cui si ricava N ;
- 2) Equilibrio delle forze orizzontali di ogni concio già vista sopra e da cui si ricava E ;
- 3) Equilibrio globale dei momenti di tutti i conci da cui si ricava F_m :

$$\sum Wx - \sum S_m R - \sum Nf = 0$$

È da notare che nell'equilibrio dei momenti non compaiono le forze interconco E ed X . Questo perché su ogni lato di un conco agiscono le stesse forze E ed X con verso opposto (la forza E_R agente sul conco n è uguale alla forza E_L agente sul conco $n + 1$, ma con segno opposto), per cui la sommatoria dei momenti di tutti i conchi è pari a zero.

4) Equilibrio globale delle forze orizzontali di tutti i conchi da cui si ricava F_f :

$$\begin{aligned} \sum(E_L - E_R) - \sum(N\text{sen}\alpha) + \sum(S_m\text{cos}\alpha) &= 0 \\ -\sum(N\text{sen}\alpha) + \sum(S_m\text{cos}\alpha) &= 0 \end{aligned}$$

Anche in questo caso $\sum(E_L - E_R) = 0$ su tutta la massa, per lo stesso motivo sopra spiegato per l'equilibrio globale dei momenti.

Il valore di S_m viene espresso con l'equazione vista sopra cioè:

$$S_m = \frac{c'\beta + (N - u\beta)\text{tg}\phi'}{F_S}$$

È particolarmente importante notare che il fattore di sicurezza F_S dovrebbe essere quello del conco di analisi, mentre verrà uguagliato al fattore di sicurezza globale della massa: si assume cioè che tutti i conchi hanno lo stesso fattore di sicurezza.

Le forze interconco di taglio X sono infine espresse tramite:

$$X = E\lambda f(x)$$

Possiamo riscrivere le 4 equazioni di base come:

1) Equilibrio delle forze verticali:

$$N = \frac{W + (E_R\lambda f(x) - E_L\lambda f(x)) - \frac{c'\beta\text{sen}\alpha + u\beta\text{tg}\phi'\text{sen}\alpha}{F_S}}{\text{cos}\alpha + \frac{\text{sen}\alpha\text{tg}\phi'}{F_S}}$$

2) Equilibrio delle forze orizzontali:

$$E_R = E_L + \frac{(c'\beta - u\beta\text{tg}\phi')\text{cos}\alpha}{F_S} + N\left(\frac{\text{tg}\phi'\text{cos}\alpha}{F_S} - \text{sen}\alpha\right)$$

3) Equilibrio globale dei momenti:

$$F_m = \frac{\sum(c'\beta R + (N - u\beta)R\text{tg}\phi')}{\sum Wx - \sum Nf}$$

4) Equilibrio globale delle forze orizzontali:

$$F_f = \frac{\sum(c' \beta \cos \alpha + (N - u \beta) \operatorname{tg} \phi' \cos \alpha)}{\sum N \operatorname{sen} \alpha}$$

Si fa ora riferimento a metodi che, con opportune ipotesi, semplificano notevolmente la soluzione del problema.

4.8.1. Metodo ordinario dei concii o di Fellenius

Il metodo di Fellenius si basa sulle seguenti assunzioni:

- la risultante delle forze interconco è parallela alla base del conco, $X / E = \operatorname{tg} \alpha$;
- la superficie di scorrimento è cilindrica, per cui $f = 0$.

e sulle seguenti equazioni di equilibrio:

- equilibrio delle forze normali alla base del conco per il calcolo di N ;
- equilibrio globale dei momenti per il calcolo di F_m .

Come si può notare, la forza normale N non dipende dal valore delle forze interconco, ed è pari a:

$$N = W \cos \alpha$$

Oltre che dal poligono delle forze, si arriva a questa equazione dall'equilibrio delle forze normali:

$$N - W \cos \alpha = 0$$

Si ottiene la medesima espressione della forza N utilizzando la soluzione generale dell'equilibrio limite e ponendo $X = E \operatorname{tg} \alpha$.

L'equilibrio alle forze orizzontali diventa:

$$-W + (E_L \operatorname{tg} \alpha - E_R \operatorname{tg} \alpha) + N \cos \alpha + S_m \operatorname{sen} \alpha = 0$$

Dall'equilibrio delle forze orizzontali si ottiene:

$$(E_L - E_R) - N \operatorname{sen} \alpha + S_m \cos \alpha = 0$$

$$S_m = \frac{E_R - E_L + N \operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha}$$

e sostituito nell'equazione di equilibrio delle forze orizzontali fornisce:

$$-W + (E_L \operatorname{tg} \alpha - E_R \operatorname{tg} \alpha) + N \cos \alpha + E_R \operatorname{tg} \alpha - E_L \operatorname{tg} \alpha + N \frac{\operatorname{sen}^2 \alpha}{\cos \alpha} = 0$$

Le forze interconco si elidono e l'equazione si riduce a quella vista sopra:

$$N = W \cos \alpha$$

La forza normale così calcolata è utilizzata nell'equilibrio globale dei momenti. Essendo la superficie di scorrimento cilindrica ($f = 0$), l'equazione dell'equilibrio globale dei momenti si riduce a:

$$F_m = \frac{\sum(c' \beta R + (N - u\beta)R \tan \phi')}{\sum W_x}$$

Questa è un'equazione lineare e si risolve direttamente senza iterazioni.

4.8.2. Metodo di Bishop semplificato

Il metodo di Bishop semplificato si basa sulle seguenti assunzioni:

- forze interconco orizzontali, cioè $X_R = X_L = 0$;
- superficie di scorrimento cilindrica per cui $f = 0$.

e sulle seguenti equazioni di equilibrio:

- equilibrio delle forze verticali per il calcolo di N ;
- equilibrio globale dei momenti per il calcolo di F_m .

In questo caso, a differenza del metodo di Fellenius, la forza normale N dipende dalle forze interconco E .

Oltre che dal poligono delle forze, tale dipendenza si vede considerando l'equilibrio delle forze orizzontali, con $X_R = X_L = 0$:

$$N = \frac{W - S_m \sin \alpha}{\cos \alpha}$$

Visto che la forza di taglio S_m dipende da E , come indicato dall'equilibrio delle forze orizzontali, si ha:

$$S_m = \frac{E_R - E_L + N \sin \alpha}{\cos \alpha}$$

Pertanto, nella formula di N proposta da Bishop, non compaiono le forze interconco E ma esse sono tenute implicitamente in conto nei termini derivati da S_m .

In questo sta la differenza fondamentale col metodo di Fellenius, in cui la forza normale N non dipende in alcun modo dalle forze interconco.

Essendo la superficie di scorrimento cilindrica ($f = 0$), l'equazione all'equilibrio globale dei momenti si riduce a:

$$F_m = \frac{\sum(c'\beta R + (N - u\beta)Rtg\phi')}{\sum W_x}$$

Le due equazioni (di N e F_m) vanno risolte per iterazione, ma la convergenza è generalmente rapida.

Si noti che l'assunzione di forze interconco orizzontali è analoga a considerare $\lambda = 0$. Si può quindi utilizzare la procedura risolutiva generale del metodo dell'equilibrio limite, ponendo $\lambda = 0$ e considerando il solo fattore di sicurezza rispetto ai momenti F_m .

4.8.3. Metodo di Janbu semplificato

Il metodo di Janbu semplificato è basato sulla seguente assunzione:

- forze interconco orizzontali, cioè $X_R = X_L = 0$.

e sulle seguenti equazioni di equilibrio:

- equilibrio delle forze verticali per il calcolo di N ;
- equilibrio globale delle forze orizzontali per il calcolo di F_f .

Il poligono delle forze e l'equazione per il calcolo di N sono uguali a quelle utilizzate nel metodo di Bishop semplificato:

$$N = \frac{W - \frac{c'\beta \text{sen}\alpha + u\beta \text{tg}\phi' \text{sen}\alpha}{F_s}}{\cos\alpha + \frac{\text{sen}\alpha \text{tg}\phi'}{F_s}}$$

L'equilibrio globale delle forze orizzontali è:

$$F_f = \frac{\sum(c'\beta \cos\alpha + (N - u\beta)\text{tg}\phi' \cos\alpha)}{\sum N \text{sen}\alpha}$$

La soluzione segue quella generale sopra descritta ponendo $\lambda = 0$, analogamente a quanto fatto per Bishop semplificato. La differenza è che in questo caso viene utilizzato il fattore di sicurezza F_f rispetto alle forze orizzontali, al posto di quello dei momenti F_m .

4.8.4. Metodo di Morgenstern - Price

Il metodo di Morgenstern - Price è basato sull'assunzione:

- relazione nota tra forze interconcoo orizzontali e verticali, cioè $X = E\lambda f(x)$.

e sulle seguenti equazioni di equilibrio:

- equilibrio delle forze verticali e orizzontali per il calcolo di N e di E ;
- equilibrio globale dei momenti per il calcolo di F_m ;
- equilibrio globale delle forze orizzontali per il calcolo di F_f .

La procedura risolutiva è quella sopra illustrata per il metodo dell'equilibrio limite generale.

Capitolo 5

Studio della frana di Poggio Ancisa

5.1. Evoluzione storica della frana di Poggio Ancisa

La frana di Poggio Ancisa, come detto, è il risultato di un movimento di versante di tipo complesso; essa si è manifestata in forma parossistica in data 27 dicembre 2009 e si tratta della riattivazione di un preesistente dissesto, ampiamente noto e riportato nella cartografia geologica e geomorfologica ufficiale della Regione Marche e nella carta dell'Inventario del Dissesto PAI 2008.

Pur essendo una frana già nota, non sono riuscita a trovare una documentazione ufficiale antecedente al dicembre 2009, che testimoni l'esistenza del fenomeno né tantomeno l'esecuzione di monitoraggi o interventi di mitigazione su di essa.

Come si vede dalla figura 5.1, già nel 1988 la frana era attiva e il suo aspetto è già ampiamente individuabile dall'ortofoto in questione (la morfologia è del tutto simile a quella attuale). Si può dedurre, visto che si sono registrate nel 1988 anche riattivazioni della frana di Schigno, che questo sia stato un anno o un periodo particolarmente piovoso per l'area in esame e quindi sfavorevole per la stabilità dei versanti.

Nella successiva ortofoto disponibile (Fig. 5.2), dell'anno 1994, anche se la frana resta visibile, mostra comunque caratteri meno marcati rispetto all'ortofoto precedente, quindi si suppone si possa trovare in una fase di quiescenza.

Lo stesso discorso può essere fatto anche per tutte le ortofoto successive (Fig. 5.3, Fig. 5.4, Fig. 5.5, Fig. 5.6, Fig. 5.7), che vanno dall'anno 1994 all'anno 2008, in

cui si possono osservare le caratteristiche geomorfologiche di un versante instabile, ma la frana non sembra possa trovarsi in una fase attiva.

Invece, come si può ben vedere dalla Fig. 5.8, che è un'ortofoto dell'agosto 2010, l'immagine ben testimonia la riattivazione avvenuta nel dicembre 2009. Si nota tutto il corpo di frana e il coinvolgimento sia della strada che corre lungo il coronamento (il cui tracciato è stato deviato più a monte), che della strada comunale di valle, Albereta-Poggio Ancisa, che è stata completamente ricoperta dai detriti.

