

LIATION LYON - TURIN / COLLEGAMENTO TORINO - LIONE

Partie commune franco-italienne
Section transfrontalière

Parte comune italo-francese
Sezione transfrontaliera

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

ECHANGEUR DE LA MADDALENA – SVINCOLO DE LA MADDALENA

RAPPORT GEOLOGIQUE-GEOTECHNIQUE – RELAZIONE GEOLOGICO-GEOTECNICA

Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérifié par / Controllato da	Autorisé par / Autorizzato da
0	09/01/2013	Première diffusion / Prima emissione	L. BARBERIS (MUSINET)	C. GIOVANNETTI (MUSINET)	M.BERTI (SITAF)
A	08/03/2013	Révision suite aux commentaires LTF/Revisione a seguito commenti LTF	L. BARBERIS (MUSINET)	C. GIOVANNETTI (MUSINET) Corrado GIOVANNETTI n° 2736	M.BERTI (SITAF)
B					

CODE DOC	P	D	2	C	3	A	M	U	S	0	9	0	2	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	05	10	19
------------------------------	-----	----	----	----	----	----	----	----

ECHELLE / SCALA



LTF sas – 1091 Avenue de la Boisse – BP 80631 – F-73006 CHAMBERY CEI
Tél. : +33 (0)4.79.68.56.50 – Fax : +33 (0)4.79.68.56.75
RCS Chambéry 439 556 952 – TVA FR 03439556952
Société LTF Tous droits réservés – Propriété LTF Tutti i diritti riser

Ce projet est cofinancé par l'Union européenne (DG-TREN)



Questo progetto è cofinanziato dall'Unione europea (TEN-T)

SOMMAIRE / INDICE

.....	
RESUME/RIASSUNTO	4
1. INTRODUZIONE	5
2. DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DA ESEGUIRSI	5
3. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	7
4. DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	7
5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE	8
5.1 Zona piemontese	8
5.2 Massiccio d'Ambin	9
5.3 Depositi quaternari	10
6. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO REGIONALE	11
6.1 Geomorfologia dell'area di progetto	14
6.2 Glaciazioni	14
6.3 Frana della Maddalena	15
6.4 Aspetti applicativi	18
6.5 Caduta Massi	19
6.5.1 Risultati della simulazione	21
6.6 Forme legate all'attività fluvio torrentizia- pericolosità di conoide	25
6.7 Assetto idrogeologico dell'area di progetto	27
6.8 Dati preesistenti utilizzati per la redazione del Modello geologico di riferimento dell'area di progetto	28
7. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	33
7.1 Parametrizzazione geotecnica	37
7.1.1 Prove penetrometriche S.P.T.	37
7.1.2 Prove pressiometriche	41
7.1.3 Prove dilatometriche	42
7.1.4 Prove di permeabilità in foro	44
7.1.5 Prove di laboratorio	44
7.1.6 Indagini geofisiche	49
7.2 Sintesi dei parametri geotecnici delle Unità geotecniche distinte nel settore di Progetto	51

RESUME/RIASSUNTO

Texte en Français.

Cet rapport traite l'encadrement, au niveau de Project Définitif, des caractéristiques géologique-géotechnique et hydrogéologique pour l'hypothèse 4bis prévu pour la réalisation du « Nouveau échangeur de la Maddalena sur la A32 ».

Testo in Italiano.

Il presente documento ha come oggetto l'inquadramento, a livello di Progetto Definitivo, delle caratteristiche geologiche-geotecniche ed idrologiche per l'ipotesi progettuale 4bis per la realizzazione del "Nuovo svincolo Della Maddalena sulla A32".

1. Introduzione

Il presente rapporto ha come oggetto l'analisi delle caratteristiche geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche e sismiche del settore di territorio interessato dal Progetto Definitivo dello Svincolo sulla A32 in località Maddalena a Chiomonte (TO), nelle sole direzioni da e per Torino.

Questo rapporto analizza e descrive il contesto geomorfologico, stratigrafico ed idrogeologico 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 sull'assetto geodinamico e tettonostratigrafico dell'area indagata;
- rilevamento geologico, geomorfologico;
- analisi fotogeologica in stereoscopia;
- analisi dei risultati delle campagne di indagini geognostiche;
- caratterizzazione idrogeologica dei litotipi affioranti mediante definizione dei complessi idrogeologici;

2. Descrizione degli interventi da eseguirsi

Il Progetto dello svincolo di Chiomonte prevede la realizzazione delle opere di accesso all'autostrada A32 in località "Maddalena", nelle sole direzioni da e per Torino. Lo svincolo permetterà in una prima fase l'accesso diretto dall'autostrada da parte dei mezzi di servizio dei cantieri (cantiere LTF del tunnel della Maddalena ed il cantiere operante per la realizzazione dello svincolo). Successivamente lo svincolo potrà essere utilizzato come accesso al Tunnel di Base, in particolare all'area di sicurezza di Clarea, ed all'imbocco della galleria per i mezzi di soccorso della nuova linea ferroviaria in caso di necessità.

Durante la fase di Dossier Guida sono state prese in considerazione ed analizzate 4 differenti ipotesi progettuali; le ipotesi sono state confrontate tra loro tramite un'analisi multicriteria che ha permesso di scegliere l'ipotesi 4 bis come quella da sviluppare in questa fase di Progetto Definitivo.

L'ipotesi progettuale prevede, sinteticamente, la realizzazione di uno svincolo in viadotto descritto nel seguito e riportato schematicamente nella figura sottostante:

La rampa di uscita prevede un iniziale tratto in affiancamento con il viadotto esistente dalla pila P4 alla pila P5. In questo tratto, l'allargamento dell'impalcato viene realizzato in struttura mista con trave in acciaio e soletta collaborante in c.a. realizzata in continuità con lo sbalzo del cassone esistente. Dalla pila P4 in poi, la rampa di uscita si stacca dal Clarea e prosegue in viadotto fino alla pila BP3, per otto campate di lunghezza massima pari a 50 m; si prevede un giunto sulla pila UP4, a separazione tra il tratto iniziale con andamento planimetrico con inversione di curvatura e pendenza longitudinale in discesa ed il secondo tratto caratterizzato da un andamento planimetrico a raggio di curvatura pressoché costante e pendenza longitudinale in salita.

La rampa in ingresso, a partire dalla pila BP3, ha un primo tratto in viadotto in curva su tre campate di lunghezza massima 50 m, un secondo tratto pressoché rettilineo di tre campate ed un tratto finale in affiancamento al viadotto Clarea dalla pila P10 alla pila P12,

realizzato, come per la rampa in uscita, con un'unica trave d'acciaio continua poggiata su tre nuove pile e soletta continua con quella dell'impalcato esistente.

Dalla pila BP3 alla pila/spalla BP1, i due rami di ingresso e di uscita si congiungono e vengono realizzati su impalcato unico largo 13.50 m costituito da due campate di luce 36 m.

Le pile a sostegno delle rampe di uscita e in ingresso, di altezza fino a 47.80 m, sono posizionate in maniera da allinearsi con le esistenti secondo direttrici passanti per i due punti di osservazione più significativi: uno posto sul rilievo a nord, a circa 1050 m di quota, nei pressi della località Pian delle Ruine; l'altro situato a sud-ovest a una quota di circa 717 m, in corrispondenza del tornante della strada che conduce al Museo Archeologico di Chiomonte.

Il tratto di viabilità che collega la pila/spalla BP1 al cantiere necessita di importanti opere di sostegno costituite da due ordini di muri in c.a. rivestiti in pietra, ciascuno di altezza fino a circa 8.50 m. Inoltre, in un tratto, tale viabilità scavalca la viabilità di collegamento per Borgo Clarea, pertanto si rende necessaria la realizzazione di un cavalcavia ad una campata e delle relative spalle. L'esecuzione di tali opere, come anche delle pile dei viadotti che si trovano sul versante meridionale della valle, avverrà previa esecuzione di paratie berlinesi multitirate necessarie al sostegno degli scavi.

