

ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Territorio

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi dell'evento franoso in località
Corbezzi (PT): dalla stabilizzazione di
versante all'inserimento nel contesto
paesaggistico.

Candidato:
Jessica Lelli

Relatore:
Prof. Matteo Mattioli

Sessione Ottobre 2015
Anno Accademico 2014-2015

Sommario

1	RIASSUNTO	5
2	INTRODUZIONE	6
2.1	Obiettivo del lavoro di tesi	6
2.2	Modalità di svolgimento	6
2.3	Inquadramento geografico	8
3	INQUADRAMENTO DELL'AREA	10
3.1	Inquadramento geologico generale	10
3.1.1	Domini paleogeografici	12
3.2	Stratigrafia	14
3.2.1	Il Gruppo del Cervarola	14
3.2.2	La formazione dell'Acquerino (AQR)	14
3.2.3	Depositi continentali quaternari	15
3.3	Inquadramento tettonico	17
3.4	Geomorfologia	19
3.4.1	Inquadramento geomorfologico e morfotettonico.....	19
3.4.2	Movimenti gravitativi di versante	19
3.5	Inquadramento idrografico	21
3.6	Inquadramento idrogeologico	22
3.7	Inquadramento del vincolo paesaggistico	24
4	LA FRANA DI CORBEZZI	26
4.1	Descrizione del fenomeno franoso	26
4.2	Classificazione delle tipologie di movimenti franosi	27
4.2.1	Il fenomeno franoso tipo Scorrimento	29
4.3	Possibili cause	31
4.4	Interventi di emergenza eseguiti	32
5	METODOLOGIA DI STUDIO DEL DISSESTO	33
5.1	Rilevamento geologico e geomorfologico	33
5.2	Prove in sito	33
5.2.1	Sondaggi e penetrometrie dinamiche	34
5.2.2	Sismica a rifrazione.....	35
5.2.3	Individuazione dei parametri geotecnici del sottosuolo	37
5.3	Studio del bacino idrografico	37
5.3.1	Situazione climatica dell'area	37
5.3.2	Individuazione delle caratteristiche idrologiche del bacino scolante	38
5.4	Analisi degli interventi di stabilizzazione eseguiti	40
5.4.1	Il dimensionamento del sistema drenante.....	40
5.5	Verifiche di stabilità	41
5.5.1	L'analisi di Stabilità all'Equilibrio Limite Globale	41
5.5.2	La normativa vigente sul trattamento dei parametri geotecnici	46
5.5.3	Programma di analisi Slide-Rocscience	48
5.6	L'analisi paesaggistica	49
6	RISULTATI DEL RILEVAMENTO GEOLOGICO E DELLA CAMPAGNA DI INDAGINI SITOSPECIFICHE	50
6.1	Risultati del rilievo geologico	50
6.1.1	Geologia	50
6.1.2	Morfologia.....	53
6.2	Analisi dei carotaggi e delle prove SPT	56
6.3	Elaborati sismici	57
6.4	Definizione di parametri geo-meccanici e modello del sottosuolo	59
7	ANALISI CARATTERISTICHE IDROGRAFICHE DEL BACINO DI RIFERIMENTO	61
7.1	Individuazione del bacino scolante	61
7.1.1	Dati climatici dell'area	61
7.1.2	Stima della portata massima di progetto alla sezione di chiusura	65
7.1.3	Correlazione tra i dati idrologici e l'innesco della frana	66
8	STABILIZZAZIONE E MITIGAZIONE DEL FENOMENO FRANOSO	67
8.1	Riprofilatura del versante	68

8.2	Consolidamento dei versanti	68
8.2.1	Muri a mensola	69
8.2.2	Reticolo di micropali	70
8.2.3	Tiranti di ancoraggio	71
8.3	Gli interventi idraulici	72
8.3.1	Drenaggi superficiali	73
8.3.2	Regimazione del rio causa dell'innesco	73
8.4	Interventi strutturali eseguiti	76
9	VERIFICHE DI STABILITÀ ALL'EQUILIBRIO LIMITE SULLA FRANA DI CORBEZZI	78
9.1	Carichi	79
9.2	Verifica di stabilità del versante post-evento	79
9.3	Verifica di stabilità del versante riprofilato e con opera a gravità	80
9.4	Verifica di stabilità del versante riprofilato e con opera a gravità fondata su palificata tirantata	81
9.5	Verifica di stabilità del versante riprofilato e con opera a gravità fondata su palificata tirantata, con presenza della tavola d'acqua al limite bedrock-detrito	82
10	IL REINSERIMENTO AMBIENTALE	83
10.1	Caratteristiche del paesaggio	83
10.2	Il contesto storico-culturale e architettonico	84
10.3	Documentazione fotografica dello stato attuale	85
10.4	Misure di Mitigazione	88
11	CONCLUSIONI	92
12	BIBLIOGRAFIA	94
13	SITOGRAFIA	96
14	ALLEGATI	99
14.1	Allegato 1 – Planimetria delle indagini in sito	99
14.2	Allegato 2 – Sondaggio S1	100
14.3	Allegato 3– Sondaggio S2	101
14.4	Allegato 4– Sondaggio S3	102
14.5	Allegato 5 – Stratigrafia del versante derivata dai carotaggi S1 ed S3	103

1 RIASSUNTO

Il presente lavoro di tesi per la Laurea Specialistica in Geologia e Territorio è stato concepito come ricostruzione, approfondimento e verifica dell'insieme di interventi finalizzati alla stabilizzazione di versante che hanno coinvolto il tratto della ferrovia Porretta-Pistoia ubicato tra la progressiva 50 + 730 e la progressiva 50 + 650. In quest'area, alle prime ore del giorno 5 Gennaio 2014, è avvenuto l'innescò di un evento franoso che ha coinvolto il rilevato su cui transita la via ferrata: la causa della mobilitazione è stata ricondotta fin da subito all'intenso evento piovoso occorso nei giorni precedenti la mobilitazione.

La zona coinvolta nel dissesto è situata nei pressi della frazione di Corbezzoli, in località Casciano, nel territorio nord-orientale della provincia di Pistoia: il bacino idrografico è quello del torrente Brana, tributario del Fiume Ombrone. L'area presenta le caratteristiche del paesaggio rurale in abbandono, con impoverimento della qualità dei castagneti e il limitato mantenimento degli oliveti. L'urgenza e l'importanza della realizzazione di questi interventi non era quindi da attribuirsi alla pericolosità nei confronti delle vite dei residenti, ma piuttosto al fatto che l'opera ferroviaria è da considerarsi come un bene di importanza strategica non solo per la provincia di Pistoia, ma anche per le regioni Toscana ed Emilia-Romagna, in quanto mezzo efficace di collegamento e spostamento di pendolari e merce tra le due.

L'elaborato che viene proposto è il risultato delle analisi dei dati acquisiti in fase di progettazione, dello studio effettuato direttamente in campo e di una fase finale di verifica sulla stabilità del versante a seguito della realizzazione delle opere e sulla correttezza del dimensionamento previsto per le stesse. Infine, ma non di minor importanza, viene proposto un approfondimento della coerenza dell'intervento nei confronti del contesto paesaggistico. Tramite il rilevamento geologico e morfologico, effettuato sul territorio del bacino idrografico attraversato dal tratto ferroviario sede di dissesto, è stato possibile giungere alla realizzazione di cartografie, utili ad avere un'idea preliminare delle caratteristiche geotecniche dei materiali presenti e delle condizioni di stabilità generali. Successivamente è stata attuata una fase di analisi di dati ricavati da sondaggi a carotaggio continuo, prove SPT e di tomografia in onde P, dalle quali sono stati tratti il modello geotecnico ed i parametri necessari alle successive analisi di stabilità. L'analisi della situazione climatica del bacino idrografico che comprende l'area sede di instabilità ha permesso in primo luogo di approfondire le cause di innescò del movimento franoso, mentre lo studio della sua morfologia ha permesso la derivazione della portata massima di progetto che le opere drenanti l'area sede d'esame devono essere in grado di sostenere. La stima del valore della portata di progetto è stata effettuata mediante l'applicazione di un modello tipo afflussi-deflussi con metodo "Cinematico". Successivamente è stata eseguita la progettazione idraulica delle opere di drenaggio superficiale: il procedimento eseguito ha previsto per il dreno a sezione rettangolare un'altezza minima di 0,8 m e di 0,4 m per la trapezia.

La verifica di stabilità eseguita tramite il programma *Slide 5.014*[®] della *Rocscience Inc.*, utilizzando l'approccio risolutivo dell'Equilibrio Limite Globale di Morgenstern-Price, ha definito per il versante la condizione di stabilità solo nel caso di realizzazione di tutte le opere progettate, ovvero muro fondato su reticolo di micropali tirantato.

In ultima analisi si è approfondito il tema dell'inserimento di un'opera così impattante dal punto di vista visivo nel contesto paesaggistico, determinandone la totale adeguatezza.

Parole chiave: *Provincia di Pistoia, studio idrologico ed idraulico, stabilità di versante, reinserimento paesaggistico.*

2 INTRODUZIONE

L'evento franoso che ha interessato il rilevato ferroviario in prossimità della località Corbezzoli nella notte tra il 4 ed il 5 Gennaio 2014 (Figura 1) ha avuto una forte incidenza sulla comunità. Le problematiche, in questi casi, non sono legate ad un pericolo diretto per la vita dei residenti e per le abitazioni, ma al rallentamento nei sistemi di trasporto. Le ripercussioni dell'evento non hanno coinvolto solo la viabilità a livello locale: la frana ha comportato un'interruzione del tratto ferroviario che ha coinvolto tutti i pendolari del tratto Porretta-Pistoia. Di fondamentale importanza, in queste situazioni, è effettuare una stabilizzazione del fenomeno in tempi rapidi ed in modo efficace, di modo da diminuire l'impatto dell'evento in termini sociali ed economici.



Figura 1: Situazione del rilevato ferroviario la mattina del 5 Gennaio.

2.1 Obiettivo del lavoro di tesi

Obiettivo del lavoro di tesi è stato apprendere e sviluppare le modalità d'intervento che si applicano a seguito di un evento geologico avente un così notevole peso sociale e riguardante un'opera di importanza strategica per la comunità. Si è andati pertanto ad individuare e ricostruire le dinamiche legate all'innesco, per poi analizzare i dati derivanti dalla campagna di indagini in sito, e proceduto alla verifica delle opere realizzate, dal punto di vista della stabilità e del dimensionamento. Sono state quindi approfondite e ripercorse tutte le fasi seguite durante la progettazione di tali opere, valutandone anche l'impatto paesaggistico.

2.2 Modalità di svolgimento

La metodologia di approccio alla problematica che è stata utilizzata per lo sviluppo dell'elaborato è quella consueta della relazione geologica: un'iniziale ricostruzione dell'ubicazione geografica e del background geo-morfologico, stratigrafico, tettonico ed idrogeologico dell'area, cui è seguita l'analisi dei dati provenienti dal data-base ambientale del Servizio Idrologico della Regione Toscana e lo studio del bacino idrografico per la

determinazione dei parametri necessari alla modellazione dell'inesco. Dopo aver ricavato i dati geotecnici dei materiali presenti dalle prove in sito, si è passati all'analisi di stabilità del sistema, introducendo nella modellazione le opere di stabilizzazione effettivamente realizzate. Delle opere di drenaggio superficiale è stato attuato il dimensionamento. Per finire si è voluto approfondire il tema dell'impatto paesaggistico.

Di seguito è schematizzato l'elaborato:

- 1) Inquadramento geologico, tettonico, geomorfologico, idrografico e dei vincoli dell'area in esame;
- 2) Descrizione introduttiva del fenomeno franoso con classificazione delle tipologie di dissesto;
- 3) Definizione delle metodologie di studio, con spiegazione teorica delle fasi di lavoro;
- 4) Risultati di rilevamento geologico e geomorfologico effettuato e analisi dei dati acquisiti da carotaggio continuo, SPT e tomografia in onde P, con realizzazione del modello geologico tecnico del versante e identificazione parametri di input per la modellazione di stabilità;
- 5) Risultati dell'analisi del bacino idrografico e valutazione della portata massima di progetto tramite il metodo "Cinematico";
- 6) Analisi delle opere di stabilizzazione e drenaggio realizzate e calcolo delle dimensioni delle canalette di drenaggio;
- 7) Analisi di stabilità all'Equilibrio Limite Globale in verifica delle opere realizzate utilizzando il programma *Slide* della *Rocscience Inc.*;
- 8) Verifica dell'insieme opera-paesaggio, studiando le caratteristiche ambientali della zona ed elaborando le misure di mitigazione;
- 9) Conclusioni.

2.3 Inquadramento geografico

L'area indagata nel corso della tesi è ubicata nel settore centro-settentrionale della provincia di Pistoia, nella regione Toscana (Figura 2).

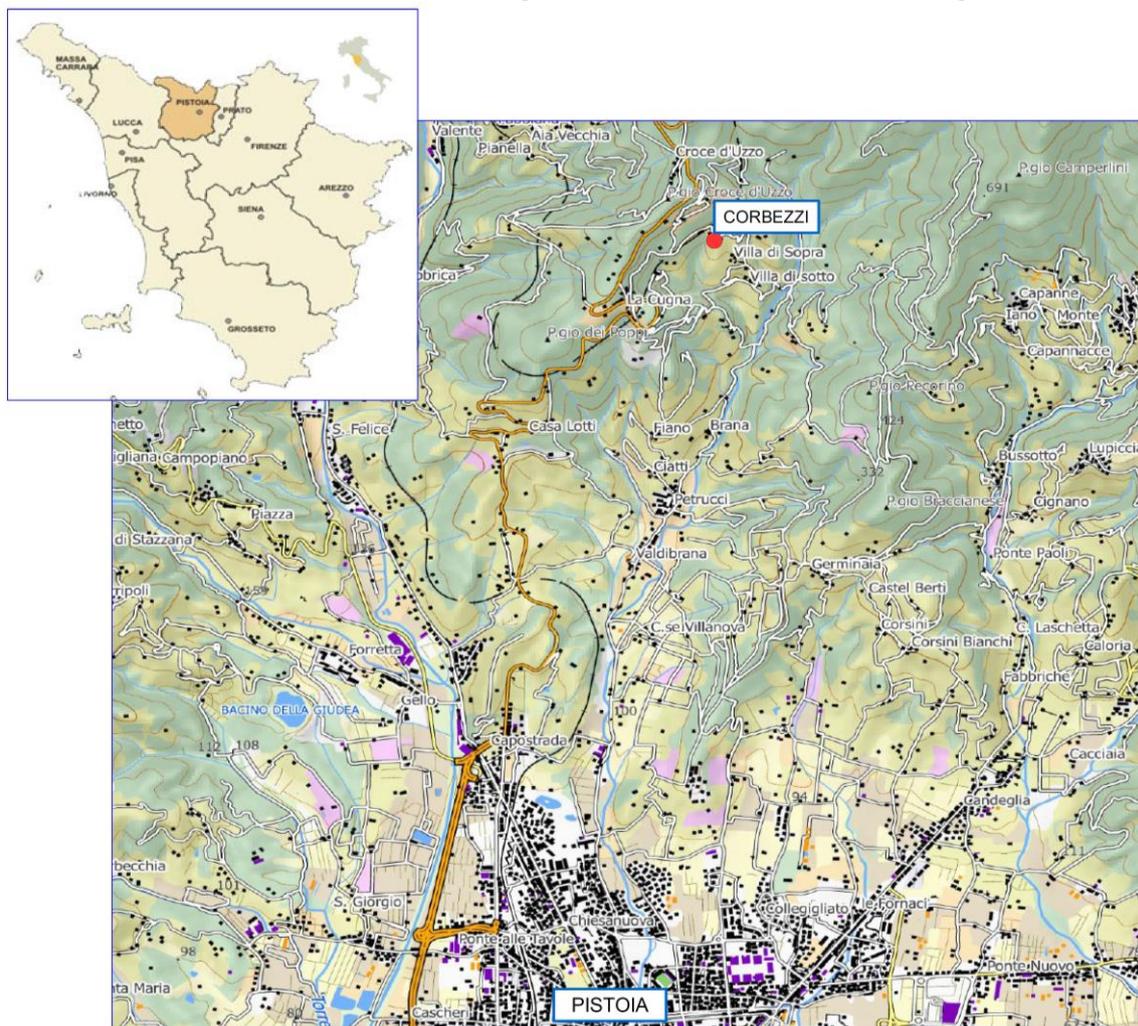


Figura 2: ubicazione provincia di Pistoia in alto a sinistra (Fonte: Regione Toscana, 2014) e dell'abitato di Corbezzi rispetto al centro urbano di Pistoia (Fonte: Regione Toscana, 2012a).

L'area di studio ricade nel foglio 262 "Pistoia" alla scala 1:50.000, il cui quadro di unione è riportato in figura 3, mentre la sezione di riferimento è la n. 262 040 Ponzano alla scala 1:10.000 (Figura 4), i cui vertici indicati in tabella 1 sono riferiti ai Sistemi Gauss Boaga fuso Ovest e UTM fuso 32.

GB FUSO W	NW	NE	SW	SE
N	4 873 566	4 873 725	4 868 012	4 868 171
E	1 653 623	1 660 305	1 653 752	1 660 439

UTM FUSO 32	NW	NE	SW	SE
N	4 873 748	4 873 907	4 868 194	4 868 353
E	653 675	660 357	653 804	660 439

Tabella 1: Coordinate dei vertici della sezione "Ponzano" (Fonte: Regione Toscana, 2001).

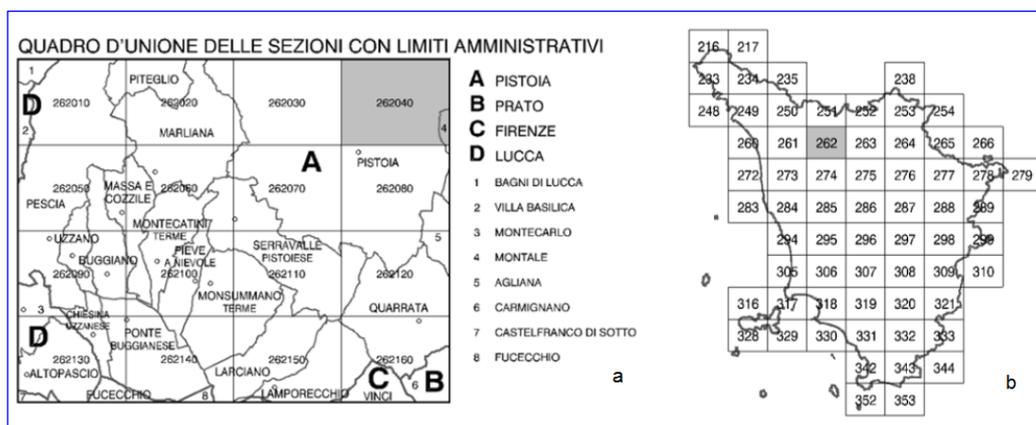


Figura 3: a. Quadro d'unione delle Sezioni con limiti amministrativi (Fonte: Regione Toscana, 2001); b Quadro d'unione dei Fogli (Fonte: Regione Toscana, 2001).

La regione Toscana rende inoltre disponibile la Carta Tecnica Regionale in scala 1:2.000, in cui viene però focalizzata l'attenzione sui centri abitati, della quale è stato utilizzato il Foglio n. 21I28 (Regione Toscana, 2007).

Il fenomeno di franamento oggetto del lavoro di tesi ha coinvolto il rilevato ferroviario in prossimità dell'abitato di Casciano, situato a sud del paese di Corbezzi (Figura 4). L'area in esame è situata sul versante esposto a SE del bacino idrografico del torrente Brana, nell'Appennino Pistoiese, torrente che dopo aver superato la piana pistoiese confluisce nel fiume Ombrone, tributario dell'Arno.

Il tratto ferroviario nell'area di interesse è stanziale alla quota 425 m e giunge alla quota di circa 440 m presso la stazione di Corbezzi.

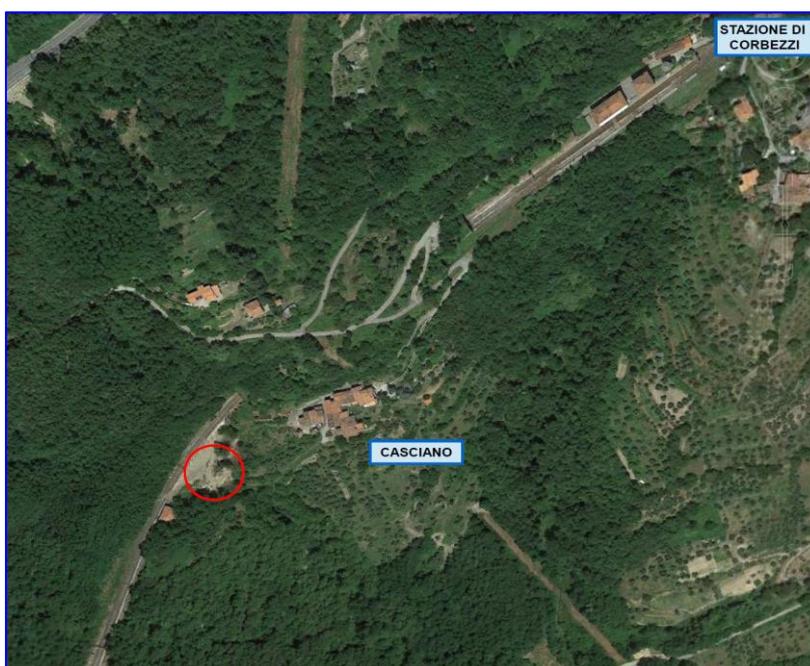


Figura 4: ubicazione della frana, con localizzazione degli abitati di Casciano e Corbezzi (Fonte: Google Earth, 2014).

L'area in esame (Figura 5) è ubicata interamente nel foglio catastale del Comune di Pistoia numero 113, particelle 223, 227, 228, 244, 245, 405 e 532. In figura 6 sono invece individuate le opere realizzate per la stabilizzazione del versante in frana su foglio catastale.

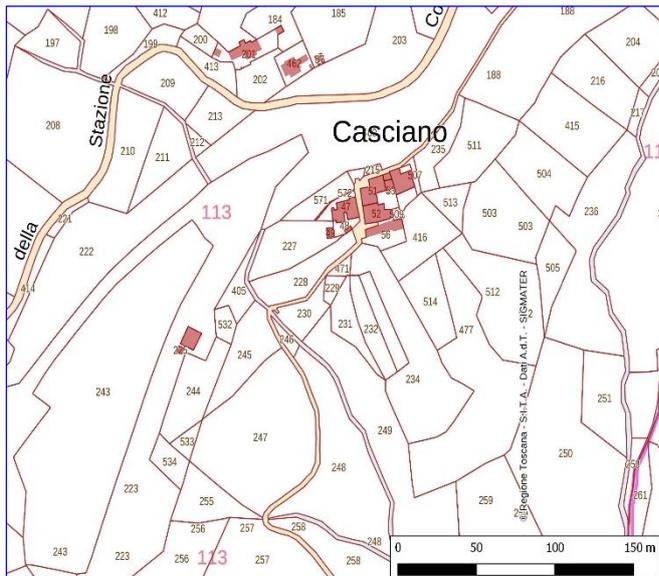


Figura 5: Estratto del foglio catastale 113 del comune di Pistoia (Fonte metadati: Regione Toscana, 2012b).



Figura 6: Individuazione opere in progetto con base estratto del foglio catastale 113 del comune di Pistoia (Fonte metadati: Regione Toscana, 2012b).

3 INQUADRAMENTO DELL'AREA

3.1 Inquadramento geologico generale

L'edificio strutturale dell'Appennino è costituito da una catena *thrust-fold-belt*, ovvero da unità tettoniche strutturate durante la collisione tra il blocco crostale europeo Sardo-Corso e la placca africana di Adria, avvenuta tra l'Oligocene superiore ed il Miocene medio, e successivamente deformate dalla migrazione est-vergente del fronte di compressione.

L'Appennino settentrionale, nel dettaglio, è delimitato a nord dalla Linea di Sestri-Voltaggio (nell'attuale territorio ligure), mentre a meridione dall'insieme di faglie a direzione N-S, denominate complessivamente Linea di Ancona-Anzio. La sovrapposizione tettonica di due grandi domini ha prodotto questo settore appenninico: il dominio esterno, collocato presso l'avanpaese, denominato Umbro-Toscano, e il dominio interno, composto da falde liguri-emiliane.

Alla fine del Triassico l'area crostale che avrebbe costituito la penisola italiana era collocata nel margine occidentale della Tetide, il golfo oceanico che bagnava Pangea: le uniche zone a sedimentazione francamente continentale erano quelle prossimali la costa toscana e il settore nord-occidentale della Sardegna. La restante parte era caratterizzata da pianure di marea (*Dolomia principale*) e lagune a forte componente evaporitica, che avrebbero precipitato le *Anidriti di Burano*. Quello lagunare era un ambiente che interessava tutto il corpo centrale della penisola e la Puglia.

All'inizio del Giurassico medio la dorsale medio-tetidea, che divideva longitudinalmente la Tetide, entra in subduzione. Già dal Triassico superiore una fase di trazione stava interessando il mega-continente Gondwana, creando una serie di *rift*, estesi dall'area caraibica passando per Gibilterra e l'area alpina attuale, sino alla Tetide. L'evento culminante di questo meccanismo si sviluppò nel Giurassico medio, con la totale separazione della placca di America dall'Africa, ovvero con l'apertura dell'Oceano Atlantico settentrionale. La trazione dovuta all'apertura dell'Atlantico centrale comporta la nascita dell'Oceano Ligure-

Piemontese, nel Giurassico inferiore: si creano così il margine continentale occidentale “europeo” e, ad oriente, il promontorio di Adria.

L'apertura dell'Atlantico meridionale nel tardo Cretaceo porterà alla chiusura dell'Oceano Ligure-Piemontese, a causa della migrazione di Africa verso NE. Il margine europeo entrerà in subduzione al di sotto di quello africano, mentre a settentrione il promontorio africano collide con la placca europea: inizia così la fase di orogenesi alpina, protrattasi sino all'Eocene medio.

Nel Cretaceo inferiore l'Italia è formata da banchi carbonatici tropicali (Piattaforma Apula e Friulano-Istriana) e soprattutto da zone di mare profondo a sedimentazione silicea (*Maiolica*): procedendo da nord sono stati individuati il Bacino Lombardo, Bacino Umbro-Marchigiano, Bacino Ionico.

Con la rotazione del blocco crostale Sardo-Corso inizia l'orogenesi appenninica (Figura 7). Nell'Oligocene medio l'area balearico-provenzale viene sottoposta a una fase di *rifting*: dal continente europeo inizia la migrazione roto-translatoria di frammenti crostali, comprendenti le attuali Corsica e Sardegna, a causa dell'apertura del Bacino Algero-Provenzale. Con la migrazione del Blocco Sardo-Corso, il blocco africano entra in subduzione. Ne consegue la formazione di una catena est-vergente, quella appenninica.

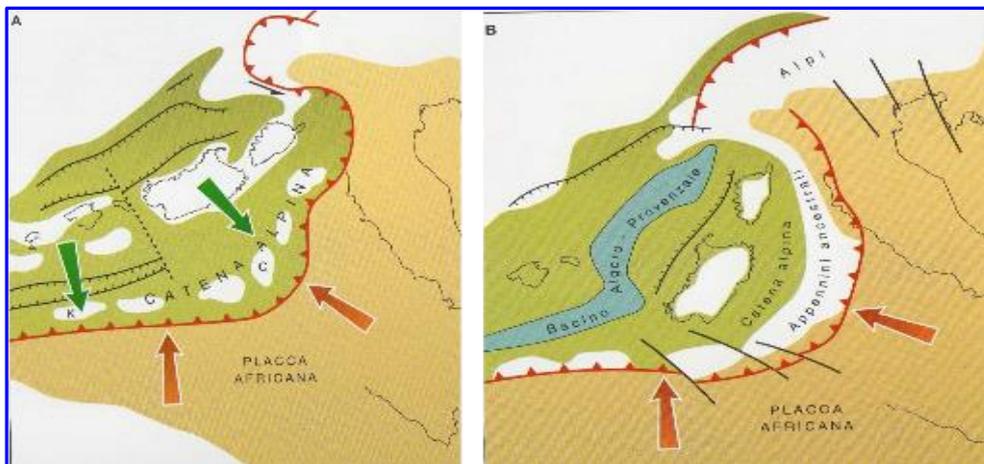


Figura 7: inizio della rotazione del Sardo-Corso (A) ed apertura del Bacino Algero-Provenzale con concomitante inizio dell'orogenesi appenninica in fig.B (Fonte: Bosellini, 2011).

L'apertura del Mar Tirreno nel Miocene superiore (Figura 8) determina la posizione finale degli Appennini, costretti ad una migrazione ad E-SE.

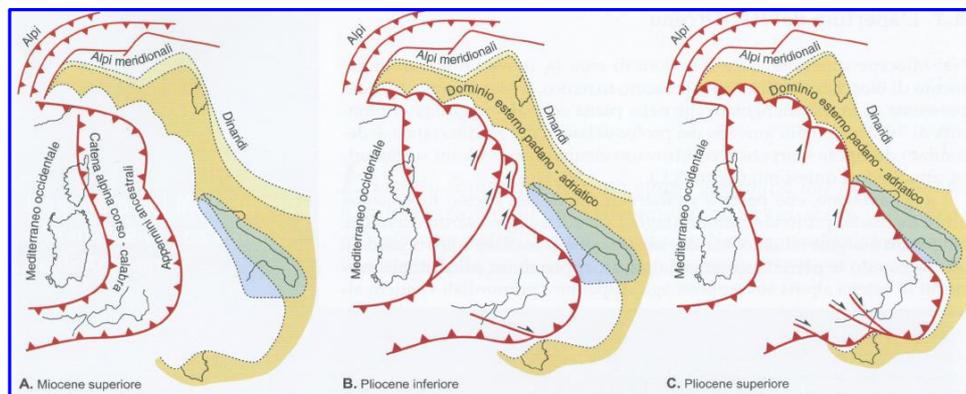


Figura 8: progressiva deriva della penisola italiana ed ispessimento della falda appenninica (Fonte: Bosellini, 2011).

A seguito della crisi di salinità del Miocene superiore, si depose dalla Sicilia sino al Monferrato la formazione *Gessoso-solfifera*. Il bacino tirrenico continuerà ad espandersi anche nel Pliocene: ciò porterà ad un collasso strutturale nelle aree più interne, quindi quelle toscane, laziali e campane. Si formano i *graben* di Val d'Elsa, Valdarno, piana di Firenze e Valle Tiberina. La distensione crostale è testimoniata dall'attività vulcanica Plio-Quaternaria in Toscana (Bosellini 2011; Puccinelli et al., in stampa).

3.1.1 *Domini paleogeografici*

L'Appennino Settentrionale è il risultato della sovrapposizione tettonica di due grandi insiemi:

- un Insieme Esterno Umbro-Toscano, costituito essenzialmente da uno zoccolo continentale appartenente alla Placca Apula, su cui poggiano le successioni mesozoico-terziarie che ne rappresentano l'originale copertura sedimentaria.
- un Insieme Interno Ligure-Emiliano, che consta di una serie di unità tettoniche originatesi in un oceano, estendendosi eventualmente anche sulla parte più assottigliata dei margini continentali adiacenti. Queste unità hanno comunque abbandonato il loro substrato originario, che è scomparso in subduzione, per sovrascorrere da ovest verso est (vergenza appenninica) sull'Insieme Esterno, che ha avuto ruolo di avampaese, costituendo perciò una coltre alloctona.

La catena appenninica settentrionale risulta costituita da diversi domini paleogeografici. Il Dominio Ligure viene diviso in Dominio Ligure Interno ed Esterno: essi sono separati da un contatto tettonico lungo il quale il primo si accavalla parzialmente sul secondo, poggiando per il resto anche direttamente sulla Falda Toscana.

1. Il Dominio Ligure Interno venne a formarsi nel Giurassico medio, tra Europa ed Adria, con la messa in posto di crosta oceanica derivante dall'apertura dell'Oceano Ligure-Piemontese. Nel Cretacico superiore la sua estensione si riduce sino alla chiusura definitiva nel Paleocene basale.
2. Il Dominio Ligure Esterno (Liguridi), rappresenta un ambiente posizionato in un'area di raccordo tra il margine oceanico della Tetide e Adria. La base della successione, risulta scollata dalla sua originaria base in corrispondenza di formazioni argillose del Cretaceo medio-superiore, i cosiddetti "Complessi di base". Le ofioliti compaiono invece come masse, scivolote nel bacino di sedimentazione ligure del Cretacico superiore, e pertanto intercalate in quei sedimenti. Queste ofioliti danno testimonianza della vicinanza di un rilievo oceanico tettonicamente attivo, situato verosimilmente al limite fra Ligure Interno ed Esterno. L'evoluzione tettono-sedimentaria è legata alle fasi di obduzione e compressione.

Il Dominio Subligure è invece composto dagli eventi torbiditici che vengono a depositarsi nel sistema di avanfossa, in migrazione verso oriente in risposta all'avanzare del fronte orogenetico.

Il Dominio Toscano Superiore ("Falda Toscana") è costituito da unità triassiche non o debolmente metamorfosate. I depositi di copertura vanno dalle evaporiti del Trias fino ai sedimenti torbiditici del Macigno.

Il Dominio Toscano Inferiore affiora principalmente nella Finestra tettonica delle Apuane ed è costituito da una successione metamorfica che comprende il basamento paleozoico, e su questo tutta la copertura dal Trias fino al Macigno.

Il Dominio Umbro, anche se piegato, scollato e avanscorso sul suo basamento, è generalmente considerato come autoctono. Esso è caratterizzato dal flisch della Formazione Marnoso-arenacea.

Il Dominio Toscano in particolare, riconosciuto nell'area di studio, è stato collocato al Triassico medio, a seguito della frammentazione di Pangea. Nel Triassico medio-superiore il dominio è caratterizzato da una sedimentazione che passa da fluviale a costiera (Formazione del Verrucano), e fino alla deposizione evaporitica-carbonatica di piattaforma (Gessi di Sassalbo, Calcere Cavernoso, Calcari a *Rhaetavicula contorta* e Calcere Massiccio). La piattaforma carbonatica si frattura poi nel Giurassico inferiore, con la conseguenza che la deposizione diviene controllata dall'assetto degli alti strutturali (successioni "complete" e "condensate"). La sedimentazione calcareo-siliceo-marnosa, pelagica ed emipelagica, compone le Formazioni dei Calcari ad Angulati, Rosso ammonitico, Calcere selcifero di Limiano e dei Calcari e marne a Posidonia. Nel Giurassico medio-superiore la sedimentazione è silicea pelagica, con i Diaspri di monte Alpe dell'Unità tettonica Bracco-Val Graveglia e Diaspri dell'Unità tettonica della Falda Toscana. Tra il Giurassico e il Cretaceo la sedimentazione passa da carbonatica (Calcari a Calpionelle dell'Unità tettonica Bracco-Val Graveglia, corrispondente alla Maiolica dell'Unità tettonica della Falda Toscana) a pelitica nel Cretaceo inferiore (Argille a Palombini dell'Unità tettonica Bracco-Val Graveglia e Scaglia Toscana dell'Unità tettonica della Falda Toscana), sia nel dominio toscano che in quello ligure. Con il Cretaceo superiore la sedimentazione tra i due Domini si differenzia a causa della chiusura dell'Oceano Ligure-Piemontese. Nel Dominio Ligure interno la sedimentazione è silicoclastica di fossa (Scisti della Val Lavagna ed Arenarie di Monte Gottero) fino al Paleocene basale con la deposizione di detrito grossolano di scarpata (Argilliti di Giaiette). Nel Dominio Ligure esterno le successioni sono di tipo ofiolitico (Unità tettonica Ottone e Unità tettonica Caio), e di tipo silico-clastico nella porzione più esterna (Arenarie di Ostia, Arenarie di Scabiazza Conglomerati dei Salti del Diavolo). La sedimentazione torbiditica calcareo-marnosa diventa ubiquitaria in tutto il Ligure Esterno fino all'Eocene medio. Nel Dominio Subligure la sedimentazione è legata alla chiusura della Tetide: si passa infatti da successioni argillitico-calcaree (Argille e Calcari di Canetolo) alle torbiditi calcareo-marnose (Calcari del Groppo del Vescovo). La migrazione ad E del fronte compressivo comporta sedimentazione silicoclastica nell'Oligo-Miocene.

Nel Dominio Toscano dal Cretaceo superiore all'Oligocene la sedimentazione bacinale pelitica della Scaglia Toscana è fortemente diversificata in termini di *facies* e spessore, con successioni pelitiche e pelitico-calcaree, calcaree (Formazione di Puglianella) e torbiditico-calcaree (Nummulitico, Breccie Cenomaniane). Con lo Sviluppo dell'avanfossa appenninica nell'Oligocene si passa ad una sedimentazione torbiditica silicoclastica, con il Macigno e le Arenarie di Monte Modino, che prosegue sino al Miocene inferiore (Bettelli et al., 2005; Elter, 2000; Puccinelli et al., in stampa).

3.2 Stratigrafia

Sono di seguito illustrate le caratteristiche del flisch riconosciuto nella zona d'esame (Regione Toscana, 2011).

3.2.1 Il Gruppo del Cervarola

Il Gruppo del Cervarola, individuato nelle Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia, foglio 252 Barberino del Mugello (Bettelli et al., 2005), rappresenta l'ambiente di deposizione degli eventi torbiditici miocenici di avanfossa, ed è stato suddiviso in quattro formazioni, denominate in modo informale formazione dell'Acquerino (AQR), formazione del Torrente Carigiola (TCG), formazione di Stagno (STA) e di Castiglione dei Pepoli (CDP). Queste quattro formazioni costituiscono quattro sistemi deposizionali torbiditici (Cibin et alii, 1997), ad evoluzione *fining* e *thinning upward* delle facies. Le singole litofacies sono considerate sotto-unità, alle quali è stato attribuito il rango di membri. L'età di questi depositi è compresa tra Chattiano e Langhiano, per un intervallo stratigrafico di 10 Ma.

