

S.S. N. 4 "SALARIA"

**ADEGUAMENTO DEL TRATTO TRISUNGO-ACQUASANTA TERME.
TRATTO GALLERIA VALGARIZIA - ACQUASANTA TERME. LOTTO 2 DAL
KM 155+400 AL KM 159+000 (EX AN6)**

PROGETTO DEFINITIVO

COD. **AN257**

PROGETTAZIONE: ATI SINTAGMA - GP INGEGNERIA - ENGEKO - GDG - ICARIA

IL RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Dott. Ing. Giorgio Guiducci
Ordine degli Ingegneri della Prov. di Roma n° 14035

IL PROGETTISTA:

Emiliano Moscatelli
Ordine degli Ingegneri della Prov. di Roma n° A20752

IL GEOLOGO:

Dott. Geol. Giorgio Cerquiglini
Ordine dei Geologi della Regione Umbria n°108

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Dott. Ing. Marco Abram
Ordine degli Ingegneri della Prov. di Perugia n° A2808

IL RESPONSABILE DI PROGETTO

Pianificatore Territoriale Marco Colazza

IL R.U.P.

Dott. Ing. Vincenzo Catone

PROTOCOLLO

DATA

IL GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

MANDATARIA:

Sintagma

Dott. Ing. N. Granieri
Dott. Ing. V. Truffini
Dott. Ing. L. Spaccini
Dott. Arch. A. Bracchini
Dott. Ing. E. Bartolucci
Dott. Ing. L. Casavecchia
Dott. Geol. G. Cerquiglini
Dott. Ing. F. Pambianco
Dott. Ing. M. Abram
Dott. Arch. C. Presciutti
Dott. Agr. F. Berti Nulli
Geom. S. Scopetta
Geom. M. Zucconi

MANDANTI:

GPI INGEGNERIA
GESTIONE PROGETTI INGEGNERIA srl

Dott. Ing. G. Guiducci
Dott. Ing. E. Moscatelli
Dott. Ing. A. Signorelli
Dott. Ing. A. Belà
Dott. Ing. G. Lucibello
Dott. Arch. G. Guastella
Dott. Geol. M. Leonardi
Dott. Ing. G. Parente

engeko

Dott. Ing. C. Muller

GEOTECHNICAL DESIGN GROUP

Dott. Ing. D. Carlaccini
Dott. Ing. C. Consorti
Dott. Ing. E. Loffredo
Dott. Ing. S. Sacconi

ICARIA
società di ingegneria

Dott. Ing. V. Rotisciani
Dott. Ing. F. Macchioni
Dott. Ing. G. Verini
Dott. Ing. V. Piuino
Dott. Ing. G. Pulli



**GEOLOGIA E GESTIONE MATERIE
CADUTA MASSI**

Opere di difesa dalla caduta massi: Relazione tecnica

CODICE PROGETTO		NOME FILE		REVISIONE	SCALA:
PROGETTO	LIV. PROG. ANNO	T00-GE02-GEO-RE01-B			
DPAN257	D 22	CODICE ELAB.	T00GE02GEORE01	B	-
B	Emissione per consegna finale	giu-22	SCA	E. Moscatelli	G. Guiducci
A	Emissione	mag-22	SCA	E. Moscatelli	G. Guiducci
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

INDICE

1	PREMESSA.....	3
2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	5
2.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	5
2.2	BIBLIOGRAFIA.....	5
2.3	SOFTWARE.....	7
3	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	8
3.1	TOPOGRAFIA DI RIFERIMENTO	10
4	INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE.....	13
5	ATTIVITÀ DI INDAGINE	19
1.1	SETTORE OVEST	19
5.1	SETTORE CENTRALE.....	24
5.2	SETTORE EST	27
6	ANALISI TRAIETTOGRAFICHE DI CROLLI DI BLOCCHI ISOLATI.....	35
6.1	DEFINIZIONE DELLE AREE SORGENTE E VOLUME ROCCIOSO UNITARIO	35
6.2	DEFINIZIONE DELLE AREE OMOGENEE	37
6.3	ANALISI 3D	41
6.3.1	Simulazioni di caduta massi in campo tridimensionale - Geomassi	41
6.3.2	Risultati delle analisi traiettografiche	44
6.3.3	Traiettorie rappresentative	50
6.4	ANALISI 2D	61
6.4.1	Simulazioni di caduta massi in campo bidimensionale - RocFall	61
6.4.2	Risultati delle analisi traiettografiche	63
6.4.3	Risultati e criteri di dimensionamento	88
7	ANALISI DI CROLLI IN MASSA	92

7.1	VOLUME DI FRANA.....	92
7.2	METODI PER LA VALUTAZIONE DELLE AREE DI INVASIONE	93
7.3	APPLICAZIONE DI METODI DETERMINISTICI	94
7.3.1	Definizione della base topografica	95
7.3.2	Definizione dei parametri del modello.....	95
7.4	RISULTATI.....	98
8	INTERVENTI DI PROGETTO	101

1 PREMESSA

Il presente documento è stato redatto dallo Studio Cancelli Associato (SCA) nell'ambito della Progettazione Definitiva (PD) dei "S.S. N.4 " Via Salaria". **Lavori di adeguamento del tratto Trisungo - Acquasanta Terme. Tratto Galleria Valgarizia-Acquasanta Terme. Lotto 2 dal km 155+400 al km 159+000".**

L'obiettivo degli interventi descritti nella presente relazione è la mitigazione del rischio da caduta massi (i.e. crollo di blocchi isolati) sugli imbocchi delle due nuove gallerie naturali e sulla viabilità di cantiere in accordo alle NTC2018 [3] ed alla Norma UNI 11211 [5], sarà altresì analizzato il tema del rischio da crollo generalizzato di porzioni di ammasso roccioso.

Le analisi traiettografiche e la definizione degli interventi di mitigazione sono state estese all'intera area di fondovalle con specifico riferimento ai seguenti comparti del Lotto 2:

- A. tratto inizio Lotto – imbocco Ovest nuova galleria lato Favalanziata;
- B. tratto imbocco Est nuova galleria lato Favalanziata – imbocco Ovest nuova galleria Acquasanta Terme;
- C. tratto imbocco Est nuova galleria Acquasanta Terme – fine Lotto.

Sulla base dei contenuti dei documenti disponibili, si conferma la necessità di mitigare il rischio da caduta massi con opere di difesa sia passiva, consistenti in barriere metalliche ad elevata deformabilità, che attiva, consistenti in interventi di consolidamento con ancoraggi, funi e reti.

Per la definizione del crollo di progetto, così come definito dalle norme UNI [5], sono state avviate e concluse una prima serie di attività di indagine e rilievi in sito. Tali indagini hanno confermato l'elevato grado di pericolosità andando a chiarire il livello di attività della parte alta del versante ed i relativi cinematicismi di rottura.

Tali studi hanno consentito la definizione dei Volumi Rocciosi Unitari (VRU) specifici dei vari comparti del versante che sono il dato di partenza delle simulazioni delle dinamiche di caduta sulla base delle quali sono state dimensionate le opere di difesa.

La relazione è stata articolata sulla base dei seguenti capitoli.

- **Documenti di riferimento:** elenco delle principali leggi, decreti, circolari e norme attinenti alla redazione dei progetti in ambito di opere pubbliche ed in particolare al dimensionamento di interventi di mitigazione del rischio da caduta massi. Da ultimo è riportato l'elenco delle principali fonti scientifiche relative allo studio dei fenomeni di caduta massi e calcolo delle opere di mitigazione previste.
- **Inquadramento geografico:** descrizione del contesto geografico in cui ricade l'opera.
- **Inquadramento geologico e geomorfologico:** descrizione dello studio geologico definitivo eseguito nell'ambito della presente fase progettuale.
- **Attività di indagine:** descrizione delle attività di rilievo geomeccanico.
- **Analisi traiettografiche di blocchi isolati:** riepilogo delle analisi traiettografiche. Descrizione delle analisi di caduta massi eseguite in campo tridimensionale finalizzate alla zonazione delle possibili traiettorie di propagazione sull'intero versante; risultati delle analisi in campo bidimensionale e

criteri di dimensionamento. Descrizione del processo decisionale che ha condotto alla definizione delle opere progettate.

- **Analisi di crolli in massa:** descrizione delle analisi condotte per valutare lo spagliamento di crolli in massa che potrebbero eventualmente coinvolgere volumetrie dell'ordine di 3000 m³.
- **Interventi di progetto:** descrizione delle principali caratteristiche geometriche e prestazionali delle soluzioni scelte.

2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- [1] Attuazione delle direttive 2014/23/UE, 2014/24/UE e 2014/25/UE sull'aggiudicazione dei contratti di concessione, sugli appalti pubblici e sulle procedure d'appalto degli enti erogatori nei settori dell'acqua, dell'energia, dei trasporti e dei servizi postali, nonché per il riordino della disciplina vigente in materia di contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture, Decreto Legislativo 18.04.2016, n. 50, G.U. n. 91 del 19.04.2016
- [2] Regolamento di esecuzione e attuazione del Decreto Legislativo 12.04.2006, n. 163, DPR del 05.10.2010, n. 207, G.U. n. 288 del 10.12.2010, Supplemento Ordinario n. 270.
- [3] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni", GU Serie Generale n.42 del 20-02-2018, Supplemento Ordinario n.8 alla Gazzetta Ufficiale.
- [4] D.M. 11.03.1988 "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione", G.U. 01.06.1988, n. 127. S.O.
- [5] UNI 11211 – Opere di difesa dalla caduta massi: Parte 1 - Termini e definizioni; Parte 2 – Programma preliminare di intervento; Parte 3 – Termini e progetto preliminare; Parte 4 – Progetto definitivo ed esecutivo; UNI 11167 – Rilevati paramassi. Metodi di prova all'impatto e realizzazione.

2.2 BIBLIOGRAFIA

- [6] Asteriou P. Saroglou H., Tsiambaos G. Rockfall: Scaling factors for the coefficient of restitution. Eurock 2013, p. 195-200.
- [7] Descoeurdes F., Montani S., Boll A. and Gerber, W. (1999) "Disaster Resilient Infrastructures", capitolo 4, IDNDR, Zurich.
- [8] Giani G. P.(1992) "Rock slopes stability analysis". Balkema, Rotterdam, 361 pp.
- [9] Giani G. P. (1997) "Caduta di massi", Edizioni Hevelius, Benevento.
- [10] ISRM - Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. International Journal of rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, vol. 15, No 6, 1978. p 319-368.
- [11] J.D. Rouiller et al. - Metodologia Matterock, 1998
- [12] Oggeri O., Peila D., Recalcati P.: Rilevati paramassi. GEAM, 2004

- [13] Pfeiffer T.J., Bowen T.D. Computer Simulation of Rockfalls of the Association of Engineering Geologists. Vol. XXVI, No. 1, 1989. p 135-146
- [14] Peila, De Biagi et al. – Estimation of the return period of rockfall blocks according to their size. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2017
- [15] Sfratato F. Sperimentazione in sito ed analisi del fenomeno di caduta massi. Professione Geologo, No. 20, 2004. pp. 25-34.
- [16] Benz, W. (1990). Smooth particle hydrodynamics: a review. In The numerical modelling of nonlinear stellar pulsations. Edited by J.R. Buchler. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, pp. 269-288.
- [17] Calvetti, F., Crosta, G. & Tatarella, M. (2000). Numerical simulation of dry granular flows: from the reproduction of small-scale experiments to the prediction of rock avalanches. Rivista italiana di geotecnica, vol. 21, No.2, pp. 21-38.
- [18] Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. Canadian Geotechnical Journal, vol. 33, pp. 260-271.
- [19] Dade, W.B. & Huppert, H.E. (1998). Long-runout rockfalls. Geology, September 1998 vol. 26 No. 9 pp.803-806.
- [20] Davies, T.R.H. (1982). Spreading of rock avalanche debris by mechanical fluidization. Rock Mechanics, vol. 15, pp. 9-24.
- [21] Erismann, T.H. & Abele, G. (2001). Dynamics of rockslides and rockfalls. Springer-Verlag. 2001.
- [22] Fang, Y.S. & Zhang, Z.Y. (1988). Kinematic mechanism of catastrophic landslides and prediction of their velocities and travelling distance. Proc. 5th Int. Symp. Landslides, C. Bonnard, Landslides, pp. 125-128.
- [23] Gingold, R.A. & Monaghan, J.J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 181, pp. 375-389.
- [24] Govi, M., Mortara, G. & Sorzana, P.F. (1985). Eventi idrologici e frane. Geologia Applicata e Idrogeologia, Vol. XX, Parte II, Bari.
- [25] Hungr, O. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches. Canadian Geotechnical Journal, vol. 32 pp. 610-623.
- [26] Hungr, O. & McDougall, S. (2009). Two numerical models for landslide dynamic analysis. Computer & Geosciences, vol. 35, pp. 978-992.
- [27] Hsü, K.J. (1975), Catastrophic debris stream (Sturzstroms) generated by rockfalls. Geological Society of American Bulletin, vol. 86 jan, pp. 129-140.
- [28] Hsü, K.J. (1978), Albert Heim: Observations on landslides and relevance of modern interpretations. In Voight (ed) Rockslides and avalanches. Amsterdam Oxford New York, pp. 70 – 93.

- [29] Kilburn C.R.J. & Sørensen S.A., 1998. Runout lengths of struzzstroms: the control of initial conditions and fragment dynamics. *Journal of Geophysical Research*, vol. 103 No. B8 pp. 17,877-17,884.
- [30] Kilburn C.R.J., 2001. The flow of giant rock landslides. In, Xiao, W. and Briegel, U. (Eds) *Paradoxes in Geology*, Elsevier.
- [31] Lucy, L.B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astrophysical Journal*, vol. 81, No.12, pp. 1013-1024.
- [32] McDougall, S. & Hungr, O. (2004). A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 41, pp. 1084-1097.
- [33] Nicoletti, P.G. & Sorriso-Valvo, M. (1991). Geomorphic controls of the shape and mobility of rock avalanches. *Geological Society of American Bulletin*, vol. 103, pp. 1365-1373.
- [34] Perla, R., Ceng, T.T. & McClung, D.M. (1980). A two-parameter model of snow-avalanche motion. *Journal of Glaciology*, Vol. 26, No. 94, 1980.
- [35] Rochet, L. (1987-a). Application des modèles numériques dans l'analyse de la propagation des éboulements rocheux. 6 Congr. Société inter. Mèca. Roches. Momtreal.
- [36] Rochet, L. (1987-b). Développement des modèles numériques de propagation a l'étude des éboulements rocheux. *Bull. Liaison Laboratoires des Pontes et Chaussées*. 150-151 juil.-aout / sept. – oct. 1987.
- [37] Scheidegger, A.E. (1973). On prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mechanics*, vol. 5, pp. 213-236.
- [38] Sousa, J. & Voight, B. (1991). Continuum simulation of flow failures. *Geotechnique* 41, No. 4, pp. 515-538.
- [39] Tianchi, L. (1983). A mathematical model for predicting the extent of a major rockfall. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.* Bd.27, p. 473-482.

2.3 SOFTWARE

- [40] CDM Dolmen Srl – Geomassi
- [41] DAN3D (Hungr & McDougall, 2009)
- [42] Rocscience Inc – RocFall ver. 5.0

3 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La porzione di versante oggetto di studio è ubicata in sponda sinistra idrografica del f. Tronto in località Acquasanta Terme (AP), nel tratto tra Favallanciata e Acquasanta Terme, a Est dell'abitato di Trisungo (Figura 1), a ca. 20 km da Ascoli Piceno (AP).

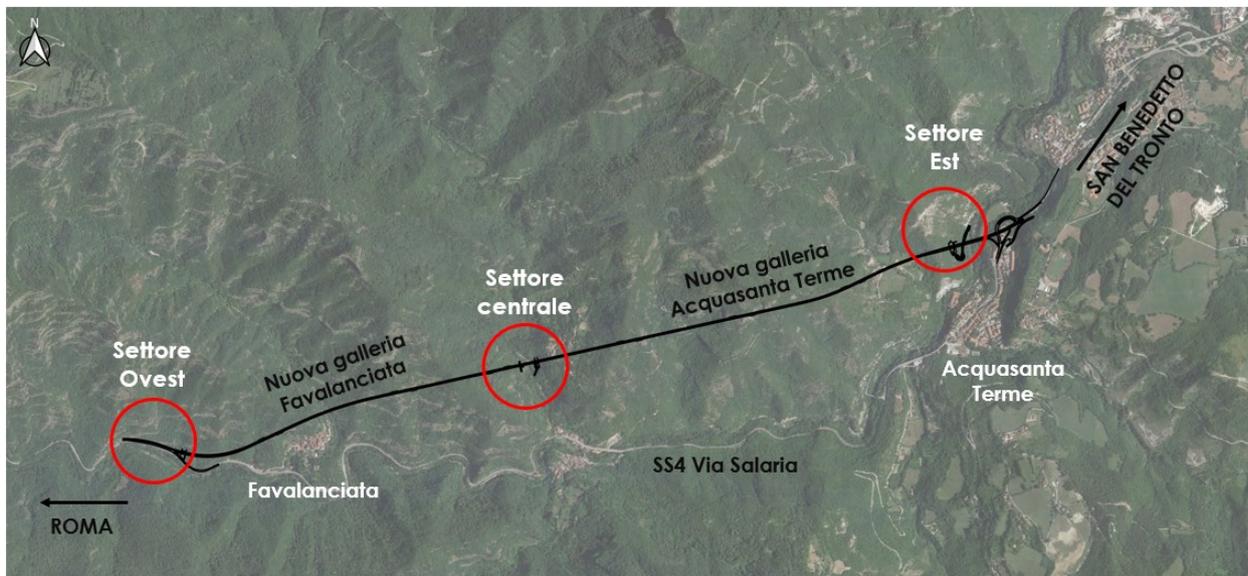


Figura 1 - Ubicazione geografica della porzione di versante oggetto di studio (da Google Earth).

Nell'area oggetto di studio verranno realizzate due gallerie, i tratti esposti soggetti a eventuali fenomeni di caduta massi sono ubicati in tre diverse zone descritte nel seguito.

- Settore Ovest: tratto inizio lotto – imbocco Ovest nuova galleria lato Favallanciata;
- Settore centrale: tratto imbocco Est nuova galleria lato Favallanciata – imbocco Ovest nuova galleria Acquasanta Terme;
- Settore Est: tratto imbocco Est nuova galleria Acquasanta Terme – fine Lotto.

Nel settore Ovest il versante, compreso indicativamente tra le quote 450 e 900 m s.l.m., presenta una generale immersione verso Sud.

Nel settore centrale sono stati esaminati i versanti su entrambe le sponde del Rio di Novele, le quote sono comprese fra 420 e 680 m s.l.m..

Nel settore Est vi è il Monte Pizzo, sulla cui sommità è presente un volume potenzialmente instabile di circa 3 000 m³; il versante che minaccia l'imbocco della nuova galleria lato Acquasanta Terme è quello che immerge verso SE, le cui quote sono comprese fra 340 e 650 m s.l.m..



Figura 2 - Vista della parete bassa del Settore Ovest in corrispondenza dell'inizio del Lotto 2.



Figura 3 - Vista del versante del Settore centrale.



Figura 4 - Vista del versante del Settore Est.

3.1 TOPOGRAFIA DI RIFERIMENTO

Ai fini del presente studio sono stati utilizzati diversi dati topografici in relazione alle specifiche necessità.

In particolare, lo studio relativo all'individuazione delle aree sorgente e le successive analisi di caduta massi sono stati effettuati utilizzando come base topografica un rilievo con curve di livello (spaziatura 2.0m) disponibile.

Con riferimento al Settore Ovest, il rilievo a disposizione raggiunge una quota di circa 700 m s.l.m., non coprendo quindi la porzione di versante che si spinge fino alla cresta, intorno ai 1 000 m s.l.m. Poiché in una prima fase di analisi non si può escludere a priori la possibilità di distacchi anche da tali porzioni, le analisi relative al settore superiore della parete rocciosa si sono avvalse di una base topografica con curve di livello spaziate 10.0 m.

La base topografica è stata tagliata intorno a ciascun settore di analisi al fine di alleggerire i dati in ingresso nel software utilizzato per le simulazioni di caduta massi. Attraverso la visualizzazione tridimensionale di aree relativamente ampie del versante, ottenute nello specifico con il software Geomassi, si sono potute individuare indicativamente le possibili traiettorie dei massi e quindi la porzione di rilievo da tagliare.

La disponibilità di modelli digitali del terreno (DTM) realizzati nell'intorno delle opere stradali di progetto in ciascuno dei tre settori di studio, ha consentito, ove possibile, di rappresentare con maggior dettaglio le porzioni di versante relative alle aree da proteggere.

Tali rilievi hanno infine costituito una base fondamentale per l'ottimizzazione della posizione delle opere di progetto; nelle aree esterne ai rilievi di dettaglio, le opere sono state posizionate utilizzando come base topografica il rilievo con curve di livello spaziate 2.0m.

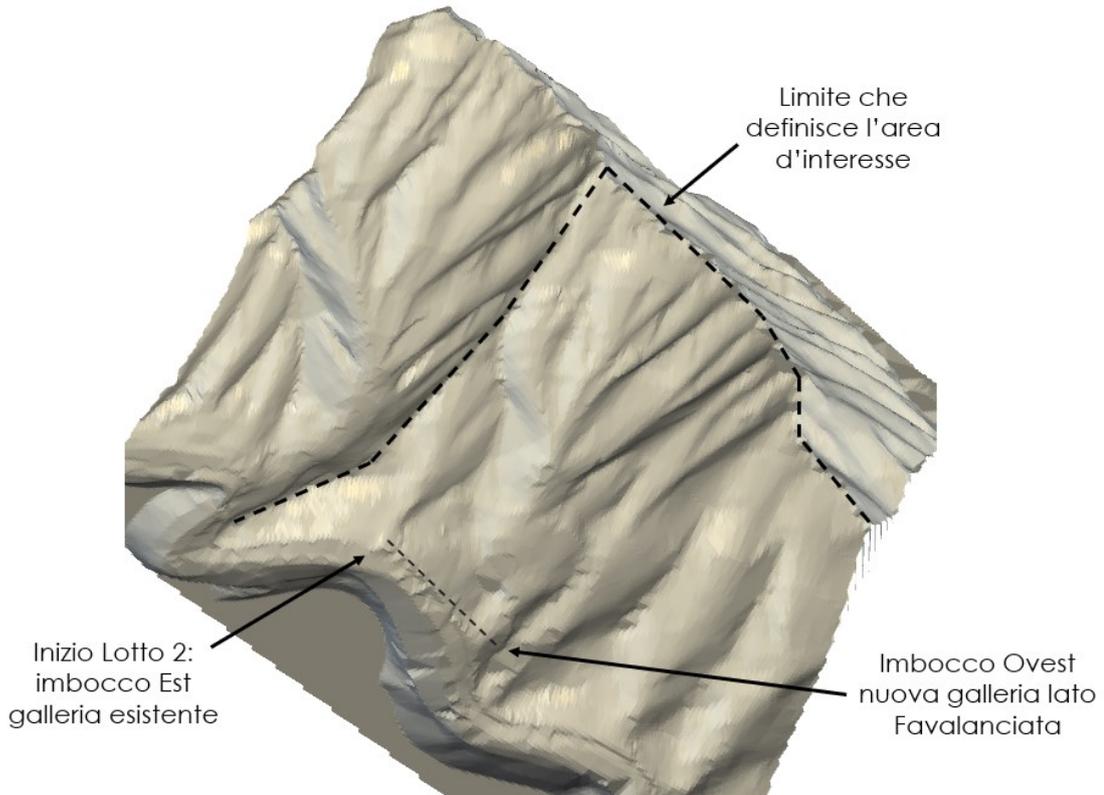


Figura 5 - Settore Ovest, vista 3D e delimitazione della porzione di rilievo di interesse.

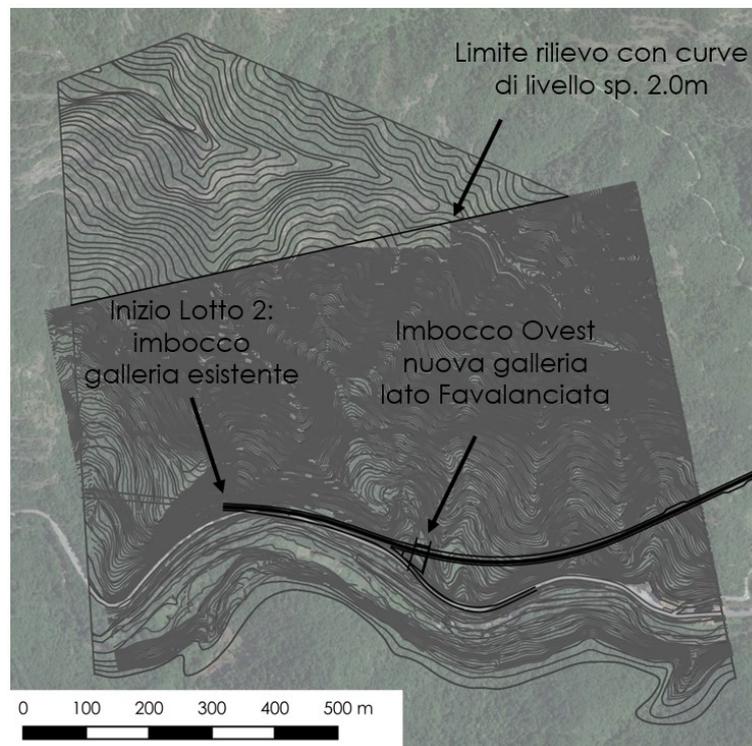


Figura 6 - Settore Ovest, rilievo topografico con curve di livello spaziate 2.0 m, sovrapposto al rilievo più ampio con curve di livello spaziate 5.0 m, utilizzato per le simulazioni di caduta massi dalla porzione più a monte del versante.

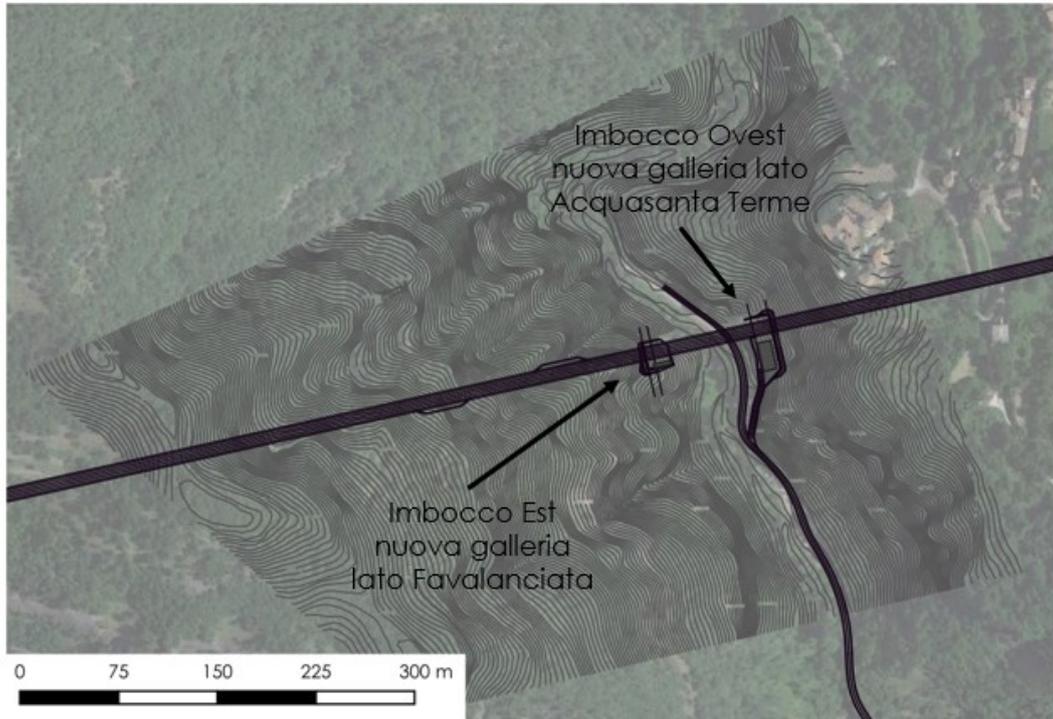


Figura 7 - Settore centrale, rilievo topografico con curve di livello spaziate 2.0 m.

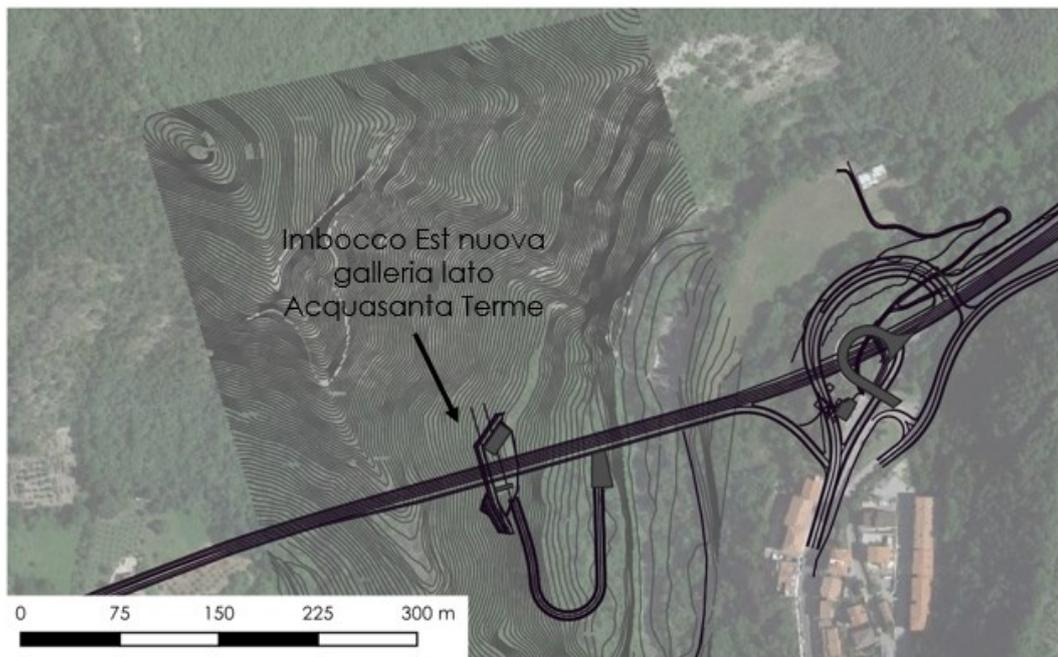


Figura 8 - Settore Est, rilievo topografico con curve di livello spaziate 2.0 m.

4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

Il quadro geologico-strutturale della zona in cui si inserisce l'intervento è già stato descritto nella relazione geologica e nelle relative tavole di carattere geologico allegate al "Progetto di fattibilità tecnico economica" a firma del geologo Giorgio Cerquiglini. Nel seguito per completezza e per permettere un più agevole inserimento di quanto previsto nel contesto ambientale di riferimento vengono riportati ampi stralci della relazione geologica citata.

L'area oggetto di studio ricade nel Bacino della Laga originatosi a seguito degli eventi orogenetici che nel corso del Miocene hanno interessato il bacino Umbro-Marchigiano; tale bacino di sedimentazione è stato, infatti, coinvolto dai fenomeni compressivi alternatisi nel tempo, provenienti da Ovest e diretti verso Est che hanno trasformato il bacino stesso in un'avanfossa torbida ubicata sul fronte della catena appenninica. A seguito delle fasi compressive si sono strutturati diversi bacini esterni, limitati ad Ovest dalla dorsale Umbro-Marchigiana, dei quali il Bacino della Laga è quello più esteso e rilevante, nonché di interesse per l'oggetto di studio. La struttura dell'area è localizzata a oriente della dorsale Appenninica Umbro-Marchigiana tra il fronte di sovrascorrimento dei Monti Sibillini ad Ovest e la struttura della Montagna dei Fiori ad Est (Boni & Colacicchi, 1966), come mostrato nella figura seguente.

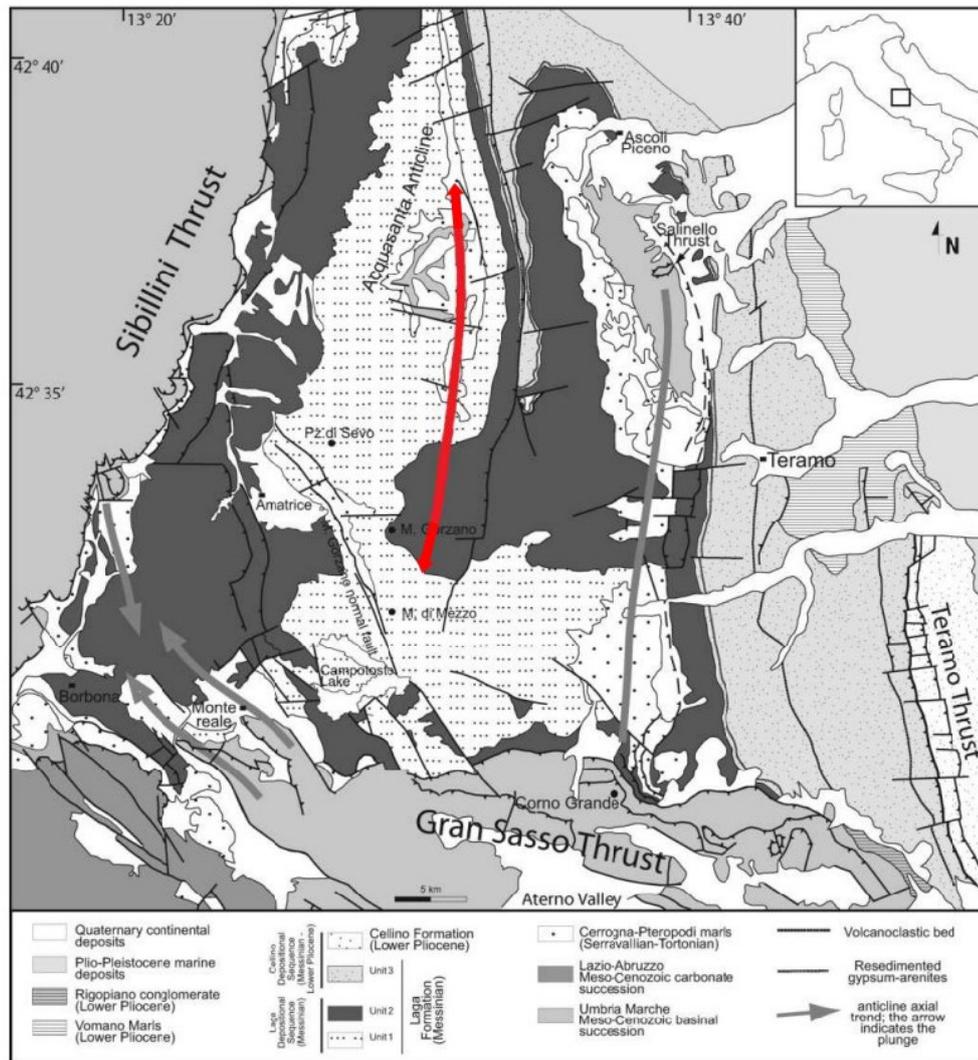


Figura 9 - quadro tettonico del Bacino della Laga (modificato da Bigi et alii, 2011). La linea rossa indica l'anticlinale di Acquasanta.

L'anticlinale di Acquasanta (in rosso nella figura) presenta l'asse orientato N-S, vergente ad Est, che si sovrappone alle strutture più esterne. La stratificazione nella zona di cerniera dell'anticlinale, coincidente con l'area di Acquasanta, è suborizzontale, mentre nelle aree più distali diventa molto inclinata fino a rovescia. Il sovrascorrimento risulta mascherato da potenti coltri detritiche, costituite da ghiaie calcaree di granulometria variabile fra le ghiaie minute e i blocchi in matrice per lo più sabbioso limosa.

Numerose faglie normali dislocano o invertono le strutture compressive ivi presenti con direzione NWSE (cfr. Fig. seguente), dislocando il thrust dei Sibillini. Come noto, il sistema di faglie Monte Bove-Monte Vettore è di cruciale importanza poiché è attivo ed è stato identificato come quello responsabile delle scosse sismiche di Agosto-Ottobre 2016.

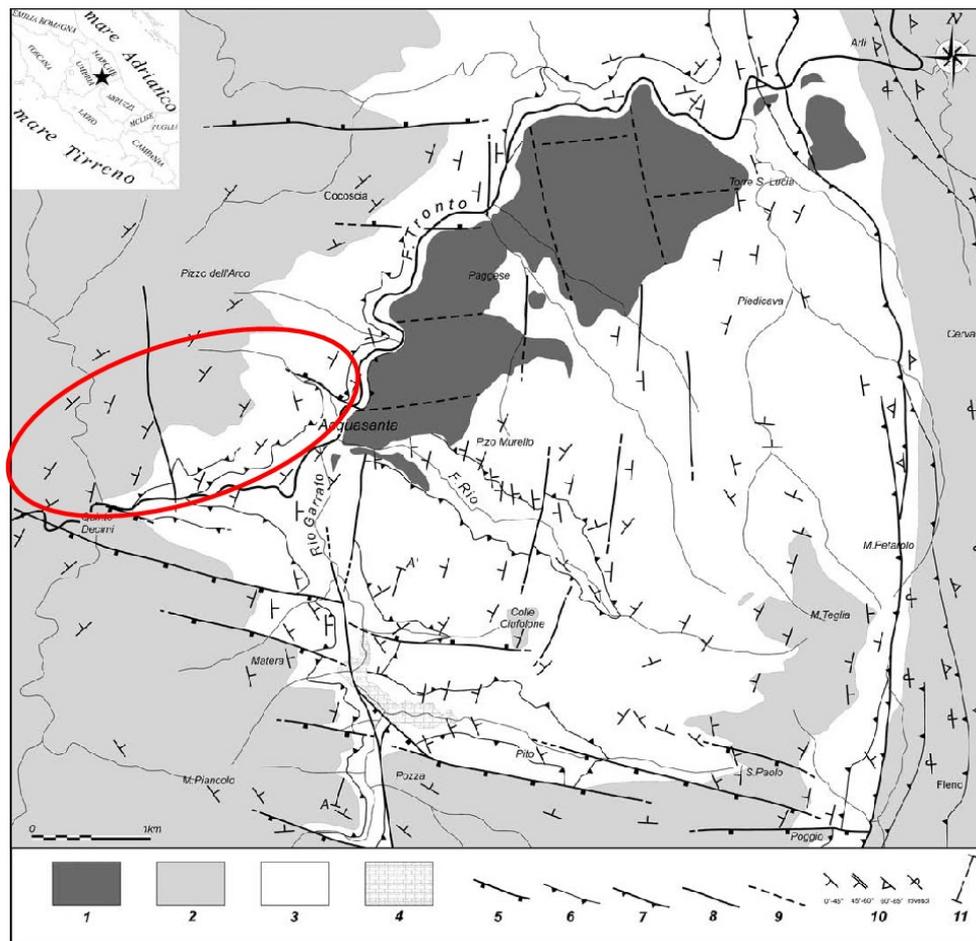
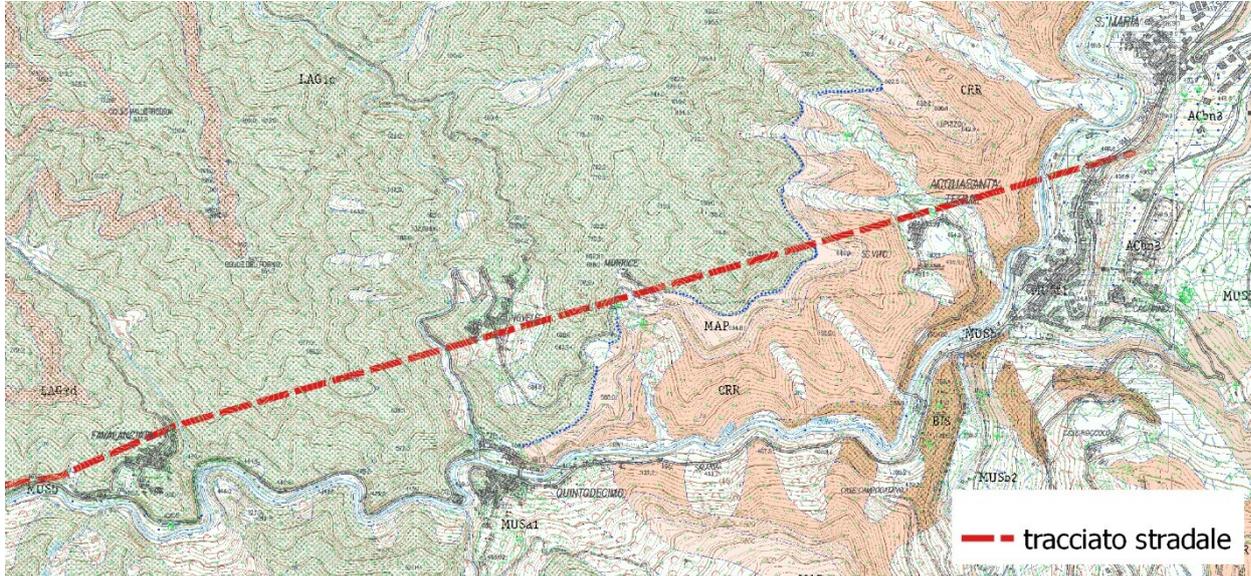


Figura 10 - Schema strutturale dell'area di Acquasanta Terme, con l'area oggetto di studio cerchiata in rosso. LEGENDA: 1) Travertini (Pleistocene); 2) Formazione della Laga (Messiniano p.p.); 3) Scaglia Variegata, Scaglia Cinerea, Bisciario, Marne con Cerrogna e Marne a Pteropodi (Paleocene-Messiniano p.p.); 4) Scaglia Rosata (Cretaceo sup.-Paleocene); 5) faglia diretta, i trattini indicano il tetto; 6) sovrascorrimenti e piani di scollamento, i triangoli indicano il tetto; 7) sovrascorrimento regionale, i triangoli indicano il tetto; 8) faglia trascorrente; 9) faglia incerta e sistemi di frattura; 10) giacitura della stratificazione. (Menichetti, 2008).

Le successioni geologiche di interesse di questo studio appartengono al Dominio Umbro-Marchigiano e ricadono all'interno della sezione 338010 "Acquasanta Terme" della Carta Geologica Regionale di cui di seguito si rappresenta uno stralcio.



LEGENDA GEOLOGICA

**DEPOSITI CONTINENTALI QUATERNARI
VERSANTE MARCHIGIANO**

**SINTEMA DEL MUSONE
(OLOCENE)**

	MUSa1	Frane in evoluzione
	MUSa	Depositi di versante
	MUSb2	Depositi eluvio-colluviali
	MUSb	Depositi alluvionali attuali (ghiaia, sabbia, limo)
	MUSbn	Depositi alluvionali terrazzati (ghiaia, sabbia, limo)
	MUSf1	Travertino

**SINTEMA DI MATELICA
(PLEISTOCENE SUPERIORE)**

	MT1a	Depositi di versante
---	------	----------------------

**SUPERSINTEMA DI COLLE ULIVO-COLONIA MONTANI
(PLEISTOCENE MEDIO SOMMITALE)**

	ACbn3	Depositi alluvionali terrazzati di Colle Ulivo (ghiaia, sabbia, limo)
---	-------	---

SUCCESSIONE UMBRO-MARCHIGIANO-ROMAGNOLA

SUCCESSIONE MIOCENICA

	LAG1d	FORMAZIONE DELLA LAGA Membro pre-evaporitico litofacies arenaceo-pelitica Messiniano p.p.
	LAG1c	FORMAZIONE DELLA LAGA Membro pre-evaporitico litofacies arenacea Messiniano p.p.
	LAG1b	FORMAZIONE DELLA LAGA Membro pre-evaporitico litofacies arenaceo-pelitica a grandi banconi Messiniano p.p.
	MAP	Marne a Pteropodi Tortoniano - Messiniano

SUCCESSIONE CALCAREO E/O MARNOSA CRETACICO-MIOCENICA

	CRR	MARNE CON CERROGNA Burdigaliano - Tortoniano
	CRRa	MARNE CON CERROGNA Intercalazioni torbiditiche Burdigaliano - Tortoniano
	BIS	BISCIARO Aquitano p.p. - Burdigaliano p.p.
	SCC	SCAGLIA CINEREA Priaboniano p.p. - Aquitano p.p.
	VAS	SCAGLIA VARIEGATA Luteziano p.p. - Priaboniano p.p.
	SAA	SCAGLIA ROSSA Turoniano inf. p.p. - Luteziano p.p.

Figura 11 - Stralcio (fuori scala) della Carta Geologica Regionale Sezione n° 338010 "Acquasanta Terme" relativamente il settore oggetto di studio tra Favallanciateda e Acquasanta Terme.

L'età delle formazioni rocciose presenti nell'area è compresa tra l'Oligocene superiore della Scaglia Cinerea, ed il Miocene superiore (Messiniano) della Formazione della Laga. Sono presenti, inoltre, i depositi recenti costituiti da: alluvioni terrazzate, detriti di versante e depositi eluvio-colluviali.

L'assetto litostratigrafico delle formazioni geologiche presenti nell'area oggetto di studio è di seguito rappresentata in successione dal basso verso l'alto:

- Scaglia Cinerea,
- Bisciario;
- Marne con Cerrognana;
- Marne a Pteropodi;
- Formazione della Laga (distinta, dal basso verso l'alto, in tre membri: pre-evaporitico, evaporitico e post-evaporitico).

Di seguito vengono descritti i caratteri principali di ciascuna formazione geologica:

- Scaglia Cinerea, di età variabile tra l'Eocene sup. e l'Oligocene sup., costituita essenzialmente da calcari marnosi e marne di colore grigio e presenta uno spessore di 100-200 m; la porzione inferiore è generalmente più calcarea mentre quella superiore è più marnosa. Il limite superiore è posto in corrispondenza della comparsa della selce e di un livello vulcanoclastico (Livello Raffaello), correlabile in tutta l'area umbro-marchigiana, che cade sopra il limite Oligocene-Miocene. Nell'area in questione la Scaglia Cinerea affiora nell'incisione operata dal Rio Garrafo, passando lateralmente al Bisciario in prossimità della terminazione periclinale del nucleo della piega che costituisce l'anticlinale di Acquasanta.