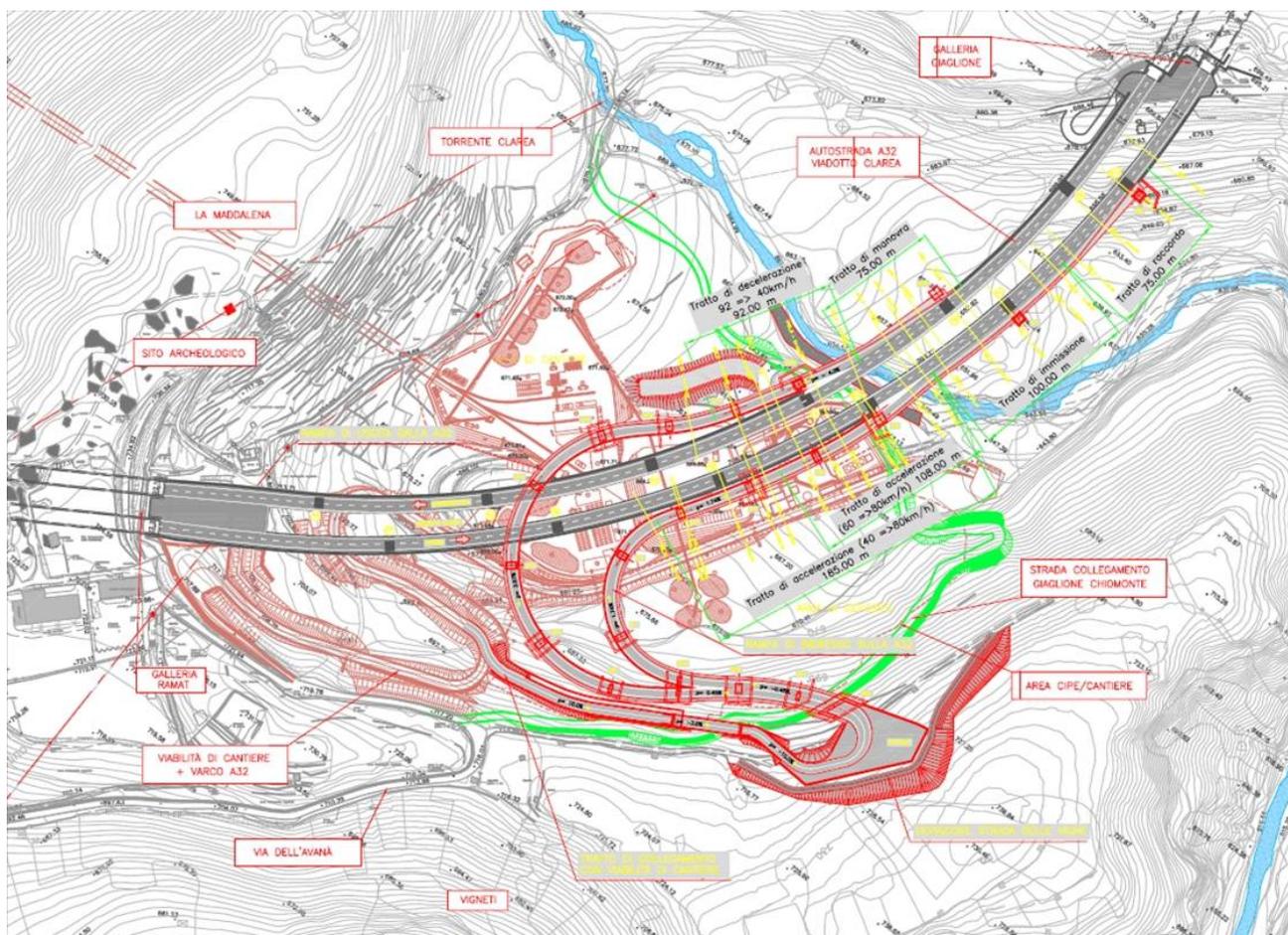


Fig. 1 – Planimetria schematica con ubicazione dell' ipotesi progettuale S4bis

3. 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.

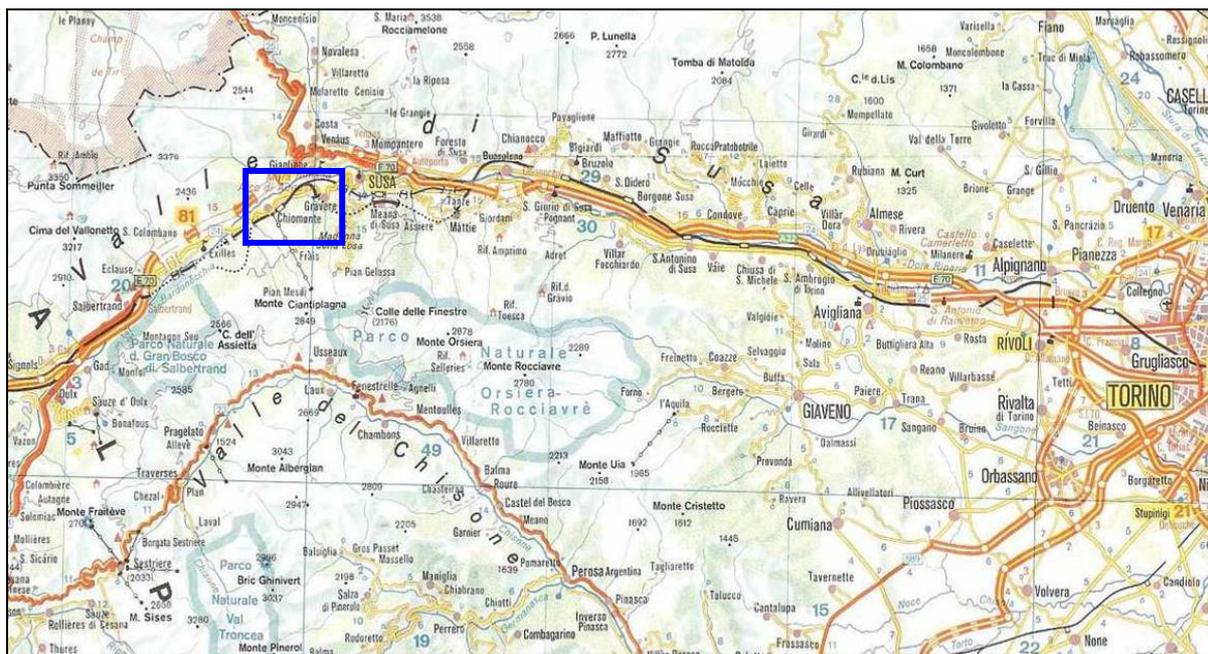


Fig. 2 – Inquadramento geografico dell'area di Progetto

4. Documentazione di riferimento

Il Modello Geologico di riferimento descritto nel presente studio si basa principalmente sui dati geologici, geomorfologici e idrogeologici acquisiti mediante indagini e rilevamenti puntuali sul terreno e su dati preesistenti provenienti da studi non finalizzati alla realizzazione dell'infrastruttura in oggetto.

In sintesi, i dati considerati provengono dalle seguenti fonti:

- Carta Geologica d'Italia scala 1:100.000, Foglio 55 Susa & Note illustrative;
- Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 153 Bardonecchia & Note illustrative;
- Foto aeree volo Regione Piemonte alluvione 2000, in scala 1:14.000 circa, a colori (F153);
- Geoportale ARPA Piemonte (Banca dati Geotecnica);
- Documentazione relativa al Progetto Preliminare dell'interconnessione HVDC Italia-Francia (Relazione geologica e indagini geognostiche);
- Documentazione relativa al Progetto Esecutivo dell'autostrada A32 Torino-Bardonecchia;

- Elaborati del Piano Regolatore Generale Comunale vigente del comune di Chiomonte;
- Risultati delle indagini geognostiche (2011-2012) realizzate nell'area di cantiere e di deposito del sito de La Maddalena;
- Risultati delle indagini geognostiche (2012-2013) realizzate a supporto della progettazione definitiva dello Svincolo de La Maddalena;

5. Inquadramento geologico generale

I tracciati delle opere in progetto attraversano un insieme di rocce e sedimenti estremamente vario sia per tipi litologici che caratterizzano le unità geologiche che per il particolare assetto geologico-strutturale. Dal punto di vista geologico, l'area di studio ricade all'interno del dominio Pennidico delle Alpi Occidentali in prossimità del contatto tra le unità tettonometamorfiche della Zona Piemontese e del Massiccio d'Ambin con le relative coperture (Zona Brianzonese).

Le principali formazioni affioranti sono descritte nei capitoli seguenti.

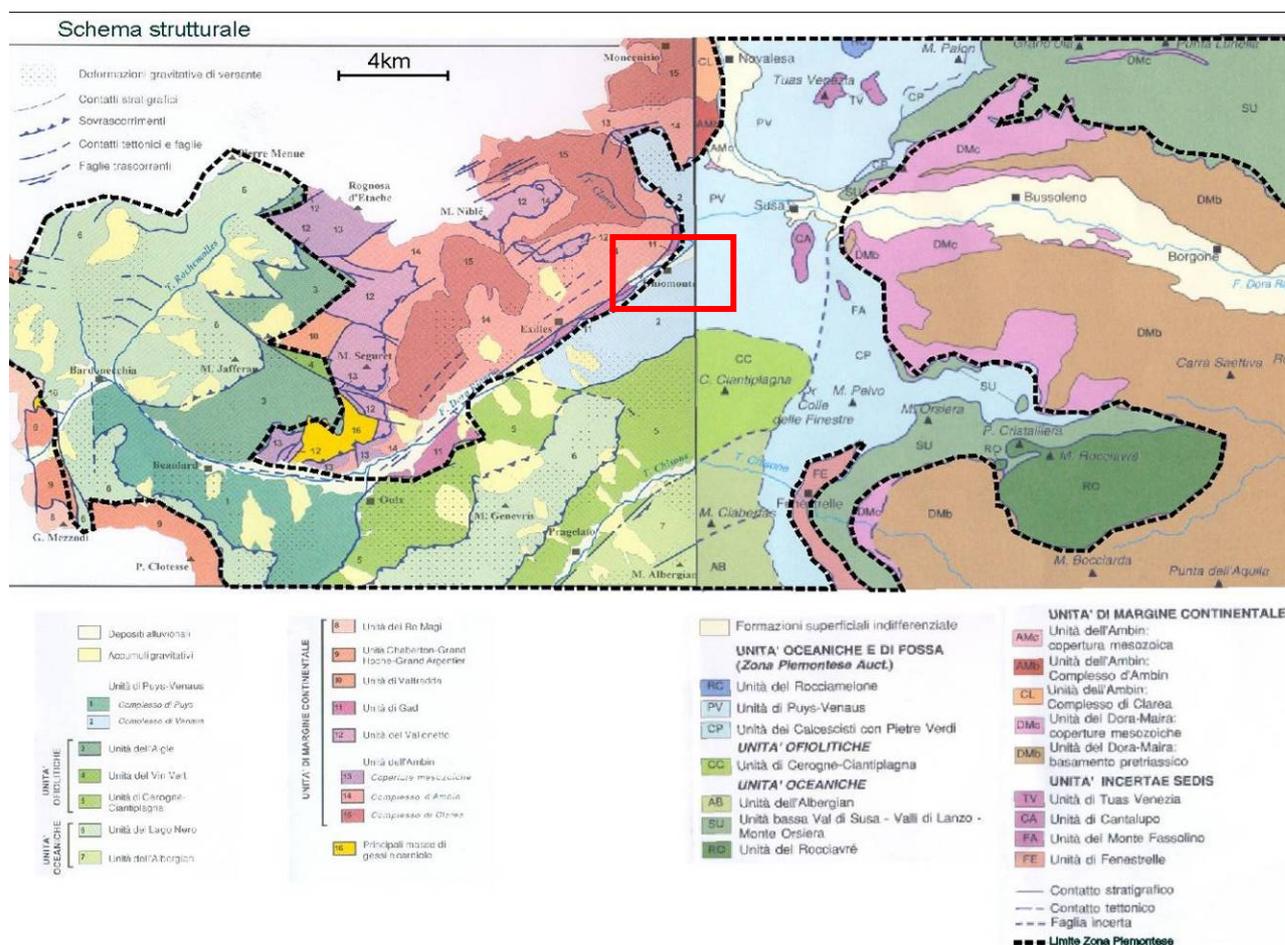


Fig. 3 – Schema strutturale raffigurante i rapporti geometrici della Zona Piemontese con il massiccio d'Ambin (Polino et alii, 2002, mod.; Carraro et alii, 1999, mod.). In rosso è evidenziata l'area di progetto.