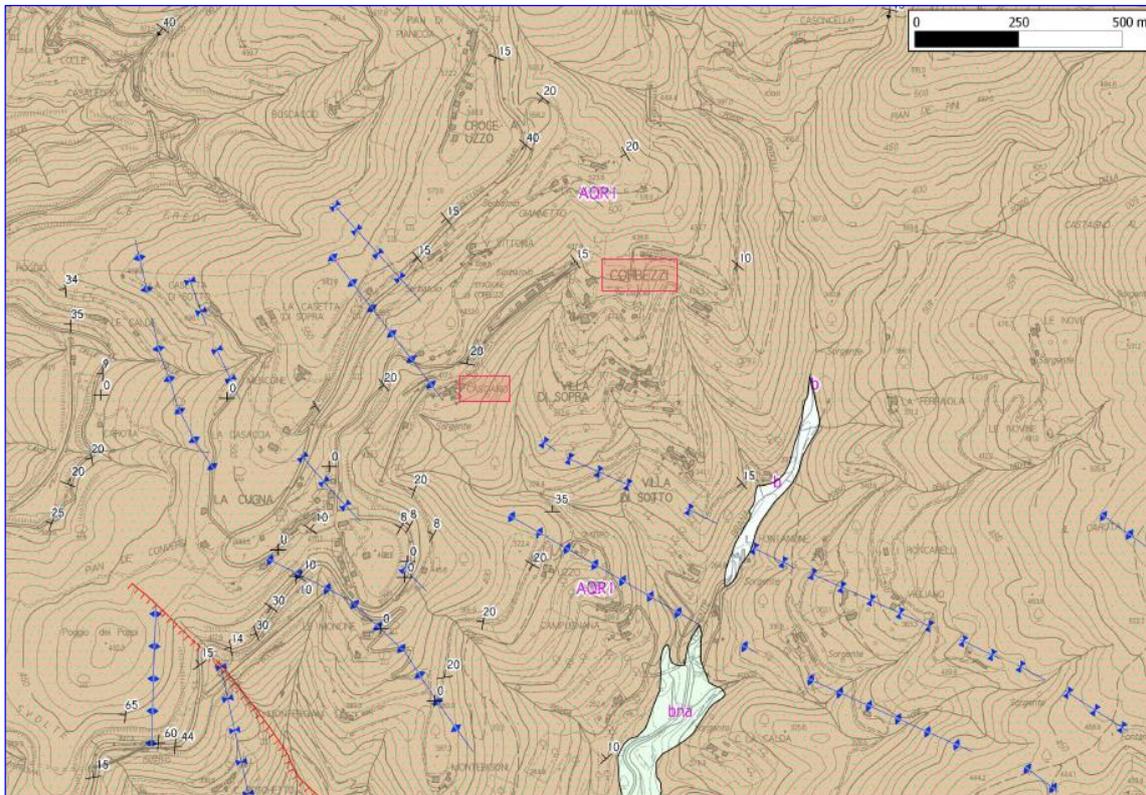
3.2.2 La formazione dell'Acquerino (AQR)

La formazione è costituita da alternanze di strati gradati arenaceo-pelitici. Le areniti presentano una colorazione grigia, composizione feldspatica, e presentano un buon grado di cementazione; le argille hanno colorazione grigia. Le impronte di fondo indicano provenienza W-NW. La potenza complessiva supera i 1000 m, l'età è compresa tra il Chattiano ed il Burdigaliano.

La tendenza è quella di una diminuzione della granulometria e dello spessore degli strati verso l'alto (*fining* e *thinning upward*), tendenza in base alla quale vengono riconosciuti tre membri nella formazione dell'Acquerino: la relazione tra di essi è di sovrapposizione stratigrafica e parziale eteropia.

- Membro arenaceo-pelitico (AQR 1). Tale litologia è stata individuata nell'area in esame (figura 9): è caratterizzato da alternanze arenaceo-pelitiche in strati da medi a molto spessi. La granulometria dei livelli arenitici è variabile. La potenza è di 500 m, il contatto superiore graduale e parzialmente eteropico con il membro di AQR2. Il rapporto arenaria/pelite varia tra $A/P \gg 1$ e $A/P < 1$. Si tratta di depositi torbiditici in una fase evolutiva iniziale del sistema deposizionale. L'età è compresa tra Chattiano ed Aquitaniano. La composizione mineralogica di queste areniti viene caratterizzata nel Foglio 252 (Bettelli et al., 2005), da cui risultano feldspato-litiche, con interstizi formati da matrice argillosa talora abbondante (fino a 10-15% dal totale della roccia in alcuni campioni) e cemento costituito principalmente da calcite, ed in percentuale minore clorite. Tra i frammenti di roccia a tessitura fine, i più abbondanti risultano frammenti metamorfici di grado medio-basso (*slate* e filladi) e frammenti di serpentinoscisti. In subordinate troviamo scisti biotitici, frammenti di rocce sedimentarie clastiche e carbonatiche, vulcaniti intermedio-basiche e serpentiniti massive.
- Il membro pelitico-arenaceo (AQR 2) è costituito da alternanze pelitico-arenacee in strati da sottili a medi, in cui spessore e rapporto A/P (variabile tra < 1 e $\ll 1$) diminuiscono verso l'alto. La potenza è pari a 600 m. Il passaggio ad AQR3 è graduale. L'età è compresa tra Aquitaniano e Burdigaliano.

- Membro pelitico (AQR3) è formato da marne e marne-siltose, legate alla disattivazione del sistema deposizionale. La potenza è di circa 300 m. L'età è compresa tra Aquitaniano e Burdigaliano (Bettelli et al., 2005; Puccinelli et al., in stampa).



Legenda simbologia geologica

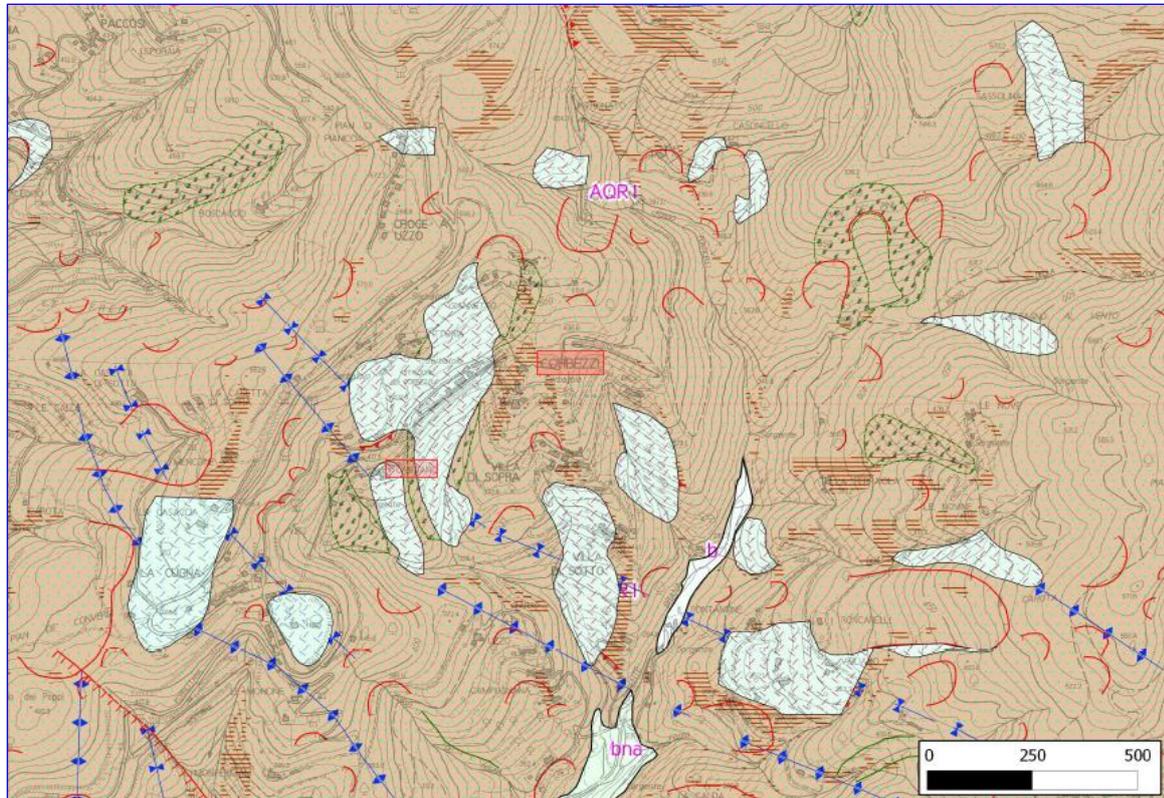
Unità di Monte Cervarola		Limite geologico	
	AQR1 Formazione dell'Acquerino Membro arenaceo-pelitico Chattiano-Aquitaniano		Contatto stratigrafico e/o litologico certo
Depositi quaternari			Faglia diretta
	Depositi alluvionali attuali	Strutture plicative	
	Depositi alluvionali recenti, terrazzati e non terrazzati		Traccia di superficie assiale di anticlinale- fase non applicabile/non classificabile
Stratificazione			Traccia di superficie assiale di sinclinale- fase non applicabile/non classificabile
	Strati a polarità non definita		
	Strati orizzontali		
	Strati a polarità non definita		

Figura 9: Elaborato alla scala 1:10.000 della cartografia e della simbologia geologica dell'area in esame (Fonte metadati: Regione Toscana, 2011).

3.2.3 Depositi continentali quaternari

Come è possibile osservare in figura 10, nell'area di studio sono stati individuati depositi continentali quaternari catalogati come deposito di versante. Nel foglio 252 Pistoia (Puccinelli et al., in stampa) il deposito di versante è spesso correlato alla presenza di formazioni arenacee (Macigno, Arenarie di Monte Modino, Arenarie di Monte Cervarola) e in misura inferiore a formazioni calcareo-marnose e argillitico-calcaree. La matrice è scarsa o assente, possibile un certo tasso di cementazione. Le coperture detritiche possono avere

perimetro più o meno regolare, talvolta adagiandosi in depressioni morfologiche o vallecole, dove tende ad assumere la morfologia dell'elemento ospitante. Lo spessore massimo è dell'ordine della decina di metri. Nell'aria di studio è stato osservato in corrispondenza della stazione di Corbezzi: nella zona a monte il materiale si estende dalla quota 520 m, evitando l'abitato di Vittoria, delineando una forma lobata che si estende a sud, in corrispondenza della galleria ferroviaria situata tra Corbezzi e Casciano.



Legenda simbologia geologica e morfologica

Depositi superficiali	Unità di Monte Cervarola	Limite geologico
Depositi di versante (Olocene)	1 AQR1 Formazione dell'Acquerino Membro arenaceo-pelitico Chattiano-Aquitano	Contatto stratigrafico e/o litologico certo
Forma geomorfologica lineare	Depositi quaternari	Faglia diretta
Orlo di scarpata in frana o di deformazione gravitativa profondi versante	b Depositi alluvionali attuali	Strutture plicative
Orlo di scarpata di degradazione	bna Depositi alluvionali recenti, terrazzati e non terrazzati	Traccia di superficie assiale di anticlinale-fase non applicabile/non classificabile
Forma geomorfologica areale	Stratificazione	Traccia di superficie assiale di sinclinale-fase non applicabile/non classificabile
Dilavamento diffuso	\nearrow_{20} Strati a polarità non definita	
Superficie strutturale o sub-strutturale	\perp Strati orizzontali	
Porzione di versante con assetto a franapoggio meno inclinato del pendio	\searrow_{20} Strati a polarità non definita	

Figura 10: Elaborato alla scala 1:10.000 della cartografia e della simbologia geomorfologica dell'area in esame (Fonte metadati: Regione Toscana, 2011).

A valle della stazione il detrito si allunga lungo la sinistra idrografica del fosso che da Corbezzi confluisce nel Brana, sino a riempirlo alla quota 400 m. L'abitato di Casciano è collocato interamente su di una coltre di detrito di versante, che si estende dalla quota del paese (420 m) sino alla quota di 340 m: inizialmente il deposito segue la morfologia del versante e finisce per occupare il canale del rio che si raccorda al Brana.

3.3 Inquadramento tettonico

Le principali fasi che hanno determinato l'evoluzione tettonica degli Appennini settentrionali, ovvero che hanno portato Unità Liguri a sovrascorrere come falde alloctone sulla copertura di Adria e a deformarsi congiuntamente con esse (Figura 11), possono essere riassunte come di seguito:

- chiusura dell'Oceano Ligure-Piemontese (Cretacico);
- collisione tra placca europea e africana (Eocene medio);
- fase tettonica attiva sulla placca di Adria tra l'Oligocene ed il Miocene.

La prima fase deformativa ha interessato le Unità Liguridi Interne ed Esterne, provocando la loro strutturazione, con generazione di superfici di taglio e pieghe rovesciate (tardo Paleocene-Eocene medio). Le Liguridi verranno poi coinvolte nella terza fase deformativa, "Fase Toscana", che le porterà a sovrascorrere il Dominio Toscano e quello Umbro-Marchigiano. L'Unità tettonica che rappresenta il Dominio Subligure nel foglio Pistoia della carta geologica d'Italia è quella di Canetolo, che comprende i corpi sedimentari depositi nell'area di migrazione del fronte compressivo in bacini di *piggy-back* (ovvero instaurati sugli antichi depositi di avanfossa in migrazione). L'Unità viene coinvolta anche nella seconda fase deformativa nella sua parte inferiore argillitico-calcareo, mentre viene coinvolta la porzione superiore silicoclastica nella fase Oligo-Miocenica.

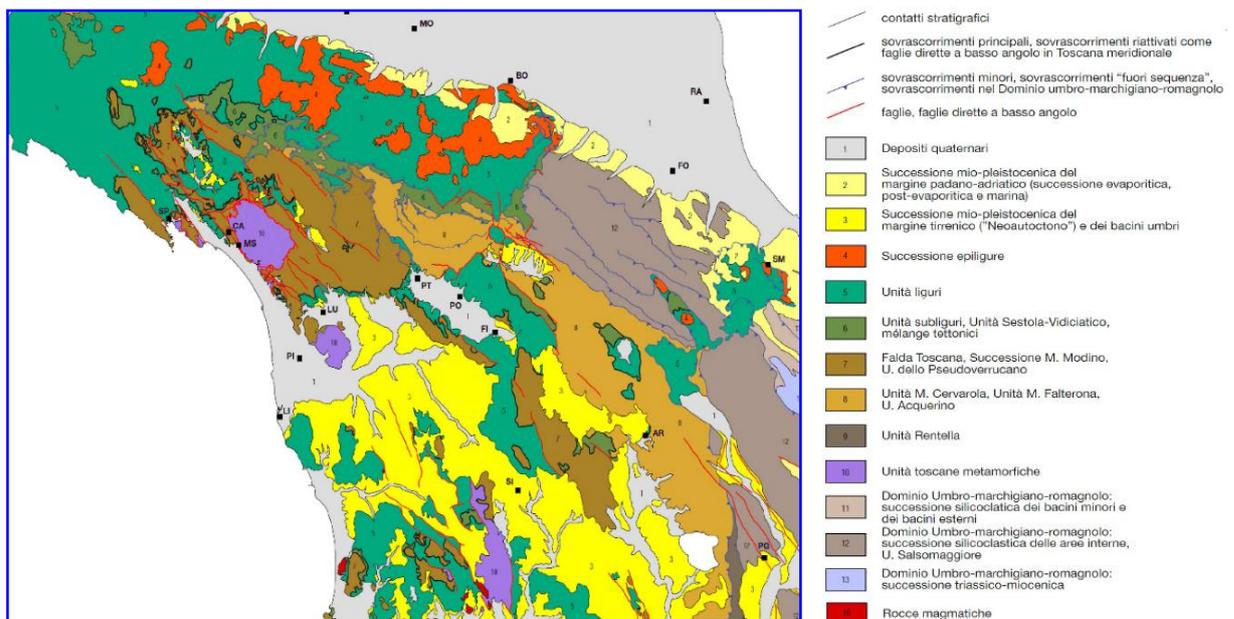


Figura 11: Particolare dello schema tettonico dell'Appennino centro-settentrionale (Fonte: Conti et al., 2013).

Durante la Fase Toscana, Falda Toscana e Unità Cervarola vengono coinvolte in una fase iniziale di *sin-nappe* nell'Oligocene superiore-Miocene inferiore, e in una fase tardiva *post-nappe* a partire dal Miocene medio. La fase *sin-nappe* è quella che porta alla principale strutturazione della Falda Toscana (evento tettonico-metamorfico): è caratterizzata da una fase compressiva che genera sovrascorrimenti e rare pieghe a vergenza NE. La fase *post-nappe*, invece, si esplica in un processo di inversione tettonica rispetto alla precedente, ed è responsabile del sollevamento apuano e dell'ulteriore deformazione dell'edificio strutturale di prima fase, tramite la formazione di pieghe ad assi a direzione appenninica e vergenze sia orientali che occidentali.

Nel Tortoniano superiore vengono meno i movimenti traslativi generati dalla tettonica compressiva nell'area tirrenica. Dal Miocene superiore in Toscana meridionale e poi dal Pliocene inferiore in alcune aree a settentrione, inizia una fase di tettonica estensionale nella parte più interna della catena appenninica, mentre il fronte compressivo sul versante padano migra in direzione N-NE, con coinvolgimento dei depositi miocenici e plio-pleistocenici: questi movimenti sono l'espressione superficiale della flessurazione di Adria al di sotto della catena appenninica.

Nelle aree interne vengono a formarsi alti e depressioni strutturali, delimitati da faglie dirette: nei bacini si depositano successioni marino-salmastre, ma anche continentali. La datazione di tali depositi ha individuato l'apertura dei bacini collocabile al Pliocene.

Lo studio strutturale dell'Unità tettonica di Cervarola, nella quale ricade la Formazione di Acquerino presente nell'area di studio, ha mostrato una deformazione polifasica ben riconoscibile. Sono state identificate le fasi D_1 "tangenziale" o di *sin-nappe* e D_2 *post-nappe*: quest'ultima mostra le strutture più evidenti a vergenza verso i quadranti nord-orientali. Una fase tettonica anti-appenninica si sovrappone alle due, cui è associato un clivaggio di fratturazione S_3 .

Alla prima fase tangenziale è associata una scistosità S_1 , che assume diverse morfologie a seconda della competenza delle litologie attraversate: negli interstrati pelitici delle Arenarie di Monte Cervarola ad esempio, appare come una scistosità di flusso (*slaty cleavage*) penetrativa e continua, conferendo quindi alla roccia un aspetto fogliettato, generalmente ad andamento sub-parallelo alla stratificazione S_0 (massima angolatura 20°); negli interstrati arenitici S_1 è invece difficilmente riconoscibile, assume infatti il carattere di clivaggio di frattura discontinuo e non penetrativo, e forma stratificazioni ad angoli sempre maggiori di 30° .

La seconda fase deformativa identifica strutture evidenti in tutti i litotipi. La scistosità S_2 spesso identifica il piano assiale di grandi pieghe F_2 , talvolta rovesciate, di cui raramente è visibile la zona di cerniera, ad assi orientati NW-SE e vergenza NE. Le pieghe F_2 risultano generalmente chiuse, o ad apertura che varia tra i 30° e i 70° , in rocce competenti, spesso asimmetriche, ad indicare la vergenza a NE. La S_2 si sviluppa nelle litologie meno competenti delle Arenarie di Monte Cervarola, ed è classificabile come clivaggio di fratturazione.

La terza fase trasversale ha creato un clivaggio di fratturazione S_3 riconducibile a faglie la cui componente di movimento principale è trascorrente.

A partire dal Pliocene inferiore-medio, una fase di tettonica distensiva ha dominato l'area, generando grandi faglie alle quali sono associabili piani di discontinuità minori, questi ultimi ben visibili a scala dell'affioramento. Tali strutture si impostano spesso su superfici pre-esistenti, quali S_2 ed S_3 . I sistemi principali sono quello ad orientazione appenninica (N120-N130) ed antiappenninica (addensamenti in direzione N20-N30 ed N80). Tra le strutture legate a questa tettonica fragile tardiva va ricordata la depressione Firenze-Prato-Pistoia, originata nel tardo Pliocene a seguito dell'apertura del Tirreno. (Elter et al., 1995; Puccinelli et al, in stampa)

3.4 Geomorfologia

3.4.1 Inquadramento geomorfologico e morfotettonico

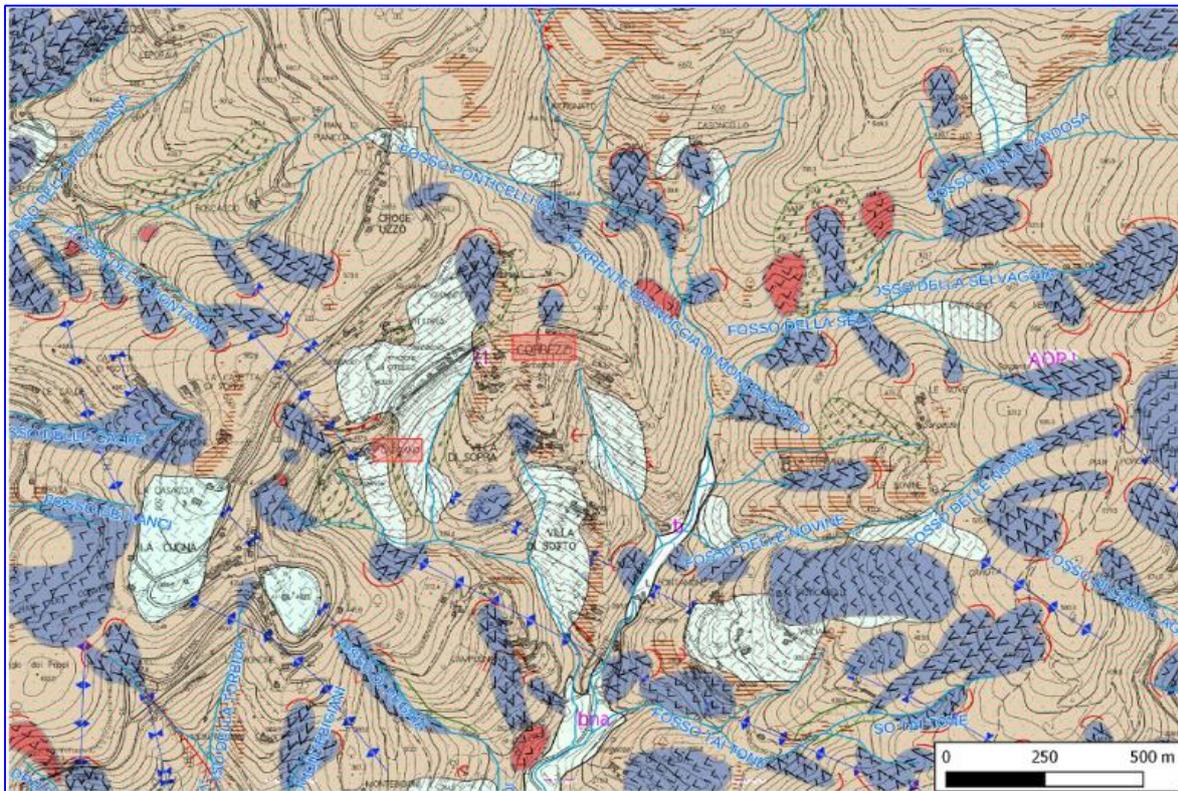
L'assetto morfologico del settore in esame è influenzato dalle dinamiche tettoniche che hanno portato alla formazione delle depressioni fluvio-lacustri di Lucca-Montecarlo-Vinci, Firenze-Prato-Pistoia e delle pianure attuali, separate dalla dorsale del Monte Albano. Tale dorsale, avente quota media che si aggira tra i 400 e i 500 m, culmina a sud-est con il Monte Cupolino (644 m). Il sollevamento di tale dorsale risale al Villafranchiano superiore, coincidente con l'età dei depositi fluvio-lacustri sedimentati dal Fiume Ombrone. Il sollevamento sembra essere successivo al Pleistocene medio, e ancora in atto. Studi di Bartolini (1980) hanno individuato la presenza di varie superfici relitte nelle zone a nord di Lucca e Pistoia: si tratta di settori in cui i processi erosivi hanno bassa intensità, fatto che permette la preservazione di superfici sub-pianeggianti. Le componenti litologiche delle formazioni che compongono il sottosuolo condizionano la morfologia del paesaggio: i rilievi montuosi ed i versanti più acclivi sono costituiti da litologie arenacee competenti, riconducibili all'unità della Falda Toscana o del Cervarola (Puccinelli et al., in stampa).

Le località indagate nel lavoro di tesi sono ubicate nel versante alla destra idrografica del torrente Brana, tributario del fiume Ombrone. Il bacino idrografico del torrente Brana è separato da quello del Torrente Bure tramite una dorsale montuosa ad andamento NE-SW, che ne delimita il settore orientale: la quota media è pari a 700 m nel foglio della CTR 20040, quota che a N, nel foglio 20060, raggiunge quote maggiori (900 metri), sino a culminare a 1140 m nel Monte Lattai. A NE del Monte Lattai vi è il Monte Cornato (1130 m): le due cime fanno parte della catena che determina lo spartiacque appenninico, ovvero che suddivide i sistemi di drenaggio di versante adriatico e versante tirrenico. In particolare i sistemi di drenaggio dei rii che andranno ad unirsi più a valle formando il Brana, sono separati, tramite il Monte Cornato, dai bacini idrografici di torrenti tributari del Fiume Limentra. L'azione erosiva alla testata di questi corsi è ben evidenziata dalla morfologia delle curve di livello alla testata dei canali. Ad ovest del torrente Brana scorre il fiume Ombrone: il rilievo che li separa, ad andamento SW-NE, ha una quota di circa 500 m a meridione, in corrispondenza della località "La Cugna", per poi aumentare, sino a ricollegarsi al Monte Cornato, seguendo la dorsale sino a settentrione: proprio sul versante esposto a SE di questo rilievo è ubicata l'area di studio. Il versante SE del bacino del Brana risulta più pendente rispetto a quello esposto a NW.

3.4.2 Movimenti gravitativi di versante

La frequenza e la diffusione dei movimenti franosi nel foglio Pistoia (Puccinelli et al., in stampa) è considerata inferiore rispetto alla media delle aree appenniniche settentrionali: le cause sono state individuate nella bassa energia del rilievo e nella distanza dalla dorsale appenninica. Il numero di eventi è comunque notevole, e riconducibile alle caratteristiche meccaniche scadenti delle litologie presenti nelle aree collinari e montuose. La movimentazione dei fenomeni franosi maggiori avvenuta negli ultimi anni è attribuita ad eventi piovosi di notevole intensità o durata. La piovosità media annua è compresa tra i 700-800 mm/anno nel territorio a sud di Pistoia e il 2000 mm/anno dello spartiacque Arno-Serchio-Reno. In generale le frane in evoluzione sono rare: la movimentazione è associata a processi geomorfologici quali l'azione erosiva dei corsi d'acqua ai piedi dei pendii, oppure fenomeni con alternanza di fasi di attività e quiescenza legate all'andamento delle precipitazioni.

Le frane da scorrimento sono frequenti in formazioni arenacee, poiché guidate dalla stratificazione o da sistemi di fratturazione significativi: il progredire del movimento porta a volte all'evoluzione verso il colamento, soprattutto in presenza di un materiale roccioso alterato e fratturato. Fenomeni di scorrimento traslativo interessano anche coperture detritiche. Frane a scorrimento rotazionale, cui possono essere associate frane di colata, sono comuni in corpi pelitici e depositi sciolti. Eventi di colata rapida di detrito sono noti in occasione di piogge intense e prolungate. Fenomeni di DGPV sono presenti nelle aree di affioramento delle arenarie, con larghezze di centinaia di metri e lunghezze che possono oltrepassare i 2 km, come rilevato in corrispondenza della Valle del torrente Pescia (Puccinelli et al., in stampa).



Legenda geologica, morfologica e fenomeni franosi

Stato di attività ■ Attivo ■ Inattivo quiescente	Depositi superficiali Depositi di versante (Olocene)	Unità di Monte Cervarola 1 AQR1 Formazione dell'Acquerino Membro arenaceo-pelitico Chattiano-Aquitano	Limite geologico Contatto stratigrafico e/o litologico certo Faglia diretta
Tipo di movimento V V Indeterminato V V Scorrimento lento/rapido (<3 m/s) ⇩ Frana non cartografabile	Forma geomorfologica lineare — Orlo di scarpata in frana o di deformazione gravitativa profonda di versante — Orlo di scarpata di degradazione	Depositi quaternari b Depositi alluvionali attuali bna Depositi alluvionali recenti, terrazzati e non terrazzati	Strutture plicative ↗ Traccia di superficie assiale di anticlinale-fase non applicabile/non classificabile ↘ Traccia di superficie assiale di sinclinale-fase non applicabile/non classificabile
	Forma geomorfologica areale Dilavamento diffuso Superficie strutturale o sub-strutturale Porzione di versante con assetto a franapoggio meno inclinato del pendio	Stratificazione / 20 Strati a polarità non definita + 20 Strati orizzontali \ 20 Strati a polarità non definita	

Figura 12: Elaborato alla scala 1:10.000 della cartografia e della simbologia geomorfologica e dei fenomeni franosi nell'area in esame (Fonte metadati: Regione Toscana, 2011).

Nell'area di studio vengono individuati prevalentemente meccanismi di innesco da scorrimento: i depositi sono indicati come quiescenti (Figura 12) nella maggior parte dei casi. Un franamento che risulta invece di recente movimentazione è quello che ha coinvolto la zona di corona di un deposito quiescente. Tale deposito è collocato in corrispondenza della

testata di uno dei due corsi d'acqua ubicati a Casciano, quello più meridionale, anche se è possibile notare come anche il rio a settentrione determini un'instabilità del materiale costituente il versante, avendo determinato anch'esso un movimento di scorrimento in passato.

Come è possibile osservare dallo stralcio della carta geologica in figura 9, ci troviamo sul fianco di un'anticlinale ad immersione W-SW e pertanto a reggipoggio rispetto alla morfologia del versante in esame: dal punto di vista della stratigrafia dell'ammasso roccioso le condizioni di stabilità sono ottimali.

3.5 Inquadramento idrografico

La morfologia dei fiumi che drenano l'Appennino Settentrionale è determinata dall'orogenesi: i movimenti distensivi della crosta terrestre, espressi dalle tipiche strutture a graben, sono avvenuti con una velocità media tale da sbarrare i maggiori corsi d'acqua in origine fluenti verso l'Adriatico; i movimenti compressivi, invece, espressi da strutture a pieghe, si sono svolti con una velocità di sollevamento così ridotta da non influire sensibilmente sui tracciati dei fiumi nel versante tirrenico. Al limite tra i due tipi di strutture corrisponde una marcata flessura, che raccorda la parte ispessita con la parte assottigliata della crosta. Risulta ragionevole pensare che la situazione attuale, caratterizzata dalla coincidenza dello spartiacque appenninico con il limite tra i due tipi opposti di strutture, si sia verificata anche in passato: lo spartiacque avrebbe pertanto compiuto una migrazione di pari passo col fronte delle strutture distensive avanzante verso l'Adriatico (Mazzanti & Trevisan, 1978).

Gli abitati di Corbezzi e Casciano sono situati sulla sinistra idrografica del bacino del torrente Brana (Figura 13): il torrente è direzionato NE-SW nel settore dell'Appennino Pistoiese. Nella regione più settentrionale della vallecchia, ad est della località "Villaggio del Signorino", il torrente "Brana di Montevestito" confluisce nel "Branuccia di Montevestito": all'altezza di Corbezzi il Branuccia di Montevestito si congiunge prima al Fosso Ponticelli (direzione di flusso NW-SE) e subito dopo al Fosso della Cardosa, il cui bacino idrografico è direzionato NE-SW, costituendo del torrente Brana.

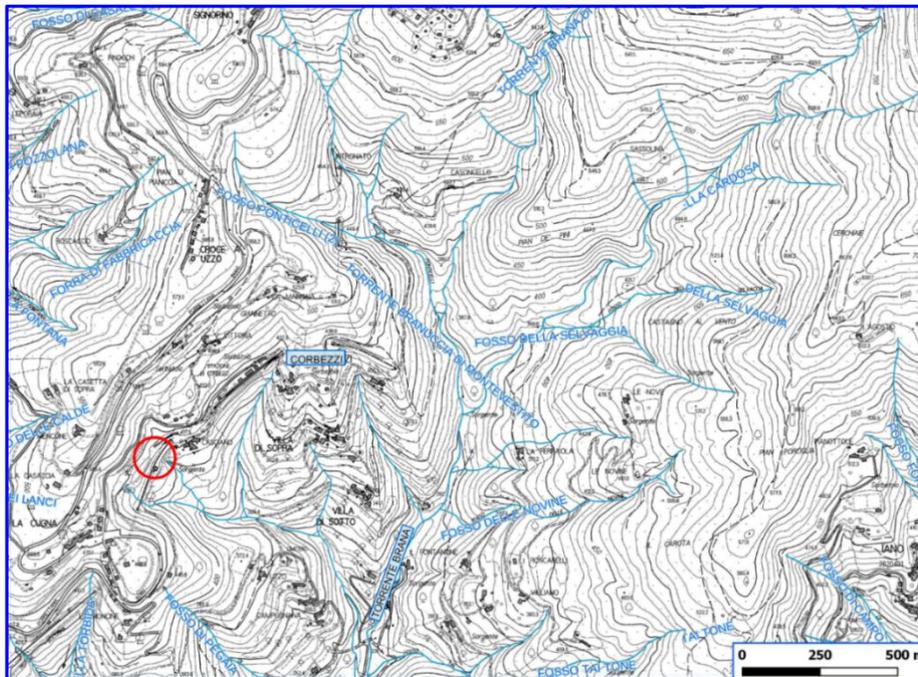


Figura 13: Particolare dell'andamento idrografico e ubicazione della frana nell'area in esame (Fonte metadati: Regione Toscana, 2011).

I corsi tributari sono costituiti da rii: i principali sono quelli, come il Fosso delle Novine e il Fosso Tai Tone, drenanti la sinistra idrografica della Val di Brana. Molti dei corsi alla sinistra, e tutti quelli alla destra idrografica, sono considerati minori, e non hanno una denominazione in CTR. Il torrente Brana confluisce poi nel canale del fiume “Calice”, che finisce poi per confluire, dopo pochi chilometri, nel Fiume Ombrone. L'Ombrone è a sua volta tributario dell'Arno, che costituisce il collettore principale del territorio. Il bacino dell'Ombrone drena quindi le aree montuose a nord di Pistoia e le pendici orientali del Monte Albano.

Nelle zone della stazione di Corbezzi e nel tratto a sud di Casciano, a valle del rilevato ferroviario, le acque piovane vengono convogliate in canali: un primo corso dalla quota 400 m in corrispondenza della stazione, scorre con andamento N-S sino ai 330 m; due diversi rii si originano invece in prossimità dell'area interessata dal franamento, unendosi poi alla quota 350 m e fluendo verso E. Quest'ultimo canale va ad unirsi a quello proveniente da Corbezzi ai 330 m di altezza: il corso che ne risulta scorre in direzione N-NW – S-SE fino a convogliare nel Brana in corrispondenza della quota 220 m. Il canale più settentrionale è in realtà solo l'emergenza terminale di un corso che si genera a monte della ferrovia, alla quota di 522 m, e che scorre lungo l'impluvio che interseca il rilevato. Il canale è stato di conseguenza tombato, e le sue acque potrebbero emergere a valle, alla quota 402 m, assieme a quelle derivanti dal drenaggio della galleria Casciano.

3.6 Inquadramento idrogeologico

L'assetto tettonico dell'area su cui giace la provincia di Pistoia rende piuttosto complicato il lavoro di riconoscimento delle strutture idrogeologiche. I maggiori acquiferi toscani si collocano nelle sabbie e nelle ghiaie dei sedimenti fluviali attuali delle pianure costiere e dei bacini intramontani, aventi alta permeabilità, che sono direttamente alimentati dall'infiltrazione delle acque meteoriche. I depositi marini pliocenici hanno un'elevata porosità, ma raramente rappresentano dei buoni acquiferi, in quanto le sabbie ed i

conglomerati generalmente contengono litologie fini. La presenza di limo e di argilla nei depositi terziari flyschoidi e nelle unità liguri alloctone limita la circolazione verticale delle acque rendendo le rocce parzialmente o totalmente impermeabili. Le maggiori risorse idriche del sottosuolo toscano si trovano quindi nei depositi fluvio-lacustri quaternari: tali falde sono però fortemente sottoposte al rischio di contaminazione ambientale, a causa della bassa soggiacenza. Questi acquiferi sono spesso collocati nelle aree urbanizzate e frequentemente sovrasfruttati rispetto alla ricarica naturale.

Il bacino del F. Arno è un elemento idrogeologico caratteristico dell'area studiata. I bacini intermontani del Valdarno medio, del Mugello, del Valdarno inferiore, del Casentino e della Val di Chiana formano l'intero bacino dell'Arno.

La presenza di rocce a bassa permeabilità nelle aree montane del bacino dell'Arno in associazione all'assenza di emersioni sorgentizie significative testimoniano la dipendenza del fiume dal regime delle precipitazioni (Pranzini, 1986). Le piogge hanno una distribuzione irregolare (in media cadono 1024 mm annui): 3000 mm in alcune aree dell'Appennino e 600 mm in altre aree del Valdarno inferiore. L'infiltrazione attuale nei flysch arenacei non supera il 5%. La maggior parte delle acque che s'infiltrano è raccolta nei depositi quaternari dei bacini intermontani, cui corrispondono i grandi acquiferi.

I corpi idrogeologici maggiori sono concentrati nelle aree di pianura: la Pianura di Pistoia (Figura 14) occupa la parte nord-occidentale della depressione di Firenze-Prato-Pistoia, confinando con l'Appennino pistoiese a nord e con la dorsale del Monte Albano a meridione. È composta da depositi alluvionali, di canale fluviale e di rota nella parte sommitale, mentre nella porzione inferiore è formata da sedimenti lacustri. Nella zona montana, a causa della presenza di litologie caratterizzate da permeabilità bassa e decrescente con la profondità, non vengono osservate importanti emersioni sorgentizie: solitamente le portate si limitano al litro al secondo nei periodi di morbida. Le sorgenti sono spesso ubicate in corrispondenza di contatti con rocce argillitiche o zone di faglia (Puccinelli et al., in stampa).