- Bisciario, caratterizzato dalla presenza di marne e calcari siliceo-marnosi, ben stratificati, grigi e grigio-verdastri (ocracei se alterati), con intercalazioni di vulcanoclastiti (cineriti e tufiti prevalenti) e di bentonite vulcanoderivate. Liste e noduli di selce grigio-nerastra sono localmente presenti nella parte inferiore-media della formazione. I limiti litostratigrafici della Formazione del Bisciario sono identificabili in corrispondenza di caratteristici livelli vulcanoclastici. Il limite tra Scaglia Cinerea e Bisciario coincide con la base del Livello Raffaello, uno strato bentonitico di spessore compreso tra 3 e 30 cm di colore grigio-verdastro con colorazione ocra se alterato. Il limite superiore del Bisciario coincide con la base del livello Piero della Francesca, uno strato bentonitico di spessore compreso tra 10 e 15 cm, particolarmente "ricco" in biotite.

Lo spessore e la litologia del Bisciario variano ampiamente nel bacino. Le aree rialzate presentano spessori minori (da 15 a 70-80 m) e litofacies marnose e calcareo marnose, mentre le zone depresse contengono litofacies calcareo-silicee e detritiche con spessori maggiori fino a 150 m. Sulla base dei litotipi dominanti si riconoscono ovunque tre membri litostratigrafici. Essi sono dal basso verso l'alto: 1) Membro marnoso inferiore; 2) Membro calcareo-siliceo-tufitico; 3) Membro marnoso superiore.

- Marne con Cerrognana la formazione è costituita da alternanze di marne, marne calcaree e marne argillose, in strati medi e sottili, associate a torbiditi carbonatiche talora laminate, in strati medio-spessi. La stratificazione è molto spesso obliterata da un clivaggio diffuso e da un'intensa bioturbazione. Gli spessori variano dai 50-200 m delle dorsali ai 300-400 m delle depressioni, dove maggiori sono gli accumuli torbiditici e gli slumping. L'unità è parzialmente eteropica con le Marne a Pteropodi al cui passaggio è presente un banco di calcarenite di elevato spessore (membro calcarenitico delle Marne con Cerrognana) che costituisce un elemento guida nel paesaggio a livello geologico-geomorfologico. La deposizione delle unità in esame si estende dal Burdigaliano p.p. alla porzione inferiore del Tortoniano medio; soltanto nelle successioni delle aree più profonde essa si arresta alla fine del Tortoniano inferiore.

- Marne a Pteropodi, presenti al di sopra delle Marne con Cerrognana e alla base della sequenza torbiditica. Esse sono costituite inferiormente da emipelagiti grigio-verdoline o grigiastre, bioturbate, con rare e sottili intercalazioni calcareo-marnose e calcarenitiche; superiormente da peliti scure, euxiniche, talora

bituminose, laminate, con intercalazioni di arenarie fini grigiastre, in strati sottili e medi. Queste ultime si rinvencono solo in corrispondenza delle dorsali, e rappresentano le parti più fini e distali (depositi di overbank) delle torbiditi della Formazione della Laga che si andavano depositando nelle depressioni. Le Marne a Pteropodi presentano parziali rapporti di eteropia sia con le Marne con Cerrognana, sia con la Formazione della Laga. L'età delle Marne a Pteropodi si estende pertanto dal Tortonianiano medio p.p. al Messiniano inferiore.

Al di sopra delle formazioni descritte, si depositarono le successioni torbiditiche attraverso il riempimento di una serie di bacini generati dalla migrazione verso E dell'avanfossa appenninica.

- Formazione della Laga, di età ascrivibile al Messiniano-Miocene sup., sovrastante le Marne a Pteropodi, è costituita da una potente successione torbiditica (oltre 3.000 m) che ha colmato il bacino che si era individuato già a partire dal Miocene inf. e medio. Tra i bacini minori marchigiani, quello della Laga è il più grande e si estende da Cingoli (a N) al F. Pescara (a S). La Formazione della Laga costituisce un ciclo sedimentario del I° ordine, di tipo regressivo, ed è suddiviso in 3 membri: "pre-evaporitico", "evaporitico", "post-evaporitico".

Il Membro Pre-evaporitico (Messiniano p.p.) presente nell'area di studio, è costituito da prevalenti arenarie da medio grossolane a fini a stratificazione da molto spessa a media, con intercalati livelli pelitici. In sede di Progetto Definitivo del 2005 sono state differenziate la litofacies arenaceo-pelitica a grandi banconi, la litofacies arenaceo-pelitica e pelitico arenacea sulla base di n°3 serie stratigrafiche che hanno fornito un'ulteriore analisi nel rapporto percentuale Arenaria-Marna e che ha permesso di distinguere due Unità all'interno della Formazione (U1 ed U2) descritte di seguito.

U1 -alternanza arenaria (A)-marna (M) in strati a contatto netto. Arenarie grigio-azzurre, giallastre se alterate, a granulometria fine al tetto e grossolana alla base, in strati di spessore tra 48 e 200 cm. costituite da muscovite, feldspati, quarzo e da cemento di natura calcarea, tenaci e massicce. Marne grigio-azzurre a fratturazione oblunga, in strati di spessore tra 3 e 30 cm. Il rapporto A/M è compreso tra 9,20 e 9,69 con percentuale di arenaria dal 90,20 al 90,31% e di marna dal 9,80 al 9,69%. (Valori dedotti dalle Serie Stratigrafiche n°1 e 3). U2 -alternanza arenaria (A)-marna (M) in strati a contatto netto. Arenarie grigio-azzurre, giallastre se alterate, a granulometria fine al tetto e grossolana alla base, in strati di spessore tra 15 e 700 cm. costituite da muscovite, feldspati, quarzo e da cemento di natura calcarea, tenaci e massicce. Marne argillose ed in subordine calcaree grigio-azzurre a fratturazione oblunga, in strati di spessore tra 3 e 60 cm. Generalmente il rapporto A/M è compreso tra 13,00 e 18,75 con percentuale di arenaria dal 93 al 95% e di marna dal 7 al 5%, occasionalmente A/M tra 1 e 1,5 con percentuale di arenaria del 40-70% e di marna del 60-30%. Sono presenti intervalli con rapporto A/M compreso tra 5 e 6% con percentuale di arenaria dell'83-85% e marna del 17-14%.

Depositi continentali quaternari

A copertura delle formazioni sopra descritte si rinvencono i depositi alluvionali relativi ai corpi idrici principali (F. Tronto) e secondari (fossi e rii laterali) nei diversi ordini, i depositi di versante eluvio-colluviali e di frana e i travertini.

I depositi eluvio-colluviali costituiscono la coltre di copertura detritica prodottasi prevalentemente per crioclastismo e ricoprente in maniera discontinua i fondivalle, le vallecicole d'erosione ed i versanti. Sono costituiti per lo più da clasti a spigoli vivi in matrice fine, priva di cemento. Lo spessore della coltre è variabile, da pochi metri fino a 20-30 m.

I depositi alluvionali costituiscono i terrazzi alluvionali del F. Tronto ed in subordine dei fossi laterali suoi tributari. Si tratta prevalentemente di depositi ghiaiosi non cementati in matrice sabbiosa; i clasti sono

arrotondati con dimensioni variabili, anche grossolane. Frequenti sono le eteropie di facies sia laterali che verticali.

I travertini, presenti solo in destra idrografica, sono ben visibili nei pressi dell'abitato di Acquasanta Terme ed in località Cagnano. Si tratta di concrezioni carbonatiche deposte dalle acque dure ruscellanti da processi tipo "cascata": per tali motivi è talvolta possibile distinguere una netta stratificazione, con andamento concordante rispetto a quello dei flussi d'acqua che li ha messi in posto.

5 ATTIVITÀ DI INDAGINE

Nell'ambito della mitigazione del rischio da caduta massi, le attività d'indagine effettuate dagli scriventi sono state programmate ed eseguite in relazione agli obiettivi da perseguire: la necessità di descrivere la natura e lo stato del fenomeno di caduta massi e la necessità di definire il modello geotecnico di riferimento per la progettazione degli interventi di mitigazione del rischio.

Gli esiti dei sopralluoghi e dei rilievi effettuati sono di seguito descritti ed articolati sulla base dei tre settori principali di intervento:

- A. **Settore Ovest:** tratto inizio Lotto – imbocco Ovest nuova galleria lato Favalanziata;
- B. **Settore Centrale:** tratto imbocco Est nuova galleria lato Favalanziata – imbocco Ovest nuova galleria Acquasanta Terme;
- C. **Settore Est:** tratto imbocco Est nuova galleria Acquasanta Terme – fine Lotto.

1.1 SETTORE OVEST

Il tratto di strada di collegamento che dalla galleria "Valgarizia" porta fino all'imbocco della galleria di progetto è limitato a monte da una ripida parete con roccia affiorante; in particolare si tratta dei litotipi attribuibili alla formazione della Laga, organizzati in spesse bancate (con potenze che seppur variabili superano talora i 5 metri) di arenaria alternate a livelli subordinati di marne-argillose di colore grigio-azzurro (spessori che difficilmente superano i 50 cm).



Figura 12 - Ripresa fotografica della S.S.4 nel tratto di collegamento tra la galleria di "Valgarizia" e quella di progetto.

La zona dell'imbocco della galleria avviene alla base del versante esposto a Sud del Monte Castello la cui vetta raggiunge la quota di 1 030 m slm. In particolare, l'ingresso in galleria sarà realizzato in un'area in cui la ripida scarpata subverticale che limita immediatamente a monte la sede stradale della S.S. "Salaria" si interrompe per la presenza di un impluvio che raccoglie le acque della parte sud orientale del versante del monte.



Figura 13 - Ripresa fotografica della S.S.4 nel tratto dove è previsto l'ingresso della galleria "Favalanciata".

La zona di interesse, quella cioè che può essere considerata sorgente di fenomeni gravitativi in grado di raggiungere l'asse viario di progetto, è rappresentata oltre che dalle pareti direttamente insistenti sulla strada, dall'anfiteatro che limita il bacino idrografico dell'impluvio citato in precedenza e che interessa una fascia di territorio compresa tra le quote 450 e 900 m slm.

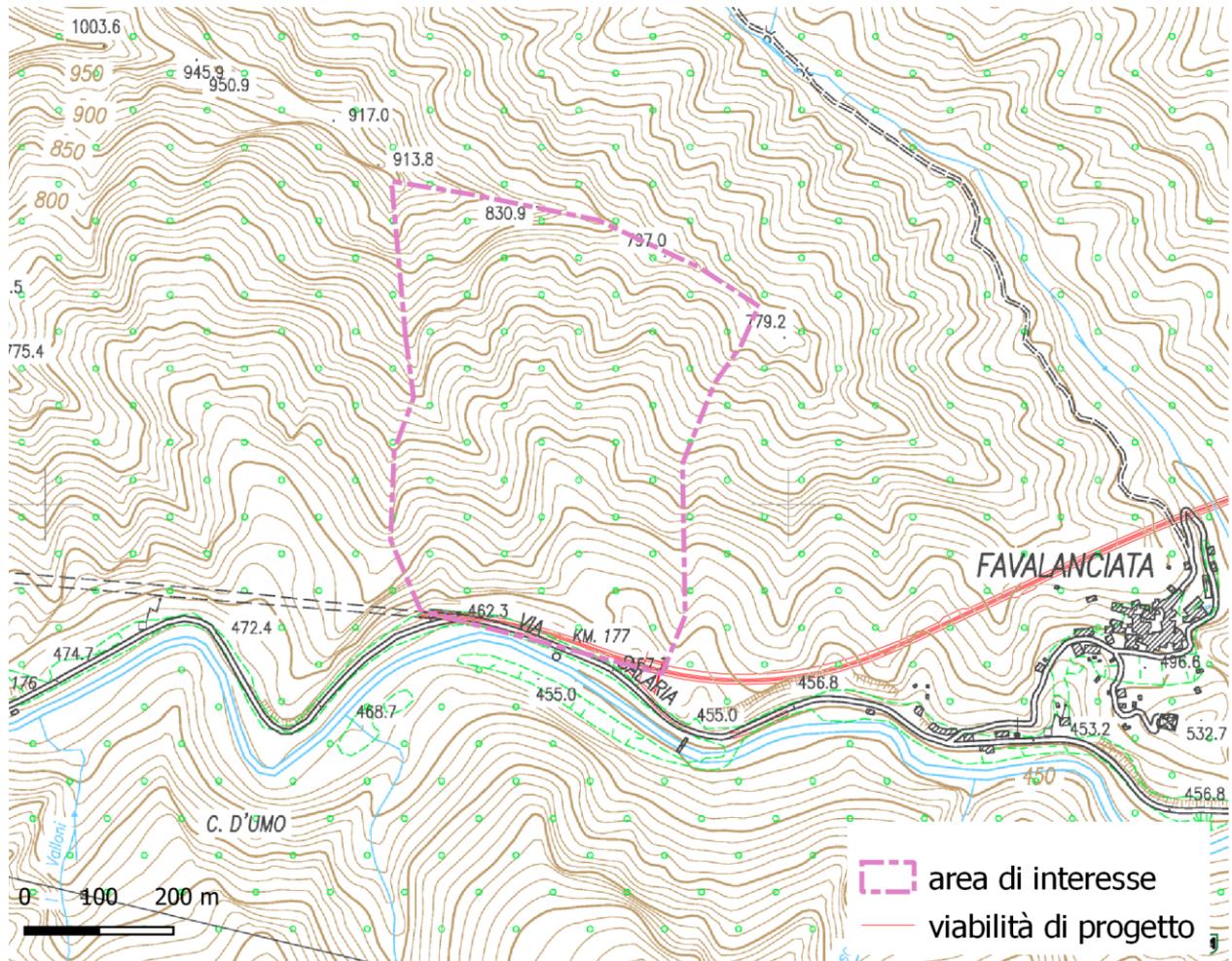


Figura 14 - Planimetria in scala 1:10.000 con indicata la zona di interesse.

Nelle parti distali di tale bacino e lungo le linee dispiuviali risulta particolarmente evidente come sia la stratificazione a guidare i processi geomorfologici che modellano i versanti; in particolare il rapporto tra le parti maggiormente competenti derivanti dalla presenza delle arenarie e quelle più facilmente erodibili rappresentate dalle argille marnose si manifesta, in una geometria "a gradini" con le parti arenacee spesso aggettanti per l'erosione ed il dilavamento dei livelli meno resistenti alla base. Ne consegue un'evoluzione morfologica segnata da crolli successivi di blocchi.



Figura 15 - Ripresa fotografica del versante in cui sono evidenti le bancate che possono originare i crolli e le zone di distacco recenti caratterizzate da roccia "fresca".

L'osservazione diretta effettuata ha mostrato la presenza di numerose zone di distacco recenti (caratterizzate da una colorazione giallastra propria della roccia "fresca") evidenziando quindi un'alta frequenza dei fenomeni di crollo.

Nelle parti meno acclivi del versante sono presenti numerosi blocchi derivanti da crolli con volumi che generalmente giungono a $2\div 3 \text{ m}^3$.



Figura 16 - Ripresa fotografica di alcuni blocchi rocciosi distaccatisi dalle bancate.

Nella zona di impluvio, poche decine di metri a monte della sede stradale, è presente un blocco roccioso, probabilmente derivante da un antico fenomeno gravitativo con volumetria stimabile in $30 \div 50 \text{ m}^3$; tale dimensione, anche in considerazione della potenza degli strati e delle dimensioni medie dei massi testimoniati i crolli precedenti, sembra essere, se non derivante da un evento unico, per lo meno testimonianza di un fenomeno estremamente raro.



Figura 17 - Ripresa fotografica di un blocco ciclopico presente nella zona di impluvio e parzialmente nascosto dalla vegetazione.

5.1 SETTORE CENTRALE

La zona dove è prevista la realizzazione del viadotto Quintodecimo, che unirà i due tratti in galleria in progetto, si imposta nella valle determinata dalla presenza del Rio di Novele, corso d'acqua che scorre da NO a SE e che risulta tributario in sx del F. Tronto.

Nell'area di interesse la valle risulta limitata a Ovest dal crinale del "Colle del Forno" avente una quota di circa 680 m.slm mentre ad oriente il limite può essere posto nella zona, a limitata pendenza, su cui sorge l'abitato di Novele. Si tratta di una stretta valle scavata nei litotipi arenaceo-marnosi della Formazione della Laga e la cui morfologia complessiva risulta asimmetrica risentendo dell'assetto tettonico monoclinale della zona: la pendice occidentale in cui la stratificazione presenta giacitura a "reggipoggio" mostra una pendenza generale più elevata mentre quella orientale, a franapoggio, risulta meno inclinata per la tendenza all'innesco di frane di scivolamento lungo le superfici di stratificazione.

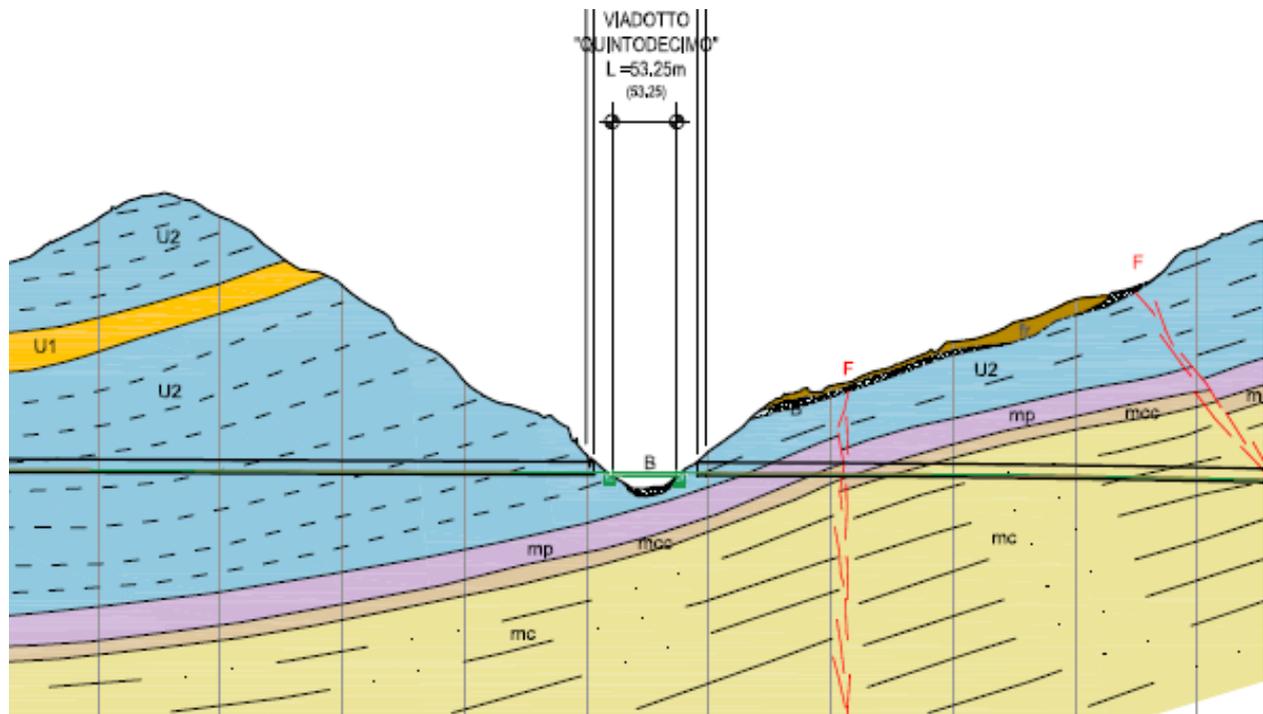


Figura 18 - Stralcio della sezione geologica presente nella relazione geologica a corredo del progetto di fattibilità tecnico-economica.

Più in dettaglio la pendice orientale presenta pendenza generalmente maggiore nella parte medio bassa dove sono evidenti le bancate di roccia arenacea con spessori anche plurimetri.



Figura 19 - Ripresa fotografica del versante occidentale effettuata dall'abitato di Novele.

Il versante occidentale è invece caratterizzato da una porzione basale che localmente presenta roccia in affioramento e assetto anche molto inclinato sebbene l'altezza delle pareti sia tutto sommato limitata.



Figura 20 - Ripresa fotografica della valle del Rio di Novele nella zona di realizzazione del viadotto.

Elemento geomorfologico rilevante è rappresentato dalla zona di impluvio che dalla porzione meridionale di Novele raggiunge la zona in cui è prevista la piazzola di cantiere e che la Carta Geologica Regionale indica come "frana in evoluzione" unitamente alla fascia che limita il corso d'acqua del Rio; tale perimetrazione associa con ogni probabilità due fenomeni distinti, frane di crollo per le pareti rocciose a forte pendenza che limitano la parte bassa della valle e fenomeni di scivolamento traslativo/rotazionale per i litotipi (presumibilmente detritici) che occupano la parte dell'impluvio. Va comunque ricordato che tali fenomeni non sono riportati tra le perimetrazioni di pericolosità indicate nella cartografia P.A.I. prodotta dall'Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Tronto.

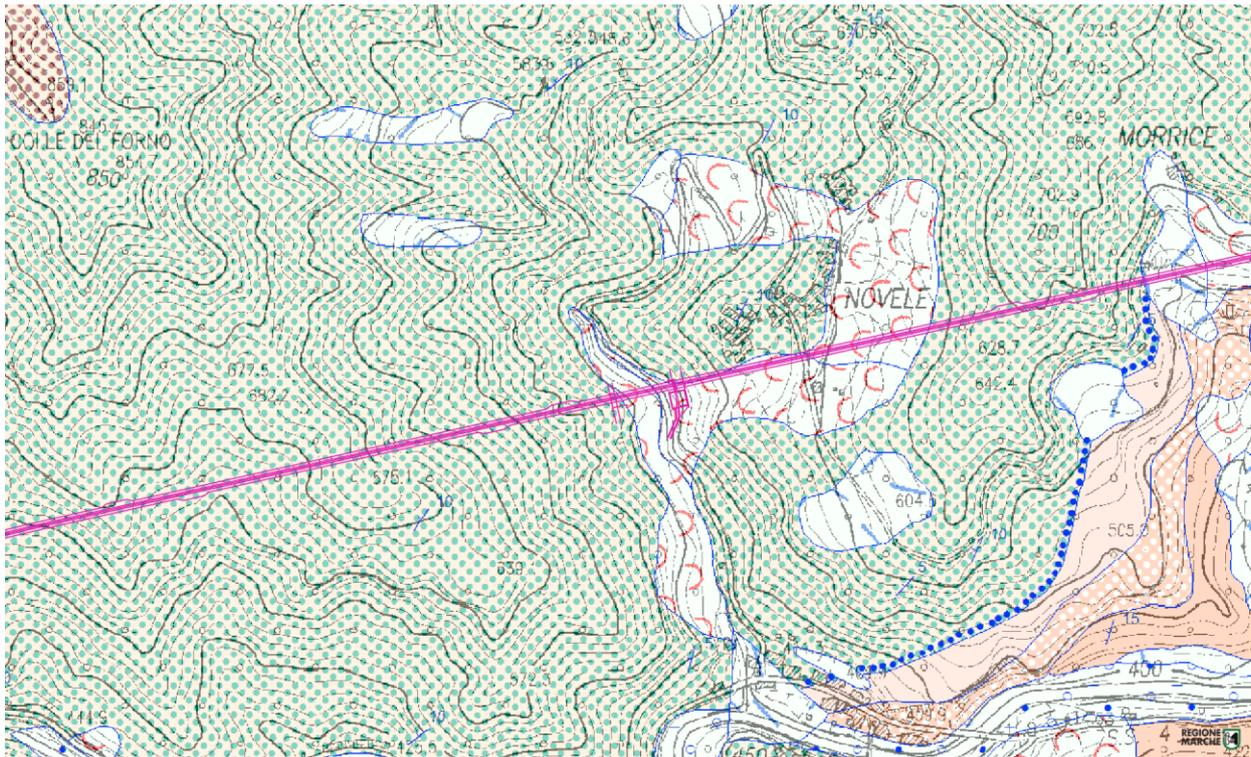


Figura 21 - Stralcio della Carta Geologica Regionale – Sezione n°338010 "Acquasanta" – in magenta il percorso stradale di progetto.

Per quanto attiene alla pericolosità derivante dai crolli che possono interessare le opere di progetto e l'area di cantiere, le zone sorgente di crolli più probabili vanno individuate nelle bancate più competenti e potenti presenti nel versante occidentale e, per quanto riguarda il versante orientale, nella base della pendice che limita a nord la citata zona di impluvio che presenta pareti rocciose seppure di limitata altezza.

I volumi dei massi presenti nell'alveo del Rio di Novele e che presumibilmente derivano da passati fenomeni di crollo dalle pareti sovrastanti sono generalmente inferiori a 2 m³; si sottolinea inoltre il fatto che in entrambi i versanti non si notano in maniera diffusa nicchie di distacco con superfici esposte "fresche" indicando una frequenza dei crolli non elevata.



Figura 22 - Ripresa di alcuni blocchi presenti nel corso del Rio di Novele.

5.2 SETTORE EST

L'ingresso al tunnel in prossimità dell'abitato di Acquasanta avverrà in sinistra idrografica del F.Tronto, interessando una pendice esposta ad Est che culmina con la cima del Monte "Il pizzo" posta ad una quota di circa 640 m slm. Il rilievo risulta costituito dai litotipi della Formazione del Bisciaro costituita da marne, calcari marnosi e calcareniti di origine torbiditica. La cima del rilievo risulta costituita da un orizzonte calcarenitico appartenente alla formazione delle Marne con Cerroigna.



Figura 23 - Ripresa fotografica della zona di intervento scattata dal centro di Acquasanta.

La parete rocciosa in prossimità dell'impianto termale, esposta grazie all'attività erosiva esercitata dall'approfondimento del corso del fiume, permette l'osservazione diretta della stratificazione; sono presenti bancate con spessori superiori anche al metro ed è inoltre evidente la presenza di un disturbo tettonico derivante da una faglia. Si nota che nella zona di ingresso della galleria i litotipi risultano orientati con una giacitura a reggipoggio. In questa zona dell'alveo del fiume sono presenti massi rocciosi crollati dalla parete aventi volumi anche superiori a $2\div 3 \text{ m}^3$.

In prossimità della zona del depuratore, in sx idrografica del fiume, è presente un'altra scarpata esposta che mostra che la potenza della stratificazione sia mediamente inferiore, ma dove appare evidente una tendenza evolutiva che si manifesta con caduta in alveo di detrito fine e blocchi con dimensioni generalmente inferiori al metro cubo.



Figura 24 - Ripresa fotografica della scarpata rocciosa in prossimità dell'impianto termale.

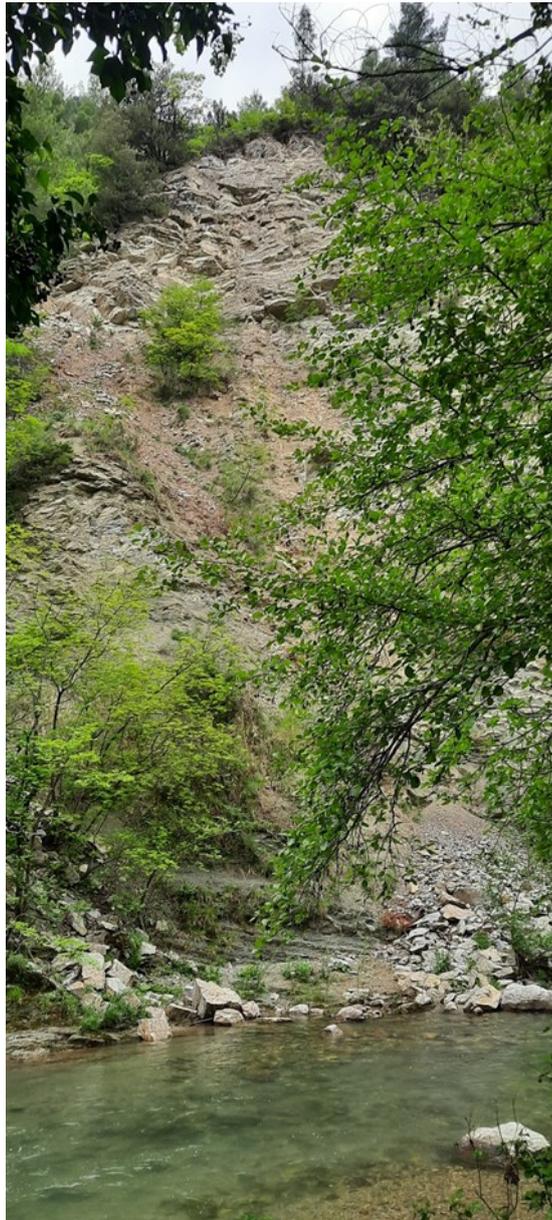


Figura 25 - Ripresa fotografica della scarpata in prossimità del depuratore in sc idrografica del Fiume Tronto.

Le zone da cui appare maggiormente probabile il distacco di massi e detriti che possono interessare i manufatti di progetto e le zone di cantiere, sono individuabili nelle porzioni basse delle scarpate che limitano il fiume in sx idrografica e nelle bancate maggiormente potenti e verticali (calcari e calcareniti che l'erosione selettiva dei livelli pelitici alla base rende instabili) della pendice sud-orientale de "Il Pizzo". La zona boscata a monte del portale della galleria non sembra molto predisposta al rilascio di blocchi rocciosi con volumetrie elevate ma per lo più coinvolta in una evoluzione legata al crollo di masse inferiori al metro cubo e detriti (le successive analisi dovranno confermare queste prime analisi basate sulle informazioni desumibili da osservazioni eseguite a distanza).

Crolli non sono da escludere dalla cima de "Il Pizzo", l'ammasso calcarenitico appare infatti interessato da famiglie di discontinuità che lo disarticolano in volumi prismatici che possono superare facilmente

10÷20 m³ ciascuno. Inoltre, la maggiore erodibilità dei litotipi sottostanti crea una morfologia predisponente ai crolli.

Va sottolineato che, se è in generale vero che le inerzie sismiche possono essere la causa scatenante dei crolli di roccia, nel caso de "Il Pizzo", in considerazione della geometria della cima e delle caratteristiche geologico strutturali tale pericolosità appare amplificata.



Figura 26 - Ripresa fotografica della cima del rilievo de "Il Pizzo".

Con specifico riferimento a "Il Pizzo" è stato effettuato un ulteriore approfondimento di rilievi geomeccanici attraverso l'impiego di tecniche alpinistiche con geologi rocciatori.

A differenza degli altri settori descritti in precedenza, "Il Pizzo" è l'unico che potenzialmente può dare origine a crolli di volume anche dell'ordine di 1 000 ÷ 1500 m³.

Il particolare assetto dei banconi arenaceo/calcarei, che poggiano su una discontinuità suborizzontale, suggerisce la possibilità, di vincolarli, qualora si rendesse necessario il suo consolidamento, impedendone il ribaltamento che è il meccanismo di crollo svincolato dalle discontinuità presenti.

I principali esiti delle attività di rilievo sono riportati in forma di commento alle seguenti figure.

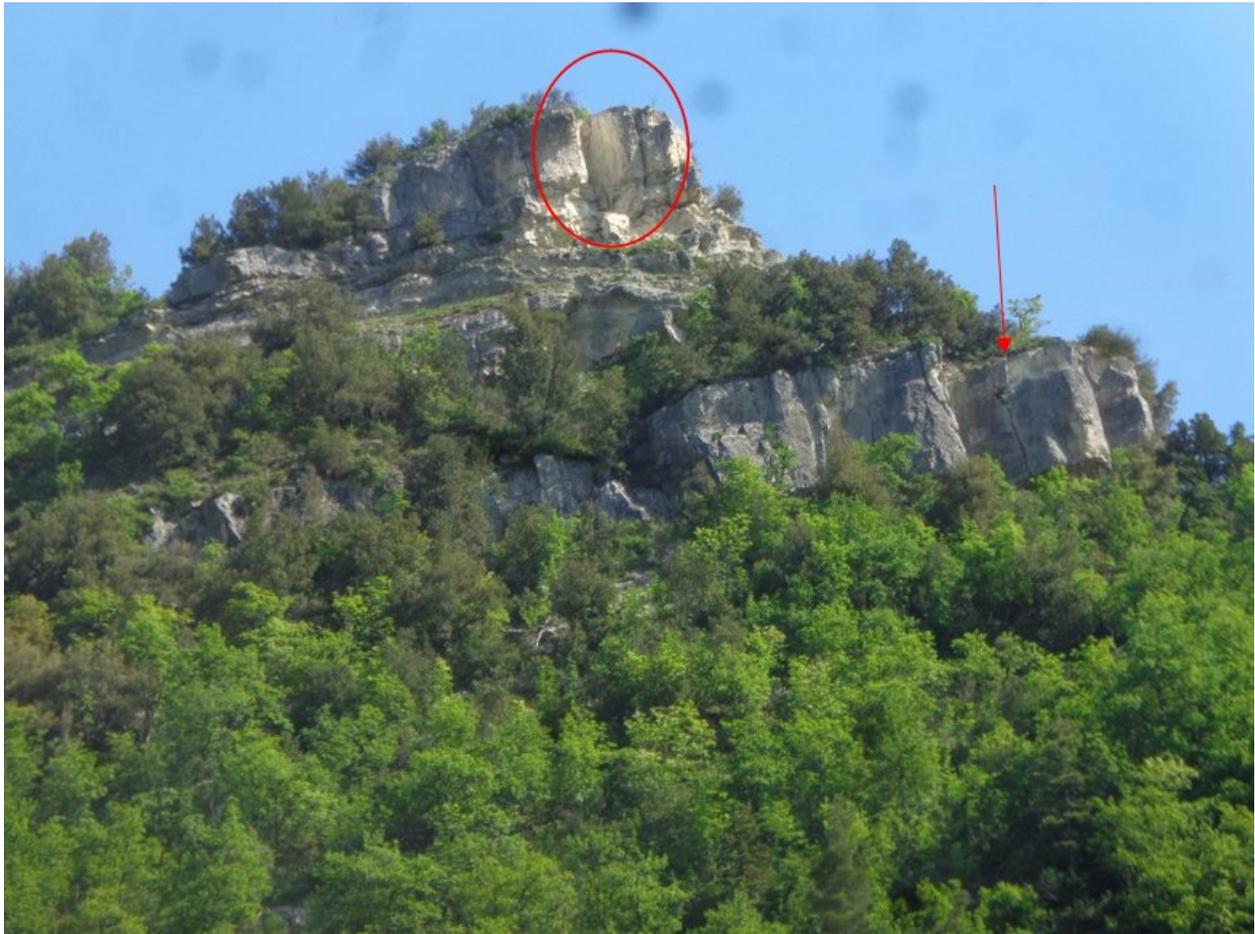


Figura 27 - I banconi di arenaria sono alti circa 10 m, cerchiato in rosso un crollo recente, la freccia indica una frattura aperta che interessa l'intero bancone.



Figura 28 - Area delle più probabili traiettorie che non dovrebbero raggiungere la zona di imbocco in quanto un canale abbastanza definito le confina. La freccia indica un blocco di volume stimato di circa $1\ 000 \div 1\ 300\ m^3$. I blocchi in questo settore del pendio non sono molti e questo è quello di maggiori dimensioni.



Figura 29 - Affioramento visto dal lato di Acquasanta Terme (le foto precedenti sono scattate da San Vito).

6 ANALISI TRAIETTOGRAFICHE DI CROLLI DI BLOCCHI ISOLATI

La modellazione delle traiettorie di caduta è stata eseguita secondo criteri probabilistici a causa della grande aleatorietà del fenomeno e della variabilità dei parametri che condizionano il moto dei blocchi.

La base topografica utilizzata è il rilievo con curve di livello spaziate 2.0 m, dal quale è stato estratto in ambiente GIS un modello digitale del terreno (DTM) con maglie 2x2 m.

I modelli digitali del terreno (DTM) realizzati nell'intorno delle opere stradali di progetto, disponibili per ciascuno dei tre settori di studio, sono stati utilizzati per rappresentare con maggior dettaglio, in campo bidimensionale, le porzioni di versante relative alle aree da proteggere.

Esclusivamente per le simulazioni di caduta massi dalla porzione superiore del Settore Ovest è stato utilizzato un rilievo con curve di livello spaziate 10.0 m, dal quale è stato estratto, sempre in ambiente GIS un modello digitale del terreno (DTM) con maglie 5x5 m.

Nei paragrafi che seguono viene descritto il processo che ha portato alla definizione dei dati di input per le analisi traiettografiche: in particolare la suddivisione delle pareti rilevate in settori omogenei dal punto di vista delle caratteristiche geomeccaniche, l'individuazione delle aree sorgente di crollo e la valutazione dei relativi valori del volume roccioso unitario (VRU), la suddivisione del versante in aree omogenee per la definizione dei parametri geomeccanici di restituzione.

Le simulazioni cinematiche sono state eseguite inizialmente in campo tridimensionale: il modello 3D si adatta infatti allo studio di problemi a grande scala, quando le zone di potenziale distacco dei massi sono molto estese ed hanno grosse differenze di quota rispetto all'area da proteggere. I parametri di input definiti per tali analisi sono volutamente conservativi, in modo da non trascurare nessuna possibile traiettoria. Solo attraverso nuove indagini di dettaglio, da eseguirsi in fase di progettazione esecutiva in corrispondenza delle specifiche aree sorgente, potrà essere possibile effettuare un ulteriore affinamento delle analisi traiettografiche.

Gli scenari ottenuti con modelli 3D costituiscono una rappresentazione realistica delle direttrici principali di propagazione sull'intero versante e quindi dei tratti maggiormente esposti al fenomeno di caduta massi.

Una volta definito il problema a grande scala, esso è stato ricondotto ad ipotesi che semplificano il fenomeno fisico in modo da consentire uno studio più raffinato del fenomeno di impatto: le simulazioni cinematiche in campo bidimensionale sono quindi state eseguite per le traiettorie più significative ai fini della minimizzazione del rischio.

6.1 DEFINIZIONE DELLE AREE SORGENTE E VOLUME ROCCIOSO UNITARIO

Come indicato in premessa, il presente studio è finalizzato all'esame delle condizioni di rischio in tre specifici comparti del Lotto 2.

L'individuazione delle porzioni di parete rocciosa che rappresentano potenziali aree sorgente è stata inizialmente eseguita durante i sopralluoghi effettuati dagli scriventi.

La definizione delle aree sorgente, una volta individuate le singole situazioni di possibile instabilità, non può prescindere dall'individuazione delle aree caratterizzate da maggiori pendenze. Un'analisi in ambiente GIS sul modello digitale del terreno ha permesso di realizzare una carta delle acclività al fine di individuare le aree con maggiori pendenze, ossia le aree dove le scarpate rocciose hanno caratteristiche tali da originare possibili distacchi.

Le potenziali aree sorgente rilevate durante i sopralluoghi, unitamente con la carta delle acclività, ha permesso di delimitare le porzioni di parete rocciosa che rappresentano le zone di distacco.

Inizialmente le simulazioni traiettografiche hanno tenuto conto di tutte le aree sorgente, escludendo solo quelle che, per la morfologia del terreno, non possono originare distacchi che vadano ad interessare le zone di interesse. In un secondo tempo saranno i risultati delle analisi a portare eventualmente all'esclusione di alcune zone di distacco.

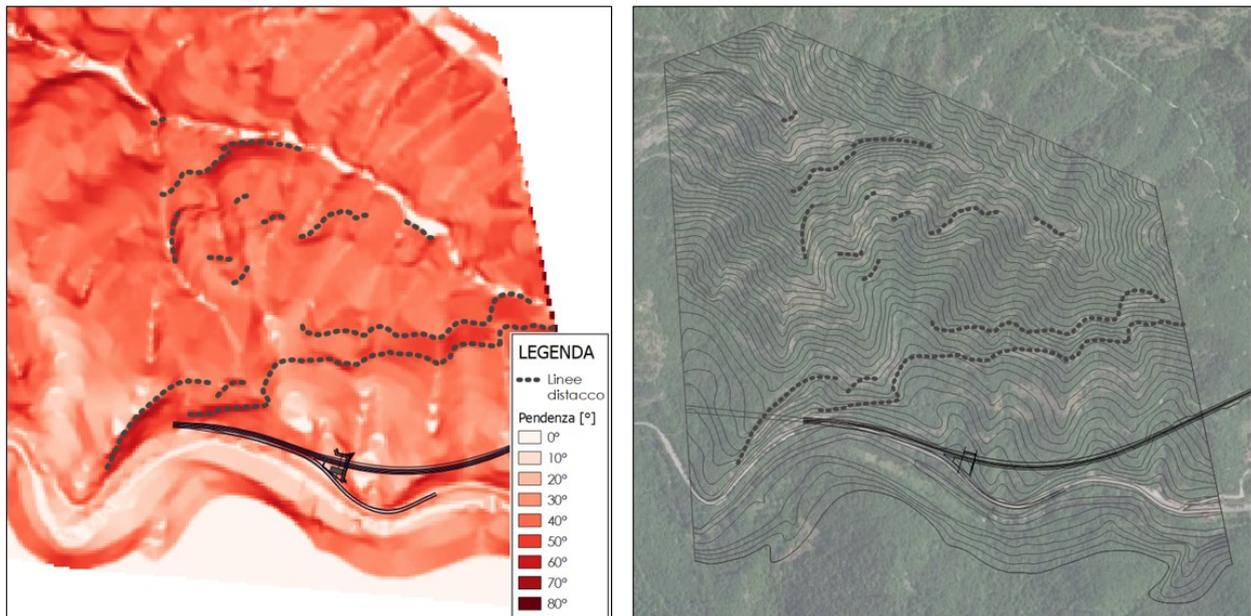


Figura 30 - Settore Ovest, linee di distacco rappresentate sulla mappa delle pendenze (sinistra) e sull' ortofoto (destra).

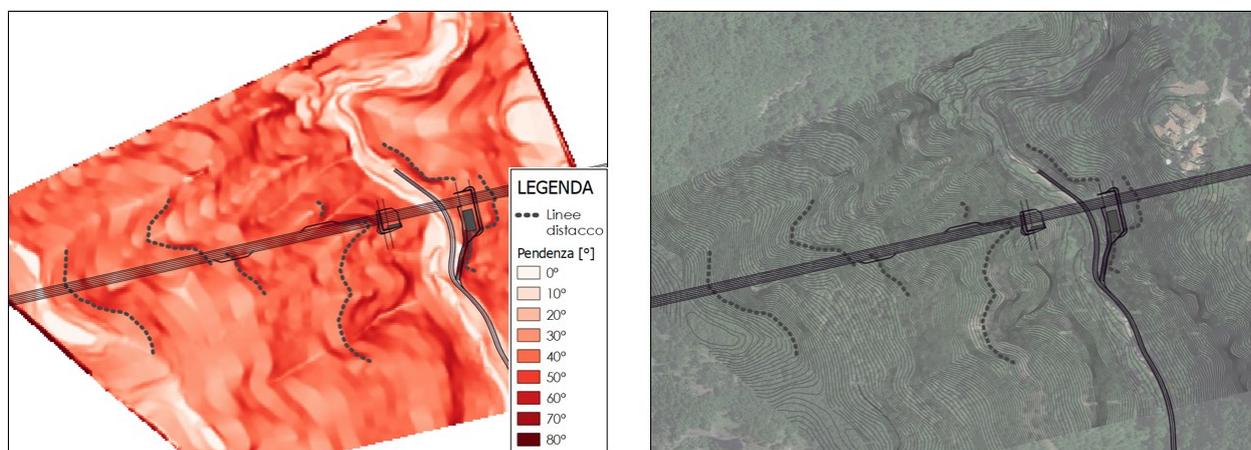


Figura 31 - Settore centrale, linee di distacco rappresentate sulla mappa delle pendenze (sinistra) e sull' ortofoto (destra). Parte della parete rocciosa è direttamente interessata dagli scavi di sbancamento in corrispondenza dell'imbocco Ovest della nuova galleria lato Acquasanta Terme.



Figura 32 - Settore Est, linee di distacco rappresentate sulla mappa delle pendenze (sinistra) e sull' ortofoto (destra).

Nel corso dei rilievi oltre ad eseguire rilievi geomeccanici direttamente nelle zone di possibile sorgente di crollo è stata altresì valutata la presenza di testimoni muti disseminati lungo il versante ed al piede delle scarpate.

Solo in questo modo è stato possibile valutare la possibilità che i volumi di roccia possibilmente staccabili dalla parete, in relazione ai dati di spaziatura e persistenza delle famiglie di discontinuità, siano in grado di raggiungere il piede del versante mantenendo invariata la propria dimensione. Ci si riferisce al fatto che, molto spesso, accade che volumetrie pluridecametriche si spezzino in porzioni minori in seguito a sollecitazioni interne al blocco stesso piuttosto che in seguito ad impatti.

Pertanto, nonostante sia stata riscontrata la possibilità di distacchi di volumi eccezionali, si è ritenuto di riferirsi a fenomeni rappresentativi e pertanto le analisi traiettografiche sono state eseguite considerando un VRU pari a 5.0 m³ per il Settore Ovest ed Est mentre 2.0 m³ per quello centrale.

Con riferimento alla possibilità di crollo da "Il Pizzo" è stata eseguita una specifica analisi di simulazione di crollo in massa per la quale si rimanda allo specifico capitolo.

6.2 DEFINIZIONE DELLE AREE OMOGENEE

La suddivisione dei versanti oggetto di studio in aree omogenee è fondamentale al fine di definire una distribuzione areale dei parametri geomeccanici di restituzione.

Sulla base dell'analisi delle traiettorie di caduta reali sono stati valutati i coefficienti di restituzione utilizzati per le simulazioni cinematiche.

La suddivisione in aree omogenee è dettata da vari fattori come la differente copertura del suolo, la presenza di un litotipo, la copertura vegetale, la granulometria dei vari depositi e la presenza di un'opera o un'infrastruttura antropica.

La metodologia utilizzata per la suddivisione in aree omogenee si basa sulla discretizzazione di diverse zone in base alle loro caratteristiche rilevate dall'analisi dell'ortofoto nonché nei sopralluoghi effettuati. Si è scelto di suddividere le zone di studio in 5 aree omogenee:

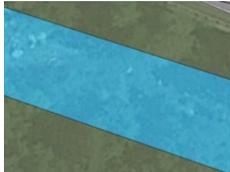
<p>Substrato roccioso</p> 	<p>Copertura vegetale di modesto spessore</p> 	<p>Detrito</p> 
<p>Asfalto</p> 	<p>Fiume</p> 	



Figura 33 - Settore Ovest, suddivisione dell'area di studio in aree omogenee (in ambiente GIS).



