

**NOUVELLE LIGNE LYON TURIN – NUOVA LINEA TORINO LIONE
PARTIE COMMUNE FRANCO-ITALIENNE – PARTE COMUNE ITALO-FRANCESE**

**REVISION DE L'AVANT-PROJET DE REFERENCE– REVISIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO
CUP C11J05000030001**

APPROFONDIMENTI PROGETTUALI

**APPROFONDIMENTI PER OSSERVAZIONI REGIONE PIEMONTE
Riscontro Osservazione n. 13 (rif. lettera prot. n. CTVA-2014-0812 del 06/03/2014)**

**ETUDE CONCERNANT LE RISQUE DE CHUTE DE BLOCS – STUDIO RELATIVO ALLA PERICOLOSITA'
PER CADUTA MASSI**

Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérifié par / Controllato da	Autorisé par / Autorizzato da
0	06/06/2014	Première diffusion / Prima emissione	L. BARBERIS (MUSINET)	C. GIOVANNETTI (MUSINET)	M.BERTI (SITAF)
A	09/06/2014	Passage au statut AP/Passaggio allo stato AP	L. BARBERIS (MUSINET)	C. GIOVANNETTI (MUSINET)	M.BERTI (SITAF)
B					

CODE DOC	P	D	2	C	3	A	M	U	S	0	9	0	9	A
	Phase / Fase			Sigle étude / Sigla			Émetteur / Emittente			Numero			Indice	

A	P	N	O	T
Statut / Stato		Type / Tipo		

ADRESSE GED INDIRIZZO GED	C3A	//	//	33	49	91	10	24
------------------------------	-----	----	----	----	----	----	----	----

ECHELLE / SCALA

SOMMAIRE / INDICE

.....	
RESUME/RIASSUNTO	4
1. INTRODUZIONE	5
2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	5
3. GEOMORFOLOGIA DELL'AREA DI PROGETTO.....	6
3.1 Frana de La Maddalena	7
3.2 Caduta Massi	12
3.2.1 Risultanze dei sopralluoghi effettuati e descrizione dei luoghi	12
3.2.2 Aree di potenziale distacco	21
4. SIMULAZIONE NUMERICA DEI PROCESSI DI CADUTA MASSI	22
4.1 Metodo numerico.....	23
4.1.1 Parametri del blocco roccioso in caduta	23
4.1.2 Parametri del versante.....	24
4.2 Equazioni del moto	25
4.2.1 Masso in caduta libera e traiettoria da saltellamento	26
4.2.2 Masso in rotolamento o scivolamento	26
4.3 Analisi con metodi probabilistici - Metodo Montecarlo.....	27
4.4 Risultati delle simulazioni	28
4.4.1 Profilo 1	29
4.4.2 Profilo 2	30
4.4.3 Profilo 3 (distacco basso).....	31
4.4.4 Profilo 3 (distacco alto).....	31
4.5 Conclusioni	32

RESUME/RIASSUNTO

Texte en Français.

Ce rapport analyse et décrit le contexte géomorphologique du versant et le phénomène de glissement de terrain pour chutes de blocs insistante sur le secteur de la Val Clarea où sont situés les chantiers du tunnel de LTF de La Maddalena et le futur site de chantier pour la réalisation de l'échangeur de Chiomonte. Ce rapport, à la suite des demandes de intégration de la Regione Piemonte, vise à actualiser et implémenter l'étude concernant le risque de chute de blocs réalisé pendant la phase de conception définitive de l'échangeur, grâce à la réalisation de trois nouvelles sections de simulation à l'aide du logiciel Masco v.2.

Testo in Italiano.

Questo rapporto analizza e descrive il contesto geomorfologico del versante ed il fenomeno della frana per caduta massi insistente sull'area della Val Clarea dove sono localizzati i cantieri LTF del tunnel della Maddalena ed il futuro cantiere operante per la realizzazione dello svincolo di Chiomonte. Tale relazione, a seguito delle richieste di integrazione della Regione Piemonte, ha lo scopo di aggiornare e implementare lo studio relativo alla pericolosità per caduta massi realizzato in fase di Progettazione Definitiva dello svincolo, tramite la realizzazione di tre nuove sezioni di simulazione mediante il software Masco v.2.

1. Introduzione

Il presente rapporto è stato redatto a seguito delle richieste di integrazione fatte dalla Regione Piemonte al progetto definitivo dello Svincolo de La Maddalena sulla A32. In particolare tale documento è stato realizzato per ottemperare alla richieste presenti al punto n° 13 dell'allegato 1 alla nota prot.3727/DB 12.06, ovvero:

Si richiede di aggiornare e implementare lo studio relativo alla pericolosità per caduta massi in relazione alla cosiddetta “Frana della Maddalena” con metodi alternativi di valutazione considerando anche altre possibili sezioni (o effettuando calcoli in tridimensionale), e di valutare le condizioni di pericolosità e rischio dell'area in modo complessivo tenendo conto di tutte le opere e i cantieri nel loro insieme. Si richiede inoltre di evidenziare più scenari di opere di difesa valutando possibili alternative, considerando anche l'esigenza di offrire maggiori tutele anche in fase di cantiere e per la totalità dell'area, valutando più posizionamenti delle opere di difesa passive.

Questo rapporto pertanto analizza e descrive il contesto geomorfologico del versante ed i fenomeni di caduta massi potenzialmente interferenti sull'area della Val Clarea dove sono localizzati i cantieri LTF del tunnel della Maddalena ed il futuro cantiere operante per la realizzazione dello svincolo stesso.

Il fenomeno è stato ricostruito durante le seguenti fasi operative:

- ricerca bibliografica di tutti i dati disponibili sulle aree interessate dal progetto, mirata ad acquisire i dati più recenti relativi all'area indagata (in particolare i dati del monitoraggio Musinet esistente);
- rilevamento geologico, geomorfologico di dettaglio;

2. Inquadramento geografico

L'area di progetto si trova in provincia di Torino circa 50 km a Ovest del capoluogo piemontese e più precisamente fa parte della alta Valle di Susa all'interno del territorio del Comune di Chiomonte (TO).

L'ipotesi in progetto sarà realizzata totalmente in viadotto e occuperà parte dell'area depressa ove è stato realizzato il viadotto sul torrente Clarea dell'esistente autostrada A32 Torino-Bardonecchia.

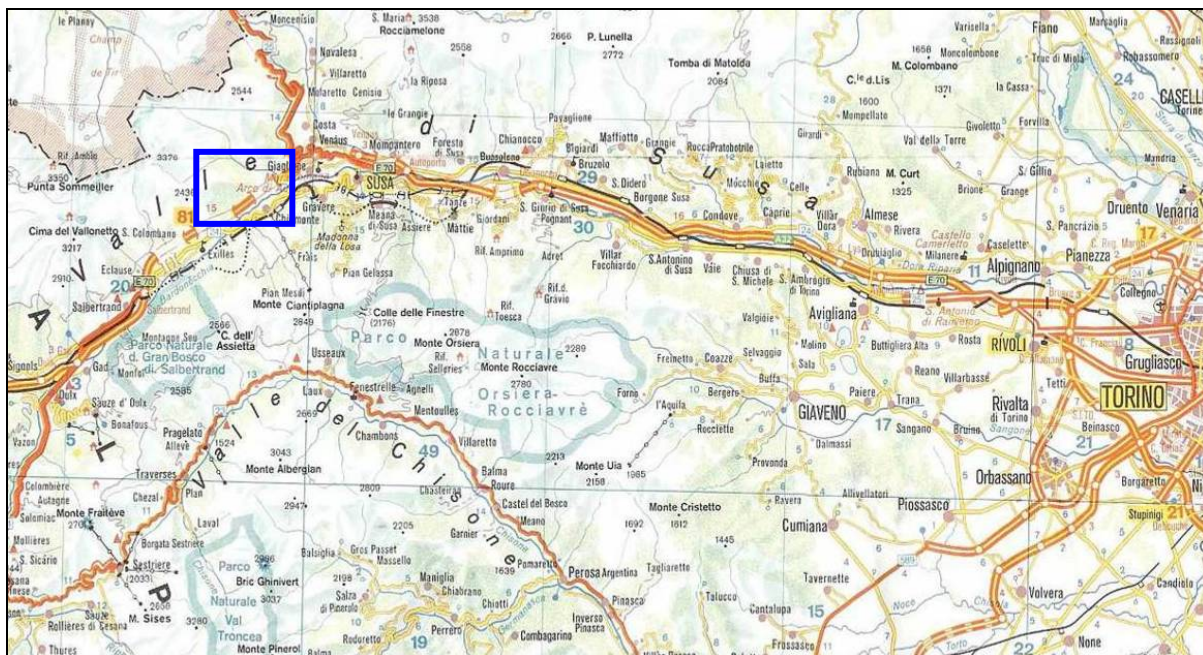


Fig. 1 – Inquadratura geografica dell'area di Progetto.