5.1 Zona piemontese

La Zona o Unità Piemontese comprende porzioni di crosta oceanica (ofioliti) e coperture metasedimentarie (calcescisti) riferibili all'antico bacino oceanico piemontese,

coinvolto nella subduzione e successiva collisione responsabili della genesi della catena alpina.

I litotipi appartenenti a tale Unità si trovano in posizione strutturalmente superiore rispetto alle Unità di basamento Pennidico qui rappresentate dal Massiccio d'Ambin.

La sequenza litostratigrafica del settore della Valle di Susa comprende unità oceaniche di fossa (Zona Piemontese auct., costituita dall'unità di Puys-Venaus e dall'Unità dei Calcescisti con Pietre Verdi) e unità ofiolitiche (unità Bassa Val di Susa - Valli di Lanzo - Monte Orsiera). Al loro interno sono distinti:

- calcescisti con associati livelli marmorei e subordinate intercalazioni di gneiss albitico - cloritici, micascisti e paragneiss;
- marmi micacei, marmi dolomitici e metadolomie con associati livelli sporadici di carnirole;
- micascisti a granato, micascisti filladici grigio scuri e paragneiss;
- gneiss albitici e gneiss leucocratici, talora con porfiroblasti di K-feldspato (Gneiss di Charbonnel auct.);
- metabasiti: gneiss prasinitici, prasiniti, prasiniti listate, scisti anfibolici, cloritoscisti e metagabbri;
- serpentiniti e serpentinoscisti con locali livelli di cloritoscisti.

Nell'area in esame la Zona piemontese è costituita essenzialmente dall'unità di calcescisti continentali, unità di Puys-Venaus, caratterizzata dall'assenza di ofioliti e dall'associazione tra calcescisti e micascisti feldspatici e/o gneiss quarziticci tipo "Gneiss di Charbonnel" (Lorenzoni, 1965).

Le fondazioni dell'ipotesi progettuale 4bis non dovrebbero intercettare il substrato roccioso; infatti sulla base dei dati disponibili solo i sondaggi S91 e S92 (campagna indagini LTF 2011) realizzati nell'area di deposito del sito de La Maddalena, hanno incontrato il substrato roccioso ma a partire da circa 65 metri di profondità.

Al momento attuale, a causa dell'assenza di dati ed indagini specifiche nel settore, non è possibile escludere che il substrato roccioso, affiorante sui versanti delle gorge del Fiume Dora, non venga intercettato dallo scavo delle fondazioni delle pile (BP1, BP2, BP3) ubicate lungo il versante della dorsale che separa la val Clarea dalla Gorge di Susa. Solamente la realizzazione di sondaggi integrativi potrà permettere di definire con maggior precisione il quadro geologico-geotecnico del settore.

5.2 Massiccio d'Ambin

Il Massiccio d'Ambin affiora diffusamente sul versante sinistro della media e alta Val di Susa al di sotto delle unità oceaniche appartenenti alla Zona Piemontese; è formato da uno zoccolo di meta-sedimenti polimetamorfici denominato Serie (o Gruppo) di Clarea e da un involuppo meta-sedimentario, cui è generalmente attribuita un'età tardo-paleozoica, denominato Serie (o Gruppo) d'Ambin (Michel, 1956, 1957; Fregolent & Lorenzoni, 1960; Lorenzoni, 1965; Gay 1964, 1970, 1972, 1973). Le due serie sono in contatto stratigrafico, sebbene esso coincida con un piano di taglio (Ganne et al., 1999).

In posizione corticale sono preservati lembi di una copertura mesozoica costituita da:

- una serie inferiore autoctona comprendente quarziti (Permo - Eotrias), micascisti, scisti calcarei, calcari a carnirole (Trias inferiore e medio);

- una serie superiore parautoctona, comprendente calcari e carniole (Trias - Lias), in contatto tettonico con i Calcescisti dell'unità Piemontese e con le formazioni sottostanti.

La serie di Clarea è costituita da micascisti a granato e glaucofane, a grana fine, di colore grigio scuro, con rare intercalazioni di metabasiti anfibolitiche.

La soprastante successione della Serie di Ambin comprende micascisti, quarzomicascisti, metaconglomerati e paragneiss, derivanti in parte dallo smantellamento del basamento costituito dalla Serie di Clarea e ricoperti a loro volta da una sequenza di copertura calcareo – dolomitica (Gay, 1964).

Nella serie di Ambin sono stati inoltre riconosciuti dei litotipi definiti "leptiniti alcaline" (Gay, 1964) o "ortogneiss aplitici" (Pognante et al., 1984), affioranti allo sbocco della Val Clarea e inglobanti piccoli corpi di metagabbri; a queste rocce è stata assegnata un'età tardo-paleozoica. I metagabbri, più antichi degli ortogneiss, sarebbero stati inglobati in questi ultimi durante la messa in posto delle rocce intrusive.

I litotipi appartenenti al Massiccio d'Ambin non dovrebbero essere incontrati durante la realizzazione delle opere in progetto.

5.3 Depositi quaternari

La sequenza stratigrafica si chiude con una serie potente di depositi di età quaternaria, che costituiscono i terreni di appoggio delle fondazioni dell'ipotesi progettuale in studio; tali depositi possono essere raggruppati principalmente in tre grandi tipologie:

- 1) Depositi glaciali e fluvio-glaciali;
- 2) Depositi alluvionali;
- 3) Depositi gravitativi.

Di seguito si descrivono le caratteristiche di ciascuna tipologia di deposito:

1. Depositi glaciali e fluvio-glaciali: all'interno di tali depositi è possibile distinguere:

- depositi glaciali di ablazione caratterizzati dalla presenza di ciottoli e blocchi eterometrici e poligenici, immersi in una matrice fine, di tipo sabbioso-limoso;
- depositi fluvioglaciali; si tratta di depositi grossolani costituiti da ghiaia con ciottoli a struttura clast-supported in matrice sabbiosa o sabbioso-limosa;
- depositi glaciali di fondo: si tratta di depositi più fini di tipo limoso-sabbioso, caratterizzati da una tessitura generalmente di tipo matrix-supported, con scarsi ciottoli;

2. Depositi alluvionali: all'interno di tali depositi è possibile distinguere:

- depositi di fondovalle; all'interno dei sedimenti alluvionali di fondovalle si possono distinguere una litofacies ghiaiosa e ghiaioso-sabbiosa prevalente, costituita da ghiaie e ghiaie ciottolose in scarsa matrice sabbioso-ghiaiosa (clast-supported), una litofacies prevalentemente sabbioso-limosa con subordinata ghiaia e ciottoli ed una facies limoso-sabbiosa subordinata che dà vita a livelli discontinui di potenza metrica all'interno delle facies più grossolane.
- depositi torrentizi dei tributari minori; si tratta di depositi recenti costituiti prevalentemente da ciottoli e blocchi eterometrici con scarsa o nulla matrice ghiaioso-sabbiosa, presenti con modesto spessore lungo le aste dei tributari minori;

- depositi di conoide; tali depositi sono particolarmente sviluppati allo sbocco nel fondovalle dei rii principali e originano dei potenti accumuli costituiti da materiali che presentano caratteristiche granulometriche e tessiturali comparabili con quelle dei depositi fluviali di fondovalle, ma che sono caratterizzati da maggiori vuoti interstiziali, un grado di classazione inferiore, ed un minor coefficiente di arrotondamento dei blocchi.
3. Depositi gravitativi: all'interno di tali depositi è possibile distinguere:
- I depositi di origine mista comprendono i depositi per debris flow, di origine torrentizia e di valanga; sono costituiti da litofacies molto variabili tra le quali prevale generalmente un diamicton a matrice sabbiosa con intercalazioni di sabbie ghiaiose.
 - Gli accumuli gravitativi costituiscono depositi caratterizzati dalla presenza di clasti e massi angolosi, eterometrici, con tessitura da open work a partially open work, privi di qualsiasi classazione granulometrica. Corrispondono geneticamente ai fenomeni classificati come crolli (falls), comprendono gli accumuli delle frane per colamento (earth/mud flows) e derivano dalla mobilizzazione prevalentemente della coltre detritico-colluviale o della porzione più superficiale del substrato alterato e/o disgregato.
 - I detriti di falda rappresentano il prodotto del processo di disgregazione meccanica termo e crio – clastica del substrato. Sono costituiti da ghiaie clast - supported ad elementi generalmente spigolosi, localmente con tessitura open - work e scarsa matrice, talora sono presenti blocchi di grandi dimensioni. La natura dei clasti rispecchia strettamente quella delle unità litostratigrafiche locali.

La coltre eluvio-colluviale, affiora molto estesamente e rappresenta il prodotto della degradazione superficiale di formazioni del substrato particolarmente alterabili. Si tratta di prodotti matrix - supported, a prevalente matrice argilloso - limosa, nella quale sono immersi clasti angolosi derivanti dalla rielaborazione di formazioni superficiali. Gli spessori sono estremamente variabili (da decimetrico a pluri-metrico).

6. Inquadramento geomorfologico regionale

L'attuale morfologia della Val Susa è il risultato di un complesso modellamento operato da diversi agenti morfogenetici che si sono susseguiti a partire dal Pliocene, anche se solo a partire dal Pleistocene medio si hanno testimonianze geologiche e geomorfologiche. Si riconoscono forme e depositi associate al modellamento glaciale i cui relitti sono conservati prevalentemente alla fronte e ai lati dell'originaria massa glaciale, la cui distribuzione consente di ricostruire le fasi principali di espansione e di ritiro del ghiacciaio vallivo. Dopo l'ultimo ritiro, la morfologia glaciale è stata rimodellata ad opera dei processi di dinamica fluviale della Dora Riparia, fluviale torrentizia dei bacini laterali e dei processi gravitativi di versante.

Successivamente alla costruzione dell'Anfiteatro di Rivoli - Avigliana, di cui si ha traccia a partire dal Pleistocene medio, il deterioramento climatico avviatosi alla fine del Pleistocene inferiore ha infatti determinato il passaggio da condizioni di tipo caldo-umido a un periodo caratterizzato da forti contrasti climatici: a fasi "interglaciali", caratterizzate da un clima umido-temperato simile a quello attuale, si sono alternati periodi "glaciali" sensibilmente più freddi.