Figura 34 - Settore centrale, suddivisione dell'area di studio in aree omogenee (in ambiente GIS).



Figura 35 - Settore Est, suddivisione dell'area di studio in aree omogenee (in ambiente GIS).

6.3 ANALISI 3D

Le simulazioni cinematiche sono state eseguite in campo tridimensionale. Gli scenari ottenuti con modelli 3D costituiscono una rappresentazione realistica delle possibili traiettorie di propagazione sull'intero versante.

6.3.1 Simulazioni di caduta massi in campo tridimensionale - Geomassi

L'analisi di caduta massi è stata condotta utilizzando il software commerciale IS GeoMassi v.20 della CDM Dolmen [40]. Il codice adopera il metodo "Lumped Mass" attraverso il quale il masso è schematizzato come un punto materiale, ignorando aspetti collegati alla forma e orientamento dei blocchi all'istante dell'impatto con la superficie del pendio. Il fenomeno d'impatto è schematizzato con riferimento ai coefficienti di restituzione dell'energia, che rappresentano completamente le caratteristiche dell'impatto. Tali coefficienti sono considerati distintamente nella componente normale e tangenziale. Il fenomeno di roto-scivolamento è schematizzato con riferimento al coefficiente di attrito dei terreni sul pendio.

Trattandosi di una massa puntiforme, il metodo non tiene conto della forma del blocco e quindi della componente rotazionale dell'energia: gli effetti del coefficiente di forma del blocco rientrano pertanto fra le incertezze caratteristiche di questo tipo di analisi, che devono in effetti essere considerate soltanto indicative delle modalità di caduta dei massi. L'analisi di un consistente numero di traiettorie porta in genere all'ottenimento di ottimi risultati ai fini pratici, soprattutto in termini d'inquadramento del problema e d'individuazione delle corrette modalità di intervento per la mitigazione del rischio di caduta.

Il profilo del versante è definito da una sequenza di superfici triangolari. Le coordinate dei punti (DTM/DEM) sono state importate da file ASC (file di testo in formato "ARC/INFO ASCII GRID").

L'analisi del rimbalzo e del roto-scivolamento su ciascun triangolo è eseguita con riferimento al piano che lo contiene; è però possibile definire un valore di rugosità del terreno (altezza media delle asperità), che influisce sull'angolo di rimbalzo, secondo le dimensioni del blocco. L'analisi delle varie fasi del moto (rimbalzo-volo-rotoscivolamento) prosegue fino all'arresto del blocco, che avviene quando l'energia traslazionale è inferiore a $1E-06$ [kJ] o la velocità traslazionale è inferiore a 0.005 [m/s].

Nella necessità di schematizzare un fenomeno complesso, considerando l'aleatorietà dei parametri che governano l'analisi (interazione blocco-terreno, condizioni iniziali), si utilizza un modello statistico.

Ad alcuni parametri, tra cui le dimensioni del blocco, la velocità iniziale, i coefficienti di restituzione, l'angolo d'attrito, la scabrezza ed altri, si può associare una distribuzione normale, definita dal valor medio μ e dallo scarto quadratico medio (o deviazione standard) σ ; nel caso in cui si assegni uno scarto nullo, il parametro avrà natura deterministica. Ad ogni evento lungo il percorso di un blocco, viene valutato un nuovo valore casuale.

I terreni sono caratterizzati dai coefficienti di restituzione e dall'angolo di attrito, il cui valore è definito dalla coppia di parametri valor medio e scarto quadratico medio σ o deviazione standard.

Sono soprattutto i coefficienti di restituzione normale e tangenziale a governare in modo sostanziale la simulazione di caduta. Essi sono definiti dai rapporti di energia post e pre-impatto e dipendono dalla forma e dalla dimensione dei blocchi, oltre che naturalmente dal tipo di copertura del suolo.

Di seguito si riportano i valori assegnati ai suddetti coefficienti e parametri nell'ambito delle analisi traiettografiche 3D, estratti a partire dalla bibliografia e da precedenti esperienze degli scriventi in ambiti simili a quello in oggetto. Come scritto in precedenza, i parametri di input definiti per le analisi in campo tridimensionale sono volutamente conservativi, in modo da non trascurare nessuna possibile traiettoria.

Tabella 1 - Parametri del terreno utilizzati nelle simulazioni in campo tridimensionale (Geomassi).

Terreno	K_n	$K_n-\sigma$	K_t	$K_t-\sigma$	Delta [°]	Delta- σ [°]	S [m]
Substrato roccioso	0.45	0.04	0.97	0.04	20	2	0
Copertura vegetale di modesto spessore	0.35	0.04	0.92	0.04	20	2	0
Detrito	0.32	0.04	0.87	0.04	25	2	0
Asfalto	0.40	0.04	0.90	0.04	25	2	0
Fiume	0.10	0.04	0.50	0.04	38.5	2	0

Il software utilizzato consente di effettuare le simulazioni considerando la riduzione del coefficiente di restituzione normale K_n attraverso un fattore di scala. Tale coefficiente, che rappresenta una misura del grado di elasticità in un impatto normale al pendio, non è indipendente dalla velocità e cioè dall'energia di impatto.

Infatti, per basse velocità l'impatto è prevalentemente elastico, mentre al crescere della velocità aumentano gli effetti anelastici dell'urto, fino allo sviluppo di veri e propri meccanismi di rottura ed alla dissipazione di elevati valori di energia.

In questo caso l'effettivo valore di K_n si riduce e l'equazione che descrive il fenomeno può essere così scritta [13]:

$$K_n (\text{scalato}) = K_n * \text{fattore di scala}$$

$$\text{fattore di scala} = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_{ROCK}}{K}\right)^2}$$

V_{ROCK} velocità del blocco immediatamente prima dell'impatto misurato normalmente alla superficie.

K velocità di riferimento; il fattore di scala è pari a 0.5 quando la velocità del blocco prima dell'impatto (V_{ROCK}) assume un valore pari a K .

L'andamento del fattore di scala in funzione della velocità del blocco è graficamente rappresentato in Figura 36.

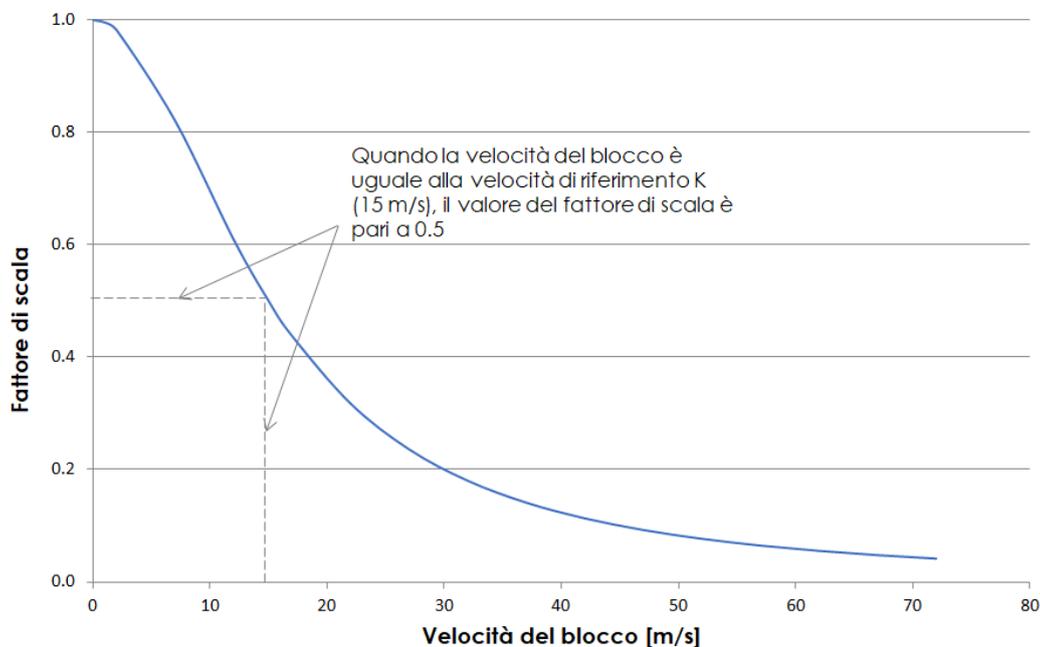


Figura 36 - Variazione del fattore di scala in funzione della velocità del blocco.

Il fattore di scala rappresenta la transizione dalle condizioni quasi elastiche per basse velocità a condizioni fortemente anelastiche, a causa dell'aumento della fratturazione del blocco e dei crateri sulla superficie del pendio, per elevate velocità. Il valore della costante K è stato fissato a 15.00 m/s (molto vicino a 9.144 m/s [6], valore ricavato empiricamente ed utilizzato nel software Colorado Rockfall Simulation Program (CRSP) [13]); per tale valore di velocità si ha una riduzione del 50% del corrispondente coefficiente di restituzione K_n .

Le simulazioni di caduta massi sono state effettuate in ciascun settore simulando un minimo di 5000 traiettorie.

6.3.2 Risultati delle analisi traiettografiche

Le figure che seguono rappresentano graficamente le traiettorie ottenute dal calcolo e mostrano, per ciascuna area sorgente, i punti di arresto lungo il pendio.

Le principali considerazioni ed esiti delle varie analisi sono riportati in forma di commento alle singole figure.

In conclusione, le analisi traiettografiche eseguite in campo tridimensionale permettono di identificare le principali direttrici di caduta che saranno oggetto di un successivo studio di dettaglio in campo bidimensionale.

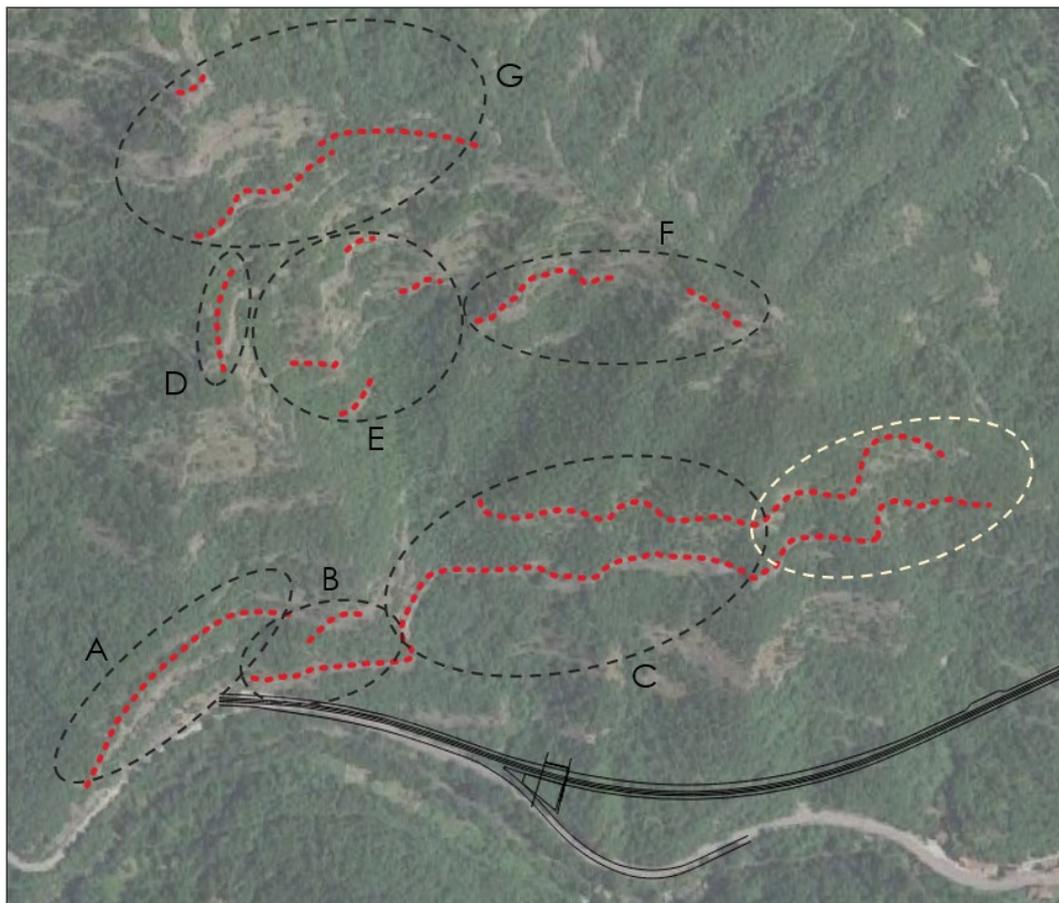


Figura 37 – Settore Ovest, suddivisione delle aree sorgente di crollo in 7 settori. In bianco è evidenziata la porzione di versante in cui distacchi generano traiettorie esterne all'area di interesse.

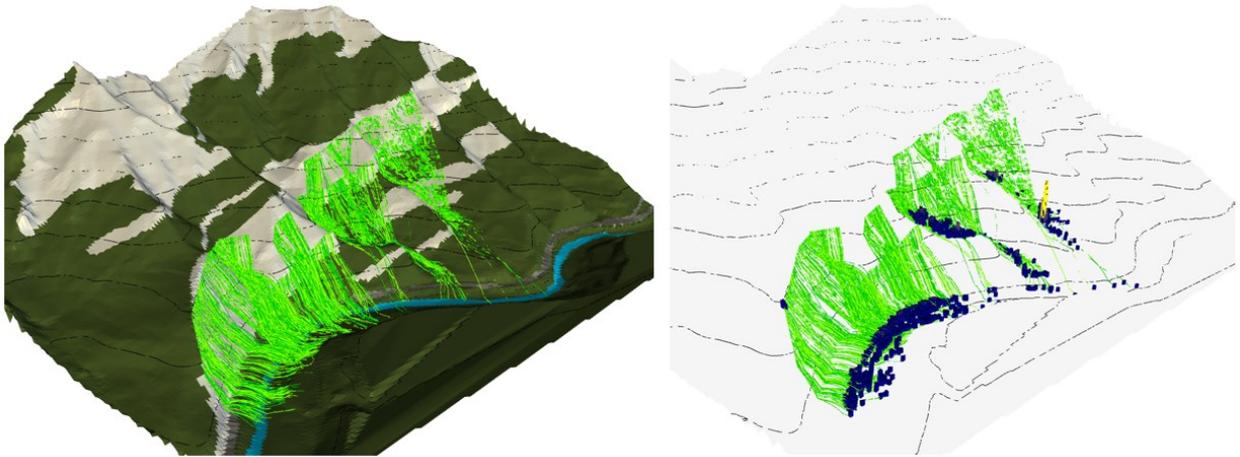


Figura 38 – Settore Ovest, porzione inferiore (aree A, B e C), traiettorie di caduta e punti di arresto dei massi. Si noti come la maggior parte delle traiettorie interessino la strada e l'imbocco della galleria. Nella parte di destra si rilevano molti arresti lungo il versante.

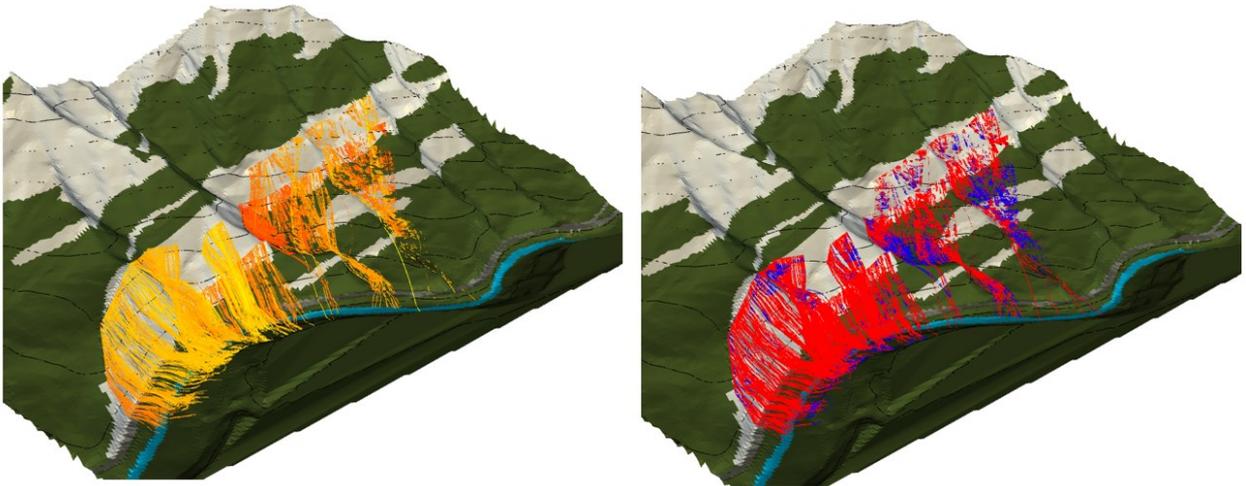


Figura 39 – Settore Ovest, porzione inferiore, traiettorie colorate in base alla velocità dei massi (a sinistra): i colori che, passando dal rosso al giallo, caratterizzano le traiettorie dei massi rappresentano il graduale aumento di velocità dei blocchi; traiettorie colorate in base al tipo di moto (a destra): volo in rosso, rotolamento in blu.

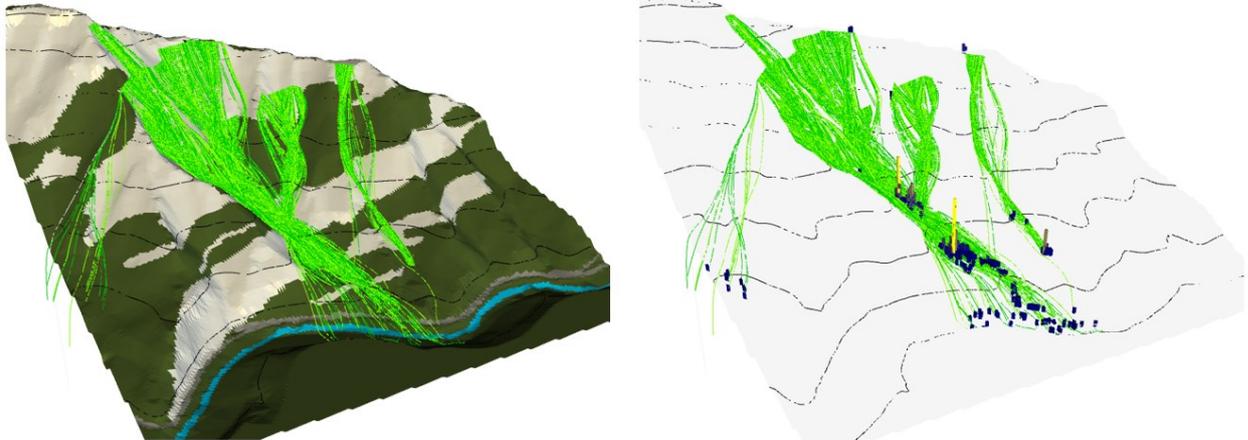


Figura 40 – Settore Ovest, porzione superiore (aree D, E, F e G), traiettorie di caduta e punti di arresto dei massi. Si noti come in corrispondenza dell'estremità di sinistra di una zona sorgente si generino delle traiettorie che deviano dai percorsi principali di caduta uscendo dai limiti di interesse del modello. In questo caso le traiettorie interessano prevalentemente la zona d'imbocco Ovest della nuova galleria lato Favalanziata.

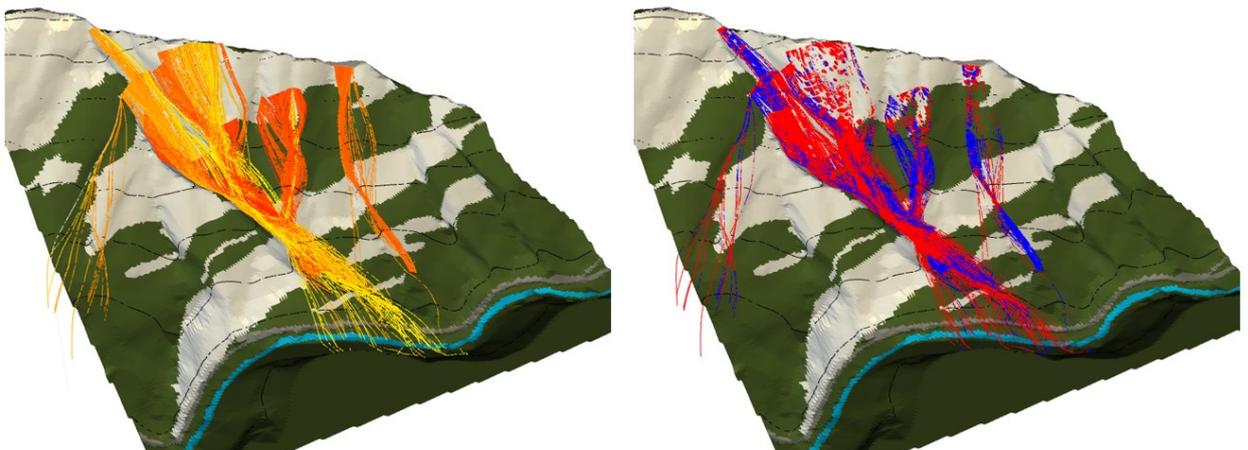


Figura 41 – Settore Ovest, porzione superiore, traiettorie colorate in base alla velocità dei massi (a sinistra): i colori che, passando dal rosso al giallo, caratterizzano le traiettorie dei massi rappresentano il graduale aumento di velocità dei blocchi; traiettorie colorate in base al tipo di moto (a destra): volo in rosso, rotolamento in blu.

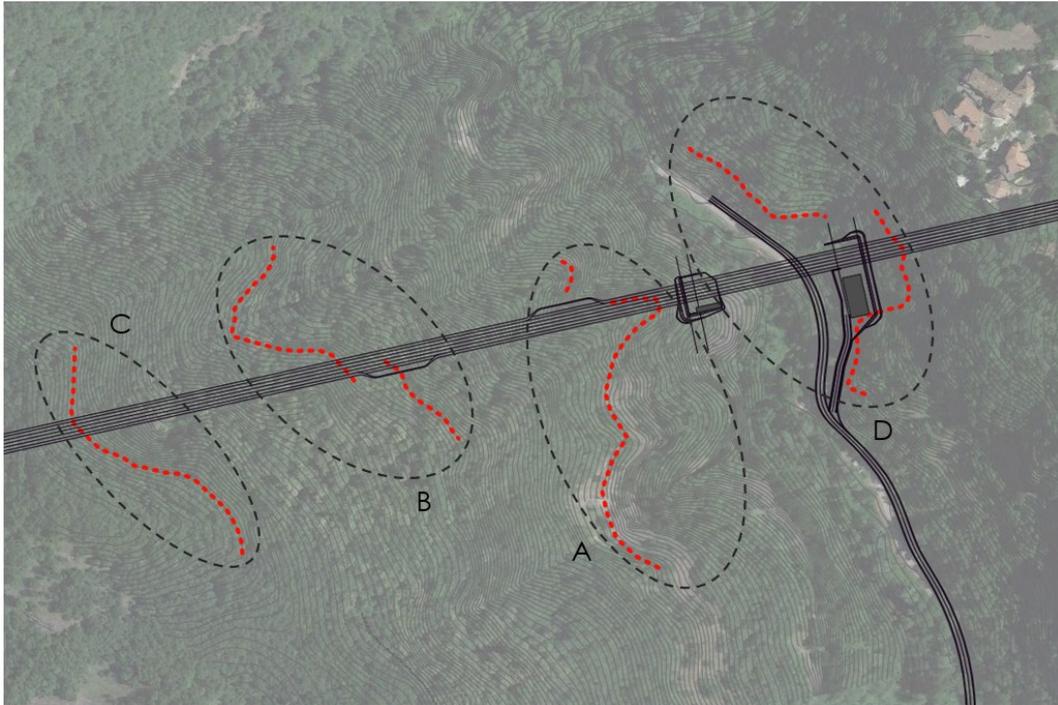


Figura 42 – Settore centrale, suddivisione delle aree sorgente di crollo in 4 settori. Parte della parete rocciosa è direttamente interessata dagli scavi di sbancamento in corrispondenza dell'imbocco Ovest della nuova galleria lato Acquasanta Terme.

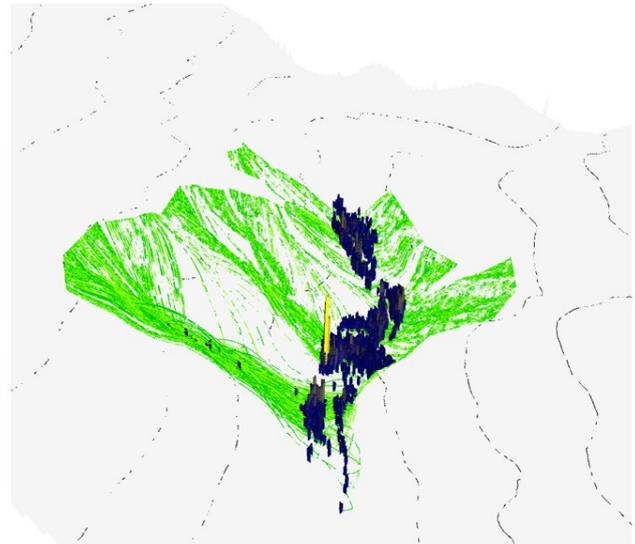
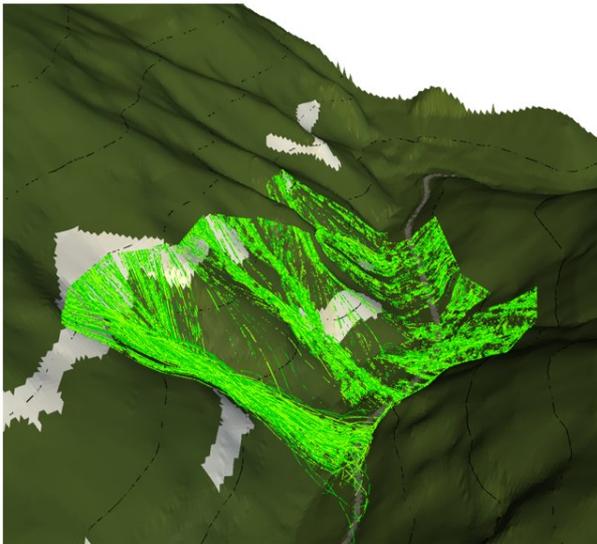


Figura 43 – Settore centrale, porzione inferiore (aree A e D), traiettorie di caduta e punti di arresto dei massi. Il settore, caratterizzato da maggiori pendenze, porta ad avere quasi tutti i punti di arresto dei massi ai piedi delle pareti rocciose, in corrispondenza dei due imbocchi e delle relative piste d'accesso.

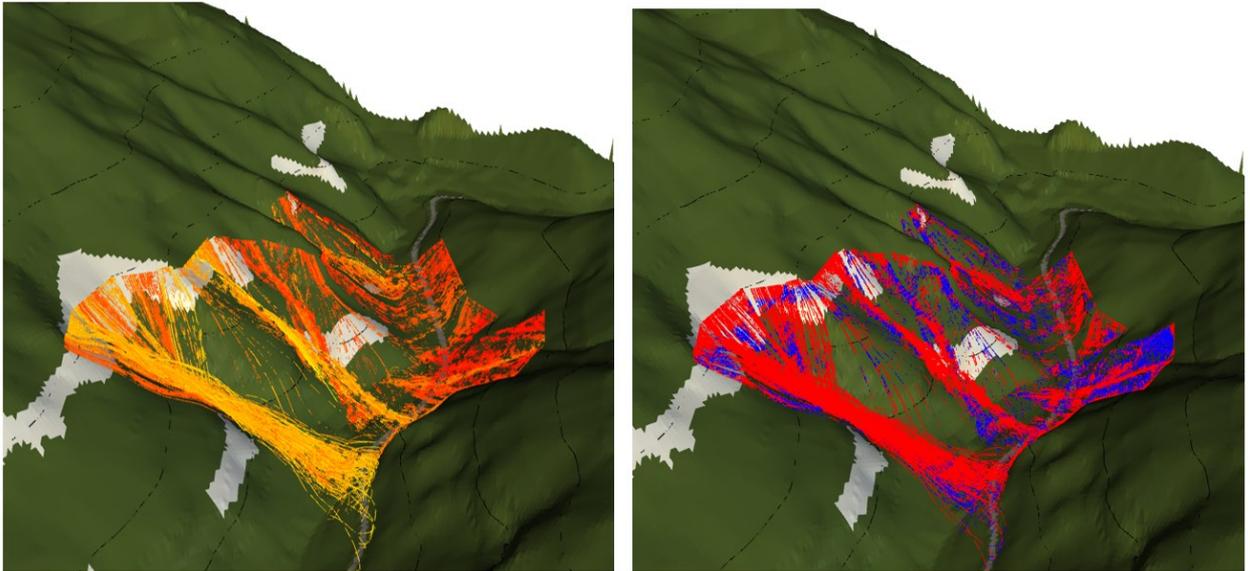


Figura 44 – Settore centrale, porzione inferiore, traiettorie colorate in base alla velocità dei massi (a sinistra): i colori che, passando dal rosso al giallo, caratterizzano le traiettorie dei massi rappresentano il graduale aumento di velocità dei blocchi; traiettorie colorate in base al tipo di moto (a destra): volo in rosso, rotolamento in blu

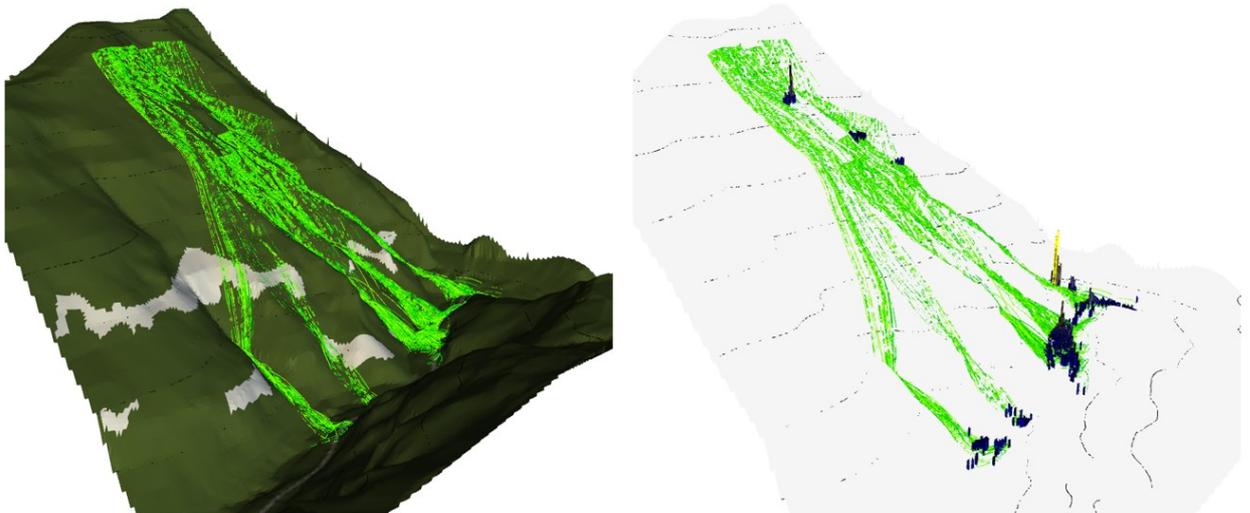


Figura 45 – Settore centrale, porzione superiore (aree B e C), traiettorie di caduta e punti di arresto dei massi. Il settore, caratterizzato da maggiori pendenze, porta ad avere quasi tutti i punti di arresto dei massi ai piedi delle pareti rocciose.

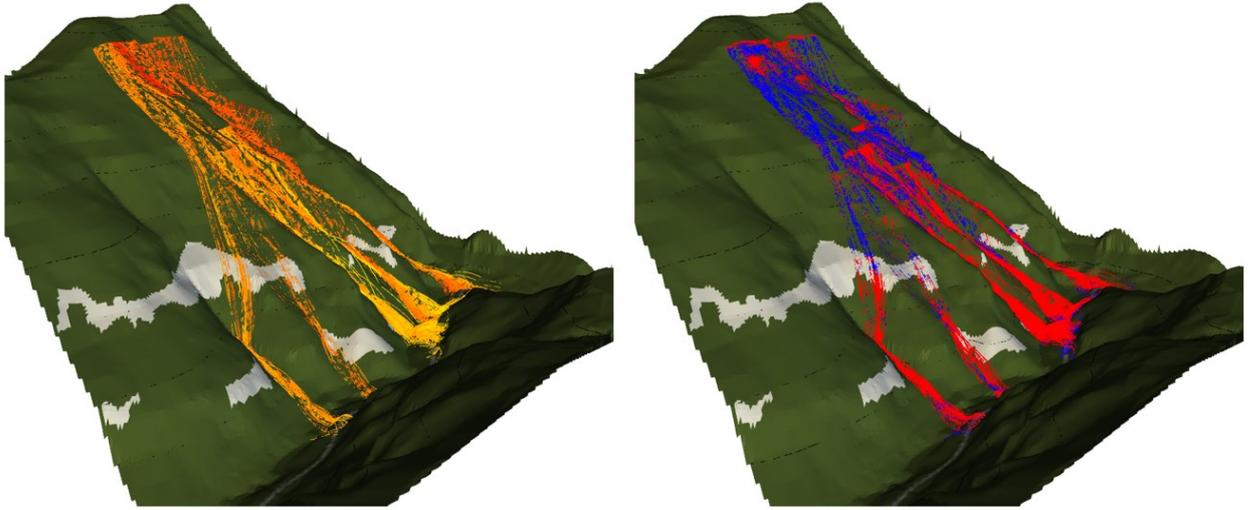


Figura 46 – Settore centrale, porzione superiore, traiettorie colorate in base alla velocità dei massi (a sinistra): i colori che, passando dal rosso al giallo, caratterizzano le traiettorie dei massi rappresentano il graduale aumento di velocità dei blocchi; traiettorie colorate in base al tipo di moto (a destra): volo in rosso, rotolamento in blu).

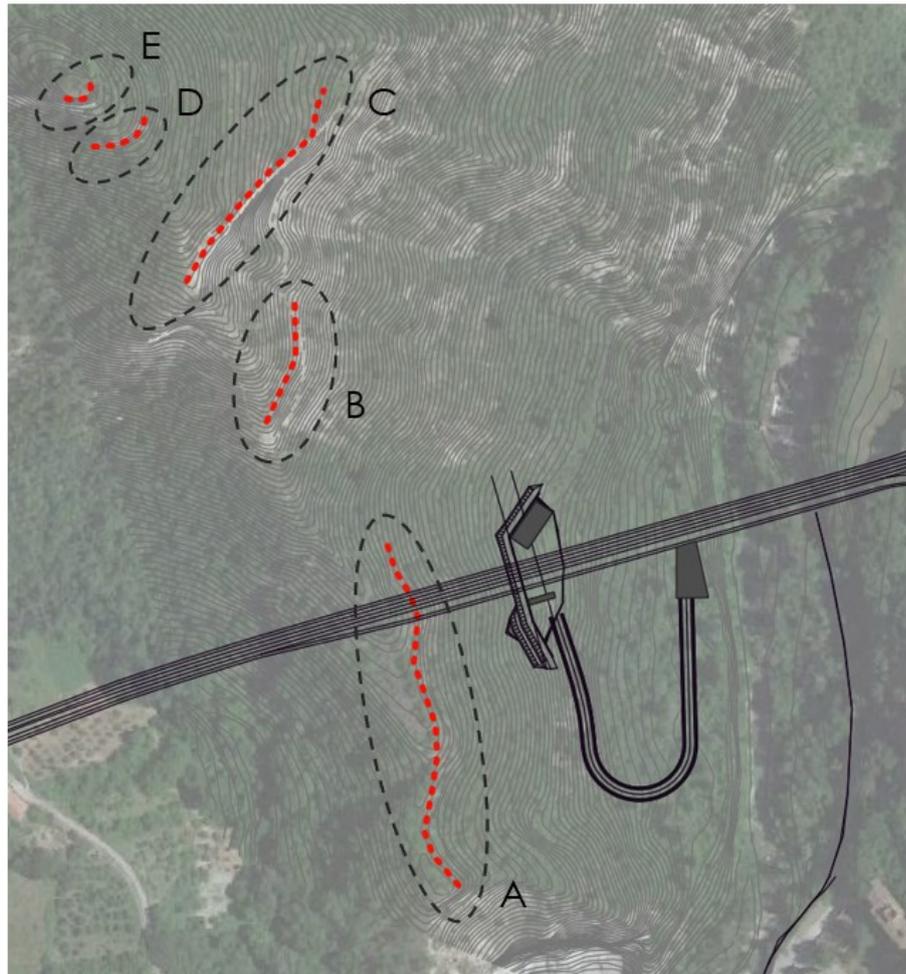


Figura 47 – Settore Est, suddivisione delle aree sorgente di crollo in 5 settori

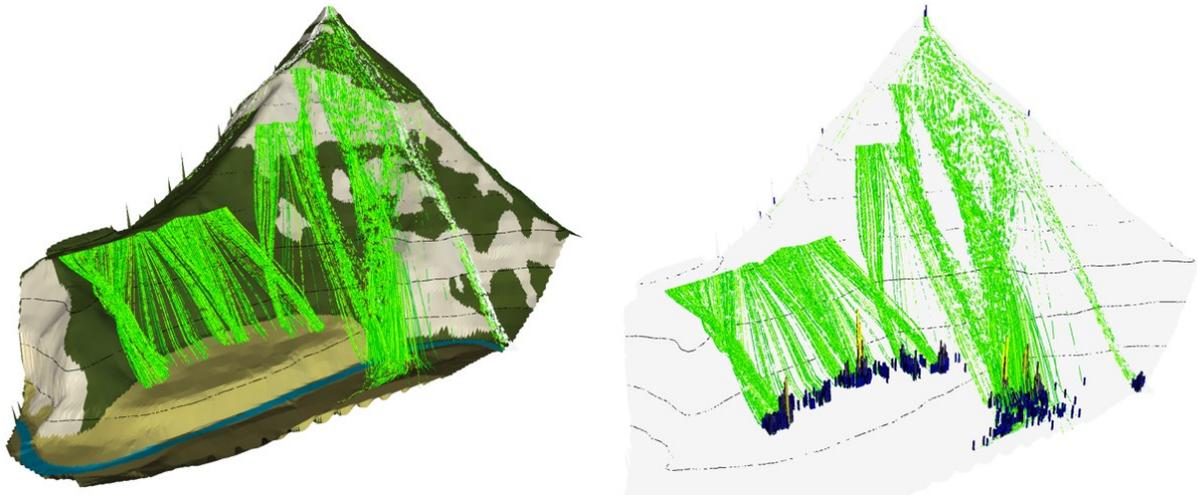


Figura 48 – Settore Est, traiettorie di caduta e punti di arresto dei massi. L'imbocco Est nuova galleria lato Acquasanta Terme ed il primo tratto della pista risultano soggette al rischio di caduta massi, mentre il tratto di pista dopo la curva si trova più a valle del luogo dei punti d'arresto dei massi.

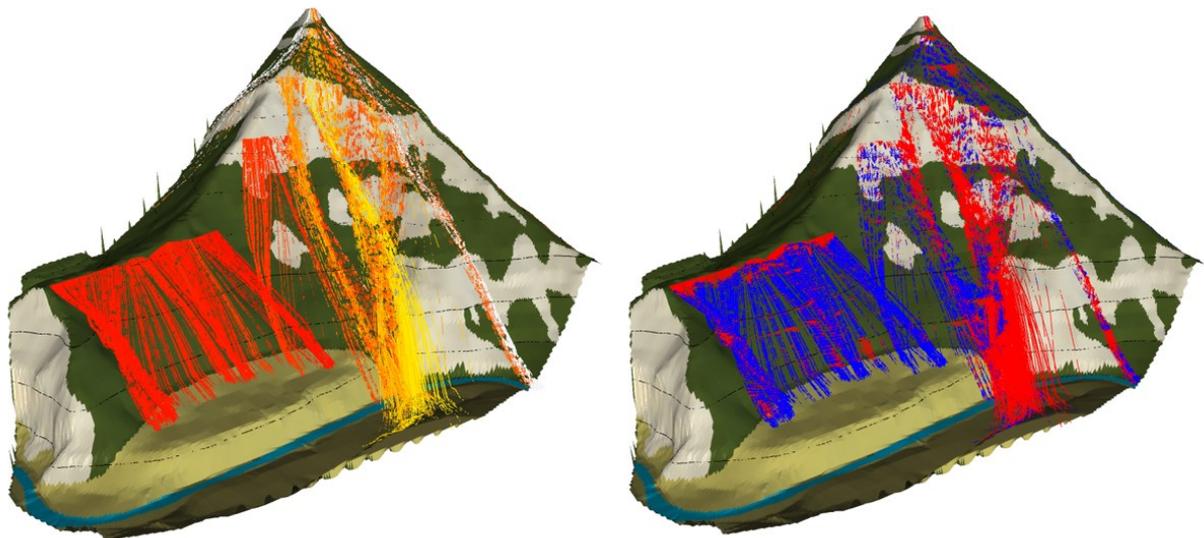


Figura 49 – Settore Est, traiettorie colorate in base alla velocità dei massi (a sinistra): i colori che, passando dal rosso al giallo, caratterizzano le traiettorie dei massi rappresentando il graduale aumento di velocità dei blocchi; traiettorie colorate in base al tipo di moto (a destra): volo in rosso, rotolamento in blu).

6.3.3 Traiettorie rappresentative

Le analisi in campo tridimensionale, eseguite con parametri di input volutamente conservativi, forniscono una rappresentazione realistica delle direttrici principali di propagazione sull'intero versante.

Le informazioni relative ai risultati delle analisi effettuate possono essere esportate in ambiente GIS (in formato shapefile). In particolare, ai fini della scelta delle traiettorie rappresentative, oggetto del successivo studio in campo bidimensionale, sono stati esportati i risultati in termini di isolinee relative al numero di massi transitati ed ai valori di energia.

Ai fini dell'individuazione delle traiettorie rappresentative, la visualizzazione dei risultati in ambiente GIS permette, per ciascuna area sorgente, di escludere le linee di distacco che generano percorsi dei massi coincidenti con quelli relativi a linee di distacco situate più a monte; queste ultime, infatti, daranno origine a traiettorie caratterizzate da energie maggiori e quindi più significative per il dimensionamento delle opere di difesa passiva. Qualora la morfologia del terreno non favorisca la discesa dei massi, rendendo quindi più significative le traiettorie che si originano più a valle, le seguenti figure mostrano come si possano utilizzare le direttrici precedentemente individuate per il dimensionamento delle opere. Esse saranno nel seguito indicate aggiungendo "bis" al nome della traiettoria.

In particolare, le aree sorgente che non vengono considerate nelle seguenti analisi, in quanto superate da traiettorie più significative, sono le seguenti:

- Settore Ovest: aree sorgente D ed E, obliterate dalle traiettorie provenienti dall'area sorgente G; in tal caso, i risultati delle analisi in campo tridimensionale, nonostante i parametri scelti siano stati particolarmente conservativi, mostrano che i massi si fermano più a monte rispetto alla strada.
- Settore centrale: area sorgente B, obliterata dalle traiettorie provenienti dall'area sorgente C. In tal caso i risultati mostrano come alcune traiettorie si spingano al di fuori dell'area da proteggere; tali traiettorie verranno trascurate.
- Settore Est: aree sorgente C e D, obliterate dalle traiettorie provenienti dall'area sorgente E. Anche in questo caso i risultati mostrano alcune traiettorie esterne all'area da proteggere, traiettorie che verranno trascurate.

A conferma di quanto sopra, nelle seguenti figure sono rappresentati, per ciascun settore, i risultati in termini di isolinee relative al numero di massi transitati.

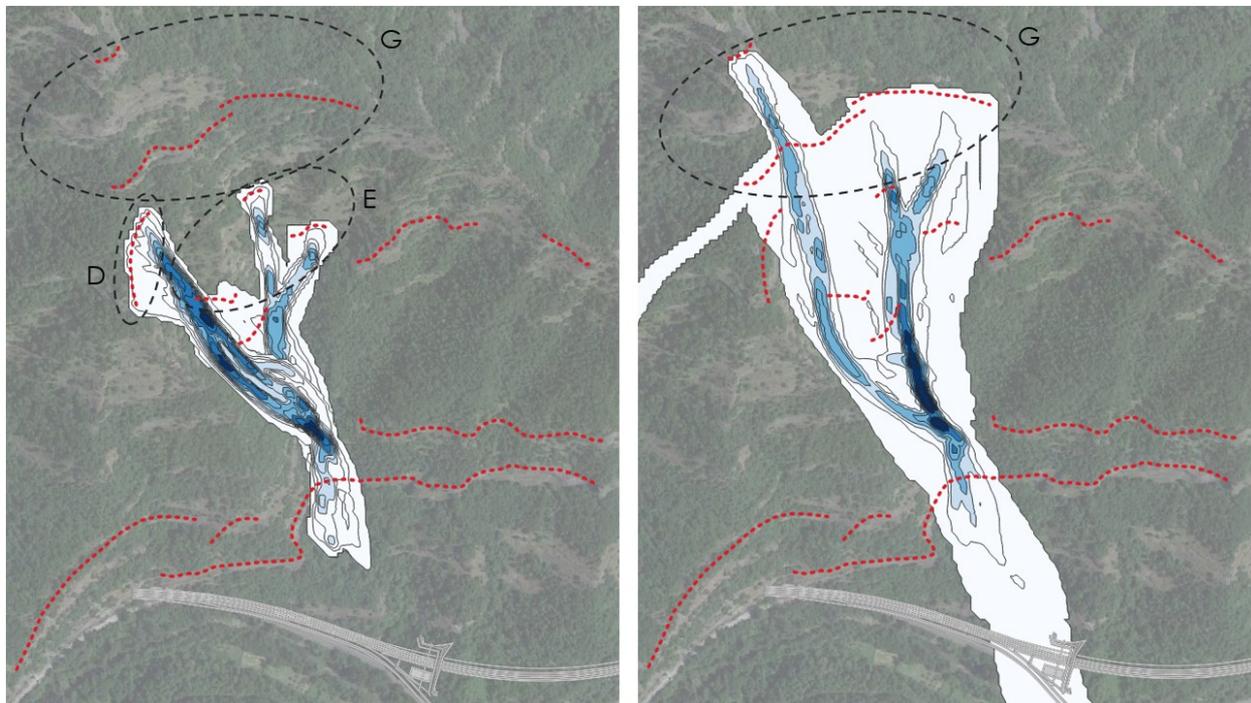


Figura 50 – Settore Ovest, le traiettorie provenienti dai settori D ed E (a sinistra) sono obliterate da quelle provenienti dal settore G (a destra), provenienti da linee di distacco situate più a monte e quindi caratterizzate da energie maggiori.