3. Geomorfologia dell'area di progetto

I tratti distintivi della geomorfologia del settore sono definiti dall'incisione glaciale della Val Clarea, più bassa rispetto alla soglia glaciale di Graverè, dalle "Gorge di Susa", dall'area calanchiva che interessa il versante sinistro della val Clarea e dalla frana della Maddalena dove sono stati rinvenuti resti di un insediamento tardoneolitico (**Fig. 2**).

I principali tratti distintivi della geomorfologia del settore sono riportati nella Carta geologica-geomorfologica (PD2-C3A-MUS-0904-A-AP-PLA).



Fig. 2 – Vista panoramica dell'area di studio.

3.1 Frana de La Maddalena

La frana de “La Maddalena” ha una forma all'incirca triangolare con un'area di circa 3 km² ed è individuabile da due scarpate principali di altezza decametrica (**Fig. 3**). La prima forma una sorta di “V” rovesciata con la punta situata poco sotto la località Cappella Bianca, presso la zona di cresta che separa la Valle Susa dalla Val Clarea. La seconda è posta più in basso (quota media di circa 1150 m) ed ha un andamento più articolato; il ciglio è caratterizzato dalla presenza di megablocchi sui quali è presente un sistema di monitoraggio (**Fig. 7**). Il corpo di frana è costituito da un ammasso roccioso disarticolato, presente in modo discontinuo lungo la seconda nicchia e presso il piede della frana e da detrito, spesso a grossi blocchi (volume > di 100 m³). Il piede della frana è costituito da un deposito a grossi blocchi, con volumetrie che raggiungono anche il migliaio di m³, che ricoprono una superficie terrazzata preesistente.



Fig. 3 – Dettaglio del versante in frana. In rosso il coronamento schematico della nicchia principale e di quella secondaria (punto di ripresa: Chiomonte, loc. Custunet)

Nel corpo della frana sono riconoscibili almeno tre giunti principali (*master joint*), immergenti verso N100-110°E ed inclinati di circa 50° e disposti a franapoggio più inclinato del pendio che la suddividono in tre corpi geometricamente sovrapposti il cui grado di fratturazione e disarticolazione diminuisce da quello più alto verso quello più basso. Lo stato di fratturazione dei due corpi più profondi non è molto spinto ed è desunto sulla base di pochi affioramenti, spesso non facilmente accessibili.

Il corpo più alto è costituito da un ammasso roccioso fratturato e disarticolato, spesso con formazione di grossi blocchi e da estesi campi di detrito. Anche l'entità della dislocazione diminuisce dal corpo più alto ai due inferiori. Nel corpo alto l'entità della dislocazione è stimata in circa 40 – 50 m e corrisponde all'ampiezza del *trench*, con riempimento detritico, profondo una ventina di metri (Carraro, 1987) e lungo 120 m circa, posto a quota 1145 m. L'entità della dislocazione nei corpi rocciosi inferiori è valutata intorno a 10-20 m e corrisponde all'incirca all'altezza delle scarpate in roccia nella zona di nicchia (1150 m).

L'assetto del versante rispetto alla famiglia di discontinuità dominante (*master joint*) è di tipo cataclinale sotto inclinato e quindi il movimento non è cinematicamente possibile in quanto i due corpi rocciosi geometricamente inferiori appaiono confinati al piede. Possibili meccanismi in grado di indurre un movimento sono legati:

- a fenomeni di dissoluzione o di “compattazione” del livello verticalizzato di “carniole” posto alla base del pendio
- al detensionamento post-glaciale
- alla presunta presenza alla base di piani di rottura disposti a franapoggio.

Fenomeni di dissoluzione si osservano nei pressi della centrale IREN (ex AEM) di Chiomonte e sono evidenziati da una serie di doline con diametro pluridecametrico. Il livello

di carnioli è costituito da brecce tettoniche di marmi con locali livelletti gessosi e da rocce carbonatiche vacuolari di origine secondaria, formatesi a seguito della precipitazione di carbonati (travertini).

Fenomeni di fratturazione e movimenti legati al detensionamento post-glaciale sono stati frequentemente ipotizzati in letteratura. Nella fattispecie non si escludono meccanismi più complessi causati dalla maggiore persistenza del ghiacciaio vallivo del Clarea rispetto a quello della val Susa, fenomeno che potrebbe aver causato un detensionamento asimmetrico e sfasato nel tempo. Per quanto riguarda invece la presunta presenza di piani a franapoggio meno inclinati del pendio e quindi in grado di svincolare al piede la massa rocciosa, si evidenzia che nell'area sono note strutture secondarie con la medesima giacitura.

L'entità della dislocazione dei due corpi inferiori appare congruente con le cause ipotizzate. Questo movimento (primo movimento) è avvenuto lungo le superfici dei giunti orientati NNE-SSW, ha provocato la disarticolazione dell'ammasso roccioso, specie, come già indicato, del corpo geometricamente superiore, a valle della nicchia principale (quota 1350 m circa). Lo stato di disarticolazione, talora molto spinto, ha innescato la formazione di ripetuti fenomeni di caduta massi e sporadiche frane di crollo che hanno formato il detrito di falda, organizzato in blandi conoidi e che hanno formato i depositi a grossi massi appoggiati al terrazzo glaciale su cui sorge il sito archeologico della Maddalena. Un fenomeno di dimensioni volumetriche maggiori (secondo movimento) ha presumibilmente creato la nicchia di frana posta a circa 1150 m.

La presenza di grossi massi in abbondante matrice fine testimonia che il primo episodio gravitativo si è presumibilmente verificato nel momento in cui si stava ultimando la sedimentazione dei depositi glaciali di fondovalle. La presenza di grossi massi con poca o scarsa matrice fine testimonia il secondo episodio gravitativo, molto probabilmente verificatosi antecedentemente al Neolitico medio (dal 4300 a.C.), come testimoniato dai rapporti di sovrapposizione dei livelli archeologici di età neolitica.

A parte questi due episodi principali la normale evoluzione della frana consiste in sporadici fenomeni di caduta massi, testimoniate da corridoi di transito e da segni di impatto, frane di crollo e da processi di origine colluviale. Il protrarsi di tali processi provoca la retrogressione della seconda nicchia di distacco specie quando è impostata in parte in colluvium.

Nell'area archeologica, la natura policronologica dei fenomeni di crollo e, soprattutto di quelli colluviali, è testimoniata dalla presenza di almeno due distinti livelli colluviali: quello inferiore, a grana più fine, ha conservato localmente le tracce della presenza antropica, mentre quello superiore, a grana maggiore e più eterometrico, presenta verso il tetto blocchi di frana e restituisce materiale archeologico rimaneggiato.

Per quanto concerne lo stato di attività della frana, ovvero se attualmente vi sono movimenti, si riportano i risultati della campagna di indagine condotta su copertura regionale tramite tecnologia radar-satellitare SqueeSAR™ realizzata da Arpa Piemonte nell'ambito del Progetto Transfrontaliero Risknat. Essi indicano che la zona del *trench* è affetta da movimenti verticali caratterizzati da velocità di circa 1-2 mm/anno. Nella restante area, maggiormente boscata, la tecnica non individua bersagli e non fornisce risultati.