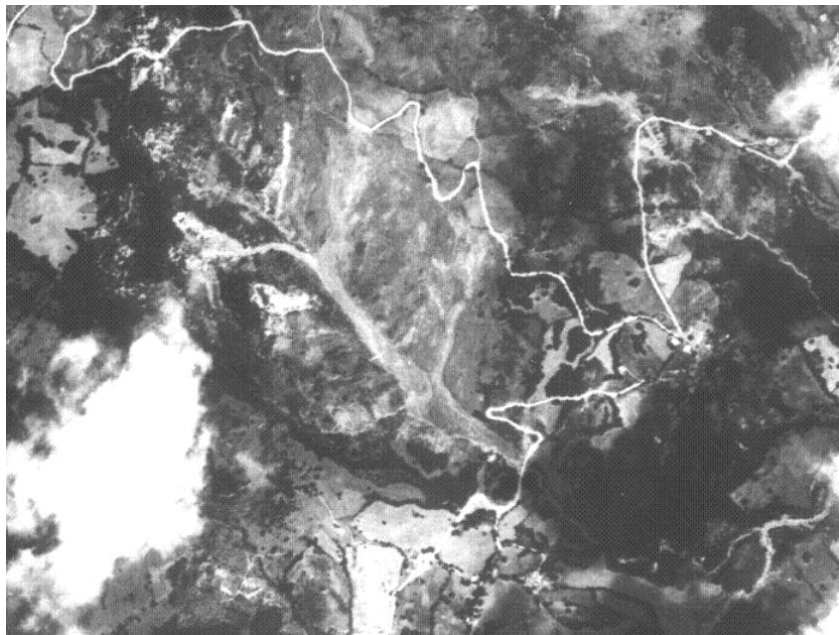


Fig. 5.1 - Ortofoto del 1988 da www.regione.marche.it

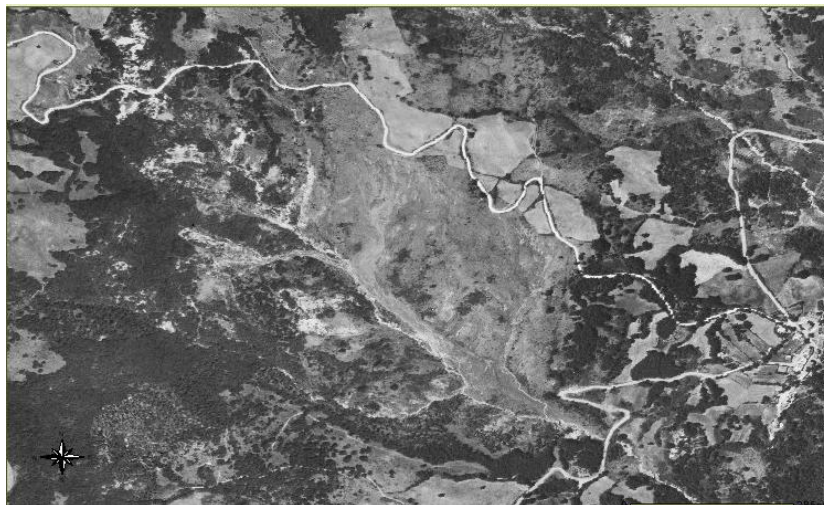


Fig. 5.2 - Ortofoto del 1994 da www.pcn.minambiente.it



Fig. 5.3 - Ortofoto del 2000 da www.pcn.minambiente.it

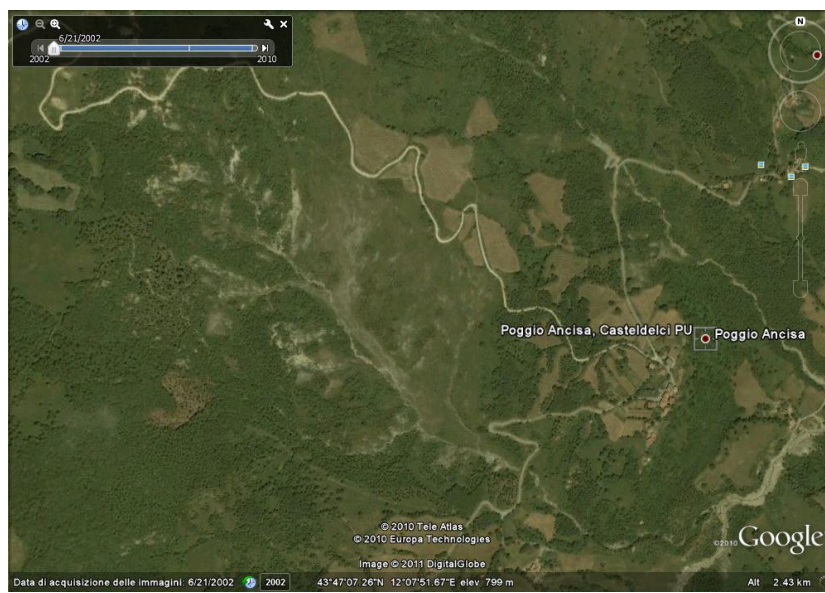


Fig. 5.4 - Ortofoto del 21 giugno 2002 da Google Earth

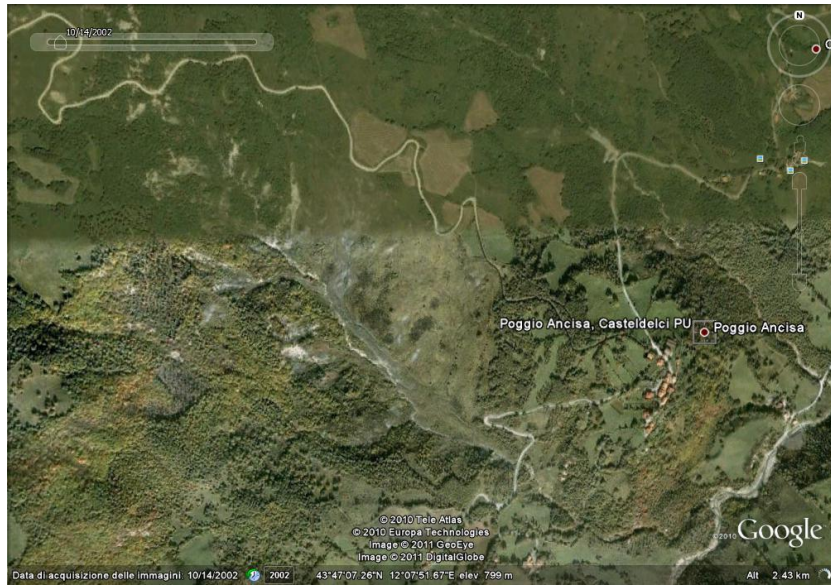


Fig. 5.5 - Ortofoto del 14 ottobre 2002 da Google Earth



Fig. 5.6 - Ortofoto del 2006 da www.pcn.minambiente.it

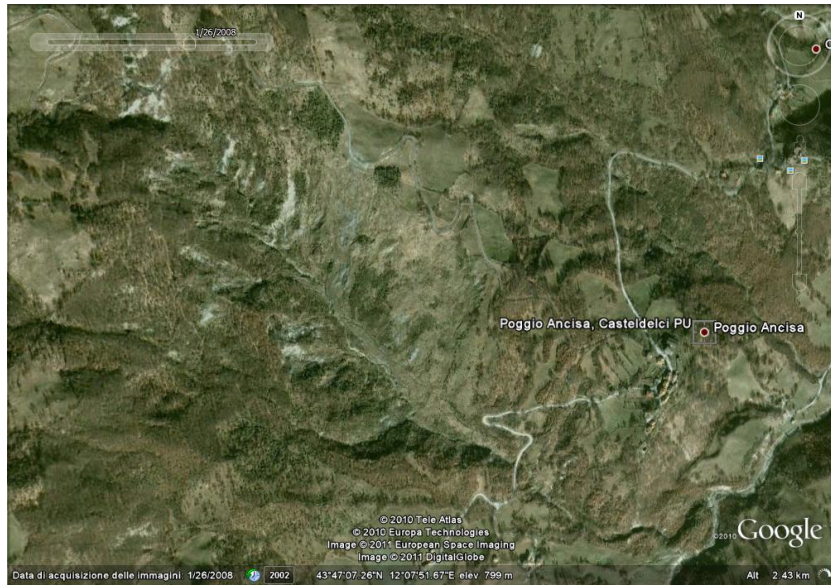


Fig. 5.7 - Ortofoto del 26 gennaio 2008 da Google Earth

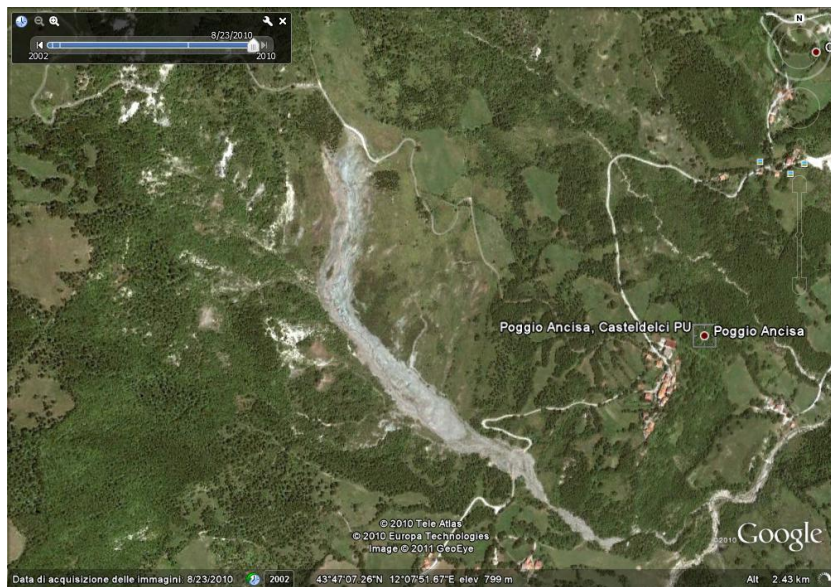


Fig. 5.8 - Ortofoto del 23 agosto 2010 da Google Earth

5.2. Dati pluviometrici di Casteldelci

La frana si è riattivata a seguito delle abbondanti precipitazioni meteoriche, occorse nei giorni 22 e 23 dicembre 2009, e al repentino innalzamento delle temperature che ha provocato lo scioglimento del manto nevoso accumulatosi in precedenza.

Queste informazioni sono confermate dai dati pluviometrici ottenuti dal sistema Dexter del Servizio IdroMeteorologico dell'Arpa dell'Emilia-Romagna.

Sistema Dexter è il nome dell'interfaccia che consente di avere l'accesso diretto al database del Servizio IdroMeteorologico; quest'ultimo registra moltissimi dati che si riferiscono alle variabili meteo-climatiche tradizionali (temperature, precipitazioni etc.), ma anche ai livelli idrometrici dei corsi d'acqua, alle concentrazioni polliniche e a molte altre grandezze di interesse ambientale, agricolo e sanitario. I dati disponibili derivano da misure effettuate in tempo reale con le apparecchiature elettroniche automatiche che costituiscono la rete regionale Rirer (Rete integrata regionale idropluviometrica dell'Emilia-Romagna), affidata originariamente ad Arpa-Sim dalla Regione, ma anche da molte altre fonti, quali ad esempio le registrazioni storiche dell'ex Servizio idrografico e mareografico nazionale (Simn), i cui uffici di Parma e Bologna sono stati incorporati in Arpa dal 2003. Dexter, che è attivo in via sperimentale dal 18 aprile 2006, consente l'accesso pubblico diretto dal sito web ai dati contenuti in questo database e permette di visualizzare su carta geografica attiva la posizione delle stazioni sul territorio regionale e di selezionare con vari metodi i dati da scaricare.

Tramite Dexter ho selezionato la variabile "dati giornalieri (da rete Rirer)", ho scelto il periodo di tempo (dal 1° giugno 2009 al 29 gennaio 2011) e ho selezionato la variabile "precipitazione giornaliera" sulla stazione di Casteldelci.

I dati ottenuti da Dexter sono stati riportati su Excel, attraverso il quale ho poi costruito un grafico (Fig. 5.9) con l'entità delle precipitazioni su Casteldelci, mettendo in evidenza la curva cumulata.

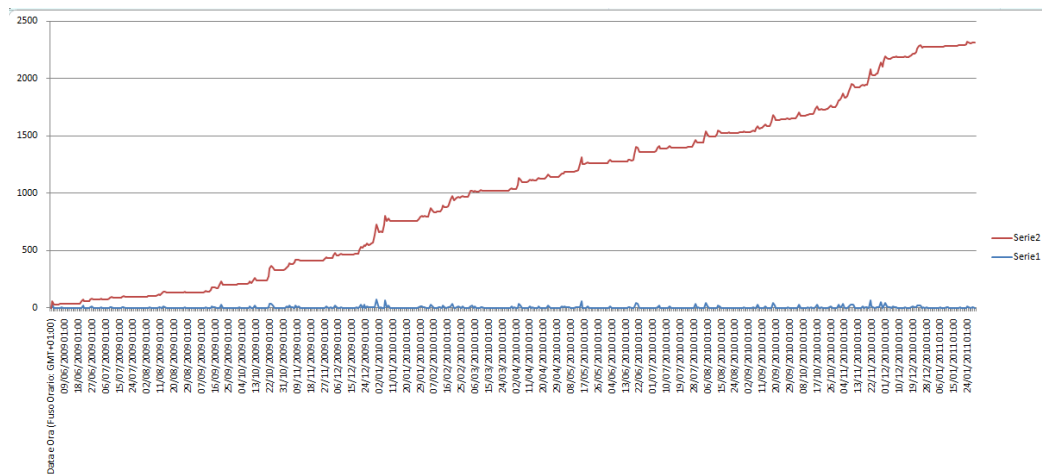


Fig. 5.9 – Curva cumulata delle precipitazioni

Ingrandendo il grafico precedente (Fig. 5.10), si può mettere meglio in evidenza l'entità e la distribuzione temporale delle precipitazioni su tale zona. Si può notare come, proprio nel periodo immediatamente antecedente alla riattivazione della frana, si sia registrato un picco di precipitazioni dalla fine di novembre.

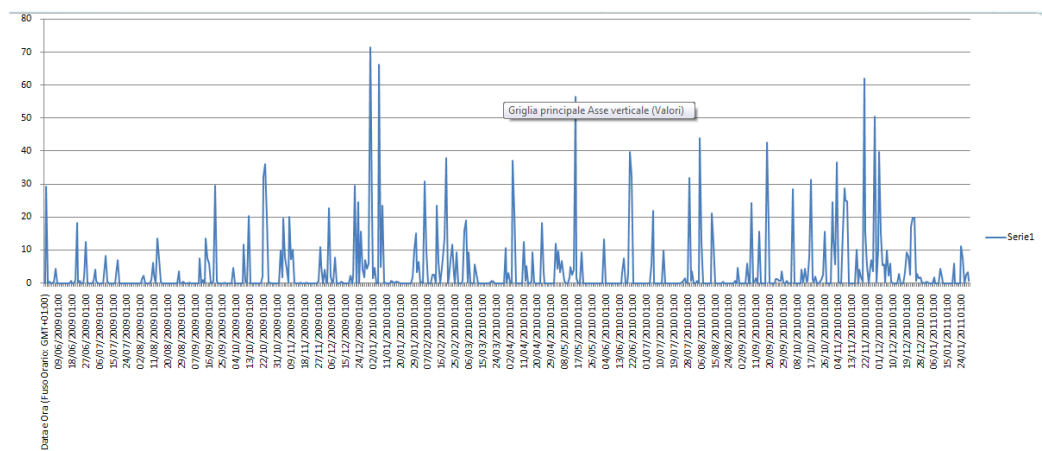


Fig. 5.10 – Zoom della fig. 5.9 sui valori delle precipitazioni

5.3. Monitoraggio geotecnico tradizionale (misure inclinometriche e piezometriche)

La ditta Geo Eco Ter si è occupata dell'esecuzione delle prove geognostiche, delle analisi di laboratorio e delle letture inclinometriche sulla frana oggetto di studio.

I servizi di diagnostica si sono concretizzati nella realizzazione di 3 tests diagnostici del tipo sondaggio a carotaggio continuo, i cui fori sono stati dotati di tubi inclinometrici e piezometrici realizzati sul corpo della frana.

Durante le fasi di lavoro si sono, inoltre, prelevati campioni di terreno, per determinare le caratteristiche fisiche e granulometriche e di compattazione. I sondaggi, inoltre, hanno permesso di ricostruire la successione litostratigrafica locale e la natura litologica del sottosuolo.

Al fine poi di estrapolare i dati puntuali ottenuti, è stata predisposta un'analisi sismica specifica a rifrazione.

La macchina impiegata per le operazioni di avanzamento geognostico è la DRILL 830L cingolata, costruita dalla società IPC di Cesena nell'anno 2000. I sondaggi a carotaggio continuo sono stati realizzati sul corpo di frana (sondaggio di valle S_v e di monte S_m) e l'investigazione ha permesso di prelevare un campione a profondità di 50 cm (campione 0), uno a profondità compresa tra 3 e 3.5 metri (campione 1) e uno a profondità compresa tra 4.80 e 5.10 metri (campione 2).

Le analisi si differenziano, nella parametrizzazione geotecnica, in quanto scaturite da campioni provenienti da materiali diversi.

Per i campioni prelevati si sono determinate le caratteristiche fisiche, granulometriche, geomeccaniche e i limiti di consistenza, e dalla miscela di tutto il terreno prelevato si è poi effettuata la prova di costipamento Proctor, che non riteniamo utile analizzare ai fini del nostro studio.

5.3.1. Letture Inclinometriche

Sono state effettuate una serie di misure inclinometriche nel foro di sondaggio S_v . La prima misura (lettura 0) è stata effettuata il giorno 16/09/2010 e le successive misurazioni sono state effettuate in data 7/10/2010 (lettura 1) e in data 5/11/2010 (lettura 2), tempi assai ristretti in condizioni normali ma accelerati perché il corpo di frana dava già ampi segnali di instabilità, con la possibilità che il tubo inclinometrico venisse interrotto a causa delle deformazioni in atto.

Le misurazioni sono state eseguite ogni 50 cm con partenza da piano campagna, utilizzando una sonda inclinometrica O.T.R. ed elaborate con programma OG390WIN.

Come si può osservare del grafico del movimento per punti (sommatoria dei movimenti alle 3 letture), il tubo inclinometrico non ha segnalato spostamenti oltre i 13 m e lo spostamento maggiore si è avuto alla profondità di 12.50 m circa (Fig. 5.11). L'entità del movimento, tra la lettura 2 e la lettura 0, ovvero in un periodo di tempo di 50 giorni, è di 5 mm (che corrisponderebbe ad uno spostamento di circa 3.5 cm all'anno). Bisogna considerare che le letture sono state eseguite in una fase di movimenti residuali, cioè alla fine del periodo secco estivo, quindi la loro entità non rispecchia i massimi movimenti registrati nella fase parossistica dell'inverno 2010-2011.

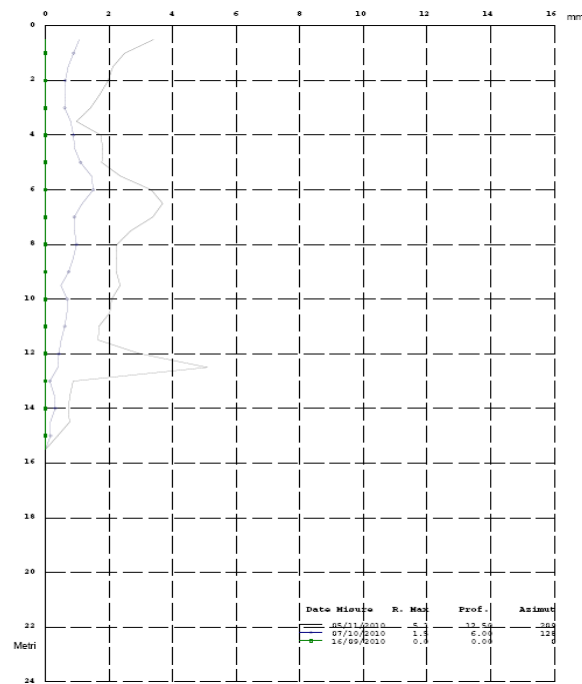


Fig. 5.11 – Grafico del movimento per sommatoria rispetto all'origine (grafico della risultante degli spostamenti)

5.3.2. Letture Piezometriche

Informazioni sulla falda, ovvero sulla presenza di acqua nel corpo di frana, sono state ottenute con periodiche ispezioni dei fori di sondaggio S_v ed S_m , effettuate il 16/09/2010, il 07/10/2010 e il 5/11/2010.