Dopo la fase di massima espansione dell'ultima glaciazione (Pleistocene sup., Last Glacial Maximum - LGM) nella valle principale persisteva ancora il ghiacciaio della Val Cenischia, trasformando la media Val di Susa in valle sospesa ("gradino di Gravera").

I depositi più antichi sono rappresentati dall'Allogruppo di Bennale che forma lembi di depositi caratterizzati da un forte rimodellamento ed ubicati in una fascia altimetrica più o meno elevata, funzione della posizione rispetto allo sbocco vallivo. Tali depositi, che costituiscono la cerchia più esterna attualmente conservata, sono riferibili al Pleistocene medio (Unità di La Cassa). Nella parte superiore del Pleistocene medio ha luogo una nuova espansione glaciale. L'avanzata della fronte glaciale verso Sud ha comportato radicali variazioni nell'andamento del corso del T. Sangone il cui deflusso, originariamente impostato lungo la depressione dei Laghi di Avigliana, è stato sospinto a ridosso del rilievo del M. Pietraborga dando luogo al solco epigenetico che corrisponde alla "stretta" di Trana.

Le fasi successive (Allogruppo del Moncenisio) sono testimoniate da depositi distribuiti su fasce altimetriche progressivamente più basse; tra queste la più alta e più antica è attribuibile, in base alla sua correlabilità altimetrica con le cerchie maggiori dell'Anfiteatro Morenico di Rivoli - Avigliana (Alloformazione di Frassinere), e le successive ai diversi stadi di ritiro attribuibile al Pleistocene superiore (Alloformazione di Magnoletto e Alloformazione di Venaus).

Nella parte inferiore del Pleistocene superiore, a seguito di un nuovo deterioramento climatico successivo all'interglaciale eemiano, nell'arco alpino prende avvio una nuova glaciazione: nella Valle di Susa l'avanzamento della fronte glaciale comporta la costruzione delle cerchie intermedie dell'Anfiteatro di Rivoli - Avigliana, dei corrispondenti depositi fluvioglaciali e di quelli fluviolacustri. La riavanzata della fronte glaciale verso Sud ha nuovamente sospinto il T. Sangone comportando un ulteriore approfondimento della "stretta" di Trana.

Nella parte terminale del Pleistocene superiore, il ghiacciaio della Dora Riparia è interessato da altre tre fasi di espansione alle quali è connessa la formazione di altrettante cerchie. La sequenza cataglaciale è stata accompagnata e seguita dalla nascita di alcuni bacini lacustri: i dati relativi a sondaggi e pozzi per acqua attestano infatti che nel fondovalle principale sono esistite diverse configurazioni di un esteso lago proglaciale, ora colmato, le cui uniche tracce rilevabili in superficie sono conservate ai margini dell'incisione della Dora Riparia in forma di lembi di superfici terrazzate localizzate sul versante destro tra Avigliana e Alpignano. In corrispondenza della depressione di Avigliana le tracce di questi antichi bacini lacustri corrispondono alla torbiera di Trana e alla Palude dei Mareschi; il Lago Grande e il Lago Piccolo rappresentano invece gli unici bacini lacustri postglaciali sopravvissuti fino ad oggi, sebbene anch'essi risultino in lento ma graduale colmamento.

Contemporaneamente all'ultima fase di ritiro lo sbarramento costituito dalle cerchie frontali formatesi durante l'LGM ha determinato la formazione di un esteso bacino lacustre. L'areale di distribuzione dei depositi di interrimento di questo bacino, attualmente quasi completamente sepolti dai depositi alluvionali postglaciali, è compresa tra Sant'Antonino e Avigliana. Presso Villardora, le analisi polliniche, effettuate nella parte alta della successione di colmamento, causata dalla Dora e dai suoi affluenti laterali, hanno consentito di riconoscere un intervallo di tempo compreso tra la fine del Pleistocene superiore e l'Olocene medio.

Indagini di sismica ad alta risoluzione effettuate nel tratto terminale della Valle di Susa indicherebbero la presenza dei sedimenti "Villafranchiano" Auct. (rappresentati dall'Unità di La Cassa come riportato nel Foglio Torino Ovest della Carta Geologica d'Italia 1:50'000) anche al di sotto del complesso lacustre post-glaciale localizzato nel settore interno

dell'anfiteatro. L'alta energia dei versanti provocata dall'esarazione e dal ritiro delle masse glaciali (rilascio di stress da deglaciazione), le caratteristiche lito - strutturali e geomeccaniche e i legami fra deformazioni gravitative ed evoluzione geodinamica sono le principali cause predisponenti delle numerose frane che coinvolgono estese porzioni di versanti. Per alcune frane è possibile ipotizzare come causa predisponente la presenza di forti riduzioni di volume dell'ammasso roccioso in profondità a seguito di generalizzati processi di dissoluzione di rocce carbonatiche e solfatiche.

Tali frane, il cui riconoscimento è basato sulla presenza di forme tipiche, sono denominate "Deformazioni Gravitative Profonde di Versante" (DGPV) ed hanno un peso determinante nella morfogenesi dei versanti.

Altri processi morfogenetici, attualmente in formazione ossia tuttora in rapporto diretto con l'agente (corso d'acqua, ghiacciaio, nicchie di distacco, ecc.) dal quale hanno preso origine, sono arealmente diffusi e rappresentati dai depositi fluviali, che formano in superficie i fondovalle delle Valli di Susa e Cenischia, da depositi di origine mista, dai detriti di falda e dalla coltre eluvio - colluviale.

All'interno dei depositi alluvionali di fondovalle si possono distinguere due litofacies: una ghiaiosa e ghiaioso-sabbiosa, e l'altra limoso-sabbiosa. La litofacies grossolana, che trova una distribuzione più generalizzata, è costituita da ghiaie e ghiaie ciottolose sabbioso-ghiaiose clast-supported, mal stratificate, passanti a sabbie ghiaiose con stratificazione planare. La litofacies limoso-sabbiosa è costituita da limi sabbiosi localmente con livelli torbosi verso l'alto, debolmente stratificati, con uno spessore medio di qualche metro. Essi costituiscono tipicamente il letto attuale di piena dei corsi d'acqua, le superfici suborizzontali di fondovalle fiancheggianti i corsi d'acqua, corrispondenti alle aree di potenziale esondazione, ed i conoidi allo sbocco dei bacini tributari.

I depositi di origine mista comprendono i depositi di debris flow, di origine torrentizia e di valanga: negli areali più rappresentativi i corpi da questi costituiti tendono a mascherare i depositi glaciali o gli accumuli gravitativi completamente formati. Sono costituiti da litofacies molto variabili tra le quali prevale generalmente un diamicton a matrice sabbiosa con intercalazioni di sabbie ghiaiose.

Gli accumuli gravitativi costituiscono depositi caratterizzati dalla presenza di clasti e massi angolosi, eterometrici, con tessitura da open work a partially open work, privi di qualsiasi classazione granulometria che corrispondono geneticamente ai fenomeni classificati come crolli. Inoltre comprendono gli accumuli delle frane per colamento (earth/mud flows) e derivano dalla mobilitazione prevalentemente della coltre detritico-colluviale o della porzione più superficiale del substrato alterato e/o disgregato.

I detriti di falda costituiscono estesi areali di distribuzione e rappresentano il prodotto del processo di disgregazione meccanica termo e crio - clastica. Sono costituiti da ghiaie ad elementi generalmente spigolosi clast - supported, localmente con tessitura open - work e scarsa matrice, talora a elementi di grandi dimensioni. La natura dei clasti rispecchia strettamente quella delle unità tettonostratigrafiche locali.

La coltre eluvio - colluviale, affiora molto estesamente e rappresenta il prodotto della degradazione superficiale di formazioni del substrato particolarmente alterabili. Si tratta di prodotti matrix - supported, a prevalente matrice argilloso - limosa nerastra, nella quale sono immersi clasti angolosi (del tutto subordinatamente arrotondati, derivati dalla rielaborazione di formazioni superficiali) di calcescisti, dei litotipi ad essi associati e della copertura. Gli spessori sono estremamente variabili (da decimetrico a metrico).

6.1 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 Gravera, 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 (foto sottostante; Panoramica dell'imbocco della val Clarea).

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



6.2 Glaciazioni

Durante le pulsazioni glaciali descritte e riconosciute in valle Susa, in val Clarea era sicuramente presente un ghiacciaio vallivo che è probabilmente sopravvissuto alla fase di ritiro del ghiacciaio segusino, i cui resti sono attualmente testimoniati dai ghiacciai dell'Agnello e del Muttet. La persistenza della massa glaciale del ghiacciaio del Clarea rispetto a quello segusino è testimoniato dalla presenza di depositi a quote più basse rispetto alla soglia di Gravera.

Allo sbocco della val Clarea sono state riconosciute le tracce di tre distinte pulsazioni glaciali (Bertone et al., 1987) che sulla base dei loro rapporti con le fasi glaciali individuate in Valle Susa e in Val Cenischia, possono essere considerate oloceniche in quanto interrompono la continuità dell'unità di Seigneur e dell'Alloformazione di Chiomonte (Foglio Bardonecchia) affioranti più ad Ovest in loc. Maddalena alle quali è stata attribuita un'età pleistocenica superiore – olocenica e che rappresentano i prodotti di riempimento da un paleoalveo della Dora Riparia, intersecato successivamente dalle Gorge di Susa.

La pulsazione più antica è documentata da ingenti masse di depositi glaciali ben visibili sul versante sinistro della Valle Clarea (Pian delle Rovine), sui quali è attualmente impostato un evidente processo di erosione di tipo calanchivo, e dai depositi che formano il rilievo arcuato che delimita l'ansa della Dora presso lo sbocco della valle Clarea.

La seconda espansione è testimoniata da depositi fluvio-glaciali posti allo sbocco vallivo che costituiscono estesi lembi terrazzati conservati sia in sinistra che in destra idrografica. La posizione della massa glaciale doveva essere più arretrata rispetto alla precedente. Il lembo di destra forma il terrazzo su cui è situato il sito archeologico.