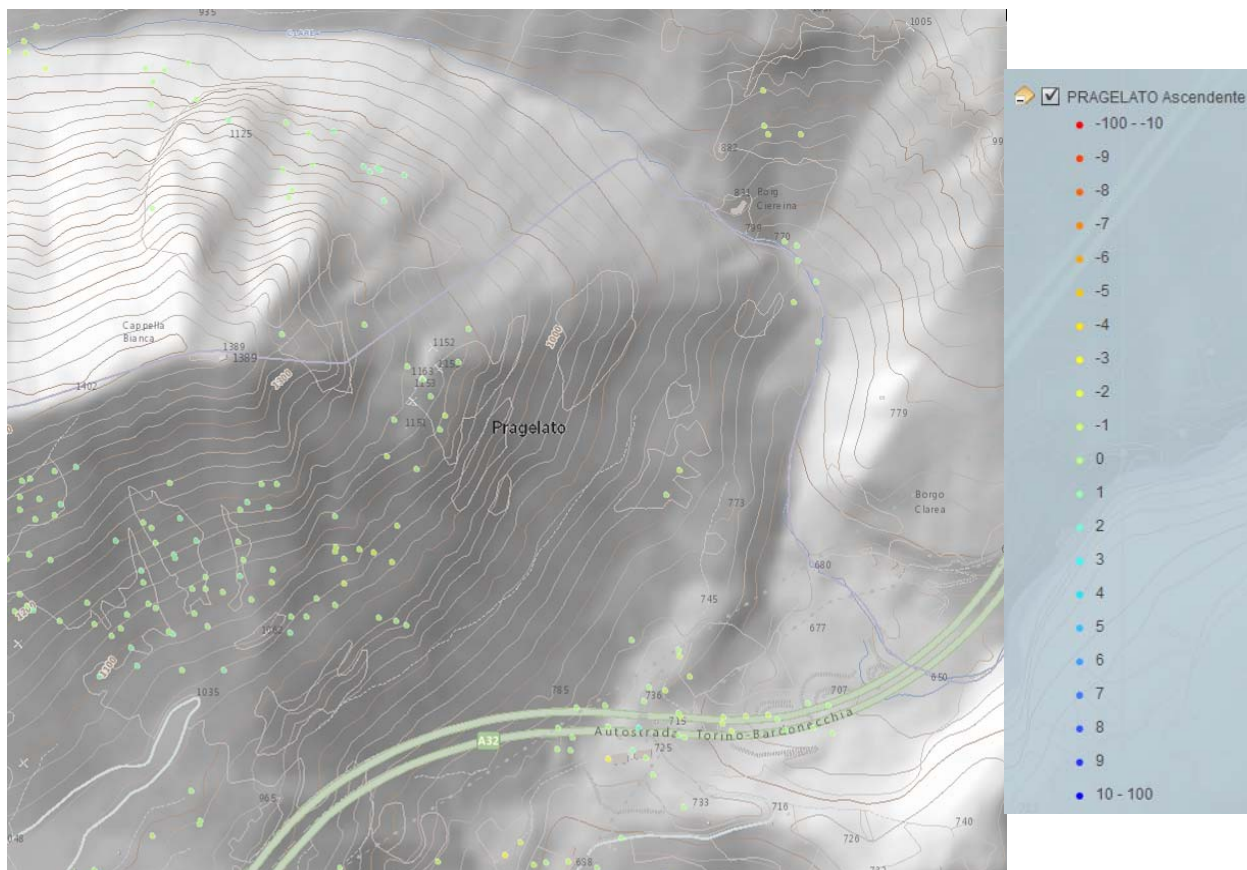


Fig. 4 – Analisi radar-satellitare SqueeSAR™ realizzata da Arpa Piemonte (sito web ARPA Piemonte). “Pragelato” si riferisce al nome del data set e non è un toponimo. Spostamenti in mm/anno.

Con riferimento alla classificazione proposta da Cruden & Varnes (1995), modificata da Amanti et al., (1996) e ripresa dal progetto IFFI, il fenomeno franoso della Maddalena è caratterizzato da:

- uno stato di attività “attivo”, almeno nella zona del trench, e quiescente nelle rimanenti parti;
- una distribuzione costante, ossia il materiale spostato continua a muoversi e la superficie di rottura non mostra variazioni apprezzabili;
- uno stile di attività complesso, ossia il fenomeno caratterizzato dalla combinazione di due tipi di movimento in sequenza temporale.

I fenomeni di crollo più recenti sono stati ampiamente e dettagliatamente descritti da Carraro (1987) e i principali massi potenzialmente interferenti con le opere autostradali (viadotti Clarea e gallerie Ramat) sono monitorati da Musinet Engineering dal 1997 circa. La zona di arresto principale dei massi e dei blocchi comprende soprattutto la superficie terrazzata. Solo alcuni massi hanno superato il ciglio della scarpata e si sono arrestati lungo il fondo della val Clarea. Per tale motivo sono state realizzate opere passive (rilevati paramassi) per la protezione dell’imbocco della galleria Ramat e delle pile dei due viadotti Clarea.

Nel complesso l’impianto, che controlla la stabilità di circa 40 blocchi ciclopici e di 5 affioramenti rocciosi, è costituito da 40 misuratori di giunti (per il controllo della variazione lineare della distanza tra due punti incernierati al trasduttore di spostamento), 30 clinometri (atti alla verifica della deviazione angolare di elementi solidali al sensore), 5 estensimetri a

basi (il cui impiego permette il controllo dei fenomeni di detensionamento che può interessare le porzioni superficiali di placche lapidee strapiombanti parzialmente collegate al substrato) e 10 termometri (**Fig. 7**).

Sono monitorati massi ciclopici movimentabili per:

- crollo da ammassi rocciosi disarticolate e fratturati (**Fig. 5**)
- per scalzamento al piede di massi appoggiati su depositi detritici (**Fig. 6**)

Il monitoraggio, protrattosi a partire dagli anni '90, evidenzia l'assenza di movimenti.



Fig. 5 – Esempio di massi potenzialmente instabili per fenomeni di crollo.



Fig. 6 – Esempio di massa ciclopica “appoggiato al terreno”.

3.2 Caduta Massi

A seguito delle richieste di integrazione effettuate dalla Regione Piemonte (allegato 1 alla nota prot.3727/DB 12.06, punto 13 in particolare) è stata realizzata una ulteriore campagna di rilievi di terreno mirata all’approfondimento dell’ubicazione e caratterizzazione delle aree di potenziale distacco.

3.2.1 Risultanze dei sopralluoghi effettuati e descrizione dei luoghi

In riferimento alle tipologie di movimentazione dei massi (per crollo e per scalzamento al piede) il sopralluogo di terreno ha evidenziato che:

1) lungo la nicchia superiore non si notano particolari situazioni dissettive eccetto una nicchia di crollo con probabile tendenza retrogressiva;

2) tra la prima e la seconda nicchia si osserva la presenza di un accumulo detritico a megablocchi che appare stabile;

3) massi e blocchi ciclopici potenzialmente movimentabili per fenomeni di crollo sono localizzati in corrispondenza della seconda nicchia. I massi a maggiore criticità sono già monitorati con tilmetri e con fessurimetri (**Fig. 7**). In tale zona sono stati osservati alcuni settori con massi instabili in quanto visibilmente ruotati e dislocati dalla loro posizione originaria (**Fig. 8**) e tracce di passaggio di massi (**Fig. 9** e **Fig. 10**)

4) a valle della seconda nicchia i massi ciclopici sono appoggiati su depositi detritici a pezzatura più fine e quindi potenzialmente movimentabili per scalzamento al piede.

5) ancora più a valle all'incirca in corrispondenza di reti paramassi non sono state osservate particolari situazioni critiche. Tali reti paramassi, poste in più ordini disposti a quinconce, sono state posizionate negli anni '90 a protezione del sito archeologico della Maddalena. Il sopralluogo ha evidenziato la presenza di almeno 8 ordini di barriere paramassi. Si tratta di barriere con pannelli di rete in fune di acciaio (maglia 20x20 cm) sostenute da montanti (profilati a "doppia T", 240x240 mm), con interasse di circa 8 m ed altezza di circa 6-7 m ancorati al terreno con quattro barre ($\phi = 32$ mm), funi di trattenuta munite di freni, funi di controvento e ancoraggi di fondazione. Tali barriere sono posizionate lungo il versante tra circa 800 e 900 m di quota (**Fig. 11**, **Fig. 12**). Non è stato possibile reperire le schede tecniche delle barriere riportanti la loro capacità di assorbimento di energia; sulla base delle caratteristiche osservate durante i rilievi di terreno quest'ultima potrebbe essere stimata tra 2000 e 3000 kJ.

6) a monte dell'imbocco delle gallerie "Ramats" dell'Autostrada A32 è presente un vallo paramassi in terre rinforzate (altezza di circa 4-6) sul quale è stata posizionata una barriera in rete paramassi con un'altezza di circa 3 m (**Fig. 13**). I massi ciclopici presenti nel ripiano retrostante il vallo hanno le volumetrie comprese tra circa 8 e 2619 m³ (Carraro, 1987) con le classi seguenti di frequenza:

- volumi inferiori ai 100 m³: circa il 40%;
- volumi tra 100 e 200 m³: circa il 17%;
- volumi tra 200 e 300 m³: circa il 17%;
- volumi superiori a 300 m³: circa il 26%;

7) immediatamente a monte dell'imbocco del tunnel della Maddalena, attualmente in fase di scavo, è stata realizzata una barriera di reti paramassi (**Fig. 14**).