Le letture piezometriche hanno confermato nel tempo la profondità della falda riscontrata già durante la fase geognostica (13/09/2010).

Per quanto riguarda il sondaggio S_v, la piezometrica si è attestata a circa - 7,20 m dal piano campagna al termine delle operazioni di perforazione. Mentre nel sondaggio S_m la falda è più o meno coincidente col piano campagna, ma gli operatori riportano che essa è stata anche prevalente.

5.4. Prospezione sismica tomografica ad onde di compressione (p)

La campagna di indagini geofisiche, nell'ambito della bonifica e del consolidamento del versante lungo il Fosso del Poggio, è stata condotta dalla Progeo S.r.l..

La finalità delle indagini era la caratterizzazione e la verifica dello spessore dei materiali della coltre in dissesto e la consistenza e grado di alterazione e fratturazione del sottostante substrato roccioso.

La campagna geognostica, in collaborazione con Geoter Soc. Coop. di Sogliano al Rubicone (FC), che ne ha eseguito la parte geognostica per quanto riguarda le indagini geomeccaniche di perforazione, e coordinata dalla Direzione Tecnica della Regione Emilia-Romagna, è stata svolta nel periodo Settembre-Ottobre 2010.

Questa è consistita in una indagine geofisica, eseguita mediante prospezione sismica a rifrazione ad onde di compressione (P), elaborata tomograficamente per determinare, in dettaglio e in continuità areale, lo spessore e l'addensamento delle varie coltri sovrapposte di copertura detritica clastico-argillosa di versante in dissesto, valutando il grado di consistenza e fratturazione del substrato lapideo calcareo-marnoso, per profondità massime nell'intorno di qualche decina di metri dal piano campagna.

Sono state eseguite 6 sezioni sismiche (1-2-3-4-5-6) a rifrazione ad onde di compressione con elaborazione tomografica, per una lunghezza complessiva sul profilo topografico di 1140 m e spaziatura geofonica di 5 m.

Le sezioni 1 (60 geofoni e 295 m) e 2 (96 geofoni e 475 m) sono state disposte (secondo le disposizioni della Committenza) longitudinalmente all'asse vallivo principale e di movimento e accumulo franoso, con un gap di circa un'ottantina di

metri fra le due, circa a metà della coltre in dissesto. Le due sezioni sono intersecate dalle sezioni trasversali 3 (24 geofoni e 120 m), 4 (24 geofoni e 120 m), 5 (12 geofoni e 55 m) e 6 (16 geofoni e 75 m) che sono state realizzate a varie quote del pendio a partire da monte, per terminare nei pressi della sede viabile attuale (una decina di metri più a monte dell'attuale strada comunale).

Trattandosi di zone fortemente in dissesto, impervie e prevalentemente senza accessi a mezzi meccanici, vista la necessità di generare impulsi che consentissero una buona qualità delle registrazioni al massimo fino a 300 m di distanza tra energizzatore e ricevitore (per poter investigare profondità fino a circa 60 m), è stato usato il sistema Hammer Blow o martello strumentato da 10 kg, ad impatto ripetuto su una piastra d'acciaio posizionata sul terreno a lato del geofono di ricezione prestabilito.

Sono stati utilizzati geofoni da 40 Hz (con asse strumentale verticale per la ricezione delle onde P), posizionati sul terreno ad intervalli prestabiliti di 5 m in funzione del dettaglio richiesto, collegati tra loro da cavo elettrico e tramite questo al sismografo.

Nella figura 5.12 è riportata la planimetria delle indagini sismiche, con indicata l'ubicazione particolareggiata degli allineamenti sismici (in rosso) e con la numerazione di tutte le stazioni geofoniche di ricezione.

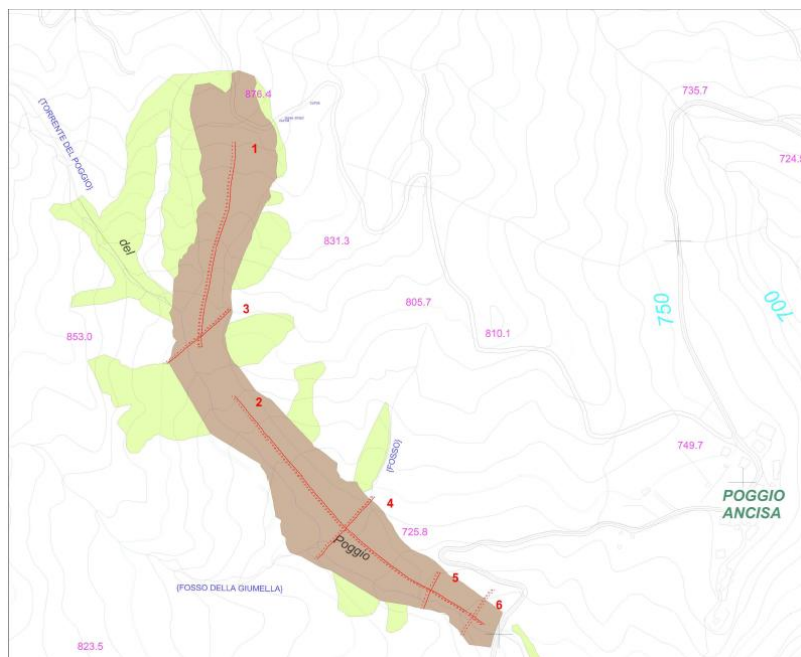


Fig. 5.12 – Planimetria delle indagini sismiche

In base all'analisi degli elaborati della prospezione sismica tomografica si possono distinguere 4 principali unità sismo-stratigrafiche (Fig. 5.13):

- a) Unità relativa allo spessore della coltre allentata in frana, la quale si presenta lungo tutto il versante analizzato con potenza oscillante tra 1 e 5 m circa. È rappresentata, nelle elaborazioni tomografiche delle sezioni sismiche, da tonalità grigio viola; la base di tale coltre è indicativamente delimitata dall'interfaccia di gradiente con velocità di $V_p=0.75$ km/s (linea in grassetto nero).
- b) Unità relativa alla copertura di versante in dissesto reale e/o potenziale con spessore medio di 4-5 m e profondità massima di circa 9-10 m, anch'essa presente lungo tutto il versante analizzato al di sotto della precedente unità sismostratigrafica. È rappresentata da tonalità arancio-marroni; la base di tale coltre è indicativamente delimitata dall'interfaccia di gradiente con velocità di $V_p=1.36$ km/s (linea in grassetto blu).
- c) Unità lapidea da alterata a decompressa e molto fratturata; tale unità è rilevabile dal contatto con la sovrastante copertura detritica, che sovente può anche mancare se il substrato alterato ("cappellaccio") è subaffiorante fino all'interfaccia di gradiente di $V_p=2.05$ km/s (linea in grassetto magenta, tonalità gialle della rappresentazione sismica tomografica). Lo spessore di tale orizzonte è variabile tra 5 e 20 m circa e si estende in modo continuo lungo l'intera area investigata.
- d) Unità lapidea a maggior consistenza (non alterata e da mediamente fratturata a compatta) presente oltre i 10-40 m di profondità dal piano campagna fino alle maggiori profondità investigate (max 80 m circa). Tale unità presenta, specie nelle sezioni più lunghe longitudinali al pendio e che hanno analizzato maggiori profondità d'ammasso, nuclei a velocità relativamente variabile, indice di un materiale eterogeneo a media-grande scala e con variazioni di consistenza e/o litologia significative; i valori di velocità delle onde di compressione V_p sono compresi tra 2.05 e 3.5 km/s (tonalità verde-azzurro blu-viola).

Infatti, si rilevano almeno 3 fasce a consistenza crescente con incremento relativo dei valori cinematici: fascia di tetto con V_p compreso tra 1.55 e 2.15 km/s (tonalità gialle), fascia intermedia con V_p compreso tra 2.15 e 3 km/s (tonalità

verdi), e fascia più compatta ed estesa arealmente con V_p compreso tra 3 e 4.65 km/s (tonalità azzurro-blu-viola).

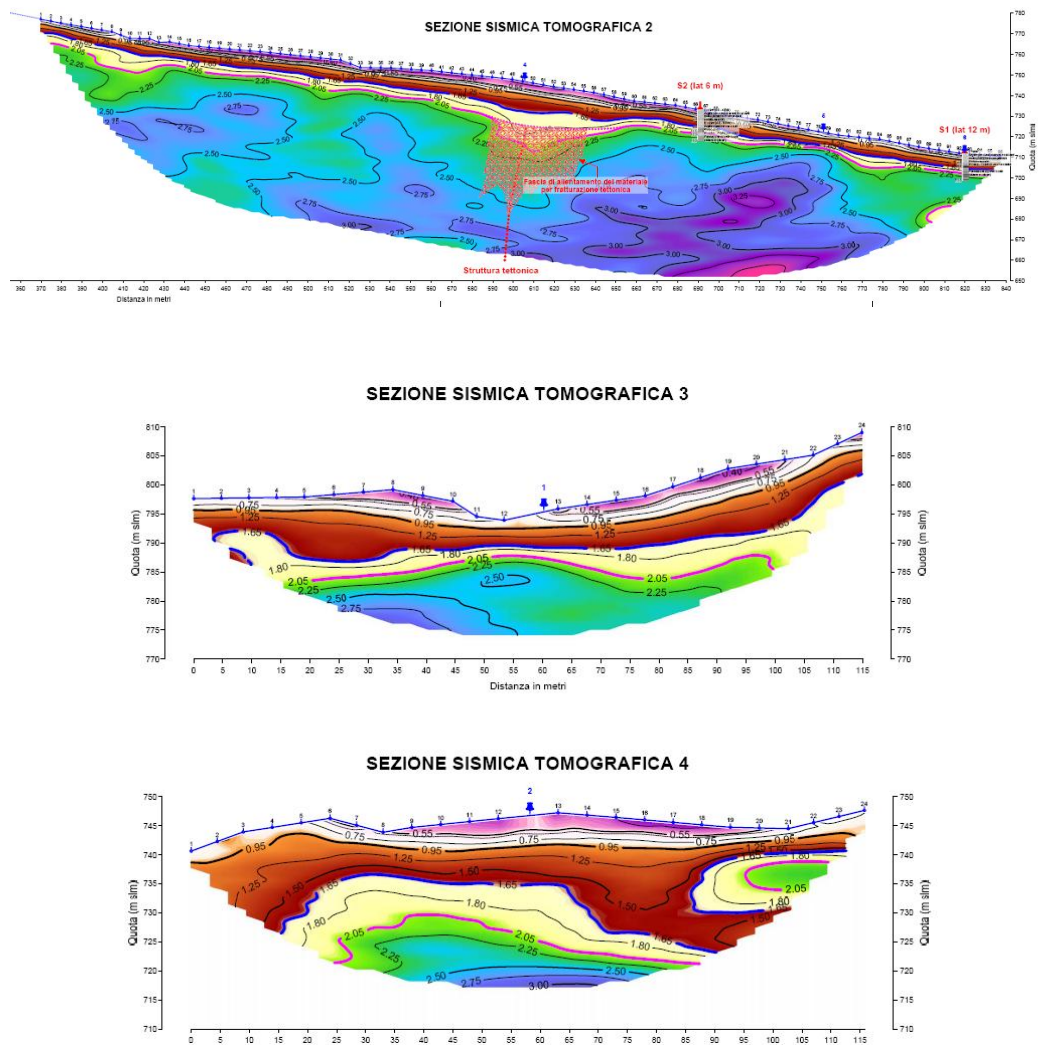


Fig. 5.13 – Esempi di sezioni sismiche tomografiche

5.5. Risultati delle prove di laboratorio

Come già detto, per i campioni prelevati si sono determinate, attraverso analisi di laboratorio e attraverso la prova di taglio diretto, le caratteristiche fisiche, granulometriche, geomeccaniche e i limiti del comportamento del terreno (limiti di Atterberg). I risultati sono elencati nella seguente tabella (Tab. 5.14).

Tab. 5.14 – Tabella dei risultati delle prove di laboratorio sui 3 campioni

	Campione 0	Campione 1	Campione 2
Contenuto in acqua	15%	23%	28%
Peso di volume umido	-	1.94 g/cm ³	1.92 g/cm ³
Peso di volume secco	-	1.577 g/cm ³	1.5 g/cm ³
Peso specifico	2.742 g/cm ³	2.744 g/cm ³	2.741 g/cm ³
Indice dei vuoti	-	0.74	0.827
Grado di saturazione	-	85.31 %	92.76 %
Limite di liquidità	51 %	54 %	60 %
Limite di plasticità	22%	22 %	23 %
Indice di plasticità	29 %	32 %	37 %
Indice di consistenza	1.24	0.97	0.86
Classificazione A.G.I.	Argilla con limo debolmente sabbiosa	Argilla con limo debolmente sabbiosa	Argilla con limo
Angolo di attrito Φ'	23°	20°	18°
Coesione c'	0.20 kg/cm ²	0.00 kg/cm ²	0.00 kg/cm ²
Angolo di attrito residuo Φ_r	12.5°	12°	11°
Coesione residua c_r	0.00 kg/cm ²	0.00 kg/cm ²	0.00 kg/cm ²

5.6. Risultati GPS

Ho assistito all'infissione di capisaldi GPS, ubicati a monte del coronamento e ai fianchi della nicchia della frana, e ho potuto osservare direttamente delle misurazioni GPS con la tecnica VRS. Allo stato attuale sono state effettuate 4 campagne di misura degli spostamenti superficiali, di cui sono in corso le elaborazioni (Fig. 5.15).

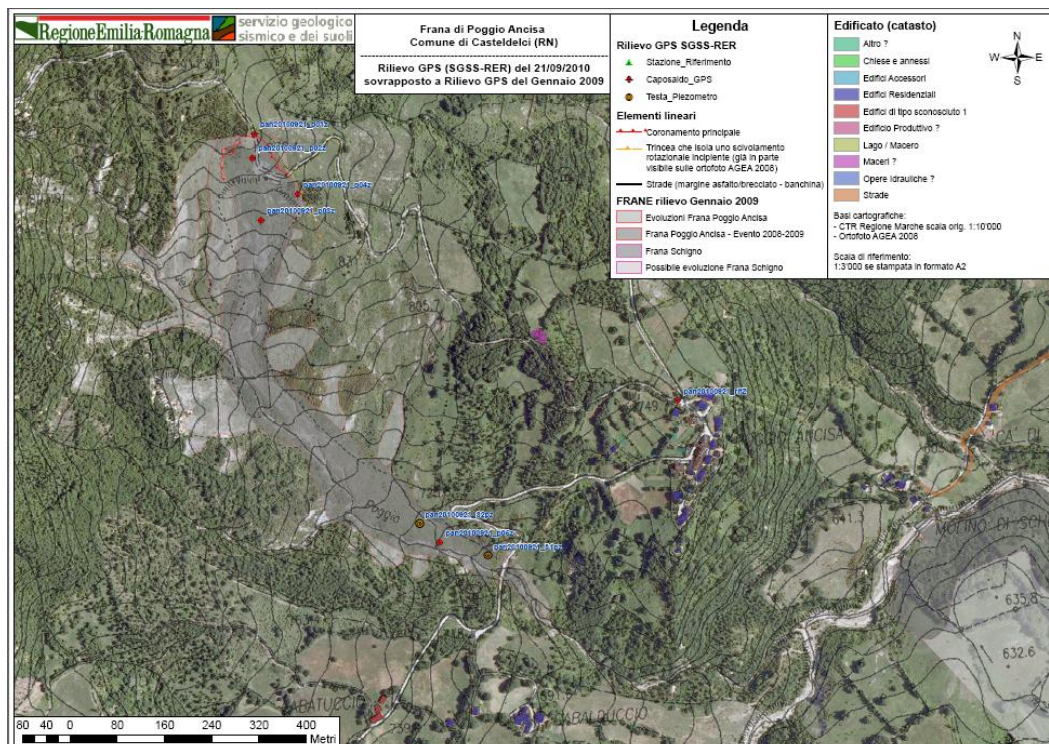


Fig. 5.15 - Posizione dei punti di monitoraggio GPS (in rosso in figura)

5.7. Risultati GBInSAR

Il radar da terra (GBInSAR) è stato posizionato in località Lamone (a circa 2.5 km in linea d'aria dalla nicchia della frana), che rappresenta la migliore posizione per offrire una visione frontale della frana e per garantire la minore presenza di ostacoli lungo la direzione di vista dello strumento (Fig. 5.16).