L'ultima espansione è documentata da depositi presso l'abitato di Clarea. La loro deposizione è avvenuta all'interno della precedente valle glaciale scavata dal ghiacciaio nei depositi abbandonati nella precedente espansione e testimonia che è stata di entità più modesta rispetto alle precedenti. La presenza di tali depositi ha verosimilmente provocato, in sponda destra idrografica, la formazione di un piccolo bacino lacustre nel quale è avvenuta una sedimentazione a granulometria fine e con una spiccata stratificazione.

6.3 Frana della Maddalena

La frana della Maddalena ha una forma all'incirca triangolare con un'area di circa 3 km² ed individuabile da due scarpate di altezza decametrica che formano una "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. Tale corpo è costituito da un ammasso roccioso disarticolato posto in posizione centrale che localmente passa a detrito a grossi blocchi e da una zona basale costituita da grossi blocchi, con volumetrie che raggiungono anche il migliaio di m³, e che ricoprono una superficie terrazzata preesistente.

La forma a "V" è evidenziata da scarpate in roccia di altezza decametrica, che si sono impostate in corrispondenza di giunti regionali (master joint) immergenti verso N100-110°E ed inclinati di circa 50°, disposti a franapoggio più inclinato del pendio. Sono riconoscibili almeno tre giunti principali che suddividono l'ammasso roccioso in tre corpi geometricamente sovrapposti il cui grado di fratturazione e disarticolazione diminuisce da quello 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, in quanto nelle restanti zone sono coperte da un'estesa copertura detritica, molto vegetata.

Il corpo più alto è costituito da un ammasso roccioso fratturato e disarticolato, spesso con formazione di grossi blocchi e di 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 cresta (1350 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 più bassi 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 IRIDE (ex AEM) di Chiomonte e sono evidenziati da una serie di doline con diametro pluridecametrico. Il livello di carniolate 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 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 superiore. Lo stato di disarticolazione, talora molto spinto, ha innescato la formazione di ripetuti fenomeni di caduta massi (secondo movimento) e sporadiche di 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. La presenza di grossi massi in abbondante matrice fine testimonia che un primo episodio gravitativo si è presumibilmente verificato mentre si stava concludendo la sedimentazione dei depositi glaciali. Un secondo episodio gravitativo, il cui accumulo è caratterizzato da scarsa matrice fine e il principale come dimensioni, è invece posteriore. Tale fenomeno si è probabilmente verificato 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 continui 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 ha formato una nicchia di distacco secondaria, impostata parte in detrito parte in roccia, posta a quota 1150 m circa.

Nell'area archeologica, la natura policronologica di tali fenomeni, 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.

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. Barriere paramassi ad alto assorbimento di energia sono inoltre presenti lungo il versante.

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 (figura seguente).

Per consentire una più agevole gestione delle informazioni l’area monitorata è stata suddivisa in aree a comportamento evolutivo omogeneo in cui sono state evidenziate le parti inerenti il corpo di frana (accumulo detritico ove il fenomeno contempla la mobilità di blocchi ciclopici per scalzamento al piede) e quelle costituite da ammassi rocciosi disarticolate e fratturate (Musinet, Engineering, 2010).

Nel complesso il monitoraggio evidenzia l’assenza di fenomenologie dissestive in atto in grado di coinvolgere i massi e le porzioni rocciose oggetto di controllo.

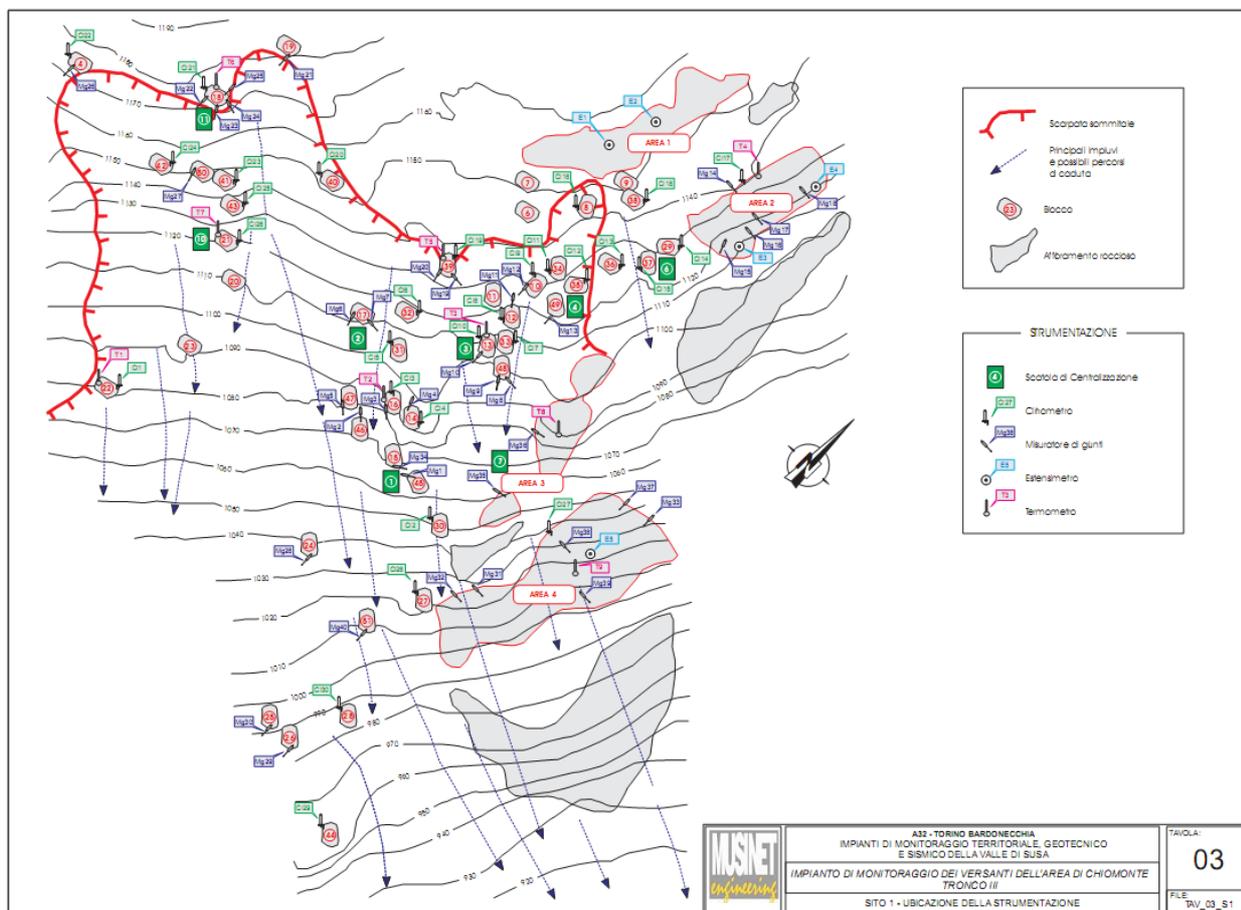


Fig. 4 – Ubicazione dei massi monitorati e tipologia della strumentazione.

6.4 Aspetti applicativi

Nel presente capitolo sono descritte sinteticamente le principali criticità geomorfologiche relative alla soluzione di svincolo in Progetto.

- **Soluzione 4bis:** Gli svincoli saranno realizzati in viadotto la cui rampa di uscita sottopassa il viadotto esistente della A32; le due rampe di accesso e uscita si uniscono nella parte terminale in corrispondenza del versante della dorsale che separa le gorge della Dora dalla vallata del Clarea. Parte delle fondazioni dei viadotti potrebbero interessare localmente i depositi più fini di origine glacio-lacustre caratterizzati da proprietà geotecniche più scadenti. Le basi delle pile dei viadotti nel fondovalle Clarea devono essere protette da terrapieni paramassi le cui caratteristiche devono essere paragonabili almeno a quelle delle strutture esistenti a protezione delle pile del viadotto della A32, come richiesto per altro dalle prescrizioni del CIPE. La tratta che si innesta sul versante della dorsale tra Dora e Clarea invece attraverserà mediante viadotto a mezzacosta un ripido versante, presumibilmente costituito da depositi glaciali, con lavorazioni problematiche data la pendenza del versante stesso ($>25^\circ$).

6.5 Caduta Massi

Il versante a monte dell'area di cantiere è caratterizzato da ampi settori soggetti a crolli in roccia connessi alla presenza di un fenomeno gravitativo complesso di grandi dimensioni, denominato "Frana de La Maddalena" (capitolo 6.3).

L'indagine di campagna, presente nello studio di Carraro (Indagini sulla stabilità del tratto di versante sinistro della valle di Susa incombente sul costruendo "Viadotto Clarea") eseguita per conto della S.I.T.A.F. durante la realizzazione del Viadotto Clarea per l'autostrada del Frejus, ha permesso di individuare le posizioni dei massi caduti al piede del versante e le loro volumetrie; i massi cartografati sono riportati nella carta geologico-geomorfologica (PD2-C3A-MUS-0904-A-AP-PLA). Lo studio di Carraro è stato considerato come punto di partenza anche per la definizione delle volumetrie massime più probabili dei massi e per la simulazione di caduta massi necessaria per quantificare la pericolosità legata a fenomeni di crollo e rotolamento.

In particolare la cubatura dei massi caduti risulta nel complesso compresa fra circa 8 e 2619 m³; i valori più frequenti sono:

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

Al fine di quantificare la pericolosità legata a fenomeni di crollo e rotolamento massi, è stata condotta una simulazione numerica di caduta massi mediante il software Masco v.2 lungo la sezione di massima pendenza S-S' (**Fig. 5**), avendo precedentemente determinato le aree di potenziale distacco. Queste sono state individuate lungo la porzione di versante compresa tra quota 900 m fino a quota 1100 m circa, nel settore in cui affiora il substrato cristallino. La sezione di simulazione, dato l'andamento pressoché pianeggiante della superficie topografia, è stata cautelativamente arrestata leggermente a monte delle protezioni paramassi esistenti attorno alle pile del viadotto della A32.