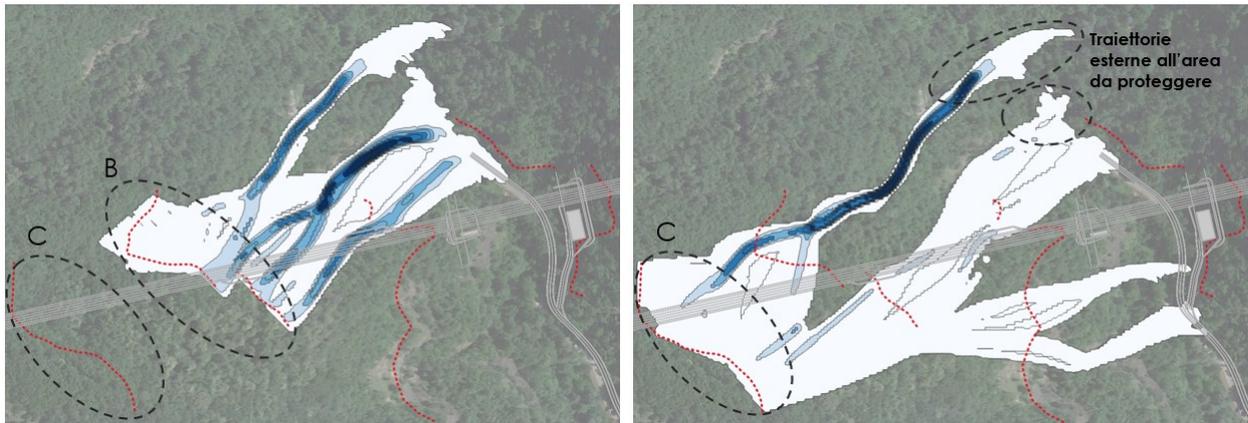


Figura 51 – Settore centrale, le traiettorie provenienti dal settore B (a sinistra) sono obliterate da quelle provenienti dal settore C (a destra), provenienti da linee di distacco situate più a monte e quindi caratterizzate da energie maggiori; la figura a destra evidenzia le traiettorie esterne all'area da proteggere

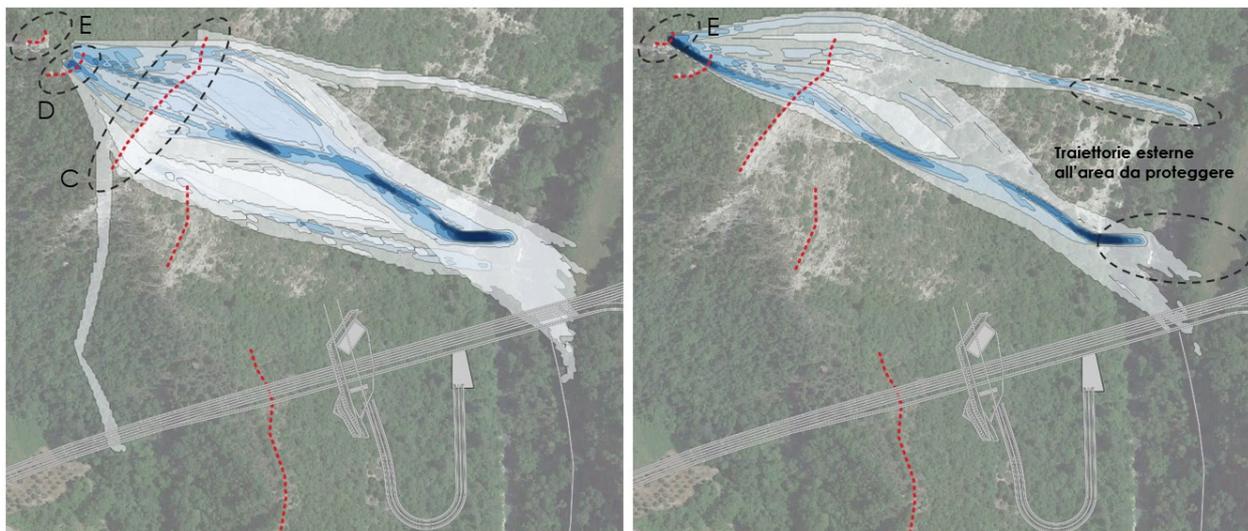


Figura 52 – Settore Est, le traiettorie provenienti dai settori C e D (a sinistra) sono obliterate da quelle provenienti dal settore G (a destra), provenienti da linee di distacco situate più a monte e quindi caratterizzate da energie maggiori; la figura a destra evidenzia le traiettorie esterne all'area da proteggere.

Alcune traiettorie sono infine state escluse dalle analisi di rotolamento perché nelle rispettive aree sorgente si è previsto di realizzare interventi di difesa attiva in parete, volti ad impedire il distacco dei massi: rafforzamento corticale e consolidamenti puntuali. In particolare, le aree sorgente di cui sopra sono le seguenti:

- Settore Ovest: area sorgente A, parte più ad Ovest;
- Settore centrale: aree sorgente A e D.

Nelle figure seguenti sono mostrate, in ambiente GIS, le traiettorie utilizzate per le simulazioni 2D; ognuna di esse, all'interno di ciascuna area sorgente, è stata individuata come rappresentativa di ciascun fascio di traiettorie di interesse, in funzione delle aree da proteggere.

Le traiettorie rappresentative vengono mostrate quindi nel seguito in relazione al fascio di traiettorie individuato con le analisi in campo tridimensionale (caso 'a' nelle seguenti figure), in relazione agli stessi risultati in termini di isolinee del numero di massi transitati (caso 'b') e di isolinee dei valori di energia (caso 'c').

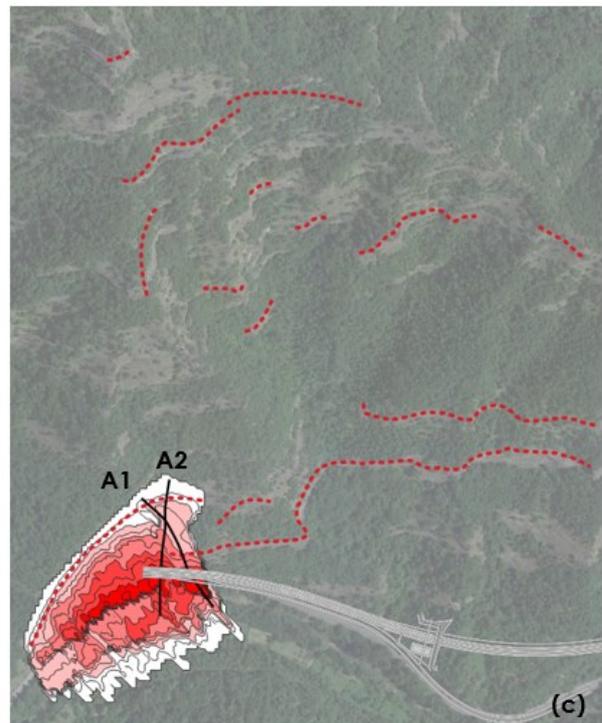
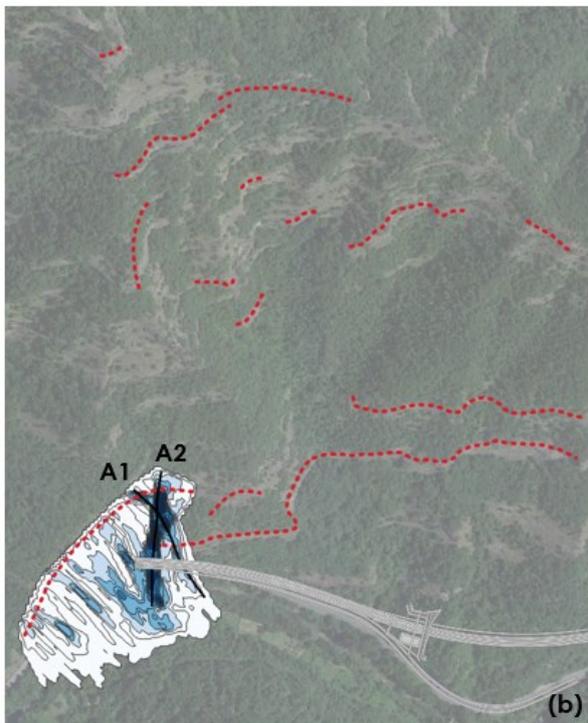
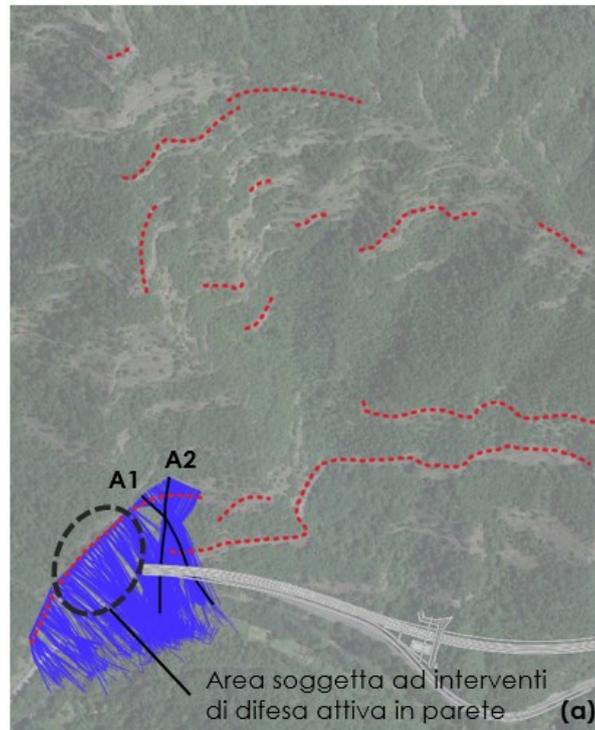


Figura 53 – Settore Ovest, area sorgente A: traiettorie selezionate per le analisi in campo bidimensionale (A1, A2); fasci di traiettorie (a), isolinee relative al numero di massi transitati (b) e isolinee relative ai valori di energia (c).

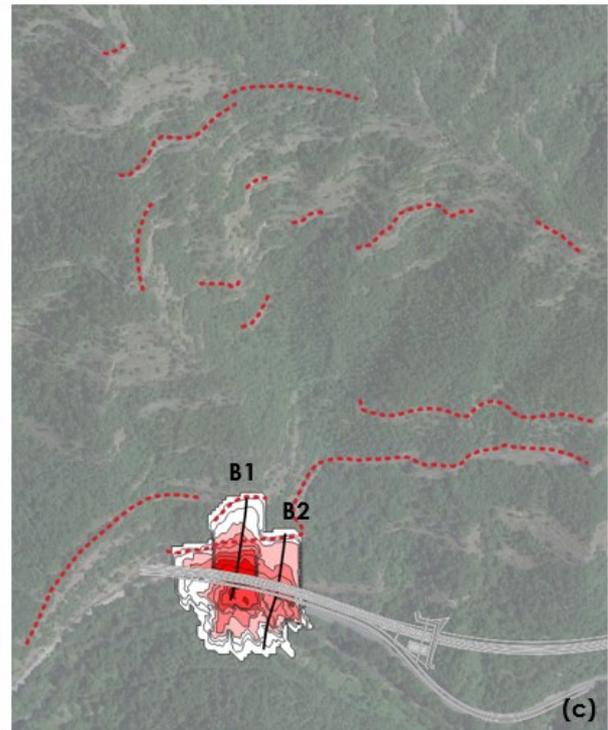
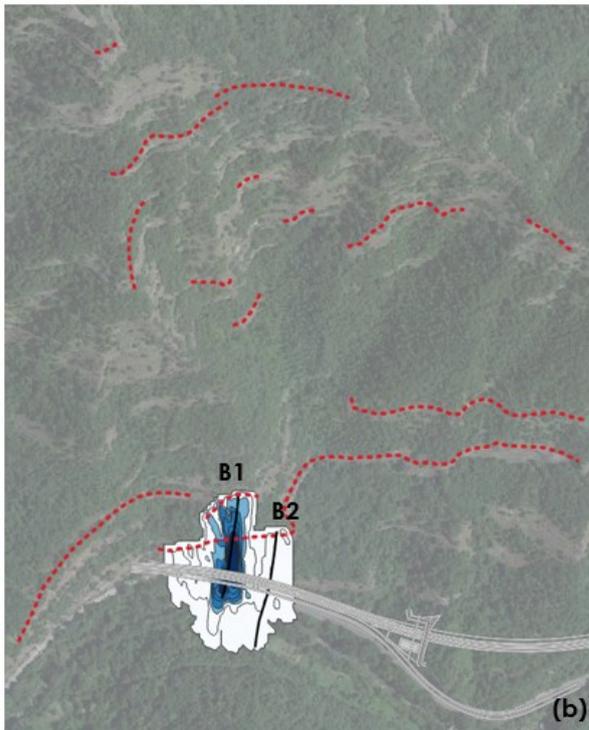
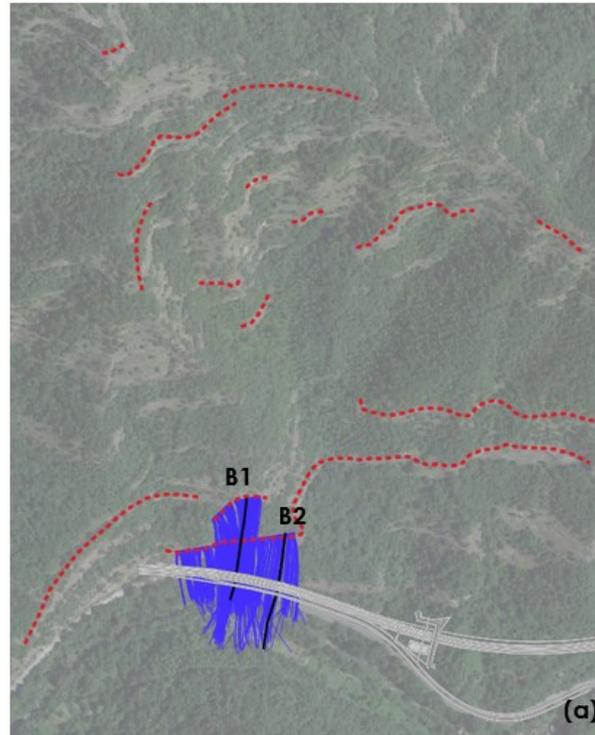


Figura 54 – Settore Ovest, area sorgente B: traiettorie selezionate per le analisi in campo bidimensionale (B1, B2); fasci di traiettorie (a), isolinee relative al numero di massi transitati (b) e isolinee relative ai valori di energia (c).

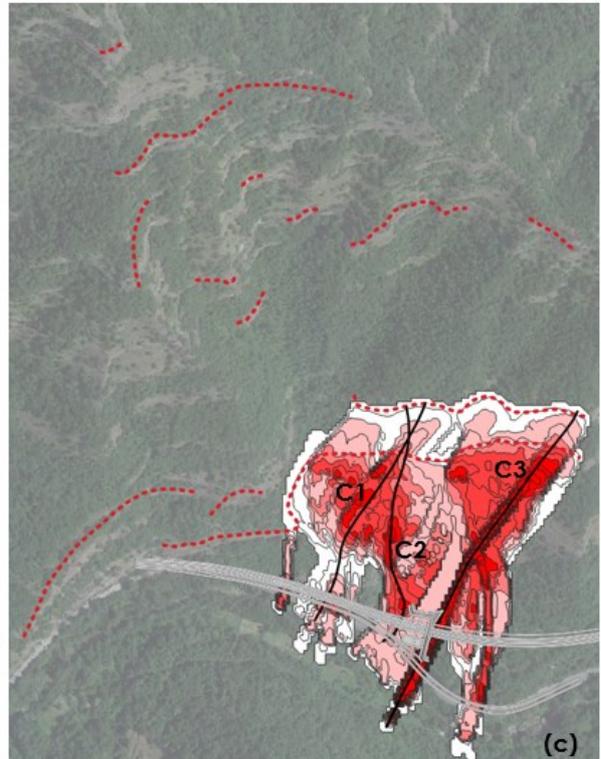
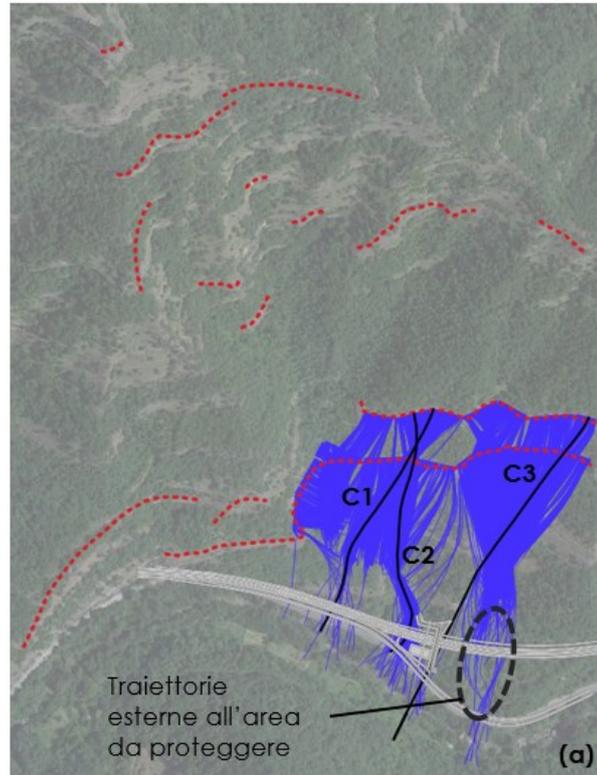


Figura 55 – Settore Ovest, area sorgente C: traiettorie selezionate per le analisi in campo bidimensionale (C1, C2, C3); fasci di traiettorie (a), isolinee relative al numero di massi transitati (b) ed isolinee relative ai valori di energia (c).

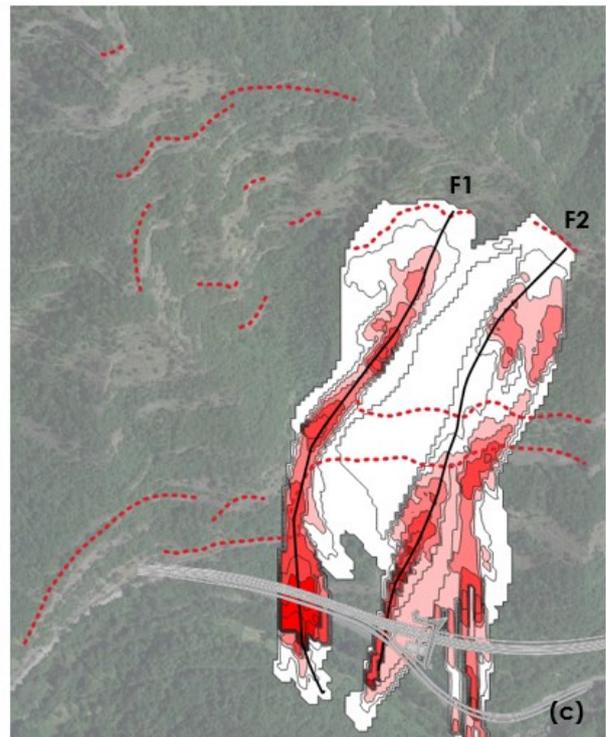
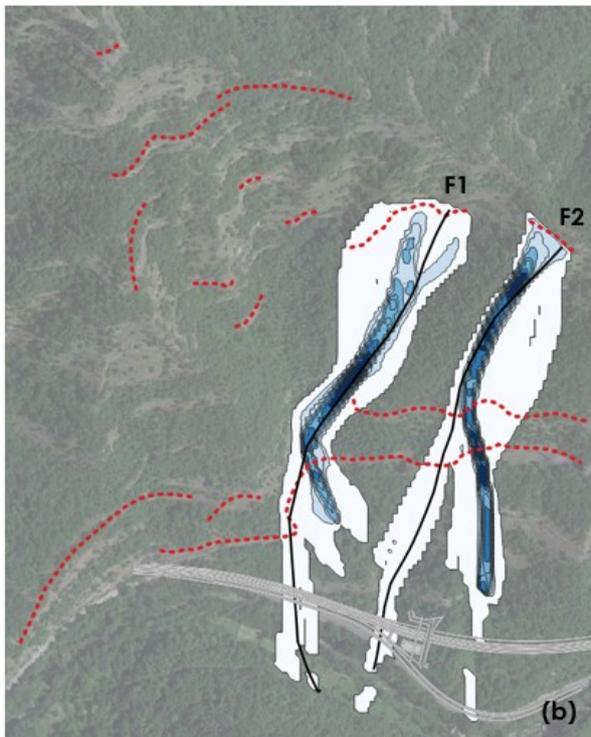
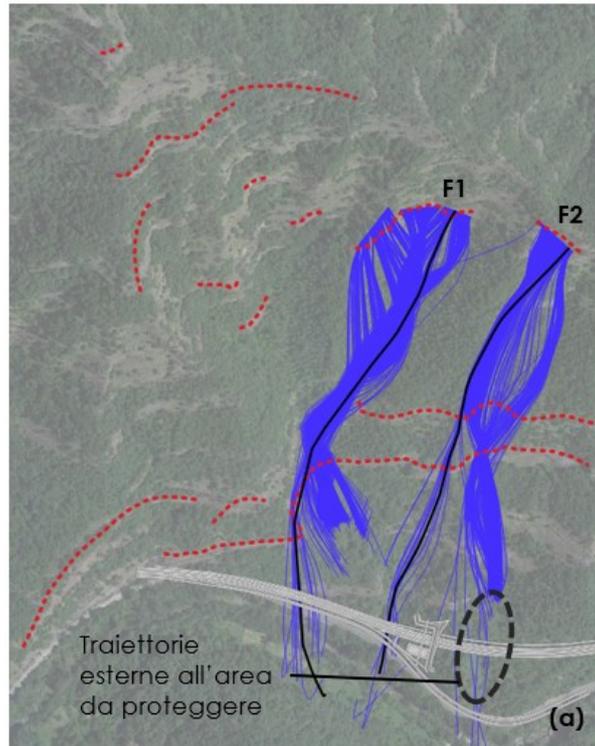


Figura 56 – Settore Ovest, area sorgente F: traiettorie selezionate per le analisi in campo bidimensionale (F1, F2); fasci di traiettorie (a), isolinee relative al numero di massi transitati (b) ed isolinee relative ai valori di energia (c).

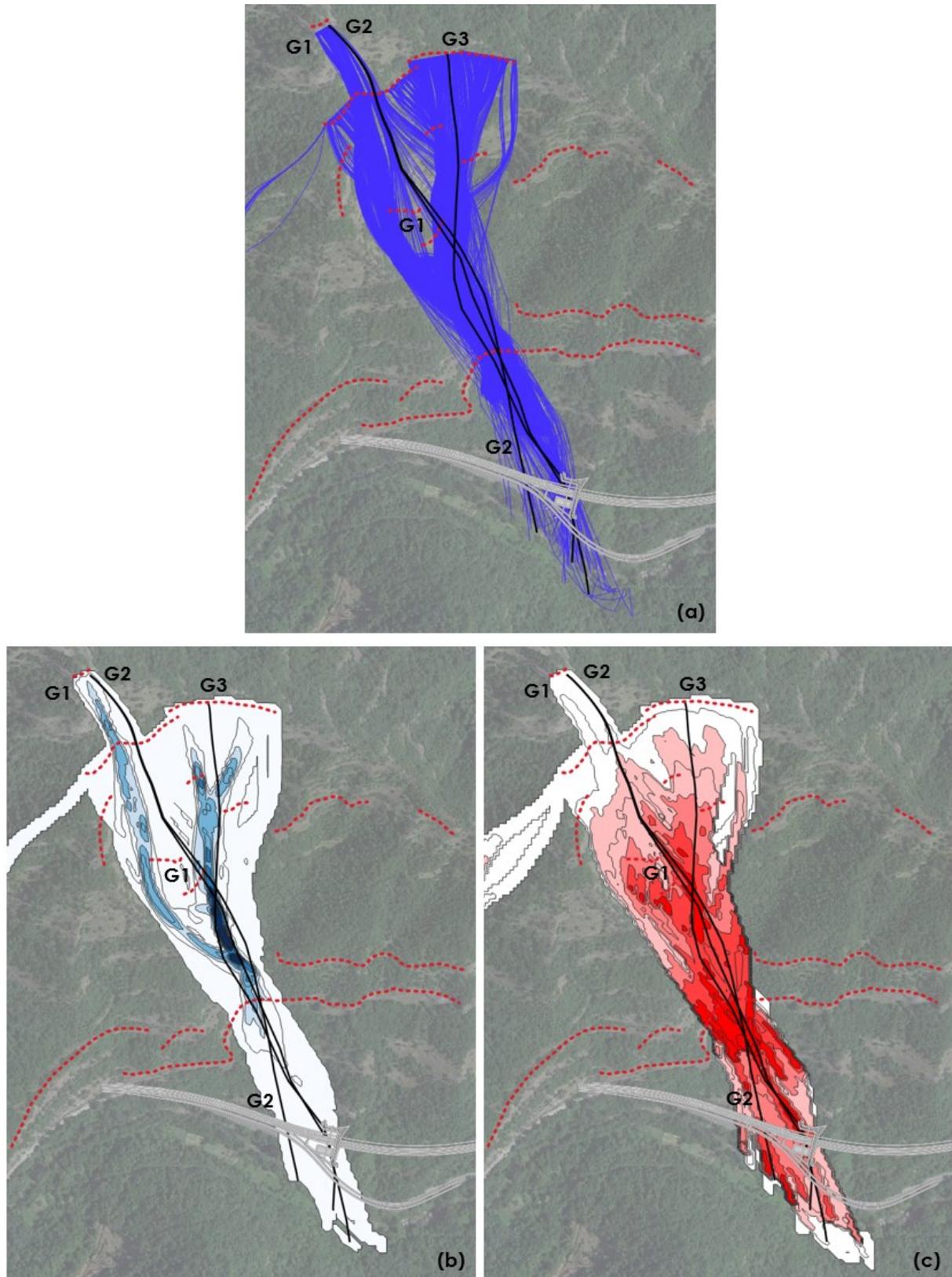


Figura 57 – Settore Ovest, area sorgente G: traiettorie selezionate per le analisi in campo bidimensionale (G1, G2, G3); fasci di traiettorie (a), isolinee relative al numero di massi transitati (b) ed isolinee relative ai valori di energia (c).

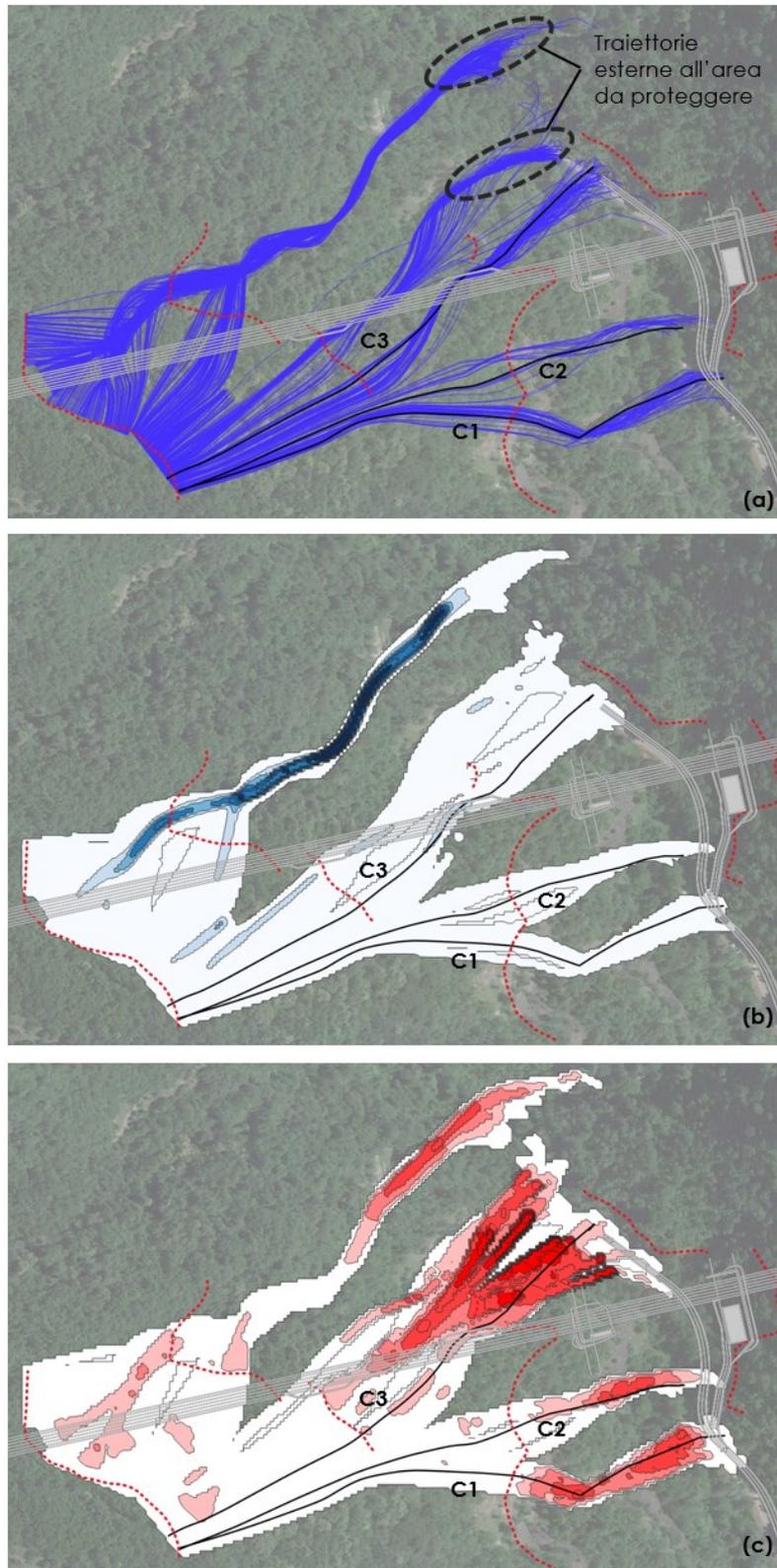


Figura 58 – Settore centrale, area sorgente C: traiettorie selezionate per le analisi in campo bidimensionale (C1, C2, C3); fasci di traiettorie (a), isolinee relative al numero di massi transitati (b) ed isolinee relative ai valori di energia (c).

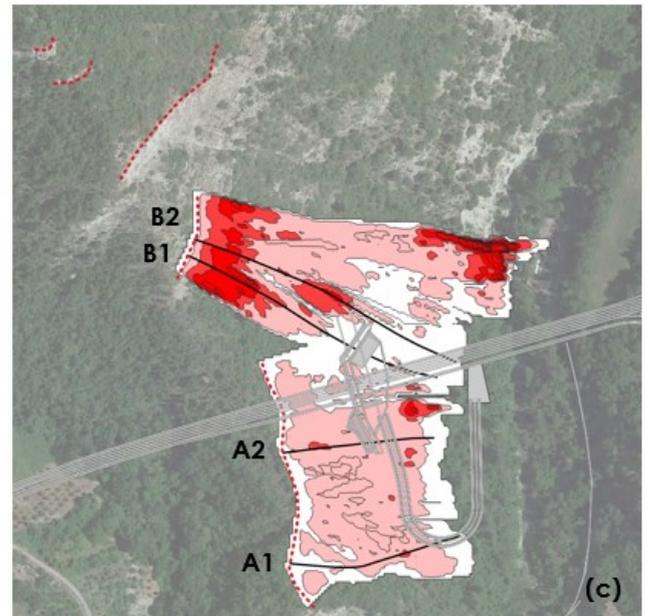
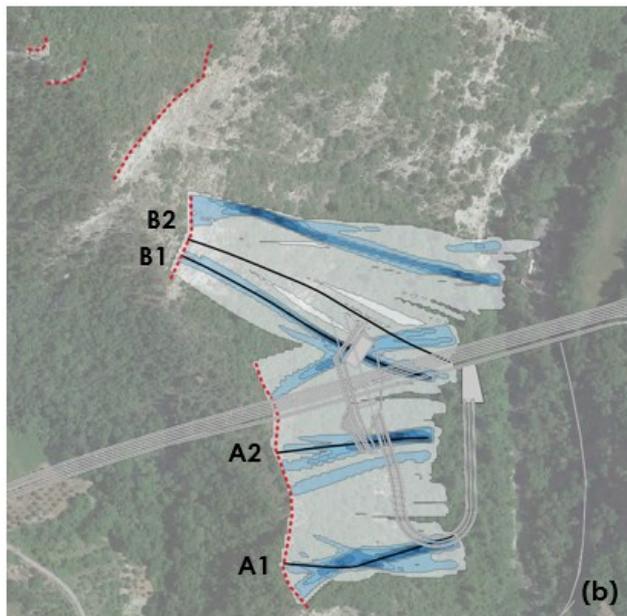
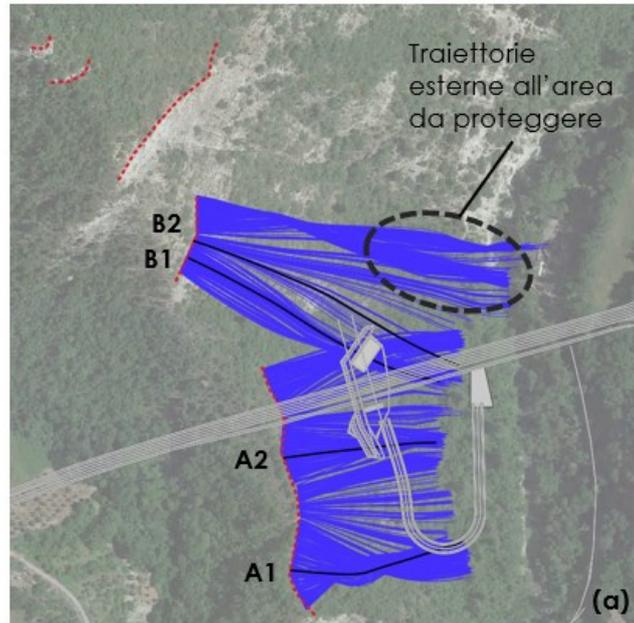


Figura 59 – Settore Est, aree sorgente A e B: traiettorie selezionate per le analisi in campo bidimensionale (A1, A2, B1, B2); fasci di traiettorie (a), isolinee relative al numero di massi transitati (b) ed isolinee relative ai valori di energia (c).

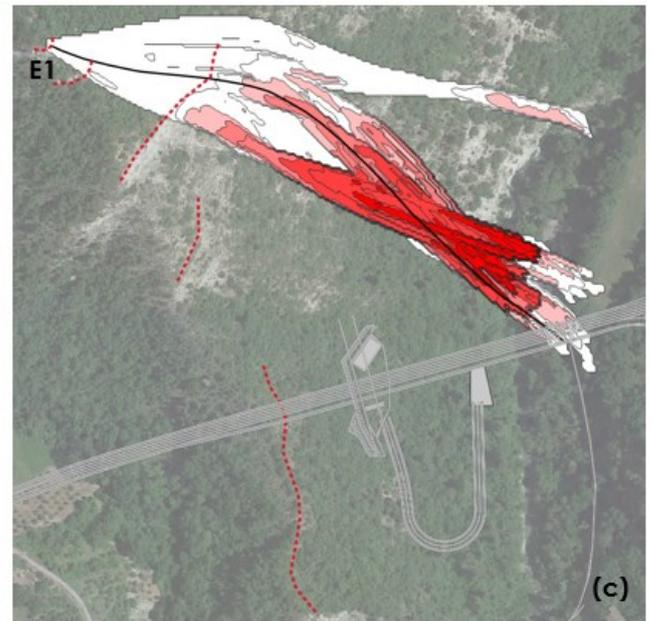
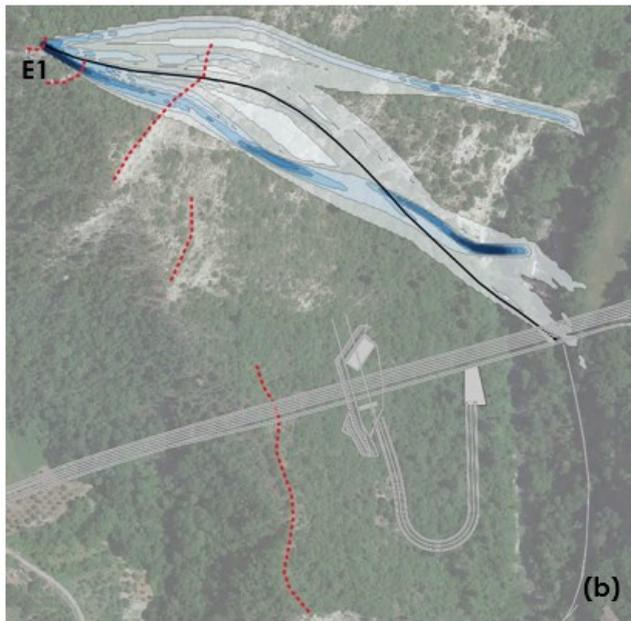
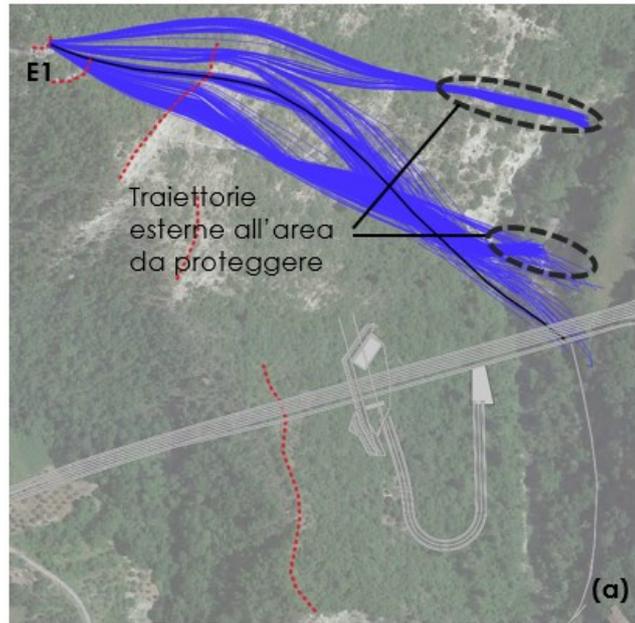


Figura 60 – Settore Est, area sorgente E: traiettoria selezionata per le analisi in campo bidimensionale (E1); fasci di traiettorie (a), isolinee relative al numero di massi transitati (b) ed isolinee relative ai valori di energia (c).

6.4 ANALISI 2D

Nella quasi totalità dei modelli di calcolo il problema tridimensionale viene ricondotto ad ipotesi che semplificano molto il fenomeno fisico, quindi si preferisce, una volta definito il problema a grande scala, ricorrere a modelli bidimensionali andando a considerare le traiettorie più significative ai fini della minimizzazione del rischio.

6.4.1 Simulazioni di caduta massi in campo bidimensionale - RocFall

Il calcolo è stato eseguito con RocFall 5.0 (Rocscience Inc.) [42], un codice di calcolo appositamente progettato per l'analisi statistica della caduta massi lungo un profilo bidimensionale. Utilizzando opportuni parametri geomeccanici e cinematici, esso consente di ricostruire le traiettorie di caduta e fornisce gli involucri delle energie cinetiche, della velocità e delle altezze di rimbalzo, oltre che le coordinate dei punti di arresto dei massi.

I parametri di input necessari per effettuare le simulazioni sono di seguito descritti:

- geometria del pendio;
- natura geologica dei materiali costituenti il pendio;
- coefficienti cinematici da attribuire a ciascun segmento del pendio;
- punti di partenza dei massi e velocità iniziali di caduta.

I risultati delle simulazioni tridimensionali effettuate con Geomassi hanno consentito di individuare le traiettorie più rappresentative che sono state poi oggetto di analisi di approfondimento in campo bidimensionale.

La morfologia del versante lungo ciascuna traiettoria di studio è stata rappresentata con maggior dettaglio nell'intorno delle opere stradali di progetto grazie a modelli digitali del terreno (DTM) appositamente realizzati per le opere in oggetto.

La suddivisione in aree omogenee, già effettuata per le analisi in campo tridimensionale, viene ora rappresentata, per ciascuna traiettoria, in campo bidimensionale.

Con riferimento ai parametri geomeccanici dei terreni, le differenze che sussistono nella trattazione del moto di caduta dei massi in campo bidimensionale e tridimensionale comportano l'adozione di valori differenti nelle simulazioni 2D e 3D. I parametri geomeccanici utilizzati nel presente studio sono compatibili con quelli suggeriti da Pfeiffer e Bowen, dal quale deriva il programma di simulazione RocFall, e sono stati tarati sulla base dell'esperienza degli scriventi. Il valore di deviazione standard, come nelle analisi tridimensionali, è pari al 4% ed anche il software RocFall, come Geomassi, consente di ridurre il coefficiente di restituzione normale K_n attraverso un fattore di scala. Il valore di velocità per il quale si ha una riduzione del 50% del corrispondente coefficiente di restituzione K_n è ancora fissato pari a 15 m/s.

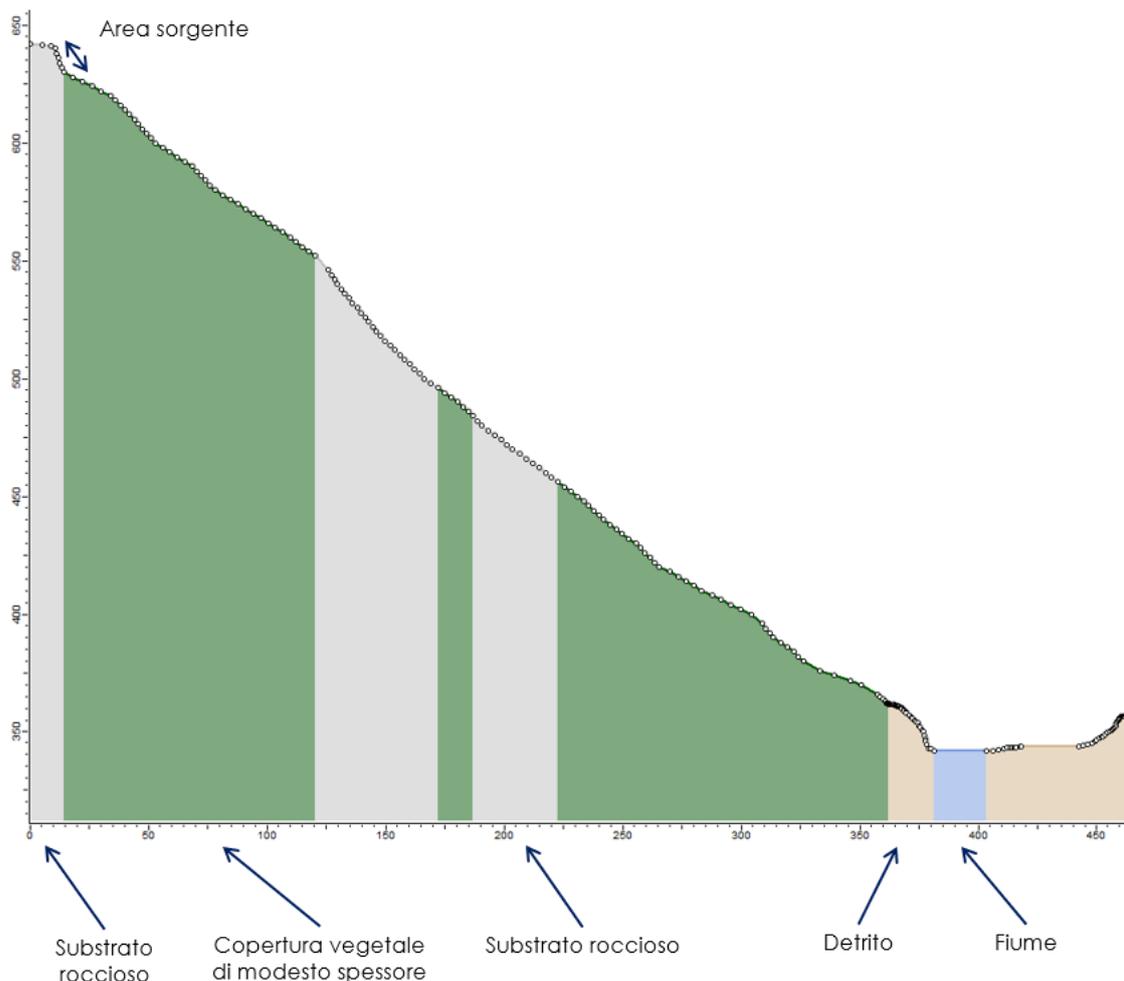


Figura 61 – Profilo per la simulazione di caduta massi in campo bidimensionale; sono indicati la zona di distacco dei massi (area sorgente) e le aree omogenee per coefficienti di restituzione.

Tabella 2 - Parametri del terreno utilizzati nelle simulazioni in campo bidimensionale (RocFall).

Terreno	K_n	K_t	μ	ϵ
Substrato roccioso	0.40	0.87	0.50	0.40
Copertura vegetale di modesto spessore	0.33	0.83	0.50	0.60
Detrito	0.30	0.70	0.60	0.70
Asfalto	0.40	0.90	0.50	0.40
Fiume	0.10	0.50	0.90	0.80

Per ogni traiettoria, al fine di poter effettuare un'analisi statistica rappresentativa, è stata simulata la caduta di almeno 1'000 blocchi.