L'elaborazione dei dati raccolti dallo strumento, durante il periodo di installazione della durata di circa 3 settimane (12 gennaio – 7 febbraio 2011), è attualmente in corso. I dati non coprono tutto il periodo in quanto si è dovuti intervenire a seguito di un malfunzionamento a carico del sistema idraulico che permette lo spostamento del sensore lungo il binario.

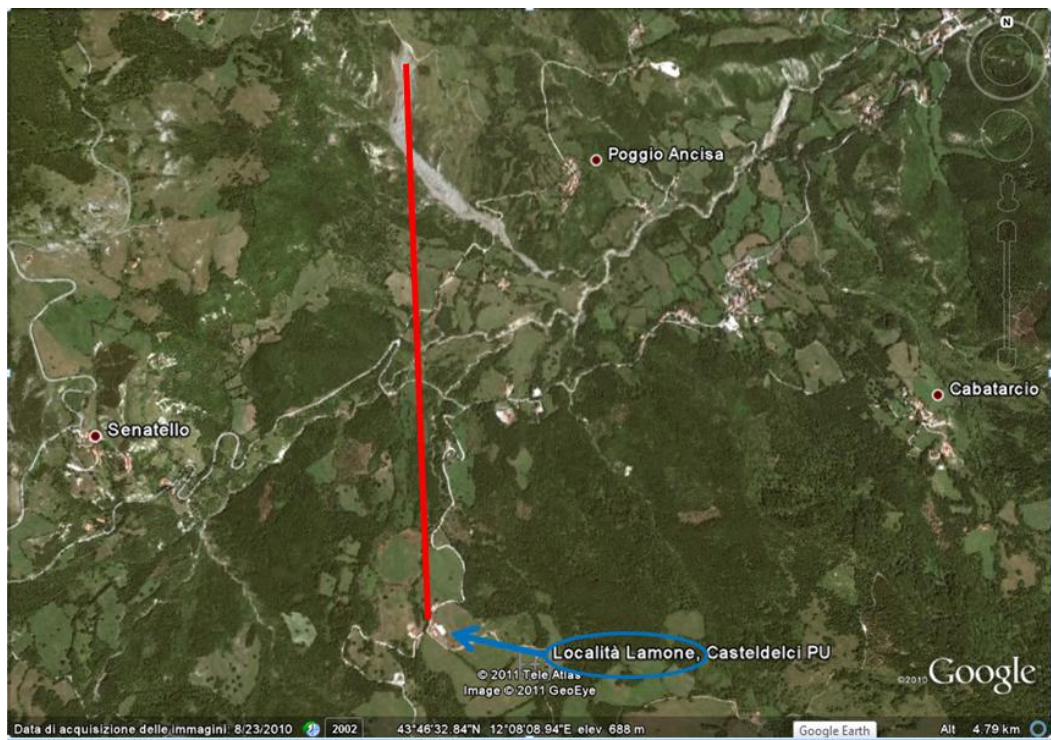


Fig. 5.16 – Luogo del posizionamento del GBInSAR

Capitolo 6

Verifiche di stabilità all'equilibrio limite sulla frana di Poggio Ancisa

6.1. Programma Slide di Rocscience

Slide è un programma bidimensionale per il calcolo della stabilità dei versanti, utilizzato per la valutazione della stabilità su superfici di rottura circolari o non circolari.

Slide analizza la stabilità delle superfici di scorrimento usando la maggior parte dei metodi di calcolo all'equilibrio limite (tra cui i metodi di Bishop, Janbu, Spencer, GLE / Morgenstern-Price). Possono essere analizzate singole superfici di scorrimento oppure possono essere applicati metodi per individuare la superficie di scivolamento critica per un dato pendio.

Questo programma consente di fare verifiche di stabilità su un pendio, con la possibilità di agire in molti modi diversi:

- i metodi dell'analisi di stabilità sono numerosi;
- i metodi di ricerca di superfici critiche valgono sia per superfici di scorrimento circolari che non circolari;
- si può applicare a una vasta tipologia di materiali;
- si possono introdurre variabili quali le superfici piezometriche, la pressione nei pori del sottosuolo, i carichi esterni (lineari, distribuiti o sismici), l'aggiunta di supporti (geotessili, chiodature, pali etc.).

Slide può realizzare anche un'analisi probabilistica, cioè un'analisi in cui l'utente può assegnare distribuzioni statistiche dei parametri di input.

Con l'assegnazione di una distribuzione statistica a uno o più parametri di input del modello, si permette all'utente di stimare il grado di incertezza nel valore dei parametri. Ciò si traduce in una distribuzione dei fattori di sicurezza, da cui può essere calcolata una probabilità di instabilità del versante (o indice di affidabilità). L'analisi probabilistica deve essere vista come un approccio complementare all'analisi deterministica tradizionale.

6.2. Introduzione alle verifiche di stabilità all'equilibrio limite

Per la frana di Poggio Ancisa, come prima operazione, necessaria ai fini dell'utilizzo del software Slide, è stata tracciato, sulla carta topografica, un profilo topografico del pendio (Fig. 6.1). Questa sezione significativa comincia nella zona centrale della frana, in corrispondenza del canale di trasporto, fino ad arrivare all'incirca al suo piede attuale; la scelta è ricaduta su questa zona perché si tratta di un settore del dissesto che può essere considerato omogeneo, sia come materiali coinvolti che come tipologia di movimento (scorrimento-colata). Si sottolinea che la geometria analizzata è una geometria pre-riattivazione del 2009-2011. L'analisi si configura, quindi, come una verifica di stabilità in back analysis, a ritroso, delle condizioni che hanno indotto l'evento del dicembre 2009, tuttora in corso.

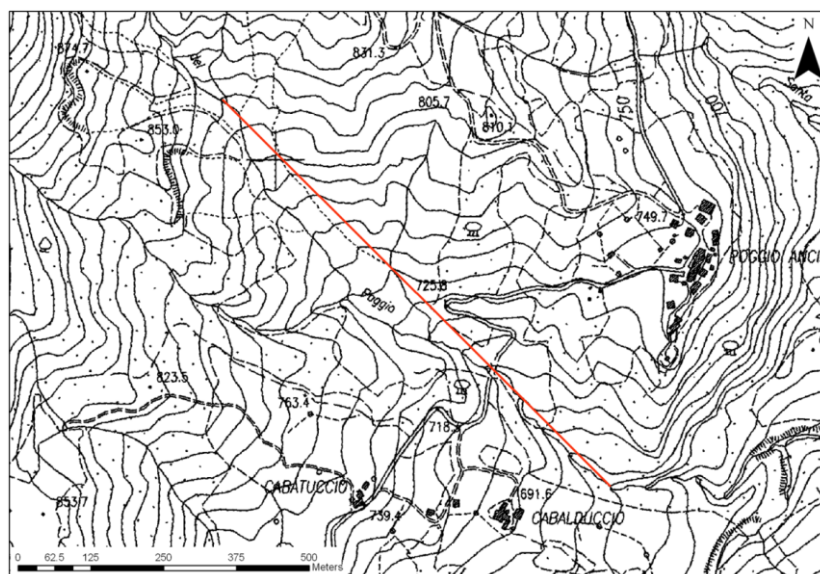


Fig. 6.1 – Tracciamento del profilo (linea rossa) su carta topografica

Riportando i valori delle coordinate (per le ascisse lo 0 coincide con il punto di inizio della linea rossa sulla figura sopra; per le ordinate si sono seguite le quote riportate sulle isoipse della carta topografica), è possibile disegnare su Slide il profilo topografico del nostro versante (Fig. 6.2).

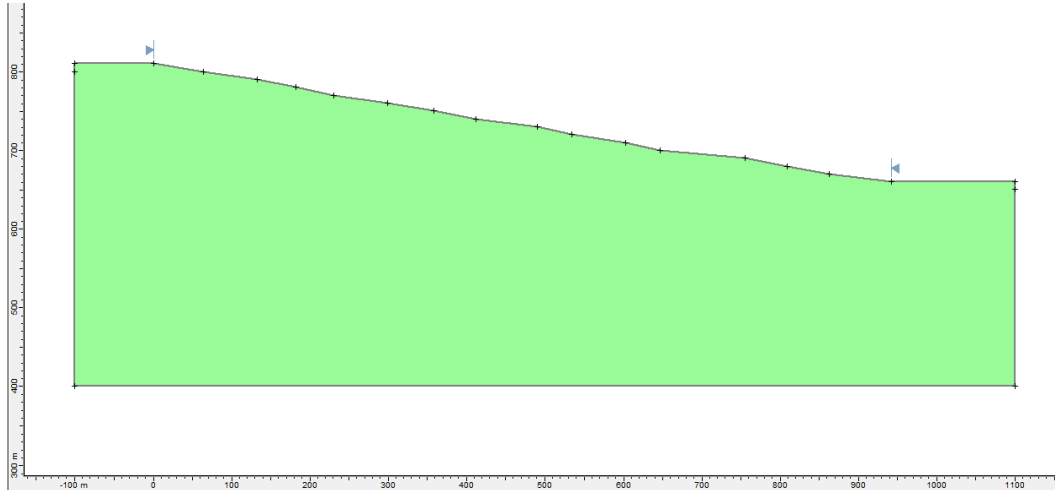


Fig. 6.2 – Geometria del profilo topografico del versante

In secondo luogo, il profilo è stato suddiviso in due aree, che corrispondono ai due diversi materiali (che chiameremo frana e substrato) che sono stati individuati in riferimento alla nostra sezione. Questa è ovviamente una notevole semplificazione perché, come abbiamo visto nei parametri precedenti, la geologia della zona è piuttosto variegata, ma trattandosi di un modello è plausibile accettare questa ipotesi restrittiva.

La suddivisione, graficamente, è stata realizzata per punti; i valori, utilizzati per ipotizzare la quota in cui si ha la separazione tra corpo franoso e substrato lungo tutto il pendio, sono stati ottenuti sia dai dati stratigrafici, litologici e inclinometrici (sondaggi S_{monte} e S_{valle}), che dai dati delle prove sismiche (sezioni sismiche 2, 3, 4, 5 e 6, che sono quelle che intercettano la nostra sezione).

Questi dati, che sono puntuali, sono stati prima disegnati sulla carta topografica e successivamente è stata eseguita un'interpolazione per riportarli sulla sezione di interesse; l'interpolazione, che è eseguita in scala, ovviamente, provoca un aumento dell'errore sui dati ma, visto l'incertezza che è legata ai risultati sia delle prove sismiche che di quelle di laboratorio e di campo, si può ritenere di raggiungere comunque una precisione soddisfacente.

In seguito, è stato necessario assegnare ai due materiali, in cui è suddivisa la sezione, i parametri geotecnici, ottenuti tramite prove di laboratorio.

Per ricavare il peso specifico si è calcolata la media sui valori di 3 campioni ottenuti dal foro di carotaggio S_v , e per l'angolo di attrito e la coesione si sono scelti i valori più scadenti, sugli stessi 3 campioni. Riassumendo si ha (Tab. 6.3):

Tab. 6.3 – Parametri geotecnici dei materiali

	Peso specifico G_s	Angolo di attrito Φ'	Coesione c'	Angolo di attrito residuo Φ_r	Coesione residua c_r
Frana	26.9 kN/m ³	18°	10 kN/m ²	11°	1 kN/m ²
Substrato	26.9 kN/m ³	35°	100 kN/m ²	35°	100 kN/m ²

Prima di effettuare le verifiche di stabilità, un'altra operazione è quella di aggiungere la tavola d'acqua. L'altezza della tavola d'acqua si può ricavare dai dati piezometrici, anche se questo è un parametro molto variabile, a seconda del periodo dell'anno in cui vengono fatte le misure. Di volta in volta, nelle varie verifiche, verrà specificato il valore scelto per questo parametro.

6.3. Verifiche di stabilità eseguite sulla frana di Poggio Ancisa

Le verifiche di stabilità eseguite sulla sezione significativa della frana con il software Slide sono state di diverso tipo. Per mettere in luce punti critici del pendio e fattori sui quali è possibile intervenire per assicurare maggiore stabilità al versante, si è scelto di effettuare le seguenti verifiche:

- 1) verifica A: analisi deterministica del fattore di sicurezza con l'utilizzo di parametri geotecnici di picco e tavola d'acqua al piano campagna, ovvero back analysis con parametri di picco;
- 2) verifica B: analisi deterministica del fattore di sicurezza con l'utilizzo di parametri geotecnici residui e tavola d'acqua al piano campagna, ovvero back analysis con parametri residui;
- 3) verifica C: analisi probabilistica e di sensitività del fattore di sicurezza con utilizzo di tre variabili: angolo di attrito, coesione e altezza della tavola d'acqua;

- 4) verifica D: analisi deterministica del fattore di sicurezza con l'utilizzo di parametri geotecnici residui e tavola d'acqua abbassata di 15 m rispetto al piano campagna, ovvero simulazione dell'efficacia di eventuali opere di drenaggio.
- 5) verifica E: analisi deterministica del fattore di sicurezza con l'utilizzo di parametri geotecnici medi (tra quelli di picco e quelli residui) e tavola d'acqua abbassata di 15 m rispetto al piano campagna tra una quota di 710 e 700 m s.l.m., ovvero simulazione dell'efficacia di eventuali opere di drenaggio localizzato nei pressi della strada comunale Albereta-Poggio Ancisa.

6.3.1. Verifica A (analisi deterministica – parametri di picco e tavola d'acqua al piano campagna)

I parametri di picco per i materiali frana e substrato, utilizzati per questa verifica, sono quelli estrapolati dalla tabella vista sopra.

Per fare ipotesi sull'altezza della tavola d'acqua, mi sono basata sui risultati dei due piezometri, anche se questi mi forniscono un solo valore spazio-temporale del livello dell'acqua. Le misure piezometriche, che riportano un valore dell'altezza d'acqua rispettivamente di -7.20 m dal piano campagna in S_v e 0 m in S_m , sono state effettuate il 17 settembre 2010 e quindi si riferiscono ad un periodo post-siccità estiva cioè un periodo non molto piovoso. Riferendomi a questi valori, però, si rischierebbe di fare un'analisi conservativa, non tenendo conto del fatto che nei periodi più piovosi il livello dell'acqua potrebbe essere più elevato. Infatti durante un sopralluogo, effettuato il 4 novembre 2010, ho potuto constatare che il livello dell'acqua nel piezometro S_m era prevalente, e si attestava a circa 40 cm sopra il piano campagna. Quindi per un'analisi che sia realistica e non troppo conservativa e che ben rispecchi le condizioni al contorno che si sono verificate nel corso dell'evento del 2009, si è scelto di porre la tavola d'acqua in corrispondenza del piano campagna su tutto il pendio.

Dopo aver assegnato queste condizioni iniziali il programma effettua il calcolo, che mi fornirà il risultato del calcolo su 5000 superfici di scivolamento generate

casualmente, con i rispettivi coefficienti di sicurezza, calcolati con i metodi dell'equilibrio limite che ho scelto (Bishop, Janbu e Morgenstern-Price).

La grafica su Slide, con la suddivisione nei due materiali (in azzurro il materiale frana e in beige il materiale substrato), l'attribuzione della tavola d'acqua e il risultato del coefficiente di sicurezza più basso ottenuto con il metodo di Morgenstern-Price (Fig. 6.4), è la seguente:



Fig. 6.4 – Risultati verifica A

Si può notare che il coefficiente di sicurezza minimo su tutta la sezione, per questa verifica con le condizioni di picco e la tavola d'acqua a piano campagna, è 1.421 e si ottiene su di una superficie con profondità massima di circa 10 m, che si posiziona proprio nei pressi della strada comunale Albereta-Poggio Ancisa, che è stata effettivamente interessata da fenomeni di instabilità localizzati.