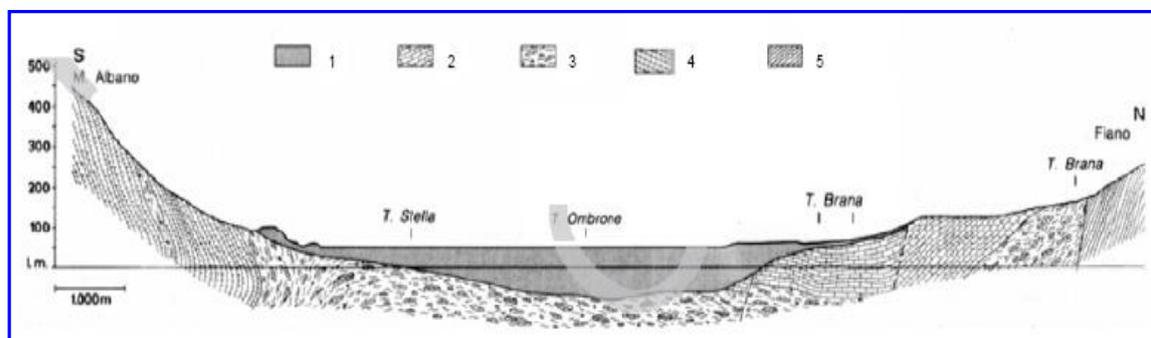


Figura 14: Sezione del sottosuolo della pianura pistoiese (Fonte: Puccinelli et al., in stampa).

La permeabilità degli elementi rocciosi può dipendere dalla porosità primaria o secondaria: la prima è riconducibile alla frazione porosa, penecontemporanea alla formazione della roccia, mentre la seconda è caratteristica di una fase successiva, in cui l'acqua è ospitata in fratture o strutture da dissoluzione. Le falde presenti nei depositi flyschoidi sono di ridotte dimensioni, con caratteristiche di scarsa continuità laterale: sono infatti falde discontinue, interrotte non solo dalle strutture tettoniche ma anche dai livelli a litologie fini poco permeabili che si rinvengono nel flysch. La permeabilità risultante è quindi da media a bassa in relazione alla presenza di livelli fini siltitici, argillitici o marnosi intercalati a quelli grossolani. Solo grazie a zone fittamente fratturate è possibile rinvenire emersioni sorgentizie.

Gli acquiferi nei mezzi fessurati sono meno utilizzati di quelli alluvionali per una serie di motivi tra i quali, la localizzazione meno comoda (aree collinari o montane spesso lontane

dalle aree di maggiore richiesta), la difficoltà di ubicazione dei pozzi (contrariamente a quanto avviene nei depositi alluvionali, nelle rocce permeabili per fratture ci sono notevoli differenze di portata in pozzi anche vicini, in conseguenza della notevole anisotropia delle rocce acquifere), e il fatto che qualche volta l'acqua presenta qualità chimiche scadenti. Lo sfruttamento delle falde idriche contenute negli acquiferi montani e collinari avviene principalmente con la captazione delle sorgenti, mentre i pozzi sono pochi e forniscono solo una piccola parte dell'acqua utilizzata (Autorità del Bacino del Fiume Arno, 2002).

3.7 Inquadramento del vincolo paesaggistico

Come da figura 15 l'area in esame risulta soggetta a vincolo di tipo "Paesaggistico" denominato "Aree coperte da foreste e da boschi" (Regione Toscana, 2010).

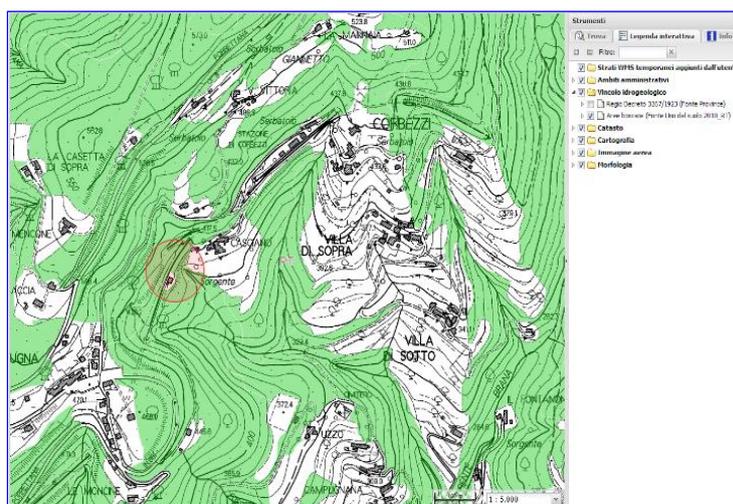


Figura 15: Vincolo paesaggistico riscontrato per l'area in esame (Fonte: Regione Toscana, 2010).

Le aree del territorio appartenenti alla provincia di Pistoia che sono sottoposte a vincolo paesaggistico sono individuabili tramite la cartografia del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (P.T.C.). Nel vincolo ricadono gli elementi di:

- territorio oltre la quota di 1200 mt s.l.m.;
- corsi d'acqua iscritti negli elenchi delle acque pubbliche;
- vincolo archeologico;
- la fascia 300 mt contermina ai laghi;
- la fascia 150 mt lungo i corsi d'acqua iscritti nell'elenco delle acque pubbliche;
- le Riserve Nazionali;
- il territorio coperto da boschi e foreste;
- le zone sottoposte a vincolo ai sensi della ex L.1497/39 (Provincia di Pistoia, 2009a).

Lo scopo del vincolo paesaggistico è la salvaguardia dei caratteri del paesaggio, poiché derivano da una specifica identità culturale, paesaggistica e ambientale. Il territorio provinciale è stato quindi articolato in "Sottosistemi territoriali di paesaggio", definiti nella tavola P03 del P.T.C. di Pistoia (Provincia di Pistoia, 2009b). Dall'estratto di figura 16 possiamo notare come l'area di analisi ricada entro la campitura individuata come "Sottosistema territoriale del paesaggio dell'alta collina a prevalenza di bosco".

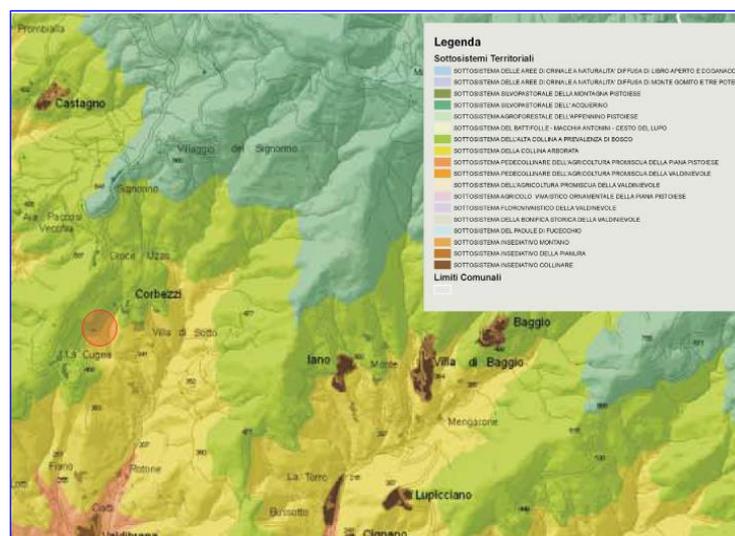


Figura 16: Estratto della carta dei Sottosistemi territoriali – P. 03 con ubicazione dell'area di indagine (Fonte: Provincia di Pistoia, 2009c).

I sottosistemi individuati in questa tavola sono poi disciplinati nella Disciplina di Piano, in cui vengono espressi indirizzi e direttive per ognuno di essi. L'Articolo 30 della Disciplina di Piano illustra le caratteristiche del Sottosistema Territoriale del Paesaggio dell'alta collina a prevalenza di bosco. Sono le aree prevalentemente o completamente boscate dell'alta collina e dei crinali collinari, distinti per strutture territoriali in:

- a) aree dell'Alta Collina Pistoiese che raggiungono i circa 1.000 m del crinale appenninico, la vallata dell'Ombrone e le valli del Reno e delle Limentra;
- b) aree dell'Alta Collina della Valdinievole, che interessano le aree collinari della vallata del Nievole fino alla Svizzera Pesciatina;
- c) aree prevalentemente boscate del crinale del Montalbano.

I Piani Strutturali e gli atti di governo del territorio hanno il compito di disciplinare le trasformazioni e le attività ammissibili in questa tipologia di ambiente sulla base delle seguenti direttive:

- a) conservare, mantenere e consolidare la copertura boschiva;
- b) impedire l'alterazione dei caratteri morfologici, degli assetti idrogeologici, dei valori paesaggistici dei luoghi ed in particolare del sistema dei crinali;
- c) individuare, con finalità di tutela conservativa, il sistema dei percorsi storici ed inserirli in un circuito di percorsi turistico-escursionistico;
- d) disciplinare la manutenzione, l'adeguamento e la realizzazione di impianti per l'approvvigionamento idrico, energetico, per telecomunicazioni nel rispetto delle caratteristiche virtuali e paesaggistiche dei luoghi;
- e) definire gli interventi di nuova edificazione rurale una volta accertata l'impossibilità di interventi alternativi di recupero edilizio e comunque per finalità non abitative;
- f) definire le tipologie, i caratteri costruttivi ed i materiali da impiegare per gli interventi di recupero e di eventuale nuova costruzione nel rispetto della tradizionale edilizia rurale (Provincia di Pistoia, 2009b).

4 LA FRANA DI CORBEZZI

Di seguito è introdotta la frana tramite la descrizione degli elementi visionati nel sito il giorno dopo la movimentazione, classificandone la tipologia, e riportando i primi presupposti relativi alle cause d'innesco.

4.1 Descrizione del fenomeno franoso

Nella ricostruzione delle dinamiche di innesco e movimentazione della frana di Corbezzi la problematica principale è rappresentata dall'assenza di documentazione relativamente alla situazione precedente l'evento proveniente dalla cartografia regionale e dalla società ferroviaria, mancanza che ha determinato una certa difficoltà nella determinazione delle dimensioni e ubicazioni esatte delle opere di sostegno e drenaggio preesistenti.

Il rilievi effettuati i giorni subito successivi l'evento hanno mostrato che la generazione della superficie di scorrimento che ha movimentato il dissesto ha lasciato invariata la posizione della via ferroviaria: la superficie che determina il coronamento della frana è infatti emersa poche decine di centimetri alla valle del binario, non deformandolo (Figura 17).



Figura 17: Situazione del binario la mattina del 5 Gennaio.

Il corpo frana è composto dal materiale appartenente al rilevato ferroviario e da detrito di copertura: non risulta quindi un coinvolgimento dell'ammasso roccioso sottostante. Tale deposito è costituito da trovanti siltoso-arenacei a spigoli vivi, marroni all'alterazione e grigio-scuri al taglio, in una matrice limoso-argillosa bruna, il tutto identificabile come materiale di riporto proveniente dall'intervento di scavo delle gallerie limitrofe, utilizzato poi come substrato per il rilevato ferroviario.

Durante l'evento tale materiale è stato movimentato in conseguenza al venir meno dell'opera di sostegno al piede: il rilevato era infatti sostenuto da un muro composto da blocchi arenacei e cemento, avente presumibilmente le dimensioni di 4 m di altezza e 2 di profondità, per una

probabile lunghezza di circa 50 m. Tale opera è scivolata e traslata, determinando l'assenza della contro-spinta necessaria alla stabilità del pendio (Figura 18).

L'esatta ubicazione e la dimensione del muro non sono facilmente individuabili, a causa della mancata segnalazione in carte topografiche e l'assenza di planimetrie ferroviarie.



Il corpo frana, avente spessore di qualche metro, ha percorso una distanza di circa 7 metri, immettendosi nell'impluvio sottostante.

Figura 18: Posizione dell'opera muraria dopo l'evento.

4.2 Classificazione delle tipologie di movimenti franosi

La classificazione comunemente accettata e più utilizzata a livello internazionale per la nomenclatura dei fenomeni franosi è quella proposta da Cruden e Varnes nel 1996, revisione del lavoro di Varnes del 1978. Tale nomenclatura vuole essere indicativa del tipo di materiale coinvolto, così come delle sue modalità di movimento espresse tramite la dicitura indicata in tabella 2.

Tipo di movimento	Tipo di materiale		
	<u>Bedrock</u>	<u>Suoli (Engineering soils)</u>	
		Predominanza componente grossolana	Predominanza componente fine
Crollo (Fall)	Crollo in roccia (Rock fall)	Crollo in detrito (Debris fall)	Crollo in terra (Earth fall)
Ribaltamento (Topple)	Ribaltamento in roccia (Rock topple)	Ribaltamento in detrito (Debris topple)	Ribaltamento in terra (Earth topple)
Scorrimento rotazionale, traslativo (Rotational, Translational slide)	Scorrimento in roccia (Rock slide)	Scorrimento in detrito (Debris slide)	Scorrimento in terra (Earth slide)
Espandimento laterale	Espandimento in roccia (rock spread)	Espandimento in detrito (Debris spread)	Espandimento in terra (Earth spread)
Colata	Colata in roccia (Rock flow)	Colata in detrito (Debris flow)	Colata in terra (Earth flow)

Tabella 2: Nomenclatura dei movimenti di versante (Fonte: Cruden & Varnes, 1996).

Vengono poi attribuiti altri termini al fenomeno allo scopo di indicarne l'“Attività” (Tabella 3). In particolare nella sezione “stato di attività” vengono distinti i materiali attualmente in movimento (Stato attivo), riattivati dopo un periodo di stasi (Stato riattivato), materiali non in movimento attualmente ma attivi nell'ultimo ciclo stagionale (Stato sospeso). Le frane inattive, ovvero stazionarie da oltre un ciclo stagionale, vengono catalogate in:

- dormienti, se la causa dell'innesco persiste;
- abbandonate, se la causa di attivazione non è più presente;
- stabilizzate, se sono stati adottati rimedi per la stabilizzazione del versante.

Questi stati possono meglio essere visualizzati tramite il grafico movimento/tempo in figura 19.

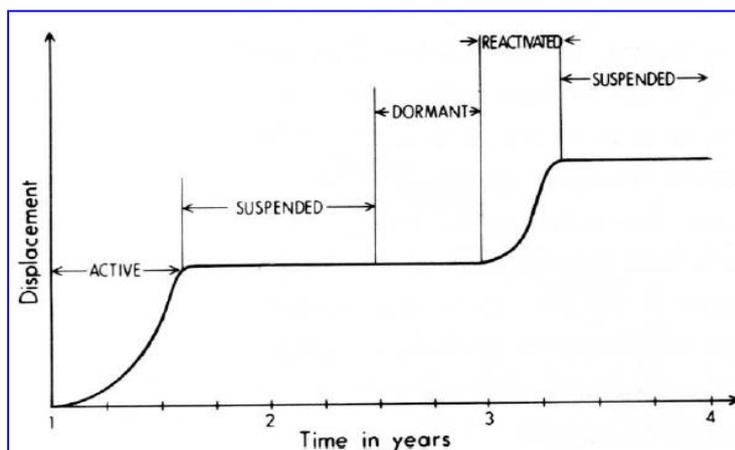


Figura 19: Illustrazione dello stato di attività di una frana tramite un grafico spostamento/tempo (Fonte: Cruden & Varnes, 1996).

Inoltre è necessaria l'indicazione del tasso di umidità presente nel corpo in frana:

- secco, ovvero senza umidità visibile;
- umido, contiene acqua ma non libera, cioè il materiale non può fluire;
- bagnato, si comporta in parte come liquido;
- molto bagnato, contiene abbastanza acqua da fluire come liquido in condizioni di basso gradiente.

Alla definizione di “stato attivo” va quindi specificato il tasso di spostamento nei seguenti termini di tabella 3:

Attività		
Stato	Distribuzione	Stile
Attivo	Avanzamento	Complesso
Riattivato	Retrogressione	Composito
Sospeso	Ingrandimento	Multiplo
Inattivo: dormiente abbandonato stabilizzato relitto	Allargamento	Successivo
	Confinamento	Singolo
	Diminuzione	

Tabella 3: Attività di una frana (Fonte: Cruden & Varnes, 1996).

- estremamente rapido (aventi un limite inferiore di 5 m/s);
- molto rapido (limite inferiore 3 m/min);
- rapido (limite inferiore 1.8 m/h);
- moderato (limite inferiore 13 m/mese);
- lento (limite inferiore 1.6 m/anno);

- molto lento (limite inferiore 16 mm/anno);
- estremamente lento (tasso di movimento inferiore ai 16 mm/anno).

In figura 20 sono elencate le morfologie che si possono distinguere in una frana tipo complessa (scorrimento rotazionale - colata in terra), tipologia molto comune in materiale omogeneo come quello di rilevati e i corpi artificiali in genere: è possibile in particolare distinguere una zona di distacco, dove il materiale distaccato giace al di sotto della superficie del versante originaria, e una zona di accumulo, dove il materiale movimentato si trova al di sopra del livello della superficie del versante originaria. Il volume dell'accumulo è spesso maggiore di quello dell'area di distacco, poiché il terreno dilata durante il movimento.

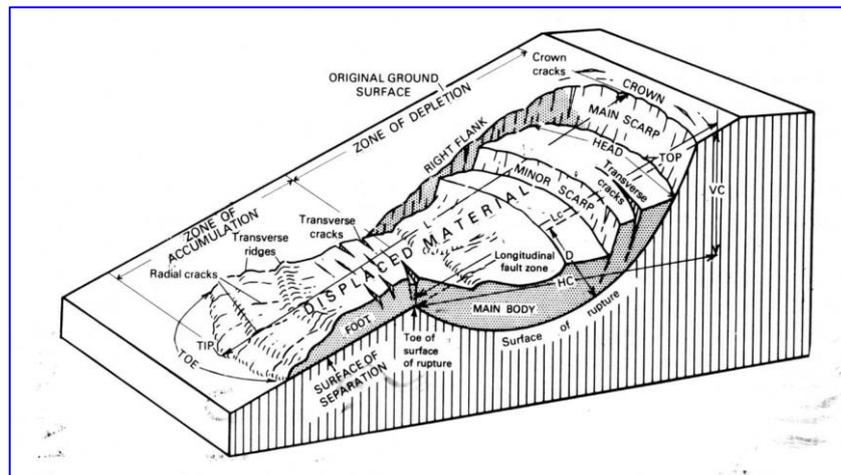


Figura 20: Nomenclatura delle morfologie di uno scorrimento in terra (Fonte: Varnes, 1978)

Le principali morfologie riconoscibili sono:

- corona o ciglio di distacco, che identifica il materiale non movimentato adiacente la quota più elevata della scarpata principale;
- scarpata principale, superficie gradonata giacente sul terreno indisturbato nella parte superiore del versante franato;
- top, superficie di contatto tra il materiale movimentato e la scarpata principale;
- piede, porzione della frana che ricopre la superficie del versante originaria;
- unghia, margine del deposito di frana più distante dalla scarpata principale;
- superficie di rottura, superficie che separa la porzione inferiore del materiale movimentato da quello originario.

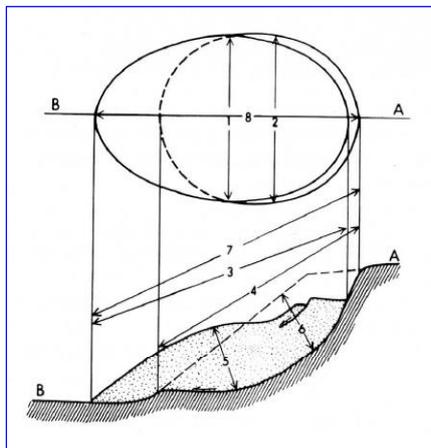
4.2.1 Il fenomeno franoso tipo Scorrimento

Il dissesto avvenuto a Corbezzì è classificabile come scorrimento roto-traslativo. Uno scorrimento è il movimento lungo un versante di una massa di suolo o roccia che avviene prevalentemente lungo superfici di rottura o zone relativamente sottili caratterizzate da intenso sforzo di taglio. La mobilitazione del materiale non avviene contemporaneamente: da una zona di rottura locale, il volume di materiale si espande gradualmente. È utile la distinzione di due tipologie di scorrimento in base ai comportamenti cinematici e al fine di individuare diversi metodi di gestione.

Lo scorrimento rotazionale è caratterizzato da una superficie di scorrimento curva e concava: la deformazione interna di una massa movimentata lungo una superficie circolare o cicloidale è minima. Il materiale distaccato si muove verticalmente verso il basso nella sua

parte sommitale mentre la superficie ruota verso monte, sino a presentare una contropendenza.

La superficie di rottura è considerata cilindrica se la frana si estende per una distanza considerevole in larghezza, lungo il versante e perpendicolarmente alla direzione di moto. Scorrimenti rotazionali in terra mostrano generalmente un rapporto profondità della superficie di scorrimento su lunghezza della superficie di scorrimento D_r/L_r compreso tra 0.15 e 0.33 (Figura 21).



NUMBER	NAME	DEFINITION
1	Width of displaced mass, W_d	Maximum breadth of displaced mass perpendicular to length, L_r
2	Width of surface of rupture, W_r	Maximum width between flanks of landslide perpendicular to length, L_r
3	Length of displaced mass, L_d	Minimum distance from tip to top
4	Length of surface of rupture, L_r	Minimum distance from toe of surface of rupture to crown
5	Depth of displaced mass, D_d	Maximum depth of displaced mass measured perpendicular to plane containing W_d and L_d
6	Depth of surface of rupture, D_r	Maximum depth of surface of rupture below original ground surface measured perpendicular to plane containing W_r and L_r
7	Total length, L	Minimum distance from tip of landslide to crown
8	Length of center line, L_c	Distance from crown to tip of landslide through points on original ground surface equidistant from lateral margins of surface of rupture and displaced material

Figura 21: Schema delle dimensioni e definizioni delle dimensioni di una frana (Fonte: Cruden & Varnes, 1996).

La scarpata alla corona di una frana rotazionale (Figura 22) è verticale e non supportata: ciò porta spesso ad una retrogressione della frana alla testata. Lo stesso può verificarsi in casi di fianchi particolarmente elevati e ripidi.

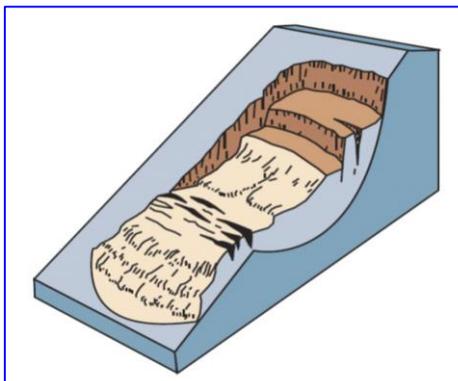


Figura 22: Schematizzazione scorrimento rotazionale (Fonte: Highland, 2004).

L'acqua aprendosi una via alla testata della frana può contribuire al ristagno nel lembo a quota maggiore del deposito tiltato verso monte, contribuendo quindi a mantenere il materiale saturo d'acqua. Questa situazione provoca una movimentazione continua del deposito, sino al raggiungimento di un profilo caratterizzato da pendenze minori.

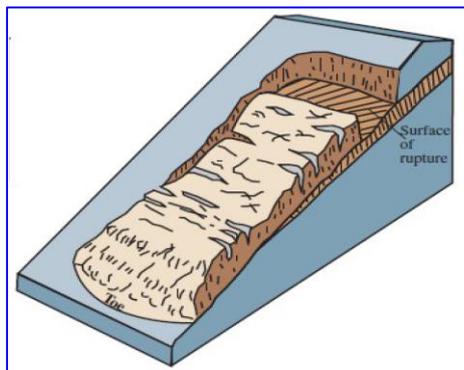


Figura 23: Schematizzazione scorrimento traslativo (Fonte: Highland, 2004).

Nello scorrimento traslativo (Figura 23) la frana è dislocata lungo una superficie di rottura planare o lievemente ondulata, disposta a franappoggio. I depositi generati da questo tipo di frana sono generalmente meno profondi di quelli da scorrimento rotazionale. Il rapporto D_r/L_r è tipicamente minore di 0.1. A causa della sua morfologia, la superficie di scorrimento induce il deposito ad una movimentazione che può raggiungere notevoli distanze se sufficientemente inclinata. La massa in movimento può arrivare a fratturarsi, soprattutto se la sua velocità o il contenuto in acqua aumenta, con la possibilità che venga tramutata in debris flow. Le

superfici di scorrimento sono spesso impostate su discontinuità pre-esistenti, come faglie, joints, letti di strati o la superficie di contatto tra roccia e suolo residuale o trasportato. Le frane composite sono poi quelle aventi range di D_r/L_r intermedi tra le sopracitate rotazionali e traslative. La superficie di rottura può diminuire la pendenza con l'aumento della profondità, mentre la parte basale della superficie di rottura può essere inclinata verso l'alto. Il distacco lungo superfici di rottura composite richiede una deformazione interna del deposito, il che conduce alla formazione di scarpate intermedie. Repentini abbassamenti nell'inclinazione della superficie di rottura possono essere segnalati da scarpate immergenti a monte nella massa movimentata e da *graben*, ovvero aree depresse date dalla subsidenza dei blocchi del deposito. La profondità di tali strutture può essere proporzionale a quella della superficie di scorrimento. Una frana composta, inoltre, spesso è indicatore di livelli deboli o di confine strato alterato-non alterato (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996). In "Analisi del dissesto da frana in Toscana" nell'ambito del Rapporto sulle frane in Italia (Morini et al., 2005) gli autori riportavano che nel territorio toscano il 56.7% delle frane è di tipo scorrimento rotazionale/traslato, mentre il secondo tipo di movimento di versante più diffuso è quello complesso (13%). Inoltre è stato calcolato come il maggior danno causato dai dissesti ricada sulle strutture viarie e in secondo luogo su corsi d'acqua. Suddividendo poi il numero di frane per classe litologica è risultato che circa il 9% è avvenuto in flisch arenacei.

4.3 Possibili cause



Figura 24: Tratto dell'opera idraulica creata per il defluire delle acque piovane e dell'impluvio a monte della ferrovia.

Le ipotesi ideate per l'innescò del fenomeno convergono ad una principale soluzione: la causa è da ricercarsi nelle condizioni idrologiche cui è stato sottoposto questo territorio nel periodo precedente l'evento. Le importanti precipitazioni avvenute tra fine 2013 e inizio anno 2014 potrebbero essere state infatti il motore d'innescò della frana, agendo tramite un'azione erosiva applicata al materiale situato ai piedi del muro di contenimento. La movimentazione del pendio, in particolar modo, sembra derivare dalle condizioni idrauliche del cunicolo in cui è stato tombato l'impluvio (Figura 24).

L'opera presenta dimensioni considerevoli (altezza uomo) passando al di sotto del tratto ferroviario in prossimità del tunnel Casciano. La galleria è inoltre fornita di un sistema di gradonature atte alla dissipazione energetica in condizioni di criticità.

Il canale finiva per emergere ai piedi dell'antico muro di contenimento, per poi continuare il suo corso parallelamente allo stesso: tale posizione, in concomitanza con il regime critico delle precipitazioni, deve

aver favorito l'erosione del materiale al piede del muro, portandolo quindi allo scalzamento e al ribaltamento.

Ipotesi differenti dall'innescò causato dalle forti precipitazioni risultano meno realistiche: ad esempio è improbabile che l'opera sia arrivata a rottura a seguito di meccanismi quali l'eccessiva spianta a tergo del muro o a causa di un cedimento strutturale, in quanto il sostegno è stato garantito per oltre 70 anni senza che si verificassero situazioni problematiche.

4.4 Interventi di emergenza eseguiti

Come misura immediata si è provveduto alla perimetrazione e chiusura al traffico ferroviario dell'area coinvolta nel dissesto: ciò ha comportato l'interruzione di tutta la tratta Pracchia-Porretta, con grande disagio per i pendolari. È stato poi attivato un servizio di trasporto sostitutivo su autobus, non senza difficoltà, come l'appesantimento del traffico sulle statali, e proteste da parte delle comunità della Montagna Pistoiese.

La tempistica di riapertura del tratto ferroviario doveva essere breve anche a causa della ricorrenza del cento-cinquantenario dall'inaugurazione della ferrovia Porrettana, occorso a Ottobre 2014.

A causa delle condizioni critiche in cui versava il sito, condizioni dovute alla prosecuzione delle precipitazioni nei giorni seguenti il dissesto, il sito è risultato inagibile ai mezzi meccanici per le prime settimane.

I primi interventi, atti all'allontanamento delle acque di deflusso dal sito, sono stati dunque realizzati in modo del tutto manuale. Tramite fossi di guardia creati ai margini del deposito, il flusso costituito dalle acque di precipitazione viene deviato dalla zona di frana, di modo da impedirne l'infiltrazione e l'azione erosiva nei confronti del materiale ancora instabile.

Le acque di ruscellamento sono state convogliate nell'impluvio più vicino, ovvero il fossato ai piedi del versante che era stato ostruito dalla vegetazione e dal deposito creato dalla frana: il materiale, anche in questo caso, è stato asportato manualmente.

Ristabilite le condizioni ottimali per la movimentazione del terreno tramite mezzi meccanici, si è potuto procedere all'esecuzione di una prima risagomatura del versante, allo scopo di rimuovere le morfologie instabili presenti nel pendio e consolidarlo.

5 METODOLOGIA DI STUDIO DEL DISSESTO

Al fine di effettuare un'efficace e corretta verifica della progettazione delle opere realizzate è stato svolto uno studio dell'area sede di dissesto analizzando molteplici aspetti: la metodologia di indagine è illustrata nei seguenti paragrafi.

5.1 Rilevamento geologico e geomorfologico

Come consuetudine, allo scopo di ottenere maggiori informazioni sul sito per le successive fasi di modellazione dell'innesco e di mitigazione del dissesto, si è provveduto all'esecuzione di un rilevamento geologico. Il rilevamento è stato eseguito nell'area che più interessa la dinamica del fenomeno franoso, ovvero il bacino idrografico: infatti la pericolosità di una frana deve tenere conto sia dei tradizionali fattori predisponenti, quali pendenza, litologia, uso del suolo, morfologia, drenaggio, sia delle caratteristiche idrogeologiche (Scesi, 2009). Il rilevamento è stato indispensabile alla definizione delle caratteristiche litologiche dei materiali e alla comprensione dei meccanismi di modellazione che agiscono nel bacino. Tramite il classico approccio di rilevamento, dallo studio delle giaciture, delle litologie, dei depositi e degli eventuali eventi franosi si pongono le basi per una corretta interpretazione delle indagini in sito.

Le basi topografiche utilizzate sono le CTR della Regione Toscana. Il rilevamento sul terreno ha consentito di aggiornare e modificare, dove ritenuto opportuno, la cartografia geologica esistente.

5.2 Prove in situ

Per definire poi un modello geologico-tecnico di riferimento del sottosuolo ed indagarne le condizioni idrogeologiche generali, sono stati analizzati i 3 sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo (Allegato 1), spinti sino alla profondità di -20,00 m dal piano campagna (Tabella 4) effettuati durante la fase di progettazione.

Al termine della perforazione il foro di sondaggio denominato S2 era stato attrezzato con piezometro a tubo aperto tipo "Norton" con $\varnothing=3"$, anch'esso installato da p.c. sino alla profondità di -20,00 m.

Sondaggio	Profondità di indagine (m da p.c.)	Livello freaticometrico (m da p.c.)	Attrezzatura installata
S1	-20	n.r.	---
S2	-20	n.r.	Piezometro a tubo aperto Norton
S3	-20	n.r.	---

Tabella 4: Dati sondaggi.

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono state effettuate prove Standard Penetration Test (SPT) nei fori dei sondaggi S1 ed S2, eseguite ogni 1,5 m di avanzamento.

I profili sismici a rifrazione, realizzati tramite tecnica tomografica in onde P, sono stati calibrati tramite un'analisi dei dati derivanti delle prove geognostiche, da cui sono stati individuati i limiti stratigrafici delle litologie presenti nel sottosuolo in esame.

5.2.1 Sondaggi e penetrometrie dinamiche

La prova Standard Penetration Test (SPT) consente di determinare la resistenza che un terreno offre alla penetrazione dinamica di un campionatore infisso a partire dal fondo di un foro di sondaggio o di un foro appositamente eseguito, avente diametro compreso tra 60 e 200 mm, con la possibilità di prelevare piccoli campioni disturbati del terreno.

La prova S.P.T. consiste nel far cadere ripetutamente un maglio, del peso di 63,5 kg, da un'altezza di 760 mm, su una testa di battuta fissata alla sommità di una batteria di aste alla cui estremità inferiore è avvitato un campionatore di dimensioni standardizzate acquisendo i seguenti parametri:

- il numero di colpi di maglio N_1 necessario a produrre l'infissione per i primi 15cm (tratto di avviamento) inclusa l'eventuale penetrazione quasi statica per gravità;
- il numero di colpi di maglio N_2 necessario a produrre l'infissione per altri 15cm;
- il numero di colpi di maglio N_3 necessario a produrre l'infissione per ulteriori 15cm.

Durante la prova quindi il campionatore viene infisso per tre tratti consecutivi di $15+15+15=45\text{cm}$

Il valore di N_{SPT} , ovvero la resistenza alla penetrazione, è dato dalla somma dei colpi ottenuti per il 2° e 3° tratto. La prova viene sospesa quando il numero di colpi N , per un tratto di 15 cm, supera 50; in tal caso si annota la penetrazione (in cm) ottenuta con 50 colpi (Facciorusso et al., 2011).

Prima di eseguire la prova si è controllato con scandaglio la quota del fondo foro, confrontandola con quella raggiunta con la manovra di perforazione o di pulizia precedentemente fatta.

È stata utilizzata un'attrezzatura di perforazione (Figura 25) adeguata alle caratteristiche dei terreni da attraversare ed agli scopi del sondaggio, costituita da:

1. sonda a rotazione (testa idraulica) con i requisiti minimi sotto indicati;

Velocità di rotazione	0 ÷ 500 rpm
Coppia massima	≥ 400 kgm
Corsa continua	≥ 150 cm
Spinta	≥ 3000 kg
Tiro	≥ 3000 kg
Pressione pompa (gruppo energia autonomo)	≥ 70 bar
Argano a fune	presente

2. pompa con circuito supplementare per il rabbocco del fluido a testa foro;
3. impianto per la preparazione ed il recupero dei fanghi impiegati;
4. accessori e utensili necessari per l'esecuzione del lavoro a norma di specifica.

Sono stati utilizzati i seguenti strumenti di perforazione:

1. carotiere semplice, con valvola di testa a sfera e calice:
Diametro nominale \varnothing esterno = 101 mm;
Lunghezza utile $l = 150 \div 300$ cm.
2. corone di perforazione in widia e diamante del tipo adatto ai terreni incontrati;
3. aste di perforazione con filettatura tronco-conica:
Diametro esterno $\varnothing_{est} = 60 \div 76$ mm.

In relazione alle caratteristiche dei terreni incontrati al fine di evitare il rischio di franamenti delle pareti del foro è stato utilizzato un rivestimento provvisorio in acciaio avente le seguenti caratteristiche:

1. spessore tubo $s=10$ mm;
2. diametro interno $\phi_{int}= 127$ mm;
3. lunghezza spezzoni $l = 150 \div 200$ cm.

Fanno poi parte del corredo della sonda i seguenti strumenti:

1. scandaglio a filo graduato, per misura della quota reale di fondo foro;
2. sondina piezometrica elettrica;
3. penetrometro tascabile, fondo scala ≥ 5 kg/cm².

Il tecnico responsabile delle attività di cantiere, deve provvedere alla compilazione della scheda stratigrafica relativa a ciascun sondaggio, completandola con i seguenti elementi:

1. cantiere;
2. numero ed ubicazione del sondaggio;
3. attrezzatura impiegata;
4. utensile di perforazione;
5. diametro di perforazione;
6. diametro del rivestimento;
7. tipo di terreno;
8. consistenza;
9. litologia;
10. colore o colore prevalente;
11. eventuali note.



Figura 25: Strumentazione di indagine.

5.2.2 Sismica a rifrazione

Ad integrazione e calibrazione dei sondaggi meccanici, per una migliore definizione dei limiti stratigrafici, e per la determinazione dei parametri sismici sito specifici necessari alla progettazione dell'opera di contenimento, è stata realizzata un'indagine geofisica.

I sismogrammi sono stati acquisiti con un sismografo a risoluzione di acquisizione 16 bit (24 bit con sovra-campionamento e post processing) collegato tramite cavo a 24 geofoni verticali di tipo elettromagnetico a bobina mobile, con frequenza propria di 14.0 Hz.

Il metodo della rifrazione sismica (Figura 26) è fondato sul fenomeno del cambiamento della direzione di propagazione di un'onda sismica (sia essa di tipo P od S) quando incontra una superficie a contrasto di velocità ($v_2 > v_1$). La variazione nella direzione di propagazione è indagabile tramite la legge di Snell, nella quale viene definito come il rapporto tra il seno del raggio incidente e quello del raggio rifratto sia uguale al rapporto tra la velocità dell'onda nello strato superficiale e la velocità dell'onda nello strato profondo.

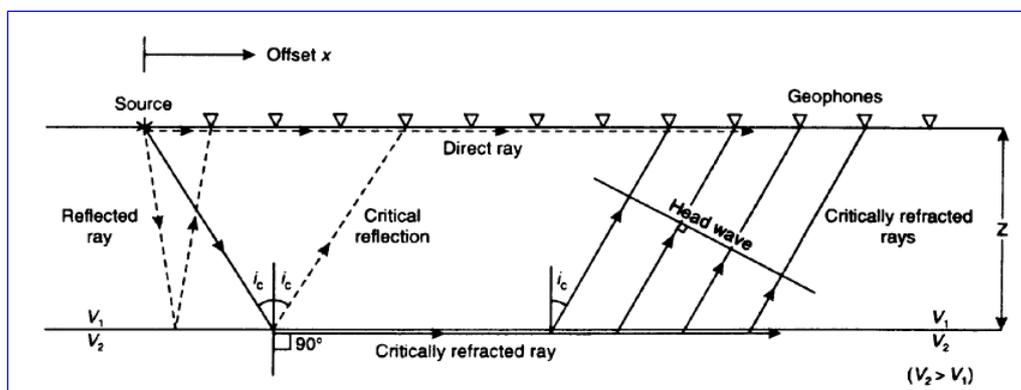


Figura 26: Schematizzazione dell'indagine sismica a rifrazione (Fonte: Reynolds, 1997).

Nell'indagine sismica a rifrazione è solitamente considerata solo l'onda P.

L'indagine consiste nel produrre una perturbazione elastica definita "shot" sulla superficie del terreno e nel registrare il tempo intercorso tra l'istante dell'energizzazione (*tempo zero*) e l'arrivo di un suo impulso rifratto dalle superfici di discontinuità presenti nel sottosuolo. L'arrivo di ogni onda è rilevato da sensori detti *geofoni*, posizionati in una configurazione lineare, lo "stendimento", e a distanze reciproche (distanza inter-geofonica) variabili in funzione dell'obiettivo e delle specifiche condizioni di sito. Il segnale di arrivo è registrato e l'output consiste di una traccia per ogni geofono.