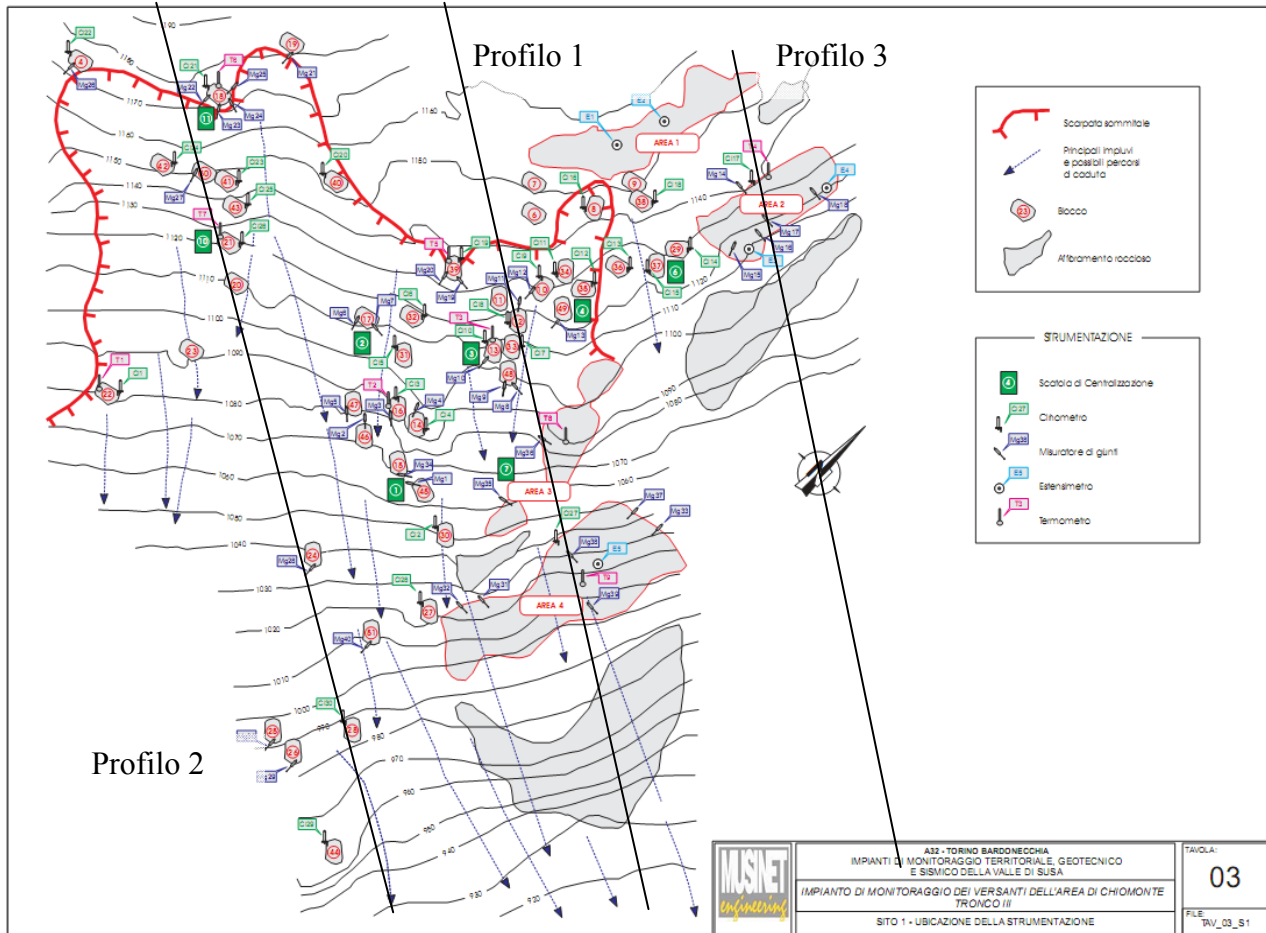


Fig. 7 – Ubicazione dei massi monitorati e tipologia della strumentazione. Sono indicati i profili utilizzati per la simulazione numerica di caduta massi.



Fig. 8 – Porzione di substrato disarticolato con massi instabili per crollo e ribaltamento.



Fig. 9 –Tracce di passaggio di caduta massi. A: probabile zona di distacco; B: tracce di impatto su roccia; C:impronta d' impatto su detrito. Volume stimato in circa 10 m³.



Fig. 10 –Tracce di passaggio di caduta massi: albero spezzato (A) all'altezza di circa 1 m.



Fig. 11 – immagine del versante in oggetto tratta da Google Earth con rappresentazione schematica (in rosso) delle barriere paramassi osservate durante i sopralluoghi.



Fig. 12 – Dettaglio delle barriere paramassi presenti lungo il versante



Fig. 13 – Dettaglio del rilevato paramassi e delle barriere in reti presenti a monte dell'imbocco della galleria Ramats.



Fig. 14 – Barriere in reti paramassi presenti a monte dell'imbocco della galleria del cunicolo della Maddalena.

3.2.2 Aree di potenziale distacco

Le aree di potenziale distacco sono state individuate lungo la porzione di versante compresa tra quota 900 m fino a quota 1150 m circa, nel settore in cui affiora il substrato cristallino, costituito principalmente da gneiss aplitici appartenenti al Massiccio d'Ambin. I rilevamenti di terreno hanno evidenziato che i massi ciclopici presenti lungo la seconda nicchia hanno volumetrie comparabili con quelle valutate da Carraro (1987) presso il piede (**Fig. 15**). Tale osservazione è congruente con lo scarso grado di fratturazione dei massi e permette di ipotizzare che durante il processo di caduta, non vi siano particolari processi di rottura.



Fig. 15 –Massi ciclopici presenti nel ripiano retrostante il vallo paramassi.

4. Simulazione numerica dei processi di caduta massi

Le simulazioni numeriche di caduta massi effettuate nel presente approfondimento differiscono rispetto a quella presente nel documento PD2-C3A-MUS-0902-A-AP-NOT per i seguenti aspetti:

- 1) È stata utilizzata come base topografica di partenza un rilievo molto dettagliato con isoipse ogni 2 m, prodotto per la fase di progettazione definitiva dello svincolo di Chiomonte, dal quale sono stati ricavati i profili topografici delle sezioni di simulazione. Queste ultime interessano il versante in oggetto per tutta la sua lunghezza e attraversano l'area sub-pianeggiante dei cantieri sino al cambio di pendenza rappresentato dallo spartiacque tra il torrente Clarea e la Dora Riparia. Per la simulazione realizzata in fase di progettazione definitiva era stata invece utilizzata la Carta Tecnica Provinciale in scala 1:5.000. L'utilizzo di una base topografica più dettagliata ha permesso di ricavare delle sezioni di simulazione lungo il versante caratterizzate da un profilo topografico molto vicino al profilo reale, permettendo di tener conto nei calcoli anche dei cambiamenti di pendenza meno significativi. La topografia più accurata modifica in modo sensibile i risultati in quanto il modello è molto sensibile ai cambiamenti di pendenza.
- 2) Sono state effettuate 1000 simulazione anziché 500 per rendere statisticamente più robusti i risultati.

- 3) Lo studio inoltre è stato realizzato, a favore di sicurezza, senza tener conto della presenza dei differenti ordini di barriere paramassi osservati lungo il versante (**Fig. 11**).
- 4) I parametri che definiscono il rimbalzo e il rotolamento del masso lungo il pendio sono stati stimati mediante una simulazione di *back-analysis* tenendo conto che:
 - a. sono state ipotizzate traiettorie abbastanza tese per evitare rimbalzi a campana di altezza eccessivamente elevata,
 - b. i rari indizi di impatti sui tronchi degli alberi sono posti alla base dei tronchi e testimoniano moti di rotolamento prevalente con locali rimbalzi di altezza pari a 1-2 metri,
 - c. per la valutazione del coefficiente di rotolamento non sono stati considerati i massi ciclopici presenti lungo il versante, specie nella parte alta e bassa del versante. Questa assunzione, a favore di sicurezza, provoca una distanza di arresto maggiore in quanto il moto dei blocchi non è influenzato dagli impatti con i massi ciclopici. Tale cautela vale soprattutto per i massi di piccola dimensione.
- 5) I punti di distacco sono posti ad una altezza di circa 10-20 m rispetto alla topografia. Ciò comporta, cautelativamente, che i blocchi raggiungono il pendio con una considerevole energia che intende simulare il distacco di massi dalla sommità della nicchia secondaria.

4.1 Metodo numerico

Per caduta massi s'intende il fenomeno di distacco e di successivo movimento verso valle di blocchi che mettono in gioco un'energia cinetica assorbibile dalle normali opere di difesa di tipo passivo - barriere e terrapieni paramassi, ecc.

La presenza di giunti di una certa persistenza, la loro intersezione ed orientazione secondo la direzione del versante, nonché i considerevoli valori delle aperture (nella maggior parte dei casi si tratta di fratture beanti) che caratterizzano i sistemi principali, possono isolare porzioni rocciose instabili, o in equilibrio precario, potenzialmente mobilizzabili secondo movimenti di scivolamento planare e ribaltamento e di scalzamento al piede.

La simulazione numerica del fenomeno di caduta massi ha lo scopo di permettere la costruzione di un modello che consente di prevedere il comportamento cinematico di singoli blocchi rocciosi distaccatisi dal versante.

Nel modello il moto è supposto bidimensionale lungo il piano x e z e con il pendio discretizzato in una serie di segmenti retti. Il masso è supposto puntiforme, considerando solo il moto del suo baricentro.

Il modello richiede la determinazione di parametri caratterizzanti il blocco in caduta e il versante.