6.3.2. Verifica B (analisi deterministica – parametri residui e tavola d'acqua al piano campagna)

Per questa verifica si sono scelti i parametri residui per il materiale frana, mentre il materiale substrato viene lasciato inalterato.

Considerando sempre la tavola d'acqua a piano campagna e utilizzando gli stessi metodi di equilibrio limite della verifica A, si ottiene la seguente grafica (Fig. 6.5):

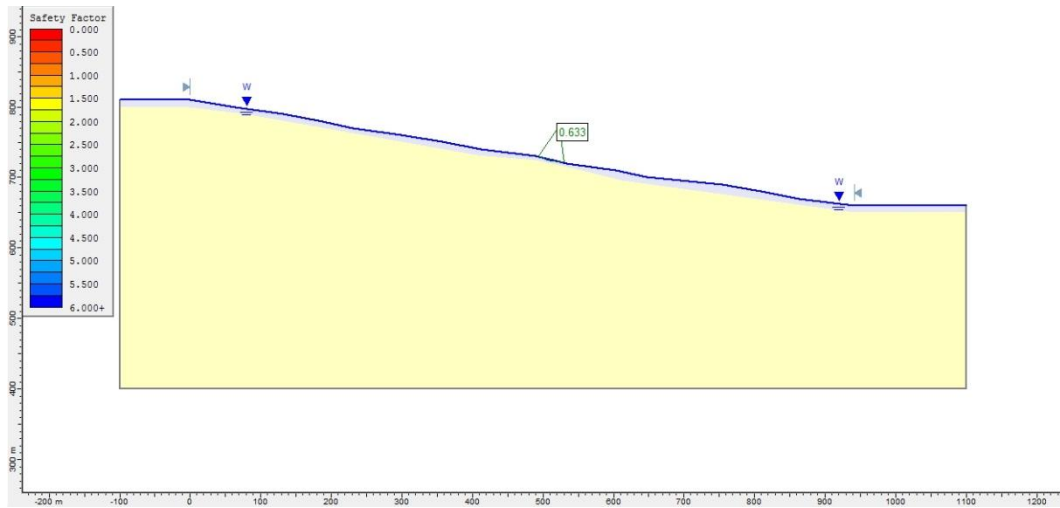


Fig. 6.5 – Risultati verifica B

Si può notare come, in questo caso, il fattore di sicurezza, calcolato con il metodo di Morgenstern-Price, si sia abbassato fino a 0.633 e la superficie di scivolamento più critica si collochi più a monte.

Facendo ulteriori elaborazioni, si possono osservare tutte le superfici di scivolamento che presentano un coefficiente di sicurezza inferiore a 1 (cioè all'equilibrio limite) (Fig. 6.6). Si può constatare come, in condizioni residue, in pratica tutto il pendio sia instabile e presenti superfici di scivolamento con $FS < 1$.

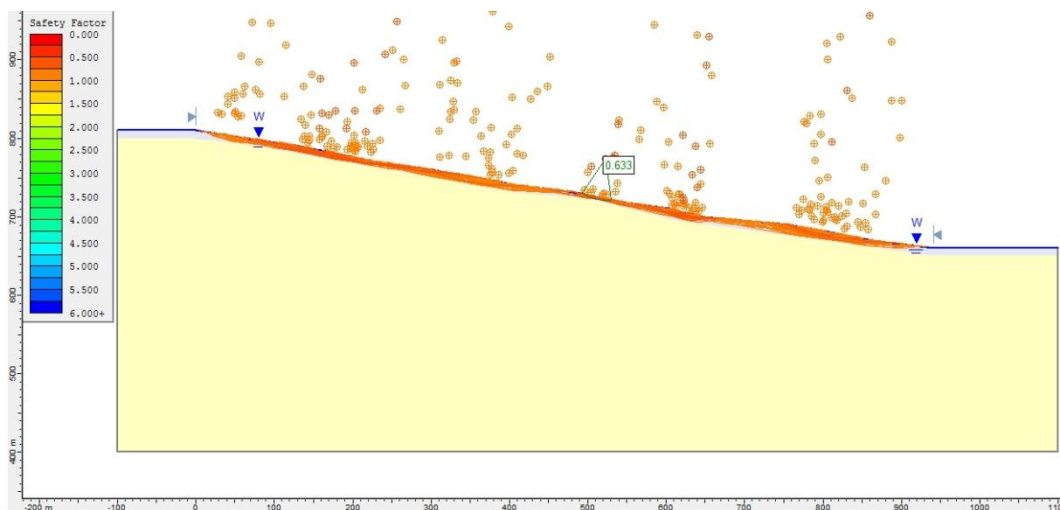


Fig. 6.6 – Superfici di scivolamento con $FS < 1$

6.3.3. Verifica C (analisi probabilistica e di sensitività)

Per l'analisi probabilistica si sono usate le opzioni di default del programma Slide cioè:

- Metodo di campionamento = Monte Carlo
- Numero di campioni $N = 1000$
- Tipo di analisi = minimo globale

Quando l'analisi è di minimo globale (Global Minimum) significa che l'analisi probabilistica è effettuata sulla superficie di scivolamento minima globale, trovata con analisi deterministica.

Il coefficiente di sicurezza sarà ricalcolato N volte (dove N = numero di campioni) per la superficie di scivolamento minima globale, utilizzando un diverso set di variabili di input generate casualmente per ogni analisi.

Al fine di effettuare un'analisi probabilistica, almeno uno dei parametri di input del modello deve essere definito come una variabile casuale.

Per fare l'analisi probabilistica sulla nostra sezione, per prima cosa, sono state assegnate due variabili casuali (angolo di attrito e coesione), lasciando, invece, fisso il valore del peso specifico, sia per il materiale frana che per il substrato.

Si è scelto di utilizzare una distribuzione normale e poi si è stabilito un valore per la media, la deviazione standard, il massimo e il minimo relativo, in base ai valori ricavati dalle indagini di laboratorio su tre campioni, per avere una distribuzione statistica per ogni variabile casuale inserita.

La media per la coesione è stata ricavata dai tre valori a disposizione della coesione di picco, cioè 10-10-20 kN/m^2 e per l'angolo di attrito, dai valori sia di picco che residui, cioè 23°-20°-18°-12.5°-12°-11°. Quindi, per questa verifica, la coesione media è 13.3 kN/m^2 e l'angolo di attrito medio è 16.1°.

Le deviazioni standard, che misurano la dispersione dei dati intorno al valore atteso o media, sono state stimate e non calcolate, vista la consistenza della base dei dati.

Il massimo relativo dei due parametri è stato calcolato moltiplicando per 3 il valore della deviazione standard, perché questo serve per garantire che una distribuzione normale sia completa e non troncata. Infatti per una distribuzione

normale il 99,7% di tutti i campioni dovrebbe cadere all'interno di 3 deviazioni standard dal valore della media.

Per il minimo relativo, però, adottando questo metodo si sarebbero ottenuti valori sotto lo 0 perché $\mu - 3\sigma < 0$, visto che $3\sigma > \mu$, quindi si sono scelti come valori del minimo relativo proprio i valori di μ , in modo da non andare nel campo dei numeri reali negativi (Tab.6.7).

Tab. 6.7 – Proprietà statistiche delle due variabili casuali

#	Material Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max
1	frana	Cohesion	Normal	13.3	7	13.3	21
2	frana	Phi	Normal	16.1	7	16.1	21

Per continuare con l'analisi, si è scelto di far variare anche l'altezza della tavola d'acqua, ipotizzando un valore massimo e minimo dei limiti della tavola d'acqua stessa. Come valore massimo si è scelto il piano campagna e come valore minimo una profondità della tavola d'acqua, costante lungo tutto il pendio, di -10 m dal piano campagna.

Il valore medio della tavola d'acqua viene calcolato direttamente dal programma. Una volta disegnata la tavola d'acqua minima, attraverso la traslazione della linea disegnata in precedenza per il valore massimo, si procede con l'analisi ottenendo la seguente grafica (Fig. 6.8):

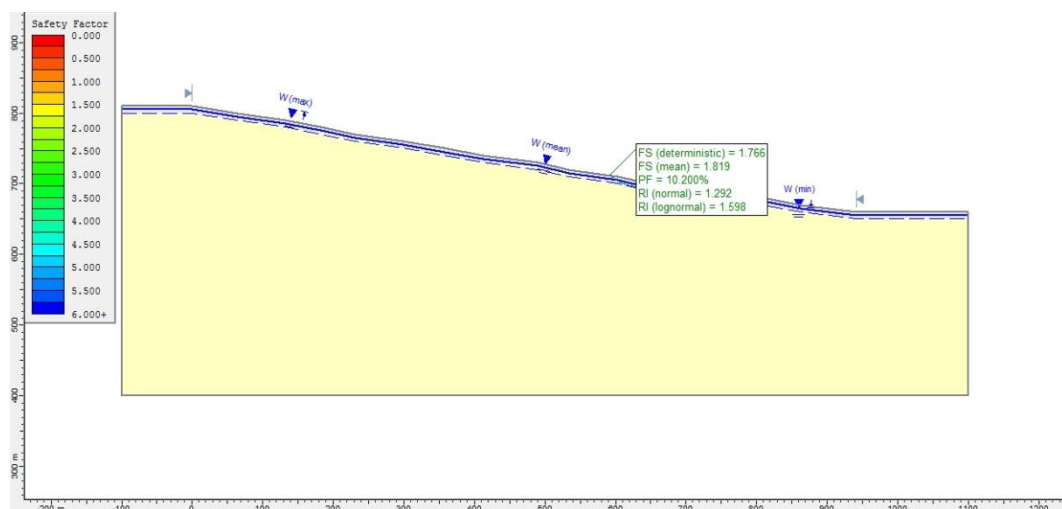


Fig. 6.8 – Risultati verifica C

I risultati principali dell'analisi probabilistica che compaiono nel grafico sono:

- FS (deterministic) - fattore di sicurezza deterministico
- FS (mean) - fattore di sicurezza medio
- PF - probabilità di instabilità della frana
- RI - indice di affidabilità

FS deterministic è il fattore di sicurezza calcolato per la superficie di scivolamento globale minima, attraverso un'analisi di stabilità regolare (non probabilistica). Questo è lo stesso fattore di sicurezza che si dovrebbe vedere se si effettua un'analisi deterministica, cioè è il valore di FS quando tutti i parametri di input sono esattamente uguali ai loro valori medi.

Nel caso in esame il FS deterministico vale 1.766 sempre calcolato con il metodo di Morgenstern-Price, ed è più elevato rispetto ai risultati illustrati in precedenza, in quanto i parametri medi sono migliori rispetto a quelli utilizzati per l'analisi A in particolare.

FS mean è il fattore di sicurezza medio cioè semplicemente la media tra tutti i fattori di sicurezza calcolati per la superficie di slittamento globale minima. In generale, il fattore di sicurezza medio dovrebbe essere vicino al valore del fattore di sicurezza deterministico. Per un numero sufficientemente elevato di campioni, i due valori dovrebbero essere quasi uguali.

Per il nostro caso il FS medio vale 1.819.

La probabilità di instabilità della frana (PF) è semplicemente il rapporto tra il numero di analisi che danno un fattore di sicurezza minore di 1 e il numero totale dei campioni.

$$PF = \frac{\text{numero analisi}_{(FS < 1)}}{\text{numero dei campioni}} \cdot 100\%$$

La PF, nel caso in questione, è 10.2% cioè significa che 102 dei 1000 campioni analizzati ci fornisce un FS minore di 1.

L'indice di affidabilità (RI) è l'indicazione del numero di deviazioni standard che separano il fattore di sicurezza medio dal fattore di sicurezza critico (FS = 1).

L'indice di affidabilità può essere calcolato ipotizzando sia una distribuzione normale o lognormale dei risultati del fattore di sicurezza.

Se si assume che i fattori di sicurezza sono distribuiti normalmente, allora l'equazione utilizzata per calcolare l'indice di affidabilità è:

$$RI = \frac{\mu_{FS} - 1}{\sigma_{FS}}$$

dove:

RI = indice di affidabilità

μ_{FS} = fattore di sicurezza medio

σ_{FS} = deviazione standard del fattore di sicurezza

Di solito sarebbe raccomandato un indice di affidabilità di almeno 3, come garanzia minima di stabilità di un pendio.

Nel nostro caso $RI = 1.292$, che indica un livello insufficiente di sicurezza per il pendio.

Se si assume che i fattori di sicurezza sono più adatti ad una distribuzione lognormale, allora l'equazione utilizzata è:

$$RI_{LN} = \frac{\ln \left[\frac{\mu}{\sqrt{1 + V^2}} \right]}{\sqrt{\ln (1 + V^2)}}$$

dove:

μ = fattore di sicurezza medio

V = coefficiente di variazione del fattore di sicurezza ($V = \sigma / \mu$).

Sulla nostra sezione RI_{LN} vale 1.598.

Per analisi di sensitività si intende semplicemente che, per uno o più parametri di input selezionati, l'utente specifica un valore massimo e minimo. Ogni parametro viene poi variato in incrementi uniformi, tra i valori di minimo e di massimo, e il fattore di sicurezza viene calcolato per ogni valore. Quando un parametro viene variato, tutti gli altri parametri di input sono tenuti costanti e pari al loro valore medio.

Un'analisi di sensitività indica quali parametri di input possono essere critici per la valutazione della stabilità del pendio, e quali parametri sono meno importanti.

È possibile effettuare sia analisi di sensitività che analisi probabilistiche nello stesso momento, come è stato per il nostro caso.

Al termine di questa verifica si è costruito un grafico, chiamato grafico di sensitività, nel quale è possibile individuare quale variabile casuale è più sensitiva, cioè quale variabile influenza maggiormente il comportamento del nostro versante.

Una curva ripida in questo grafico indica che il fattore di sicurezza è sensibile al valore del parametro. Una curva relativamente piatta indica, invece, che il fattore di sicurezza non è sensibile al valore del parametro.

Come si può vedere dal grafico (Fig. 6.9), per la sezione della frana di Poggio Ancisa, il fattore di sicurezza è più sensibile all'angolo di attrito (curva verde che è la più ripida), e meno sensibili alla variazione della tavola d'acqua (la curva blu è quasi piatta).

Bisogna tenere presente quanto segue sul grafico di sensitività:

- Se sono tracciate più variabili, l'asse orizzontale del grafico è in termini di percentuale;
- Percentuale uguale a 0 rappresenta il valore minimo di ciascuna variabile, e percentuale uguale a 100 rappresenta il valore massimo di ogni variabile; si noti che tutte e 3 le curve si intersecano nella percentuale = 50%. Percentuale = 50% rappresenta sempre il valore medio di ciascuna variabile.