Le registrazioni, a distanze crescenti dal punto di energizzazione, vengono quindi riportate su di un grafico tempo di arrivo/distanza, ottenendo così una retta di inclinazione variabile rispetto all'asse delle ascisse, detta *dromocrona*. Oltre la distanza definita "Distanza di crossover", i raggi rifratti, ovvero quelli che percorrono i tratti AB e CD di figura 20 a velocità v_1 e BC a velocità v_2 , precedono quelli diretti, i quali dal punto A giungono direttamente a D viaggiando nella parte alta del layer più superficiale a velocità v_1 : tale punto definisce la variazione di pendenza del grafico, definendo un ramo relativo al segnale diretto ed uno associato a quello rifratto.

È possibile calcolare le velocità dei due layers, v_1 e v_2 , dalla pendenza dei due segmenti individuati ($1/v_1$). Diventa possibile risolvere l'equazione di profondità del riflettore prolungando il segmento dei raggi rifratti sino all'asse delle ordinate e ricavando il parametro del "tempo intercetto" t_i (Reynolds, 1997).

5.2.2.1 Tomografia sismica

Nelle tecniche di indagine conosciute come "tomografie sismiche" il sottosuolo è sistematicamente indagato tramite la trasmissione di un'enorme quantità di raggi sismici. Il volume di sottosuolo indagato è diviso in elementi cubici: ad ognuno di essi è assegnata una velocità sismica in fase preliminare. Il tempo totale di viaggio di ogni raggio è il dato da cui si parte per l'interpretazione: assumendo un percorso lineare tra sorgente e ricevitore tale parametro può essere conosciuto. Viene quindi rapportata la velocità assegnata inizialmente con quella sperimentalmente individuata, e vengono apportate le opportune modifiche. Il software di elaborazione tomografica elabora un modello teorico compiendo alcune migliaia di iterazioni sulla base dei primi arrivi delle onde sismiche: l'elaborato finale fornisce la

velocità relativa a singole celle unitarie di piccole dimensioni, in maniera tale da individuare e discriminare le anomalie laterali di velocità. È dunque possibile distinguere litologie, diversi stati di fratturazione di un materiale, pressione dei pori: si possono creare correlazioni della stratigrafia con i parametri geomeccanici e realizzare ricostruzioni geomorfologiche. La tomografia è in grado di mettere in risalto anisotropie laterali non sempre individuabili direttamente dalle analisi geotecniche, le quali hanno la limitazione dell'essere puntuali (Kearey, 2002).

5.2.3 Individuazione dei parametri geotecnici del sottosuolo

I dati comparati di indagini in foro e sismiche hanno permesso la riproduzione di un modello del sottosuolo, su cui è stata poi introdotta una semplificazione per la fase di modellazione.

I parametri geotecnici da utilizzarsi per la progettazione sono stati derivati dall'analisi di indagini e prove in sito effettuate. I valori adottati come rappresentativi delle caratteristiche geotecniche dei terreni investigati sono quelli estrapolati da vari abachi di correlazione consigliati da diversi autori ed assunti in modo moderatamente cautelativo:

- per la densità relativa è stata utilizzata la formulazione di Skempton (1986), la cui validità è garantita per limi e sabbie e sabbie da fini a grossolane NC

$$D_r = 100 \sqrt{\frac{N_{60}}{32 + 0,288 \sigma'_{v0}}}$$

Con: D_r = Densità relativa

N_{60} = Numero di colpi normalizzato per rendimento alla battitura del 60%

σ'_{v0} = Sforzo verticale efficace

- per il peso dell'unità di volume secco è stato impiegato l'abaco di correlazione con la D_r di Meyerhof (1957) valida per sabbie, ghiaie, limo, limo sabbioso.
- per ricavare il valore dell'angolo di attrito Shioi - Fukui (1982), valido per sabbie - sabbie fini o limose e limi siltosi

$$\phi' = (15 N_{SPT})^{0.5} + 15$$

Con: ϕ = Angolo di attrito

$N_{SPT} = N_2 + N_3$

- infine per la stima del modulo edometrico tramite l'abaco di correlazione con N_{SPT} proposto da Begemann (1974).

5.3 Studio del bacino idrografico

Lo studio del bacino è consistito inizialmente nell'elaborazione di dati pluviometrici e climatici, per meglio definire la situazione presente al momento della movimentazione, per poi, in un secondo momento, andare ad analizzare i parametri idrologici caratteristici.

5.3.1 Situazione climatica dell'area

L'indice SPI "Standardized Precipitation Index", scelto a livello internazionale come indicatore di siccità metereologica, è stato utilizzato per un'indagine circa il regime delle precipitazioni nella zona in esame: è basato sulla precipitazione cumulata mensile (McKee et al., 1993) e quantifica un deficit o surplus di precipitazione in specifiche aree del territorio.

Vengono infatti rapportati gli apporti pluviometrici alla deviazione standard dei dati rilevati negli anni precedenti. I valori positivi indicano un surplus pluviometrico, mentre i negativi rivelano situazioni siccitose. Le scale temporali calcolate sono generalmente 1, 3, 6, 12, 24, 48 mesi, periodi che consentono la determinazione delle diverse tipologie di siccità, dalla meteorologica, all'agricola, all'idrologica.

Intervalli SPI	Condizioni di umidità
SPI >2	Umidità estrema
2 > SPI >1.5	Umidità severa
1.5 > SPI >1	Umidità moderata
1 > SPI >-1	Nella norma
-1 > SPI > -1.5	Siccità moderata
-1.5 SPI >-2	Siccità severa
SPI <-2	Siccità estrema

L'intervallo 1-3 mesi, ad esempio, indica situazioni di pericolosità per il sistema agricolo, derivante da disponibilità di acqua meteorica e nel suolo superficiale; le durate 6-12 mesi e superiori indicano disponibilità a livello di bacino idrografico (portate, livelli di falda).

In tabella 5 sono riportate le classi di umidità in base ai valori di SPI.

Tabella 5: Classificazione secondo SPI (Fonte elaborato: Consorzio Lamma, 2015).

Si è poi passati all'analisi dello specifico evento piovoso in atto al momento dell'innescò. Entro il territorio della regione Toscana sono state collocate circa 400 stazioni di rilevamento automatico degli apporti pluviometrici: tali strumentazioni fanno parte delle reti di monitoraggio gestite dal Servizio Idrologico Regionale (SIR) e dall'ex ARSIA. La zona settentrionale della Provincia di Pistoia ricade nel settore denominato "Arno Medio" (Figura 27): le stazioni prossimali all'area di frana sono quelle di Cireglio (ubicata ad W), Pracchia (N) e Baggio (E). I dati relativi alla strumentazione di Sammommè disponibili solo da 2015, pertanto, anche se più vicina all'area di interesse rispetto a Pracchia, è inutilizzabile ai fini dell'analisi.

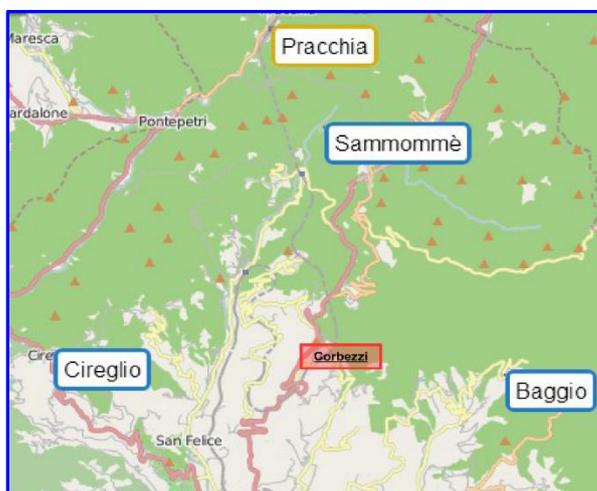


Figura 27: Ubicazione delle stazioni pluviometriche analizzate e ubicazione della frazione di Corbezzoli (Fonte: SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2015).

5.3.2 Individuazione delle caratteristiche idrologiche del bacino scolante

Tramite lo studio dei dati pluviometrici provenienti dal Servizio Idrologico Regionale viene analizzato l'evento piovoso verificatosi a inizio Gennaio 2014: questa analisi ha lo scopo di verifica delle ipotesi circa le cause della movimentazione.

La determinazione delle caratteristiche che devono avere i sistemi idraulici al fine di costituire degli efficaci collettori delle acque di ruscellamento necessita innanzitutto della definizione dei parametri idrologici del bacino idraulico.

La previsione quantitativa dell'intensità delle precipitazioni in un punto del bacino è effettuata attraverso la determinazione della curva di probabilità pluviometrica, cioè della relazione che lega l'altezza di precipitazione alla sua durata, per un assegnato tempo di ritorno.

La curva di probabilità pluviometrica è comunemente espressa da una legge di potenza del tipo:

$$h(t) = a \times t^n$$

Con: h = altezza di precipitazione [mm]

t = durata della precipitazione [h]

a e n = parametri caratteristici per il tempo di ritorno considerati.

Con il termine altezza di precipitazione in un punto, comunemente misurata in mm, si intende l'altezza d'acqua che si formerebbe al suolo su una superficie orizzontale e impermeabile, in un certo intervallo di tempo (durata della precipitazione) e in assenza di perdite (Martina, 2008a; Caporali, 2012).

La stima del valore della portata di progetto, al fine del dimensionamento delle opere idrauliche da realizzarsi, è stata effettuata mediante l'applicazione di un modello tipo afflussi-deflussi. In particolare è stata presupposta una relazione lineare tra input (ossia le precipitazioni) ed output (la portata): tale approccio è definito appunto "Modello lineare". È stato qui utilizzato il metodo "Cinematico" o "della Corrivazione", metodo più frequentemente utilizzato per la stima della portata di colmo. Tale modello si basa sulle seguenti ipotesi:

1. esiste ed è unico il percorso che l'acqua percorre e che congiunge un punto qualsiasi del bacino alla sezione di chiusura;
2. la formazione della piena è dovuta esclusivamente ad un fenomeno di trasferimento (senza invasi) di massa liquida;
3. ogni goccia di pioggia si muove sulla superficie del bacino seguendo un percorso immutabile, che dipende soltanto dalla posizione in cui è caduta;
4. la velocità di ogni goccia non è influenzata dalla presenza delle altre gocce;
5. la portata alla sezione di chiusura si ottiene sommando tra loro le portate elementari, provenienti dalle singole aree del bacino che si presentano allo stesso istante nella sezione di chiusura.

Il fatto che il sistema idrologico sia definito lineare e invariante nel tempo significa che l'idrogramma, per assegnata precipitazione, dipende da caratteristiche supposte stazionarie e indipendenti dall'evento considerato. In particolare la velocità di percorrenza $v(x)$ non dipende né dall'intensità di pioggia né dallo stato di saturazione del bacino: essa è quindi una costante nel tempo del percorso.

Il cinematico è un modello "Concettuale", cioè che schematizza i processi fisici che avvengono nel bacino. In questo caso si presuppone l'esistenza di "canali lineari": ognuno di questi canali collega un'area infinitesima del bacino con la sezione di chiusura e trasferisce le gocce d'acqua che cadono in quell'area sino alla sezione terminale, sempre con lo stesso ritardo, pari al tempo di corrivazione della stessa area.

Il tempo di corrivazione caratteristico del bacino (t_c) è definito come il tempo necessario perché una particella d'acqua caduta nel punto idraulicamente più lontano raggiunga la sezione di chiusura per deflusso superficiale, tempo quindi che è costante, poiché la velocità non varia (Lisjak, 2007; Deidda, 2012).

La formula più utilizzata per la stima di t_c è quella di Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5 L}{0,8 \sqrt{H_m}}$$

Con: t_c = Tempo di corrivazione (h)
 A = Area bacino (km^2)
 L = Lunghezza dell'asta principale (km)
 H_m = Altitudine media del bacino (m)

Affinché un sistema possa effettivamente essere considerato tramite caratteristiche di linearità è necessario escludere dal modello la frazione di precipitazione che va ad infiltrarsi nel sottosuolo: questo implica che il sistema presenta esclusivamente terreni a proprietà impermeabili.

In alternativa, andando a sottrarre all'idrogramma ed allo ietogramma del bacino la parte caratterizzata da relazioni di non-linearità (ad esempio il deflusso ipodermico), è possibile comunque l'utilizzo del modello lineare. Le parti quindi utili sono l'aliquota di precipitazione netta e il deflusso superficiale (Aronica, 2015; Martina, 2008b).

La determinazione della quantità di pioggia netta viene effettuata sottraendo gli effetti di infiltrazione e detenzione superficiale: è definito il coefficiente di afflusso ϕ come il rapporto tra il volume che defluisce alla sezione di chiusura e quello caduto entro il bacino. Il valore è pari a circa 0,1 per bacini con caratteristiche di permeabilità elevata (rocce carbonatiche) mentre risulta 0,8 per bacini significativamente impermeabili. Nel caso in esame viene assunto pari a 0,6 (Deidda, 2012).

La portata massima di progetto, mediante il metodo della corrivazione, si determina con la seguente relazione:

$$Q_{max} = k \times C \times A \times a \times t_c^{n-1}$$

Con: Q_{max} = portata massima attesa [m^3/s];
 C = coefficiente di afflusso;
 A = area del bacino [ha];
 a, n = coefficienti della curva di probabilità pluviometrica;
 t_c = tempo di corrivazione [h].
 k = fattore di conversione pari a 0.002778

Ovvero la portata massima, o di colmo, si ha per un tempo pari a quello di corrivazione, poiché tutta l'area del bacino contribuisce al deflusso tramite il coefficiente di afflusso (Lisjak, 2007; Deidda, 2012).

5.4 Analisi degli interventi di stabilizzazione eseguiti

Sono state analizzate le tipologie di interventi effettuati, che verranno poi introdotti nella modellazione di versante, di modo da verificarne il ruolo rispetto alla stabilità del versante.

5.4.1 Il dimensionamento del sistema drenante

La sistemazione idraulica prevede due tipologie di sezioni idrauliche: una sezione rettangolare in calcestruzzo ed una sezione trapezia, entrambe rivestite in pietrame.

È stato possibile ricavare il valore della velocità in condizioni di moto uniforme, relativamente alle varie altezze idrometriche, tramite l'espressione di Chezy:

$$v = K_s \times R^{2/3} \times \sqrt{i}$$

Dove: v = velocità di transito nel condotto [m/s]

K_s = coefficiente di scabrezza di Gauckler-Strickler, dipendente dalla natura del materiale che costituisce l'alveo [m^{1/3}/s]

R = raggio idraulico, definito come rapporto tra l'area bagnata ed il perimetro bagnato [m]

i = pendenza del fondo del condotto

La scabrezza K_s è un parametro tanto maggiore quanto più liscia è la superficie del fondo del canale in esame: è stata assunta pari a 70 m^{1/3}/s per le canalette in calcestruzzo e pari a 50 m^{1/3}/s per le sezioni trapezie rivestite in pietrame (Toraldò, 2015).

La verifica della capacità delle sezioni idrauliche di contenere la portata di progetto calcolata per il bacino, è calcolata tramite la seguente formulazione:

$$Q_{\max} = A \times v$$

Dove: Q_{\max} = portata massima che può transitare nel condotto [m³/s]

v = velocità di transito nel condotto [m/s]

A = area bagnata del condotto misurata ai vari livelli idrometrici [m²]

Per il calcolo delle due tipologie di canalette (trapezia e rettangolare) vengono ipotizzati alcuni parametri geometrici delle sezioni e realizzato il calcolo utilizzando diverse altezze di prova della lama d'acqua, lasciando come incognita l'altezza della sezione.

Sono state scelte per la canaletta rettangolare in calcestruzzo una larghezza di 0.85 m ed una pendenza del fondo minima del 5%.

Per quanto riguarda la sezione trapezia sono stati inseriti come parametri di calcolo una larghezza alla base di 1.5 m, pendenza delle sponde di 45°, altezza di circa 1 m e pendenza minima del 5%.

5.5 Verifiche di stabilità

5.5.1 L'analisi di Stabilità all'Equilibrio Limite Globale

La metodologia di studio dell'analisi di stabilità dei pendii più utilizzata è senza dubbio quella che si basa sul Metodo Generale dell'Equilibrio Limite Globale: il GLE è un approccio di analisi che vuole individuare la stabilità del versante rispetto allo scorrimento, problematica con cui più frequentemente ci si confronta nella professione.

Il processo deve avere i seguenti presupposti:

1. la rottura del versante avviene per scorrimento lungo una superficie ben definita;
2. la massa in frana è perfettamente rigida (non vengono considerate possibili deformazioni o rotture entro la massa in frana);
3. le condizioni di stabilità sono espresse dal rapporto tra lo sforzo resistente e quello agente sulla superficie di scorrimento, è considerato quindi solo l'equilibrio statico del materiale.

Dal punto 2 consegue che:

- a) la resistenza mobilitata lungo la superficie di scorrimento in condizioni di equilibrio limite è costante nel tempo, indipendente dalle deformazioni e quindi dai movimenti della frana, e ovunque pari alla resistenza al taglio;

- b) non è possibile determinare né le deformazioni precedenti la rottura, né l'entità dei movimenti del blocco in frana, né la velocità del fenomeno.

Inoltre la maggior parte dei metodi di verifica della stabilità dei pendii considerano il problema piano, bidimensionale (cioè ipotizzano che la superficie di scorrimento sia di forma cilindrica con direttrici ortogonali al piano considerato), tramite l'analisi di una o più sezioni longitudinali al versante, trascurando così gli effetti tridimensionali.

Occorre poi distinguere i pendii naturali da quelli artificiali: vi è infatti molta differenza riguardo la conoscenza dei parametri fisico-meccanici dei terreni e sulla geometria dell'ipotetica superficie di scorrimento nei due casi. Ciò può comportare l'utilizzo di metodi analitici differenti.

Nei versanti artificiali (ad esempio i fianchi dei rilevati stradali e ferroviari, di argini o dighe in terra) la geometria è semplice e nota, le caratteristiche meccaniche dei terreni che li compongono sono note ed omogenee, poiché corrispondenti alle specifiche di capitolato. Il problema piano è pertanto aderente alla realtà fisica, poiché si tratta di opere con una dimensione longitudinale di gran lunga prevalente rispetto alle trasversali. Le condizioni di carico possono variare rapidamente nel tempo, ad esempio per gli argini al variare del livello del fiume, o per le dighe al variare del livello di invaso.

I versanti naturali, invece, sono di norma caratterizzati da una grande variabilità spaziale delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni, e solitamente da una variazione delle condizioni di carico meno rapida (salvo per le azioni sismiche).

Nel caso degli scavi, infine, la geometria superficiale è nota, ma il terreno di cui è costituito il pendio è naturale, e quindi può essere caratterizzato anche da forte variabilità spaziale. Le condizioni di carico, inoltre, possono variare sensibilmente nel tempo, in base ai tempi e ai modi di realizzazione dello scavo.

In versante soggetto a potenziale franamento viene suddiviso, lungo il profilo longitudinale, in elementi denominati "conci", delimitati da due superfici verticali e da un piano di base appartenente alla potenziale superficie di scorrimento. In figura 28 è mostrata la nomenclatura di riferimento delle forze agenti sul concio di materiale, nella quale:

W = peso totale del concio

N = forza normale agente alla base del concio

S_m = forza di taglio mobilizzata alla base del concio

E = forza interconcio normale orizzontale (E_L sinistra E_R destra)

X = forza interconcio di taglio verticale (X_L sinistra X_R destra)

R = raggio di rotazione per una superficie di scorrimento circolare o braccio associato alla forza S_m per una superficie di scorrimento di forma qualunque

f = braccio della forza normale rispetto al centro di rotazione

x = braccio della forza peso rispetto al centro di rotazione

h = altezza del concio

β = lunghezza della base del concio

b = larghezza del concio

α = inclinazione della base del concio

h_n = punto di applicazione della forza normale sul concio

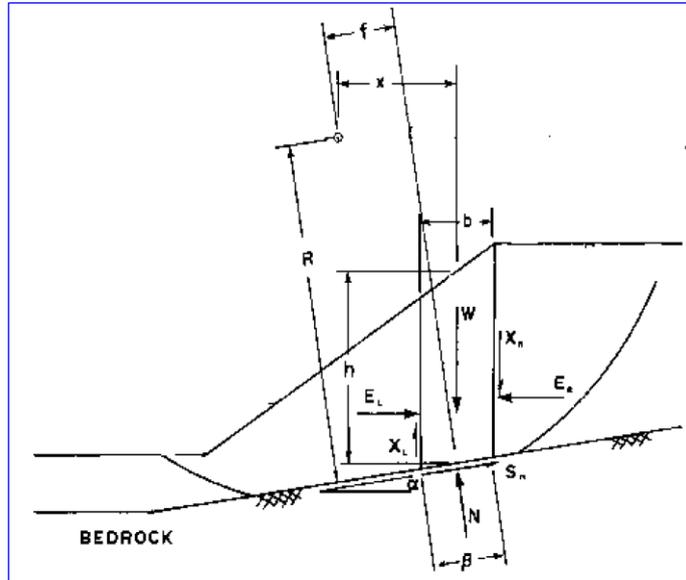


Figura 28: Variabili in gioco nell'analisi GLE (Fonte: Berti, 2009).

Quando si effettua un'analisi di stabilità si vuole arrivare all'individuazione di un fattore o coefficiente di sicurezza F_s .

Il suo valore è dato dal rapporto:

$$\frac{\tau_R}{\tau_m} = \frac{\text{resistenza al taglio}}{\text{sforzo di taglio agente}}$$

Il fattore di sicurezza del versante è quello corrispondente alla superficie di scorrimento più critica che viene individuato tra le varie superfici di prova simulate.

In condizione di equilibrio è possibile utilizzare le equazioni della statica. Ciò significa che:

- la sommatoria delle forze verticali = 0
- la sommatoria delle forze orizzontali = 0
- la sommatoria dei momenti = 0

In situazione di non equilibrio, considerando n conchi, abbiamo quindi la necessità di risolvere le $3n$ equazioni di equilibrio e l'equazione del fattore di sicurezza F , per un totale di $4n$ equazioni. Ciò implica che F sia uguale in tutti i conchi. Nella realtà questo non è di norma verificato (ad esempio per i fenomeni di rottura progressiva) ma la pratica ha dimostrato che tale assunzione è generalmente accettabile.

Le incognite sono invece quelle riportate in Tabella 6.

n	forza normale N
n	punto di applicazione di N (da cui dipende f)
n	forza di taglio S_m
$n-1$	forza di taglio interconco X . Nota che $X_R^i = X_L^{i+1}$ per il principio di azione-reazione, ed inoltre le forze interconco esterne per il primo ed ultimo conco sono pari a zero (Fig.4.2).
$n-1$	forza normale interconco E . Vale lo stesso discorso fatto per le X
$n-1$	punto di applicazione delle forze interconco
1	Fattore di sicurezza F

Tabella 6: Incognite nell'elaborazione del GLE (Fonte Berti, 2011).

Il totale è di $6n-2$ incognite, ovvero si raggiunge la condizione un sistema indeterminato: vi è la necessità di assunzioni preliminari per il raggiungimento di un risultato determinato. In primo luogo si procede con il posizionamento del punto di applicazione della forza normale h_n al centro del concio: il problema rimane però indeterminato ($5n-2$ incognite, $4n$ equazioni), per cui diversi autori hanno proposto differenti assunzioni per rendere il problema determinato

Viene quindi fatta un'altra assunzione, ipotizzando che la componente di taglio della forza interconco X sia dipendente dalla componente normale E . Viene definita l'equazione:

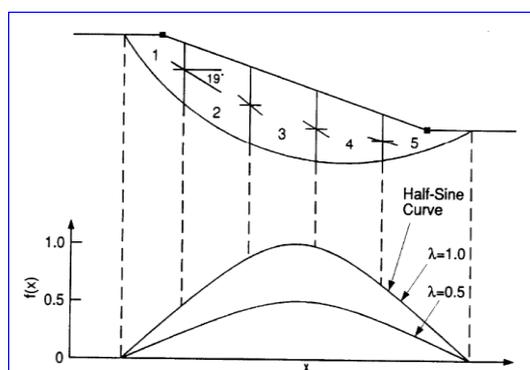
$$X = E \times \lambda \times f(x)$$

Con: x = Centro della larghezza del concio misurato lungo la superficie di scorrimento

$f(x)$ = Funzione delle forze interconco, che rappresenta la direzione relativa della risultante delle forze interconco

λ = Percentuale (in forma decimale) della funzione delle forze interconco utilizzata

La funzione delle forze interconco approssima la forma della superficie di scorrimento della frana: per una superficie circolare sarà quindi più appropriata una funzione mezzo-seno, una superficie planare sarà invece meglio approssimata da una funzione costante.



Il calcolo della componente di taglio della forza interconco viene operato come da figura 29: considerando ad esempio la forza normale E tra i conci 1 e 2 uguale a 100 kN, ed assumendo un funzione di forze interconco $f(x)$ a mezzo-seno con un valore $\lambda = 0.5$, il valore di $f(x)$ tra i due conci è 0.45.

La forza di taglio interconco è quindi:

$$X = E \times \lambda \times f(x) = 100 \times 0.5 \times 0.45 = 22.5 \text{ KN}$$

Figura 29: Esempio di calcolo della componente X (Fonte: Berti, 2011).

Nel corso degli anni sono stati proposti diversi metodi risolutivi, che si differenziano nei seguenti termini:

- diverse funzioni di forza interconco considerate;
- diversi valori λ considerati;
- diverse le equazioni di equilibrio statico del concio considerate.

I principali di questi approcci sono mostrati in Tabella 7:

Metodo	Fattore di sicurezza considerato	λ	$f(x)$	X	Note	Superficie di scorrimento
Fellenius	F_m	$\tan \alpha$	1	$X = E \tan \alpha$	Risultante delle forze interconco parallela alla base del concio	circolare $f = 0$
Bishop semplificato	F_m	0		$X = 0$	Risultante delle forze interconco orizzontale	circolare $f = 0$
Janbu semplificato	F_f	0		$X = 0$	Risultante delle forze interconco orizzontale	non circolare
Morgenstern - Price	$F_m - F_f$	incognita	variabile	$X = E \lambda f(x)$	Risultante delle forze interconco variabile	non circolare

Tabella 7: Metodi di risoluzione dell'Equilibrio Limite Globale più utilizzati (Fonte: Berti, 2011).

Il grafico in figura 30 mostra un confronto tra alcuni dei metodi illustrati in Tabella 7: sono indicati i risultati derivanti dall'analisi tramite Bishop, Janbu e Morgenstern-Price su di un generico grafico di correlazione F_t / λ ed F_m / λ . Per diversi valori di λ viene evidenziata la variazione del fattore di sicurezza, calcolato sui momenti e sulle forze.

L'andamento del fattore di sicurezza F rispetto al parametro λ , parametro che definisce il rapporto tra le componenti normali e di taglio della forza interconco, mostra come i metodi basati sul calcolo del fattore di sicurezza dei momenti risultino meno sensibili al variare di λ , e quindi rispetto alle assunzioni sulle forze di taglio interconco. Le differenze tra Bishop semplificato e Morgenstern-Price sono minori di quelle tra Janbu semplificato e Morgenstern-Price, solo 0.4%. Ne consegue che i metodi basati sul solo equilibrio dei momenti (come ad esempio Bishop) sono più accurati rispetto a quelli basati sul solo equilibrio delle forze (Janbu).

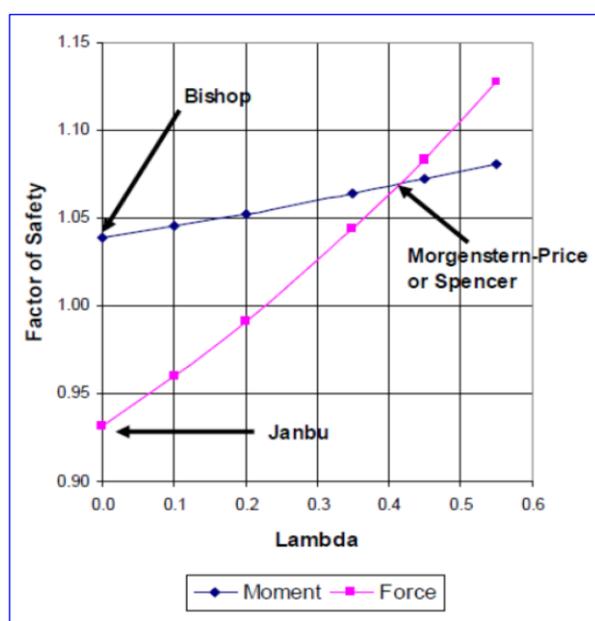


Figura 30: Soluzioni di letteratura riportate nel grafico $F - \lambda$ (Fonte Berti, 2011).

Dati sperimentali (Fredlund & Krahn, 1977) hanno dimostrato poi che l'influenza della funzione $f(x)$ sul fattore di sicurezza in analisi come quella di Morgenstern-Price è solo marginale. Inoltre i metodi che soddisfano sia l'equilibrio delle forze sia quello dei momenti sono meno sensibili degli altri nei confronti della posizione del centro dei momenti, che viene arbitrariamente posizionato al di sopra del versante nel caso di superfici di scorrimento non circolari.

Si può concludere che:

1. I metodi che soddisfano sia l'equilibrio delle forze sia quello dei momenti (Janbu rigoroso, Spencer, Morgenstern & Price) forniscono risultati accurati (5%) per l'analisi dei versanti;
2. Il metodo di Bishop, che soddisfa il solo equilibrio dei momenti, fornisce risultati accurati ad eccezione del caso in cui la superficie di scorrimento sia fortemente inclinata al piede;
3. I metodi che non soddisfano tutte le condizioni di equilibrio (metodo ordinario dei conchi, metodi basati sul solo equilibrio delle forze) possono fornire risultati inesatti;
4. Nei casi in cui la superficie di scorrimento sia fortemente inclinata al piede si deve utilizzare un metodo che prenda in considerazione la distribuzione delle forze interconco come Morgenstern & Price (Berti, 1999; Berti, 2011).

5.5.2 La normativa vigente sul trattamento dei parametri geotecnici

Le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008 (NTC08) definiscono i principi per il progetto, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, nei riguardi delle prestazioni richieste in termini di requisiti essenziali di resistenza meccanica, stabilità e di durabilità.

Esse forniscono quindi i criteri generali di sicurezza, precisano le azioni che devono essere utilizzate nel progetto, definiscono le caratteristiche dei materiali e dei prodotti e, più in generale, trattano gli aspetti attinenti la sicurezza strutturale delle opere.

In particolar modo la normativa impone la valutazione di sicurezza e le prestazioni di un'opera (o di una parte di essa) in relazione agli stati limite che si possono verificare durante la vita nominale. Lo stato limite viene definito come la condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze per le quali è stata progettata.

In particolare, le opere e le varie tipologie strutturali devono possedere i seguenti requisiti:

- *sicurezza nei confronti di stati limite ultimi (SLU)*: capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e dissesti gravi, totali o parziali, che possano compromettere l'incolumità delle persone, ovvero comportare la perdita di beni, ovvero provocare gravi danni ambientali e sociali, ovvero mettere fuori servizio l'opera;
- *sicurezza nei confronti di stati limite di esercizio (SLE)*: capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio;
- *robustezza nei confronti di azioni eccezionali*: capacità di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità delle cause innescanti quali incendio, esplosioni, urti.

Il superamento di uno stato limite ultimo ha carattere irreversibile e si definisce "collasso", mentre il superamento di uno stato limite di esercizio può avere carattere reversibile o irreversibile.

La normativa adotta il metodo semiprobabilistico agli stati limite, tramite il quale vengono introdotte incertezze sui valori di calcolo, applicando dei coefficienti parziali di sicurezza γ che operano su azioni e resistenze.

La resistenza di progetto f_d viene rapportata al valore di progetto E_d delle azioni. Le azioni, definite al valore caratteristico F_k , sono moltiplicate per un coefficiente γ_F ottenendo il termine di progetto F_d : in questo modo le azioni di progetto impiegate nel calcolo hanno un'intensità maggiore, con lo scopo di incrementare il livello di sicurezza. Per lo stesso principio le resistenze caratteristiche vengono diminuite di un termine γ_M , per ottenerne il termine f_d .

Le azioni vengono poi espresse in termini di prestazioni attese E_d (derivanti da analisi strutturali), mentre le resistenze in capacità di prestazione R_d : la verifica di sicurezza si basa sul principio per cui

$$R_d \geq E_d$$

La verifica della suddetta condizione è effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A1 e A2), per i parametri geotecnici (M1 e M2) e per le resistenze (R1, R2 e R3):

- lo stato limite di equilibrio, EQU, considera la struttura, il terreno o l'insieme terreno-struttura come corpo rigido.
- lo stato limite di resistenza della struttura, STR, riguarda gli elementi di fondazione e di sostegno del terreno. Si utilizza per tutti i dimensionamenti strutturali.
- lo stato limite di resistenza del terreno, GEO, si utilizza per il dimensionamento geotecnico delle opere di fondazione e di sostegno e per tutte le strutture che interagiscono col terreno, ma anche per le verifiche di stabilità globale terreno-struttura.

Nelle verifiche nei confronti degli stati limite ultimi strutturali (STR) e geotecnici (GEO) si possono adottare due differenti approcci progettuali. Nell'Approccio 1 (DA1) vengono utilizzate due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali:

- 1) la "Combinazione 1" è definita come A1+M1+R1, ovvero vengono impiegati per le azioni i coefficienti γ_F riportati nella colonna A1 (STR) della tabella "6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni" (Figura 31) della normativa, per i materiali geotecnici i coefficienti γ_M di colonna M1 della tabella "6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno" (Figura 32), mentre per le resistenze sono da applicare i γ_R definiti dalla normativa a seconda della tipologia di opera da realizzarsi;
- 2) nella "Combinazione 2", si impiegano i coefficienti definiti dalla dicitura A2+M2+R2, ovvero vengono impiegati per le azioni i coefficienti γ_F riportati nella colonna A2 (GEO) della tabella "6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni" della normativa, per i materiali geotecnici i coefficienti γ_M di colonna M2 della tabella "6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno", mentre per le resistenze sono da applicare i γ_R specifici per la tipologia di opera da realizzarsi.

Nell'Approccio 2 è utilizzata invece un'unica combinazione dei gruppi di coefficienti parziali A1+M1+R3: per le azioni si impiegano i coefficienti γ_F riportati nella colonna A1 tabella 6.2.I, i γ_M per i parametri geotecnici sono riportati sempre in tabella 6.2.II e i coefficienti γ_R che operano direttamente sulla resistenza globale di opere e sistemi geotecnici sono definiti specificatamente per ogni opera.

Nel primo approccio progettuale (Approccio 1) la prima combinazione è generalmente più severa nei confronti del dimensionamento strutturale delle opere a contatto con il terreno, mentre la seconda combinazione è generalmente più severa nei riguardi del dimensionamento geotecnico. Nel secondo approccio progettuale (Approccio 2) è prevista l'unica combinazione di gruppi di coefficienti è da adottare sia nelle verifiche strutturali sia nelle verifiche geotecniche.

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali ⁽¹⁾	Favorevole	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	γ_{Gi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

Figura 31: Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Fonte: NTC, 2008).

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	γ_ϕ	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	γ_c	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ	γ_γ	1,0	1,0

Figura 32: Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Fonte: NTC, 2008).

Nel capitolo 6 delle NTC08, viene approfondito il tema della progettazione geotecnica: in particolar modo nel paragrafo 6.4.3 è regolamentata la verifica agli SLU delle fondazioni su

pali. Gli stati limite ultimi delle fondazioni su pali si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che compongono la fondazione stessa.

Nel caso di fondazioni posizionate su o in prossimità di pendii naturali o artificiali deve essere effettuata la verifica con riferimento alle condizioni di stabilità globale del pendio includendo nelle verifiche le azioni trasmesse dalle fondazioni.

Le verifiche delle fondazioni su pali devono essere effettuate con riferimento almeno ai seguenti stati limite, quando pertinenti:

- *SLU di tipo geotecnico (GEO)*
 - collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi assiali;
 - collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi trasversali;
 - collasso per carico limite di sfilamento nei riguardi dei carichi assiali di trazione;
 - stabilità globale;
- *SLU di tipo strutturale (STR)*
 - raggiungimento della resistenza dei pali;
 - raggiungimento della resistenza della struttura di collegamento dei pali.

La verifica di stabilità globale deve essere effettuata secondo l'Approccio 1, Combinazione 2 (A2+M2+R2), tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I e 6.2.II per le azioni e i parametri geotecnici, e nella Tabella 6.8.I (Figura 33) per le resistenze globali (NTC, 2008).

Tabella 6.8.I – Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo.

Coefficiente	R2
γ_R	1.1

Figura 33: Coefficienti parziali per le resistenze (Fonte: NTC, 2008).

5.5.3 Programma di analisi Slide-Rocscience

Le analisi di stabilità (e la definizione dei corrispondenti coefficienti di sicurezza) sono state eseguite mediante il programma di calcolo bidimensionale *Slide 5.014*[®] redatto da *Rocscience Inc.*, Toronto-Ontario.

In particolare la suddetta versione permette l'analisi di superfici di scorrimento circolari o non, considerando terreni variamente stratificati e quindi innumerevoli tipologie di materiali; l'analisi è effettuata in presenza di falda idrica, pressioni interstiziali, sollecitazioni sismiche per via statica equivalente. È possibile inoltre l'inserimento di elementi di "carico" distribuiti, lineari o sismici.

Un'importante caratteristica del programma è la possibilità di inserimento di meccanismi di supporto: ancoraggi tirantati, geotessili, chiodature, micropali.

Il programma è in grado di fornire una soluzione generale al problema bidimensionale di stabilità del versante ricavando il coefficiente di sicurezza F_s .

Le verifiche di stabilità sono effettuate fornendo il coefficiente di sicurezza secondo diversi possibili criteri, di cui i più utilizzati Morgenstern & Price, Spencer, Bishop, Janbu: per le finalità di questo studio, si è utilizzato il criterio di Morgenstern & Price, con il quale il coefficiente di sicurezza viene ricercato soddisfacendo la condizione di equilibrio delle forze e dei momenti da superfici di scorrimento a direttrice circolare. Il criterio di rottura del terreno considerato è quello di Mohr-Coulomb.

I profili del versante, i perimetri delle stratificazioni, e successivamente di muro e materiale riportato, sono stati eseguiti in primo luogo su *AUTO-Cad*, e successivamente importati in *Slide* tramite il formato .dxf.