4.1.1 Parametri del blocco roccioso in caduta

- Volume del masso: unitario, pari a 1 m^3 ;
- Peso di volume apparente del blocco: 28 kN/m^3 ;

4.1.2 Parametri del versante

Ad ogni singolo tratto di pendio sono associati i parametri necessari per il calcolo dell'interazione massa-versante.

a) Coefficiente di restituzione (E)

È definito come il rapporto fra la velocità prima e dopo ($V1 / V0$ dove $V1$ è la velocità dopo l'urto, $V0$ prima dell'urto) l'impatto del masso con il terreno; tale coefficiente risulta:

- uguale a zero nel caso di un urto completamente anelastico (tutta l'energia cinetica del blocco impattante viene dissipata sotto forma di calore e la velocità del masso dopo l'urto è uguale a zero);
- uguale a uno nel caso di urto completamente elastico (tutta l'energia cinetica viene conservata ed il masso avrà una velocità dopo l'impatto uguale a quella precedente l'urto, cioè $V1=V0$);
- compreso fra 0 e 1 nel caso di urto parzialmente elastico (parte dell'energia cinetica viene conservata e parte dissipata sotto forma di calore; la velocità del masso sarà data da $V1= E \cdot V0$);

Il valore di E è legato principalmente alla litologia ed alla morfologia del versante. Diversi Autori hanno proposto valori medi da applicare a diverse tipologie di pendio. Tali valori sono sempre a controllare mediante *back-analysis* in quanto fortemente dipendenti dal sito di validazione e dall'applicativo utilizzato.

I valori utilizzati derivano da quelli proposti da Broili (1979) e Mazzalai, Vuillermin, (1995):

Tipo substrato	E
apice di conoide detritico	0,05 - 0,10
bosco con sottobosco sviluppato, prato	0,05 - 0,15
copertura detritica con vegetazione folta	0,10 - 0,15
copertura detritica con vegetazione rada	0,20 - 0,30
detrito eluviale di spessore ridotto	0,30 - 0,40
strutture rigide e strade	0,40 - 0,60
roccia affiorante fratturata	0,60 - 0,70
roccia affiorante integra	0,75 - 0,85

b) Angolo d'attrito massa-versante (φ)

Nei tratti di pendio in cui il masso si muove rotolando o scivolando, l'energia cinetica viene dissipata attraverso l'attrito che si sviluppa fra blocco e versante. Tali forze di attrito sono introdotte nel calcolo attraverso il parametro angolo d'attrito massa-versante. Nel caso di un blocco che rotola, φ generalmente possiede valori compresi fra 20° e 40° , con i valori inferiori corrispondenti ai tratti di pendio in roccia privi di scabrosità.

Cocco (1991) propone di considerare per la stima dell'angolo d'attrito terra-massa in fase di rotolamento tre componenti distinte legate rispettivamente alla natura del terreno, alla

copertura vegetale e alle asperità del terreno in relazione alle dimensioni del masso. Ogni componente fornisce un contributo, dalla cui somma si ottiene l'angolo d'attrito totale.

I valori dei parametri parziali sono riportati nelle seguenti tabelle:

Natura del terreno	Contributo parziale (°)
Roccia nuda	19,5
Detrito	21,0
Alluvioni	26,5
Morena	26,5

Copertura vegetale	Contributo parziale (°)
Terreno nudo	0,0
Prato	3,0
Arbusti	3,5
Frutteto	6,0
Bosco ceduo	4,5
Bosco d'alto fusto	8,5

Asperità del terreno	Contributo parziale (°)
Nessuna	0
Piccola	3
Media	7
Elevata	11

Il modello permette di ricavare E e Φ eseguendo una calibrazione in *back-analysis*; tali parametri sono risultati confrontabili con i valori dei medesimi parametri provenienti da dati di letteratura. I parametri utilizzati nelle simulazioni sono proposti dall'applicativo e sono riportati nella *Tabella 1*.

Tipo substrato	Coefficiente di restituzione E (-)	Angolo d'attrito masso-versante Φ (°)
Roccia affiorante integra	0.85	22
Detrito compatto con vegetazione (ceduo)	0.60	29
Terreno sciolto con vegetazione	0.20	39

Tabella 1 – Coefficienti di restituzione e angolo di attrito masso – terreno ricavati mediante back-analysis.

4.2 Equazioni del moto

Trascurando la resistenza dell'aria, le forze che condizionano il moto del masso in movimento lungo il versante sono la forza di gravità e l'attrito masso-pendio.

Vengono distinti nella simulazione numerica i tratti di versante in cui il moto avviene per caduta libera da quelli in cui avviene per rotolamento o scivolamento. I calcoli vengono eseguiti sulla base delle equazioni proposte da Piteau e Clayton (1977) e da Bassato et al. (1985).

4.2.1 *Masso in caduta libera e traiettoria da saltellamento*

Questo tipo di moto è dominante in pendii con inclinazione superiore ai 45° (Ritchie, 1963).

Il masso inizialmente si muove senza mantenere il contatto con il pendio. La velocità finale di caduta del masso, cioè quella posseduta immediatamente prima dell'impatto con il terreno, secondo le equazioni della meccanica, è data da:

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot d};$$

con

$g = 9.807 \text{ m/s}^2$ accelerazione di gravità

d = distanza percorsa in aria dal masso

In seguito all'urto con il terreno il blocco viene proiettato in avanti con una velocità data da:

$$V = \sqrt{(V_i \cdot \sin \beta)^2 \cdot E + (V_i \cdot \cos \beta)^2 \cdot (E \cdot 0.3^{\log E})}$$

con

V_i = velocità d'impatto

β = angolo d'incidenza della traiettoria del masso rispetto al versante;

E = coefficiente di restituzione dell'energia

Per quanto riguarda la determinazione dell'angolo di proiezione del blocco nel rimbalzo dopo l'impatto (angolo θ), l'esperienza dimostra che non è da ritenersi valida l'assunzione, spesso usata nelle simulazioni numeriche, che sia uguale all'angolo d'incidenza. Nella simulazione tale angolo è considerato come parametro variabile in maniera del tutto casuale fra l'orizzontale e la superficie topografica qualunque sia l'angolo d'incidenza (Paronuzzi, 1989) in quanto influenzati dalla presenza di piccole asperità od ostacoli nel terreno.

4.2.2 *Masso in rotolamento o scivolamento*

Questo tipo di moto è dominante in pendii con inclinazione inferiore ai 45° (Ritchie, 1963).

Il blocco, nel caso di rotolamento, si muove con un moto di rototraslazione lungo il pendio, attraverso una serie di piccoli rimbalzi o, nel caso di scivolamento, con un moto di traslazione pura, mantenendo il contatto con la superficie del pendio lungo una faccia, generalmente la più estesa arealmente.

La velocità finale del masso al termine del tratto di pendio considerato può essere valutata attraverso la relazione:

$$V = \sqrt{V_i^2 + (10/7) \cdot g \cdot s \cdot (\tan \alpha - \tan \varphi)}$$

nel caso di moto per rotolamento, o con la formula:

$$V = \sqrt{V_i^2 + 2 \cdot g \cdot s \cdot (\sin \alpha - \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \alpha)}$$

nel caso di moto per scivolamento,

con

V_i = velocità iniziale lungo il tratto di pendio considerato;

s = distanza percorsa dal masso lungo il tratto;

α = inclinazione del pendio;

φ = angolo d'attrito terra-masso.

Il passaggio da un moto di rotolamento ad uno di scivolamento, nel caso di un masso approssimato da un ellissoide triassiale, avviene quando è verificata la relazione:

$$E < \Delta H \cdot g \cdot m;$$

dove:

ΔH = differenza fra il semiasse maggiore a e quello minore c ($a-c$);

g = accelerazione di gravità;

m = massa del blocco;

$E = E = 0,5 \cdot m \cdot V^2 + 0,5 \cdot I \cdot \omega^2$, energia totale posseduta dal masso;

V = velocità del blocco;

I = momento d'inerzia del blocco, uguale a $(2/5) mR$ per un masso sferico;

ω = velocità angolare del blocco (velocità di rotazione del masso).

Nel caso di un blocco sferico $\Delta H = 0$, per cui il moto avverrà in pratica solo per rotolamento.

4.3 Analisi con metodi probabilistici - Metodo Montecarlo.

L'incertezza insita nella scelta delle grandezze da introdurre nella simulazione di caduta massi, ed in particolare nei parametri E (coef. di restituzione), φ (angolo d'attrito masso-versante), e V (volume del masso in caduta) consiglia un approccio di tipo probabilistico al problema.

Il metodo probabilistico generalmente utilizzato è quello Montecarlo.

Il metodo Montecarlo si basa sulla generazione di numeri casuali, scelti in determinati intervalli, che godano nel complesso di proprietà statistiche. Fra le varie applicazioni possibili di tali metodi, vi è quella detta "del campionamento" che consiste nel dedurre proprietà generali di un insieme grande, studiandone solo un sottoinsieme casuale, giudicato rappresentativo dell'insieme stesso. E' evidente che maggiori saranno le dimensioni del campione *random*, più rappresentative potranno essere considerate le proprietà dedotte.