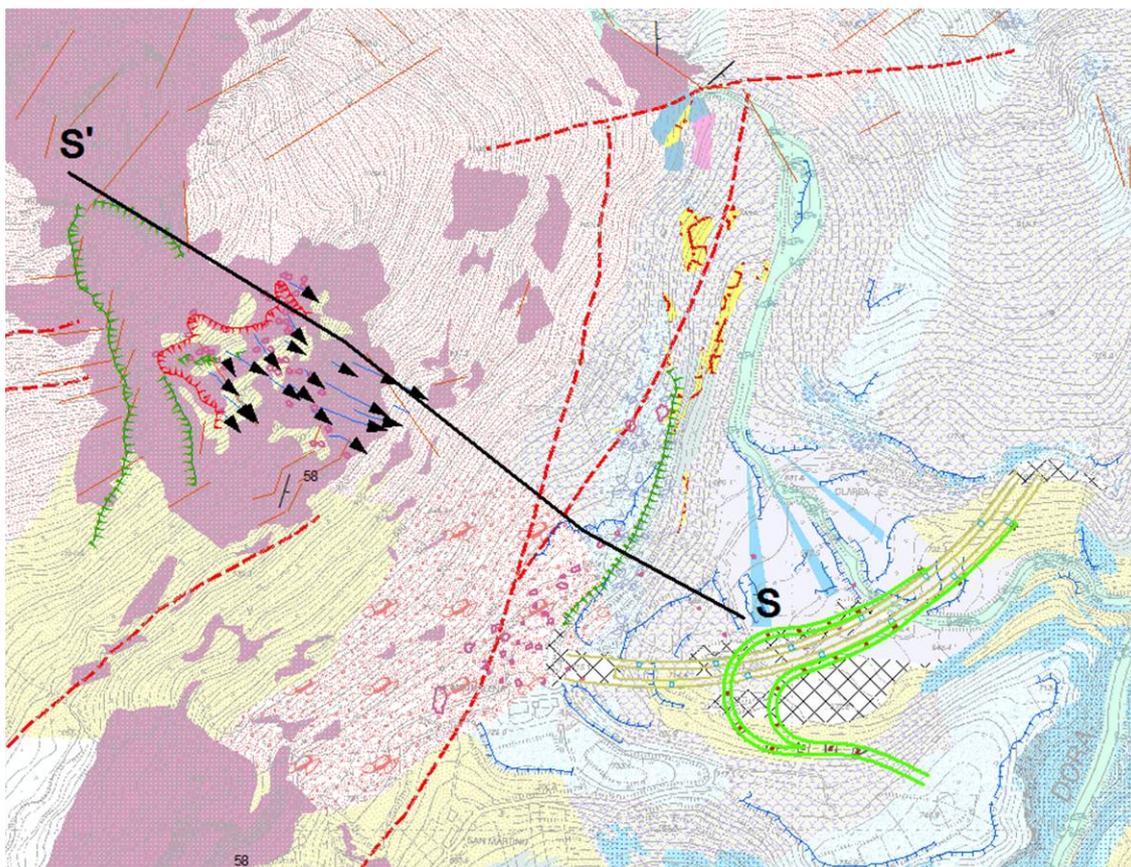


Fig. 5 – Stralcio della carta geomorfologica con rappresentata la sezione S-S' utilizzata nelle verifiche di rotolamento massi.

Nel modello il moto è supposto bidimensionale lungo il piano x e z, e il pendio è discretizzato in una serie di segmenti retti. Ai fini della simulazione, come richiesto dal software utilizzato, sono stati adottati i seguenti parametri di input:

- volume del blocco pari a 1 m³;
- zona di distacco: affioramenti rocciosi mediamente fratturati, peso specifico del blocco pari a 28 kN/m³;
- quota zona di distacco: da 900 m a 1100 m;
- zona inferiore: depositi di versante ricoperti da fitta vegetazione arbustiva;
- blocco assunto come puntiforme (lumped-mass), considerando solo il moto del suo baricentro;
- numero simulazioni: 500;

Sono state considerate le azioni sismiche ($\sigma_h=0,032$; $\sigma_v=0,016$), mentre non sono stati supposti fenomeni di frantumazione dei blocchi (a favore di sicurezza). Seguendo un approccio cautelativo si è scelto di attribuire una velocità iniziale non nulla ma bensì pari a 0,5 m/s.

I parametri che definiscono l'interazione tra il blocco roccioso e il versante sono descritti dal coefficiente di restituzione (E) e dall'angolo d'attrito massa-versante (ϕ). I coefficienti sono principalmente funzione della litologia, della copertura vegetale del versante e delle asperità del terreno in relazione alle dimensioni del masso.

Il coefficiente di restituzione (E) è definito come il rapporto fra la velocità prima e dopo l'impatto del masso con il terreno ($V1/V0$ dove $V1$ è la velocità dopo l'urto, $V0$ prima dell'urto).

L'angolo d'attrito masso-versante descrive la perdita d'energia cinetica nei tratti di pendio in cui il masso si muove rotolando o scivolando.

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. Si riporta di seguito una sintesi dei parametri utilizzati nelle simulazioni (*Tabella 1*).

Tipo substrato	Coefficiente di restituzione E (-)	Angolo d'attrito masso-versante Φ (°)
roccia affiorante integra	0.85	22
copertura detritica con vegetazione folta	0.6	29

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

Al fine di valutare condizioni differenti di crollo, i parametri E (coeff. di restituzione), ϕ (angolo d'attrito masso-versante), e V (volume in caduta) sono stati definiti dal programma di calcolo su base probabilistica (metodo di Montecarlo).

6.5.1 Risultati della simulazione

La simulazione permette di definire l'altezza di rimbalzo dei blocchi, la loro velocità e l'energia dei blocchi in un determinato punto lungo la sezione di simulazione. Cautelativamente è stato scelto il punto A (a quota 682 circa) che coincide all'incirca con l'ultimo cambio significativo di pendenza lungo la sezione di calcolo.

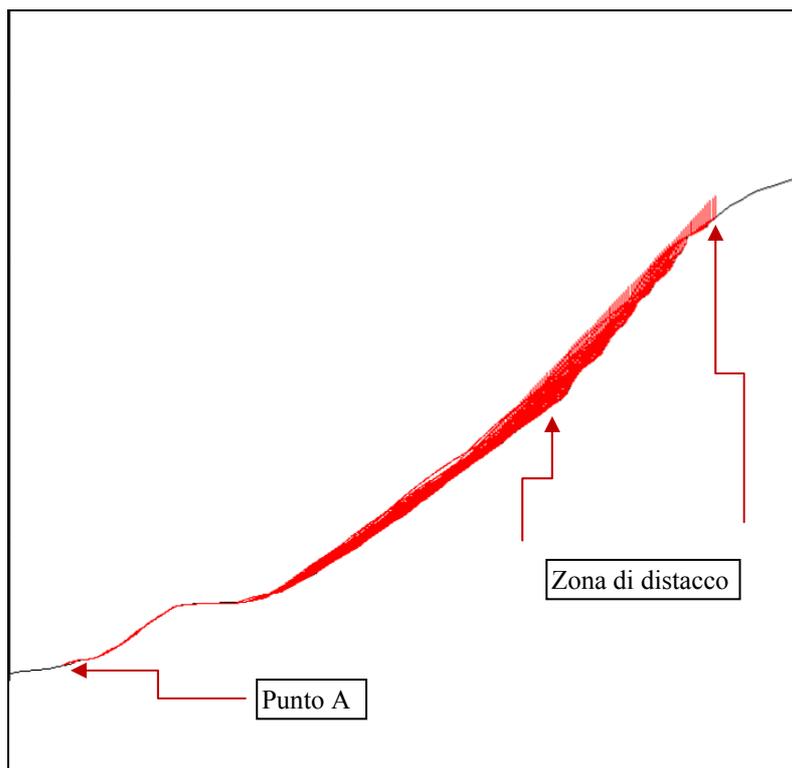


Figura 6 – Profilo della sezione di calcolo con le traiettorie più probabili considerando una zona di distacco collocata tra 900 m e 1100 m.

Innanzitutto le simulazioni indicano che un ridotto numero di massi (7 su 500 per l'esattezza) staccatisi dalla parte di versante compresa tra le quote 900 e 1100 m potrebbe raggiungere l'area di cantiere.

Le altezze di rimbalzo dei blocchi nel punto A (682 m circa) sono dell'ordine di circa 3.4 m. Tale valore viene calcolato applicando la relazione seguente:

$$Hr = e^{qr} - qA$$

Dove :

Hr = altezza rimbalzi espressa in m;

qr = quota assoluta massima del rimbalzo nel punto A espressa sotto forma di logaritmo naturale corrispondente a 6,53 (Figura 7);

qA = quota assoluta del punto A espressa in m s.l.m. (682 m);

Le velocità osservate in corrispondenza del punto A sono comprese tra 13 e i 3 m/s, con un valore medio di 9,36 m/s (Figura 8).

Le energie nel punto A sono corrispondenti a circa 640 kJ, essendo l'energia massima definita dall'equazione:

$$Emax = e^{Ec}$$

Dove:

Emax= massima energia del blocco nel punto A espressa in kJ;

Ec= logaritmo naturale dell'energia cinetica massima attesa nel punto A (6,46 circa in Figura 9)

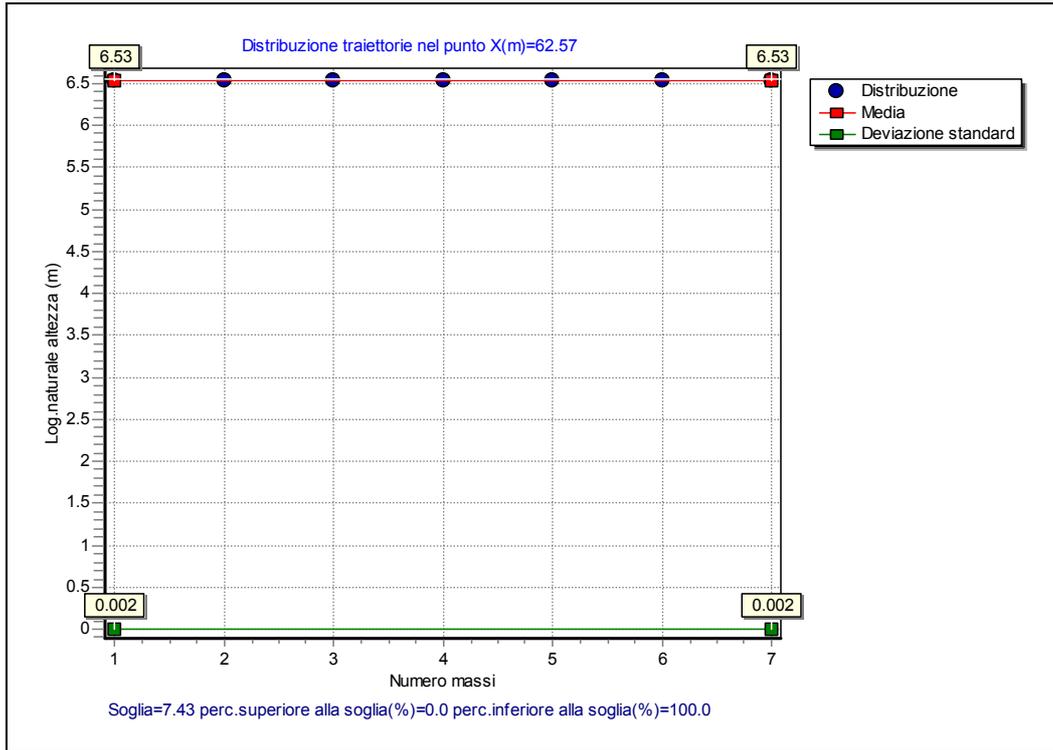


Figura 7 – Grafico in scala logaritmica dei rimbalzi a quota 682 m circa (Punto A).