5.6 *L'analisi paesaggistica*

La relazione paesaggistica è un documento contenente tutti gli elementi necessari alla verifica della compatibilità paesaggistica dell'intervento che si vuole realizzare: deve tener conto delle indicazioni della normativa paesaggistica vigente in quel territorio, e avere specifico riferimento ai suoi valori paesaggistici. Deve inoltre avere specifica autonomia di indagine ed essere corredata da elaborati tecnici atti a motivare ed evidenziare la qualità dell'intervento da effettuare.

La relazione dovrà dar conto sia dello stato dei luoghi (contesto paesaggistico ed area di intervento) prima dell'esecuzione delle opere previste, sia delle caratteristiche progettuali di intervento, oltre a dover indicare in modo chiaro e quanto più dettagliato possibile lo stato dei luoghi dopo l'intervento.

Il principio fondamentale su cui si basa prevede un'accurata analisi non in termini architettonici o ambientali, bensì di paesaggio, che è tutto ciò che ci circonda.

Gli elementi di valutazione e compatibilità paesaggistica si basano su di una fase di simulazione dettagliata dello stato dei luoghi a seguito della realizzazione del progetto, attuabile tramite fotomodellazione realistica (rendering computerizzato o manuale) comprendente un adeguato intorno dell'area di intervento. La finalità è quindi mostrare gli effetti dell'inserimento nel contesto paesaggistico e dell'adeguatezza delle soluzioni, attraverso la specifica di materiali, colori e del suo involucro: infatti se l'opera da realizzarsi, o alcuni dei suoi elementi, entra in contrasto con il contesto paesaggistico, è necessario attuare misure di mitigazione e compensazione. Lo scopo fondamentale è quindi operare un miglioramento della qualità paesaggistica complessiva dei luoghi, o, quanto meno, impedire una diminuzione dell'impatto visivo.

Tali opere potranno essere realizzate sia immediate che in una fase successiva e potranno essere caratterizzate da un diverso grado nel contrastare gli effetti negativi dell'intervento: annullamento, riduzione o riqualificazione (D.P.C.M., 2005).

All'adempimento di tali obiettivi sono state acquisite le fotografie riguardanti la situazione del sito il giorno seguente l'evento, e scattate delle immagini che rappresentassero in modo significativo le peculiarità della zona: il risultato è stato quello di restituire un'immediata raffigurazione della situazione che si era creata a causa del dissesto. Sono state poi annotate, durante il rilevamento, le principali essenze presenti in sito, allo scopo di indicare le specie più idonee alle piantumazioni per il rinverdimento.

Per rendere più facile la visione di quello che sarà invece il sito ad opera ultimata sono state create delle simulazioni fotorealistiche utilizzando fotografie dei giorni successivi l'evento. Vengono infine riassunti gli interventi di mitigazione paesaggistica proposti.

6 RISULTATI DEL RILEVAMENTO GEOLOGICO E DELLA CAMPAGNA DI INDAGINI SITOSPECIFICHE

Vengono di seguito riportati i risultati derivati per il rilevamento e le varie tipologie di indagine in sito realizzate a fine progettuale.

6.1 *Risultati del rilievo geologico*

Tramite il rilevamento effettuato nel bacino idrografico del rio che ha determinato l'innescò dell'evento franoso si è voluto approfondire gli argomenti precedentemente trattati nel capitolo di inquadramento geologico sull'area in esame. La cartografia derivata dal rilevamento geologico (realizzata in Q-Gis su CTR in scala 1:2.000) è riportata in figura 34, mentre quella descrittiva degli elementi geomorfologici in figura 38.

6.1.1 *Geologia*

Il rilevamento geologico sugli affioramenti presenti nell'area in esame ha permesso di confermare la presenza di un'unica tipologia litologica, riconducibile a depositi flyshoidi. Gli affioramenti sono stati individuati essenzialmente lungo il taglio stradale e nella porzione più meridionale del bacino idrografico, ovvero nel bosco in cui transita il tratto terminale del rio in esame.

Il membro prevalente di questa formazione torbiditica è quello a componente siltitica dominante. Lo spessore degli strati di questi litotipi è generalmente compreso tra dimensioni sottili (3-10 cm) e medie (10-30 cm) come visibile nell'affioramento di Figura 35, ubicato in prossimità di Casciano, fatta eccezione per gli strati individuati in Via di Casciano, che arrivano ad essere anche spessi 30-100 cm o addirittura molto spessi, ovvero con dimensioni superiori al metro (Figura 36).

Risultano invece da sottili (3-10 cm) a molto sottili (< 3 cm) gli intervalli pelitici.

Gli strati siltitici possono presentare la tipica rottura "a dente di sega".

Gli strati di silt risultano avere una colorazione marrone-grigiastra all'alterazione, grigio o grigio-nerastra al taglio, mentre quelli pelitici grigio chiaro-biancastre, in condizione di alterazione, sino a grigio scuri al taglio.

Le superfici della stratificazione sono piano-parallele, mentre strutture presenti sono le laminazioni, che testimoniano la variazione di velocità della corrente trattiva durante la deposizione, fenomeno che porta ad una selezione dei granuli in relazione alla loro dimensione, densità e forma (Zuffa, 2011).

Il rapporto A/P varia tra $\cong 1$ e > 1 .

La stratificazione, risultando a reggipoggio o traverpoggio, definisce per il versante buone condizioni di stabilità.

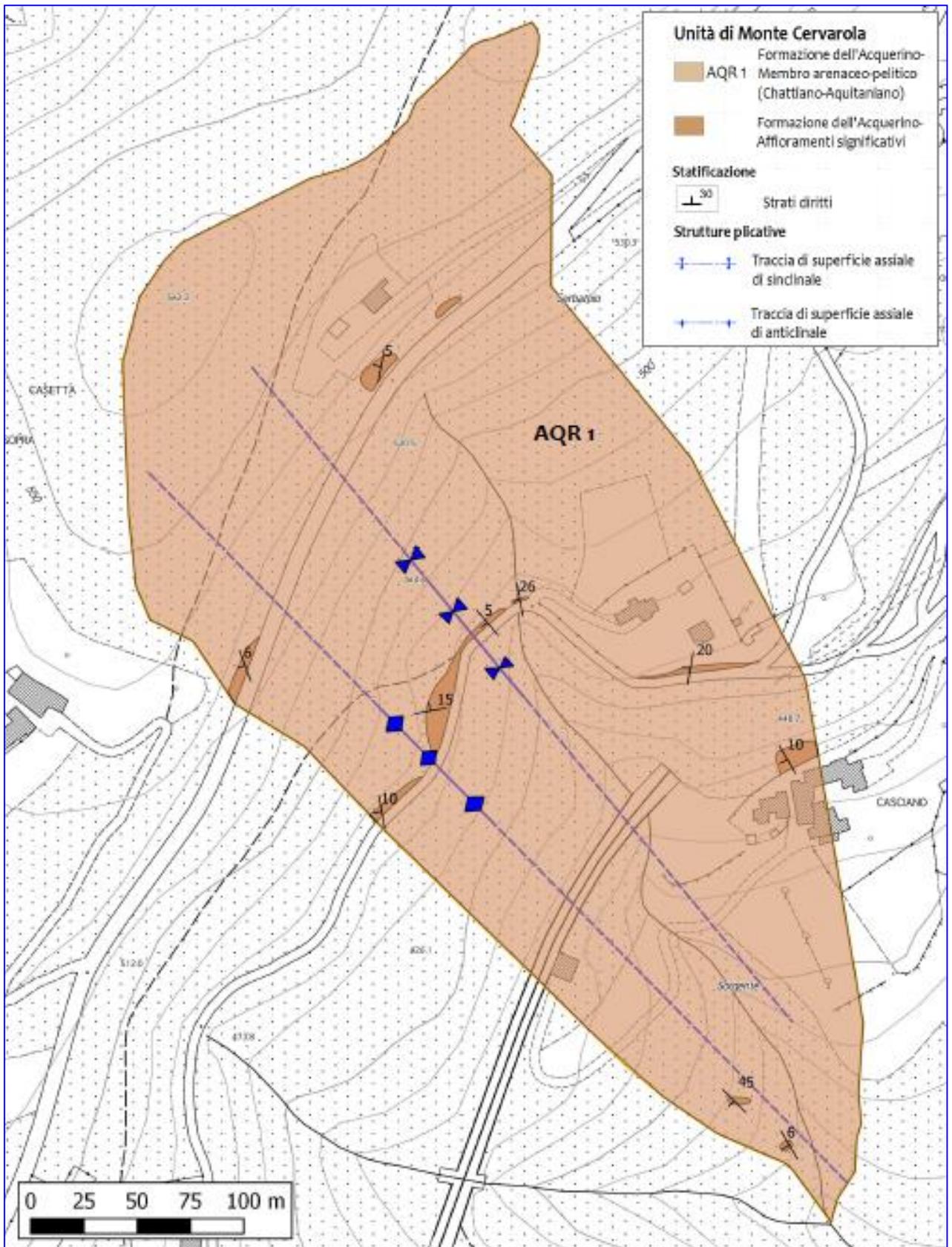


Figura 34: Cartografia geologica realizzata a seguito del rilevamento in scala 1:2.000.



Figura 35: Affioramento presso l'abitato di Casciano.



Figura 36: Affioramento lungo Via di Casciano.

Lo studio dei campioni prelevati in sito, effettuato tramite una normale lente 10x consente di identificare, per quanto riguarda la roccia siltitica, la presenza di miche e di una componente marnosa più o meno abbondante (Figura 37). Anche le peliti includono una componente marnosa.



Figura 37: Campioni dei livelli a siltite.

6.1.2 Morfologia

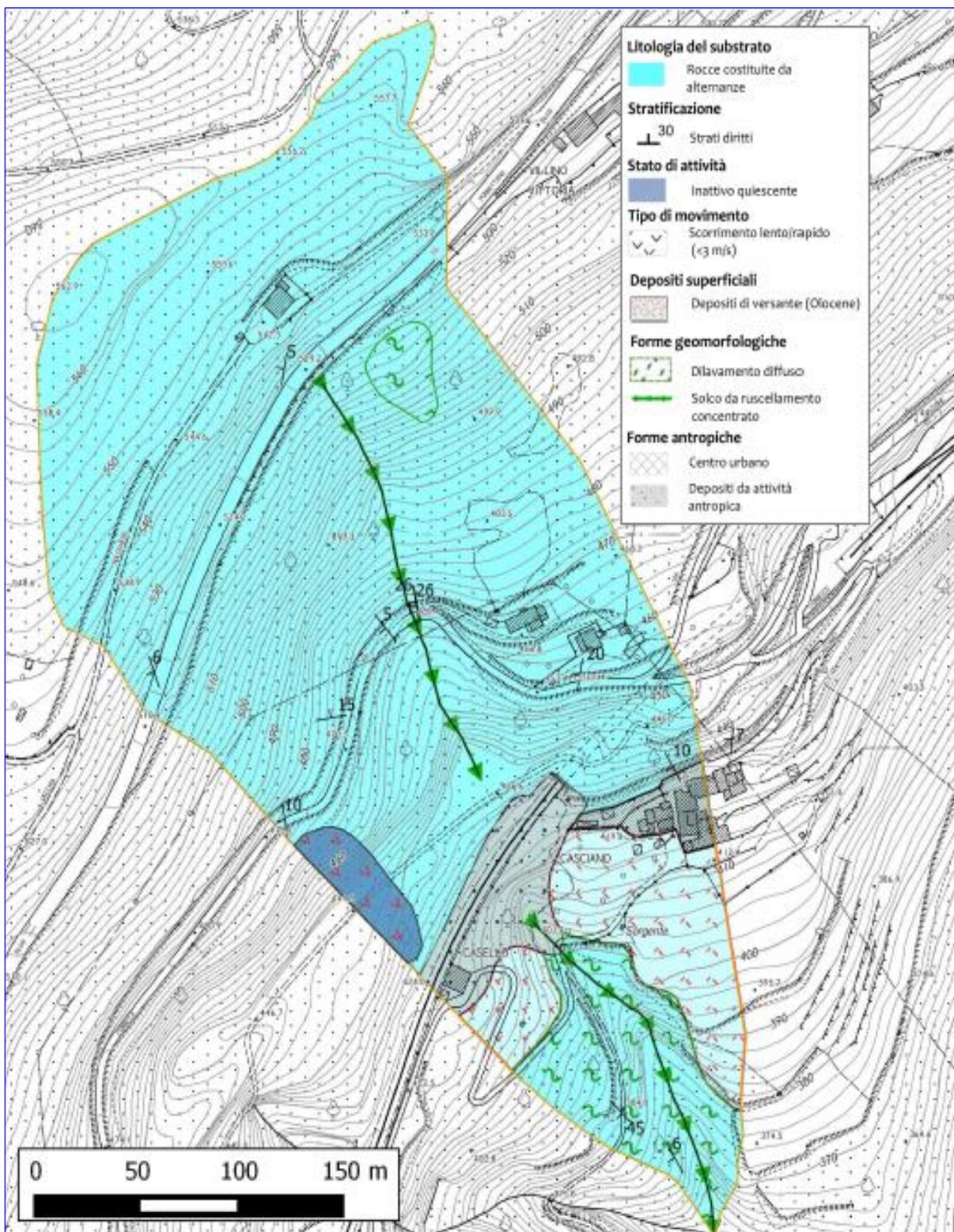


Figura 38: Cartografia geomorfologica realizzata a seguito del rilevamento in scala 1:2.000.

6.1.2.1 *Detrito di versante*

Il detrito di versante è costituito dall'accumulo di materiale prodotto dall'alterazione del substrato: le sue caratteristiche saranno quindi variabili in virtù del tipo di substrato che li ha originati. In questo caso il deposito è costituito da clasti eterometrici, a morfologia sub-spigolosa. La tessitura è aperta, e i frammenti litici risultano immersi in matrice limoso-argillosa marrone chiara.

Le coperture detritiche che interessano l'area studiata, presentano estensioni variabili e spessori compresi tra i 50 cm e i 5 m. Sono state rilevate nei pressi dell'abitato di Casciano sino alla parte meridionale del bacino idrografico (Figura 39), e nella parte SW rispetto alla zona di frana.



Figura 39: Detrito di versante presso il boco nella parte meridionale del bacino.

6.1.2.2 *Detrito derivante dall'intervento antropico*

Si è scelto di differenziare la tipologia di detrito presente nella zona di dissesto, ovvero quello costituente il rilevato ferroviario, rispetto a quello di versante: questa decisione è stata presa al fine di differenziarne i meccanismi di origine. L'area in cui si è sviluppato il dissesto è stata modellata e progettata per mano dell'uomo: il deposito che la caratterizza, infatti, è molto probabilmente il risultato del riporto dello smarino generato durante lo scavo delle gallerie limitrofe, lavorato e compattato per creare il corpo del rilevato ferroviario che vediamo oggi. Il materiale è in generale formato dai clasti eterometrici e a spigoli vivi della componente siltitica del flisch, immerso in una matrice bruna costituita da un limo argilloso (Figura 40).



Figura 40: Detrito derivato dalla lavorazione antropica nei pressi del cantiere.

6.1.2.3 *Corpi di frana*

Nel bacino idrografico in esame è stata identificata una morfologia riconducibile ad un evento franoso di tipo scorrimento rotazionale, già indicata dalla Cartografia dei fenomeni franosi della Regione Toscana. La morfologia del deposito risulta ormai mascherata da dinamiche di erosione e rimodellazione e dalla vegetazione, che ne impediscono l'esatta stima delle dimensioni. L'attività della frana è da considerarsi come inattiva dormiente, poiché le cause che ne hanno causato l'attivazione sono ancora presenti.

6.1.2.4 *Dilavamento*

Il dilavamento si presenta nella parte superiore del bacino idrografico come zone ad alta pendenza in cui l'effetto del deflusso delle precipitazioni comporta la movimentazione dello strato più superficiale del suolo. Questa erosione è facilitata dalla mancanza di piante ad alto fusto in questa posizione.

Nel settore boscato meridionale essa invece agisce, anche in questo caso grazie alla forte acclività, erodendo il suolo tramite un sistema di rivoli e rigagnoli durante l'evento piovoso.

6.2 Analisi dei carotaggi e delle prove SPT

Nelle tabelle 8 e 9 vengono riportati i risultati delle prove SPT eseguite: sono state effettuate le prove penetrometriche per i sondaggi denominati S1 ed S2. Le litologie riportate nelle tabelle sono ricavate dalla descrizione del relativo spezzone di carota e dal parametro N_{SPT}

SONDAGGIO S1					
Profondità [m da p.c.]	Prova SPT (n. colpi/15 cm)			NSPT	Litologia prevalente
3,3	2	2	1	3	Brecce in matrice sabbiosa
5	5	5	6	11	Limi sabbiosi con inclusi
6,5	5	6	18	24	Limi sabbiosi con inclusi
7,5	9	11	11	22	Limi sabbiosi con inclusi
8,8	12	13	12	25	Limi sabbiosi con inclusi
10,2	24	27	11	38	Limi sabbiosi con inclusi
11,4	20	18	25	43	Limi sabbiosi con inclusi
12,8	22	24	21	45	Substrato alterato
14,5	50/5 cm			R	Substrato
16	50/4 cm			R	Substrato
18,5	18	30	50/3 cm	R	Substrato
20	50/4 cm			R	Substrato

Tabella 8: Dati SPT in sondaggio S1.

SONDAGGIO S2					
Profondità [m da p.c.]	Prova SPT (n. colpi/15 cm)			NSPT	Litologia prevalente
1,5	2	3	2	5	Brecce in matrice limosa
3	3	2	4	6	Brecce in matrice limosa
5	6	13	17	30	Brecce in matrice limosa
6,5	50/8 cm			R	Substrato
10,5	19	8	24	32	Substrato
12	50/2 cm			R	Substrato
13,5	50/4 cm			R	Substrato
20	50/4 cm			R	Substrato

Tabella 9: Dati SPT in sondaggio S2.

Negli Allegati 2-3-4 è stata riportata la stratigrafia dei tre carotaggi. Importante dato è quello derivante dal piezometro installato nel foro di sondaggio S2, che non ha rivelato la presenza della falda freatica fino alla profondità di 20 m dal piano campagna.

6.3 Elaborati sismici

Gli elaborati tomografici hanno consentito di individuare il limite tra detrito di versante e bedrock, non coinvolto nel dissesto.

Le sezioni tomografiche eseguite sono state 3 (ubicazione in Allegato 1):

1. ST1 eseguita lungo il binario ferroviario (SSW-NNE);
2. ST2 eseguita parallelamente all'asse del binario, nella zona del coronamento della frana (SSW-NNE);
3. ST3 eseguita nella parte bassa del deposito, in direzione S-N.

In figura 41 è mostrato l'elaborato grafico della prima sezione sismica ST1.

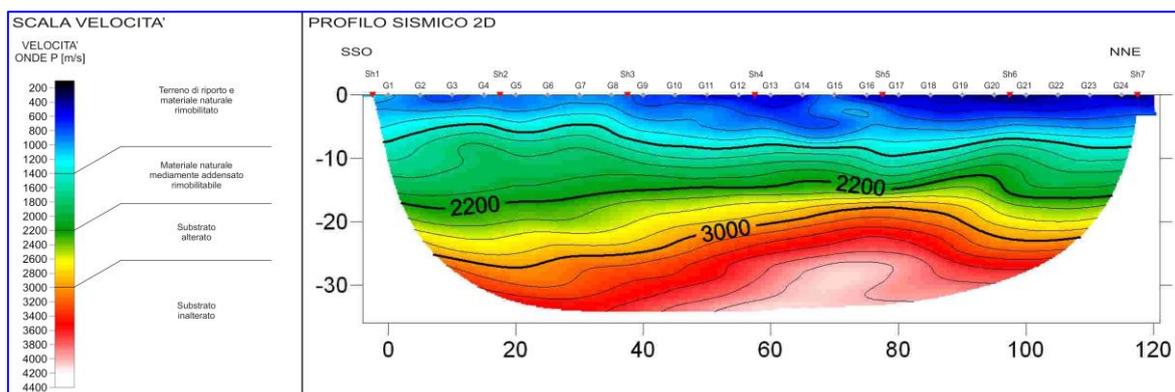


Figura 41: Tomografia tramite sismica a rifrazione delle onde P per la sezione ST1.

STRATO	SPESORE min-max	VELOCITÀ V_p min-max	VELOCITÀ MEDIA EQUIVALENTE V_s	LITOLOGIA
1	4,6-9,6 m	200-1400 m/s	178 m/s	Terreno di riporto e materiale naturale
2	3,6-13,0 m	1400-2200 m/s	280 m/s	Materiale naturale
3	2,8-10,4 m	2200-3000 m/s	367 m/s	Substrato alterato
4	>10,0 m	>3000 m/s	>700 m/s	Substrato inalterato

Tabella 10: Risultati dell'analisi tomografica per il profilo ST1.

Come descritto anche in tabella 10, il profilo di velocità delle onde P evidenzia che il sistema stratigrafico al di sotto della via ferroviaria è composto da quattro strati:

1. il primo strato presenta uno spessore che varia tra 4,6 e 9,6 m, ed una velocità delle onde P compresa tra i 200 ed i 1400 m/s;
2. segue l'unità 2, di spessore variabile tra 3,6 e 13,0 m con velocità v_p compresa tra 1400 e 22000 m/s. Sulla base dei risultati del sondaggio S1 realizzato in corrispondenza dello stendimento, questi primi due strati rappresentano ragionevolmente il terreno di riporto costituente il rilevato ferroviario;
3. a partire dalla profondità di circa -15 m dal piano binari, segue l'unità 3, che mostra velocità maggiori comprese tra 2200 e 3000 m/s, velocità che tipicamente rappresentano il substrato alterato;
4. l'ultima unità individuata, con velocità delle onde P maggiori di 3000 m/s, costituisce il substrato roccioso integro.

In figura 42 è mostrato l'elaborato grafico della seconda sezione sismica ST2.

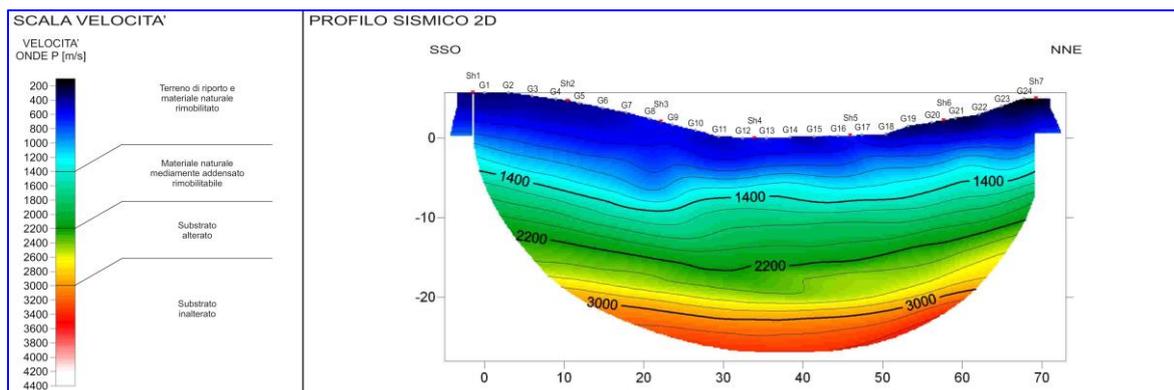


Figura 42: Tomografia tramite sismica a rifrazione delle onde P per la sezione ST2.

STRATO	SPESSORE min-max	VELOCITÀ Vp min-max	VELOCITÀ MEDIA EQUIVALENTE Vs	LITOLOGIA
1	7,3-11,9 m	100-1400 m/s	n.d.	Terreno di riporto e materiale naturale
2	5,5-9,2 m	1400-2200 m/s	n.d.	Materiale naturale
3	6,0-7,2 m	2200-3000 m/s	n.d.	Substrato alterato
4	n.d.	>3000 m/s	n.d.	Substrato inalterato

Tabella 11: Risultati dell'analisi tomografica per il profilo ST2.

Come descritto anche in tabella 11 il profilo di velocità delle onde P evidenzia che il sistema stratigrafico per lo stendimento ST2 è composto da quattro strati:

1. lo spessore dell'unità 1, varia tra 7,3 m e 11,9 m, determinando velocità dell'onda P comprese tra i 100 ed i 1400 m/s;
2. la profondità del riflettore che segna la base dell'unità 2 varia tra i -13,00 m ed i -21,00 m da p.c., mostrando uno strato a v_p che variano nel range 1400-2200 m/s. Dal punto di vista interpretativo, i primi due strati potrebbero corrispondere al materiale movimentato frammisto al materiale detritico naturale di origine eluviale, presente sul versante a ridosso della formazione rocciosa in posto. Infatti, il primo strato è costituito da materiali praticamente areati, mentre il secondo strato risulta maggiormente compatto, anche se la consistenza è abbastanza simile allo strato superiore.
3. l'unità 3, avente spessore di 6-7,2 m, mostra velocità maggiori, comprese tra 2200 e 3000 m/s, velocità che tipicamente rappresentano il substrato alterato;
4. anche in questo l'unità 4 è riconducibile alla formazione rocciosa non alterata presente in posto, con velocità delle onde P maggiori di 3000 m/s.

In figura 43 è mostrato l'elaborato grafico della seconda sezione sismica ST3.

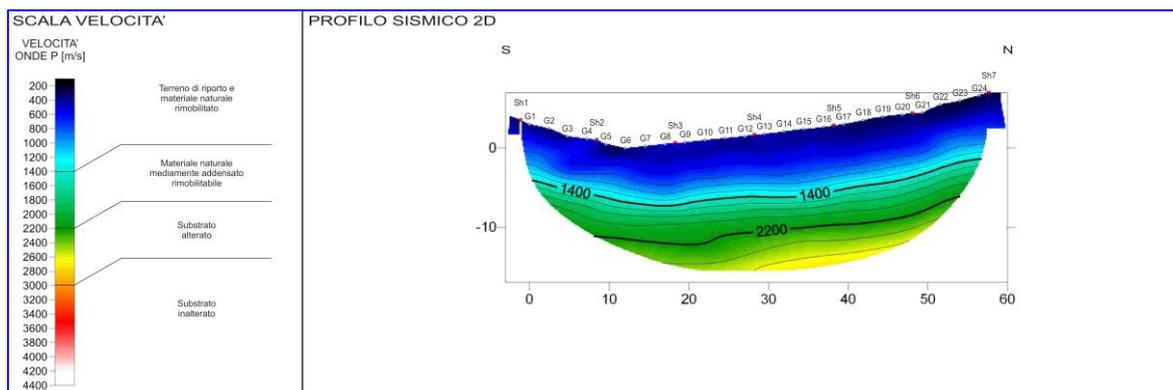


Figura 43: Tomografia tramite sismica a rifrazione delle onde P per la sezione ST3.

STRATO	SPESSORE min-max	VELOCITÀ v_p min-max	VELOCITÀ MEDIA EQUIVALENTE v_s	LITOLOGIA
1	6.8-8.4 m	200-1400 m/s	n.d.	Terreno di riporto e materiale naturale
2	3.9-5.4 m	1400-2200 m/s	n.d.	Materiale naturale
3	n.d.	>2200 m/s	n.d.	Substrato alterato

Tabella 12: Risultati dell'analisi tomografica per il profilo ST3.

Come descritto in tabella 12, il profilo di velocità delle onde P ha permesso il riconoscimento di tre unità sismo-stratigrafiche

1. la coltre detritica più superficiale, rimaneggiata, presenta uno spessore tra i 6.8 ed i 8.4 m, con una velocità delle onde P compresa tra i 200 ed i 1400 m/s;
2. una sottile unità 2, a spessore variabile tra i 3.9 ed i 5.4 m, avente v_p di 1400-2200 m/s, costituisce detrito di versante a maggior consistenza rispetto allo strato 1;
3. lo strato 3, costituente il substrato alterato, il cui tetto varia tra la profondità di -11 m dal p.c. e quella di -14 m.

6.4 Definizione di parametri geo-meccanici e modello del sottosuolo

Sulla base dello studio geologico-geomorfologico locale condotto e dei risultati ottenuti nel corso delle indagini eseguite in fase di progettazione sull'area interessata, si può stabilire quanto segue:

1. l'area oggetto di studio è ubicata su depositi di versante di natura argilloso-limosa, a loro volta poggianti su di un substrato roccioso costituito da un flisch in cui la litologia prevalente è rappresentata da un silt debolmente marnoso;
2. le strutture di sostegno al versante possono avvalersi di un sistema fondale profondo, costituito da micropali, sfruttando così le migliori proprietà meccaniche del substrato rispetto a quelle del terreno di copertura.

Dall'analisi degli stendimenti sismici realizzati, si è giunti all'individuazione delle seguenti unità sismo-stratigrafiche:

- Unità 1, avente $v_p = 200-1400$ m/s: corrispondente a terreno di riporto e materiale naturale;
- Unità 2, avente $v_p = 1400-2200$ m/s: corrispondente a materiale naturale;
- Unità 3, avente $v_p = 2200-3000$ m/s: corrispondente a substrato alterato;
- Unità 4, avente $v_p > 3000$ m/s: corrispondente a substrato non alterato.

Tali unità, rapportate alle unità litostratigrafiche individuate dalle indagini geognostiche dirette, portano alla definizione di un modello del sottosuolo del versante (Allegato 5). Tale modello è stato derivato considerando i carotaggi S1 ed S3, ovvero quelli situati ad una minor distanza dalla sezione topografica considerata, che è stata ubicata centralmente rispetto al corpo di frana.

Tenendo conto dell'inevitabile eterogeneità delle caratteristiche litologiche dei terreni presenti nell'area, a causa del pesante rimaneggiamento antropico avvenuto in passato, è stato elaborato un modello semplificato del sottosuolo, tramite la distinzione di due maggiori unità:

- I. unità A, costituita dalla coltre detritica di versante e di derivazione antropica; è rappresentata essenzialmente da limi sabbiosi con inclusi eterometrici di natura siltitica ed arenacea. Localmente si rinvencono corpi lenticolari costituenti l'unità B, rinvenuta in corrispondenza delle verticali S2 ed S3 a profondità comprese tra - 9,20 m e -17,20 m da p.c. (S3) e da p.c. a - 6,50 m da p.c. (S2)
- II. unità B, ovvero il bedrock, in prevalenza composta da siltiti debolmente marnose di colore grigio-grigio scuro, laminate ed alternate a livelli di materiale di alterazione argilloso-marnoso.

I parametri geotecnici caratteristici delle suddette facies sono qui riportati in forma tabellare (Tabelle 13-14):

UNITÀ A	
<u>Limi sabbiosi con inclusi</u>	
Densità relativa D_r (%)	23 - 78
Peso di volume secco (γ_d)	1,70 - 1,90 t/m ³
Angolo di attrito mobilizzabile (φ)	22° - 26°
Modulo edometrico (E_{ed})	40 - 50 kg/cm ²

Tabella 13: Parametri geo-meccanici ricavati dalle prove in sito per l'unità detritica.

UNITÀ B	
<u>Substrato roccioso (Siltiti debolmente marnose)</u>	
Densità relativa D_r (%)	51-60
Peso di volume secco (γ_d)	2,00 - 2,20 t/m ³
Angolo di attrito mobilizzabile (φ)	33° - 37°
Modulo edometrico (E_{ed})	200 - 250 kg/cm ²

Tabella 14: Parametri geo-meccanici ricavati dalle prove in sito per il substrato.

7 ANALISI CARATTERISTICHE IDROGRAFICHE DEL BACINO DI RIFERIMENTO

7.1 Individuazione del bacino scolante

Il bacino idrografico di interesse per lo studio del dissesto è quello che convoglia le acque nel rio tombato che transitava presso base del vecchio muro di contenimento. In figura 44 è stato scontornato il suo perimetro: l'area è di circa 10 ettari, equivalenti a 100.000 m², mentre il perimetro è risultato di una lunghezza pari a 14.000 m.

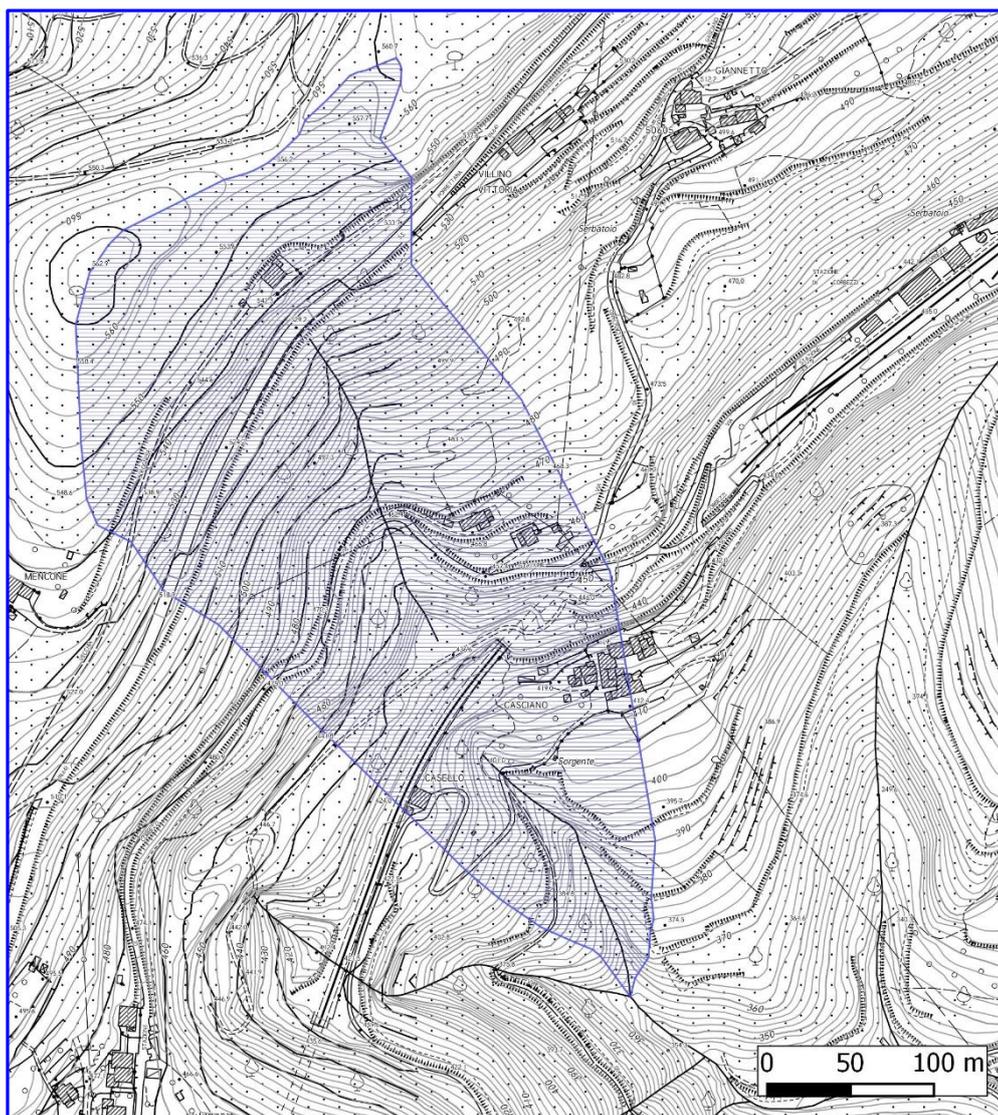


Figura 44: Bacino idrografico del rio che transita per l'area in esame (Fonte CTR 1:2.000 Regione Toscana, 2007).

7.1.1 Dati climatici dell'area

Risulta importante ai fini della ricerca delle cause d'innesco della frana di Corbezzi la descrizione dell'andamento delle precipitazioni nella stagione invernale del 2013, oltre che di quello immediatamente precedente l'evento. Il Report Pluviometrico dell'anno 2013, redatto dal Servizio Idrologico Regionale della Toscana (2014b), indica apporti meteorici

che variano tra i 600 ed i 3000 mm: i maggiori afflussi sono stati registrati sul settore nord-occidentale della Regione, in particolare sulle province di Massa-Carrara e Lucca (bacini idrografici del Magra e del Serchio), mentre gli apporti inferiori si sono registrati nella fascia costiera centro-meridionale in corrispondenza del bacino del Cornia e del basso bacino dell'Ombrone Grossetano.

Mediamente sul territorio regionale nel corso dell'anno sono caduti circa 1200 mm di pioggia.

Eccedenze e deficit di precipitazione nel territorio toscano sono bene visualizzabili tramite elaborati derivanti dalla valutazione dell'indice SPI.

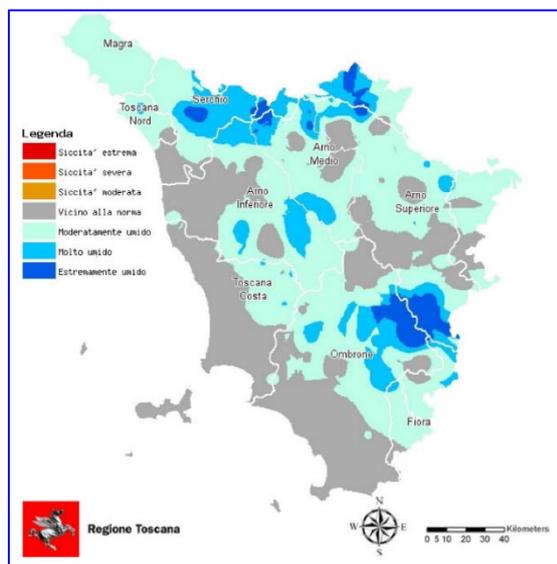


Figura 45: Distribuzione dell'indice SPI per l'anno 2013 (Fonte: SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2014b).

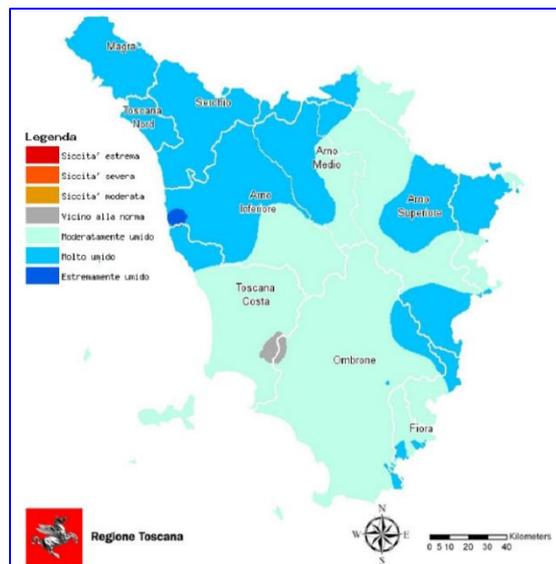


Figura 46: Distribuzione dell'indice SPI per il mese di Dicembre 2013 (Fonte: SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2014a).