Nel caso di applicazione del metodo alla simulazione di caduta massi, la procedura da seguire è la seguente:

- si genera la distribuzione delle variabili aleatorie E (coef. di restituzione), φ e V misurate in situ o stimate, supponendo che sia di tipo gaussiano (cioè rappresentate da una curva a campana, con il valore centrale corrispondente al valore medio);
- attraverso un generatore di numeri casuali, si crea una serie, estesa quanto si vuole, di valori numerici compresi fra 0 e 1;
- si associa ad ogni valore numerico casuale della serie un valore di E , φ e V , rispettando la curva di distribuzione delle probabilità di queste grandezze (facendo cioè in modo che la frequenza con cui un certo parametro viene chiamato nel calcolo sia uguale alla sua probabilità ricavata dalla curva gaussiana di probabilità del parametro stesso); in questo modo si trasforma la serie di numeri casuali generati nel punto precedente in una serie di valori di E , φ e V ;
- si esegue la simulazione per ogni terna di valori E , φ e V .

L'andamento delle traiettorie di caduta collegata ad ogni terna di E , φ e V consente di valutare l'influenza della dispersione dei valori di questi parametri sui percorsi di caduta.

Lo scarto quadratico assunto per il parametro E è di 0,1 mentre quello utilizzato per il parametro φ è stato di 2. Al volume non è stato applicato il metodo Montecarlo (scarto quadratico pari a zero).

4.4 Risultati delle simulazioni

Lo studio del fenomeno di caduta massi è stato condotto lungo tre sezioni significative simulando numericamente 1000 cadute per ognuna e facendo variare in modo statistico le caratteristiche del pendio e dei coefficienti di restituzione.

Lo studio permette di individuare:

- la massima distanza percorribile dal masso distaccato;
- la traiettoria più favorevole per la realizzazione delle opere di difesa;
- la massima energia d'impatto che dovrà essere dissipata dalla singola opera di difesa.

A tal fine il problema è stato analizzato in due fasi distinte:

Fase di rilievo in campagna dei dati relativi a distacchi avvenuti in passato e rilievo geomeccanico delle pareti rocciose, al fine di individuare i cinematismi e le volumetrie potenzialmente coinvolte;

Fase di simulazione numerica delle traiettorie e dei punti di arresto dei distacchi prevedibili lungo tre sezioni bidimensionali, utilizzando il programma MASCO 2.2 (Program Geo), al fine di verificare l'efficacia e l'efficienza delle opere passive (**Fig. 16**).

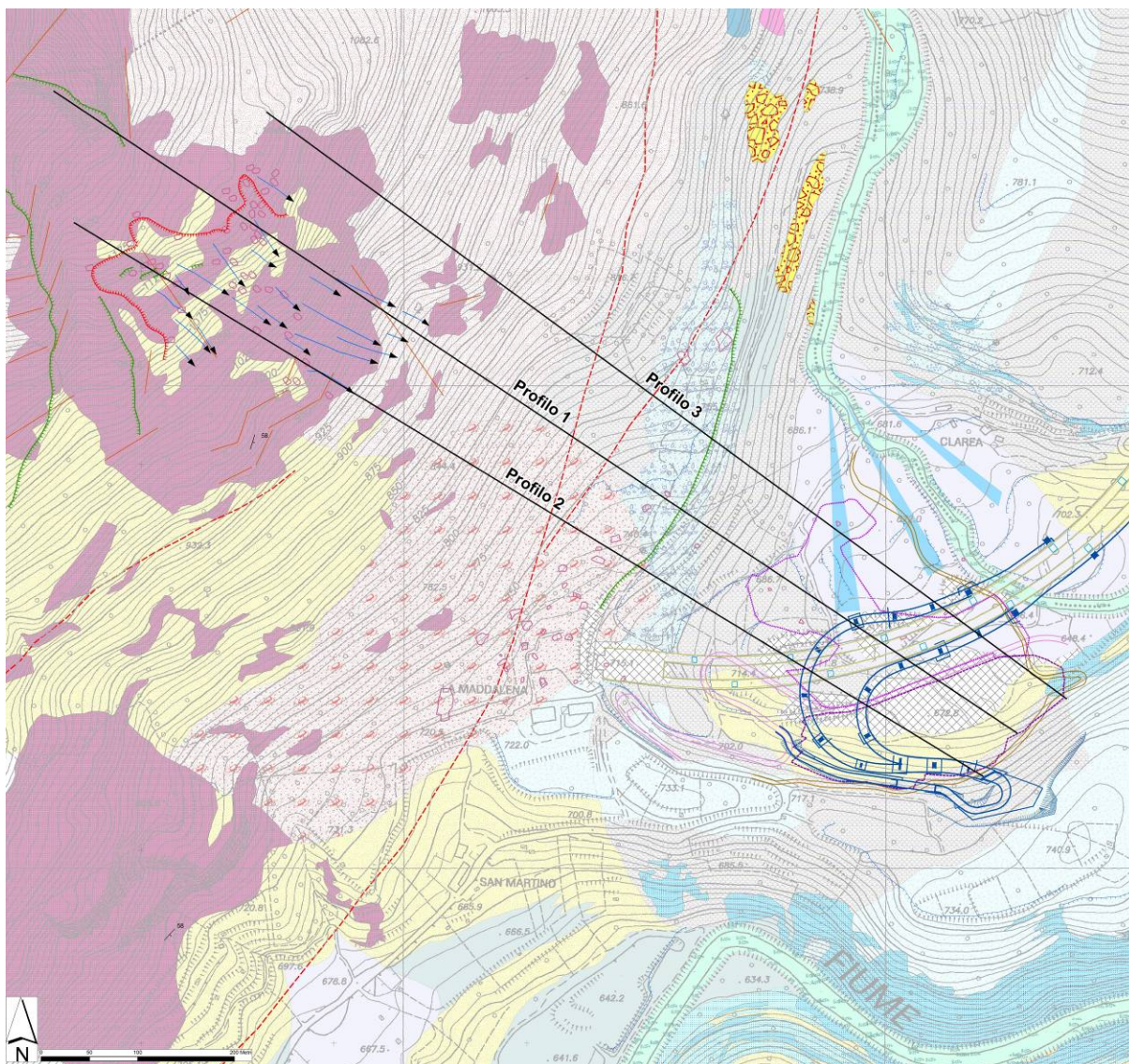


Fig. 16 – Stralcio della carta geomorfologica con rappresentazione delle sezioni di verifica di rotolamento massi.

4.4.1 Profilo 1

La simulazione è stata condotta lungo la precedente sezione SS' (PD2-C3A-MUS-0902-A-AP-NOT) che è stata estesa verso valle comprendendo anche l'area di cantiere.

I risultati della simulazione sono riportati nella **Figura 17**. I risultati sono comparabili con quelli della precedente simulazione. In corrispondenza delle reti paramassi a protezione della zona archeologica i massi sono caratterizzati da un'altezza massima di rimbalzo di circa 5-6 m con energie unitarie elevate, tra 200 e 5000 kJ.

Alla base del pendio i massi sono caratterizzati da un'altezza massima di rimbalzo di circa 1-1.5 m con energie unitarie tra 100 e 3500 kJ.

La massima distanza di arresto (raggiunta da 1 masso su 1000) è posta all'incirca sul ciglio del ripiano posto alla base del pendio.