Le forme dei blocchi considerate nel presente studio sono, coerentemente con quanto rinvenuto durante i sopralluoghi, dei poliedri con sezione quadrata, pentagonale, esagonale.

Nelle seguenti analisi di approfondimento in campo bidimensionale le condizioni di velocità iniziale sono state definite in base alle possibili cause d'innesco del crollo: ipotizzando una progressiva instabilizzazione di un volume roccioso, isolato da discontinuità naturali, si è assunto che nel momento in cui il blocco acquisisce movimento esso raggiunga una velocità minima pari a 0.01m/s per entrambe le componenti, orizzontale e verticale.

6.4.2 Risultati delle analisi traiettografiche

Si riportano nel seguito gli esiti delle analisi traiettografiche in campo bidimensionale. Le figure mostrano le traiettorie dei blocchi e la distribuzione dei punti di arresto lungo i profili considerati.

I risultati relativi alle velocità dei blocchi ed alle altezze d'impatto degli stessi in corrispondenza delle opere da realizzare sono stati ottenuti grazie all'inserimento di un "collector", ovvero di una sezione di controllo.

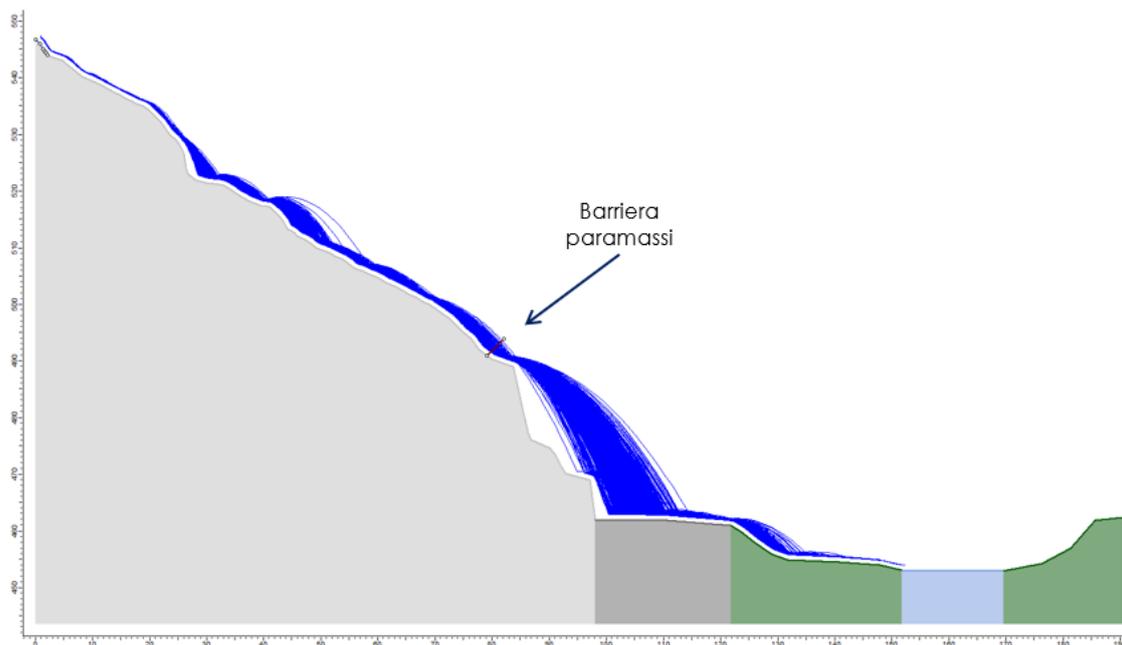


Figura 62 – Traiettorie dei blocchi e sezione di controllo ("collector") per la determinazione dei valori di velocità dei blocchi ed altezze d'impatto in corrispondenza delle barriere paramassi.

Alcuni profili si ripetono (con il nome "bis") in quanto lungo la stessa direttrice sono state studiate le traiettorie dei massi che si distaccano da un'area sorgente situata più a valle.

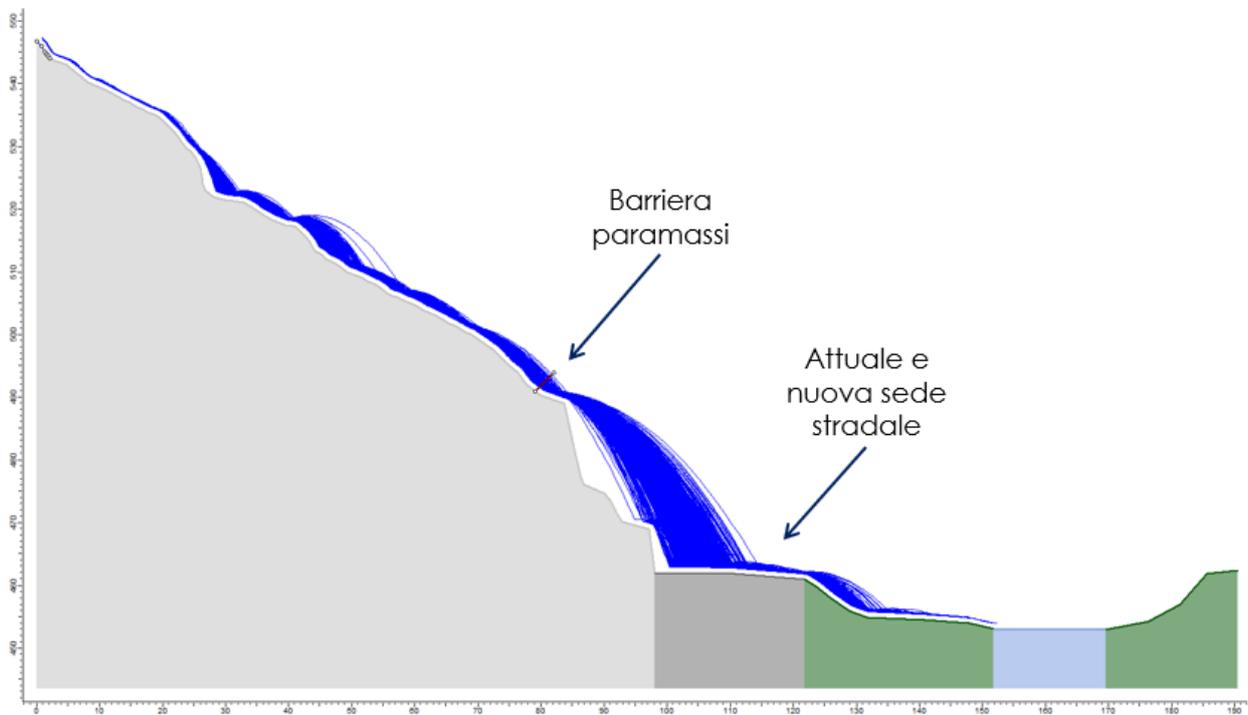


Figura 63 – Settore Ovest, profilo A1: traiettorie dei blocchi.

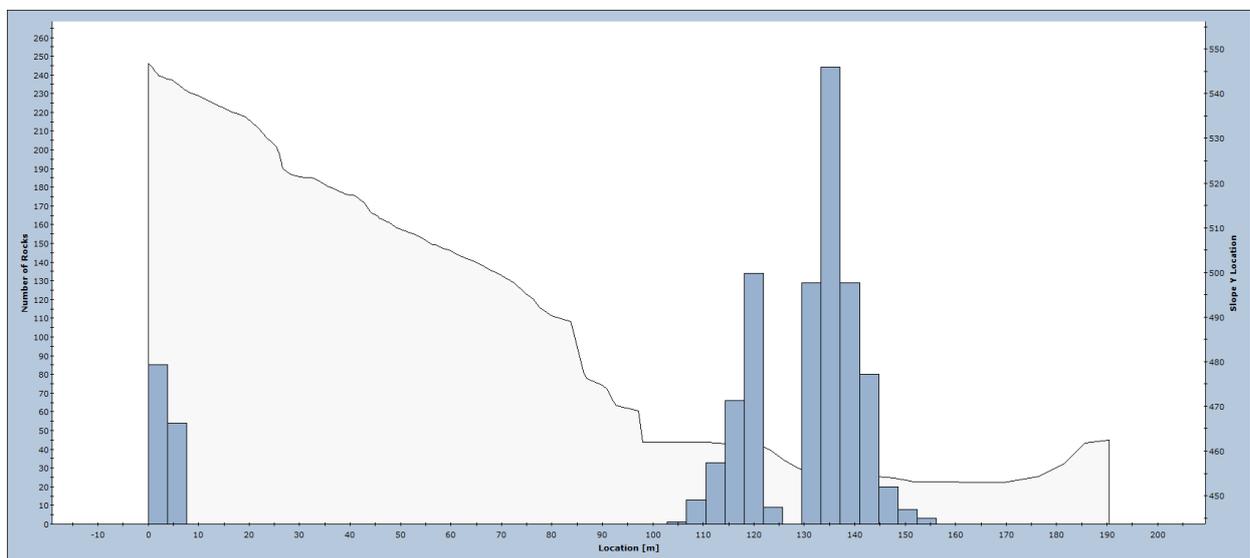


Figura 64 – Settore Ovest, profilo A1: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

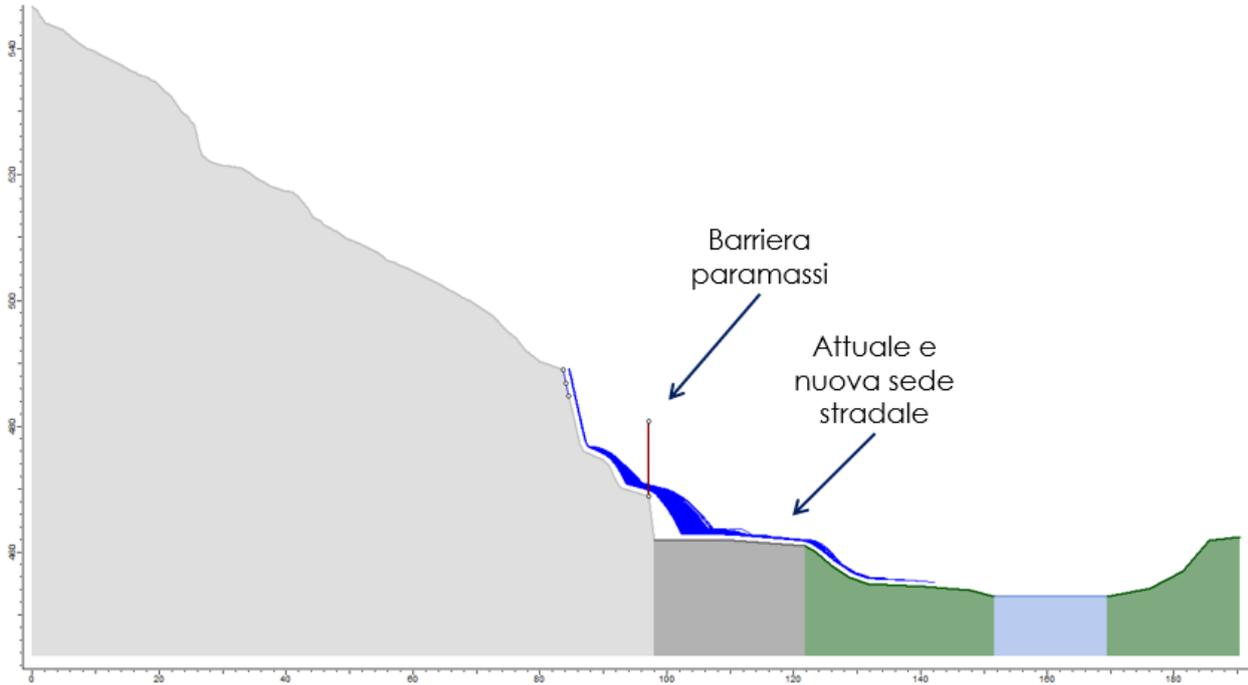


Figura 65 – Settore Ovest, profilo A1 bis: traiettorie dei blocchi.

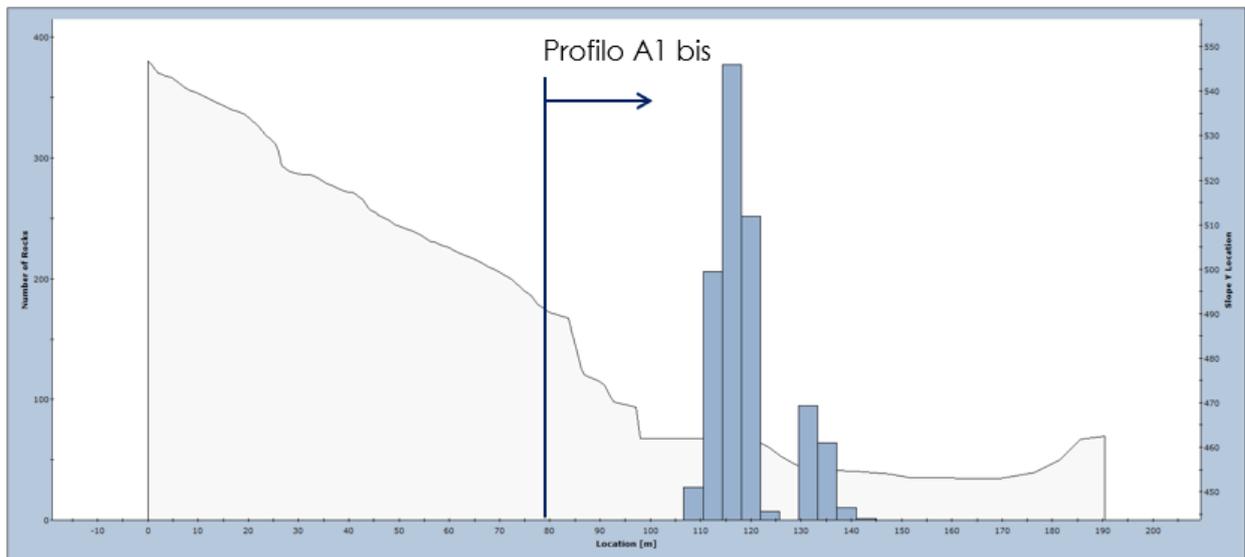


Figura 66 – Settore Ovest, profilo A1 bis: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

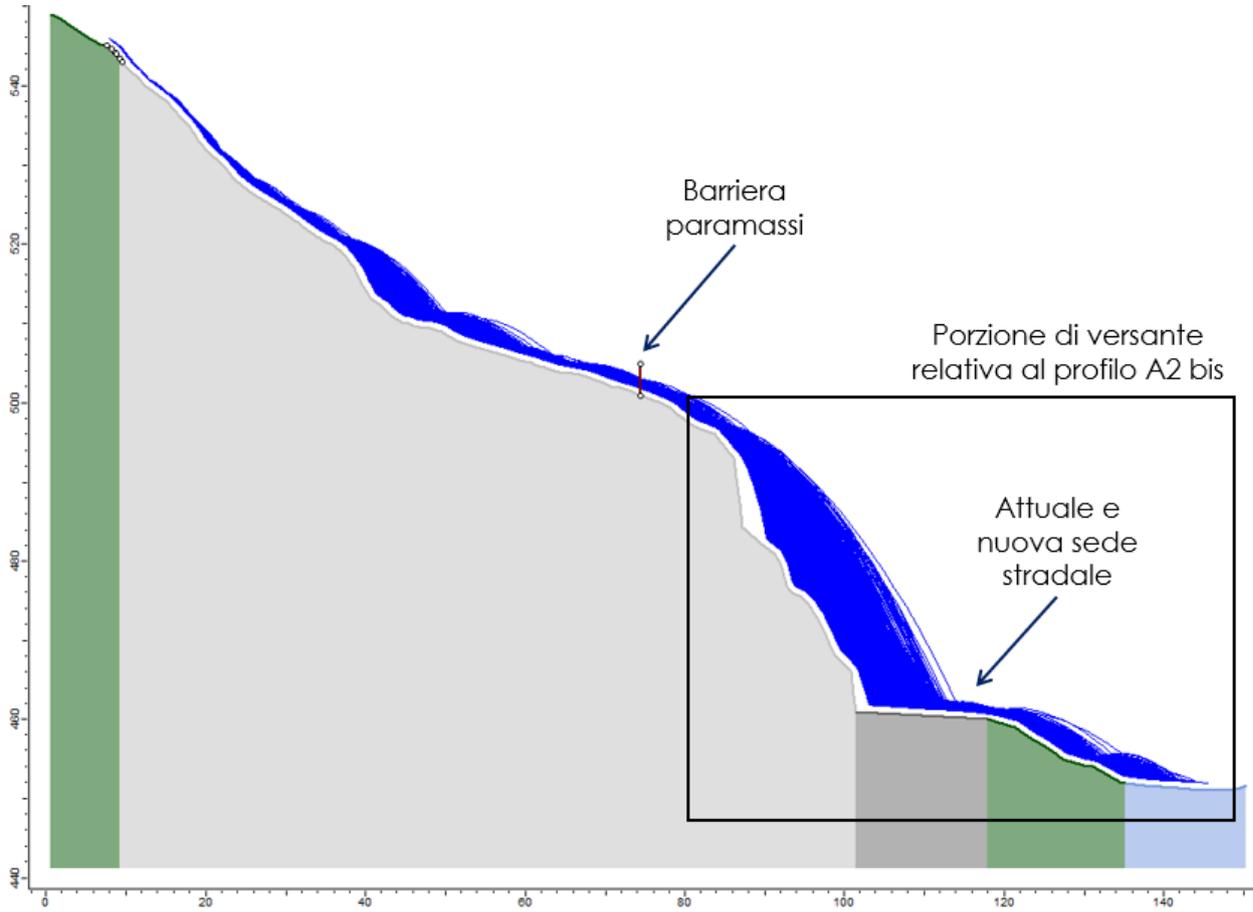


Figura 67 – Settore Ovest, profilo A2: traiettorie dei blocchi.

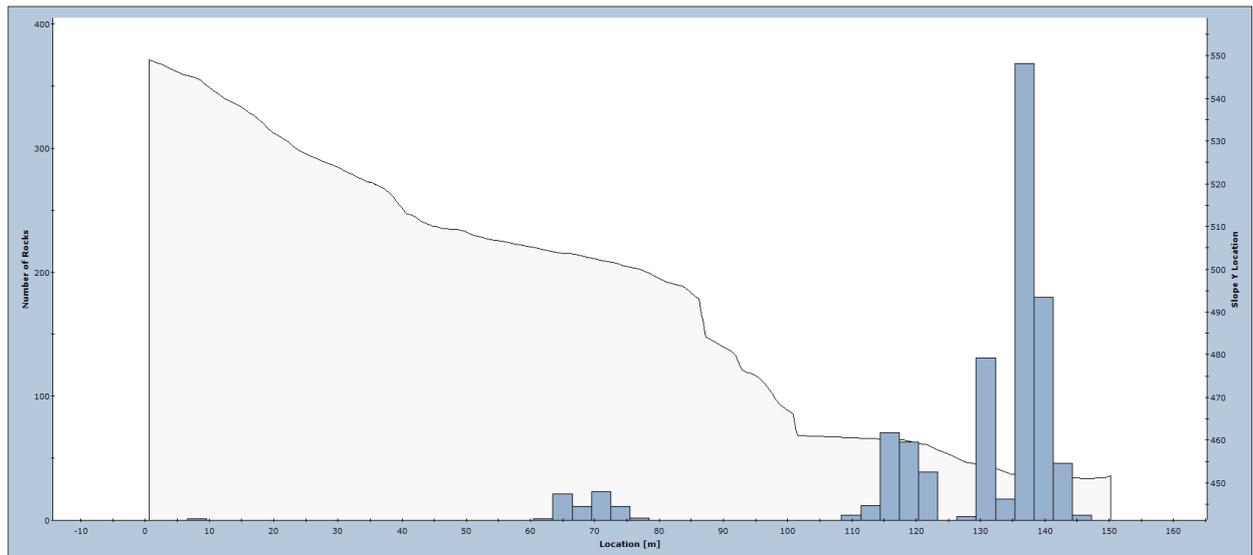


Figura 68 – Settore Ovest, profilo A2: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

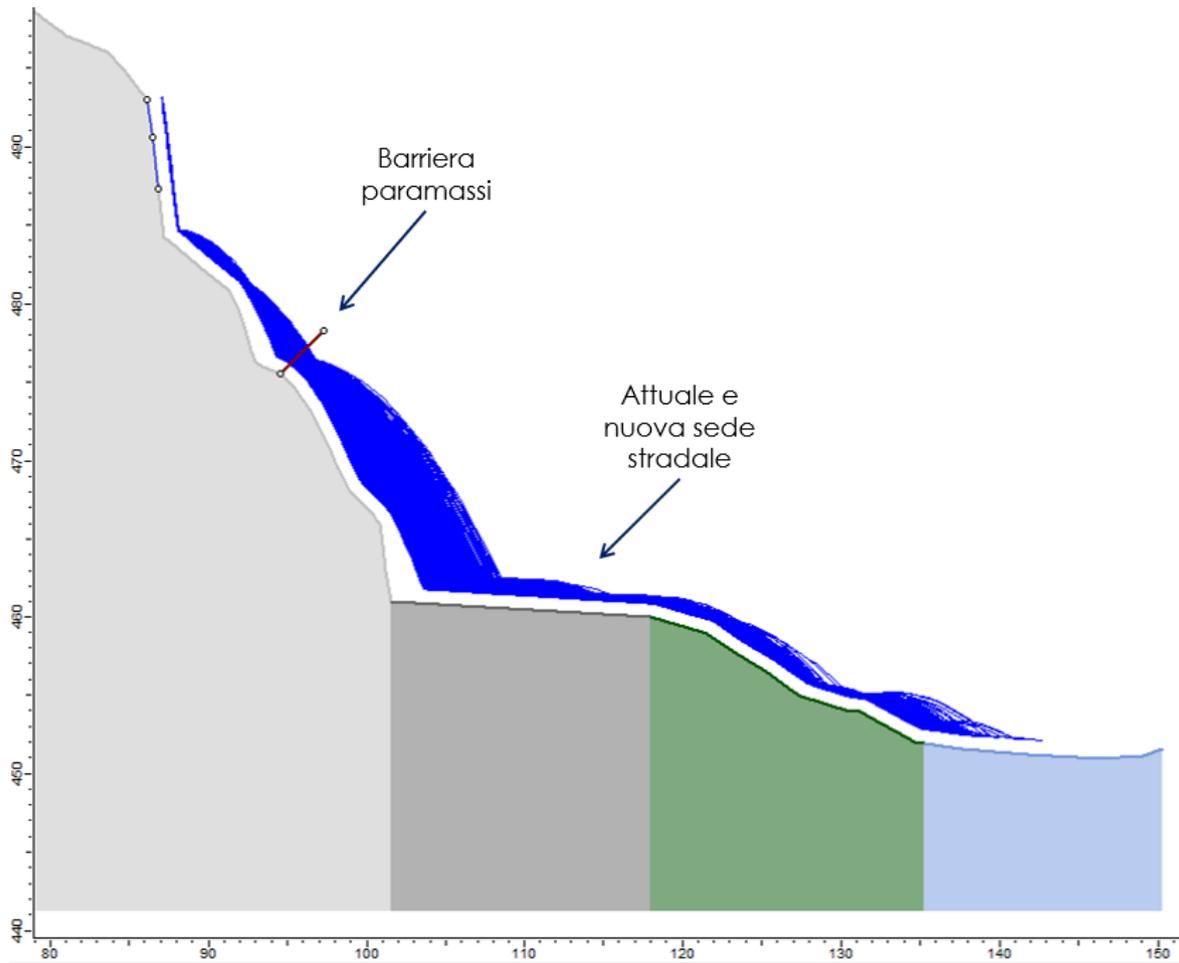


Figura 69 – Settore Ovest, profilo A2 bis: traiettorie dei blocchi.

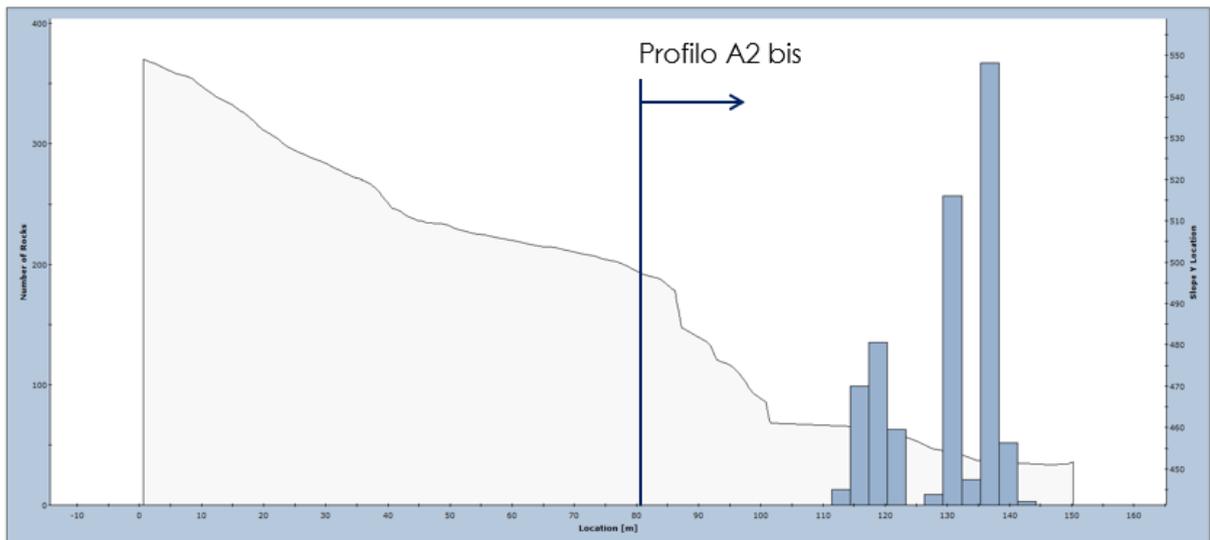


Figura 70 – Settore Ovest, profilo A2 bis: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

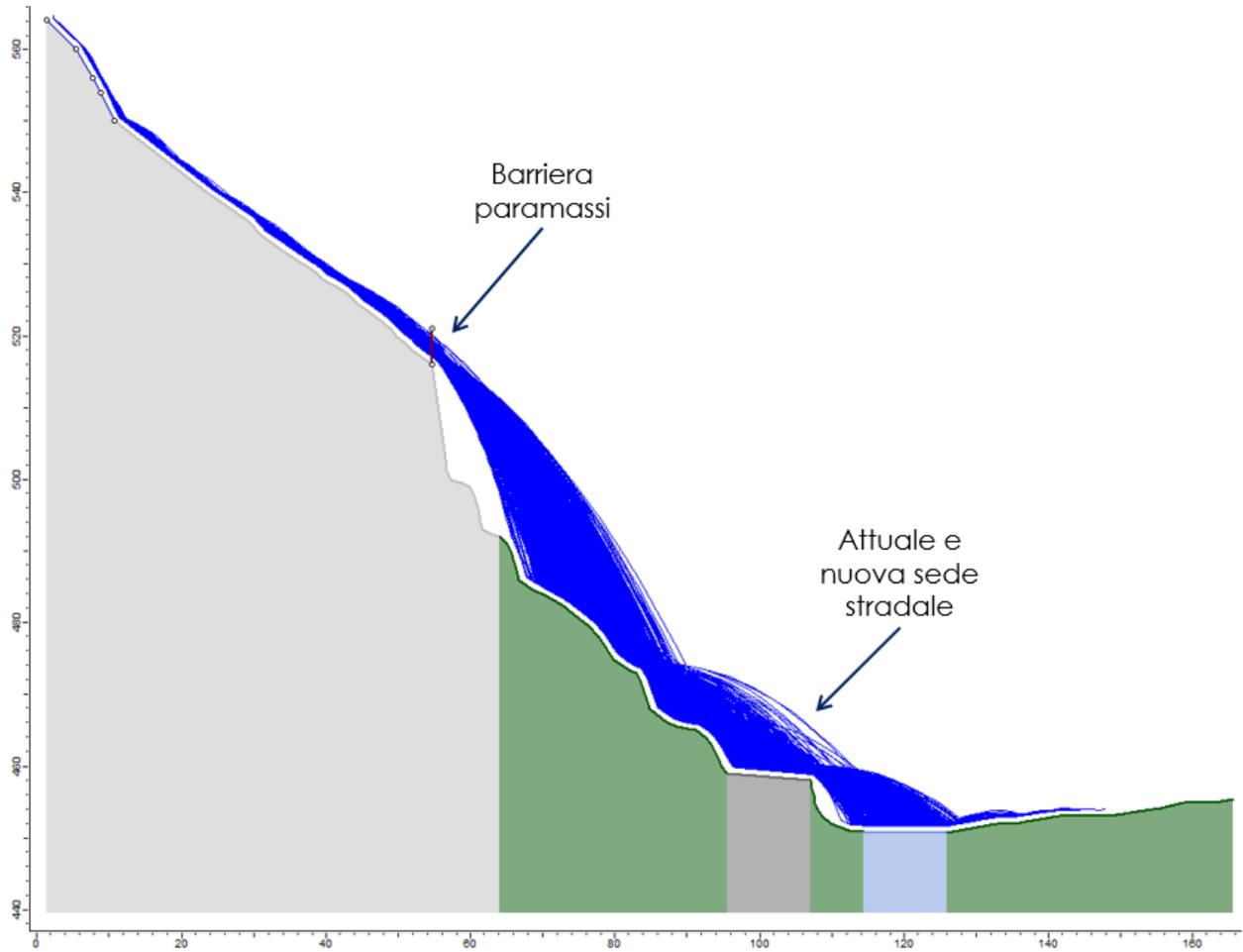


Figura 71 – Settore Ovest, profilo B1: traiettorie dei blocchi.

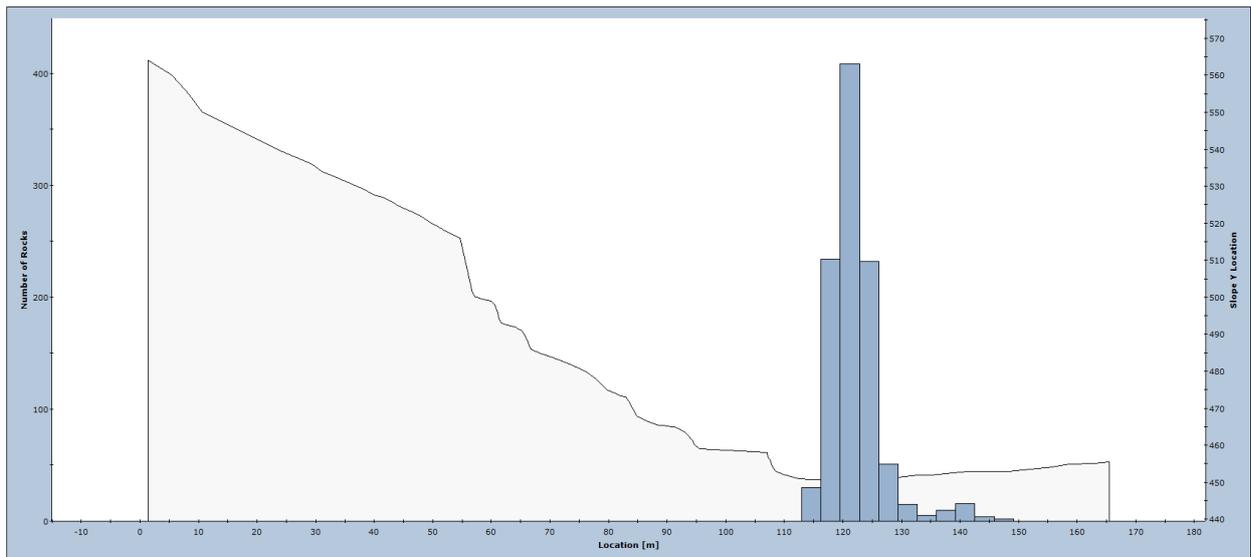


Figura 72 – Settore Ovest, profilo B1: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

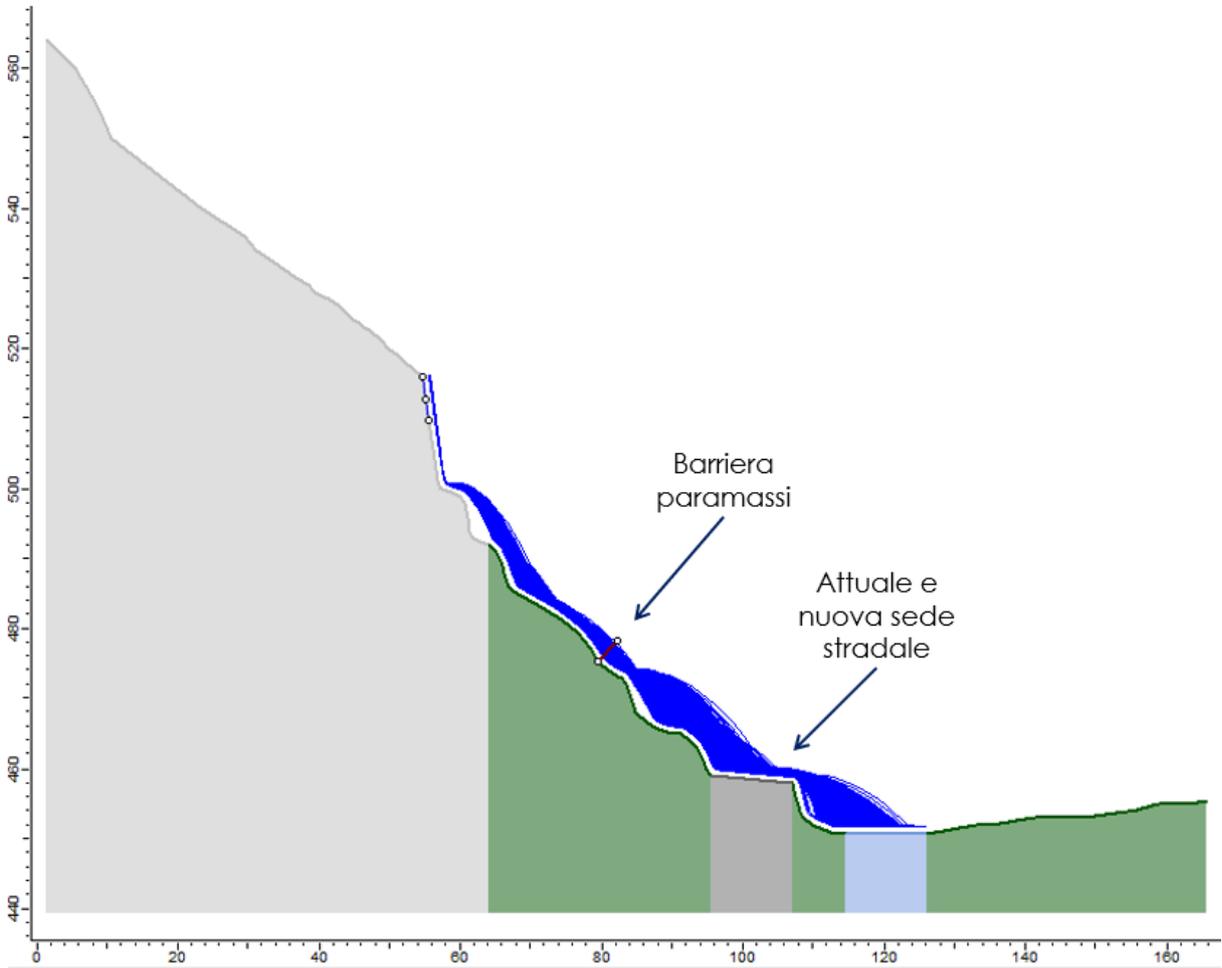


Figura 73 – Settore Ovest, profilo B1 bis: traiettorie dei blocchi.

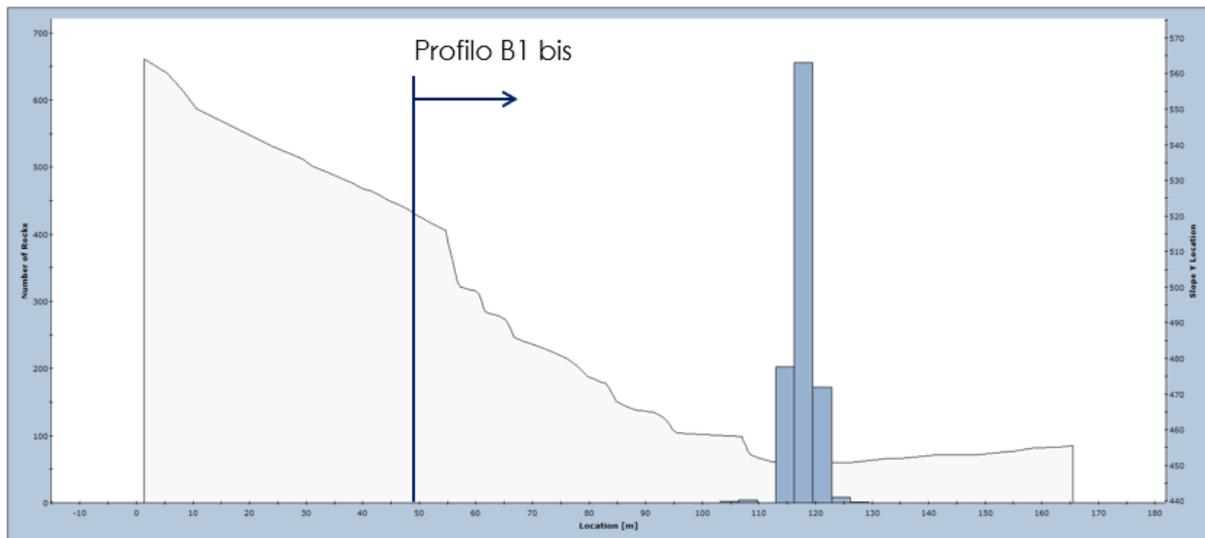


Figura 74 – Settore Ovest, profilo B1 bis: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

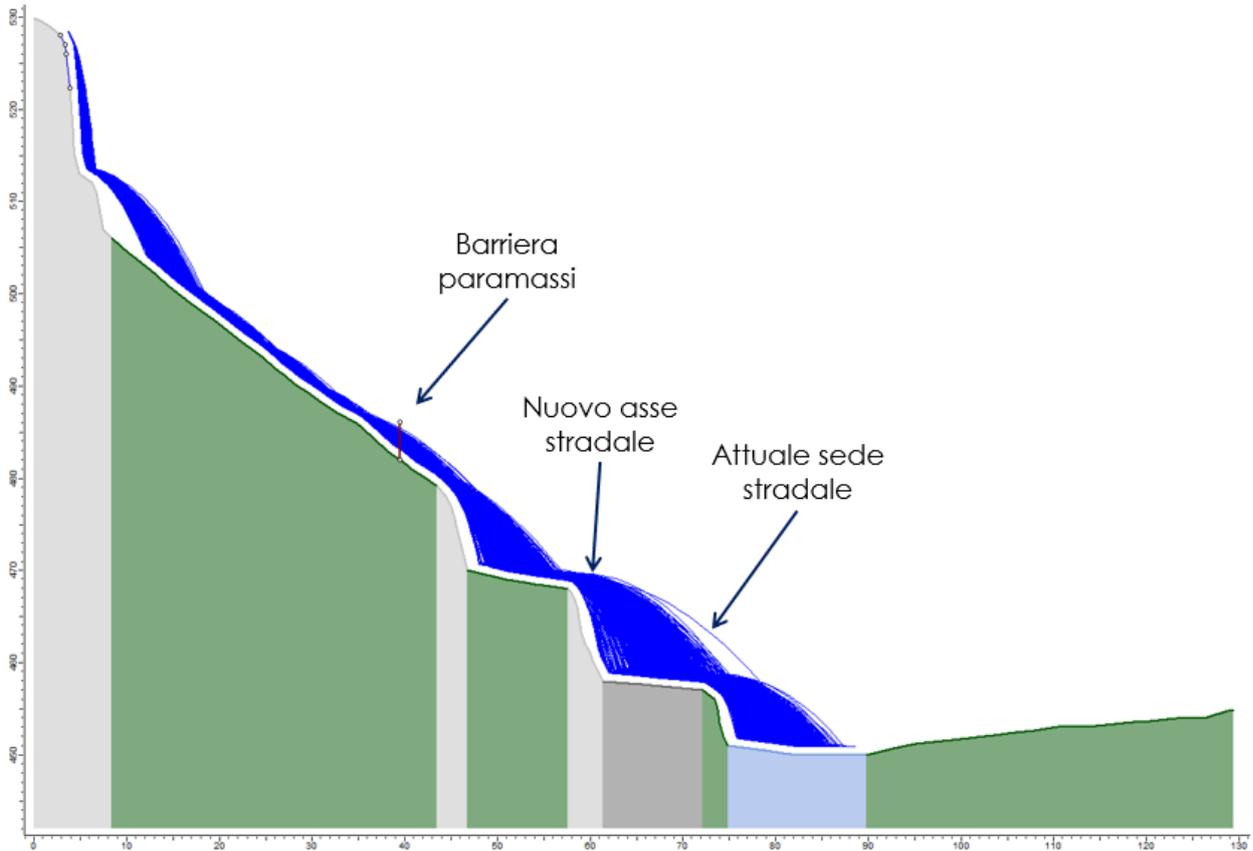


Figura 75 – Settore Ovest, profilo B2: traiettorie dei blocchi.

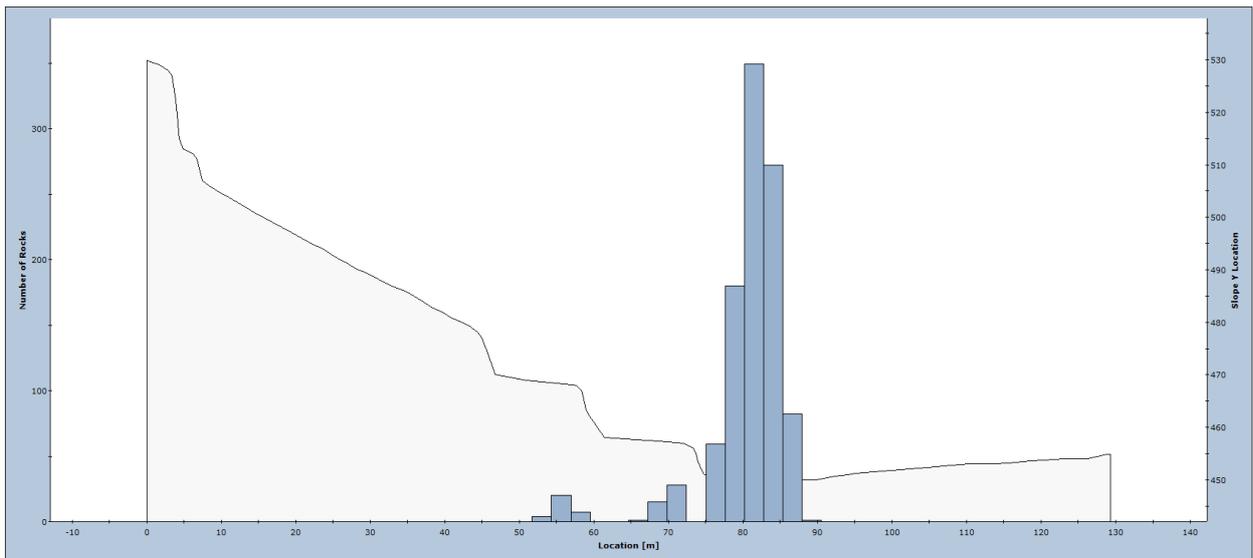


Figura 76 – Settore Ovest, profilo B2: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

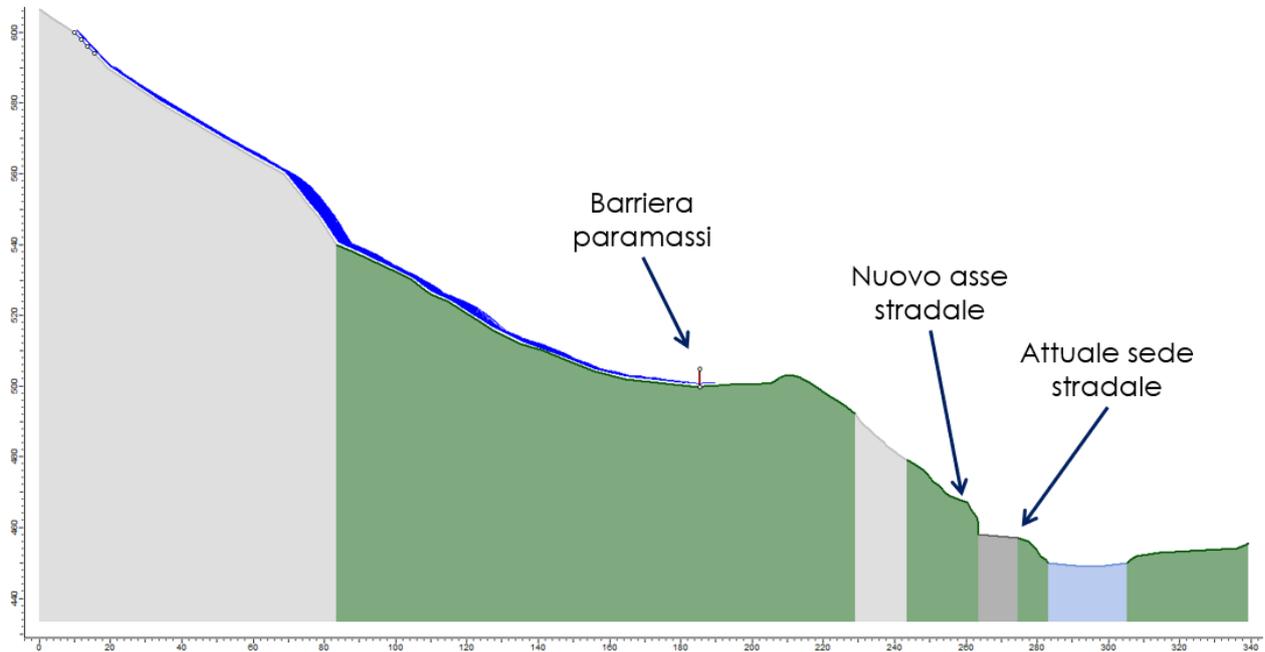


Figura 77 – Settore Ovest, profilo C1: traiettorie dei blocchi.