Gli elaborati creati tramite questa classificazione mostrano all'annata 2013 (Figura 45) un indice SPI nell'area settentrionale del settore Arno Medio (ubicazione del sito in esame), condizioni "Estremamente umide", mentre nel solo mese di Dicembre 2013, come mostrato in figura 46, il sito è classificato come "Molto umido" (SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2014a). Le mappe mostrano quindi per l'anno 2013 un quantitativo di precipitazioni molto maggiore rispetto alla media del trentennio precedente.

Lo studio effettuato sulla tendenza dei dati acquisiti nell'intervallo temporale 1916-2013 evidenzia però una generale tendenza negativa degli apporti meteorici su base regionale. A pari passo con la riduzione degli afflussi meteorici, appare in atto un'importante variazione nel regime delle precipitazioni: si rileva infatti un aumento di giorni caratterizzati da forti intensità di pioggia ($P \geq 50$ mm/giorno), mentre il numero di giorni contraddistinti dalle piogge medie, cosiddette "efficaci" ($1 < P \leq 20$ mm/giorno) stanno diminuendo nel corso degli ultimi anni, con contestuale aumento del numero dei giorni non piovosi.

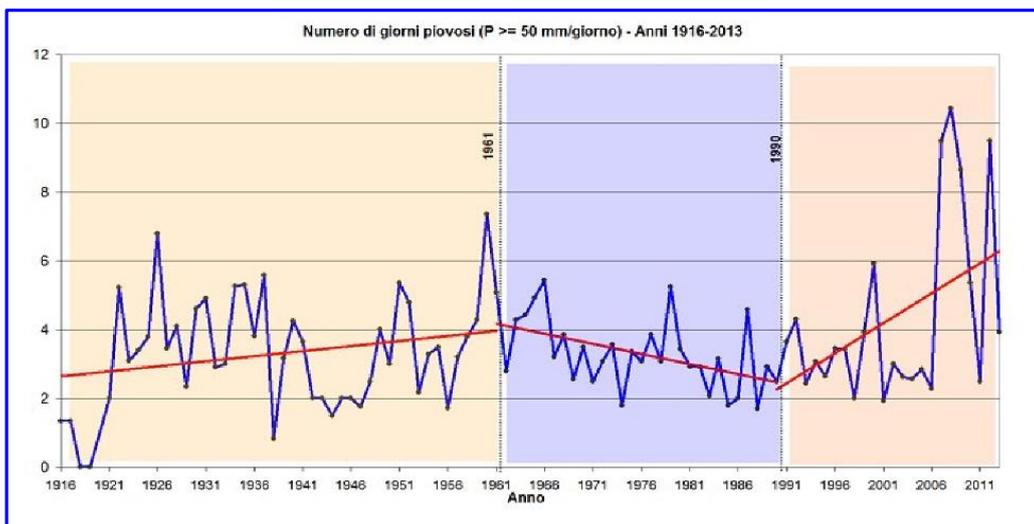


Figura 47: Trend dei giorni caratterizzati da piogge intense nel periodo 1916-2013 (Fonte: SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2014b).

Le variazioni della tipologia di pioggia caduta è messa ancor più in evidenza nel grafico di figura 47, dove il periodo di analisi è stato sezionato in tre sotto-intervalli (1916-1960, 1961-1990 e 1991-2013): appare alquanto marcato il trend positivo nel periodo 1991-2013. Ciò sta a significare che il numero di giorni caratterizzati da piogge oltre i 50 mm/giorno sta aumentando, così come è in aumento il contributo della pioggia caduta durante questi giorni rispetto al cumulo annuo totale. In estrema sintesi, si può asserire che la tendenza delle ultime decadi in Toscana va verso una diminuzione delle piogge e del numero dei giorni piovosi; contestualmente si assiste a un aumento dei fenomeni precipitativi molto intensi che possono avere ripercussioni importanti sul territorio dal punto di vista idrogeologico ed idraulico (SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2014a; SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2014b).

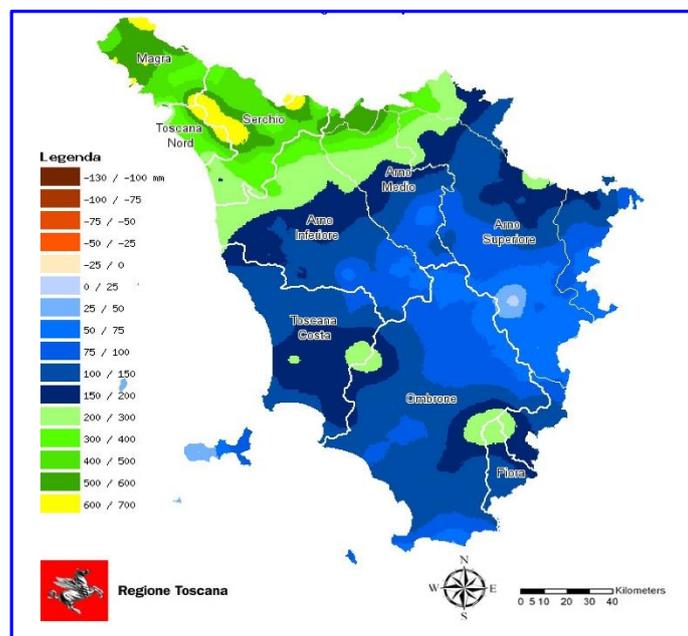


Figura 48: Surplus di precipitazione (misurata in mm) di Gennaio 2014 rispetto alla media registrata nello stesso mese dell'intervallo temporale 1984-2013 (Fonte: SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2014c).

Per quanto riguarda le precipitazioni occorse a Gennaio 2014 è stata invece significativa l'analisi del grafico in figura 48, che mostra un confronto tra le precipitazioni (in millimetri) rilevate sul territorio toscano rispetto alla media dello stesso mese nell'intervallo 1989-2013. Nell'area di interesse risulta un tasso di piovosità superiore di ben 500-600 mm la media dell'intervallo temporale sopra citato (SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2014c).

A supporto degli elaborati effettuati dalla Regione sono stati elaborati i dati registrati dalle stazioni pluviometriche prossime all'abitato di Corbezzoli (Figura 49) reperibili dal sito internet del Servizio Idrologico Regionale (SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2015b).

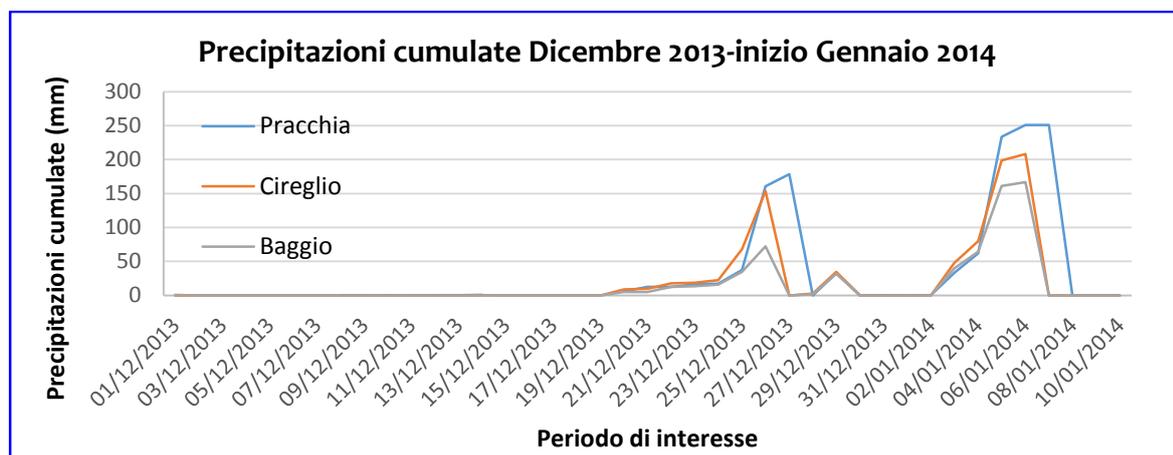


Figura 49: Precipitazioni cumulate nel periodo di fine Dicembre 2013 e inizio 2014 (Fonte dati: SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2015b).

Il grafico mostra due principali eventi piovosi, che hanno avuto durata di diversi giorni consecutivi: uno a fine anno, intercorso tra il 20 Dicembre (Pracchia, Cireglio e Baggio) e il 27 (Pracchia) - 29 Dicembre (Cireglio e Baggio). La cumulata massima raggiunta è quella di Pracchia, con i 178 mm misurati nella giornata del 27, mentre la minima è costituita dai 37 mm di Baggio il giorno di Santo Stefano.

L'evento di inizio anno, meglio apprezzabile nel grafico in figura 50, ha visto sempre Pracchia come stazione a precipitazione cumulata maggiore, con un picco di 250 mm il 6 Gennaio, e Baggio quella a cumulata minore, con 167 mm misurati sempre nella giornata dell'Epifania. La notte del dissesto è posizionata in un tratto delle curve caratterizzato da un forte incremento di ripidità, ovvero di intensificazione delle piogge: questo fatto potrebbe verificare l'ipotesi dell'innescò causato da erosione superficiale dovuta all'azione di precipitazioni intense in un breve intervallo temporale.

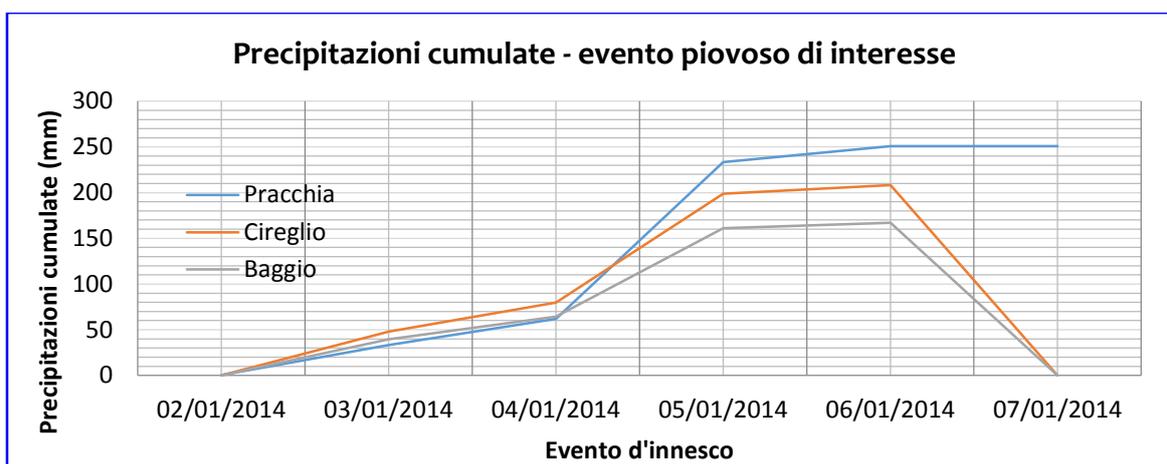


Figura 50. Particolare delle precipitazioni cumulate durante l'evento di inizio Gennaio 2014 (Fonte dati: SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2015b).

7.1.2 Stima della portata massima di progetto alla sezione di chiusura

Al fine di valutare ogni quanti anni si può verificare il mancato contenimento delle acque di piena entro l'alveo naturale sotto indagine, è necessario assegnare un tempo di ritorno all'evento in esame. Tale parametro, chiamato anche intervallo di ricorrenza, rappresenta il periodo di tempo (espresso in anni) durante il quale il valore dell'evento preso in considerazione viene uguagliato o superato una sola volta. Il tempo di ritorno dell'altezza di precipitazione deve essere commisurata all'importanza strategica della struttura che si deve realizzare. Ad opere di questa valenza viene assegnato un tempo di ritorno dell'evento piovoso T_r di 200 anni, affinché vengano considerati gli eventi più intensi, e una durata delle precipitazioni $d = 1$ ora, per prevedere quindi eventi che si sviluppano un tempo limitato.

Inserendo questi due parametri nella pagina online Linee Segnalartici di Probabilità Pluviometrica del Servizio Idrologico Regionale della Regione Toscana (2012), vengono restituiti i parametri di altezza della precipitazione H , a , ed n in riferimento ad una stazione pluviometrica pre-impostata.

È stata scelta la stazione di Baggio, che si trova a quota e latitudine paragonabili a quella di Corbezzoli.

In tabella 15 sono riportati i valori emersi.

	Quota (m s.l.m.)	T_r (anni)	D (h)	H (mm)	a	n
Stazione di Baggio	525	200	1	75.70	75.70100	0.39150

Tabella 15: Parametri della curva di probabilità pluviometrica per la stazione di Baggio (Fonte: Sir, 2012).

Il bacino idrografico considerato nell'esecuzione del calcolo è un sotto-bacino di quello in figura 20, avente la sezione di chiusura la quota alla quale si crea l'incanalamento delle acque di deflusso, 410 m. La superficie drenata di tale sotto-bacino si può stimare in circa 10 ettari, ovvero 0.1 km^2 . La lunghezza dell'asta principale è risultata di 480 m.

Il risultato ottenuto per la stima del tempo di corrivazione del bacino è pari a 0.123 h.

Considerando poi i parametri di tabella 6 relativi alla stazione di Baggio, la portata di progetto Q_{\max} è risultata pari a $4.53 \text{ m}^3/\text{s}$.

I risultati sono proposti in tabella 16.

Parametri bacino	Quota sezione di chiusura (m s.l.m.)	Tc (ore)	Q _{max} (m ³ /s)
	398	0.123	4.53

Tabella 16: Risultati ottenuti con il metodo razionale per la stima della portata di colmo del bacino.

7.1.3 Correlazione tra i dati idrologici e l'innescò della frana

Dall'analisi del bacino idrografico cui appartiene l'area sede di dissesto è stato ricavato il valore della portata che transita, per un tempo di ritorno pari a duecento anni e per una durata dell'evento pari al tempo di corrivazione, alla quota di interesse, dal quale sarà possibile procedere al dimensionamento del sistema drenante.

Inoltre, sapendo che il piezometro non ha rilevato la presenza di falda nel versante, i dati che emergono dall'analisi delle stazioni pluviometriche e dell'indice SPI consentono ulteriori conferme circa la natura del meccanismo d'innescò della frana. Come osservato nel paragrafo 4.3 le condizioni del cunicolo drenante dal punto di vista del dimensionamento a prima vista apparirebbero ottimali, ma è plausibile ritenere che si sia verificato un eccesso del livello della portata di colmo in quel tratto a causa dell'incuria nella manutenzione del sistema di scarico delle acque piovane.

8 STABILIZZAZIONE E MITIGAZIONE DEL FENOMENO

FRANOSO

Gli interventi di stabilizzazione dei pendii sono applicati in situazioni di pericolo attivo, ovvero in circostanze in cui il materiale si trova in una fase di movimentazione in quel momento, di rischio temuto, quando vi è una reale possibilità di attivazione, oppure in fase posteriore all'evento parossistico, in cui gli interventi sono atti alla riduzione delle conseguenze di un danno.

Lo studio di un fenomeno franoso rappresenta, nell'ambito della difesa del suolo dai rischi naturali, una delle problematiche più complesse e difficili, e richiede una stretta interazione tra ingegneria geotecnica, idraulica e geologia.

La scelta di tipo e dimensionamento dell'intervento stabilizzate è condizionata da numerosi fattori, partendo dalla tipologia di frana, la stabilità del pendio in quel momento, dimensione e velocità del fenomeno, fino a considerare la situazione dell'ambiente fisico e socio-economico, le tecnologie utilizzabili, costi e tempi di realizzazione e la valutazione di impatto ambientale.

Di importanza crescente negli ultimi anni è la sensibilità rispetto fattori che condizionano l'ambiente fisico e socio-economico di una comunità, sensibilità che risulta avere risvolti fondamentali sulle scelte di progettazione degli interventi.

È inoltre spesso determinante, nella scelta di tali interventi, l'influenza dei fattori economici e di conseguenza il costo dell'opera, i relativi tempi di esecuzione e le possibili tecnologie utilizzabili.

In un progetto di stabilizzazione di pendio in terra le tipologie di intervento possono suddividersi in due gruppi in relazione al meccanismo con il quale aumentano il fattore di sicurezza:

1. interventi che aumentano la resistenza al taglio del materiale (aumento delle forze o dei momenti stabilizzanti);
2. interventi che riducono la resistenza al taglio mobilitata (diminuzione delle forze o dei momenti destabilizzanti).

Il primo gruppo comprende:

- a) interventi che migliorano la resistenza al taglio del materiale, aumentandone le caratteristiche meccaniche quali coesione e angolo di attrito; tra essi si annoverano le tecniche di addensamento, le iniezioni, la cottura ecc.;
- b) interventi che riducono le pressioni neutre all'interno della massa in movimento e lungo il contorno, in prossimità della superficie di rottura, rappresentati da drenaggi superficiali e profondi;
- c) interventi che incrementano gli sforzi normali lungo la superficie di rottura, tipicamente costituiti dalla realizzazione di sovraccarichi al piede del versante.

Il secondo gruppo comprende:

- a) interventi che riducono gli sforzi tangenziali lungo la superficie di rottura; si possono realizzare mediante scavi in sommità o abbattimento della scarpata;
- b) interventi che trasferiscono gli sforzi tangenziali a formazioni rocciose non interessate da movimento; il trasferimento può avvenire mediante la realizzazione di elementi strutturali quali opere di sostegno rigide o flessibili, in terra armata o rinforzata, con o senza ancoraggi e chiodature.

In generale la stabilizzazione di un pendio non si raggiunge con un solo tipo di intervento ma necessitano più tipologie di interventi di stabilizzazione combinate tra di loro (Marasciulo et al., 2002; Barile et al., 2004).

8.1 Riprofilatura del versante

L'intervento di riprofilatura consiste in un rimaneggiamento del materiale costituente il pendio avente lo scopo di eliminare depressioni o 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 devono infatti essere intercettate e allontanate dall'area dissestata e convogliate negli impluvi naturali mediante canalette (Marasciulo et al., 2002). Lo scopo è innanzitutto la riduzione degli sforzi tangenziale agenti lungo la superficie di potenziale scivolamento: viene infatti eliminato il materiale dalla parte sommitale del versante (Figura 51 a), alleggerendo il ciglio di distacco, e diminuita la pendenza del versante tramite rimozione o riprofilatura del materiale franato (Figura 51 b).

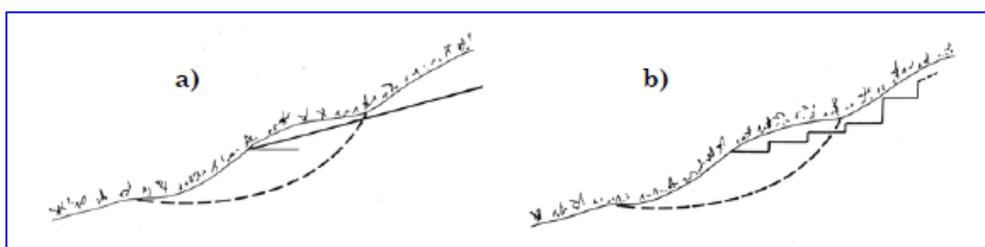


Figura 51: a) alleggerimento con asportazione di materiale nella parte alta della zona in frana; b) riprofilatura del pendio mediante terrazzamenti (Fonte: Barile et al., 2004).

L'inserimento di gradonature, inoltre, consente il passaggio dei mezzi da lavoro e permette l'attecchimento, in ultima fase, delle piantumazioni.

Le operazioni da eseguire sono quindi:

- Rimozione di detrito superficiale grossolano;
- Disgaggio di eventuale materiale ancora instabile;
- Asportazione del materiale nella zona di corona;
- Taglio di piante;
- Riprofilatura e livellamento terreno;
- Stabilizzazione superficiale e rivestimento vegetativo.

Per ridurre gli effetti di erosione superficiale vengono spesso utilizzate tecniche di ingegneria naturalistica.

8.2 Consolidamento dei versanti

Alcune tipologie di strutture sono impiegate in interventi, quali la sistemazione e consolidamento dei versanti in frana, quando, per cause naturali o artificiali, si hanno condizioni che non permettono al terreno di assumere la naturale pendenza d'equilibrio.

Le opere di sostegno possono essere rigide o flessibili in relazione alla capacità di adattarsi alle deformazioni e cedimenti dei terreni o degli ammassi rocciosi, senza rotture o danni significativi. Nel primo caso, la stabilità è legata al peso dell'opera, oppure a quella del terreno che grava sulla suola di fondazione; nel secondo caso, invece, l'equilibrio è assicurato dalla mobilitazione della resistenza passiva nella parte infissa, ed eventualmente dalla presenza di altri vincoli, quali ad esempio un sistema di ancoraggio.

Negli ultimi anni si sono diffuse alcune categorie di opere di sostegno e di consolidamento speciali che rispondono all'esigenza di minimizzare l'impatto degli interventi sull'ambiente e di favorire il ripristino naturale dell'area.

8.2.1 Muri a mensola

I muri a mensola hanno trovato un largo impiego negli ultimi anni nella realizzazione di opere di ingegneria e negli interventi di stabilizzazione dei versanti. Sono realizzati in cemento armato gettato in opera o con elementi prefabbricati (Figura 52 a-b).

I muri in cemento armato sono strutture a limitato spessore molto resistenti, in cui la resistenza interna alla trazione è garantita dalle armature, mentre la stabilità al ribaltamento, oltre che dal peso dell'opera, è assicurata anche grazie al contributo del peso del terreno che grava sulla base a mensola.

In genere, il muro è composto da due elementi principali: una struttura in elevazione (muro verticale) ed una fondazione completamente interrata con vincolo di incastro.

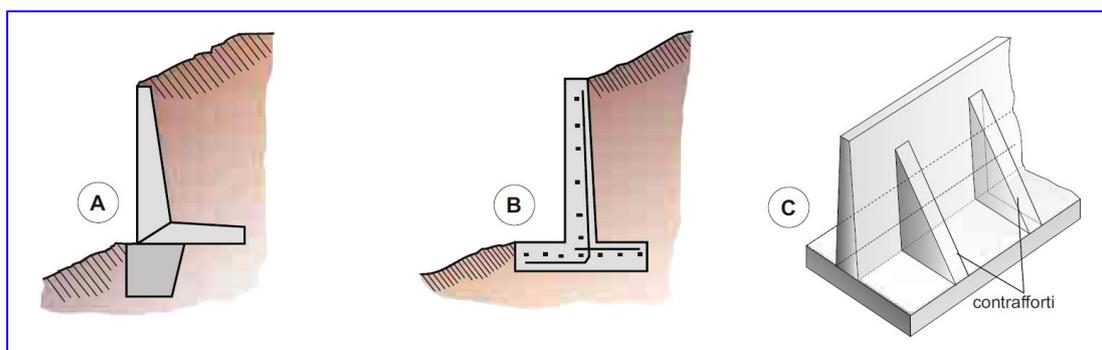


Figura 52: Tipologie di muri a mensola a) in elementi pre-fabbricati di cemento armato, b) in cemento armato gettato in opera, c) in cemento armato gettato in opera con contrafforti interni (Fonte: Marasciulo et al., 2002).

L'altezza del muro verticale può arrivare fino ai 5 - 6 metri. Per altezze maggiori, dovendo limitare gli spessori, la struttura viene dotata di contrafforti interni e/o esterni, o di tiranti d'ancoraggio sul muro verticale (muri ancorati con tiranti) come mostrato in figura 52 c.

Quando il terreno di fondazione presenta scarse caratteristiche meccaniche oppure quando c'è forte eccentricità dei carichi, tale da dover realizzare in alternativa una fondazione estesa e quindi ingombrante affinché si assicuri un certo carico limite, oppure per limitare i cedimenti, viene realizzato un muro a mensola su pali.

I pali maggiormente adottati sono di medio e grande diametro, data la maggiore capacità di resistenza ai carichi. Si possono avere più file di pali o, al limite una sola, anche se questa tipologia è sconsigliabile in quanto quella unica fila dovrebbe assorbire tutto il momento ribaltante dell'opera attraverso il momento flettente dei pali, mentre con almeno due file, tale momento si trasforma in sforzi assiali aggiuntivi. Alternativamente si possono utilizzare dei micropali opportunamente inclinati in modo che essi non risultino sollecitati a flessione ma solo a sforzo normale.

Il dimensionamento dei pali e dello zoccolo di fondazione sono tipici della fondazione su pali; i pali vanno verificati a flessione, taglio e capacità portante.

Particolarmente importante per la stabilità dell'opera è la realizzazione e la manutenzione di un sistema di drenaggio alle spalle dello stesso, in modo da limitare o impedire l'insorgere di pericolose sovrappressioni idrauliche e l'aumento delle spinte della terra.

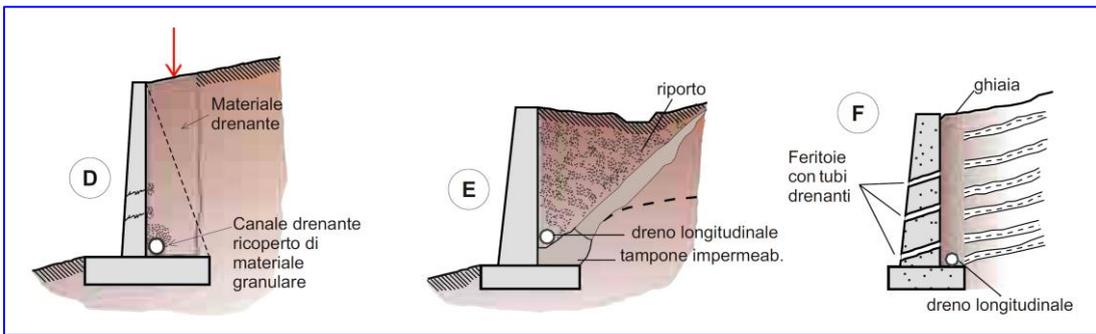


Figura 53: Sistemi di drenaggio impiegati per i muri di sostegno a mensola (Fonte: Marasciulo et al., 2002).

L'entità e la disposizione delle opere di drenaggio dipende principalmente dalle caratteristiche di permeabilità del materiale di riempimento, dalla stratigrafia e dal regime dell'eventuale falda nel terreno retrostante, perciò possiamo distinguere diversi sistemi di drenaggio:

- Riempimento con riporto di materiale granulare drenante (pietrisco, ghiaia e sabbia pulita), feritoie con tubi drenanti, tubo drenante longitudinale, coperto con materiale granulare, posato lungo la base del muro (Fig. 53 d).
- Formazione di uno strato inclinato di materiale granulare drenante posto a diretto contatto col terreno in posto ed appoggiato su un tampono impermeabile, dreno longitudinale coperto con materiale granulare lungo la base, riempimento con riporto di materiale impermeabile e formazione di canalette per la regimazione e l'allontanamento delle acque meteoriche dal ciglio (Fig. 53 e).
- Realizzazione di un setto di materiale granulare drenante a contatto con la parete interna del muro, feritoie con tubi drenanti e dreno longitudinale lungo la base del muro (Fig. 53 f).

Il materiale drenante deve essere scelto in funzione della granulometria della terra della scarpata o del terrapieno, con caratteristiche granulometriche tali da non intasare i fori dei tubi drenanti e garantire un'efficace azione drenante del terreno naturale a tergo della struttura di sostegno.

8.2.2 Reticolo di micropali

I micropali sono dei pali di piccolo diametro, tra i 100 ed i 300 mm in calcestruzzo, rinforzati con barre nella parte centrale o attraverso particolari armature in acciaio, che possono essere realizzati all'interno del corpo di frana allo scopo di connettere la zona instabile con quella stabile sottostante, determinando così un incremento della resistenza al taglio sulla superficie di scorrimento. L'intervento può essere conseguente ad una stabilità già accertata, per la quale si conosce la superficie di scorrimento oppure, agendo preventivamente, viene progettato in relazione alle ipotetiche superfici di rottura che possono essere assunte come quelle più probabili. In ogni caso si opera considerando una massa di terreno in movimento su un ammasso stabile sul quale attestare, per una certa lunghezza, l'allineamento di pali. Essi vengono disposti generalmente con orientazione variabile, in modo tale da realizzare una struttura tridimensionale, il "reticolo di micropali", che si oppone al movimento franoso in virtù della resistenza al taglio, alla trazione, compressione e momento flettente dei pali. Con questa particolare tecnica di intervento si viene a realizzare una sorta di terreno rinforzato il cui comportamento è fortemente dipendente dall'interazione micropali-terreno: il miglioramento delle proprietà meccaniche del terreno è meno diffuso dipendentemente alla pressione di iniezione del calcestruzzo e alla tipologia del terreno stesso.

Tutti i pali terminano superiormente in un cordolo rigido in cui possono essere inseriti tiranti di ancoraggio (Girelli, 2008; Barile et al., 2004).

8.2.3 Tiranti di ancoraggio

I tiranti di ancoraggio sono elementi di rinforzo sollecitati in esercizio da sforzi di trazione, capaci di trasmettere forze resistenti al bedrock in cui sono infissi. Un tipico tirante d'ancoraggio (Figura 54) è costituito da una “testa” munita di piastra di ripartizione e sistema di bloccaggio, collegati ad una “parte libera”, che comprende la porzione tensionabile e la guaina di rivestimento: questa porzione non garantisce forza resistente, che è invece fornita da una “fondazione”, dotata di armatura.

Più precisamente, la testa trasmette alla struttura ancorata o alla roccia la forza di trazione del tirante; la parte libera trasmette la forza di trazione dalla testata alla fondazione; la fondazione trasmette all'ammasso roccioso le forze di trazione del tirante.

La testa del tirante è di solito cementata a strutture di sostegno quali muri, diaframmi o pali.

I tiranti d'ancoraggio possono essere:

- pretesi (o attivi) quando gli stessi elementi sono sollecitati in esercizio da sforzi di trazione impressi all'atto dell'esecuzione;
- non pretesi (o passivi) quando gli elementi di rinforzo sono sollecitati a trazione, che si mobilita in seguito all'instaurarsi di movimenti e deformazioni dell'ammasso;
- parzialmente pretesi quando viene impressa in loro all'atto dell'installazione una tensione minore di quella d'esercizio.

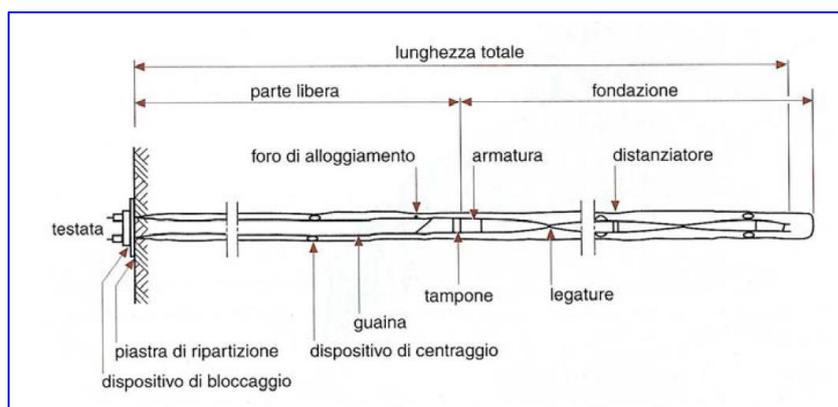


Figura 54: Esempio tipico di ancoraggio con cementazione del bulbo e possibilità di tesare il tirante agendo sul bullone autocentrante su piastra di ripartizione.

Una palificata di consolidamento ancorata permette un'efficienza statica migliore rispetto ad un analogo sistema non ancorato. Il tratto di fondazione dell'ancoraggio deve garantire il vincolo statico superiore della palificata di consolidamento: deve quindi essere infisso in una zona stabile sia in condizioni statiche che dinamiche, ed essere dimensionato al fine di realizzare la forza resistente a trazione definita in fase di progettazione (Froldi, 2015).

8.3 *Gli interventi idraulici*

Gli interventi sui corsi d'acqua atti alla protezione di insediamenti ed infrastrutture esistenti, definiti “strutturali”, hanno diversi campi di applicazione, tra i quali la difesa dalle inondazioni fluviali, il consolidamento degli alvei e la stabilizzazione dei versanti e la difesa degli invasi dai materiali solidi trasportati. Consistono in diverse tipologie di intervento, quali:

- la regimazione, ossia l'apporto di modifiche al regime delle portate che possono defluire lungo il corso d'acqua;
- la sistemazione, ovvero modificare o consolidare l'alveo per raggiungere un assetto plano-altimetrico stabile;
- la rinaturalizzazione, la ricostituzione cioè degli habitat propri del corso d'acqua;
- la costruzione di opere di difesa passiva, ovvero di sistemi di difesa in grado di arrestare o deviare le colate detritiche secondo varie modalità.

Le opere di difesa dall'erosione lungo un tratto del corso d'acqua si rendono necessarie in tutti i casi in cui la velocità della corrente sia sufficientemente elevata da riuscire ad asportare materiale dal fondo e dalle sponde e la capacità di trasporto non sia già saturata dai sedimenti in carico alla corrente. In questi casi l'approccio alla difesa dall'erosione può essere di due tipi diversi:

- diminuzione della velocità della corrente: sistemazioni a gradinata e briglie di consolidamento, repellenti;
- protezione meccanica delle sponde e del fondo con materiali artificiali o naturali, con la possibilità di combinare materiali vivi ed inerti: muri di sponda, rivestimenti e presidi al piede.

La sistemazione a gradinata, in particolare, si attua allorché si intenda correggere il profilo longitudinale di un torrente allo scopo di ridurre la pendenza mediante opere trasversali: Scopo delle opere trasversali è la creazione di punti fissi lungo il profilo dell'alveo a cui, pertanto, viene data una configurazione pressoché definitiva. L'effetto della correzione della pendenza con opere trasversali è quello di far raggiungere all'alveo una situazione di equilibrio con maggiore rapidità rispetto a quanto avverrebbe naturalmente.

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 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 realizzazione 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 (cunette e canalette superficiali, fossi di guardia, dreni intercettori);
- opere di drenaggio di tipo profondo (trincee e setti drenanti, dreni sub-orizzontali, pozzi di drenaggio, cunicoli e gallerie drenanti).

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 (Marasciulo et al., 2002; Anselmo et al., 2003).

8.3.1 Drenaggi superficiali

Le opere di drenaggio superficiali sono interventi eseguiti immediatamente dopo il verificarsi di un evento franoso per la regimazione ed il drenaggio delle acque superficiali e per la sistemazione del pendio instabile. In genere i drenaggi superficiali comprendono: canalette superficiali, fossi di guardia, dreni intercettori, riprofilatura dei versanti per eliminare le depressioni presenti, sigillatura ed impermeabilizzazione delle fessure beanti. Le opere di drenaggio superficiale hanno lo scopo di tenere sotto controllo le condizioni idrauliche al contorno, e sono volte ad impedire infiltrazioni d'acqua nelle zone instabili e a limitarne il ruscellamento superficiale, contenendo quindi l'erosione.

Nella progettazione dei sistemi di drenaggio superficiale si dovrebbero valutare le seguenti due condizioni:

- venute d'acqua attraverso la superficie del pendio
- infiltrazioni in corrispondenza della sommità del pendio

Entrambe le condizioni causano l'erosione della parte più corticale del pendio e aumentano la tendenza a rotture superficiali localizzate. Canalette, fossi di guardia, dreni superficiali di intercettazione, tombinature, pozzetti, briglie, soglie, sono largamente impiegati come sistemi di controllo dell'erosione superficiale, specialmente dove sono previste intense precipitazioni.

Canalette superficiali, in particolar modo, hanno 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. Il fondo deve essere il più possibile impermeabile. In funzione delle modalità costruttive e del materiale di costruzione si possono avere vari tipi di canalette, in terra, legname o pietrame, calcestruzzo o lamiera.

Gli interventi di drenaggio superficiale sono opere che possono essere realizzate immediatamente dopo il verificarsi di un evento franoso: il loro utilizzo è frequente anche nella sistemazione e consolidamento di versanti in dissesto insieme ad altre opere a carattere definitivo.

Nell'esecuzione dei drenaggi è di fondamentale importanza assicurarsi che tutti gli scarichi delle canalizzazioni siano condotti sino al più vicino fosso o impluvio, fuori dal versante in frana, e che in corrispondenza dei punti di scarico non inneschino processi erosivi. Come ovvio la manutenzione riveste inoltre un ruolo determinante nella funzionalità di questi sistemi (Marasciulo et al., 2002; Barile et al., 2004).

8.3.2 Regimazione del rio causa dell'inesco

La scala di deflusso, costituita dai parametri di portata in relazione all'altezza del livello idrico misurata nel canale, è rappresentata nella tabella 17. Si può osservare come la canaletta sia in grado di far transitare la portata di progetto per un'altezza dell'acqua di circa 0.8 m.

SEZIONE RETTANGOLARE						
Larghezza del fondo (m)	0,85					
Pendenza del fondo	5%					
k_s	70					
Tirante (m)	$A_{bagnata}$ (m ²)	$P_{bagnato}$ (m)	R (m)	v (m/s)	Q (m ³ /s)	
0,05	0,043	0,950	0,045	1,97	0,08	
0,1	0,085	1,050	0,081	2,93	0,25	
0,15	0,128	1,150	0,111	3,61	0,46	
0,2	0,170	1,250	0,136	4,14	0,70	
0,25	0,213	1,350	0,157	4,56	0,97	
0,3	0,255	1,450	0,176	4,91	1,25	
0,35	0,298	1,550	0,192	5,21	1,55	
0,4	0,340	1,650	0,206	5,46	1,86	
0,45	0,383	1,750	0,219	5,68	2,17	
0,5	0,425	1,850	0,230	5,87	2,50	
0,55	0,468	1,950	0,240	6,04	2,82	
0,6	0,510	2,050	0,249	6,19	3,16	
0,65	0,553	2,150	0,257	6,33	3,50	
0,7	0,595	2,250	0,264	6,45	3,84	
0,75	0,638	2,350	0,271	6,56	4,18	
0,8	0,680	2,450	0,278	6,66	4,53	

Tabella 17: Risultato dell'analisi di verifica della portata di progetto per la canaletta a sezione rettangolare.

I risultati relativi alla canaletta a sezione trapezia sono riportati in tabella 18.