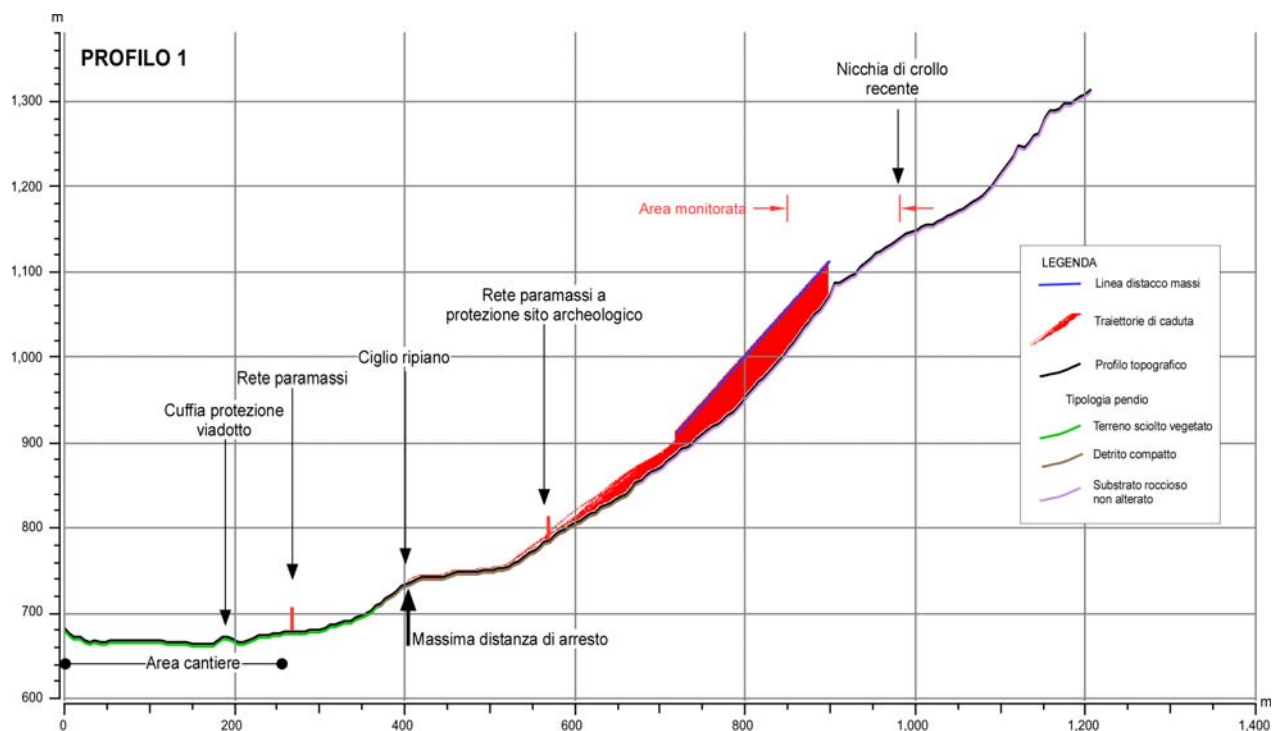


Figura 17 – Profilo della sezione di calcolo con le traiettorie più probabili considerando una zona di distacco collocata tra 900 m e 1100 m.

4.4.2 Profilo 2

I risultati della simulazione sono riportati nella **Figura 18**. Alla base del pendio i massi sono caratterizzati da un'altezza massima di circa 1.5-2 m con energie unitarie tra 100 e 4000 kJ.

La massima distanza di arresto (raggiunta da 1 masso su 1000) è posta all'incirca nella parte mediana del ripiano posto alla base del pendio.

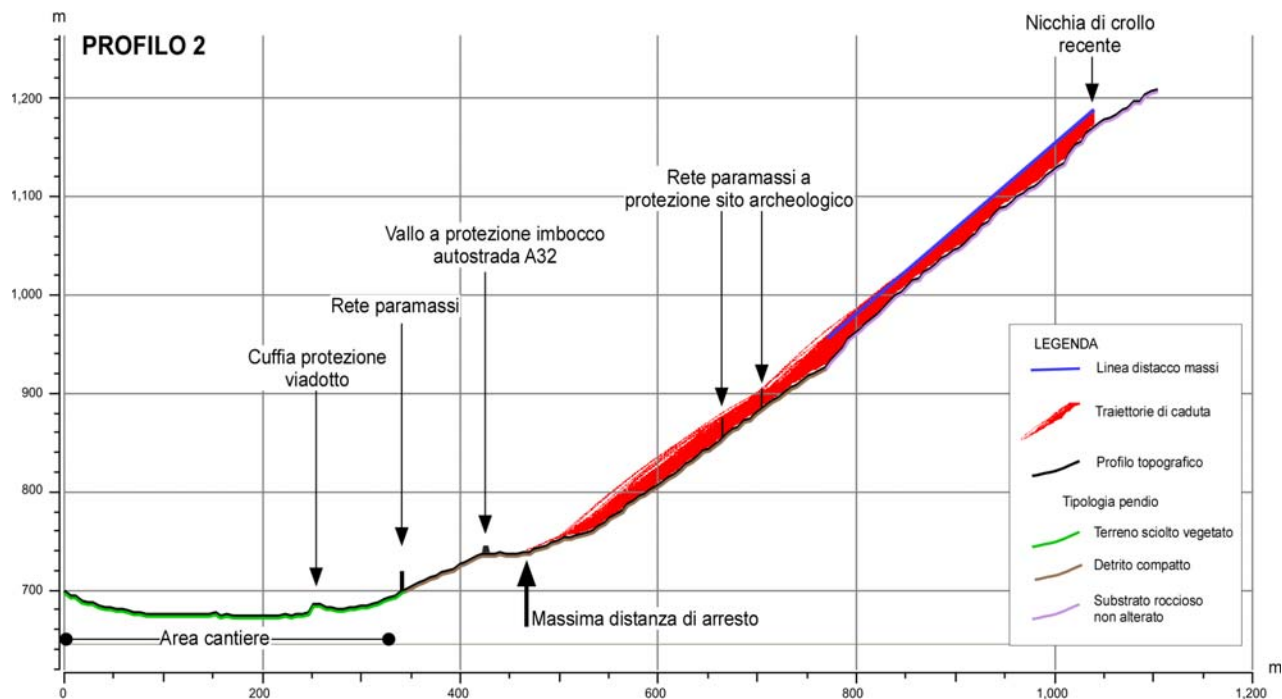


Figura 18 – Profilo della sezione di calcolo con le traiettorie più probabili considerando una zona di distacco collocata tra 950 m e 1200 m.

4.4.3 Profilo 3 (distacco basso)

I risultati della simulazione sono riportati nella **Figura 19**. In corrispondenza delle reti paramassi a protezione della zona archeologica i massi sono caratterizzati da un'altezza massima di rimbalzo di circa 8-9 m con energie unitarie massima di 3500 kJ.

Alla base del pendio i massi sono caratterizzati da un'altezza massima di rimbalzo di circa 2-2,5 m con energie unitarie massime 2000 kJ.

La massima distanza di arresto (raggiunta da 4 massi su 1000) è posta all'incirca nella parte iniziale del ripiano posto alla base del pendio.

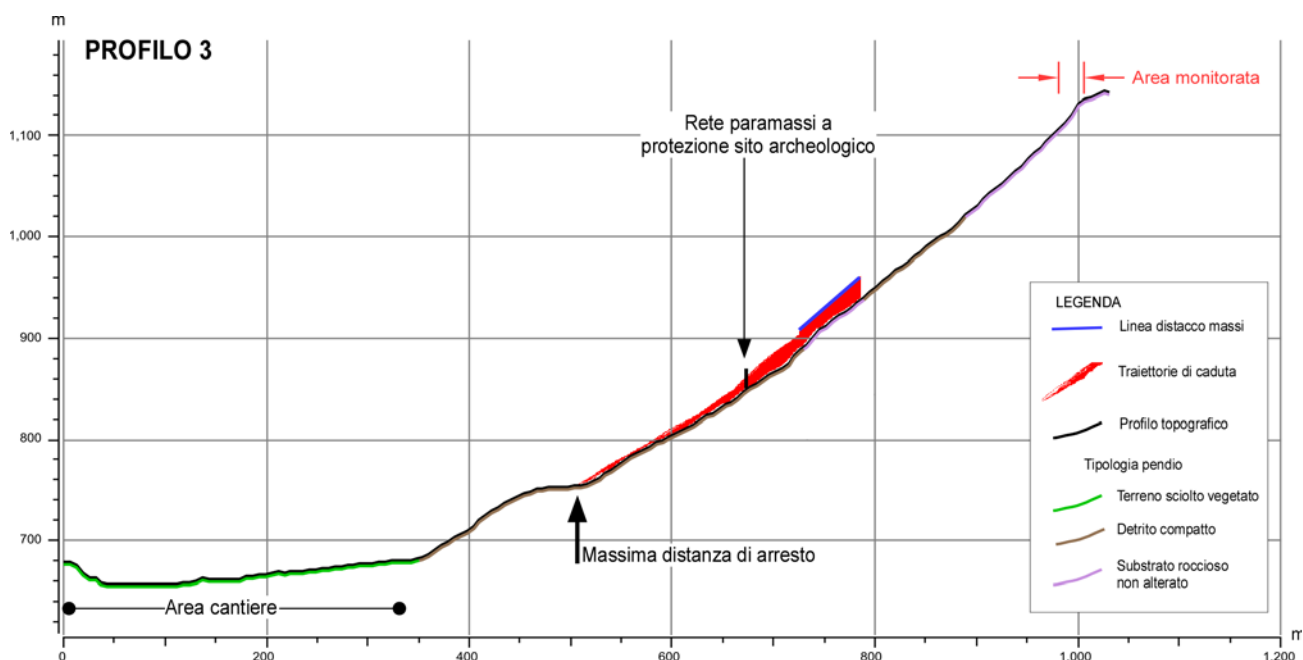


Figura 19 – Profilo della sezione di calcolo con le traiettorie più probabili considerando una zona di distacco collocata tra 900 m e 950 m.