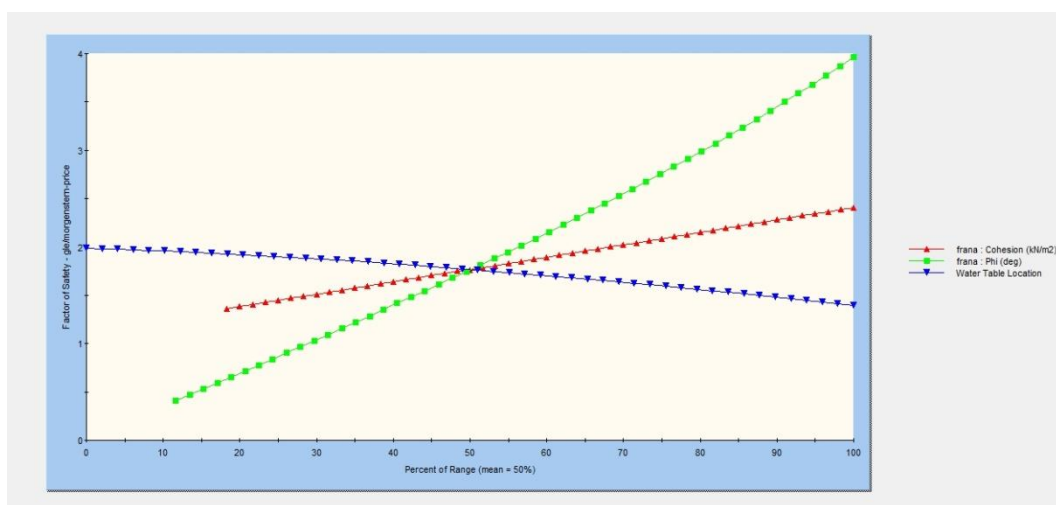


Fig. 6.9 – Grafico di sensitività delle tre variabili

6.3.4. Verifica D (analisi deterministica – parametri residui e tavola d’acqua abbassata di 15 m rispetto al piano campagna)

Abbassando la tavola d’acqua di 15 metri dal piano campagna, operazione realizzabile nella realtà attraverso opere di drenaggio, (si suppone un drenaggio costante lungo tutto il pendio), e considerando i parametri geotecnici peggiori cioè quelli residui, si ottiene la seguente grafica (Fig. 6.10):

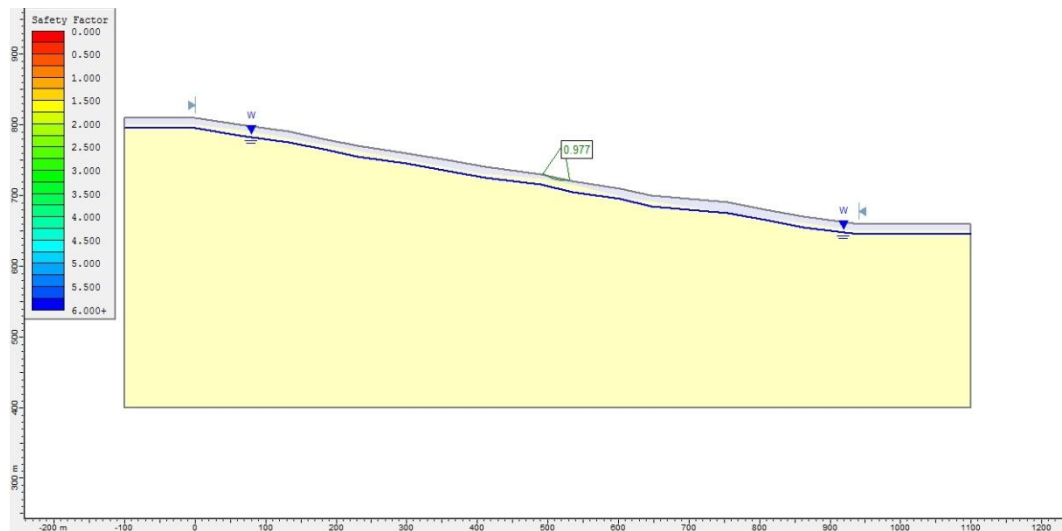


Fig. 6.10 – Risultati verifica D

Da queste condizioni ne consegue un coefficiente di sicurezza minimo, ottenuto con il metodo di Morgenstern-Price, pari a 0.977. Quindi, per rendere il pendio stabile, non sarebbe sufficiente questo livello di drenaggio, perché il FS rimane minore di 1.

Mettendo a confronto le due situazioni (con tavola d’acqua al piano campagna e abbassata di 15 metri dal piano campagna), e filtrando le superfici di scivolamento con quelle che hanno un $FS < 1.3$, che è il FS che si dovrebbe realizzare in un pendio per assicurare una completa stabilità, si può notare come le superfici con un FS sotto tale valore, nel caso di abbassamento della falda, siano molto minori rispetto al caso di falda a piano campagna (Fig. 6.11). Anche se è avvenuto questo notevole miglioramento delle condizioni generali del pendio, comunque il drenaggio, come abbiamo già constatato, non sarebbe sufficiente a garantire la stabilità del pendio.

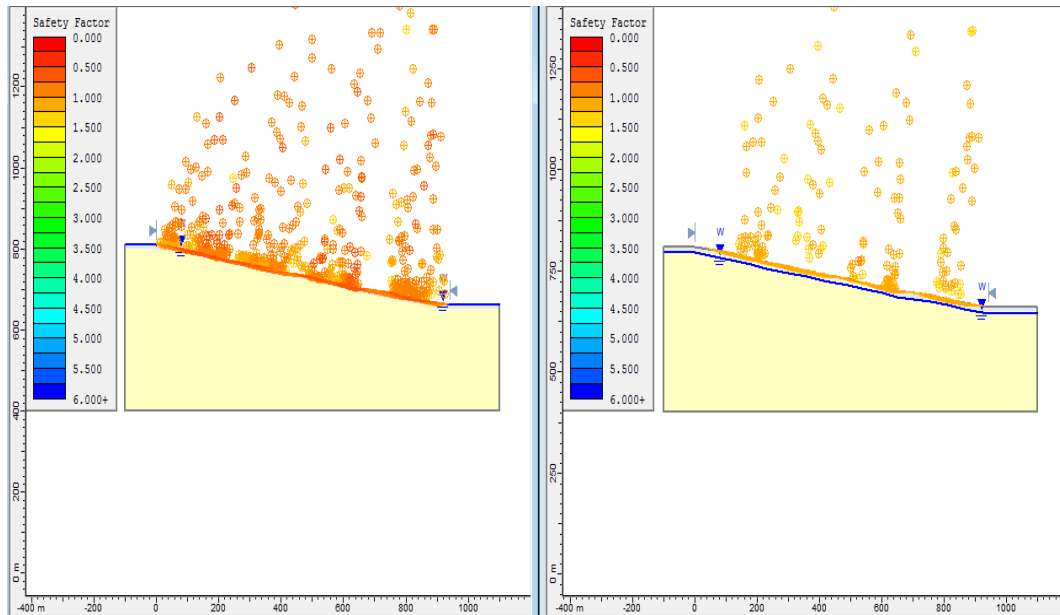


Fig. 6.11 – Confronto tra verifica B e D, filtrando le superfici di scivolamento con $FS < 1.3$

Ipotizziamo però di trovarci in condizioni di parametri geotecnici scadenti ma non residue, cioè per il materiale frana consideriamo i valori medi trovati sopra, sia per l'angolo di attrito che consideriamo pari a 16.1° , che per la coesione che consideriamo pari a 13.3 kN/m^2 . In questo caso possiamo notare come il FS aumenta notevolmente arrivando fino a 1.994 (Fig. 6.12), e quindi il drenaggio realizzato sarebbe sufficientemente idoneo per portare il versante ad una completa stabilità.

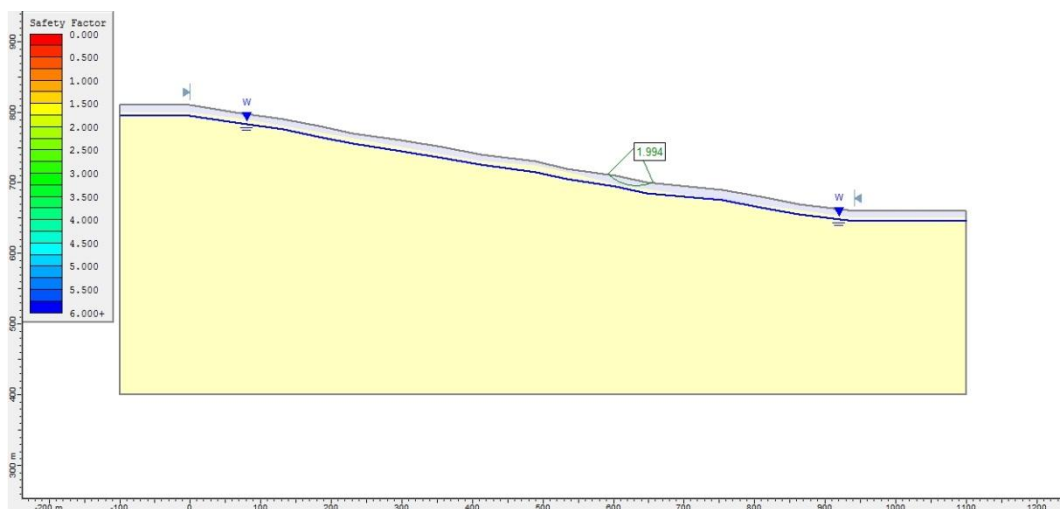


Fig. 6.12 – Risultati verifica D con parametri geotecnici scadenti ma non residui

6.3.5. Verifica E (analisi deterministica – parametri medi e tavola d’acqua abbassata di 15 m rispetto al piano campagna tra una quota di 710 e 700 m s.l.m.)

Una visione più realistica, però, ci porta a ideare un drenaggio che non sia uniforme lungo tutto il versante ma che sia concentrato nei punti più critici dello stesso e che sia, eventualmente, affiancato da altre opere di consolidamento quali le opere di sostegno, specialmente nei pressi della strada comunale Albereta-Poggio Ancisa.

Realizzando, perciò, un abbassamento della falda di 15 m dal piano campagna, tra una quota di 710 e 700 m s.l.m. (poco a monte della strada) e utilizzando i valori medi dei parametri geotecnici (angolo di attrito pari a 16.1° e coesione pari a 13.3 kN/m^2), si può ricavare la grafica seguente (Fig. 6.13):

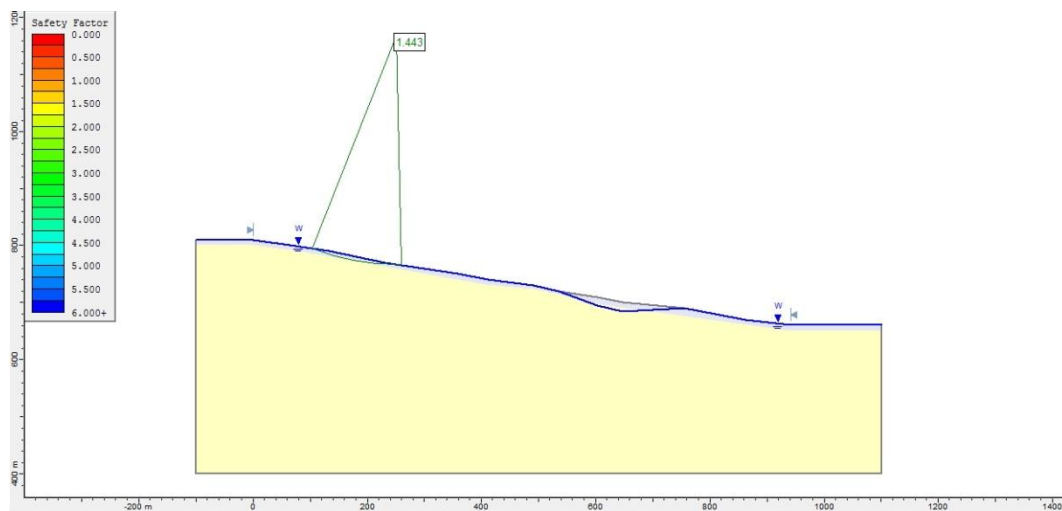


Fig. 6.13 – Risultati verifica E

Come vediamo, il FS, calcolato con Morgenstern-Price, è 1.443 in una superficie di scorrimento posizionata molto più a monte della zona in cui siamo intervenuti con il drenaggio. Quindi $FS > 1$ e, con il solo drenaggio puntuale nella zona da considerare la più critica, siamo stati in grado di rendere il pendio generalmente più stabile.

Capitolo 7

Proposte di misure di mitigazione del fenomeno franoso

7.1. Interventi di consolidamento dei versanti

La sistemazione di un pendio naturale in frana o di un'area soggetta ad escavazione presenta caratteristiche molto differenti a seconda della causa che ha generato il dissesto, dell'ambiente, del tipo di terreno e delle pendenze del versante. Il consolidamento e la stabilizzazione dei versanti viene attuata attraverso le seguenti tipologie di opere:

- Opere di protezione e consolidamento superficiale: le opere per il controllo dell'erosione superficiale (abbinamento di materiali vivi e inerti come legname, calcestruzzo, metalli etc.) creano condizioni ambientali e di stabilità necessarie all'attecchimento e alla crescita della vegetazione impiantata sui pendii in terra. La copertura vegetale, così realizzata, consente un efficace controllo e mitigazione dei fenomeni d'erosione, proteggendo il terreno dall'azione aggressiva delle acque meteoriche e superficiali, del vento e delle escursioni termiche. Tra queste opere si possono aggiungere anche le opere di difesa dalla caduta massi e le opere speciali che comprendono gli interventi volti a migliorare le caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni e delle rocce (trattamenti di iniezione, termici, chimici ed elettrici).

- Opere di sostegno: queste strutture sono impiegate negli interventi di sistemazione e consolidamento dei versanti in frana e nella realizzazione di un'ampia gamma di opere di ingegneria per stabilizzare e/o sostenere terreno o altro materiale, quando per cause naturali o artificiali, quali scavi e riporti, si hanno condizioni che non permettono al terreno di assumere la sua naturale pendenza d'equilibrio. Si realizzano murature (in pietrame, in calcestruzzo, in cemento armato), terre rinforzate, chiodatura del terreno, gabbionate, pali, ancoraggi, spritz beton.
- Opere di drenaggio.

Per il caso di studio le opere realizzabili sono quelle di drenaggio, sia superficiale che profondo.

7.2. Interventi di drenaggio

Gli interventi di drenaggio hanno lo scopo di allontanare e di raccogliere le acque superficiali e sotterranee in corrispondenza di pendii instabili o di terreni di fondazione da bonificare e consolidare, in modo da diminuire le pressioni interstiziali e conseguentemente le spinte del terreno.

In termini più generali i drenaggi comprendono anche gli interventi diretti ad esercitare un'azione regolatrice delle acque correnti superficiali non incanalate e di quelle stagnanti in depressioni.

Negli interventi di sistemazione e consolidamento dei versanti in frana e nelle realizzazioni delle opere di ingegneria civile, sono utilizzati vari metodi e strumenti per il drenaggio, applicati sia per un effetto temporaneo che per un'azione drenante permanente.

Gli interventi di drenaggio si possono suddividere in due gruppi principali:

- opere di drenaggio di tipo superficiale;
- opere di drenaggio di tipo profondo.

I drenaggi di tipo superficiale, comprendenti le opere di regimazione e drenaggio delle acque superficiali e di sistemazione del pendio di primo intervento, sono quelli di più rapida e facile installazione e manutenzione, ma sono anche quelli che più facilmente si danneggiano e necessitano di manutenzione continua.

I drenaggi profondi, che in genere hanno un carattere definitivo, necessitano di opere e di attrezzature più complesse per la loro installazione e sono più costosi. A fronte di questi svantaggi assicurano, però, una maggiore efficacia nella stabilizzazione di versanti in frana.

In considerazione del fatto che è spesso difficile valutare l'efficacia di un sistema di drenaggio in fase di progettazione, è prassi consolidata valutare gli effetti del sistema attraverso piezometri che fanno parte integrante del sistema stesso e sono installati contemporaneamente ad esso. La loro lettura periodica consente di valutare i riflessi del sistema di drenaggio sulle acque sotterranee e, in base a questi, ottimizzare il loro funzionamento.

7.2.1. Drenaggi superficiali

Canalette superficiali: sono fra le opere di drenaggio più frequentemente utilizzate negli interventi di sistemazione di aree dissestate, con l'obiettivo di captare e allontanare le acque superficiali, non solo quelle provenienti dalle precipitazioni o dalle emergenze idriche ma anche quelle stagnanti entro eventuali depressioni.

La disposizione delle canalette superficiali, realizzate sia all'interno che all'esterno dell'area dissestata, può essere trasversale o longitudinale rispetto al pendio. Possono essere in terra, in legname e pietrame, prefabbricate in calcestruzzo, prefabbricate in lamiera.