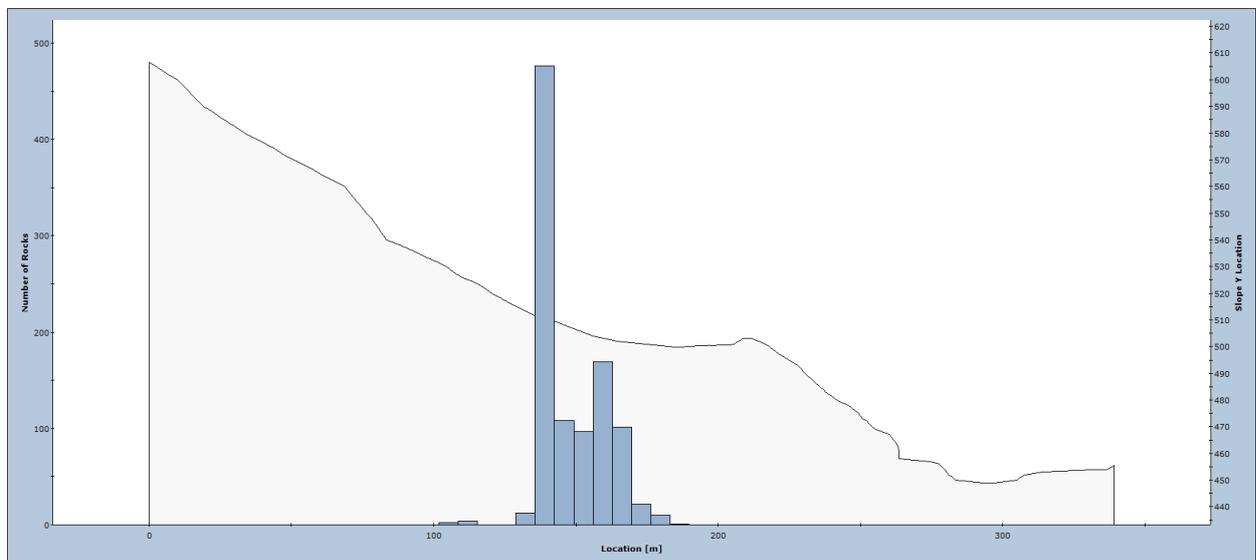


Figura 78 – Settore Ovest, profilo C1: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

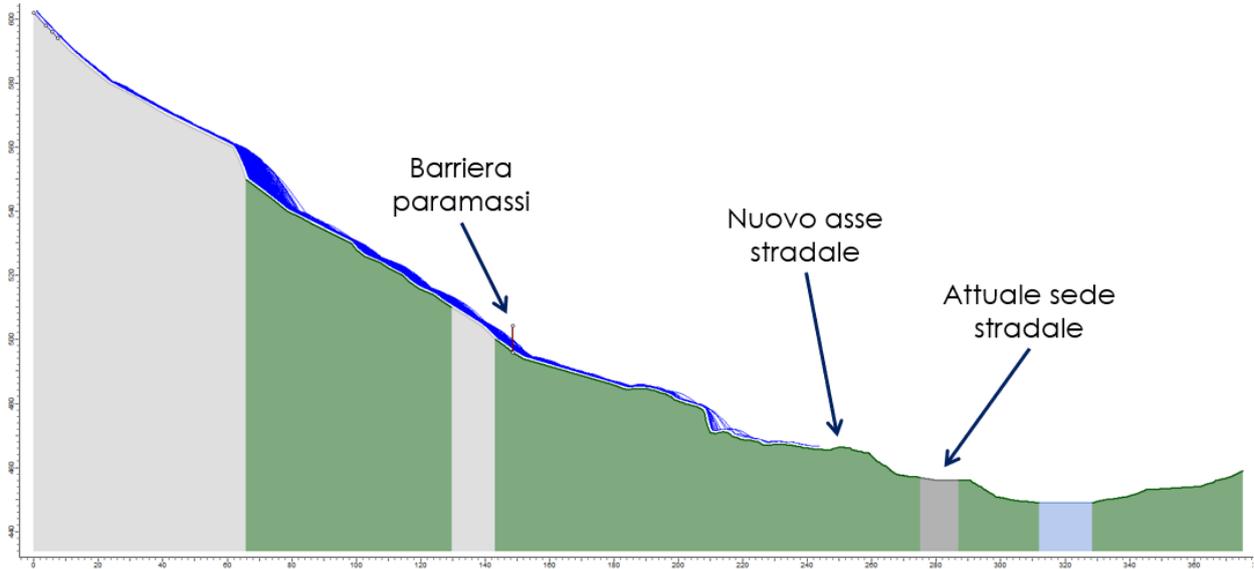


Figura 79 – Settore Ovest, profilo C2: traiettorie dei blocchi.

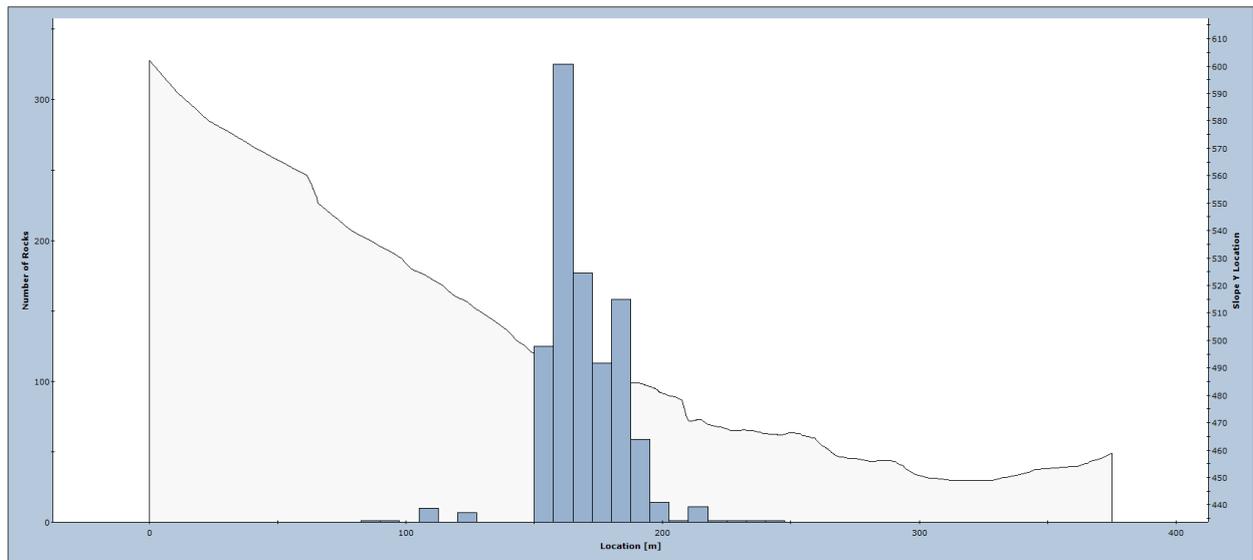


Figura 80 – Settore Ovest, profilo C2: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

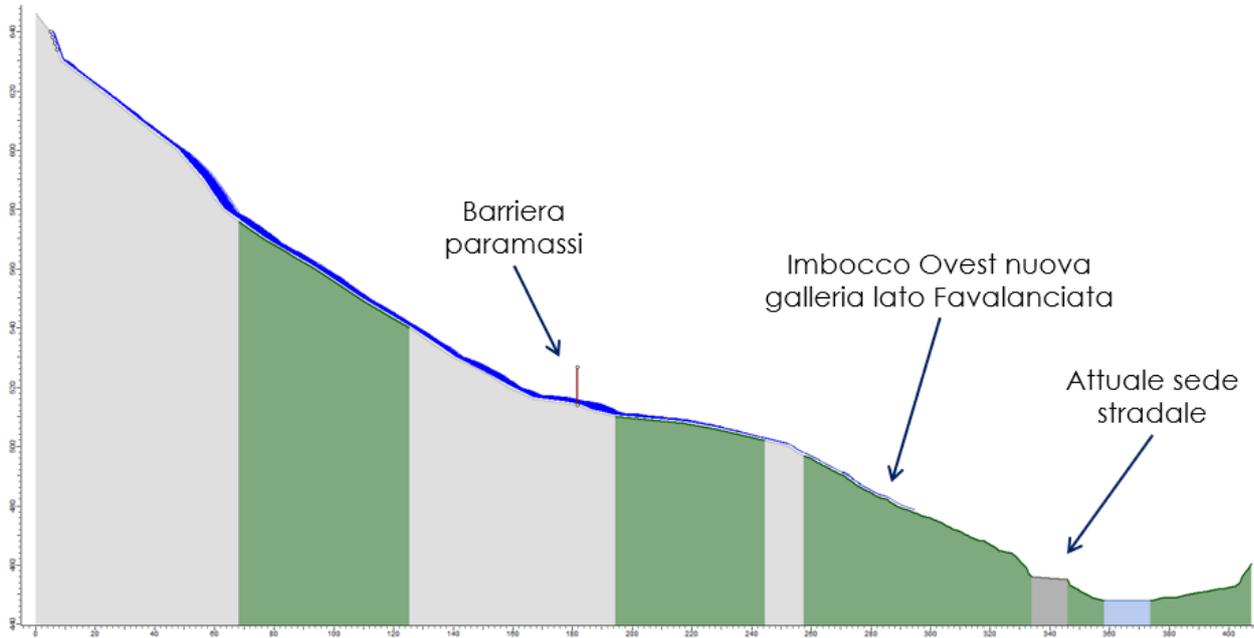


Figura 81 – Settore Ovest, profilo C3: traiettorie dei blocchi.

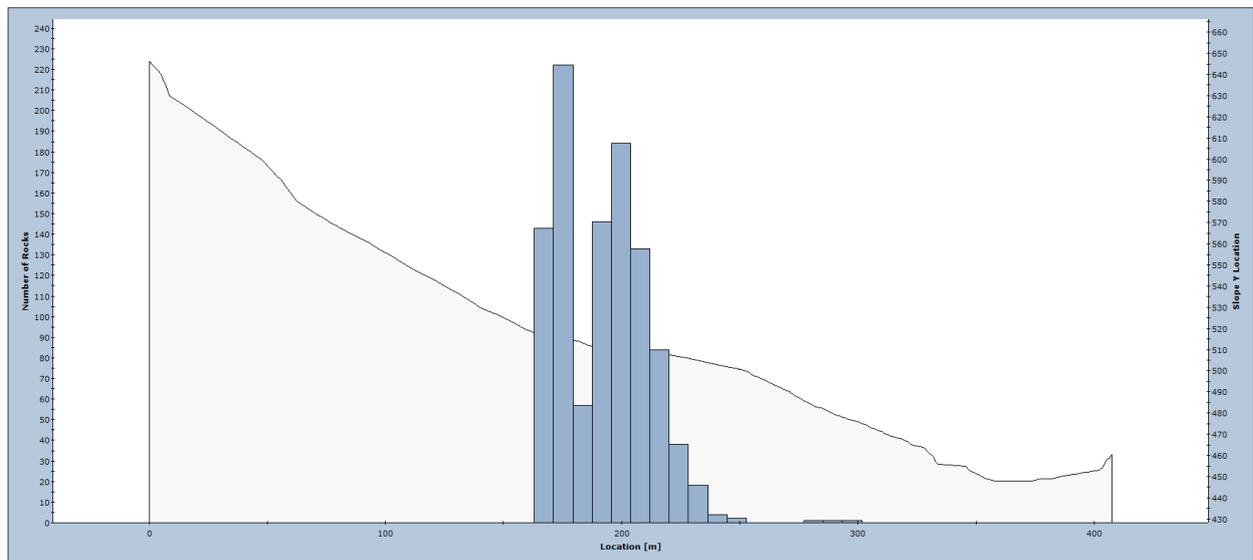


Figura 82 – Settore Ovest, profilo C3: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

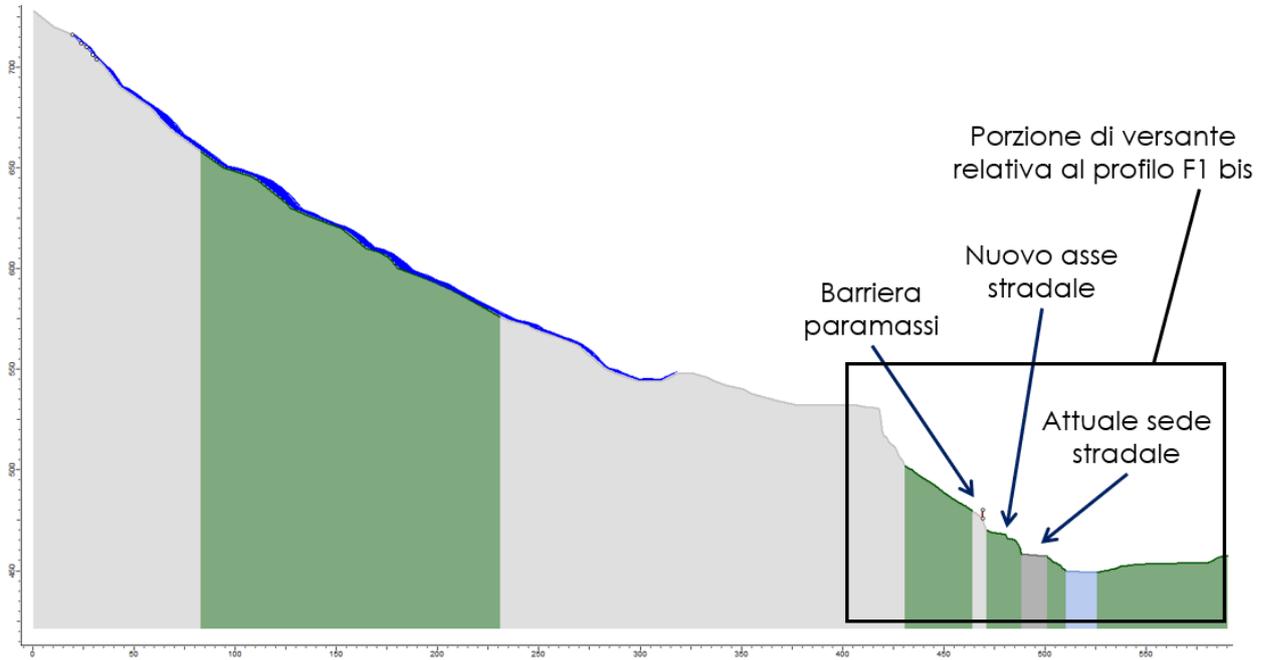


Figura 83 – Settore Ovest, profilo F1: traiettorie dei blocchi.

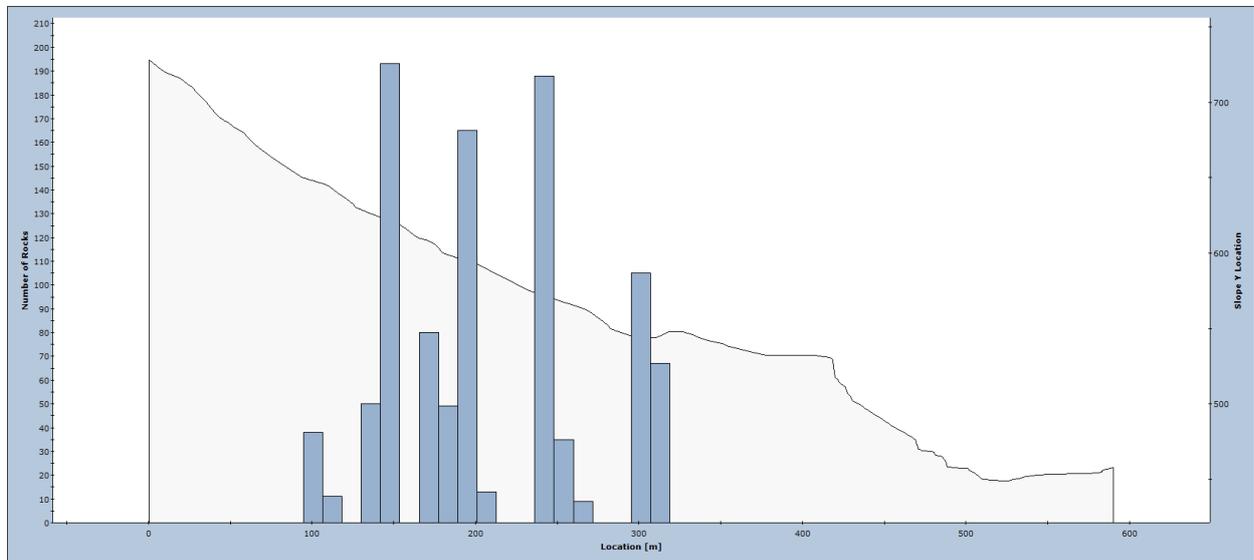


Figura 84 – Settore Ovest, profilo F1: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

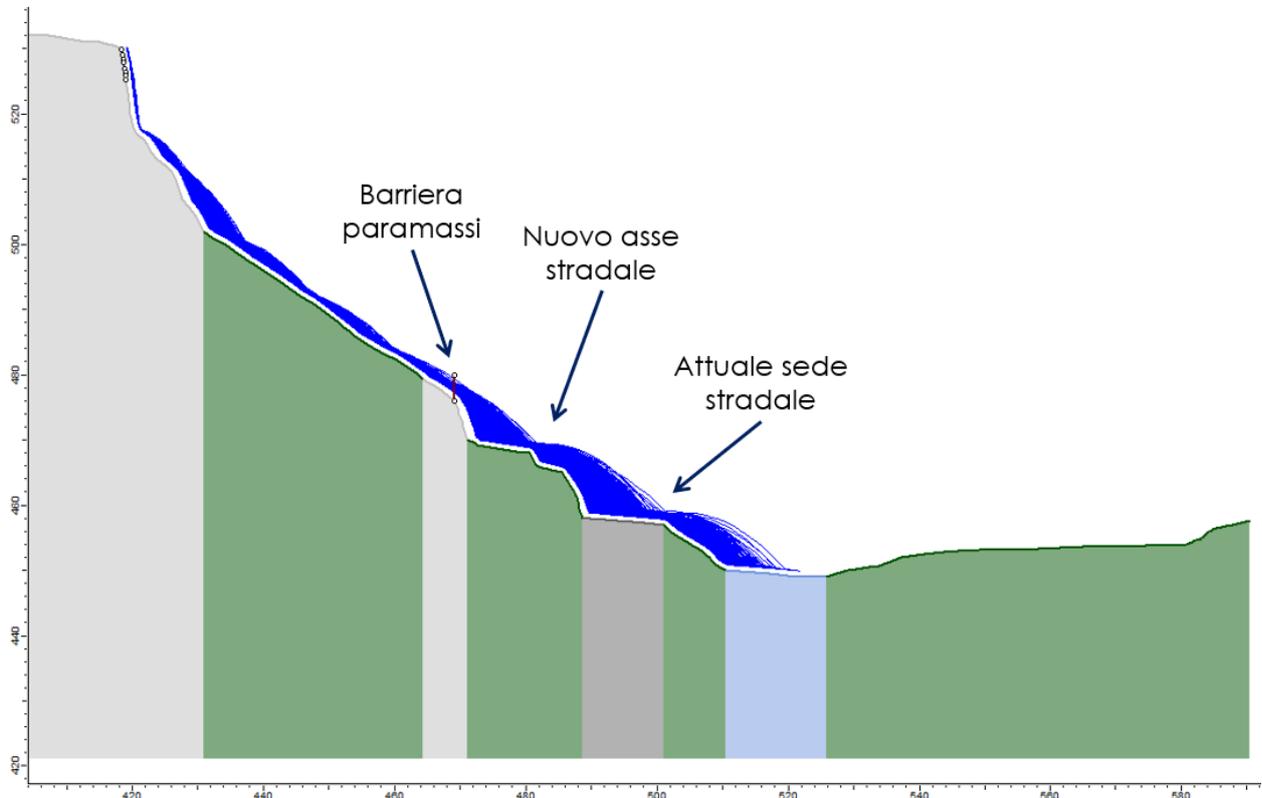


Figura 85 – Settore Ovest, profilo F1 bis: traiettorie dei blocchi.

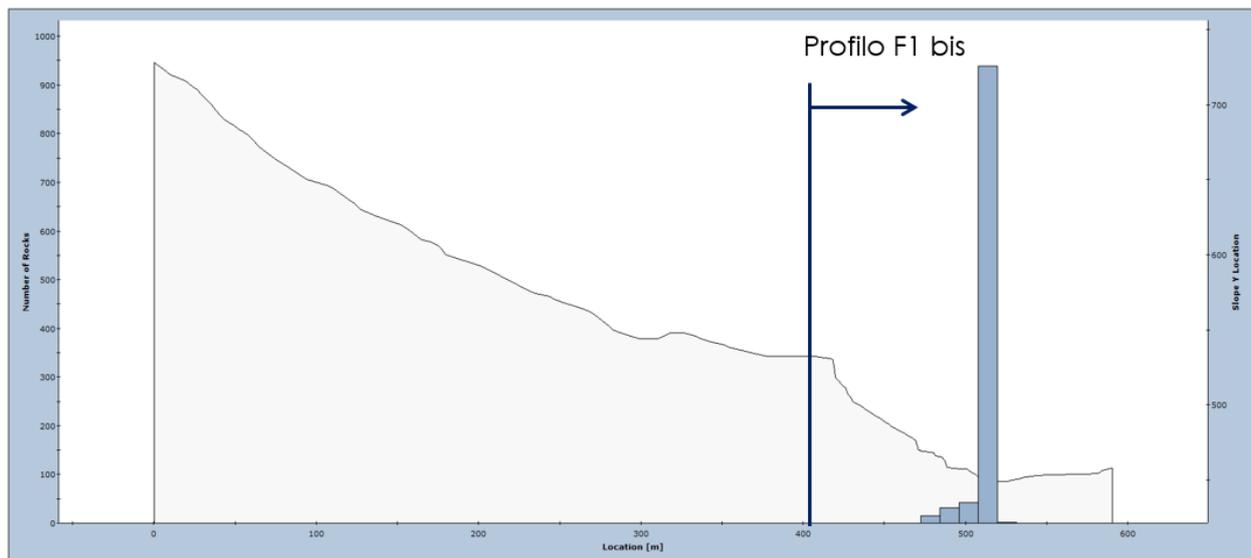


Figura 86 – Settore Ovest, profilo F1 bis: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

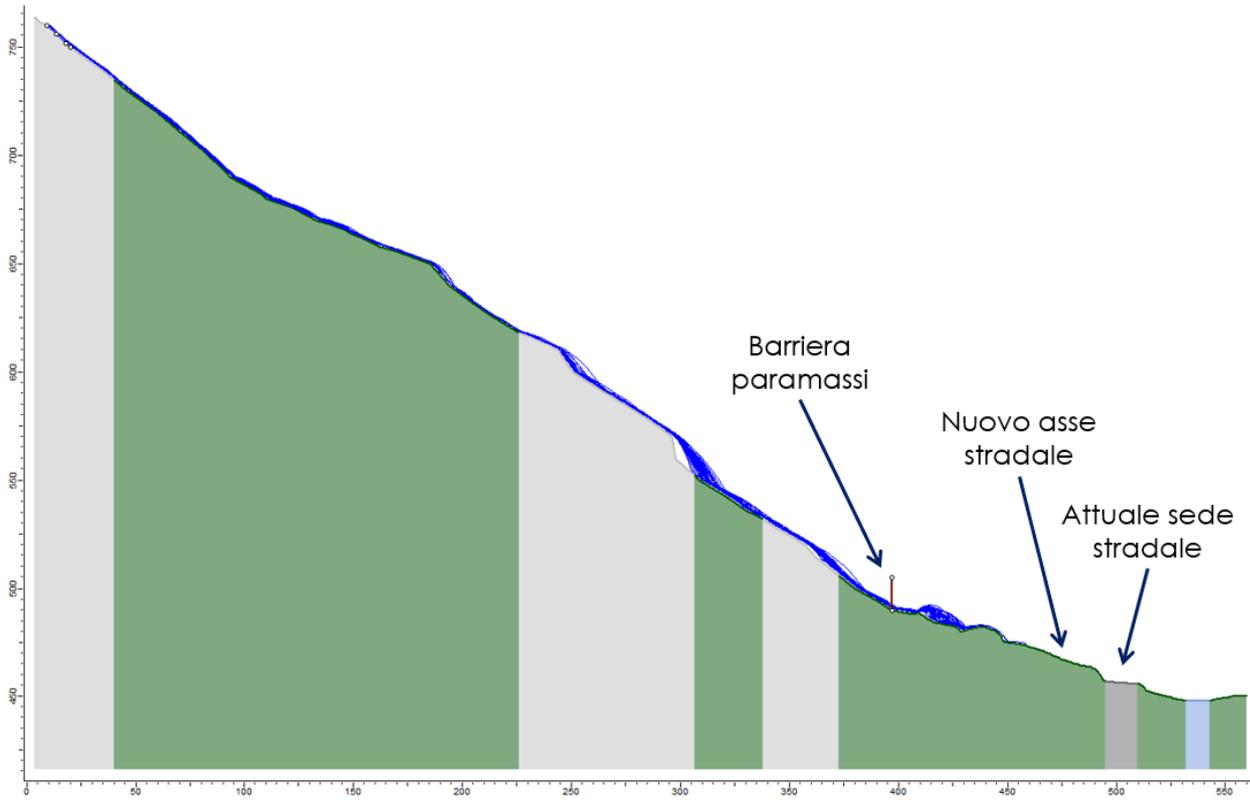


Figura 87 – Settore Ovest, profilo F2: traiettorie dei blocchi.

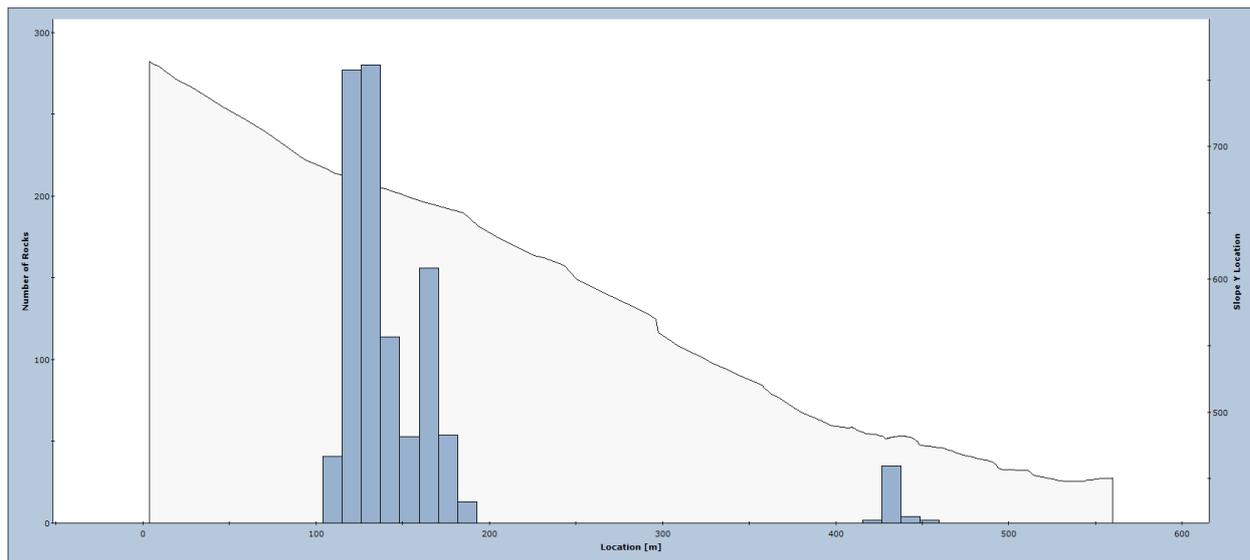


Figura 88 – Settore Ovest, profilo F2: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

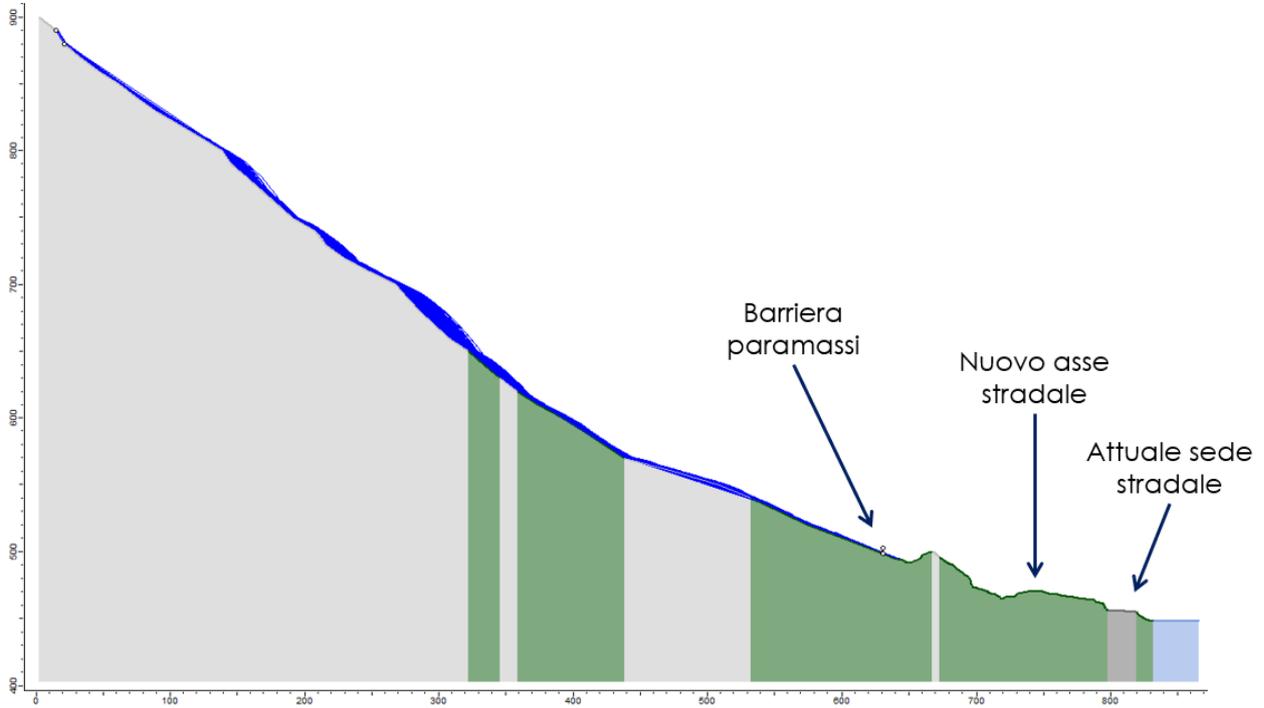


Figura 89 – Settore Ovest, profilo G1: traiettorie dei blocchi.

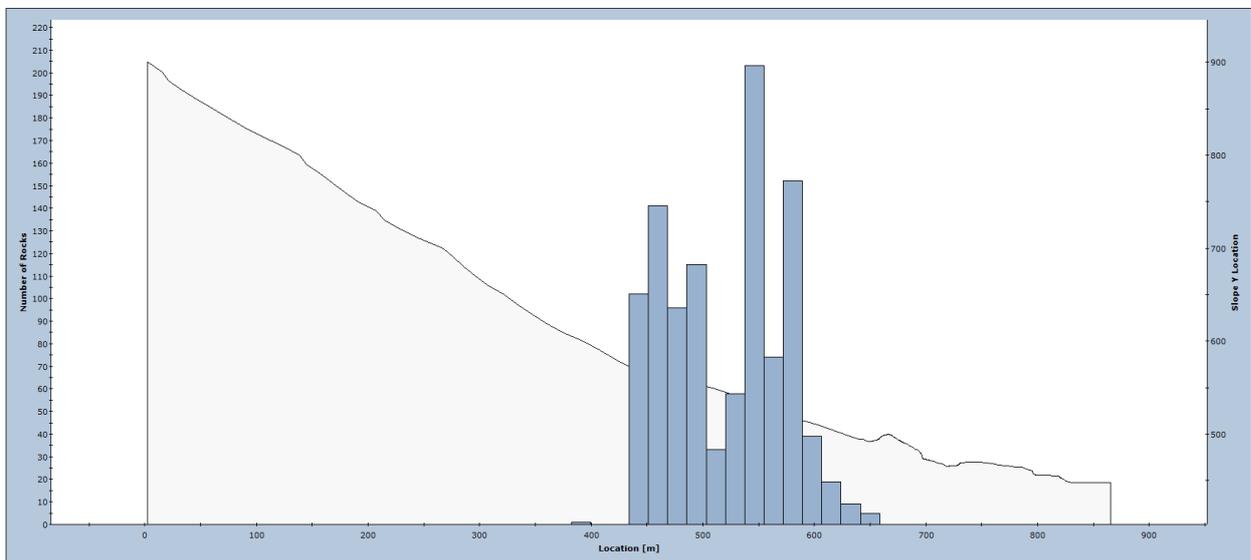


Figura 90 – Settore Ovest, profilo G1: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

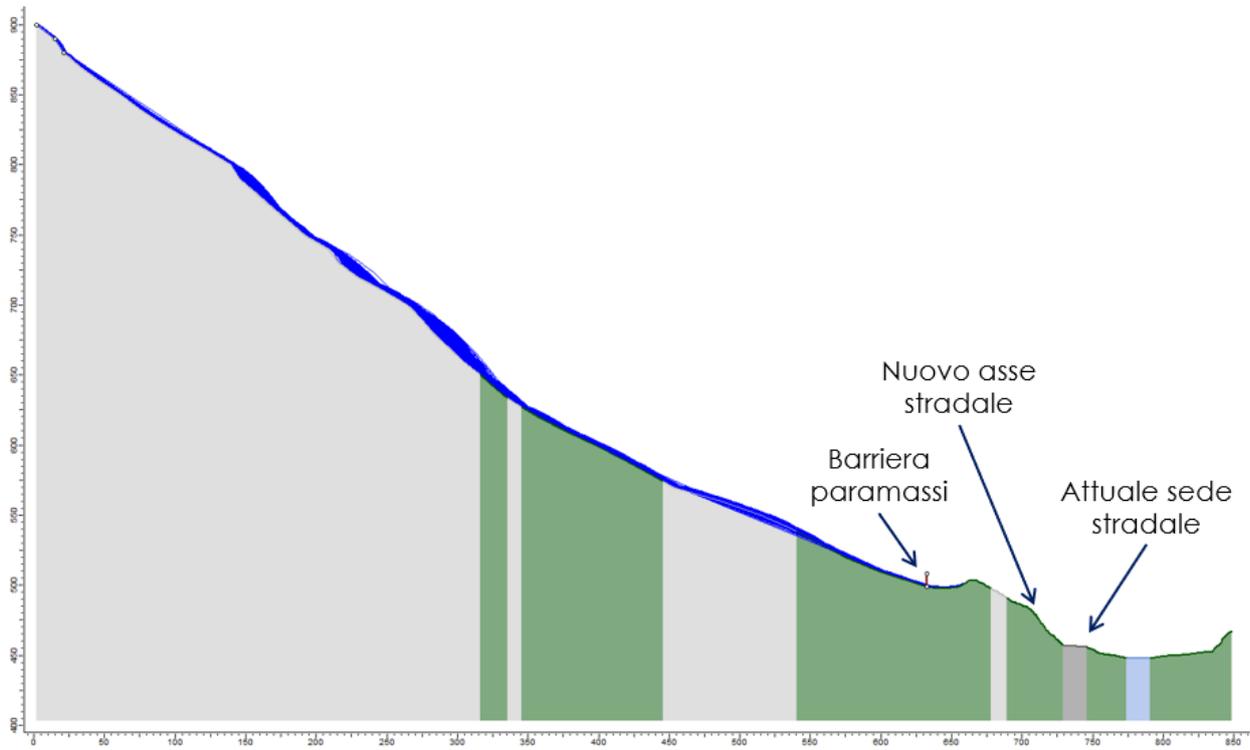


Figura 91 – Settore Ovest, profilo G2: traiettorie dei blocchi.

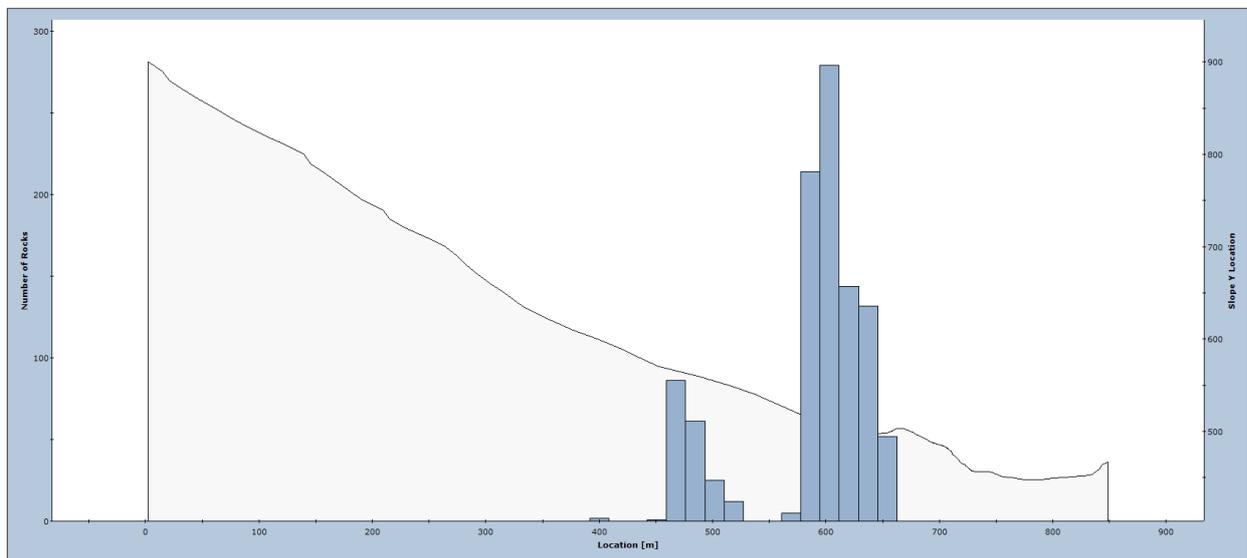


Figura 92 – Settore Ovest, profilo G2: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

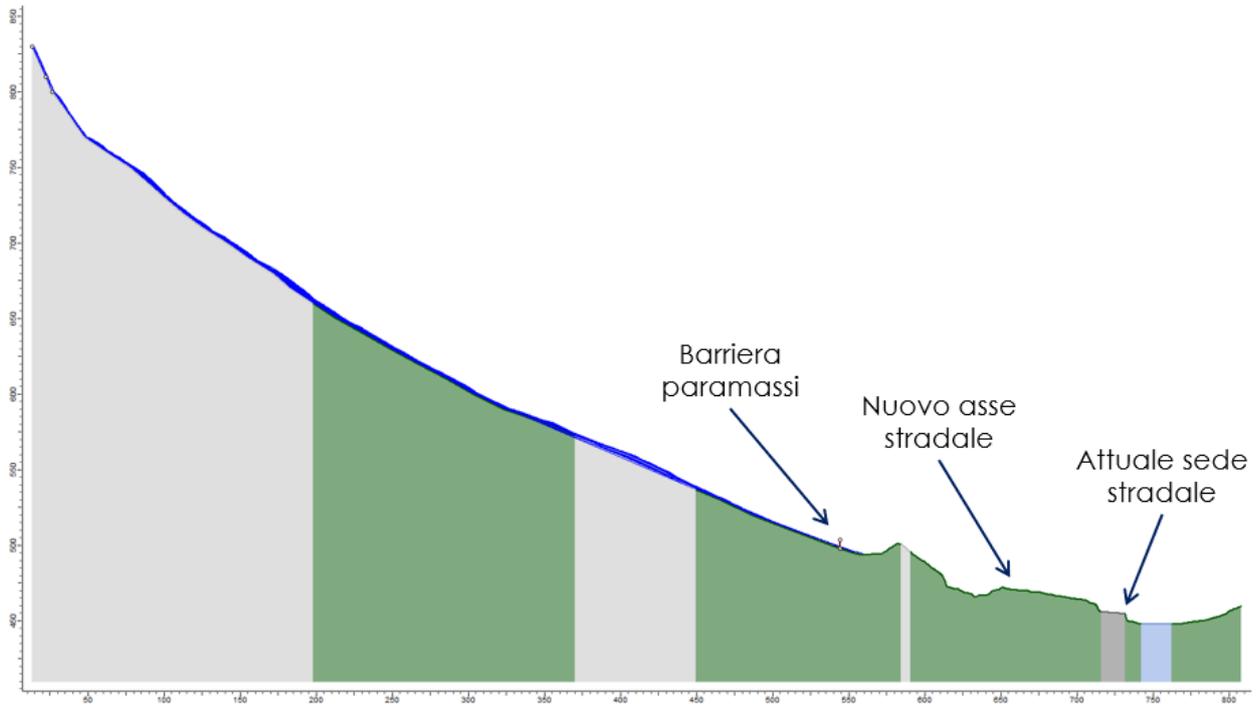


Figura 93 – Settore Ovest, profilo G3: traiettorie dei blocchi.

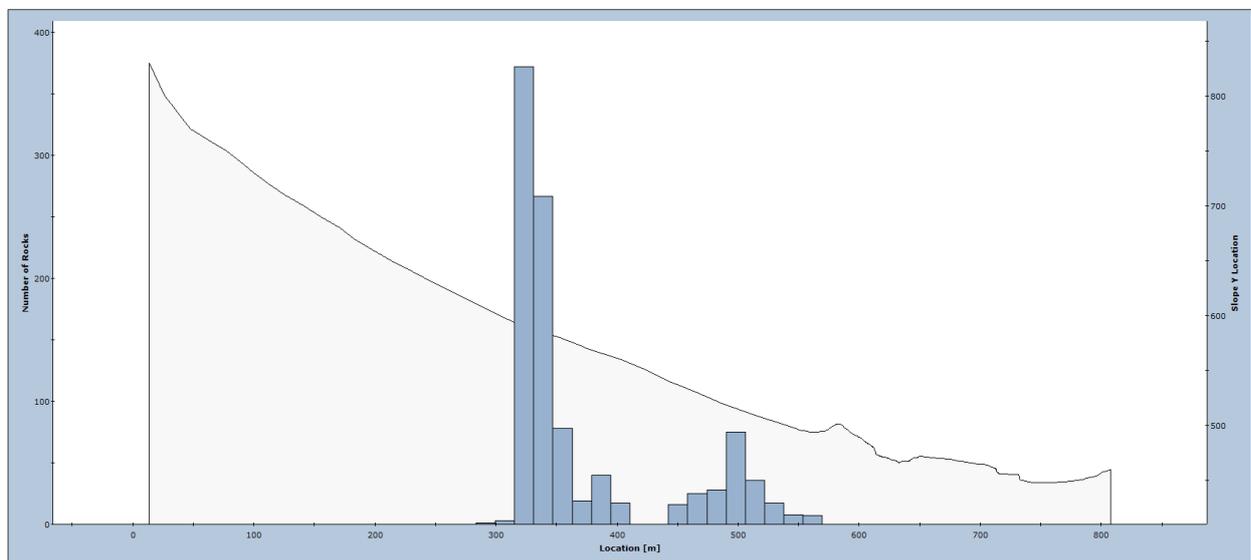


Figura 94 – Settore Ovest, profilo G3: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

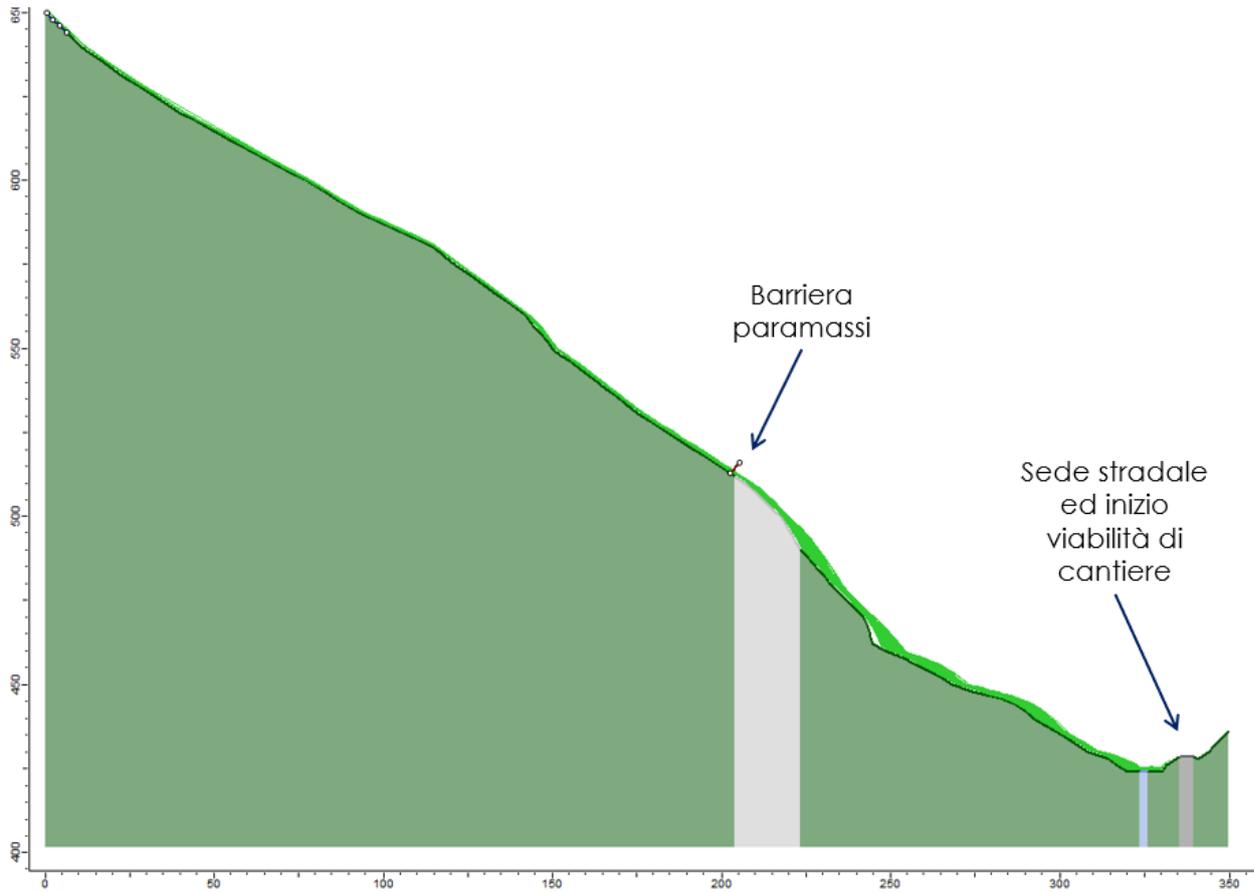


Figura 95 – Settore centrale, profilo C1: traiettorie dei blocchi.