SEZIONE TRAPEZIA						
Larghezza del fondo (m)	1,5					
Pendenza del fondo	5%					
Altezza sezione (m)	1					
Pendenza (°)	45					
k_s	50					
Tirante (m)	$A_{bagnata}$ (m ²)	$P_{bagnato}$ (m)	R (m)	v (m/s)	Q (m ³ /s)	
0,05	0,079	1,690	0,047	1,45	0,11	
0,1	0,166	1,881	0,088	2,22	0,37	
0,15	0,261	2,071	0,126	2,81	0,74	
0,2	0,365	2,261	0,161	3,31	1,21	
0,25	0,476	2,452	0,194	3,75	1,79	
0,3	0,596	2,642	0,225	4,14	2,47	
0,35	0,723	2,833	0,255	4,50	3,26	
0,4	0,859	3,023	0,284	4,83	4,15	
0,45	1,003	3,213	0,312	5,14	5,16	

Tabella 18: Risultato dell'analisi di verifica della portata di progetto per la canaletta a sezione trapezia.

Si può osservare che la canaletta è in grado di far transitare la portata di progetto, e ciò avviene per un'altezza della lama d'acqua di circa 0.41 m.

Il dimensionamento dei canali realizzati in loco è schematizzato nelle figure che seguono (Figure 55 e 56).

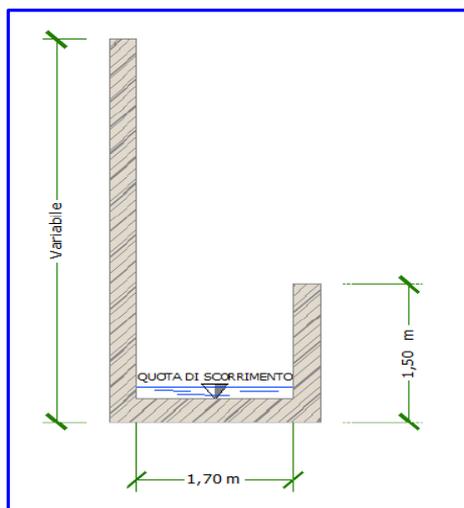


Figura 55: Dimensioni del canale a sezione rettangolare realizzata (realizzazione in Auto-CAD).

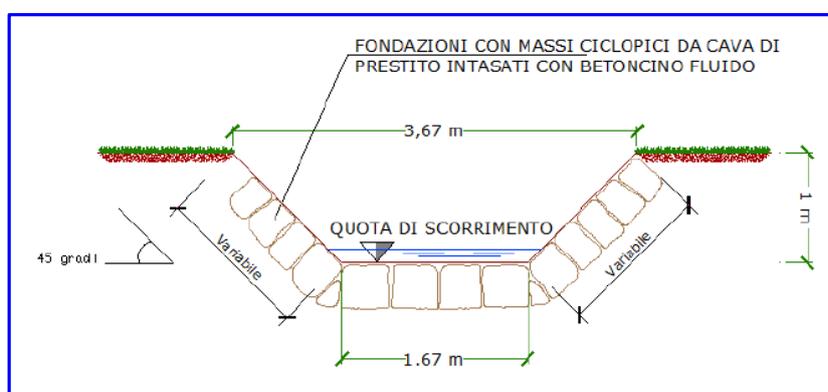


Figura 56: Dimensioni del canale a sezione trapezia realizzata (realizzazione in Auto-CAD).

Nelle seguenti figure sono invece mostrate immagini relative all'ultimazione delle opere di drenaggio: in figura 57 la sezione rettangolare e nella figura 58 la trapezia.



Figura 57: Veduta da SW (sinistra) e veduta da NE (destra) del canale di drenaggio a sezione rettangolare.



Figura 58: Veduta da S (sinistra) e veduta NE (destra) del canale di drenaggio a sezione trapezia.

8.4 Interventi strutturali eseguiti

Gli interventi necessari al ripristino del tratto ferroviario, ovvero la realizzazione di un muro di contenimento sottoscarpa e l'ammmodernamento del sistema drenante, sono stati fortemente condizionati dalla morfologia del versante: l'area di cantiere è infatti fortemente scoscesa, e risultava pertanto accessibile esclusivamente da mezzi d'opera su cingoli. Inoltre la via ottimale per il rifornimento dei materiali al cantiere risultava essere su via ferrata.

Il lavoro d'intervento è stato articolato nelle seguenti fasi:

1. Realizzazione di piste di accesso al cantiere e di collegamento tra piattaforma ferroviaria, area di costruzione del nuovo muro di sottoscarpa, ed il fossato preesistente, oggetto di regimazione idraulica.
2. Realizzazione di elementi gradonati per la protezione degli scavi, necessari per definire il piano d'imposta da utilizzarsi poi per l'attività di realizzazione di micropali e, successivamente, per realizzare il piano di imposta intradossale delle fondazioni attestata su micropali. È stato prescritto che le strutture a gradoni siano sostenute da paratie provvisorie.
3. Esecuzione di micropali di fondazione profonda e tiranti attivi di stabilizzazione del nuovo muro di sottoscarpa: il numero di micropali previsti, attestati all'interno della formazione geologica di migliori caratteristiche geomeccaniche, è stato di 204, a lunghezza $L_1 = 15$ m, caratterizzati da diametro $\varnothing = 240$ mm ed armati con tubi in acciaio 177.80 mm x 12.50 mm, disposti su quattro file ad interasse trasversale tra le file più esterne pari a $i_{t1} = 60$ cm, tra le file centrali pari a $i_{t2} = 80$ cm e ad interasse longitudinale sulla stessa fila di circa $i_l = 100$ cm.; per garantire la stabilità all'opera in progetto nei confronti di incipienti cinematismi di traslazione sub-orizzontale legata ad eventuali movimenti di versante, si è optato per l'inserimento di una fila di tiranti costituiti ognuno da n.4 trefoli da 0,60", ad interasse pari a $i = 4,00$ m lungo tutto lo sviluppo della fondazione del muro e a lunghezza pari a $L_2 = 25$ m.
4. Intervento di realizzazione del cordolo in cemento armato, a spessore $s = 0.75$ m e larghezza totale $L = 3.00$ m come parte della fondazione del nuovo muro di sottoscarpa, posizionato alla sommità della paratia di micropali.
5. Realizzazione della parte in elevazione del muro di sottoscarpa, costituito da lastre doppie semi-prefabbricate rivestite poi con elementi lapidei, a spessore $s = 0.75$ cm, altezza costante $H = 3.50$ m e lunghezza $L = 50.40$ m.

Il rivestimento ha lo scopo di incrementare, o quantomeno impedire la diminuzione, della qualità paesaggistica complessiva del luogo, nonostante il pesante impatto

antropico. Il principio perseguito è quello di garantire sempre il rispetto delle condizioni che hanno reso il progetto accettabile dal punto di vista del suo impatto ambientale. Oltre al miglioramento visivo del nuovo muro di sostegno si è provveduto al rivestimento della sezione idraulica del fossato drenante, sempre tramite un rivestimento di massi ciclopici in pietra naturale.

Si provvederà poi al recupero della naturale morfologia dei luoghi, in modo da favorire lo sviluppo dell'originaria copertura vegetale ed il ripristino dell'ecosistema naturale danneggiato dall'evento franoso.

6. Regimazione del fossato a valle del nuovo muro, e riempimento a tergo con materiale drenante reperito dalla demolizione dei ruderi del muro preesistente. L'intervento ha previsto la rimozione del materiale che occludeva la sezione del fossato, lo scavo a sezione obbligata per il ripristino di percorso idraulico e sezione idraulica del fossato stesso, il posizionamento di massi ciclopici in pietra naturale e la loro saturazione con betoncino di calcestruzzo o malta di cemento.
7. Intervento di ripristino e completamento del nuovo rilevato ferroviario. L'intervento è stato effettuato con materiale inerte "trattato" a calce e proveniente da cave di prestito, trasportato in cantiere mediante convoglio ferroviario, distribuito, compattato e rullato in sito mediante macchine operatrici.

Gli eventuali terreni di risulta dagli scavi potranno essere conguagliati in loco per la risistemazione dell'area oggetto dei lavori, al di fuori di corsi d'acqua, fossi, impluvi e linee di sgrondo delle acque, senza determinare apprezzabili modificazioni di assetto o pendenza dei terreni, provvedendo al compattamento ed inerbimento del terreno stesso ed evitando che abbiano a verificarsi fenomeni erosivi o di ristagno delle acque.

I tempi di realizzazione previsti erano stati valutati a 150 giorni, con data di consegna lavori non successiva il 30 maggio 2014.

9 VERIFICHE DI STABILITÀ ALL'EQUILIBRIO LIMITE SULLA FRANA DI CORBEZZI

Sono state eseguite le verifiche di stabilità del versante al fine di evidenziare quelle che sono le maggiori criticità a seguito della movimentazione franosa, e, successivamente, per andare ad indagare i migliori accorgimenti finalizzati alla definitiva stabilizzazione strutturale del pendio.

Si sono indagati i seguenti scenari:

1. Verifica di stabilità del versante lungo la sezione mediana, considerando il profilo, la stratigrafia, e i parametri geo-meccanici post-evento.
2. Verificata l'instabilità del versante così come si presentava dopo la frana, il profilo topografico è stato modificato, considerando una morfologia riprofilata artificialmente tramite l'introduzione di un'opera a gravità avente materiale di riporto compatto a monte.
3. Appurata l'instabilità di questa configurazione, si procede con l'inserimento di un ulteriore elemento di stabilizzazione, la palificata tirantata.
4. In ultima fase si verifica la stabilità conseguita inserendo la tavola d'acqua al limite bedrock-detrito.

I parametri geotecnici utilizzati sono quelli ricavati dalle analisi geotecniche, riassunti in tabella 19, cui sono stati applicati i coefficienti parziali per i parametri geotecnici definiti dalla normativa in vigore (colonna M2 della tabella 6.2.I. delle NTC08 in figura 32) allo scopo di rendere l'analisi cautelativa nei confronti di questi valori. In tabella sono inoltre inseriti i dati relativi al materiale di riempimento a monte del muro ("Riempimento") e del muro stesso ("Opera muraria").

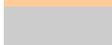
	γ_d (KN/m ³)	c (KN/m ²)	c_u progetto (KN/m ²)	Φ (°)	Φ progetto (°)	Litologia
Detrito (UNITÀ B)	18	3	2	25	20	
Bedrock (UNITÀ A)	21	3	2	35	29	
Riempimento	16	50	36	30	25	
Opera muraria	25	∞	∞	∞	∞	
Ballast	18	100	100	24	24	

Tabella 19: Parametri geotecnici dei materiali utilizzati nell'analisi di stabilità di versante.

Per l'opera a gravità l'opzione di resistenza al taglio adottata è l'"Infinite Strength" disponibile in *Slide*, che pone $\tau = \infty$, mentre per gli altri materiali è considerato il criterio classico di Mohr-Coulomb.

Il peso della massicciata, dell'armamento e dell'impermeabilizzazione è assunto pari ad un peso di volume di 18.0 kN/m³ (Masi, 1996; Toraldo, 2015): tale valore è stato attribuito in al materiale corrispondente al "Ballast" nella modellazione di stabilità.

La presenza della tavola d'acqua, non essendo stata individuata in corso di sondaggio per tutta la profondità di indagine di 20 m, è stata infine analizzata in via cautelativa sottostante al limite bedrock-detrito.

9.1 Carichi

I carichi verticali ferroviari sono schematizzati per mezzo di modelli di carico: in particolare per quel che riguarda il traffico normale (Treno di carico LM 71), viene assunto un carico verticale q_{vk} pari a 80 kN/m, qui inserito in tutte le verifiche di stabilità eseguite tramite l'opzione "distributed load" (Masi, 1996; Toraldo, 2015).

9.2 Verifica di stabilità del versante post-evento

In figura 59 viene illustrato l'esito della verifica di stabilità del versante successivamente alla movimentazione franosa: com'è possibile notare il profilo, in queste condizioni, è instabile, con un Fattore di Sicurezza F_s uguale a 0.642. L'analisi è stata eseguita utilizzando l'approccio risolutivo dell'Equilibrio Limite Globale di Morgenstern-Price. Possiamo osservare come la superficie di scorrimento individuata come quella a minimo F_s presenti una profondità massima di circa 5 metri, paragonabile allo spessore di materiale mobilizzato dal dissesto avvenuto.

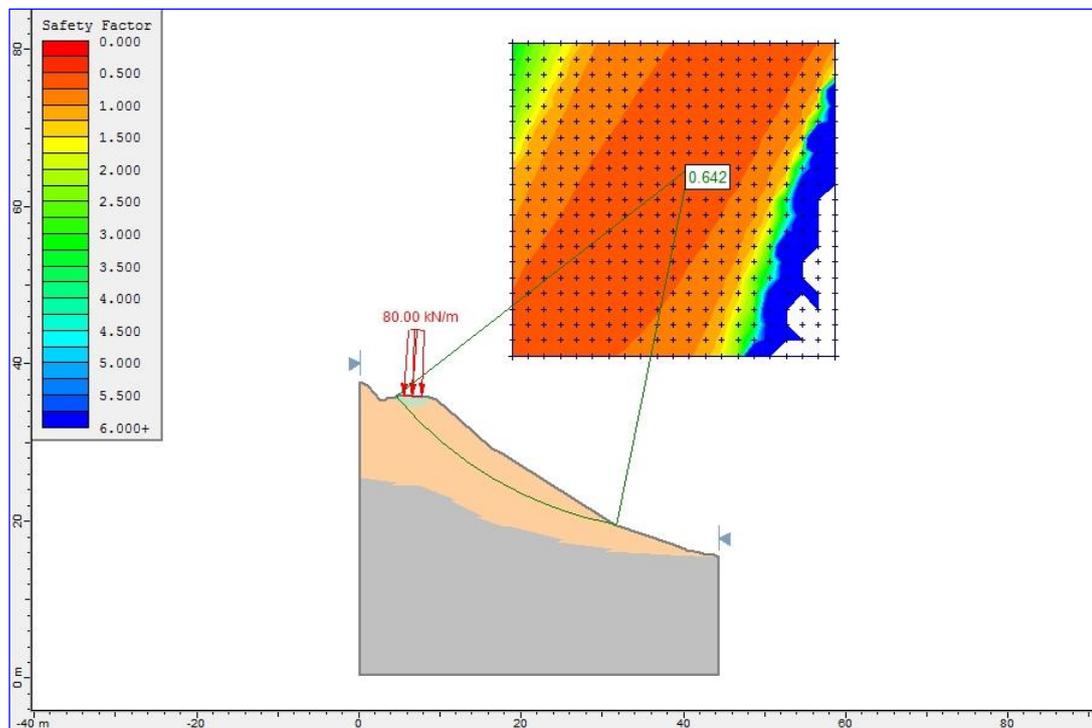


Figura 59: Output dell'analisi di stabilità all'Equilibrio Limite del versante con profilo naturale.

9.3 Verifica di stabilità del versante riprofilato e con opera a gravità

Il peso dell'unità dei volume del materiale granulare utilizzato come riempimento è pari a 16 kN/m^3 , mentre la sua coesione è stata aumentata a seguito del compattamento eseguito dai mezzi meccanici in sito.

Il muro di sostegno presenta un peso dell'unità dei volume di 25 kN/m^3 e la sua resistenza alla rottura è presupposta infinita.

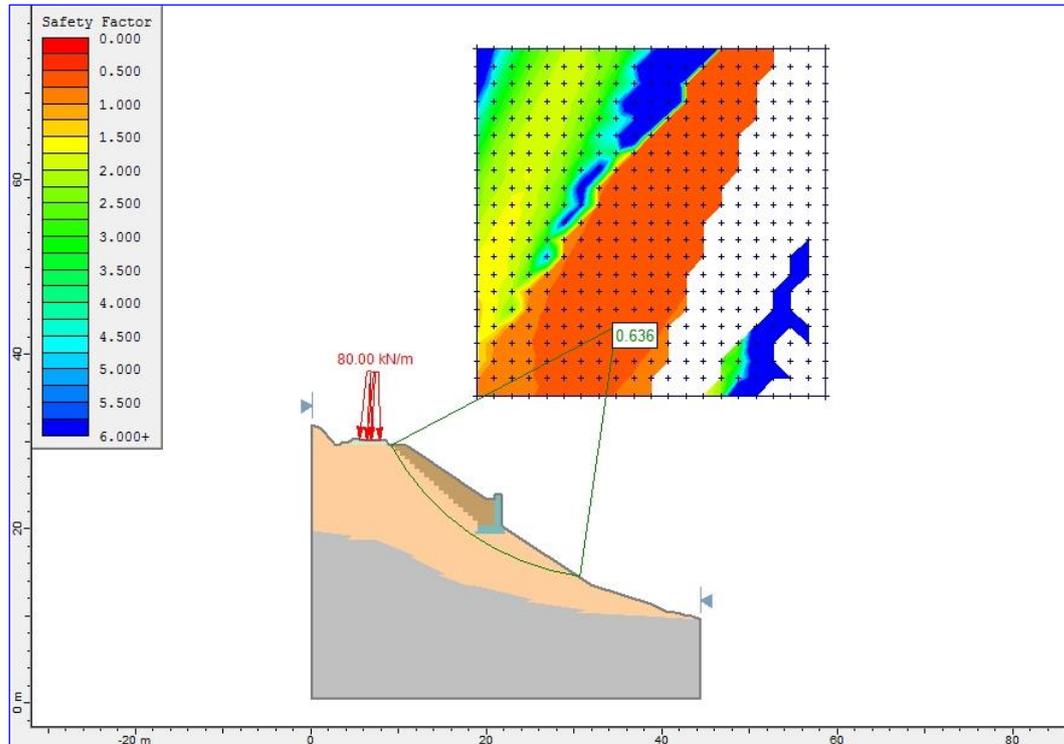


Figura 60: Output dell'analisi di stabilità all'Equilibrio Limite del versante riprofilato con opera a gravità.

Anche in questa situazione (Figura 60) il fattore di sicurezza ottenuto tramite la risoluzione Morgenstern-Price risulta a discapito delle Forze resistenti, con un valore di 0.636. Questo perché l'inserimento di un'opera di sostegno non è sufficiente: nonostante la rimozione del materiale instabile, a scadenti proprietà meccaniche, e la sostituzione con un terreno riportato compattato, il muro agisce come un carico che va a gravare sulla zona di taglio.

La soluzione è quindi quella di sfruttare le resistenze del substrato stabile.

9.4 Verifica di stabilità del versante riprofilato e con opera a gravità fondata su palificata tirantata

Come è possibile notare in figura 61 viene raggiunto un valore del fattore di sicurezza superiore la soglia di sicurezza solo per mezzo di ulteriori interventi.

Un sistema di pali trasferisce i carichi di fondazione direttamente al bedrock, oltrepassando il mezzo meccanicamente più debole costituito dal detrito di versante. Questa misura risulta indispensabile, soprattutto considerando la causa d'innescio del fenomeno: il reticolo di pali ha infatti lo scopo di impedire lo scalzamento e il ribaltamento del muro in condizioni di regime idraulico superficiale critico. I pali agiscono in modo passivo sul sistema, ovvero aumentando le resistenze disponibili dei materiali.

L'interdistanza longitudinale assegnata ai micropali in fase di progettazione è di 1 m, quella trasversale variabile tra 0.6 e 0.8 m, mentre la lunghezza è di 16 metri. Il ruolo fondamentale nel raggiungimento della stabilità di versante è giocato dalla resistenza al taglio del palo: essa è risultata, dai calcoli effettuati in fase di progettazione, pari a 636 kN.

Gli ancoraggi tensionati, infissi in corrispondenza del cordolo di unione della testa dei pali, hanno lo scopo di diminuire la spinta del terreno agente sul muro. Gli ancoraggi sono stati dimensionati di 25 metri di lunghezza, interdistaziati di 4 m e hanno una capacità di ancoraggio pari a 200 kN.

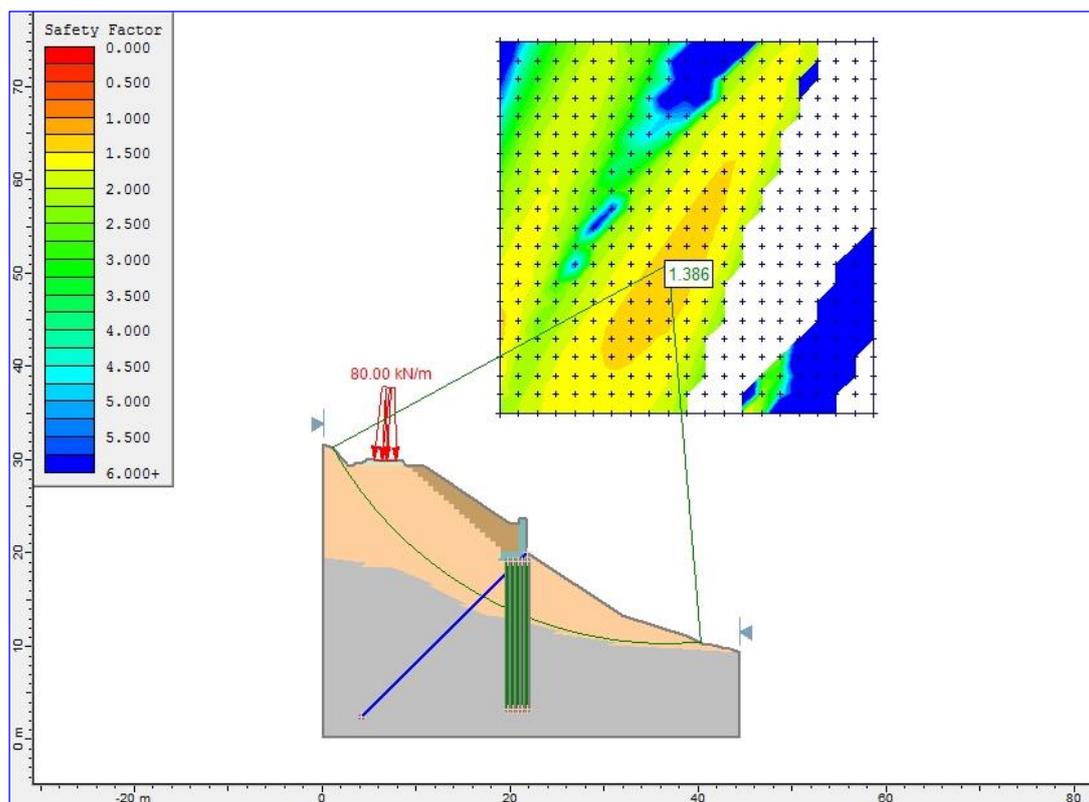


Figura 61: Output dell'analisi di stabilità all'Equilibrio Limite del versante riprofilato con opera a gravità fondata su palificata tirantata.

9.5 Verifica di stabilità del versante riprofilato e con opera a gravità fondata su palificata tirantata, con presenza della tavola d'acqua al limite bedrock-detrito

È stata infine analizzata la condizione di stabilità più critica per il versante: quella in cui la tavola d'acqua è presente al limite bedrock-detrito (Figura 62). Una situazione in cui falda si presenti ad un'altezza maggiore è da escludere, in quanto non è stata rilevata acqua in corso di sondaggio.

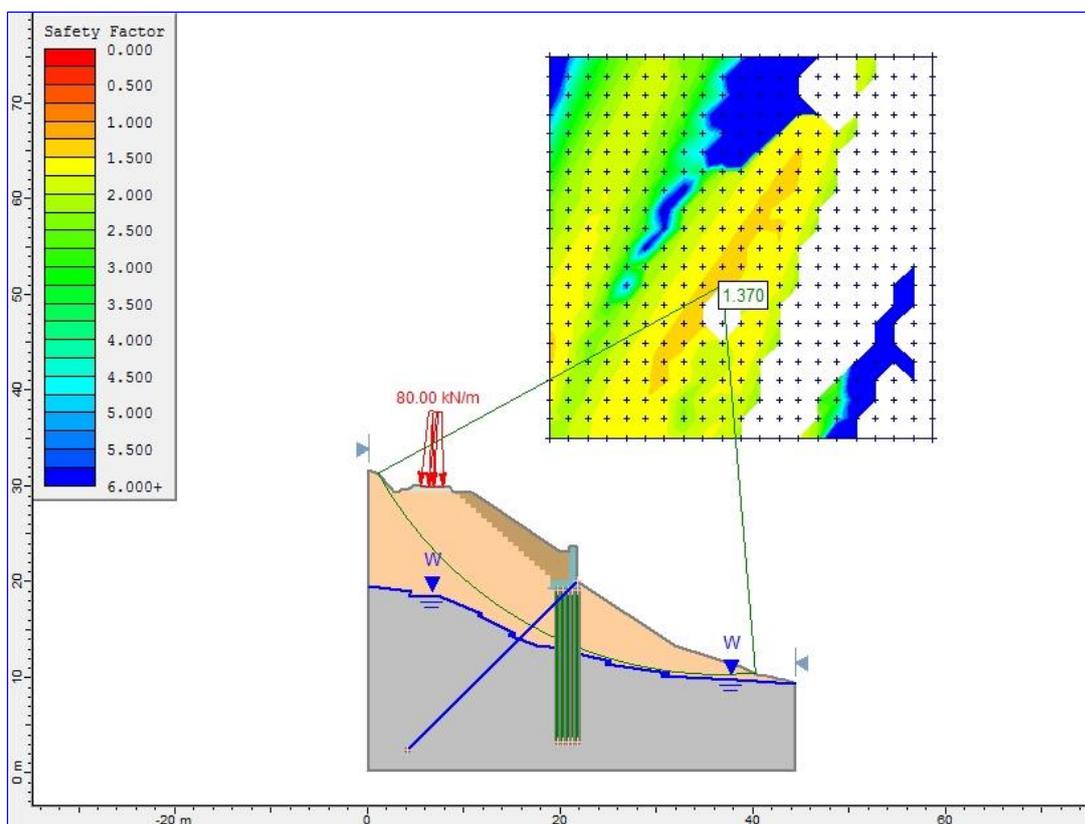


Figura 62: Output dell'analisi di stabilità all'Equilibrio Limite del versante riprofilato con opera a gravità fondata su palificata tirantata in presenza di falda al limite bedrock-detrito di versante.

Anche in questo caso il rapporto tra la resistenza al taglio e lo sforzo di taglio agente risulta a favore di stabilità, con un valore pari a 1.370.

La configurazione impostata definirebbe quindi il versante come “stabile” anche in caso di livello della falda sfavorevole.

10 IL REINSERIMENTO AMBIENTALE

Di seguito è riportata l'analisi dei caratteri paesaggistici dell'area di intervento, fondamentale per definire i criteri di costruzione delle opere di stabilizzazione, al fine di ottenere un armonioso inserimento delle stesse nel contesto ambientale.

10.1 Caratteristiche del paesaggio

Il mosaico paesistico della provincia di Pistoia è caratterizzato dall'evidente prevalenza dei boschi nelle aree montane settentrionali e in tutto l'arco collinare. Il paesaggio agrario e forestale storico è caratterizzato da formazioni forestali a faggete, alle quote montane maggiori e, più in basso, castagneti. Il paesaggio collinare presenta boschi a prevalenza di latifoglie decidue mesofile e sciafile sui versanti esposti a settentrione, e spesso vi è traccia di un ordinamento precedente a coltura mista sui ciglioni. Il ciglionamento dei rapidi versanti collinari ad olivo costituisce un connotato strutturale di grande rilevanza sul piano semiologico, oltre che su quello preminente della difesa idrogeologica.

Le colture agrarie miste si dispongono in stretta corrispondenza con i rilievi collinari e submontani, mentre quelle specializzate sono prevalenti in pianura.

Nelle vallecole che si aprono sulla pianura pistoiese, come l'area sede di esame, nell'ambito di un mosaico agrario dominato dall'oliveto, si svolge una agricoltura tradizionale.

Oltre all'importanza della piana con l'insediamento storico di Pistoia è da sottolineare la peculiarità dell'ambito territoriale dei versanti collinari e submontani, strutturati da una rete infrastrutturale e insediativa di carattere storico che presenta un sostanziale equilibrio paesistico. Tali ambiti hanno un valore di testimonianza e svolgono una essenziale funzione ambientale di connessione fra quelli di pianura più intensamente coltivati e la fascia pedecollinare. La zona a nord della città di Pistoia è costituita da un "Paesaggio di Eccellenza" per le sue caratteristiche (Regione Toscana, 2009a).

Il territorio che contorna gli abitati di Casciano e Corbezzoli è ricco di testimonianze storiche dell'insediamento umano, come ad esempio la coltivazione a terrazzamento e ciglioni degli olivi (Figura 63), i boschi di castagni (Figura 64), e gli edifici storici.



Figura 63: Oliveto limitrofo all'area oggetto d'esame.

Nonostante l'alto valore ambientale, nella zona circostante l'evento di frana sono stati riscontrati innumerevoli elementi che testimoniano l'abbandono dell'area: dal punto di vista

dell'agricoltura è evidente come la produzione si limiti al mantenimento delle coltivazioni olivicole, il totale abbandono dei castagneti, come dell'attività di selvicoltura, con sottoboschi pervasi da robinia e rovi.

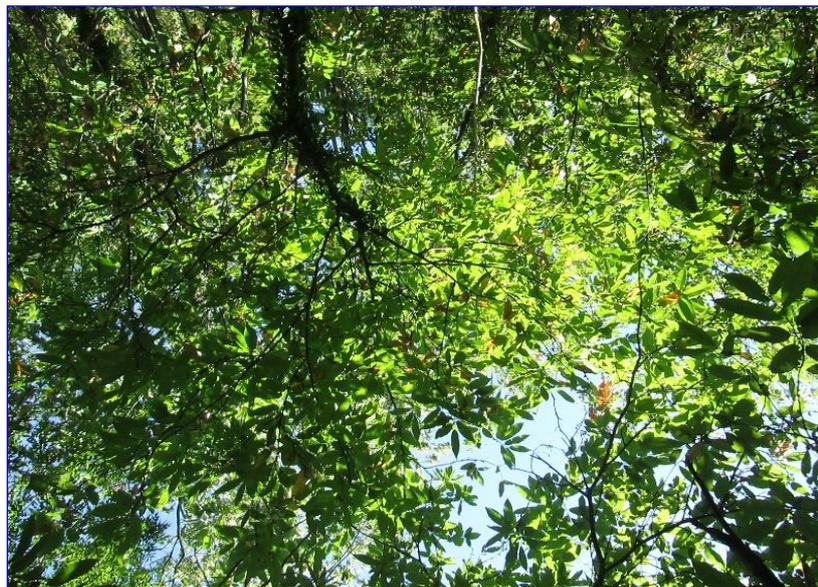


Figura 64: Castagneto in abbandono nel bosco sottostante l'area del dissesto.

Le comunità vegetazionali presenti in corrispondenza dell'area in esame sono caratterizzate dalla presenza di un soprassuolo boschivo tipicamente dominato da *Quercus cerris* (Cerro), a cui si associano latifoglie mesofile quali *Quercus pubescens* (Roverella), *Acer campestre* (Acer campestre) e *Castanea sativa* (Castagno).

La specie più diffusa è Robinia pseudoacacia (Acacia o Robinia).

Tra le specie arbustive costituenti il sottobosco sono state individuate: *Crataegus monogyna* (Biancospino), *Lonicera caprifolium* (Caprifoglio), *Rubus ulmifolius* (Rovo), *Cornus sanguinea* (Sanguinella), *Ligustrum vulgare* (Ligustro), *Rosa canina* (Rosa canina) e *Prunus spinosa* (Prugnolo).

10.2 Il contesto storico-culturale e architettonico

Il territorio è caratterizzato dalla presenza di elevate valenze ambientali e naturalistiche e da particolari categorie di beni che possono essere definite come risorse del territorio da un lato e elementi fondamentali del paesaggio dall'altro: l'acqua, i boschi, i crinali ed il sistema podereale. Questi territori collinari e montani sono stati abitati o percorsi fin dall'epoca romana ed alto medioevo; le risorse storiche e culturali si sono sedimentate sul territorio in uno stretto rapporto con esso e con le sue risorse naturali costituendo un non comune patrimonio di monumenti, fabbriche e infrastrutture pubbliche.

In epoca medioevale si tracciarono i percorsi di valico che dall'alta valle dell'Ombrone si dirigevano verso la Lucchesia e i territori bolognesi e modenesi. Lungo questi antichi tracciati iniziarono a sorgere gli insediamenti sparsi. Successivamente si consolidarono i nuclei antichi e se ne formarono di nuovi intorno agli insediamenti delle ferriere che hanno fortemente segnato il territorio in termini di interventi sulle acque e sul patrimonio boschivo. I nuclei e le case sparse di valore storico costituiscono una presenza continua e costante su tutto il territorio: l'edilizia rurale è essenziale, fortemente caratteristica e generalmente ben inserita nell'ambiente circostante, che si è sviluppata nel tempo da insediamenti medioevali

fino alle abitazioni delle bonifiche montane gli appoderamenti della seconda metà dell'800 e della prima metà del '900.

Montagne e colline pistoiese sono interessate storicamente dal fenomeno dell'emarginazione sociale, culturale ed economica nei confronti della città: il territorio, caratterizzato da piccoli e sparsi nuclei, è sempre stato soggetto al fenomeno dello spopolamento.

L'economia montana si basava essenzialmente sulla produzione del carbone di legna e della legna da ardere; la scarsa attività agricola era compensata dalla pastorizia e dalla produzione delle castagne.

Verso la metà del 1700 l'apertura della strada regia modenese determinò un lungo periodo di sviluppo del territorio corrispondente alle aree delle valli del Reno,

del Bardalone, Limestre e Lima (tratto della Modenese compresa fra le Piastre e l'Abetone).

L'apertura della ferrovia "Porrettana" nel 1865 costituì il motivo del rilancio economico dei paesi della Valle del Reno (Pracchia e Piteccio). Oggi il progressivo abbassamento delle produzioni di tipo industriale localizzate nella montagna dovuto al cambiamento dei metodi di lavorazione, allo sfruttamento di altre fonti di energia, alla diminuzione della domanda di castagne e della loro farina e alla minore utilizzazione della legna da costruzione determina un nuovo esodo dei lavoratori che per il miglioramento dei collegamenti è diventato pendolarismo.

Il turismo, invernale (Abetone e Pian di Novello) ed estivo (S. Marcello, Cutigliano, Gavinana e Maresca) rimane l'unica risorsa per l'economia montana che però spesso produce fenomeni di degrado ambientale (rifacimenti e ampliamenti che portano alla perdita dei caratteri tipologici e dei repertori costruttivi tradizionali ed ad alterazioni della compagine ambientale).

La conservazione dei centri montani e dei relativi valori paesistici sono collegati ai problemi generali legati all'economia della zona ed alle condizioni delle popolazioni residenti (Regione Toscana, 2009b).

10.3 Documentazione fotografica dello stato attuale

In figura 65 è stata elaborata una raffigurazione dei punti di presa di immagini fotografiche su CTR: lo scopo dell'inserire fotografie, scattate da diverse posizioni e angolazioni, nella relazione paesaggistica è quello di restituire le caratteristiche principali dell'ambiente che circonda il luogo in cui si vuole intervenire, cercando di coglierne gli aspetti caratteristici, di modo da tenerne conto in fase progettuale e tentarne il ripristino a intervento ultimato.

Le immagini delle figure 66 e 67, ad esempio, inquadra alcuni aspetti chiavi del paesaggio della collina pistoiese citati in precedenza, quali i piccoli centri rurali immersi nei boschi e i terrazzamenti creati dall'uomo nei secoli: questi impatti visivi risultano importanti per la cultura territoriale, e devono essere preservati.

Ma osservando le immagini successive ci si può rendere immediatamente conto di come non sia stato possibile evitare la costruzione delle opere di sostegno al rilevato. In figura 68 innanzitutto è focalizzata l'attenzione sul la porzione di versante franato: tale situazione non solo risulta un pericolo al transito ferroviario, in quanto si tratta di una massa di terreno a Fattore di Sicurezza ancora inferiore all'unità, ma, focalizzandoci sugli aspetti paesaggistici, è dannosa anche per gli elementi che valorizzano il territorio sopraccitati, come la coltivazione a terrazzamenti degli oliveti. Un paesaggio simile, inoltre, non può essere considerato congruo all'ambiente circostante nemmeno dal punto di vista puramente visivo.

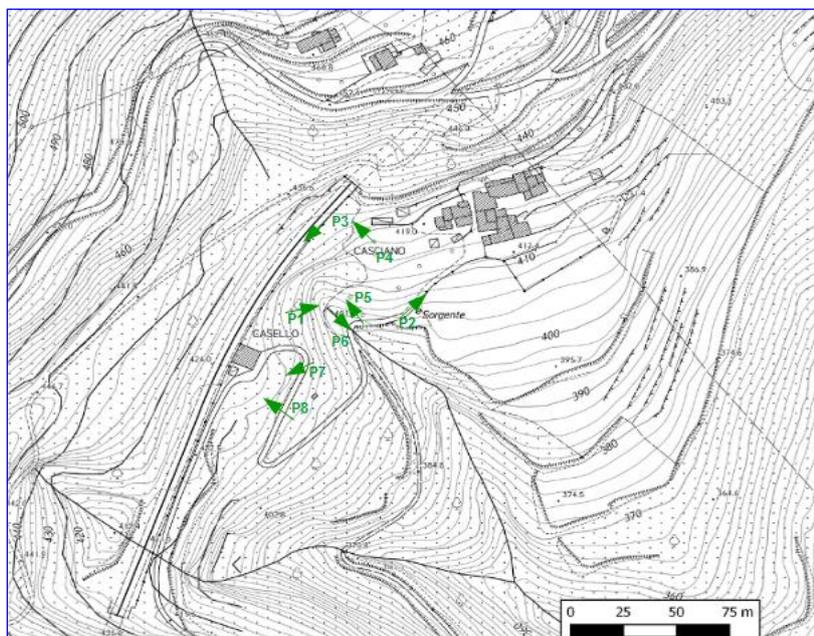


Figura 65: Ubicazione dei punti di osservazione in CTR 1:2.000 (Fonte metadati: Regione Toscana, 2007b).



Figura 66: Punto di osservazione P1.



Figura 67: Punto di osservazione P2.

La figura 69 mostra un altro aspetto fondamentale della situazione che si era venuta a creare: la mancata manutenzione delle zone limitrofe l'area di frana. È qui mostrata una galleria di sottopassaggio al binario, in prossimità della galleria "Casciano", che doveva essere utilizzata per gli interventi di controllo e pulizia del sistema ferroviario. Le pessime condizioni in cui versava al momento dell'innescò della frana sono il segno dell'incuria generale dell'area. Il sottopassaggio si presentava allagato, a testimoniare una non corretta regimazione delle acque superficiali.



Figura 68: Punto di osservazione P3.



Figura 69: Punto di osservazione P4.



Figura 70: Punto di osservazione P5.