Fossi di guardia: sono realizzati eseguendo scavi con sezione ad U o trapezoidale, immediatamente a monte della nicchia di distacco, in modo da intercettare le acque correnti superficiali lungo il versante ed allontanarle dall'area instabile. Lo scavo ha, in genere, un rivestimento rigido in calcestruzzo.

Dreni intercettori: sono realizzati immediatamente a monte della nicchia di distacco ed a valle del fosso di guardia. I dreni sono realizzati eseguendo uno scavo, spinto in profondità fino ad intercettare l'eventuale superficie piezometrica della falda, e parzialmente riempito da materiale drenante. Il corpo drenante è costituito in genere da ghiaia pulita separata dalle pareti e dal fondo dello scavo da

tessuto non tessuto. La raccolta e l'allontanamento delle acque dal dreno sono garantiti da un tubo fessurato in PVC.

Riprofilatura del versante: questi interventi consistono in movimenti di terra aventi lo scopo di eliminare le depressioni o le altre forme presenti nel versante in frana che sono sede di ristagno d'acqua e, più in generale, favorire il drenaggio delle acque di precipitazione. Le acque intercettate sono allontanate dall'area dissestata e convogliate negli impluvi naturali mediante canalette.

Sigillatura ed impermeabilizzazione delle fessure beanti: le fessure beanti, presenti soprattutto nella parte alta dell'area in frana, sono una delle più importanti vie di infiltrazione delle acque meteoriche superficiali in profondità. Il materiale utilizzato per la sigillatura e l'impermeabilizzazione è preferibilmente costituito da argilla, adeguatamente costipata. Anche in questo caso occorre completare il sistema con un adeguato drenaggio superficiale per intercettare le acque provenienti da monte che potrebbero essere convogliate verso le fratture.

7.2.2. Drenaggi profondi

Cuneo filtrante: l'intervento è realizzato alla base del pendio o della scarpata da stabilizzare, preferibilmente previa sistemazione mediante terrazzamenti con muri a secco e/o rivestimenti di scogliera in pietrame. Il materiale drenante (pietrisco o ghiaia) è disposto con la stessa pendenza del versante. Alla base dello scavo è posto un tubo drenante, in grado di allontanare le acque della falda e quelle meteoriche di infiltrazione.

Dreni sub-orizzontali: i dreni sono costituiti da tubazioni fessurate in PVC, inseriti in fori suborizzontali o leggermente inclinati verso l'alto, eseguiti mediante macchine idrauliche potenti e molto versatili.

I dreni orizzontali sono spesso associati all'installazione di altri tipi di sistema di drenaggio sia profondo che superficiale.

I tubi sono in genere rivestiti con geotessili per evitare l'intasamento da parte di sedimenti a granulometria fine. Le profondità massime che possono essere raggiunte dai tubi drenanti sono dell'ordine di 50 - 60 m.

I tubi drenanti possono rappresentare il solo sistema di drenaggio profondo del terreno oppure, molto più frequentemente, possono essere abbinati ad altre opere, come pozzi verticali di grande diametro o gallerie drenanti. In tal caso i tubi possono essere disposti a raggiera su uno o più ordini, oppure paralleli tra loro. Il dimensionamento, il numero, la disposizione e la profondità dei tubi drenanti devono essere scelti sulla base di un'accurata indagine geologica ed idrogeologica, finalizzata ad acquisire i parametri idrogeologici del terreno necessari per una corretta progettazione del sistema drenante volto all'abbattimento della falda. È prassi consolidata installare nell'area di influenza dei dreni alcuni piezometri per monitorare gli effetti del sistema sulla falda ed eventualmente apportare modifiche per ottimizzarne il funzionamento.

Trincee drenanti: sono delle strutture allungate disposte in genere parallelamente alla linea di massima pendenza del versante, con profondità limitate (possono raggiungere i 4-6 m) e larghezze di poco inferiori o superiori al metro.

In epoca più recente l'aspetto innovativo di questa tecnica è rappresentato soprattutto dalla possibilità di raggiungere profondità di drenaggio maggiori, anche fino a 10 - 12 m, senza dover ricorrere a scavi di cunicoli e gallerie, dalla rapidità di esecuzione e dal perfezionamento delle tecniche costruttive, volte a garantire l'efficienza e la durata nel tempo dell'azione drenante e consolidante di queste strutture.

Le modalità di esecuzione delle trincee drenanti sono diverse in funzione della profondità e delle diverse situazioni litologiche ed idrogeologiche locali. Sul fondo della trincea può essere installata una canaletta in calcestruzzo sopra la quale è posto un tubo (PVC, PE, metallico o in cemento).

Al di sopra della canaletta e del tubo di raccolta è posto il corpo drenante: questo può essere formato da un filtro in terreno naturale, o in alternativa da geotessili.

Nel primo caso il materiale drenante è costituito da ghiaia e sabbia pulita, con scarso fango, ricoperto da uno strato sommitale di terreno vegetale. Nel secondo caso il corpo drenante è formato da uno strato di ghiaia pulita, completamente

avvolto con un telo di tessuto non tessuto posto a contatto col terreno da drenare. Al di sopra di questo, il riempimento della trincea è completato da uno strato di sabbia e dallo strato sommitale di terreno vegetale.

Queste opere sono un efficace sistema di drenaggio profondo delle acque di infiltrazione e di quelle della falda.

Speroni drenanti: queste strutture sono utilizzate per il consolidamento di pendii in frana quando, sia per la profondità del piano di scorrimento sia per le caratteristiche litologiche e giaciture del terreno, è necessario abbinare all'azione drenante anche un'azione resistente nei confronti delle spinte dei terreni in movimento, in modo da poter costituire un sistema autoconsolidante senza ricorrere ad altre opere di sostegno.

Gli speroni drenanti sono realizzati con scavi a sezione ristretta, eventualmente sostenuti da armature provvisorie, utilizzando macchine scavatrici e/o perforatrici in grado di raggiungere profondità anche superiori ai 7 m. Lo scavo è completato con la posa sul fondo di una cunetta in calcestruzzo gradonata.

Nella configurazione standard la struttura è formata da un drenaggio longitudinale a sezione variabile che interseca la superficie di scorrimento e si scarica su di una struttura resistente che ne costituisce la base.

Pali e paratie drenanti: le paratie drenanti costituiscono un sistema caratterizzato da una tecnologia innovativa che permette di raggiungere profondità di drenaggio superiori ai 30 m.

Le paratie drenanti possono spingersi fino a profondità di circa 30 m, con spessore variabile da 60 a 120 cm.

In funzione delle modalità di esecuzione dello scavo e del tipo di sostegno adottato si possono avere:

- paratie a pali secanti, idonee per suoli che consentono lo scavo del singolo palo senza sostegno, per il tempo necessario all'inserimento del tubo "gobbo" ed al suo riempimento con materiale drenante.
- Paratie a pannelli, realizzate con scavo in miscela bentonitica in terreni che necessitano di sostegno per permettere l'inserimento delle casseforme di forma rettangolare ed il loro riempimento con materiale drenante. Questo tipo di paratie viene anche fatto eseguendo lo scavo mediante getto

d'acqua ad altissima pressione e lo spurgo del terreno scavato con aria compressa, il tutto entro cassaforma rettangolare infissa progressivamente nel terreno. Quest'ultima tecnica consente di avere sia il necessario sostegno delle pareti dello scavo, sia una più facile messa in opera del materiale drenante e dei geotessili.

Pozzi drenanti: possono essere di medio e grande diametro; sono opere di drenaggio profondo, utilizzate in corrispondenza di aree di cui non è noto, con sufficiente approssimazione, l'andamento delle linee di flusso delle acque sotterranee o in cui è presente una situazione litostratigrafica eterogenea, caratterizzata da alternanze di orizzonti a differente permeabilità e idrogeologia complessa.

La realizzazione di queste opere comporta l'uso di attrezzature moderne e di tecniche di perforazione comunemente impiegate per lo scavo dei pozzi d'acqua.

I pozzi possono essere realizzati isolatamente oppure accostati tra loro in modo da formare una paratia drenante. In questo caso è necessario riempire il foro solo con materiale drenante e lo scarico delle acque avviene per gravità.

Le moderne tecnologie impiegate nell'esecuzione dei drenaggi profondi, hanno consentito l'introduzione di un tipo di intervento composito, costituito da pozzi verticali drenanti, accessibili anche in via permanente, collegati tra loro da fori per lo scarico delle acque per gravità, muniti di dreni suborizzontali eseguiti a raggiera dall'interno dei pozzi, disposti su due o più livelli. Questa soluzione permette di allargare notevolmente l'area d'influenza del sistema drenante.

I pozzi possono essere costituiti da una corona esterna di pali trivellati e rivestimento interno delle pareti in calcestruzzo, messo in opera entro casseforme in acciaio. In alternativa si possono avere pareti in cemento armato, eseguite con elementi di paratia per pozzi.

I pozzi così eseguiti assolvono, oltre alla funzione di drenaggio e di controllo dell'andamento delle falde freatiche, anche un importante funzione strutturale di sostegno, fondamentale negli interventi di consolidamento e stabilizzazione di pendii in frana che coinvolgono infrastrutture o abitati.

Gallerie drenanti: sono opere di drenaggio profondo caratterizzate da costi di realizzazione elevati. Per questo motivo si ricorre ad esse solo in caso di

condizioni di vulnerabilità di infrastrutture civili o insediamenti abitativi, causate da frane di dimensioni molto estese.

Le gallerie di drenaggio interessano i terreni stabili circostanti la massa in frana e sono in genere raccordate a pozzi verticali di grande diametro. La sezione è in genere modesta, con dimensioni minime tali da consentirne l'ispezione e la manutenzione. Il fondo dello scavo è rivestito da una platea in calcestruzzo mentre le spalle sono in genere in muratura. La base è posta a profondità leggermente maggiore del livello medio delle acque sotterranee, mentre la sommità raggiunge ed intercetta il livello stesso. In alcuni casi, a partire dalle gallerie si sviluppa una rete di drenaggi suborizzontali per rendere più efficace l'intero sistema.

7.3. Primi interventi di risagomatura (previsti dal Servizio Tecnico Bacini Conca Marecchia)

Dalla relazione “Frana di Albereta – Poggio Ancisa in comune di Casteldelci: primi interventi di mitigazione del rischio idrogeologico e ripristino provvisorio viabilità della strada comunale Fonte del Frate” del Geol. C. C. Lucente, si sono estrapolate le seguenti informazioni, in riguardo ai primi interventi di mitigazione del dissesto oggetto di studio.

La mitigazione avrà lo scopo di realizzare gli interventi necessari, che consentano di controllare il fenomeno franoso e limitarne gli effetti, agendo sulla raccolta e allontanamento delle acque di versante, causa principale del dissesto.

Sono previsti in questa fase i seguenti interventi (Fig. 7.1), per l'importo di € 60.000,00:

- risagomatura del Fosso del Poggio nel tratto a monte della strada comunale “Fonte del Frate”;
- realizzazione di fossi a cielo aperto con convogliamento acque nel Fosso del Poggio;
- intercettazione di alcune sorgenti nell'area di nicchia mediante dreni suborizzontali;
- realizzazione e mantenimento di arginature per il contenimento della colata entro l'alveo del Fosso del Poggio in corrispondenza dei punti a rischio di esondazione della massa in movimento (acqua + fango e detrito);

- ripristino viabilità provvisoria con ripristino dell'attraversamento del Fosso del Poggio, mediante l'impiego di tubi autoportanti e utilizzo di massi ciclopici a difesa delle sponde e del fondo.

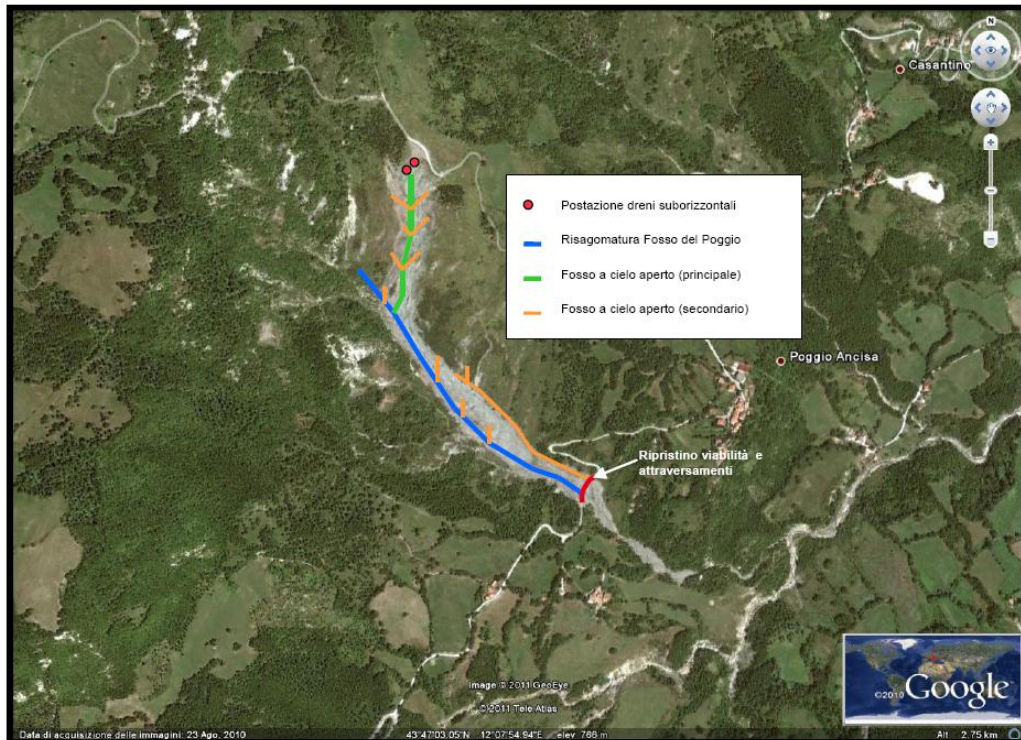


Fig. 7.1 – Ubicazione delle principali opere previste per la mitigazione del rischio idrogeologico (la foto aerea è tratta da Google Earth, agosto 2010).

Considerate l'attività e l'intensità del fenomeno franoso in esame, è bene qui sottolineare che, a prescindere dalla manutenzione, le opere di regimazione non danno garanzia di durata nel tempo in assenza di un intervento strutturale finalizzato alla stabilizzazione dell'area di nicchia della frana. L'intervento strutturale ipotizzato consiste in una paratia su pali da ubicarsi alla base dell'anfiteatro di nicchia in corrispondenza di una naturale strettoia (Fig. 7.2).



Fig. 7.2 - Nicchia della frana con ubicazione alla base della paratia su pali ipotizzata. La morfologia della nicchia è aggiornata a dicembre 2010.

L'intervento dovrebbe impedire l'alimentazione (apporto di altro materiale per regressione della linea di coronamento) del corpo principale della frana. In via preliminare è stata fatta una stima minima dei costi della paratia quantificabili in € 50.000,00.

Per quanto riguarda la sistemazione della strada comunale, si prevede di eseguire un intervento che possa consentire il transito in via del tutto provvisoria. Interventi di ripristino della viabilità in forma definitiva si possono prendere in considerazione solo in presenza di un intervento strutturale di cui sopra e implementando le opere di regimazione delle acque. Anche in questo caso è stata fatta una stima preliminare che prevede una spesa di altri € 50.000,00.

7.4. Proposta di un intervento di mitigazione alternativo

Le verifiche di stabilità hanno indicato che un miglioramento del fattore di sicurezza può ottenersi attraverso un significativo drenaggio del corpo di frana, preferibilmente da associare ad opere di contenimento strutturale, finalizzate sia ad un incremento delle forze resistenti sul versante, sia alla tutela delle opere di drenaggio stesse, vulnerabili in presenza di assestamenti importanti della frana.