4.4.4 Profilo 3 (distacco alto)

I risultati della simulazione sono riportati nella **Figura 20**. In corrispondenza delle reti paramassi a protezione della zona archeologica i massi sono caratterizzati da un'altezza massima di rimbalzo di circa 15-20 m con energie unitarie massime di circa 8000 kJ. Tali valori potrebbero essere sovrastimati per le considerazioni riportate nelle conclusioni.

Alla base del pendio i massi sono caratterizzati da un'altezza massima di rimbalzo di circa 2-2,5 m con energie unitarie massime 5000 kJ.

La massima distanza di arresto (raggiunta da 2 massi su 1000) è posta all'incirca presso il ciglio del ripiano posto alla base del pendio.

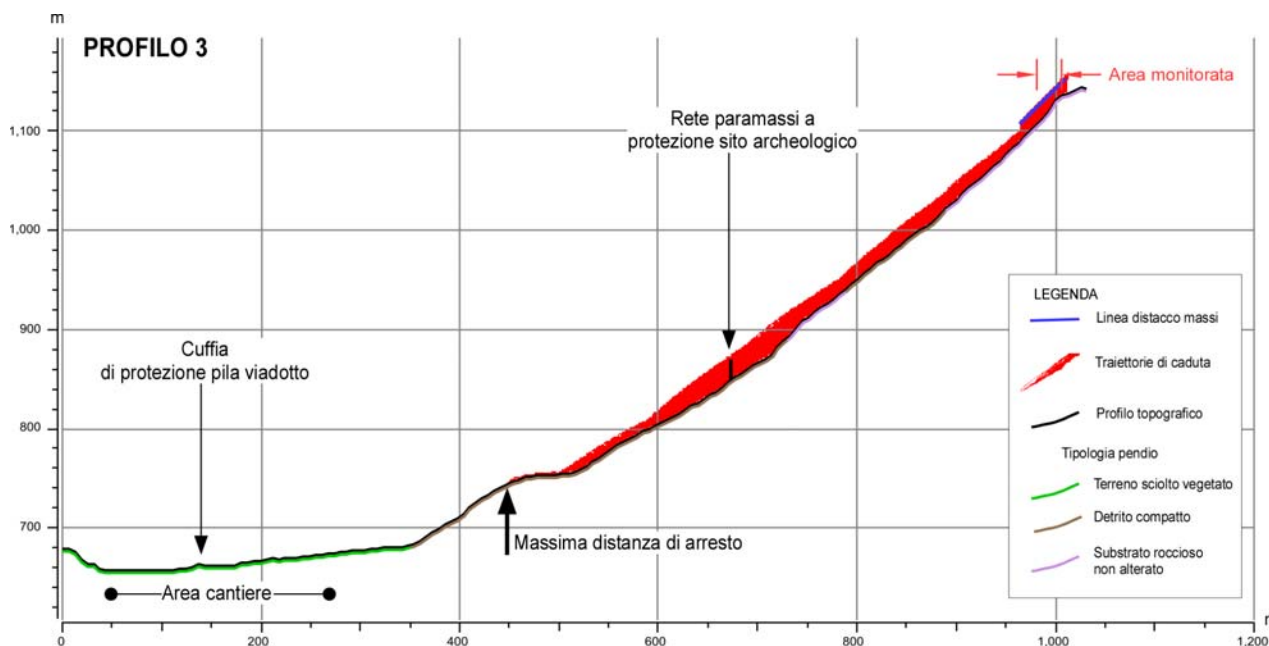


Figura 20 – Profilo della sezione di calcolo con le traiettorie più probabili considerando una zona di distacco collocata tra 1100 m e 1140 m.

4.5 Conclusioni

Le analisi realizzate e descritte nei capitoli precedenti permettono di giungere alle considerazioni seguenti:

1) I risultati delle simulazioni effettuate dimostrano, in accordo con gli indizi raccolti sul terreno, che pochi massi raggiungono il ripiano a monte delle aree di cantiere e retrostante il terrapieno paramassi esistente a protezione dell'autostrada. Tale risultato appare comunque cautelativo poiché le simulazioni numeriche forniscono velocità molto elevate, in quanto il modello non considera in modo accurato le asperità del pendio che sono più elevate di quelle ipotizzate. Nei tratti in cui sono presenti ampi tratti di substrato, tale effetto risulta amplificato in quanto il coefficiente di attrito al rotolamento masso – roccia proposto dalla letteratura è generalmente basso. Con coefficienti di rotolamento più elevati i massi non raggiungono la base del pendio e la frequenza di distribuzione dei punti di arresto è anomala, poco rispondente alla distribuzione reale.

2) Lungo le barriere paramassi poste nel versante tra 800 e 900 m non sono stati osservati massi intercettati. Ciò significa che i fenomeni di caduta massi non sono frequenti. L'ipotesi che i massi siano caratterizzati da traiettorie più alte delle barriere paramassi (alte circa 6-7 m) è contraddetta dalla mancanza di indizi di impatti alla sommità delle piante di alto fusto e dai frequenti indizi di impatti alla base dei fusti.

3) Si conferma che in considerazione delle dimensioni dei blocchi potenzialmente instabili e delle energie attese in corrispondenza del ciglio del ripiano morfologico (Tabella 3), la tipologia di intervento passivo ritenuta più idonea è la realizzazione di un terrapieno paramassi.

4) In considerazione delle altezze di rimbalzo calcolate, per il dimensionamento di interventi passivi a protezione delle aree di cantiere si consiglia la realizzazione di un terrapieno paramassi di altezza pari ad almeno 7 m. Occorre

sottolineare tuttavia che l'altezza del rilevato deve essere almeno superiore all'altezza di rimbalzo più il diametro del masso di progetto.

Profilo	Progressiva (m)	Altezza di rimbalzo (m)	Velocità media (m/sec)	Energia (kJ)
1	420	6	24	800
2	425	Punto non raggiunto dai massi		
3	475	6	15	500

Tabella 2 – Valori di altezza di rimbalzo, velocità media ed energia calcolati per massi di 1 m³ in corrispondenza del ciglio del ripiano morfologico presente a monte dell'area di cantiere

Le simulazioni sopradescritte realizzate per blocchi di dimensioni pari a 1 m³ sono state utilizzate come dato di partenza per valutare le energie possedute da blocchi di dimensioni differenti, dal momento che la cubatura dei massi è molto variabile (capitolo 3.2); le energie valutate per blocchi fino a 300 m³ sono riassunte nella tabella successiva:

<i>Dimensioni del masso (m³) v = 24 m/s</i>	<i>Energia attesa (kJ)</i>
1	800
50	37.000
100	73.000
200	145.000
300	220.000

Tabella 3 – Energia massima attesa per i massi in corrispondenza del ciglio del ripiano morfologico (Massa = 2550 kg/m³).

5) Sulla base delle considerazioni sopra esposte pertanto si conferma che quanto previsto dal progetto definitivo del futuro svincolo di Chiomonte (PD2_C3A_MUS_1167_A) per la protezione delle pile dello svincolo è compatibile, sia in termini di dimensionamento che di ubicazione, con i risultati del presente studio ed in accordo con le richieste del CIPE per la progettazione di tale opera.

6) Per quanto riguarda la valutazione delle condizioni di pericolosità dell'area tenendo conto di tutte le opere previste nel loro insieme, il progetto definitivo della nuova linea Torino-Lione prevede già la realizzazione di un vallo paramassi a monte dell'imbocco del tunnel de La Maddalena (PD2_C3A_3843_A), le cui caratteristiche tipologiche (altezza minima 6 m) risultano compatibili con i risultati delle simulazioni di caduta massi realizzate. Tuttavia, affinché tale intervento di difesa possa essere funzionale alla protezione dell'area di progetto anche in fase di cantiere, sarebbe necessario anticipare la sua realizzazione.

7) La realizzazione di entrambe le opere di difesa previste dai progetti dello Svincolo di Chiomonte e della nuova linea Torino-Lione ottemperano pertanto alla necessità di ridurre le condizioni di pericolosità e rischio dell'area in modo complessivo.

8) L'opera di difesa passiva prevista dal progetto definitivo della nuova linea Torino-Lione, come alternativa di posizionamento, potrebbe essere posta in corrispondenza del ciglio del ripiano morfologico a prosecuzione del paramassi esistente costruito a protezione degli imbocchi delle gallerie "Ramats" dell'autostrada A32, in quanto è il punto in cui le energie dei massi e l'altezza delle traiettorie sono risultate minori. Tale posizione inoltre, date le caratteristiche morfologiche dell'area e le presumibili migliori condizioni di accesso, potrebbe permettere una più agevole realizzazione dell'opera stessa. Tuttavia, affinché tale intervento di difesa possa essere funzionale alla protezione dell'area di progetto anche in fase di cantiere, sarebbe necessario anticipare la sua realizzazione.

9) Si segnala che le opere di difesa non possono trattenere eventuali impatti di massi ciclopici (volume fino a oltre 2000 m³ presenti nella parte alta del versante) per i quali non è possibile realizzare interventi risolutivi.