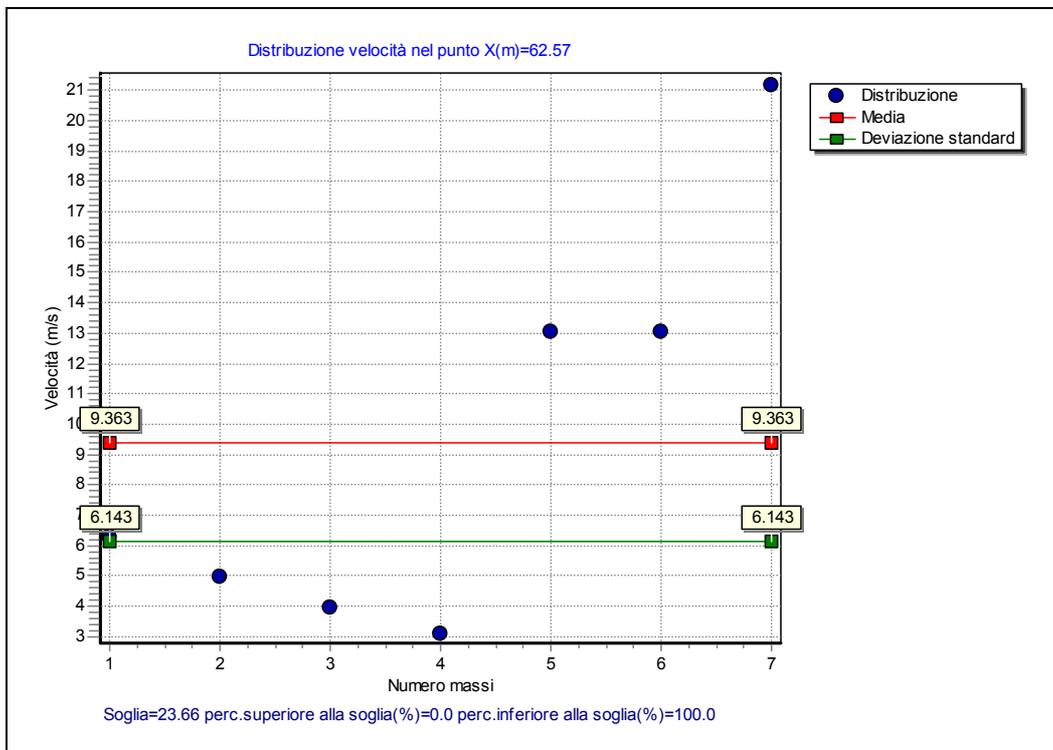


Figura 8 – Grafico delle velocità a quota 682 m circa (Punto A).

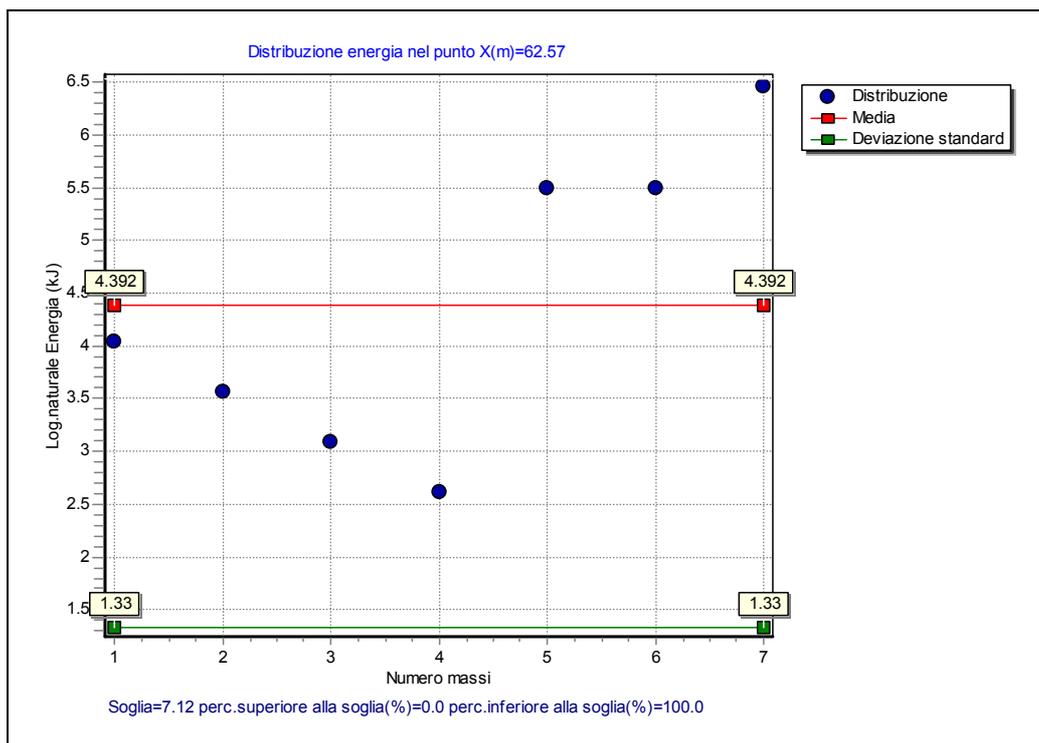


Figura 9 – Grafico in scala logaritmica dell'energia cinetica a quota 682 m circa (Punto A).

I risultati dell'analisi condotta per blocchi di dimensioni pari a 1m³ sono riassunti nella tabella che segue:

Altezza di rimbalzo (m)	Velocità media (m/sec)	Energia (kJ)
3,4	9,36	640

Le simulazioni sopradescritte realizzate per blocchi di dimensioni pari a 1m³ 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 6.5); le energie valutate per blocchi fino a 300 m³ sono riassunte nella tabella successiva:

Dimensioni del masso (m ³)	Energia attesa (kJ)
1	640
50	32000
100	64000
300	192000

Tabella 2 – Energia massima attesa per i massi a quota 682 m s.l.m. (punto A)

Per il dimensionamento di interventi passivi a protezione delle pile dello svincolo occorre inoltre tenere in considerazione anche la dimensione del masso; poiché le altezze massime di rimbalzo di un masso puntiforme a quota 682 m s.l.m. sono di circa 3,4 m, l'altezza del rilevato deve essere almeno superiore a questo valore più il diametro del masso di progetto. Ad esempio un masso cubico di circa 300 m³ avrà un lato di circa 6.5 m, e pertanto il rilevato di protezione, supponendo di realizzarlo nel punto A, dovrà avere altezza di almeno 10 m. I rilevati paramassi esistenti a protezione delle pile della A32 hanno forma arcuata e sono caratterizzati da una larghezza di base massima mediamente di circa 24 m, da

una larghezza massima in sommità mediamente di circa 9 m e da un'altezza massima, valutata nella parte a monte, mediamente di circa 7 m. Come da richiesta del CIPE occorrerà realizzare a protezione delle pile a rischio delle opere di difesa che “dovranno avere almeno le medesime caratteristiche di durabilità e efficienza di quelle poste a protezione dell'autostrada”.

La realizzazione di opere di difesa per la protezione delle pile dello svincolo non può ignorare la presenza di massi di dimensioni notevoli, fino a oltre 2000 m³ nella parte alta del versante, per i quali non è realistico pensare ad interventi risolutivi. Si ritiene quindi necessario il mantenimento ed eventuale estensione della rete di monitoraggio realizzata da Musinet sulla parte alta del versante. La rete dovrà essere integrata con un sistema di allerta che segnali in tempo reale il superamento di soglie di movimento, individuate da studi specifici e sulla base dei movimenti finora registrati, per attivare procedure di evacuazione, chiusura del cantiere, dell'autostrada, etc.

6.6 Forme legate all'attività fluvio torrentizia– pericolosità di conoide

Le opere in progetto interessano parte dell'apparato di conoide alluvionale del Torrente Clarea. Questo aspetto rappresenta un elemento di criticità, in quanto le opere ricadenti nell'area di conoide potrebbero essere interessate da trasporto in massa connesso all'occorrenza di colate detritiche in occasione di fenomeni pluviometrici intensi. Il PAI, consultato sul sito web http://www.adbpo.it/maplab_projects/webgis nel mese di ottobre 2012, classifica il conoide del Torrente Clarea come conoide attivo – Ca (Figura 10).