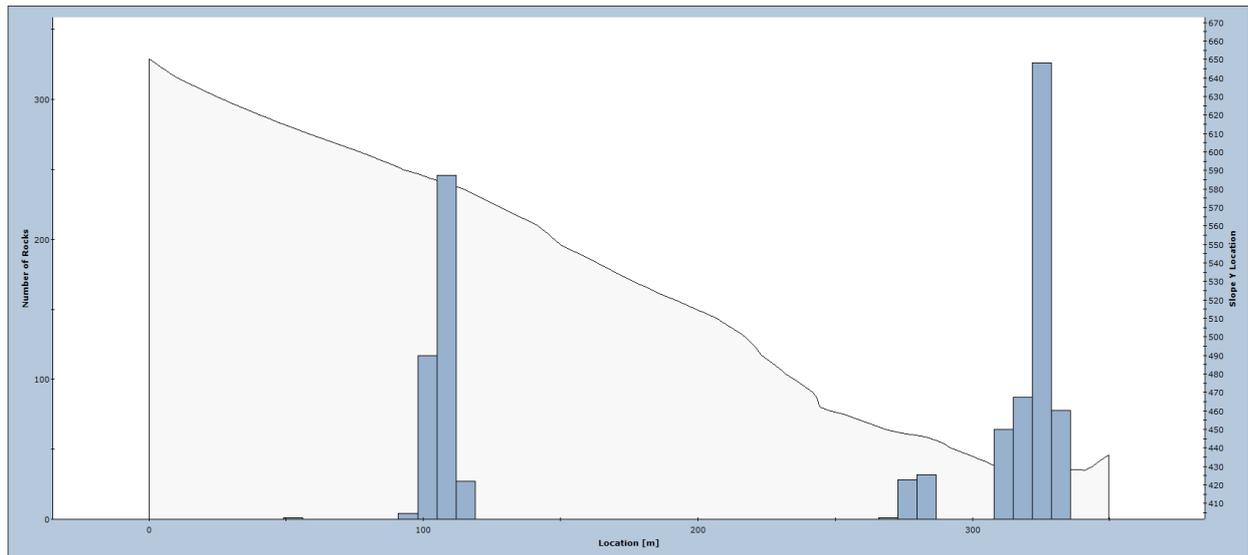


Figura 96 – Settore centrale, profilo C1: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

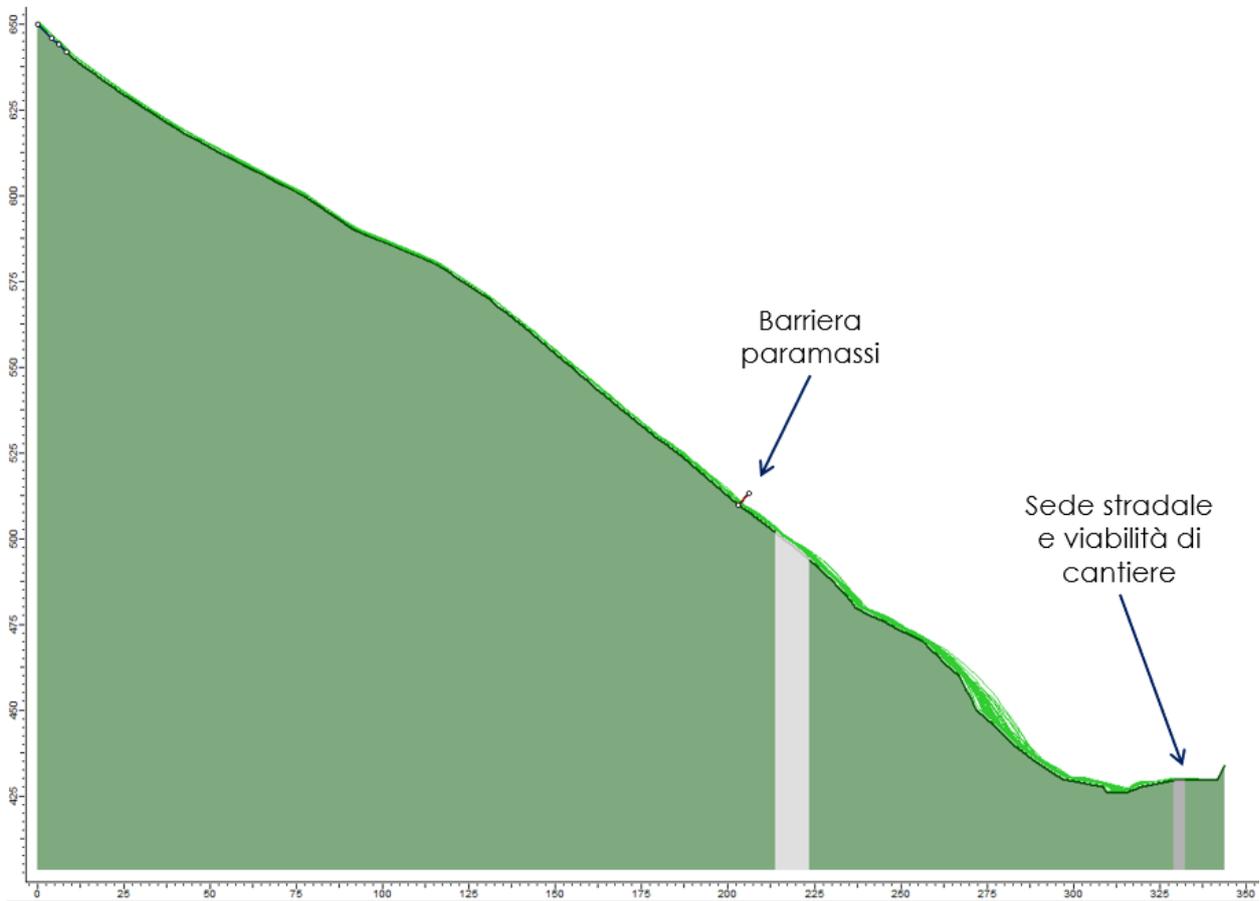


Figura 97 – Settore centrale, profilo C2: traiettorie dei blocchi.

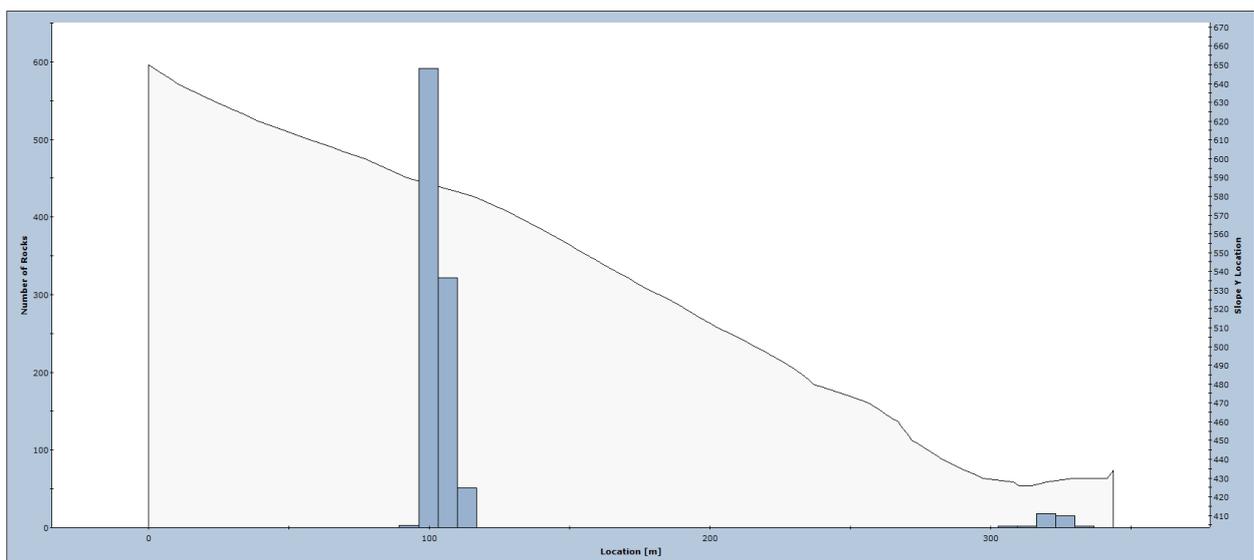


Figura 98 – Settore centrale, profilo C2: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

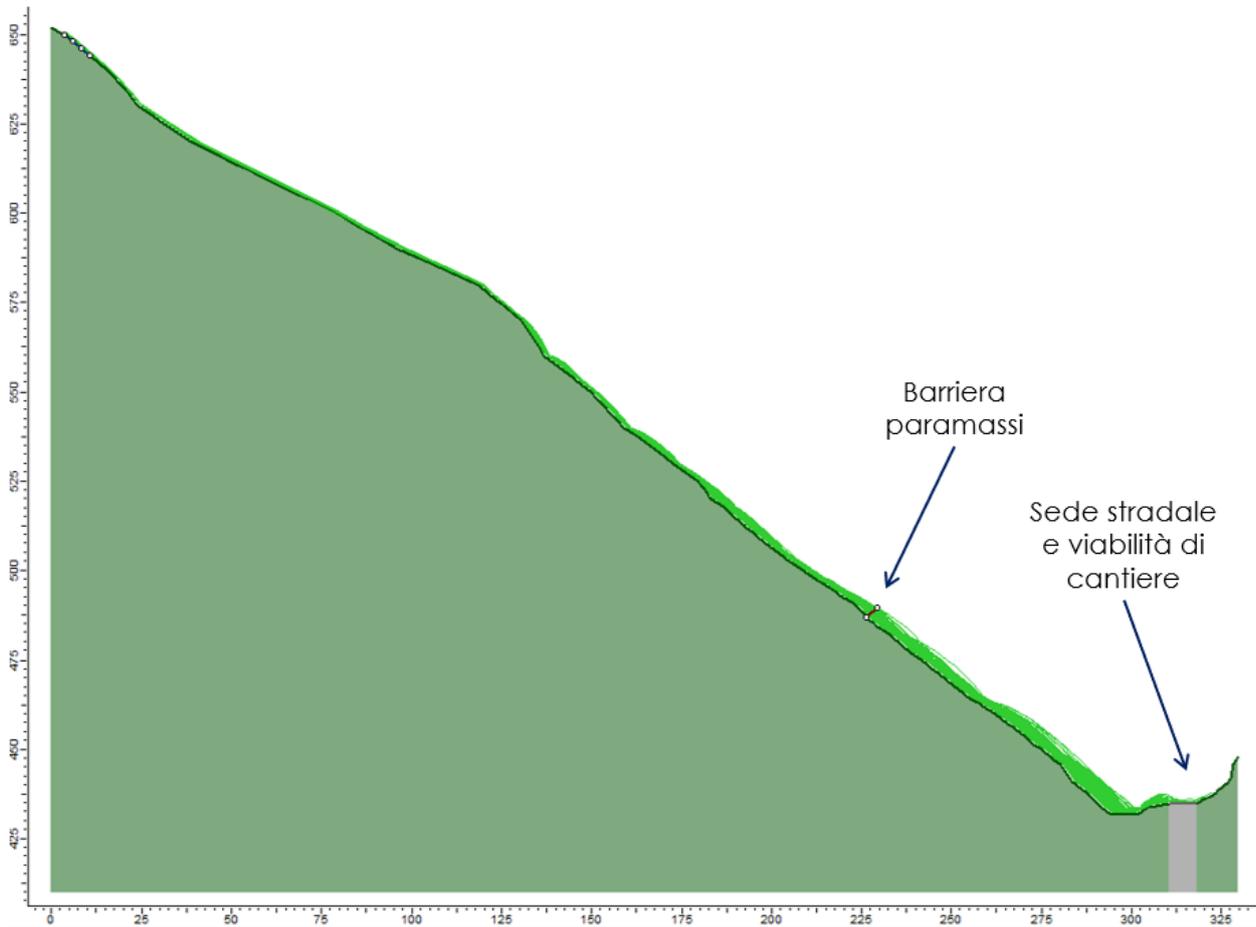


Figura 99 – Settore centrale, profilo C3: traiettorie dei blocchi.

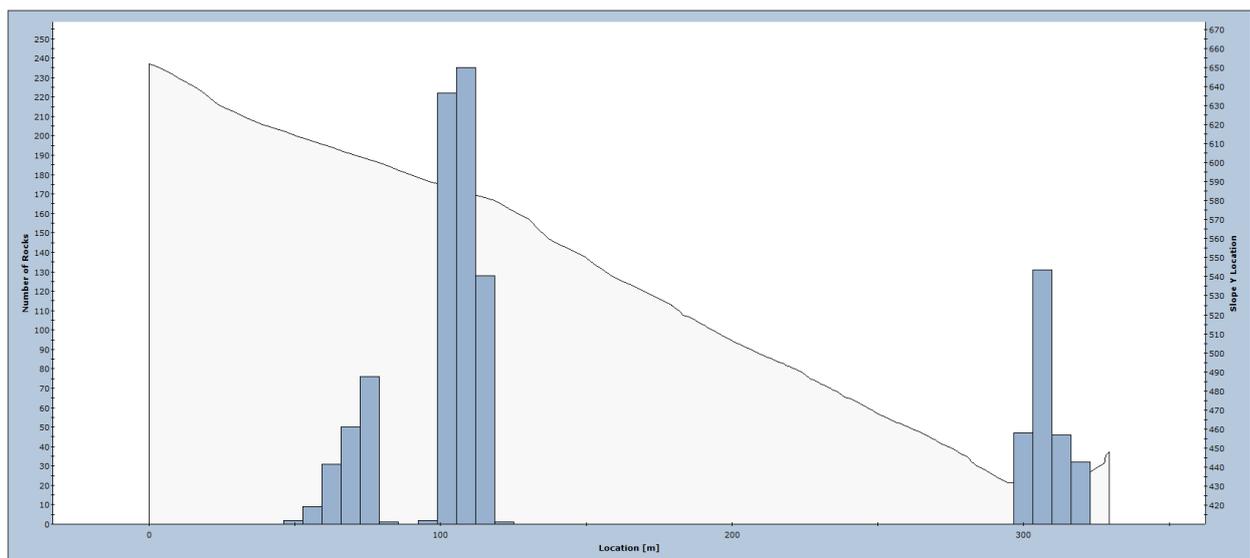


Figura 100 – Settore centrale, profilo C3: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

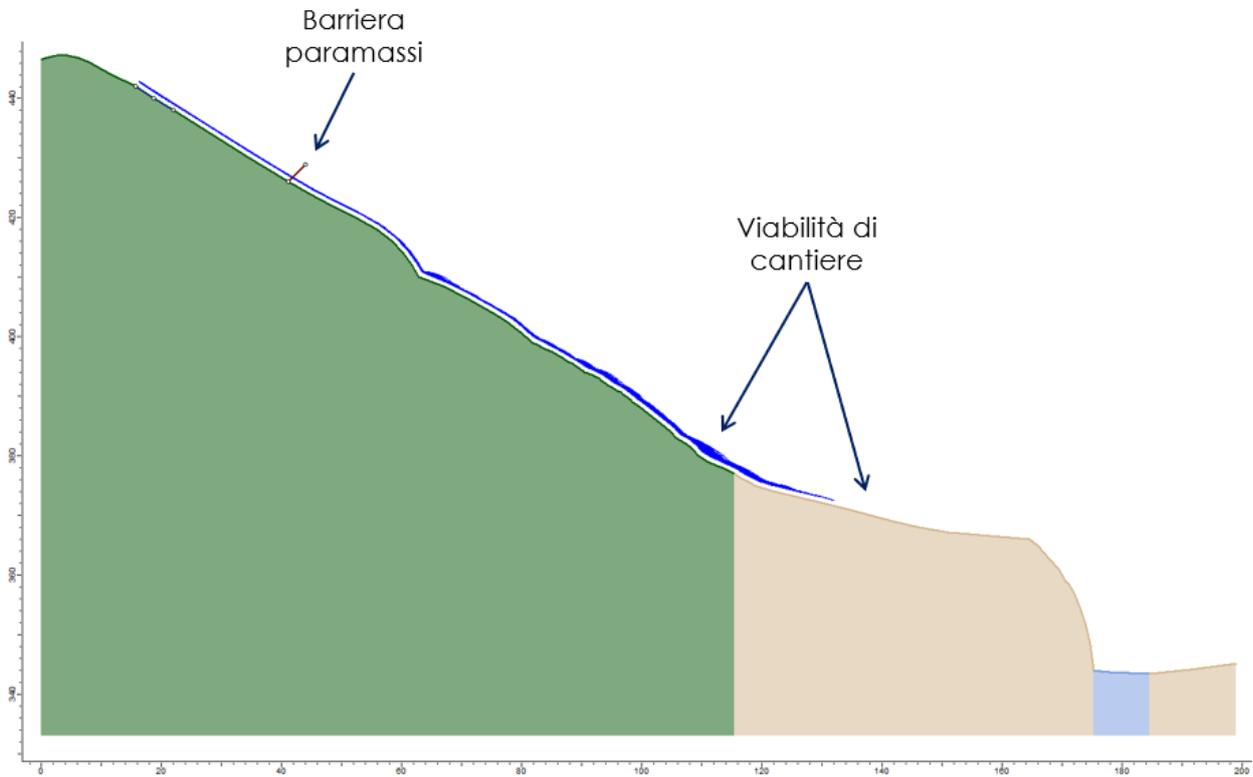


Figura 101 – Settore Est, profilo A1: traiettorie dei blocchi.

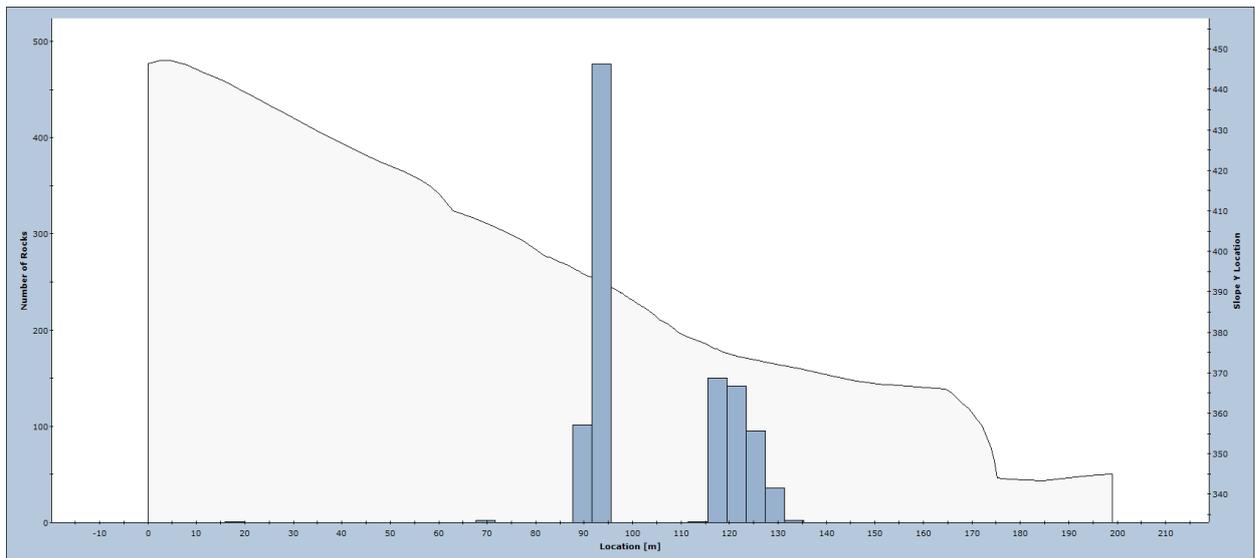


Figura 102 – Settore Est, profilo A1: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

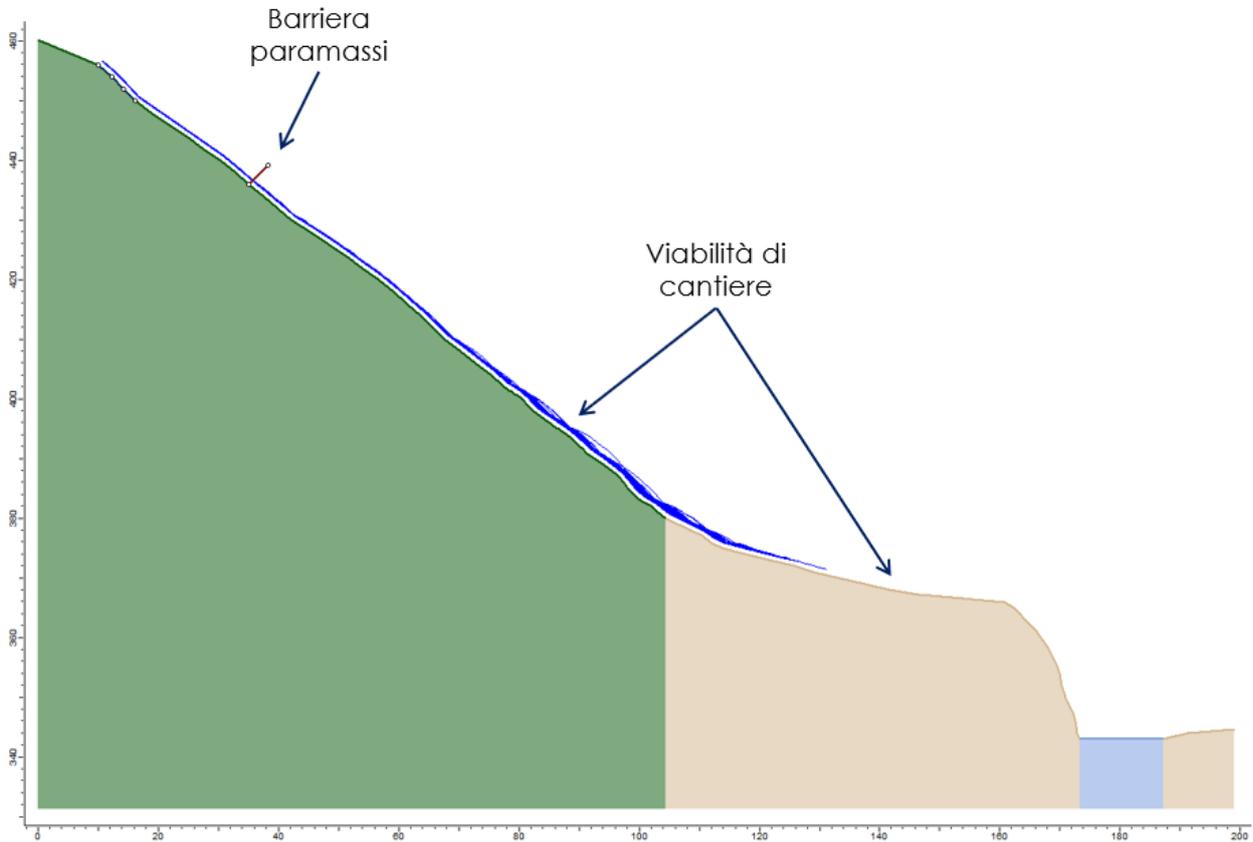


Figura 103 – Settore Est, profilo A2: traiettorie dei blocchi.

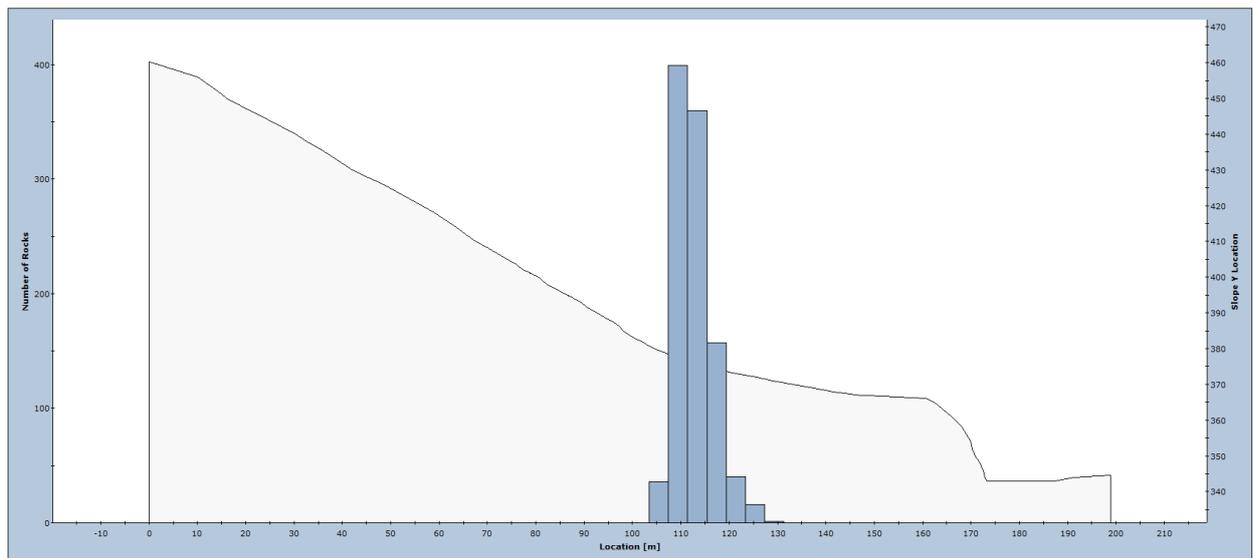


Figura 104 – Settore Est, profilo A2: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

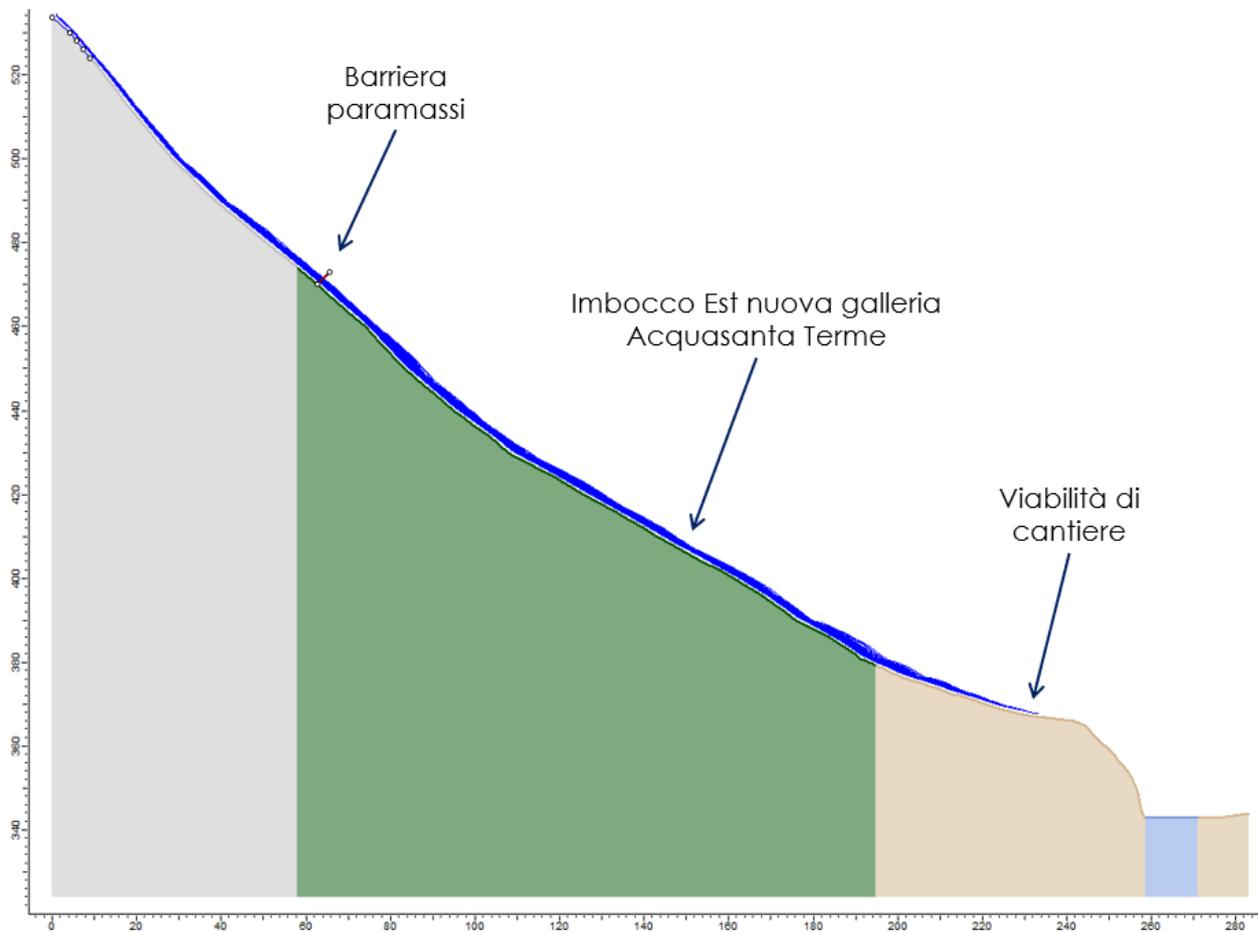


Figura 105 – Settore Est, profilo B1: traiettorie dei blocchi.

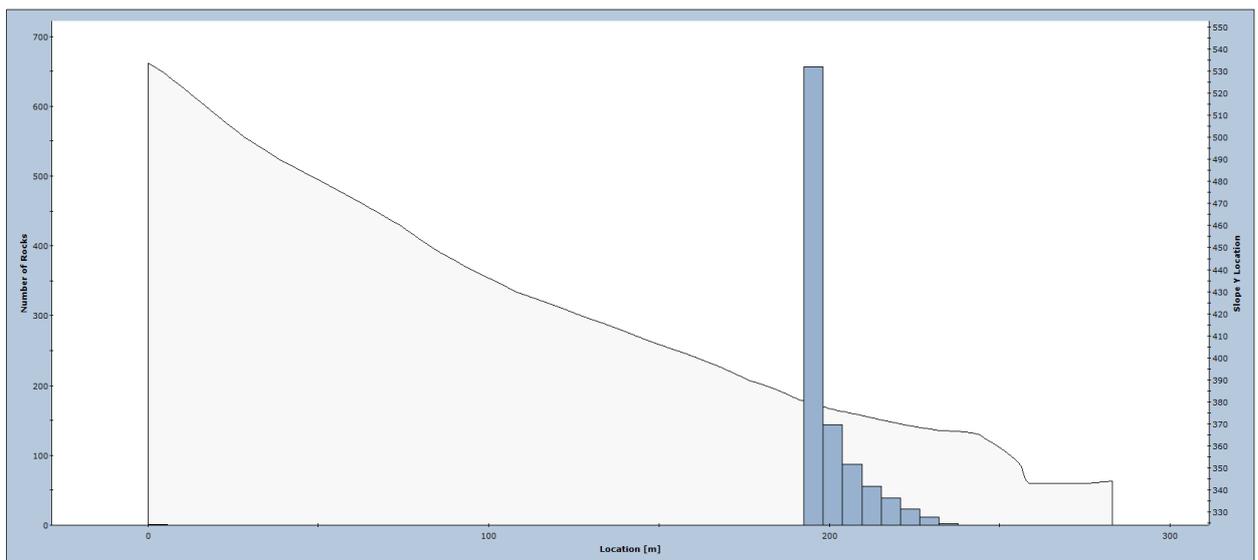


Figura 106 – Settore Est, profilo B1: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

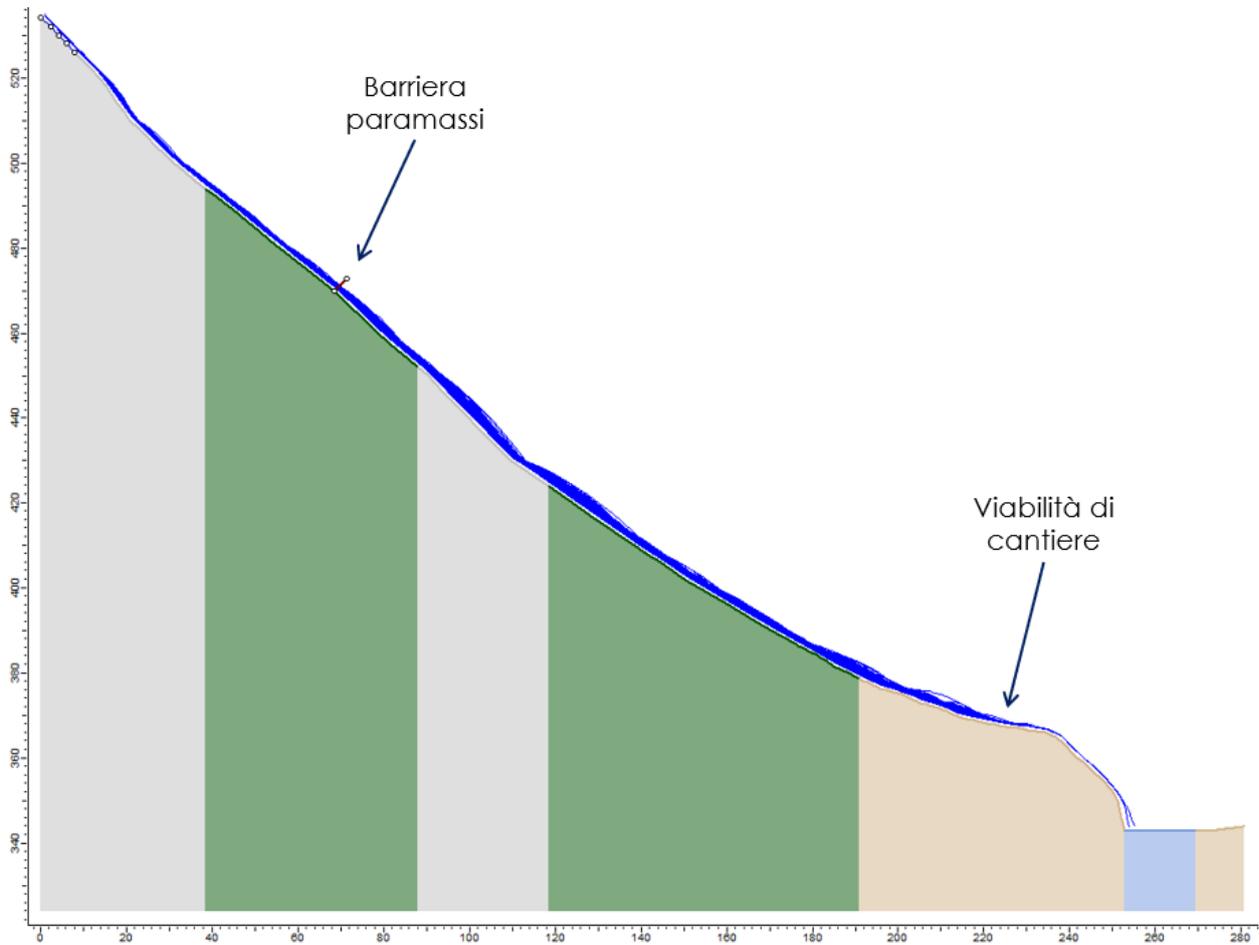


Figura 107 – Settore Est, profilo B2: traiettorie dei blocchi.

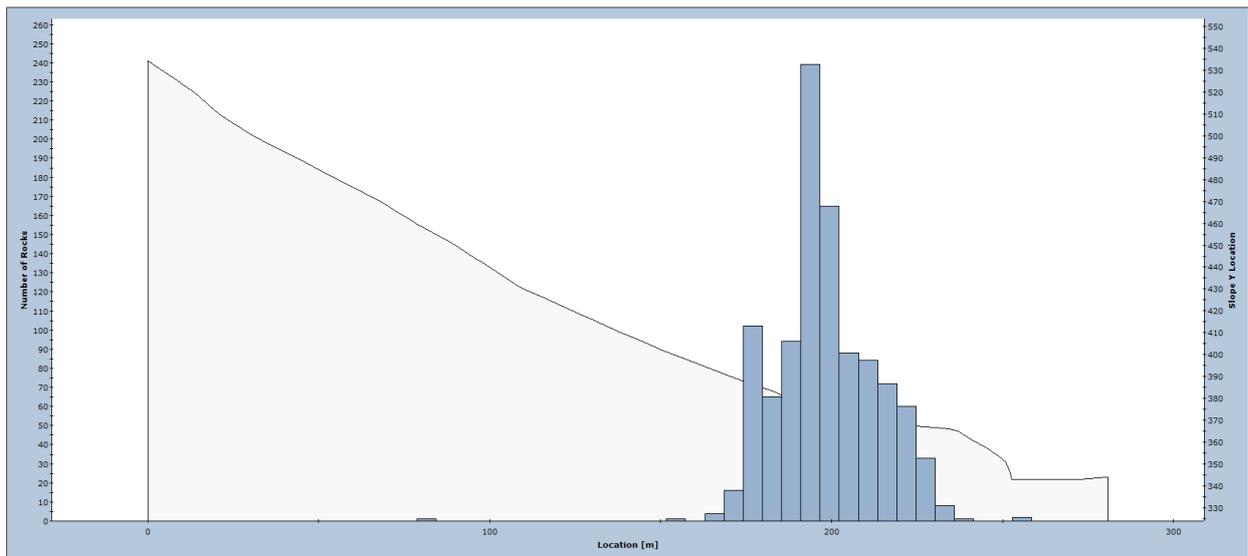


Figura 108 – Settore Est, profilo B2: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

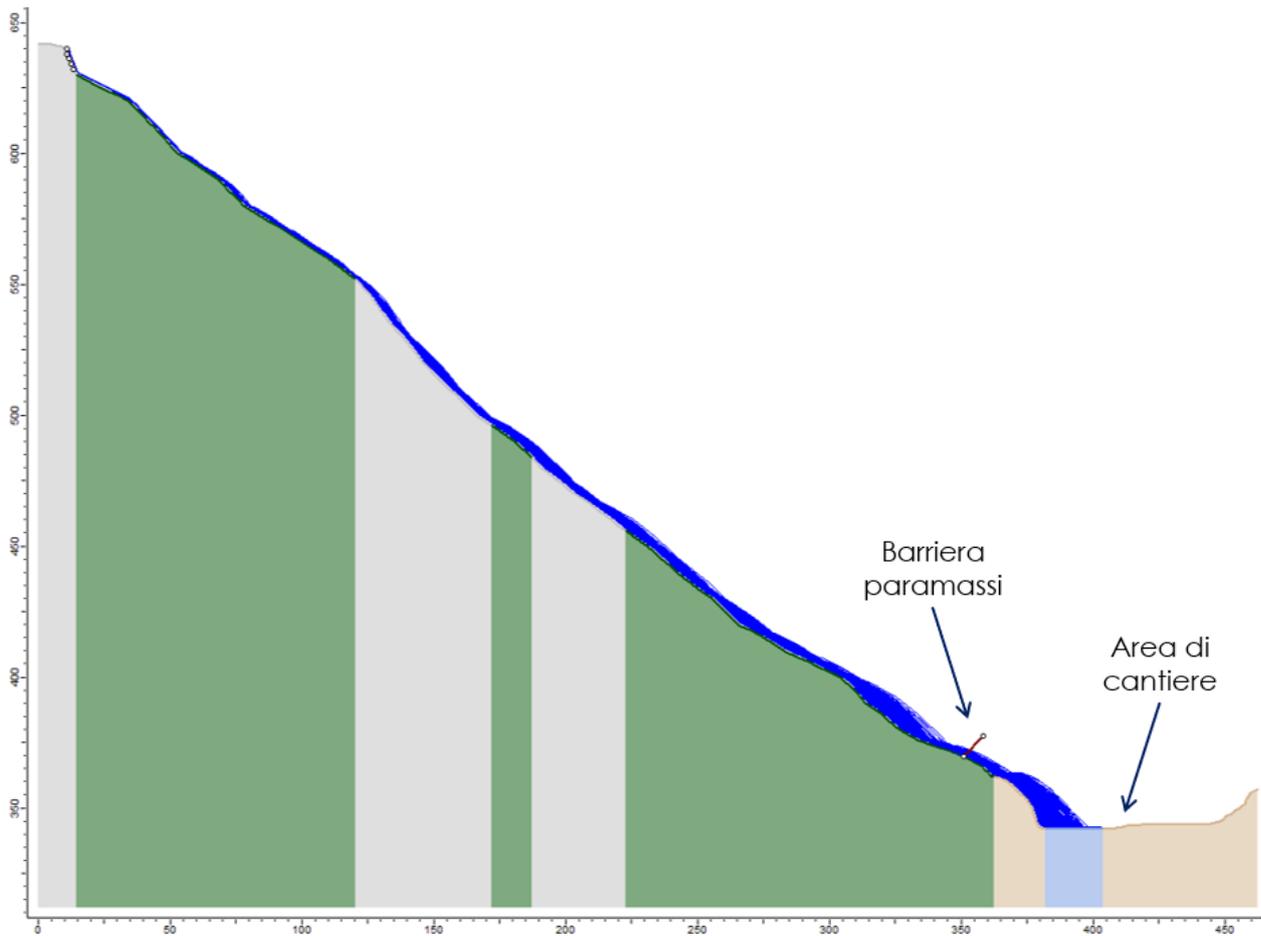


Figura 109 – Settore Est, profilo E1: traiettorie dei blocchi.

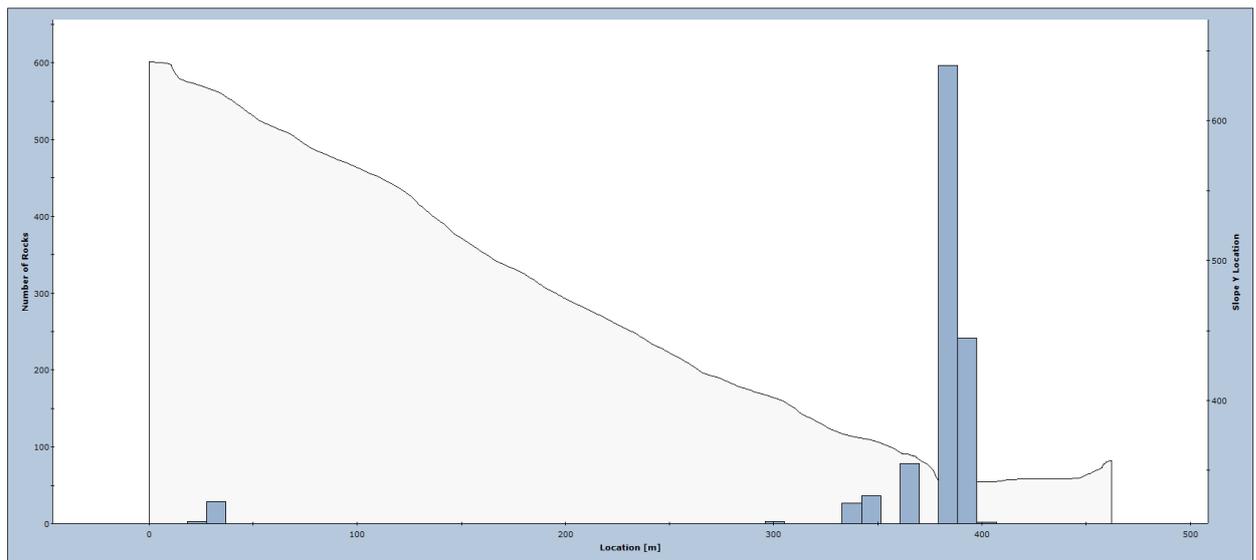


Figura 110 – Settore Est, profilo E1: distribuzione dei punti di arresto lungo il profilo.

6.4.3 Risultati e criteri di dimensionamento

Di seguito vengono presentati i risultati delle analisi traiettografiche, in termini di velocità dei blocchi e di altezza del punto d'impatto dei blocchi stessi con la sezione di controllo. Entrambe le grandezze vengono date nei loro valori massimi ed in corrispondenza del frattile del 95%, calcolato sul campione totale delle possibili traiettorie (n=1000), anche quando il numero di blocchi che raggiunge la sezione di controllo è inferiore.

L'applicazione delle Norme UNI, con l'indicazione di considerare tali grandezze in corrispondenza del frattile del 95%, consente di determinare le azioni di progetto secondo un'ottica conservativa, e nel contempo garantisce che le traiettorie anomale non vadano ad influenzare in modo troppo significativo i risultati delle analisi.

I risultati in termini di energia di progetto e di altezza d'intercettazione di progetto, sono quindi stati calcolati in ottemperanza alle Norme UNI 11211 [5], che rappresentano un quadro di riferimento per le opere di difesa da caduta massi. In particolare nella Parte 4 vengono definiti i parametri d'impatto sulle opere paramassi passive.

Le azioni sulle opere di difesa passiva devono essere determinate ricorrendo ad analisi approfondite sulla dinamica dello scoscendimento del masso di progetto, al fine di determinarne la traiettoria, sia dal punto di vista planimetrico che altimetrico, la frequenza di caduta, la velocità e l'energia cinetica.

L'energia di progetto E_{sd} corrisponde all'energia posseduta dal blocco in movimento in corrispondenza del punto d'impatto con l'opera passiva.

La velocità di progetto dei blocchi (v_d) è definita come la velocità in corrispondenza del punto d'impatto con l'opera corrispondente al frattile del 95% delle velocità calcolate (v_t) nelle analisi delle traiettorie moltiplicata per il coefficiente di amplificazione (γ_F) definito come:

$$v_d = v_t \times \gamma_F$$

dove:

v_d è la velocità di progetto dei blocchi

v_t sono le velocità calcolate nelle analisi delle traiettorie

γ_F è espresso come $\gamma_F = \gamma_{Tr} \times \gamma_{Dp}$

dove:

γ_{Tr} è il coefficiente di affidabilità di calcolo delle traiettorie:

= 1.02 per simulazioni di caduta basate su coefficienti di restituzione ottenuti da analisi a ritroso (back analysis);

= 1.10 per simulazioni di caduta basate su coefficienti di restituzione derivati da sole informazioni bibliografiche.