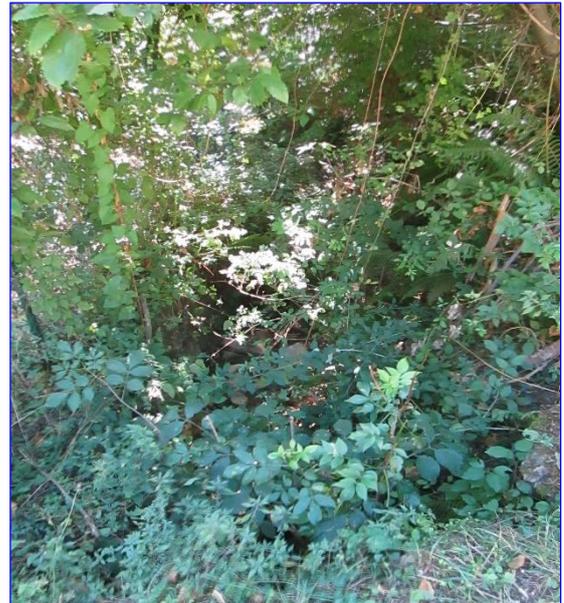


Figura 71: Punto di osservazione P6.

La figura 70 mostra proprio le conseguenze di questo deflusso incontrollato in corrispondenza della parte basale della frana, il giorno dopo il dissesto. La figura successiva (Figura 71) mostra lo stato totale di abbandono di questo canale, fondamentale al corretto drenaggio del corpo del versante.

Le figure 72 e 73 danno ancora uno scorcio delle strutture a ciglionamenti realizzate nelle immediate vicinanze della frana (settore SW): come è possibile osservare, un'incontrollata gestione del dissesto ne avrebbe quasi certamente causato lo smantellamento. Si sarebbe potuto realizzare inoltre l'abbandono di queste strutture: ciò avrebbe portato non solo alla perdita dei elementi così cari al paesaggio toscano, ma anche ad un aggravio delle condizioni di deflusso superficiale del versante, che terrazzi e ciglioni hanno lo scopo di regimare.



Figura 72: Punto di osservazione P7.



Figura 73: Punto di osservazione P8.

10.4 Misure di Mitigazione

Le opere di mitigazione e compensazione si fondano sul principio per il quale ogni intervento deve essere finalizzato ad un miglioramento della qualità paesaggistica complessiva dei luoghi, o, quantomeno, deve garantire che non vi sia una diminuzione delle sue qualità, pur nelle trasformazioni. In particolare gli impatti ambientali previsti devono essere ridotti o comunque contenuti, affinché la loro entità si mantenga sempre al di sotto di determinate soglie di accettabilità.

È stata considerata l'importanza della rete ferroviaria per la Regione Toscana, che non consiste solo nell'essere strumento fondamentale per la viabilità, ma anche nell'essere parte integrante del paesaggio: la rete infrastrutturale storica, infatti, non è considerata come un elemento estraneo al territorio in cui è inserita, ma vi rientra in modo armonioso e ne fa parte in modo "strutturale" (Regione Toscana & Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo, 2014a; Regione Toscana, Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo, 2014b). In particolare la linea di traffico locale Pistoia - Bologna Porrettana è una rete ferroviaria di impianto storico, avente caratteri architettonici e costruttivi caratteristici, in armonia con tradizione e materiali locali.

L'intervento di mitigazione dell'impatto ambientale dell'opera (Figura 74) ha previsto quindi la realizzazione della parte in elevazione del muro di sottoscarpa in lastre doppie semi prefabbricate e rivestite in elementi lapidei, mentre per l'intervento di regimazione del corso d'acqua, è previsto il rivestimento della sezione idraulica in massi ciclopici in pietra naturale.

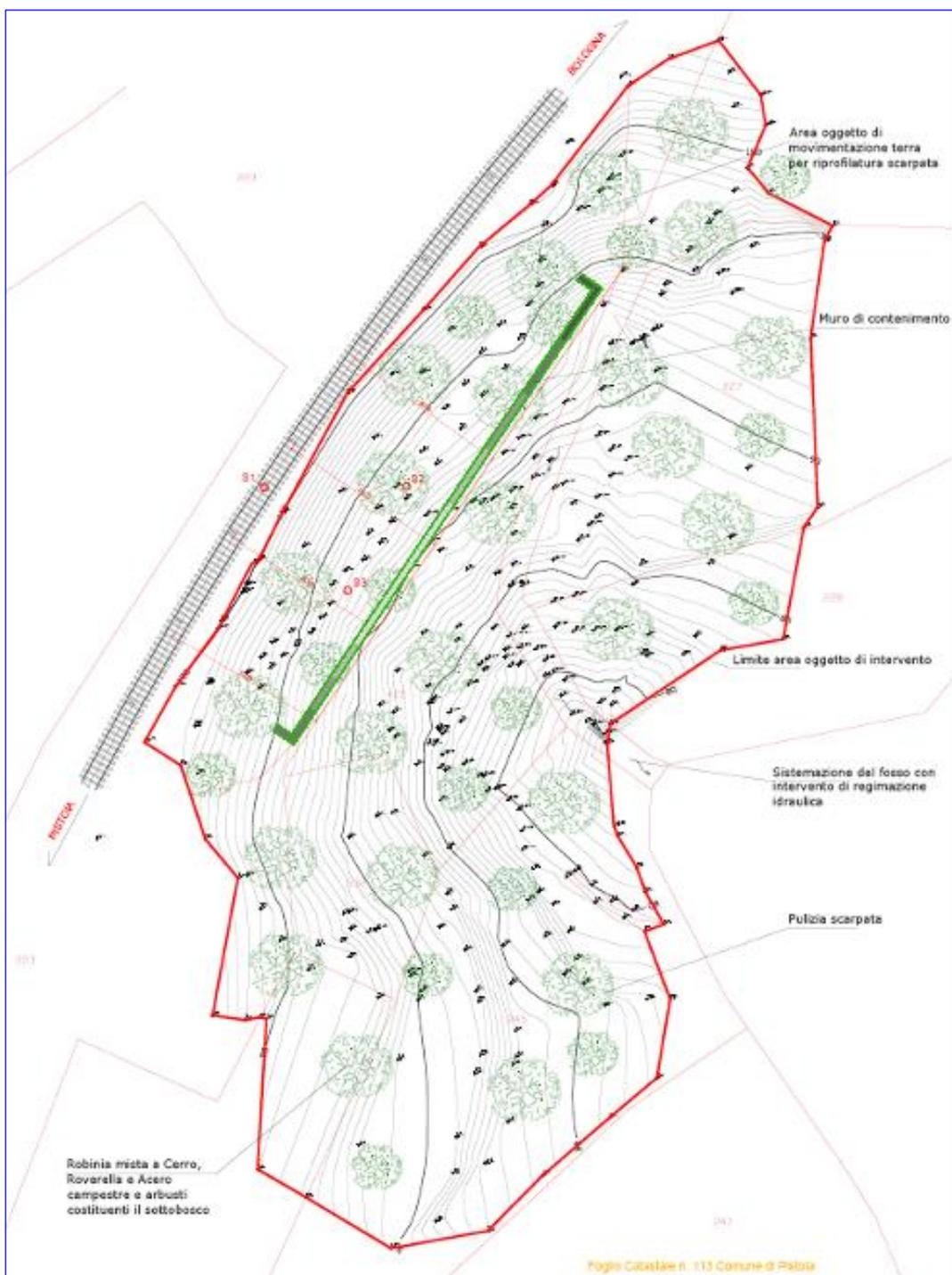


Figura 74: Progettazione degli interventi di mitigazione (Fonte metadati: Regione Toscana, 2012c).

Al termine delle lavorazioni si provvederà al recupero, per quanto possibile, della naturale morfologia dei luoghi, in modo da favorire lo sviluppo dell'originaria copertura vegetale ed il ripristino dell'ecosistema naturale danneggiato dall'evento franoso. La copertura arborea ha infatti il duplice effetto di ottenere un occultamento visivo parziale delle opere realizzate e favorire un maggior inserimento nel contesto del paesaggio esistente, in particolare se si tratta di specie caratteristiche della zona.

Sono state realizzate elaborazioni di immagini fotografiche, acquisite a seguito della movimentazione franosa, allo scopo di comprendere quello che sarà l'impatto visivo dell'opera. Nelle figure 75 e 76 è mostrata, ad esempio, la veduta del versante ad opera realizzata e rinverdito.



Figura 75: Simulazione fotorealistica del versante ripristinato dopo la realizzazione delle opere



Figura 76: Simulazione fotorealistica del versante ripristinato dopo la realizzazione delle opere

L'analisi effettuata nel territorio di interesse ha riscontrato l'esistenza di un sistema ambientale e storico caratteristico, che deve essere salvaguardato.

La realizzazione del progetto, non produrrà un'alterazione in senso negativo della percezione visiva del sistema paesaggistico, ma la migliorerà, operando una riqualificazione versante: dall'eliminazione dei sistemi infestanti, introducendo elementi vegetali tipici della montagna pistoiese, alla realizzazione degli elementi strutturali rivestiti con materiali caratteristici in sintonia con la tradizione delle vallate.

Le soluzioni atte alla minimizzazione dell'impatto visivo e paesaggistico ricercate in fase di progettazione sono quindi state:

- riutilizzo del materiale del vecchio muro di contenimento franato;
- rivestimento in pietra naturale delle opere progettate;
- piantumazioni di specie autoctone che andranno a schermare i manufatti.

Per quanto esposto e per le analisi presentate, è possibile affermare che l'intervento risulta "compatibile" nei confronti dei valori paesaggistici riconosciuti dal vincolo, "congruo" con i criteri di gestione dell'area.

11 CONCLUSIONI

L'evento franoso che ha coinvolto il rilevato ferroviario in prossimità della galleria Casciano, nella frazione di Corbezzi, ha fornito l'opportunità per lo svolgimento di questo lavoro di tesi, in cui sono state analizzate ed elaborate molte delle fasi che conducono alla realizzazione di un intervento di stabilizzazione di versante. Il particolare contesto territoriale ha creato inoltre le condizioni per l'approfondimento di aspetti legati all'impatto paesaggistico di questa tipologia di opera.

Per quanto riguarda la stabilizzazione del versante, sono stati innanzitutto analizzati i classici temi inerenti la raccolta dei dati in sito, la loro elaborazione, per poi procedere alla ricerca della soluzione ottimale tramite la modellazione 2D.

L'area, tramite il rilevamento geologico, è risultata suscettibile dal punto di vista idrogeologico a causa delle coltri superficiali, in quanto gli strati della formazione torbiditica dell'Acquerino, che ne costituisce il substrato, sono a reggipoggio o traverpoggio rispetto al versante. La causa predisponente l'instabilità è quindi da ricollegarsi all'erosione dei materiali detritici operata dal deflusso superficiale.

Alla base dello sviluppo dell'innescò è infatti stato individuato questo meccanismo, che avrebbe agito tramite flusso turbolento asportando il materiale di fondazione del vecchio muro di sostegno al rilevato, provocandone il ribaltamento. La conferma di questa ipotesi è stata derivata tramite l'analisi dei dati raccolti in sito e delle stazioni pluviometriche. Lo studio dell'evento piovoso occorso a inizio Gennaio 2014, effettuato tramite l'elaborazione dei dati derivanti da tre stazioni pluviometriche, ha collocato l'innescò della movimentazione franosa in corrispondenza del picco di precipitazione. Ciò nonostante il materiale che costituisce il rilevato è risultato essere un mezzo drenante, in quanto i dati piezometrici hanno rilevato l'assenza della falda freatica al di sopra dei 20 m di profondità. Questo fatto preclude quindi la possibilità di un innescò causato dall'aumento del gradiente idraulico su di una potenziale superficie di scorrimento.

Comprese le cause dell'attivazione, si è passati alla fase di verifica delle opere realizzate. Sono state innanzitutto analizzate le tipologie di opere realizzate in sito, le loro caratteristiche, e definendo quali di esse agiscano sulle forze agenti e quali su quelle resistenti. Si è andati poi a condurre la fase di verifica di tali opere. Lo studio delle indagini in sito che erano state effettuate in fase progettuale ha condotto alla modellazione di un versante costituito da un sistema a due unità. La prima è costituita dalla coltre detritica di versante e di derivazione antropica, rappresentata da limi sabbiosi con inclusi di natura siltitica ed arenacea, la seconda, il bedrock, in prevalenza composta da siltiti debolmente marnose di colore grigio-grigio scuro, laminate ed alternate a livelli di materiale di alterazione argilloso-marnoso.

Di queste sono stati derivati i parametri geotecnici, che, dopo la riduzione tramite l'applicazione dei coefficienti parziali secondo la normativa italiana vigente, sono stati utilizzati come dati di input alla modellazione di stabilità del versante. L'analisi effettuata tramite il software *Slide* della *Rocscience*, ha verificato diversi scenari tramite l'applicazione del metodo risolutivo dell'Equilibrio Limite Globale di Morgenstern-Price:

1. In primo luogo si è verificata la stabilità del versante subito dopo l'evento di movimentazione, quindi senza alcun tipo di intervento sul profilo topografico, per la quale il Fattore di Sicurezza è risultato inferiore all'unità;
2. Di nuovo il F_s è risultato negativo se modellizzata la riprofilatura del versante e la realizzazione di un muro di sostegno avente alle spalle materiale di riporto compattato;

3. Il raggiungimento della soglia di sicurezza si ha solo tramite l'inserimento di strutture fondali profonde, nello specifico del reticolo di micropali, e di ancoraggio attivo, ovvero tiranti, inseriti lungo la base del muro;
4. In ultimo luogo si è voluta verificare la condizione di livello della falda al limite tra substrato e detrito, risultata anch'essa a favore di stabilità.

Al conseguimento ottimale della stabilità del versante concorre anche la corretta progettazione delle opere di deflusso superficiale. A questo proposito è stata innanzitutto studiata l'idrologia del bacino interessato dal dissesto, per il quale è stata definita la portata di colmo, tramite il metodo "Cinematico", pari a $4.53 \text{ m}^3/\text{s}$, in condizioni di tempo di ritorno dell'evento piovoso di 200 anni e considerando la quota corrispondente alla base del muro progettato come sezione di chiusura del suddetto bacino. Sono state poi dimensionate le canalette di scolo delle acque, una a geometria rettangolare ed una trapezia, tali da poter allontanare tale portata.

L'analisi paesaggistica, infine, ha dimostrato che l'intervento in esame non ricade in aree protette, tuttavia rientra nel vincolo di "area coperta da foreste e boschi": per sopperire all'impatto visivo occorrono quindi interventi di mitigazione. I provvedimenti atti alla mitigazione dell'effetto di opere antropiche impattanti su aree rurali o di interesse agroforestale, prevedono l'impiego di misure di compensazione: ciò significa dover integrare le opere all'ambiente circostante.

In primo luogo deve essere elaborata un'accurata selezione dei materiali di rivestimento per l'opera muraria ed il sistema drenante, nel rispetto della tradizione storica del territorio, ed evitando quindi di lasciare elementi di calcestruzzo in vista. In secondo luogo dovranno essere operate misure di rinverdimento del versante con specie autoctone, con lo scopo di conciliare la visione dell'opera al il paesaggio circostante.

12 BIBLIOGRAFIA

- ♣ Anselmo V, Comedini M., NATAMS, Guerrieri L., Pascarella F., 2004. Atlante delle opere di sistemazione fluviale. I.G.E.R srl, Roma, 27: 172 p.
- ♣ Aronica G. T., 2015. Lezione XIII - I metodi indiretti per la valutazione delle portate a colmo di piena (I modelli di trasferimento del deflusso). Corso di idrologia delle piene. Università di Messina.
- ♣ Bartolini C., 1980. Su alcune superfici sommitali dell'Appennino Settentrionale (prov. di Lucca e di Pistoia). Geogr. Fis. Dinam. Quat., 3: 42-60.
- ♣ Begemann H., 1974. General Report: Central and Western Europe. ESOPT, Stockholm, 2.1: 29-39.
- ♣ Berti M., 1999. Appunti di...Analisi di Stabilità dei Versanti all'Equilibrio Limite. Corso di aggiornamento professionale per l'Ordine Regionale dei Geologi dell'Emilia-Romagna, Bologna, 49 p.
- ♣ Berti M., 2011. Appunti e riferimenti alle presentazioni PowerPoint in allegato - Materiale didattico per il corso di Stabilità dei versanti. Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali. Università degli studi di Bologna. Versione 4.0.
- ♣ Bosellini A., 2011. Storia geologica d'Italia, gli ultimi 200 milioni di anni. Zanichelli, Bologna, 183 p.
- ♣ Bettelli G., Boccaletti M., Cibin U., Panini F., Poccianti C., Rosselli S., Sani F., 2005. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia 1.50.000. Foglio 252 "Barberino di Mugello". Serv. Geol. d'It. Regione Emilia Romagna. S.EL.CA. s.r.l., Firenze: 130 p.
- ♣ Cibin U., Poccianti C. & Rosselli S., 1997. Sistemi deposizionali torbiditici nell'avanzata miocenica dell'Appennino settentrionale (Arenarie del Cervarola, Aquitaniano-Langhiano inferiore). Geitalia, 1° Forum FIST, 2: 94-95.
- ♣ Cruden D. M., Varnes D. J., 1996. Landslides Types and Processes. In: Turner A.K., Schuster R.L. (Eds), Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board Special Report 247. National Academy Press, WA: 36-75.
- ♣ Deidda R., 2012. Capitolo 8, Modelli idrologici - Appunti delle lezioni di Idrologia. Università degli Studi di Cagliari.
- ♣ D.M. 14 Gennaio 2008, Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC).
- ♣ D.P.C.M. 12 Dicembre 2005, Individuazione della documentazione necessaria alla verifica della compatibilità paesaggistica degli interventi proposti - Allegato, n° 42.
- ♣ Elter F. M., Schiera L., Spinelli E., 1995. Caratteri geometrici delle pieghe associate alla fase "post-nappe" nell'Unità di Monticiano-Roccastrada nel sottosuolo delle aree geotermiche di Larderello e M.te Amiata (Toscana meridionale). Atti Soc. tosc. Sci. Nat., Mem., Serie A, 102: 61-66.
- ♣ Facciorusso J., Madiari C., Vannucchi G., 2007. Capitolo 18, Stabilità dei pendii - Dispense di Geotecnica. Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Sezione Geotecnica. Università degli Studi di Firenze.
- ♣ Facciorusso J., Madiari C., Vannucchi G., 2011. Capitolo 12, Indagini in foro - Dispense di Geotecnica. Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Sezione Geotecnica. Università degli Studi di Firenze.
- ♣ Fredlund F.K., Krahn J., 1977. Comparison of slope stability methods of analysis. Canadian Geotechnical Journal, 14: 429-439.
- ♣ Froidi P., 2015. Dissesto idrogeologico e stabilità dei versanti. Consolidamento dei pendii con palificate. Analisi e progettazione. Maggioli Editore. 246
- ♣ Girelli M., 2008. Stabilizzazione dei movimenti franosi mediante pali discreti. Tesi di laurea in geotecnica LS, Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile –

- Strutture, Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento, del Territorio – DISTART, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Bologna, 192 p.
- ▲ Kearey P., Brooks M., Hill I., 2002. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science Ltd, Oxford: 117-119.
 - ▲ Lisjak A., 2007. *Appunti di Idrologia Tecnica - Corso di Idrologia Tecnica*. Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Ambientale e del Territorio. Università degli studi di Trieste: 37-49.
 - ▲ MacKee T. B., Doesken N. J., Kliest J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology*, 17-22 January, Anaheim, CA. American Meteorological Society, Boston, MA, pp.179-184.
 - ▲ Marasciulo T., Pascarella F., Guerra M., 2002. *Atlante delle opere di sistemazione dei versanti*. APAT - Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici, I.G.E.R srl, Roma, 10: 125 p.
 - ▲ Martina M., 2008a. *6.Linee Segnalatrici di Probabilità Pluviometrica - Dispense del corso di Idrologia e Rischio Idrologico*. Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali. Università degli studi di Bologna.
 - ▲ Martina M., 2008b. *7.Modelli Idrologici - Dispense del corso di Idrologia e Rischio Idrologico*. Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali. Università degli studi di Bologna.
 - ▲ Masi F., 1996. *Costruire in acciaio*. Hoepli Editore, Milano, 789 p.
 - ▲ Mazzanti R., Trevisan L., 1978. Evoluzione della rete idrografica nell'Appennino Centro-Settentrionale. *Geogr. Fis. Dinam. Quat* .,1: 55-62.
 - ▲ Meyerhof G. G., 1957. Discussion on Sand Density by Spoon Penetration. *4th ICSMF*, 3, 110 p.
 - ▲ Morini D., Lavorini G., Romanelli S., 2005. *Analisi del dissesto da frana in Toscana. Rapporto sulle frane in Italia, Capitolo 14: 355-378*.
 - ▲ Pranzini G., 1986. Quantity and quality problems of some Tuscan aquifer. *Mem. Soc. Geol. It.*, 31: 267-285.
 - ▲ Puccinelli A., D'Amato Avanzi G., Perilli N., Verani M., in stampa. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia 1.50.000. Foglio 252 "Pistoia". *Serv. Geol. d'It. Università di Pisa – Dipartimento di Scienze della Terra. S.EL.CA. s.r.l., Firenze: 161 p.*
 - ▲ Regione Toscana, 2001. *Carta Tecnica della Regione Toscana 1:10.000-Sezione 262 040 Ponzano. SYSTEMCART*, Roma.
 - ▲ Reynolds J. M., 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England: 277-284.
 - ▲ Scesi L., Gattinoni P., 2009. *Analisi delle interazioni tra dinamica fluviale e stabilità dei versanti: l'esempio della Val Trebbia (PC, Nord Italia)*. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2: 5-21.
 - ▲ Shioi, Y., Fukui J., 1982. Application of *N-Value* to Design of Foundations in Japan, *2nd ESOPT*, 1, pp. 159-164.
 - ▲ Skempton A. W., 1986. Standard Penetration Test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Geotechnique*, 36: 425-447.
 - ▲ Toraldo E., 2015. *Costruzioni stradali. Quaderni del Manuale dell'Ingegnere*. Hoepli Editore, Milano, 128 p.
 - ▲ Varnes, D. J., 1978. Slope movement types and processes. In: Schuster R.L.,Krizek, R.J. (Eds), *Landslides: Analysis and control*. National Research Council, Washington D.C., Transportation Research Board, Special Report, 176: 11-33.

- ▲ Zuffa G. G., 2011. Argille - Materiale didattico per il corso di Petrografia, Modulo “Rocce sedimentarie”, A.A. 2011-2012. Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali. Università degli studi di Bologna.

13 SITOGRAFIA

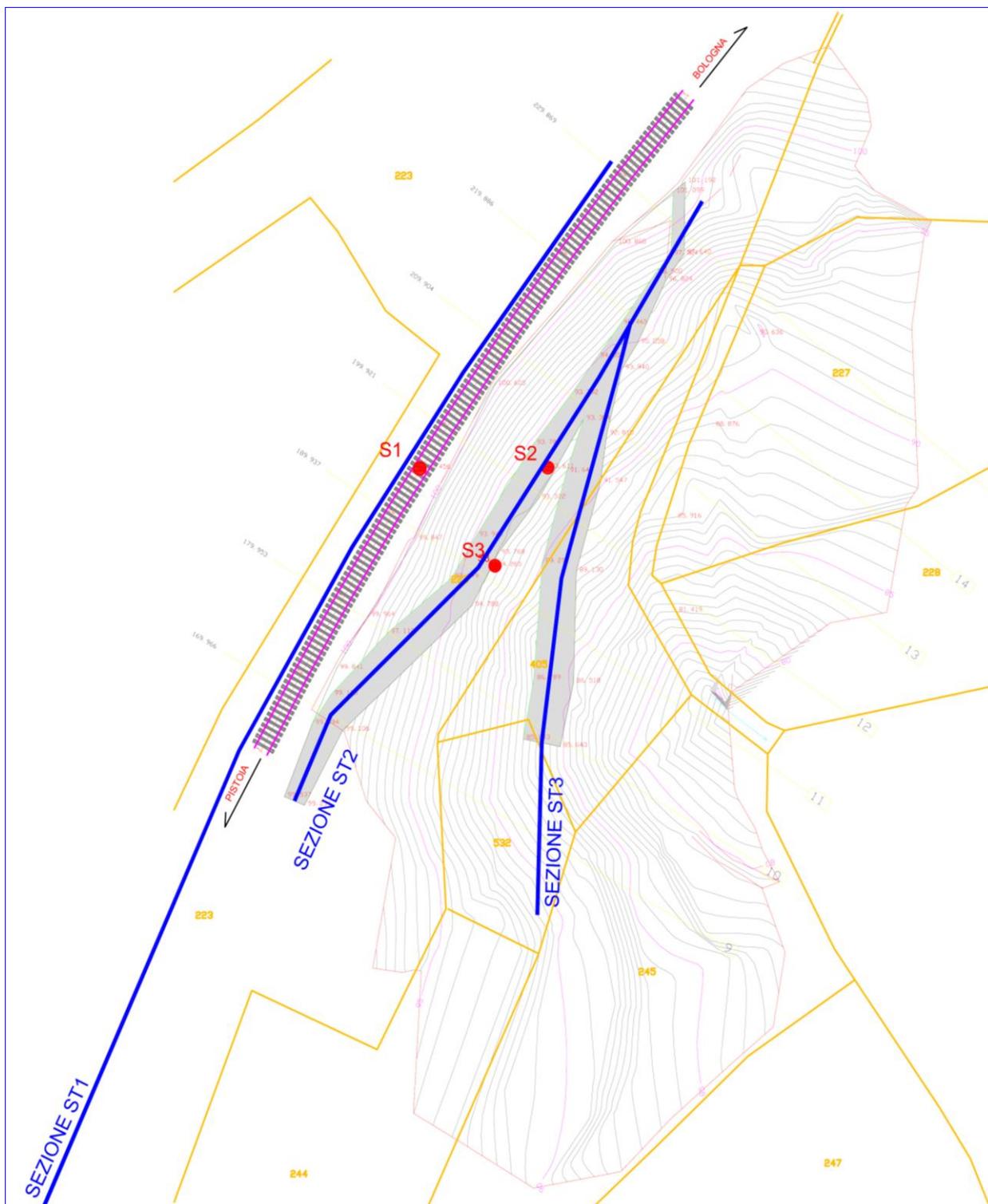
- ▲ Autorità di Bacino del Fiume Arno, 2002. Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico – Parte III, Quadro Conoscitivo [online]. Autorità di Bacino del Fiume Arno. Disponibile su: http://www.adbarno.it/rep/pai_parteIII.pdf [Data di accesso: 7/9/2015].
- ▲ Barile A., Leonetti F., Silvestri F., Troncone A., 2004. Linee guida. Interventi di Riduzione del Rischio di Instabilità dei Pendii: Tipologie e Metodi di Dimensionamento. INGV. Disponibile su: ftp://ftp.ingv.it/pro/gndt/Att_scient/Prodotti_consegnati/Calvi/VIA_Task_2_Final_e/Rapporto_stabilizzazione/Linee_guida_interventi%20di%20stabilizzazione.pdf [Data di accesso: 20/8/2015].
- ▲ Caporali E., 2012. Analisi di Frequenza Regionale delle Precipitazioni Estreme LSPP - Aggiornamento al 2012 [online]. Regione Toscana. Disponibile su: http://www.sir.toscana.it/supports/download/lssp_2012.pdf [Data di accesso: 20/7/2015].
- ▲ Consorzio Lamma, 2015. SPI-Standardized Precipitation Index [online]. Regione Toscana. Disponibile su: <http://www.lamma.rete.toscana.it/spi-standardized-precipitation-index> [Data di accesso: 7/7/2015].
- ▲ Conti P., Cornamusini G., Carmignani L., 2013. Schema tettonico dell'Appennino Settentrionale [online]. Università di Siena – Centro di GeoTecnologie. Disponibile su: <http://www.neogeo.unisi.it/galleriaimmagini/M1.pdf> [Data di accesso: 7/7/2015].
- ▲ Elter P., 2000. Introduzione alla geologia dell'Appennino Ligure-Emiliano [online]. E.R. Ambiente. Disponibile su: http://ambiente.regione.emiliaromagna.it/geologia/archivio_pdf/geologia/Articolo_Elter.pdf/view [Data di accesso: 10/5/2015].
- ▲ Google Earth 7.1.2, 2014. Casciano 43°59'32.12"N, 10°55'02.85"E, elevation 431 m [online]. Disponibile su: <http://www.google.com/earth/index.html> [Data di accesso: 10/3/2015].
- ▲ Lynn Highland, 2004. Landslide Types and Processes [online]. U.S. Geological Survey. Disponibile su: <http://pbs.usgs.gov/fs/2004/3072/> [Data di accesso: 10/3/2015].
- ▲ Provincia di Pistoia, 2009a. Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale – Rapporto Ambientale (Allegato 1 – Dir. 2001/42/CE) [online]. Disponibile su: http://www.provincia.pistoia.it/RISORSE_TERRITORIO/SIT/PTC_21_04_09/Va_lutazione%20Integrata/Rapporto_Ambientale.pdf [Data di accesso: 10/9/2015].
- ▲ Provincia di Pistoia, 2009b. Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale - Disciplina di Piano [online]. Disponibile su: http://www.provincia.pistoia.it/RISORSE_TERRITORIO/SIT/PTC_21_04_09/Di_sciplina%20di%20Piano/Disciplina_di_Piano.pdf [Data di accesso: 10/9/2015].
- ▲ Provincia di Pistoia, 2009c. Sottosistemi territoriali P. 03 [online]. Disponibile su: http://www.provincia.pistoia.it/RISORSE_TERRITORIO/SIT/PTC_21_04_09/Ta_vole%20di%20Progetto/PR03.pdf [Data di accesso: 10/9/2015].

- ^ Regione Toscana, 2007. Carta Tecnica Regionale Scala 1:2.000 - Foglio n. 21I28 [online]. Disponibile su: <<http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html>> [Data di accesso: 10/4/2015].
- ^ Regione Toscana, 2009a. Quadro conoscitivo, Ambito n.6 - Pistoia. [online]. Disponibile su: <http://www.regione.toscana.it/documents/10180/404161/ambito_06_pistoia_1_2/b0fea9a6-6fc4-458e-b691-cd6fad5998ba> [Data di accesso: 10/9/2015].
- ^ Regione Toscana, 2009b. Allegato A, Elaborato 2 - Sezione 3: Ambito n. 6 Pistoia. Funzionamenti, dinamiche, obiettivi di qualità, azioni prioritarie [online]. Disponibile su: <<http://www.regione.toscana.it/documents/10180/404161/ambito%2006%20pistoia%203/c11ee60e-10a6-4187-8da1-d422bccd61e3>> [Data di accesso: 10/9/2015].
- ^ Regione Toscana, 2010. Vincolo Idrogeologico – Aree Boscate [online]. Disponibile su: <<http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/idrogeol.html>> [Data di accesso: 10/9/2015].
- ^ Regione Toscana, 2011. Data Base Geologico [online]. Disponibile su: <<http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/geologia.html>> [Data di accesso: 10/4/2015].
- ^ Regione Toscana, 2012a. Topografia 1:50.000 color [online]. Disponibile su: <<http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/geologia.html#>> [Data di accesso: 10/3/2015].
- ^ Regione Toscana, 2012b. Catasto [online]. Disponibile su: <<http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/pianopaesaggistico.html>> [Data di accesso: 10/9/2015].
- ^ Regione Toscana, 2014. Giardini e ville nella Provincia di Pistoia - Guida [online]. Disponibile su: <<http://www.regione.toscana.it/-/villa-garzoni>> [Data di accesso: 10/6/2015].
- ^ Regione Toscana, Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo, 2014a. PIT- Piano di Indirizzo Territoriale con valenza di Piano paesaggistico – Disciplina del Piano [online]. Disponibile su: <<http://www.regione.toscana.it/-/piano-di-indirizzo-territoriale-con-valenza-di-piano-paesaggistico>> [Data di accesso: 10/9/2015].
- ^ Regione Toscana, Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo, 2014b. PIT- Piano di Indirizzo Territoriale con valenza di Piano paesaggistico – Relazione Generale del Piano Paesaggistico [online]. Disponibile su: <<http://www.regione.toscana.it/-/piano-di-indirizzo-territoriale-con-valenza-di-piano-paesaggistico>> [Data di accesso: 10/9/2015].
- ^ SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2012. Linee Segnatrici di Possibilità Pluviometrica, Aggiornamento 2012 [online]. Regione Toscana. Disponibile su: <<http://www.sir.toscana.it/index.php?IDS=4&IDSS=19>> [Data di accesso: 10/5/2015]
- ^ SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2014a. Report pluviometrico del mese di Dicembre 2013 [online]. Regione Toscana. Disponibile su: <http://www.sir.toscana.it/supports/download/report/2013-12_report_cumulate_mensili.pdf> [Data di accesso: 10/5/2015].
- ^ SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2014b. Report pluviometrico Anno 2013 [online]. Regione Toscana. Disponibile su: <http://www.sir.toscana.it/supports/download/report/2013_situazione_idrologica.pdf> [Data di accesso: 10/5/2015].

- ♣ SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2014c. Report pluviometrico del mese di Gennaio 2014 [online]. Regione Toscana. Disponibile su: http://www.sir.toscana.it/supports/download/report/2014-01_report_cumulate_mensili.pdf [Data di accesso: 10/5/2015].
- ♣ SIR-Servizio Idrologico Regionale, 2015. Consistenza della rete di monitoraggio [online]. Regione Toscana. Disponibile su: <http://www.sir.toscana.it/index.php?IDS=3&IDSS=33> [Data di accesso: 10/5/2015]

14 ALLEGATI

14.1 Allegato 1 – Planimetria delle indagini in sito



14.2 Allegato 2 – Sondaggio S1

Scala 1: 100	Profondità [m]	Stratigrafia	Descrizione	S.P.T.	N	Pz Norton	Falda
1			BRECCIE CALCIREE DI DIMENSIONE OMIOGENEA, FACENTI PARTE DEL RILEVATO FERROVIARIO				
2	1.50		LIVELLO FRATURATO E RIANNEGGIATO, COSTITUITO DA CLASTI ETEROMETRICI DI SILT MARNOSE GRIGIE PRESENZA DI MATRICE SABBIOSA-LIMOSA DI COLORE MARRONE GRIGIA				
3							
4	3.40		LIMI SABBIOSI DI COLORAZIONE BRUNA, CON SFUMATURE ROSASTRE, CON INCLUSI CLASTI ETEROMETRICI DI ARENARIE FINI MARRONI. ASSENZA DI REAZIONE HCI	2-2-1	3		
5				5-5-6	11		
6				5-6-18	24		
7				9-11-11	22		
8				12-13-12	25		
9				24-27-11	38		
10				20-19-25	43		
11	11.50		LIMI ARGILLOSO DEBO LIMENTE SABBIOSO DI COLORE GRIGIO CON SFUMATURE AVANA. PRESENZA DI UN LIVELLO ALTERATO DA 11.50 A 15 m. PRESENZA IN CAROTA DI NUMEROSI TROVANTI SILTOSO-MARNOSE FOGLIETTATI, DI COLORE GRIGIO-NERA. LIVELLO CON SFUMATURE AVANA CORA TRA 17.50 E 19 m.	22-24-21	45		
12				50/5 cm	R.T.		
13				50/4 cm	R.T.		
14				18-30-50/3 cm	R.T.		
15				50/4 cm	R.T.		
16							
17							
18							
19							
20							
21	20						



14.3 Allegato 3– Sondaggio S2

Scala 1: 100	Profondità [m]	Stratigrafia	Descrizione	S.P.T.	N	P.z. Morton	Falida	
1	1.10		MATERIALE DI COPERTURA DI VARIA NATURA, CHE INCORPORA BRECCIE ETEROMETRICHE DI ORIGINE DIVERSA E RESTI DI LATERIZI					
2			BRECCIE ETEROMETRICHE DI SILTITI DEBOLMENTE MARNOSE DI COLORE GRIGIO E TROVANTI ARBACEI, IMMERSI IN MATRICE LIMOSO-ARGILLOSA DEBOLMENTE SABBIOSA DI COLORE GRIGIO (COLORE AVANNA) ARROTONDO DA 3.40 A 6.30 m.	23-2	5			
3			BRECCIE E TROVANTI ARBACEI TRA 3.90 E 4.20 m.	32-4	6			
4								
5								
6								
7			6.50			6-13-17	30	
8	20		SILTITI DEBOLMENTE MARNOSE DI COLORAZIONE GRIGIA O GRIGIA SCURA, LAMINATE, ALTERNANZA A MATERIALE DI ALTERAZIONE ARGILLOSO-LIMOSO DI COLORE GRIGIO, ALL'INTERNO DEL QUALE SONO IMMERSI FREQUENTI CLASTI SILTICI. SFUMATURE AVANNA-OCRA TRA 8.60 A 9.20 m.	50/8 cm	Rif.			
9								
10								
11								
12						19-8-24	32	
13						50/2 cm	Rif.	
14						50/4 cm	Rif.	
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								



14.4 Allegato 4– Sondaggio S3

Scala 1:200	Profondità [m]	Stratigrafia	Descrizione	S.P.T.	N	Pz Norton	Falda
1	3.40		TERRINO DI COPERTURA LIMOSO DEBOLMENTE SABBIGIO, A COLORAZIONE BRUNA. PRESENZA DI CLASTI FOGLIETTATI SILTICI GRIGI, ETROMIETRICI A SFGIOI VIVI.				
2							
3							
4							
5	9.20		LIMI SABBIGI OCCRACEI DEBOLMENTE ARGILLOSI, CON SFUMATURE ROSSASTRE CON INCLUSI CLASTI ETROMIETRICI DI SILTI A COLORAZIONI BRUNO-ROSSASTRO GRIGIO SCURO FOGLIETTATE. ASSENZA DI REAZIONE HOI DEI CLASTI.				
6							
7							
8							
9							
10							
11	20		LIMIDA SABBIGIO A DEBOLMENTE SABBIGIO, DI COLORE GRIGIO CON TONALITÀ OCRACEE NEI PRIMI METRI. PRESENZA PERVASIVA DI INCLUSI DI CLASTI FOGLIETTATI ETROMIETRICI A COLORAZIONE GRIGIO-NERASTRA. ASSENZA DI REAZIONE HOI.				
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19	20		BRECCIE SILTICHE GRIGIO SCURO, DEBOLMENTE MARNOSE COSTITUTE DA ARBNARE, IN MATRICE LIMOSO-SABBIGIA A COLORAZIONE GRIGIO-SCURA. ASSENZA DI REAZIONE ALL'HOI.				
20							
21							