Nel caso della frana di Poggio Ancisa, sull'esempio di interventi eseguiti su frane simili (sia per caratteristiche geologiche che idrogeologiche), è possibile ipotizzare un intervento che abbinì il drenaggio, superficiale e profondo, ad opere di sostegno nei pressi della strada comunale Albereta-Poggio Ancisa.

Per le opere di sostegno, la scelta potrebbe ricadere su una paratia (in rosso nella Fig. 7.3) costituita da una doppia fila di pali in cemento armato disposti a quinconce, profondi fino ad intercettare il substrato (circa 10 m) e collegati in testa da una trave in cemento armato (Fig. 7.4).



Fig. 7.3 - Ubicazione delle opere previste (la foto aerea è tratta da Google Earth, agosto 2010).

La trave viene ancorata al terreno mediante tiranti a più trefoli che vengono parzialmente pre-tensionati e in parte monitorati attraverso celle di carico. Per tutto lo sviluppo della paratia viene realizzato un muro fuori terra solidale con la trave.

La paratia sarà localizzata subito a monte o in corrispondenza del tracciato della strada comunale, in modo tale da tagliare trasversalmente l'intero corpo di frana. In questo punto la frana ha una larghezza ridotta (circa 70 m), quindi la realizzazione di questo tipo di intervento è idonea.



Fig. 7.4 – Foto di una paratia

A tergo dalla paratia si possono realizzare batterie di dreni sub-orizzontali di lunghezza variabile.

Il drenaggio profondo del corpo di frana può essere garantito realizzando schermi di pozzi drenanti a monte della paratia (in giallo nella Fig. 7.3).

Tali schermi, oltre a permettere il raggiungimento di discrete profondità (anche nell'ordine dei 30 m), si configurano come opere molto resistenti ed efficaci, ispezionabili e di facile manutenzione (Fig. 7.5 e 7.6). Il numero e l'interasse dei pozzi si definirà con studi più approfonditi, in base all'estensione dell'area da drenare e alla permeabilità del terreno, e valutando per quanto possibile il potenziale raggio d'influenza di ciascun pozzo.

Allo scopo di rendere agevoli gli interventi di manutenzione, gli schermi trasversali di pozzi si potrebbero realizzare secondo moduli costituiti da un pozzo ispezionabile ogni tre pozzi complessivi (1 pozzo drenante ispezionabile ogni 2 pozzi solo drenanti). Tutti i pozzi saranno, inoltre, collegati sul fondo da una condotta di scarico (dreni orizzontali), realizzata mediante esecuzione di perforazione sub-orizzontale dall'interno dei singoli pozzi. La raccolta e lo scarico delle acque drenate dai pozzi è affidata ad uno schermo longitudinale di pozzi, congiungente gli schermi di pozzi trasversali.



Fig. 7.5 e 7.6 – Foto di schermi di pozzi drenanti a monte della paratia

Una delle questioni chiave è, infatti, quella di allontanare dal pendio l'acqua di scarico dai pozzi e raccolte dai dreni di sbocco, per consentire un rapido deflusso e migliorare la stabilità dei versanti. A tal fine, si può progettare un modello adeguato di deviazione dei fossi per convogliare l'acqua ai corsi d'acqua ai bordi del corpo di frana.

Si potrebbe pensare di affiancare a tutto ciò delle opere di sistemazione superficiale, al termine dei lavori, che permetterebbero di conferire al versante un

profilo finale quanto più possibile migliorativo della stabilità, di regimare le acque superficiali e di ridurre i processi erosivi al fine di favorire lo sviluppo di una nuova copertura vegetale, anche con l'ausilio di adeguati interventi di idrosemina. Dopo l'ultimazione dei lavori, inoltre, è da prevedere un ripristino della rete di monitoraggio inclinometrico e piezometrico già presente sul corpo di frana e un raffittimento di tale rete. Questa permetterebbe di controllare il comportamento meccanico e idrogeologico della frana e, quindi, di valutare l'efficacia dell'intervento di consolidamento eseguito.

Come ultima considerazione, si può aggiungere che, a causa delle dimensioni e caratteristiche litologiche della frana, è molto difficile raggiungere il consolidamento definitivo a costi ragionevoli, soprattutto se confrontato con il valore intrinseco degli edifici e delle infrastrutture soggette a rischio.

7.5. Considerazioni sulla proposta di consolidamento del Servizio Tecnico Bacini Conca Marecchia e sulla mia proposta

Innanzitutto la proposta di consolidamento del Servizio Tecnico Bacini Conca Marecchia riguarda tutto il versante in frana, mentre nella mia proposta si è presa in considerazione solo la zona centrale e terminale del pendio, che è la parte su cui è stato tracciato il profilo topografico, sul quale ho effettuato le verifiche di stabilità all'equilibrio limite.

- Nel mio progetto non ho quindi considerato la mitigazione della zona di nicchia, però è ragionevole e verosimile poter pensare di realizzare, come si ipotizza nella proposta del Servizio Tecnico, l'intercettazione di alcune sorgenti nell'area di nicchia mediante dreni sub-orizzontali.
- Ho invece delle perplessità sulla costruzione della paratia su pali da ubicarsi alla base dell'anfiteatro di nicchia, perché, a mio avviso, rischia di essere un intervento insufficiente al contenimento del materiale; infatti la frana è retrogressiva e non è possibile sapere con precisione l'entità dell'arretramento verso monte e del quantitativo di materiale ulteriormente coinvolto da questo arretramento, ovvero le spinte delle terre che saranno eventualmente mobilizzate da futuri eventi di riattivazione. Inoltre la creazione di un'opera

così importante in termini di dimensioni, potrebbe, con il suo peso, andare a caricare una zona già molto critica, destabilizzandola ulteriormente.

- La risagomatura del versante, sempre a mio avviso, non è sufficiente a garantire il naturale deflusso delle acque verso il Torrente Senatello. Ritengo sia da preferire il drenaggio ipotizzato nella mia proposta, che favorirebbe in modo più marcato il deflusso delle acque, soprattutto sotterranee, in un'area in cui i livelli di falda in passato si sono dimostrati anche prevalenti.
- Vista la continua mobilità della frana e le sue notevoli dimensioni, penso sia inutile aggiungere altre opere di sostegno più a monte nel corpo di frana, anche tenendo conto degli ingenti costi per la loro realizzazione, in relazione ai rischi ridotti per le opere e le infrastrutture presenti; piuttosto, credo più utile, come dimostrano anche le verifiche di stabilità fatte, cercare di abbassare la falda attraverso ulteriori drenaggi rispetto a quelli della mia proposta. Si potrebbe pensare, allora, di intervenire formando altri schermi di pozzi drenanti a mano a mano che si procede verso monte, supportati anche dall'utilizzo di dreni sub-orizzontali.

Conclusioni

Lo studio fatto sulla frana di Poggio Ancisa verte su alcune fasi del monitoraggio degli spostamenti (rilievo con GPS e con GBInSAR) e sulla raccolta dati, ricavati dalle fasi del monitoraggio antecedenti al novembre 2010 (sondaggi, prove sismiche a rifrazione, monitoraggio con inclinometri e piezometri). I dati sono stati acquisiti dal Servizio Tecnico Bacini Conca Marecchia (Regione Emilia-Romagna) di Rimini.

L'analisi dei dati, provenienti dalle prime fasi del monitoraggio, ha consentito la realizzazione di un modello geologico del versante e, in un secondo momento, l'esecuzione, tramite il software Slide di Rocscience, di diverse verifiche di stabilità all'equilibrio limite. In queste è emerso che un corretto drenaggio, svolto anche solo localmente a monte della strada comunale, permette di stabilizzare il versante in questo punto, che si è dimostrato essere il più critico (infatti si è raggiunto un $FS > 1.3$).

Le verifiche di stabilità, unite a tutte le informazioni raccolte, mi hanno permesso di fare una proposta di consolidamento e, in seguito, di fare delle considerazioni sulle differenze esistenti tra la mia proposta di intervento e quella del Servizio Tecnico Bacini Conca Marecchia.

Per avere uno studio più completo, quindi poter avere informazioni più precise ai fini di predisporre sia un piano di monitoraggio post-evento che una proposta di mitigazione idonea, sarebbero da correlare ai dati a mia disposizione, anche quelli ottenuti con rilievo GPS e GBInSAR ma, come detto, questi sono ancora in fase di elaborazione.

Un'ultima considerazione è che un intervento di consolidamento imponente e più spinto di quelli proposti, anche in termini di costi, potrebbe risultare eccessivo, considerando che la frana è tuttora attiva, che i volumi di terreno coinvolti sono notevoli e che la zona affetta dalla frana è un'area a rischio molto basso. Infatti nella situazione attuale, il pericolo maggiore riguarda solo le due strade che corrono a monte e a valle della frana e gli scenari di rischio di coinvolgimento del fondovalle, con ripercussioni sulla frana di Schigno, si presentano piuttosto remoti.

Bibliografia e sitologia

- APAT – Dipartimento Difesa del Suolo (2002) “Atlante delle opere di sistemazione dei versanti – Manuali e linee guida”
- APAT – Dipartimento Difesa del Suolo (2008) “Carta geologica d’Italia alla scala 1:50000, foglio 278 Pieve Santo Stefano”
- A. Corsini, F. Cervi, G. Ciccarese, J.P. Iannaccone, F. Ronchetti, E. Bertacchini, A. Capra, M. Berti, E. Brancaloni, P. Mora, V. Pancioli, A. Gallucci, G. Gozza, A. Monni, M. Generali, M. Pizziolo, G. Caputo, G. Truffelli, V. Manzi, F. Ghiselli, M. Guida, G. Minardi, C.C. Lucente, A. Bernardi, A. Benini “Surveillance of landslide risk areas with ground-based interferometric SAR for Civil Protection in Emilia Romagna (Italy)”
- A. Corsini, L. Borgatti, G. Caputo, N. De Simone, G. Sartini, G. Truffelli (2006) “Investigation and monitoring in support of the structural mitigation of large slow moving landslides: an example from Ca’ Lita (Northern Apennines, Reggio Emilia, Italy)” - *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 55–61
- A. Corsini, P. Farina, G. Antonello, M. Barbieri, N. Casagli, F. Coren, L. Guerri, F. Ronchetti, P. Sterzai, D. Tarchi (2006) “Space-borne and ground-based SAR interferometry as tools for landslide hazard management in civil protection”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, No. 12, 2351 – 2369
- Berardi, Bovolenta – Corso di consolidamento “Analisi di stabilità dei pendii”, “Frane”, “Introduzione al problema delle frane e cenni alle analisi di rischio (implicazioni sulla Pianificazione di Bacino)”

- C. C. Lucente, con la collaborazione di Ing. G. Brizzi e Geom. R. Grifoni (2010) “La frana di Albereta - Poggio Ancisa: gestione del dissesto e rischio idrogeologico correlato”
- C. C. Lucente (2011) “Frana di Albereta-Poggio Ancisa in comune di casteldelci: primi interventi di mitigazione del rischio idrogeologico e ripristino provvisorio viabilità della strada comunale Fonte del frate”.
- E. Ronci “Dallo statico al network RTK: l’evoluzione del rilievo satellitare”
- Geocoter Società cooperativa (2010) “Relazione tecnica - Indagine sismica per la caratterizzazione del movimento franoso che interessa il versante prossimo all'abitato di Casteldelci (RN)”
- Geocoter Società cooperativa (2010) “Relazione indagini e monitoraggio - Indagini Geognostiche preliminari sulla frana di Albereta – Poggio Ancisa finalizzati alla mitigazione del rischio e al ripristino della viabilità comunale Fonte del Frate in Comune di Casteldelci.”
- G. Allegretti, M. Battistelli, F. Lombardi, P. Persi, G. Renzi, A. Veggiani (1991) “Le frane nella storia della Valmarecchia”
- G. Sartini, G. Caputo, N. De Simone, G. Truffelli, L. Borgatti, F. Cervi, A. Corsini, F. Ronchetti (2007) “Consolidamento di versanti instabili mediante opere di contenimento strutturale e tecniche di drenaggio profondo: gli esempi di Acquabona, Cervarezza, Magliatica e Ca’ Lita (Appennino reggiano)” - *Giornale di Geologia Applicata* 7 (2007) 5-16
- IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p.A. (2008) “IBIS-L System – IBIS-L User manual”, “IBIS-L Controller Software – IBIS-L Controller ver. 02.00.000 - User Manual”

- IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p.A. (2009) “IBIS Image by Interferometric Survey – A Ground Based Microwave Interferometer with Imaging Capabilities for the Remote Measurement of Displacements and Vibrations”, “IBIS-L Image by Interferometric Survey – A Ground Based Microwave Interferometer with Imaging Capabilities for Remote Measurements of Displacements – Training course”
- L. Borgatti (2009-2010) – Dispense Corso Geologia tecnica “Indagini geognostiche”, “Sistemi di monitoraggio di spostamenti”, “Slope instability”, “Interventi per la mitigazione del rischio – Valutazione e gestione della pericolosità e del rischio da frana”
- L. Carmignani, P. Conti, G. Cornamusini, L. Martelli, S. Quagliere (2002) “Note illustrative della carta geologica d’Italia alla scala 1:50000 – foglio 267 San Marino”
- L. Gusella, L.Pasquini, M.Belò “Il posizionamento GPS/RTK mediante tecnologia virtual reference station”
- Materiale cartaceo e informatico raccolto presso l’Ufficio Tecnico del Comune di Casteldelci e il Servizio Tecnico Bacini Conca Marecchia (Regione Emilia-Romagna) di Rimini
- M. Barbarella (2009) “Rilievo di precisione Real Time e Reti NRTK – Presentazione della Rete di Stazioni Permanenti GNSS dell’Emilia-Romagna”
- M. Barbarella (2008-2009) – Dispense Corso Geomatica “Il sistema GPS (Global Positioning System)”
- M. Berti (1999) – Corso di aggiornamento professionale per l’Ordine Regionale dei Geologi dell’Emilia-Romagna “Analisi di stabilità dei versanti all’equilibrio limite”

- M. Berti (2003-2004) - Corso di Complementi di Geologia Applicata “Soluzione del metodo dell’equilibrio limite globale per l’analisi di stabilità dei versanti”
- M. Principi, C. Bettucci, A. Carotti (2006) “Progetto IFFI Marche – Rapporto sulle frane in Italia – Analisi del dissesto da frana nelle Marche”
- N. Capuano, con i contributi di D. Savelli, S. Santini, G. Tonelli “Note illustrative della carta geologica d’Italia alla scala 1:50000 – foglio 279 Urbino”, Progetto CARG (Cartografia geologica)
- N. Casagli, C. Proietti, G. Righini, F. Ferrigno (2010) “Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale – Analisi di dati interferometrici satellitari in aree soggette a dissesti idrogeologici: applicazione su aree test”
- PAI Adb Conca - Marecchia (2004) “Allegato 1 – Inventario e censimento dei dissesti”, “Allegato 2 – Aree in dissesto oggetto di perimetrazione; Scheda 5: Casteldelci - Schigno (PS278093)”
- P. Colombo, F. Colleselli (2004) “Elementi di geotecnica”, Zanichelli editore S.p.A.
- Rocscience Inc. (1989 -2003) “Slide, 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes – User’s guide, part 1 e 2”
- Trimble – Geomatics and Engineering Division “Introduzione al concetto di Virtual Reference Station per il posizionamento in tempo reale”
- www.arpa.emr.it
- www.anisig.it “Posa in opera di strumentazione geotecnica”

- www.cm-novafeltria.ps.it
- www.comune.casteldelci.rn.it
- www.dica.unipg.it “Misure in sito”
- www.geoappunti.altervista.org/geologia-tecnica “Pericolo e classificazione delle frane”, “Classificazione dei movimenti franosi”, “Analisi e classificazione delle terre”, “Resistenza al taglio e stato critico”
- www.geodes.it
- www.gps-assogeo.com
- www.isprambiente.gov.it
- www.pcn.minambiente.it
- www.regione.emilia-romagna.it
- www.regione.marche.it
- www.rischioidrogeologico.it
- www.roscience.com
- www.trimble.com
- www.wikipedia.org