Per un approccio cautelativo si adotta il valore massimo: $\gamma_{Tr} = 1.10$

γ_{Dp} è il coefficiente che tiene conto della qualità della discretizzazione topografica del pendio:

= 1.02 per pendii discretizzati con rilievo topografico di buona precisione in rapporto alle caratteristiche del sito;

= 1.10 per pendii discretizzati con precisione media-bassa.

Nel caso specifico è stato considerato: $\gamma_{Dp} = 1.02$, in quanto la morfologia del versante, estratta da un rilievo con curve di livello (spaziatura 2.0m) è stata

rappresentata con maggior dettaglio nell'intorno delle opere stradali di progetto grazie a modelli digitali del terreno (DTM) appositamente realizzati per le opere in oggetto.

La massa del blocco di progetto (m_d) è definita come il prodotto del volume del blocco di progetto (Vol_b) per la massa per unità di volume della roccia (γ) moltiplicato per un coefficiente di amplificazione:

$$m_d = (Vol_b \times \gamma) \gamma_m$$

dove:

m_d è la massa del blocco di progetto

Vol_b è il volume del blocco di progetto

γ è la massa per unità di volume della roccia in posto

γ_m è un coefficiente di amplificazione espresso come $\gamma_m = \gamma_{VolFI} \times \gamma_\Psi$

dove:

γ_{VolFI} è il coefficiente legato alla precisione del rilievo del volume del blocco di progetto:

= 1.02 per rilievi accurati della parete (per esempio mediante tecniche fotogrammetriche, topografiche di precisione, rilievi geomeccanici sistematici in parete, misurazione dei blocchi presenti sul detrito alla base delle pareti);

= 1.10 in assenza di rilievi finalizzati al progetto.

Nel caso in esame si adotta il valore: $\gamma_{VolFI} = 1.10$.

γ_Ψ è il coefficiente legato alla valutazione della massa per unità di volume della roccia, che può essere generalmente assunto pari a 1.00.

L'energia cinetica sollecitante di progetto E_{sd} è pertanto determinata nel modo seguente:

$$E_{sd} = \frac{1}{2} m_d v_d^2$$

dove:

E_{sd} è l'energia cinetica sollecitante di progetto

m_d è la massa del blocco di progetto

v_d è la velocità del blocco di progetto al momento dell'impatto.

L'altezza d'intercettazione di progetto (h_d) è definita come l'altezza del punto d'impatto del baricentro del blocco con l'opera corrispondente al frattile del 95% delle altezze calcolate (h_t) nelle analisi delle traiettorie, moltiplicata per il coefficiente di amplificazione (γ_F):

$$h_d = h_t \times \gamma_F$$

dove:

h_t è l'altezza del punto d'impatto del baricentro del blocco con l'opera corrispondente al frattile del 95% delle altezze calcolate nelle analisi delle traiettorie;

γ_F è espresso come $\gamma_F = \gamma_{Tr} \times \gamma_{Dp}$ (come già definito nell'equazione per il calcolo della velocità di progetto)

Il franco minimo libero (f_{min}) è la fascia al bordo superiore o ai fianchi dell'opera di intercettazione passiva di dimensione pari al raggio del blocco di progetto e comunque non minore di 0.50m.

La verifica delle opere paramassi passive deve infine essere condotta tenendo conto della destinazione, dell'ubicazione e del livello di rischio. Nel caso infatti di elevato rischio per la vita umana, all'energia

sollecitante di progetto E_{sd} può essere applicato un ulteriore coefficiente amplificativo di protezione variabile da 1.0 a 1.2. Nel presente studio si è scelto di utilizzare un valore pari a 1.2.

$$E_{sd}^* = E_{sd} \times 1.2$$

Nel caso della barriera paramassi il valore dell'energia cinetica sollecitante di progetto E_{sd}^* viene moltiplicato, come indicato nelle Norme UNI 11211-4, per un coefficiente di sicurezza ($\gamma_E = 1.20$) riferito al livello energetico MEL.

Le seguenti tabelle contengono i risultati relativi alle sezioni ritenute più significative.

Tabella 3 - Risultati delle analisi in campo bidimensionale per ciascun settore e per ciascuna traiettoria significativa.

Settore	Traiettoria	v_{max}	v_t	v_d	E_{sd}	E_{sd}^*	$E_{sd}^* \times \gamma_E$	h_{max}	h_t	h_d	$h_d + f_{min}$
		[m/s]	[m/s]	[m/s]	[kJ]			[m]	[m]	[m]	[m]
Ovest	A1	18.77	17.01	19.09	2 404.02	2 884.83	3 461.79	3.75	2.11	2.36	3.43
	A1 bis	8.65	8.03	9.01	535.75	642.90	771.48	1.80	1.63	1.83	2.89
	A2	13.98	11.32	12.70	1 064.69	1 277.63	1 533.15	2.27	1.83	2.05	3.11
	A2 bis	14.12	12.95	14.53	1 393.38	1 672.05	2 006.47	2.49	2.09	2.35	3.41
	B1	19.89	18.44	20.69	2 825.21	3 390.26	4 068.31	4.16	2.58	2.89	3.96
	B1 bis	16.96	16.23	18.21	2 188.60	2 626.32	3 151.59	3.65	2.69	3.01	4.08
	B2	17.82	15.06	16.90	1 884.43	2 261.31	2 713.58	3.41	2.76	3.10	4.16
	C1	6.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	0.00	0.00	1.06
	C2	21.26	17.07	19.15	2 421.01	2 905.21	3 486.26	3.95	2.23	2.50	3.56
	C3	7.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98	0.00	0.00	1.06
	F1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.06
	F1 bis	15.85	14.59	16.37	1 768.64	2 122.37	2 546.85	2.10	1.70	1.91	2.97
	F2	22.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.62	0.00	0.00	1.06
G1	18.24	11.59	13.00	1 116.08	1 339.30	1 607.16	1.77	1.15	1.29	2.35	
G2	21.49	10.75	12.06	960.17	1 152.20	1 382.64	1.85	1.09	1.22	2.28	
G3	9.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	1.06	
Centrale	C1	16.10	11.57	12.98	444.89	533.87	640.65	1.23	0.86	0.97	1.75
	C2	19.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.37	0.00	0.00	0.78
	C3	22.65	18.98	21.30	1 197.24	1 436.69	1 724.03	3.86	2.38	2.67	3.45
Est	A1	8.20	7.54	8.46	472.36	566.83	680.20	0.98	0.98	1.09	2.16
	A2	9.35	8.73	9.80	633.23	759.87	911.84	1.05	0.95	1.06	2.12
	B1	22.82	20.27	22.74	3 413.79	4 096.55	4 915.86	2.14	1.53	1.71	2.77
	B2	21.70	17.30	19.41	2 486.69	2 984.03	3 580.84	1.77	1.37	1.54	2.60
	E1	24.14	19.88	22.31	3 283.69	3 940.43	4 728.52	2.46	2.10	2.36	3.42

Tutte le traiettorie "bis" seguono la direttrice del profilo della sezione, ma i massi partono da una linea di distacco situata più a valle.

Laddove il numero di massi che raggiunge la barriera di progetto è inferiore al 5% del totale (quindi n. massi < 50 su 1000; vedi profili C1, C3, F1, F2 e G3 del settore Ovest, C2 del settore centrale), i risultati delle simulazioni, secondo le norme UNI 11211-4, non sono significativi al fine della progettazione delle barriere paramassi.

Tuttavia, le analisi effettuate dimostrano come non si possa escludere la possibilità che alcuni massi raggiungano le aree da proteggere (imbocchi delle due nuove gallerie naturali e viabilità di cantiere):

considerazioni di carattere ingegneristico, unitamente alla sensibilità dello scrivente ed al ritrovamento di testimoni muti lungo il pendio, portano a prevedere in via cautelativa la realizzazione di barriere paramassi anche lungo le traiettorie meno critiche.

Sulla base delle analisi traiettografiche e dei criteri di dimensionamento si prevede quindi l'installazione di barriere metalliche ad elevata deformazione con differenti capacità di assorbimento: 2 000, 3 000 e 5 000 kJ (valori MEL), corrispondenti rispettivamente alla classificazione 5, 6 e 8 EOTA.

7 ANALISI DI CROLLI IN MASSA

Nel presente capitolo sono riportati gli esiti delle verifiche dei volumi e traiettorie di spagliamento per crolli in massa, dell'ordine delle migliaia di metri cubi, che si possono originare dalla cima del monte Pizzo in occasione di eventi sismici. Scopo di queste analisi è, in particolare, valutare se le opere in progetto sono esposte alla frana che si potrebbe sviluppare a seguito del distacco del volume posto sulla cima del Monte Pizzo in occasione di eventi sismici.

7.1 VOLUME DI FRANA

La massa potenzialmente instabile è stata definita a partire dall'analisi della morfologia. La cima del Monte Pizzo presenta una parete di roccia affiorante. A partire dalla base di tale parete è stata tracciata una superficie di rottura, delimitando così il possibile volume instabile (Figura 111). La possibile massa instabile così definita ha un volume di 2814 m³.

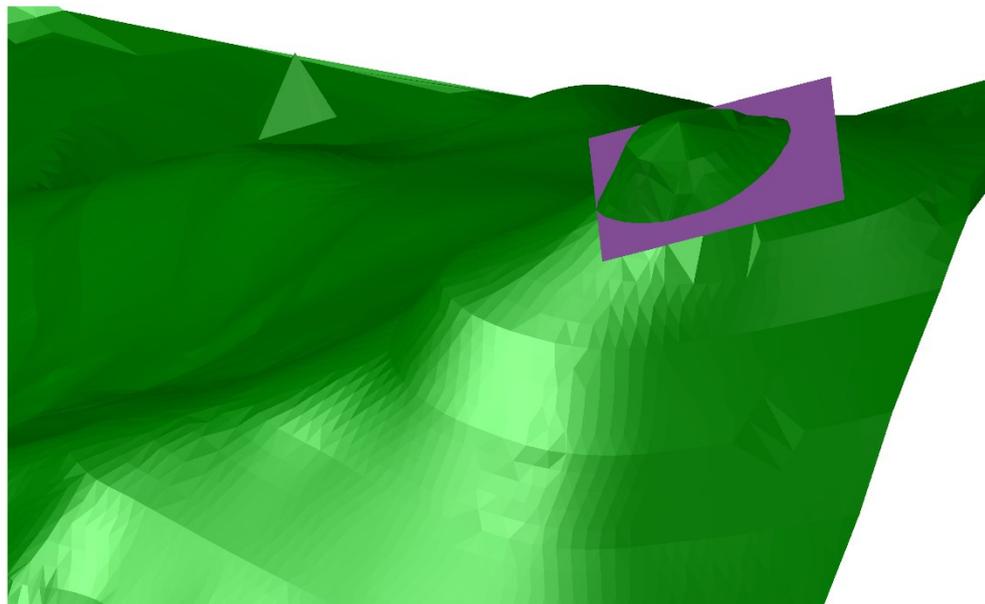


Figura 111 - Vista da NE della cima del monte Pizzo con l'indicata la superficie di scorrimento ipotizzata.

Nella Figura 112 è riportata sezione della cima del monte Pizzo lungo la direzione verso l'imbocco della galleria lato acquasanta. Si nota come alla base della parete posta sulla cima del Monte Pizzo è presente un piccolo piano, al di sotto del quale è presente poi un'altra parete, alla cui base si sviluppa poi il versante. Qualitativamente, osservando la sezione, una possibile dinamica prevede che il volume individuato dopo una prima fase di volo impatta sul piano posto alla base della parete posta sulla cima del Monte Pizzo ("impatto alto") oppure sul versante che si sviluppa alla base della parete posta sotto il piano ("impatto basso").

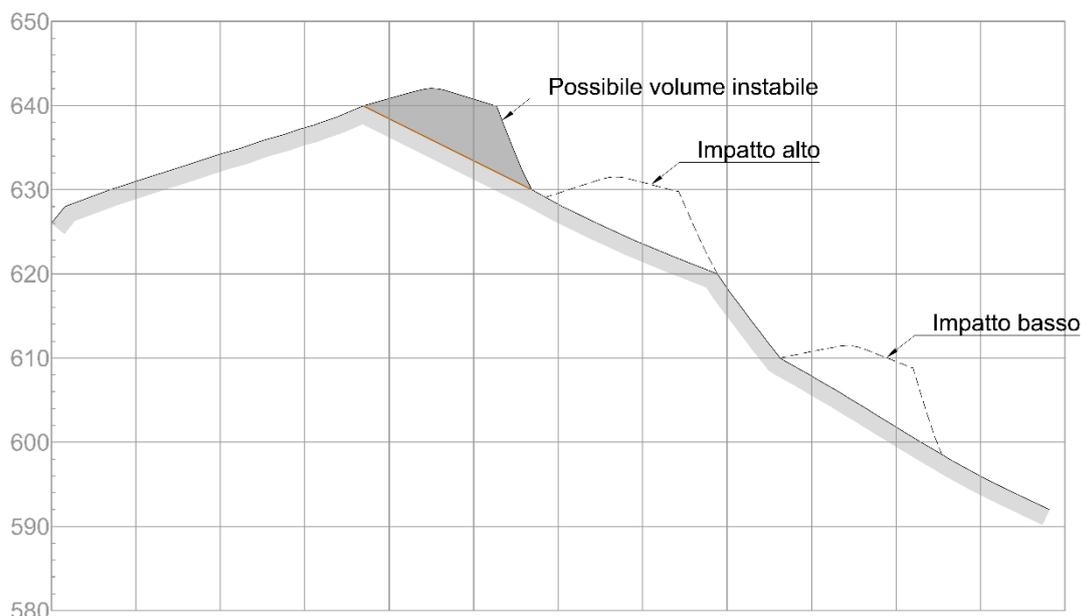


Figura 112 - Sezione della cima del monte Pizzo lungo la direzione verso l'imbocco della galleria lato acquasanta, nella quale sono riportate anche i volumi iniziali che verranno considerati nelle analisi ("impatto alto" e "impatto basso").

In ognuno dei due possibili punti di impatto si ha un'un'alta energia, data la massa elevata. La letteratura riporta che negli impatti con energie elevate, frequentemente il volume crollato si frantuma ed è quindi possibile considerare la frana come un crollo in massa. Per questo motivo nelle analisi presentate di seguito i due possibili punti di impatti costituiranno il punto iniziale dal quale la massa instabile inizierà il suo moto.

7.2 METODI PER LA VALUTAZIONE DELLE AREE DI INVASIONE

In linea generale i metodi attualmente esistenti per la previsione dell'area d'invasione delle frane di crolli in massa possono essere raggruppati in quattro grandi categorie in funzione dei criteri e del tipo di approccio alla base della loro formulazione:

1. Metodi statistici: basati sull'analisi statistica, tipicamente mediante regressioni lineari di dati di frane avvenute nel passato (Scheidegger, 1973; Tianchi, 1983; Govi et al., 1985).
2. Metodi statistico – deterministici: producono analisi statistiche corrette in base a diversi criteri non statistici (Hsü, 1975, 1978; Davies, 1982; Fang & Zhang, 1988; Dade & Huppert, 1998; Kilburn & Sorensen, 1998; Kilburn, 2001).
3. Metodi statistico – morfologici: procedono ad un'analisi statistica analogamente al gruppo precedente avendo però a priori suddiviso la massa di dati in base alla morfologia del terreno (Nicoletti & Sorriso Valvo, 1991; Corominas, 1996; Erismann & Abele, 2001).
4. Metodi deterministici: basati su modelli reologici che simulano il movimento del fenomeno gravitativo riproducendone matematicamente le condizioni (Perla et al., 1980; Rochet, 1987; Sousa & Voight, 1991; Hungr, 1995; Calvetti et al., 2000; ecc.).

I metodi empirico-statistici, appartenenti ai primi tre gruppi, sono quasi sempre applicabili data la loro semplicità, la necessità di pochi dati di ingresso in genere facilmente ricavabili, la presenza di casi analoghi (cataloghi di frane) su cui tarare il modello e/o confrontare i risultati ottenuti. In generale, tali metodi consentono di ricavare la corsa assiale della frana a partire dal rapporto H/L, ovvero il rapporto tra la distanza verticale e la distanza orizzontale tra la parte più alta della zona di distacco e la parte più avanzata del deposito di frana (Figura 113).

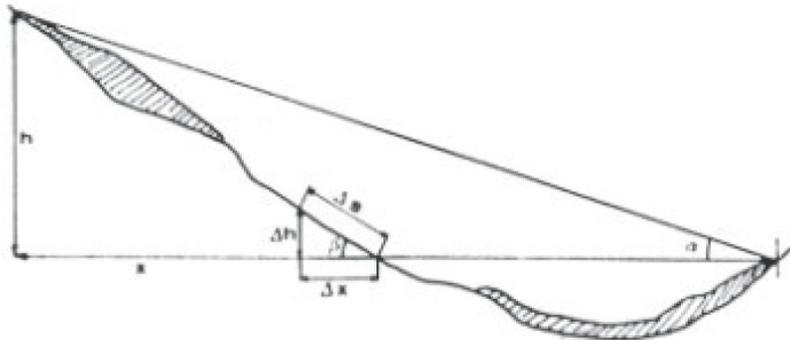


Figura 113 - Definizione di H ed L (Scheidegger, 1973).

I diversi autori propongono correlazioni tra il rapporto H/L ed il volume della frana su un campione selezionato di casi documentati; in base a tali correlazioni è possibile quindi determinare il valore della corsa assiale per un dato volume di frana, con i relativi margini di incertezza. Per contro, tali metodi non consentono di tener conto della topografia della potenziale zona di espansione dell'accumulo di frana. Inoltre, mentre tutti i metodi elencati forniscono il valore della corsa assiale, solo pochi autori propongono formule utilizzabili per determinare l'espansione laterale. Per tali ragioni si è deciso di utilizzare un approccio deterministico, in grado di fornire una zonazione da confrontare con quella fornita dall'analisi di rotolamento di singoli crolli descritta in precedenza.

7.3 APPLICAZIONE DI METODI DETERMINISTICI

Per l'esecuzione del presente studio si è utilizzato un modello basato sulla risoluzione, in un sistema di riferimento lagrangiano, delle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto (Hung, 1995). La risoluzione delle equazioni è basata sulla teoria dell'"idrodinamica delle particelle smussate" (SPH, ovvero nell'originale inglese *Smoothed Particle Hydrodynamics*; e.g. Lucy, 1977; Gingold & Monaghan, 1977; Benz, 1990), nel quale le equazioni sono mediate con la profondità. Il modello è implementato nel codice DAN3D (Hung & McDougall, 2009), che opera nello spazio 3D. Il codice permette di descrivere la resistenza basale al moto del materiale attraverso diversi modelli reologici, ad esempio frizionale, di Voellmy o di Bingham. Ai fini della realizzazione delle simulazioni è necessario l'inserimento di una serie di informazioni. In particolare:

- una topografia tridimensionale;
- la topografia tridimensionale della superficie di distacco;
- le caratteristiche fisico meccaniche dei materiali coinvolti;
- il modello reologico e i parametri che lo descrivono.

Nel caso di analisi a ritroso di eventi già avvenuti, i parametri e la topografia della superficie di distacco possono essere ottenuti tramite calibrazione del modello. Tale calibrazione può avvenire in base a:

- distribuzione finale dell'accumulo, ossia limite di espandimento;
- distribuzione degli spessori dell'accumulo;
- tracce di transito del materiale, collocate spazialmente;
- valori misurati o stimati di velocità del materiale durante il flusso;
- durata totale dell'evento.

Nel caso di un'analisi previsionale di eventi attesi in località ove simili fenomeni sono già avvenuti, è possibile utilizzare i parametri che descrivono il modello reologico derivanti da analisi a ritroso. Nel caso di simulazioni realizzate a scopo revisionale, in assenza di eventi pregressi, la scelta dei parametri fisico meccanici richiesti dal modello può essere compiuta sulla base di osservazioni fatte per frane (valanghe di roccia e detrito) realizzatesi in materiali simili e in ambienti con caratteristiche comparabili. Nel caso in esame non sono disponibili direttamente osservazioni di eventi pregressi e di conseguenza si è dovuto procedere alla stima delle caratteristiche del materiale e della superficie di distacco.

7.3.1 Definizione della base topografica

La base topografica utilizzata è il rilievo fornito dal committente, dal quale è stato estratto in ambiente GIS un modello digitale del terreno (DTM) con maglie 2.5x2.5 m. La spaziatura delle maglie è stata scelta poiché include interamente l'area in frana e ha una risoluzione non eccessiva, ma al contempo non troppo rada, per evitare problemi durante la risoluzione delle equazioni di moto.

7.3.2 Definizione dei parametri del modello

Per l'angolo d'attrito interno si è stabilito in prima istanza un valore di 35°.

La resistenza basale al moto è stata descritta attraverso un modello attritivo. In un modello attritivo la resistenza basale al moto dipende unicamente da un angolo di attrito Φ :

$$\tau_{zx} = -\sigma'_z \tan\Phi \quad , \quad 7.1$$

dove σ'_z è lo sforzo normale agente sulla superficie di scorrimento. I valori di angolo di attrito del modello frizionale sono stati definiti a partire dallo studio di Corominas (1996) per le frane in roccia non ostruite lungo il loro percorso.

Corominas (1996) espone una tesi secondo la quale il rapporto H/L dipende dal volume della frana, dal tipo di frana e dalla presenza di ostacoli e/o costrizioni che la frana incontra lungo il percorso. L'autore prende in considerazione circa 200 frane in tutto il mondo di diversa tipologia. Di queste frane il 70% ha volume inferiore a 10⁶ m³ e la maggior parte inferiore a 10⁴ m³. L'autore raggruppa le frane in quattro classi principali in funzione della tipologia di movimento (crolli in roccia, scorrimenti traslativi, colate, debris flow), ulteriormente classificabili a seconda del tipo di ostacolo morfologico presente (Figura 114).

L'autore ha stimato, per ognuna delle classi di frana precedentemente citate, l'equazione della retta di regressione lineare col metodo dei metodi quadrati. La forma generale di tali equazioni è:

$$\log(H/L) = A + B \log V \quad 7.2$$

dove il volume V è espresso in m^3 . I valori dei parametri A e B variano per tipo di frana ed ostacolo morfologico e sono ricavabili dalla *Tabella 1*. Il valore di H/L determinato può essere assimilato alla tangente dell'angolo di attrito apparante del materiale.

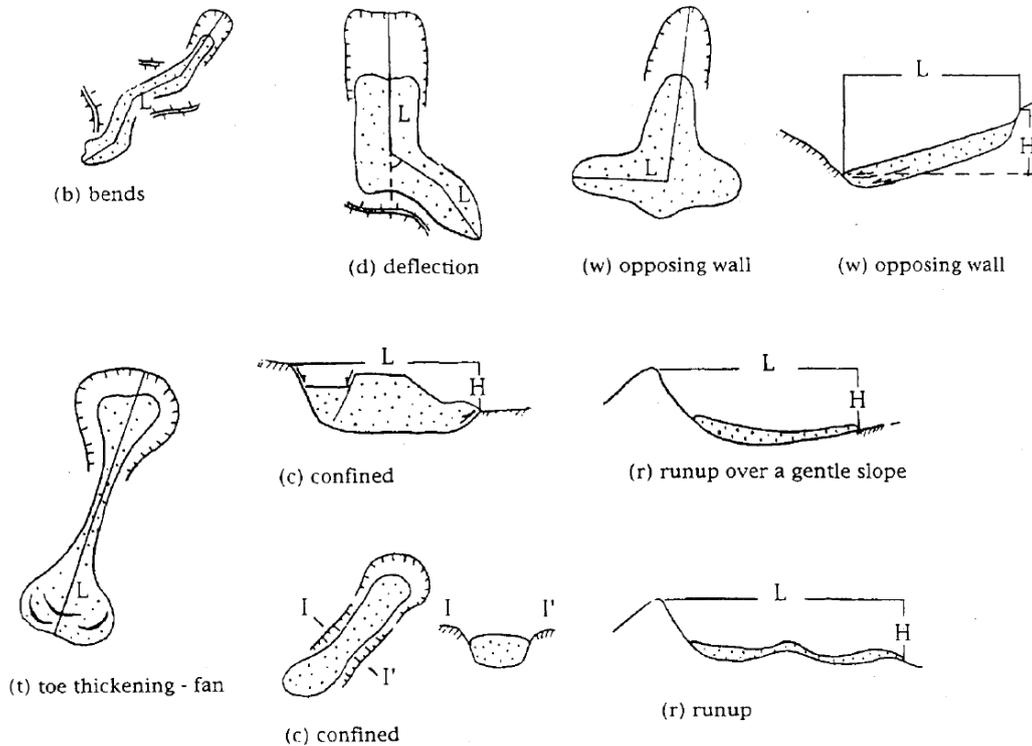


Figura 114 - Condizionamenti morfologici che possono influenzare il percorso di una frana (Corominas, 1996).

Tabella 1 - Risultati della regressione lineare dell'equazione $\log(H/L) = B + A \times \log V$ per ciascun gruppo di frane ed ostacolo morfologico presente (Corominas, 1996).

Landslide type	N	Path type	A	B	r	r ²	Standard error	F test	Probability	Mean confidence limits 95%		Slope confidence limits 95%	
										Lower	Upper	Lower	Upper
All landslides	204	All	-0.047	-0.085	0.791	0.625	0.161	343.792	0.0001	-0.441	-0.396	-0.094	-0.076
Rockfalls													
All	47	All	0.210	-0.109	0.871	0.759	0.123	141.899	0.0001	-0.326	-0.253	-0.128	-0.091
Obstructed	16	w+f	0.231	-0.091	0.913	0.834	0.078	70.416	0.0001	-0.187	-0.103	-0.115	-0.068
Deflected	6	d	1.078	-0.233	0.924	0.854	0.121	23.313	0.0085	-0.687	-0.413	-0.366	-0.099
Unobstructed	14	u	0.167	-0.119	0.961	0.924	0.073	146.248	0.0001	-0.395	-0.309	-0.141	-0.098
Translational slides													
All	69	All	-0.159	-0.068	0.819	0.670	0.137	136.321	0.0001	-0.500	-0.435	-0.080	-0.057
Obstructed	23	w+f	-0.133	-0.057	0.869	0.756	0.101	65.051	0.0001	-0.469	-0.382	-0.072	-0.042
Unobstructed	42	u+l+r	-0.143	-0.080	0.892	0.796	0.115	155.963	0.0001	-0.504	-0.433	-0.093	-0.067
Debris flows													
All	71	All	-0.012	-0.105	0.873	0.763	0.137	221.572	0.0001	-0.451	-0.386	-0.119	-0.091
Obstructed	29	w+d+f	-0.049	-0.108	0.921	0.849	0.101	151.482	0.0001	-0.347	-0.270	-0.126	-0.090
Channelized	19	b+h	-0.077	-0.109	0.831	0.690	0.171	37.855	0.0001	-0.633	-0.467	-0.146	-0.072
Unobstructed	18	u+l+e	-0.031	-0.102	0.932	0.868	0.093	105.024	0.0001	-0.451	-0.358	-0.123	-0.081
Earthflows and mudslides													
All	17	All	-0.214	-0.070	0.805	0.648	0.131	27.589	0.0001	-0.646	-0.512	-0.098	-0.041
Unobstructed	8	u+l	-0.220	-0.138	0.953	0.908	0.074	59.357	0.0003	-0.535	-0.408	-0.182	-0.094

Notes: $\log(H/L) = A + B \log \text{vol}$, where H , L are measured in m and volume is measured in m^3 . In all cases there is no lineal dependence between residuals and both log volume and predicted $\log(H/L)$.

Tra le classi di frana individuate da Corominas (1996), il caso in esame rientra tra le frane non ostruite (*unobstructed*). La massa instabile individuata è infatti posta sulla sommità di un versante caratterizzato da pendenza elevata e all'incirca costante. In tale classe Corominas ha infatti posto eventi nei quali la massa in frana impatta contro il versante opposto dopo aver raggiunto il fondovalle oppure il moto è rallentato da boschi fitti.

Noti i parametri della regressione stimati da Corominas (1996), l'intervallo di confidenza con un fissato livello di probabilità $1-p$ di non superamento (intervallo di confidenza sinistro) è dato da:

$$\log H/L = A + B \log V + \sigma z_p \quad \text{con} \quad 1-p = \int_{-\infty}^{z_p} N(0,1) \quad 7.3$$

Si ottengono quindi i valori riportati nella *Tabella 2*.

Tabella 2 - Angolo di attrito in funzione della probabilità $1-p$ di non superamento.

Probabilità, p	H/L	Angolo di attrito, ϕ
(%)	(-)	(°)
50%	0.570	29.66
84%	0.481	25.71
90%	0.459	24.66
95%	0.432	23.36
99%	0.385	21.07

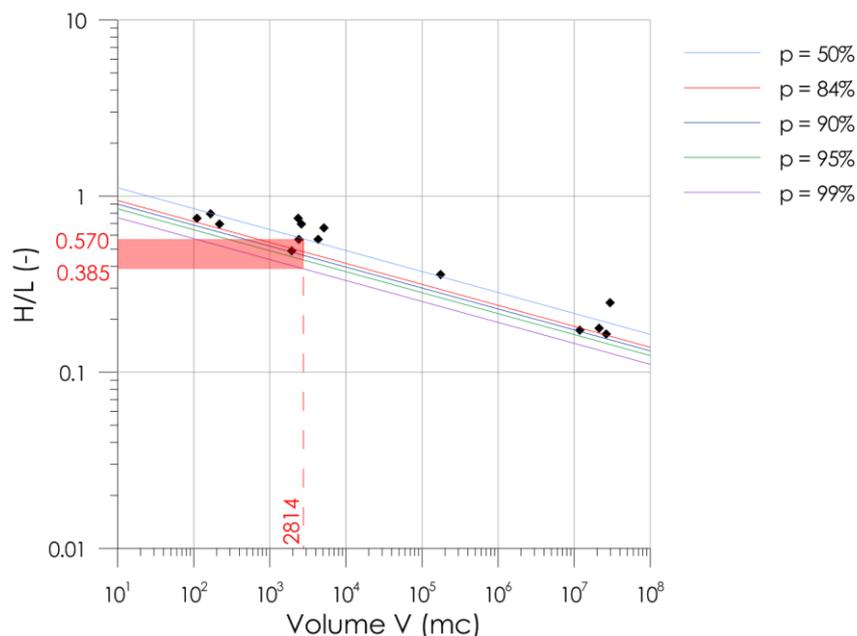


Figura 115 - Diagramma dei dati degli eventi storici impiegati per la definizione dei valori più rappresentativi dell'angolo d'attrito apparente (dati sperimentali da Corominas, 1996) e regressioni con un fissato livello $1-p$ di non superamento.

L'approccio sopra descritto per la definizione dei parametri del moto è stato utilizzato recentemente con successo dagli scriventi in un caso analogo a quello in oggetto (frana di Gallivaggio, comune di San Giacomo

Filippo SO). In quel caso si aveva una parete subverticale alta 400 m soggetta al fenomeno di crollo di massi. Alla sommità della parete il monitoraggio aveva evidenziato un volume instabile di circa 4000/5000 m³, del quale era stato analizzato il possibile moto nel caso di crollo in massa, dal quale erano state definite delle possibili aree di invasione. Successivamente allo studio effettuato si è verificato il crollo di tale volume ed è quindi stato possibile confrontare i limiti di espansione della massa in frana con quelli previsti dalle analisi. Si è notata un'ottima corrispondenza tra le aree previste e quelle effettivamente interessate dal crollo.

7.4 RISULTATI

Come già anticipato in precedenza sono state condotte due diversi tipi di analisi, che differiscono per il punto iniziale. Nel primo gruppo di analisi ("impatto alto") si ipotizza che il volume roccioso si disgreghi immediatamente dopo il distacco dalla cima del Monte Pizzo, nel pianoro a valle della parete stessa. Nel secondo gruppo di analisi ("impatto basso") si ipotizza invece che il volume roccioso si disgreghi al di sotto della parte inferiore.

Nella Figura 116 sono riportati gli spessori finali e l'area di invasione per le analisi eseguite con una resistenza basale calcolata con una probabilità del 50% (valore medio). Si nota come le aree interessate dal transito della massa in frana nel versante ovest sono pressoché sovrapponibili. Le differenze tra le due analisi risiedono nello spessore finale dell'accumulo che si ha nel fondovalle, maggiore nel caso dell'analisi in cui si considera come punto iniziale quello possibile del secondo impatto.

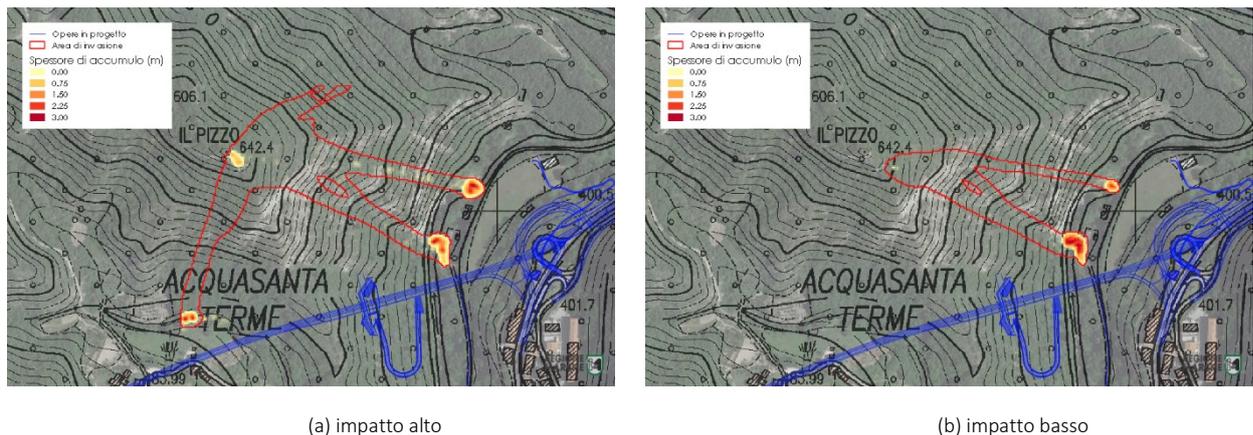
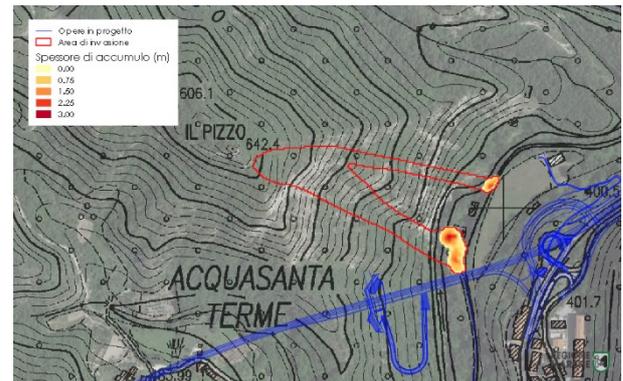


Figura 116 - Limiti di espansione del deposito determinato con il valor medio dell'angolo di attrito apparente secondo Corominas (1996).

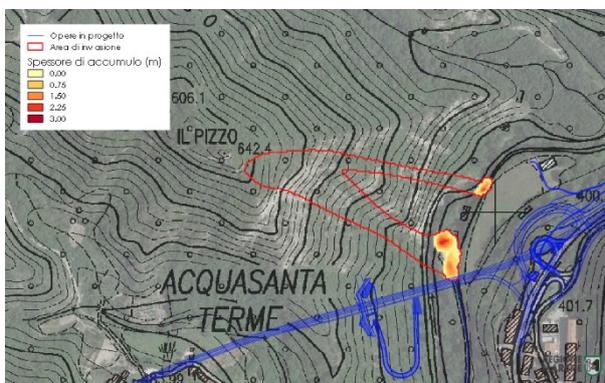
Nella Figura 117 sono riportati gli spessori finali e l'area di invasione per le analisi in cui si considera come punto iniziale quello possibile del secondo impatto. Al diminuire dell'angolo di attrito, ovvero al diminuire della probabilità di non superamento, aumenta l'area occupata dal deposito di frana. Le opere in progetto sono parzialmente interessate dalla massa in frana, più precisamente il primo tratto della pista di cantiere che raggiunge l'imbocco della galleria lato Acquasanta.



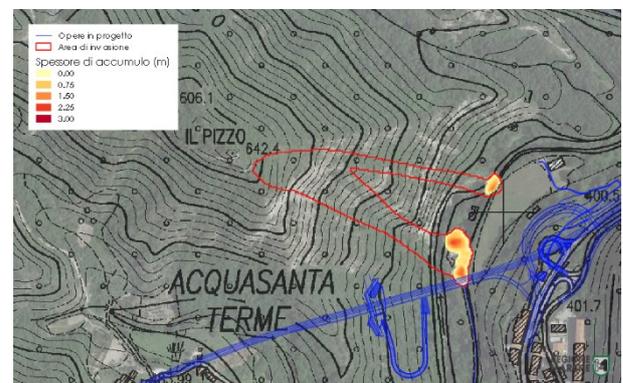
(a) $\phi=29.66$ (p=50%)



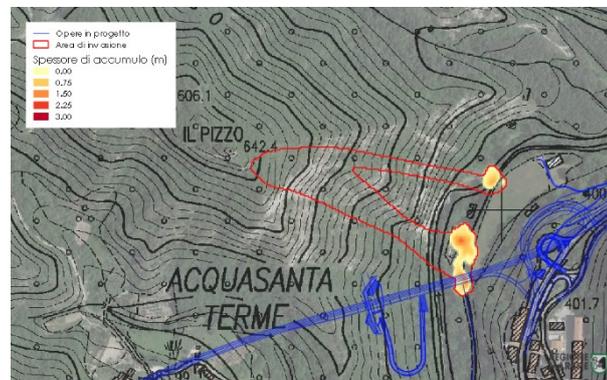
(b) $\phi=25.71$ (p=84%)



(c) $\phi=24.66$ (p=90%)



(d) $\phi=23.36$ (p=95%)



(e) $\phi=21.07$ (p=99%)

Figura 117 - Limiti di espansione del deposito determinato con diversi valori dell'angolo di attrito apparente nelle analisi in cui si considera come punto iniziale quello possibile dell'impatto basso.

Come detto in precedenza le analisi effettuate in questo paragrafo sono state eseguite per valutare se le opere in progetto sono esposte alla frana che si potrebbe sviluppare a seguito del distacco del volume posto sulla cima del Monte Pizzo in occasione di eventi sismici. In queste prime analisi è stato individuato, sulla base della morfologia, un possibile volume instabile di circa 3000 m³. Qualitativamente, osservando la sezione del versante, una possibile dinamica prevede che il volume individuato dopo una prima fase di volo impatta sul piano posto alla base della parete posta sulla cima del Monte Pizzo ("impatto alto") oppure sul versante che si sviluppa alla base della parete posta sotto il piano ("impatto basso"). In ognuno dei due casi

si tratta di un impatto con alta energia data la massa elevata. La letteratura riporta che negli impatti con energie elevate, frequentemente il volume crollato si frantuma, con un comportamento esplosivo, in diversi volumi minori. Questi volumi sono caratterizzati da un'elevata energia, maggiore di quella del masso originario, che ne aumenta la mobilità. In tale situazione non è quindi sempre accettabile usare una relazione come quella di Corominas (1996) per descrivere il fenomeno. Per questo motivo si ritiene che le analisi più rappresentative siano quelle con la mobilità maggiore, come quelle con una probabilità di non superamento maggiore del 90%.

8 INTERVENTI DI PROGETTO

In larga prevalenza gli interventi consisteranno nella realizzazione di barriere paramassi i cui requisiti minimi sono stati determinati mediante analisi traiettografiche di blocchi singoli.

Sulla base di tali analisi, in corrispondenza degli elementi da proteggere sono state previste barriere di classe 5, 6 ed 8 (norma EOTA), con energie di impatto (MEL) rispettivamente dell'ordine di 2 000, 3 000 e 5 000 kJ.

L'ubicazione delle opere di difesa passiva è stata valutata in modo da avere altezze d'intercettazione, comprensive dei relativi franchi di sicurezza, non superiori a 5,00 m.

Trattandosi di opere con certificazione di crash-test eseguiti in vera grandezza, le barriere sono disponibili con altezze standard.

La seguente tabella riassume, per ciascun settore, le caratteristiche delle barriere paramassi di progetto.

Tabella 1 - Barriere paramassi

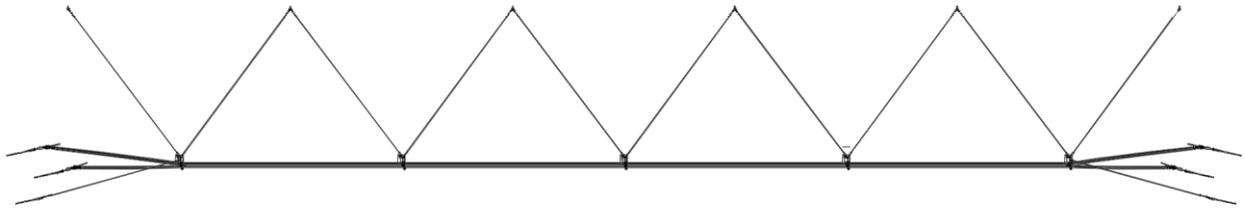
Settore	Barriera	E [kJ]	L [m]	H [m]
Ovest	B.SO-1	3000	80.00	4.00
	B.SO-2	5000	80.00	5.00
	B.SO-3	5000	60.00	5.00
	B.SO-4	3000	60.00	4.00
	B.SO-5	5000	40.00	5.00
	B.SO-6	5000	40.00	5.00
	B.SO-7	5000	50.00	5.00
	B.SO-8	5000	80.00	5.00
	B.SO-9	5000	40.00	5.00
	B.SO-10	2000	30.00	3.00
Centrale	B.SC-1	2000	60.00	3.00
	B.SC-2	2000	80.00	4.00
Est	B.SE-1	2000	80.00	3.00
	B.SE-2	2000	80.00	3.00
	B.SE-3	2000	40.00	3.00
	B.SE-4	5000	50.00	5.00
	B.SE-5	5000	80.00	5.00

Data la tipologia dei terreni e le caratteristiche delle barriere, sono stati previsti ancoraggi in fune di lunghezza media pari a 6.00m per le barriere di classe 5 e 6 e di lunghezza pari a 8.00m per le barriere di classe 8.

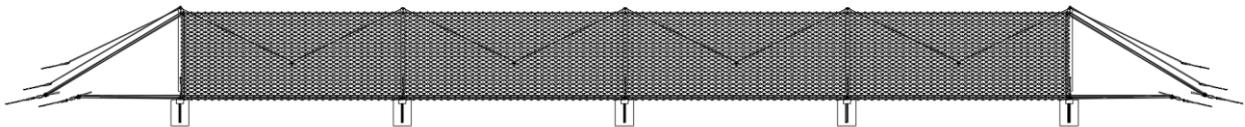
Gli ancoraggi dei montanti per barriere di classe 5 e 6 sono sempre 2 barre piene, rispettivamente phi 28 e phi 32 GEWI (lunghezza 6.00m), per ciascun montante; con riferimento alle barriere di classe 8 sono 2 barre piene phi 32 GEWI (lunghezza 6.00m) per i montanti centrali, 3 barre piene phi 32 GEWI (lunghezza 6.00m) per i montanti laterali.

Ove già presenti barriere di "vecchia" generazione (i.e. non certificate o comunque di età precedente le attuali normative di settore) queste dovranno venire smontate e sostituite da strutture conformi alla Norma ETAG 027.

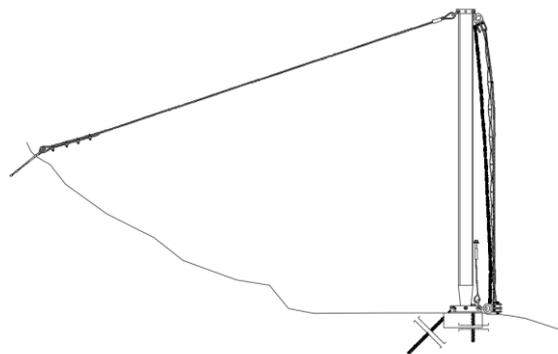
PLANIMETRIA



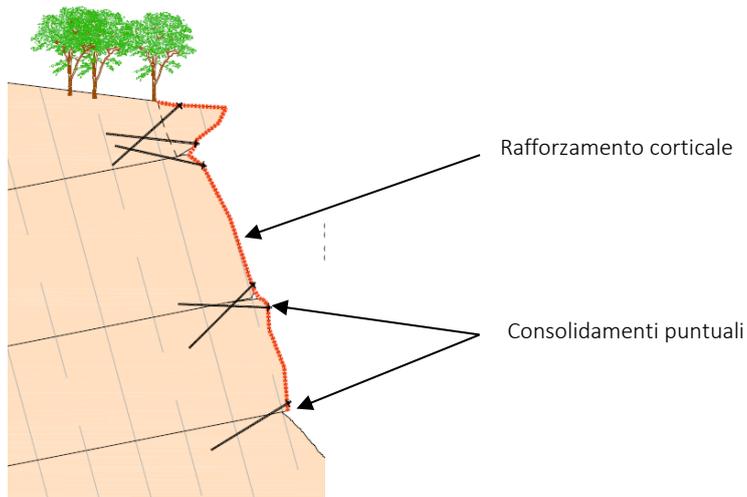
PROSPETTO



SEZIONE



Dove non possibile, per mancanza di spazio o per il possibile crollo di volumi multipli, sarà necessario intervenire mediante tecniche di rafforzamento corticale, se non di vero e proprio consolidamento puntuale con barre d'acciaio, previa pulizia e disagggio dei volumi già pericolanti



Con specifico riferimento a "Il Pizzo", le valutazioni effettuate suggeriscono che eventuali crolli in massa dalla sommità del rilievo, anche in occasione di eventi sismici, non interferiscano con i tratti scoperti o con le aree di cantiere, e per questo motivo gli interventi previsti sono volti al contenimento di soli fenomeni di crollo isolati.

Ulteriori approfondimenti circa la topografia e le geometrie che determinano lo scenario di riferimento di un eventuale crollo in massa de "Il Pizzo" dovranno essere approfondite in fase di progetto esecutivo.