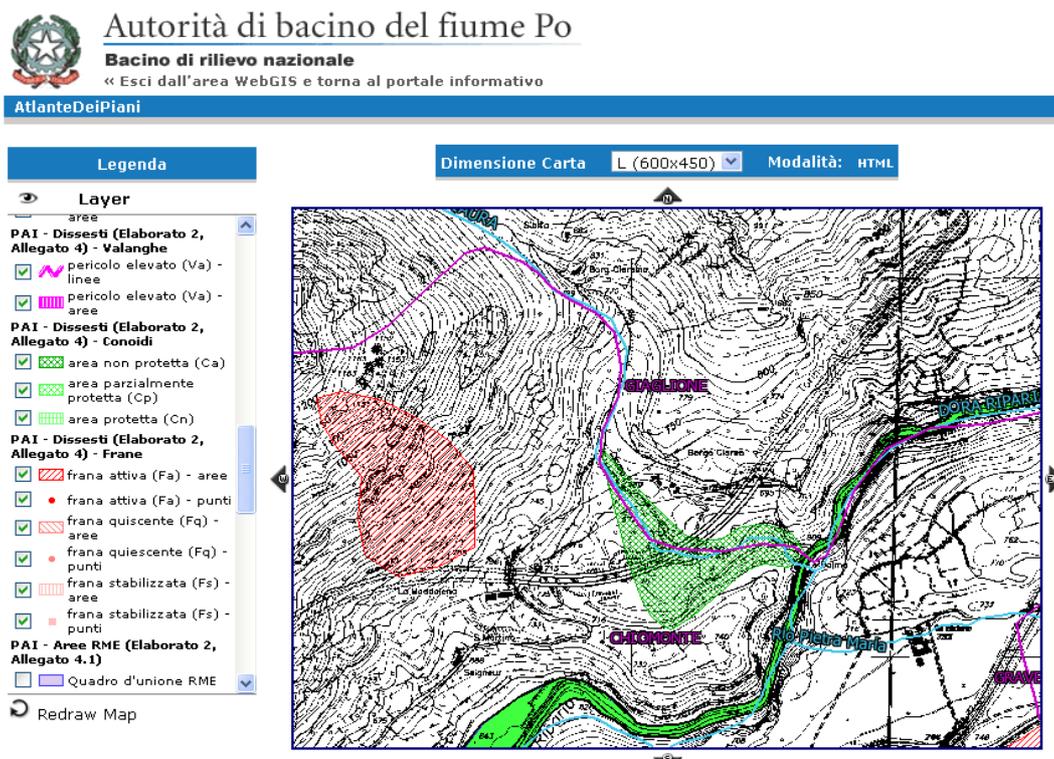


Figura 10 – Stralcio carta dei dissesti e pericolosità geomorfologica del PAI: in verde retinato il conoide attivo non protetto del Torrente Clarea Ca, in verde la fascia fluviale A della Dora Riparia; in rosso rigato la frana attiva della Maddalena Fa (Fonte: sito web http://www.adbpo.it/maplab_projects/webgis consultato in settembre 2012).

Il torrente Clarea è stato caratterizzato nel corso dell'evento alluvionale del 2000 da localizzati fenomeni di trasporto e deposizione di materiale grossolano lungo l'asta torrentizia e da colamenti della coltre superficiale a valle di una scarpata antropica rappresentata in Figura 11.



Figura 11 Stralcio carta dell'evento alluvionale del 2000 e 2008: in viola aree interessate da deposizione grossolana (evento 2000); la linea nera indica una scarpata antropica; in giallo colamenti della coltre superficiale (evento 2000); triangolo blu ponte danneggiato Borgo Clarea (evento 2008) (Fonte: sito web http://www.adbpo.it/maplab_projects/webgis consultato in dicembre 2012).

Nel corso dell'evento alluvionale del 2008 il ponte sul torrente Clarea nella frazione Borgo Clarea è stato gravemente danneggiato a seguito dell'occlusione da parte di materiale vegetale Figura 12. Il corso d'acqua in questo tratto risulta mediamente inciso presentando delle scarpate di 2-3 m di altezza.

Sebbene l'alveo del torrente Clarea sia ben inciso nel suo tratto terminale (da quota 660 m s.l.m. circa fino alla confluenza con il fiume Dora Riparia), al fine di mitigare il rischio di trasporto e deposizione di materiale torrentizio grossolano, peraltro già verificatosi durante l'evento del 2000, sulla base anche dei risultati delle verifiche idrauliche in corso di realizzazione, potrebbe essere da prevedere la realizzazione di opere di trattenuta del trasporto solido. Sono inoltre da prevedere periodici interventi di pulizia delle vegetazione caduta in alveo.



Figura 12 – Attraversamento sul torrente Clarea in località Borgo Clarea durante l'evento alluvionale del maggio 2008 (Fonte: sito web http://www.adbpo.it/maplab_projects/webgis consultato in dicembre 2012)

6.7 Assetto idrogeologico dell'area di progetto

Di seguito è illustrata la schematizzazione delle unità affioranti in complessi idrogeologici e il modello idrogeologico di riferimento deducibile sulla base delle caratteristiche litologiche dedotte dalle stratigrafie dei sondaggi disponibili, sulla base dei risultati delle prove di permeabilità realizzate durante le differenti campagne indagini e sulla base dell'interpretazione dei dati piezometrici. La distribuzione dei differenti complessi idrogeologici riconosciuti è riportata nella Carta Idrogeologica (PD2-C3A-MUS-0851-A-AP-PLA). Nell'area di studio si possono distinguere nel sottosuolo due principali unità idrogeologiche, distinguibili per la loro omogeneità di costituzione, corrispondenti alle due principali unità litotecniche potenzialmente presenti, distinte e descritte in dettaglio nel capitolo 5.

Dal basso verso l'alto sono distinguibili le seguenti unità idrogeologiche:

- basamento roccioso (costituito dai calcescisti della Zona Piemontese);
- depositi quaternari (depositi glaciali e fluvio-glaciali, depositi alluvionali, depositi gravitativi);

I depositi quaternari (capitolo 5.3) che rappresentano i terreni di imposta delle fondazioni delle rampe di svincolo, affiorano con continuità lungo tutto il corridoio di progetto e presentano una potenza di almeno 65 m in corrispondenza dei sondaggi S91 e S92 che sulla base dei dati attualmente disponibili sono gli unici ad avere incontrato il basamento roccioso. Tale unità è costituita da depositi di origine continentale rappresentati da prevalenti ghiaie e sabbie, con ridotto contenuto in limo ed argilla, e da sabbie limose con ghiaia, caratterizzate da permeabilità da media a elevata. Quest'unità è sede dell'acquifero libero

superficiale. Le informazioni relative alla permeabilità dei terreni sono state ricavate dalle prove di permeabilità Lefranc eseguite nei fori di sondaggio realizzati nel 2011-2012 per il Progetto del Tunnel della Maddalena e dalle prove di permeabilità realizzate nei 5 sondaggi attualmente disponibili eseguiti a supporto della progettazione definitiva dello svincolo di Chiomonte. Le prove di permeabilità attualmente disponibili forniscono dei valori del coefficiente di permeabilità variabili tra $1E-07$ nei terreni limosi (grado di permeabilità basso) ed un valore di permeabilità medio dell'ordine di circa $7E-04$ m/sec per i terreni ghiaiosi e sabbioso ghiaiosi (indicativo di un grado di permeabilità medio-alto).

La posizione della falda nei depositi quaternari è stata dedotta sulla base dei dati piezometrici disponibili ed oscilla tra circa 11 e 27 metri di profondità rispetto al piano di campagna. Sulla base di tali dati la soggiacenza media risulta circa 18 metri, corrispondente ad una quota media di circa 659 m s.l.m.

Per quanto riguarda i calcescisti del basamento roccioso, non abbiamo attualmente dati in merito al loro grado di permeabilità o se possano essere sede di una falda acquifera. È tuttavia ipotizzabile una permeabilità per fratturazione variabile da bassa a media nelle zone a fratturazione più intensa (indicativamente tra $1E-08$ e $1E-06$ m/sec).

6.8 Dati preesistenti utilizzati per la redazione del Modello geologico di riferimento dell'area di progetto

Per la redazione del Modello geologico di riferimento dell'area di progetto sono stati presi in considerazione i dati disponibili (principalmente stratigrafie sondaggi geognostici con relative prove in foro ed in laboratorio) provenienti dagli studi realizzati per la progettazione di altre infrastrutture (autostrada A32, Tunnel de La Maddalena, collegamento HVDC Italia-Francia) e i dati attualmente disponibili (stratigrafie sondaggi geognostici con relative prove in foro, indagini geofisiche e prove di laboratorio) provenienti dai 5 sondaggi eseguiti a supporto della progettazione definitiva dello svincolo di Chiomonte.

Ad oggi sono stati realizzati solo una parte dei sondaggi previsti dal piano delle indagini integrative per il Progetto Definitivo presentato all'interno della Relazione geologico-geotecnica redatta in fase di Dossier Guida (PD2-C3A-MUS-0003-0-PA-NOT). Attualmente sono disponibili solo le stratigrafie di 5 sondaggi con relative foto, i risultati delle prove SPT eseguite al loro interno ed i risultati delle prove di permeabilità; mancano i risultati di tutte le altre prove in foro (pressiometriche e geofisiche) ed i risultati delle prove di laboratorio sui campioni di terreno. Il piano delle indagini integrative per il Progetto Definitivo per l'ipotesi 4bis si compone nel complesso di 10 sondaggi carotati, spinti sino alla profondità massima di 50 m, al cui interno è prevista la realizzazione di prove in foro di tipo SPT, prove di permeabilità Lefranc, prove pressiometriche Menard e di prove dilatometriche, nel caso venisse incontrato il substrato roccioso. Il piano indagini prevede inoltre che i sondaggi siano attrezzati o con piezometri aperti per la misura della profondità della falda o con tubi cementati per la realizzazione delle indagini geofisiche di tipo down hole, per la misura della $Vs30$, e cross hole in corrispondenza di alcune delle pile in affiancamento, al fine di definire meglio la tipologia e l'ingombro delle fondazioni delle pile dell'autostrada A32 esistente. Il piano delle indagini si completa con una serie di prove di laboratorio su campioni di terreno ed eventualmente roccia prelevati dai fori di sondaggio.

Nelle tabelle successive sono riassunte le principali caratteristiche del piano delle indagini geognostiche redatto a supporto della progettazione definitiva.

Piano delle indagini per Svincolo di Chiomonte							Prove in foro						Campioni rimaneggiati	Prelievo campioni indisturbati	
Ipotesi progettuale	Codice sondaggio	Tipologia sondaggio	Opera di riferimento	Lunghezza	Strumentazione tipo	Strumentazione m lineari	SPT ogni 3 m	Permeabilità Lefranc (n°)	Prova dilatometrica in roccia	Prove geofisiche cross-hole	Prove geofisiche down-hole (Vs30)	Prove pressiometriche	n°	Terreno (n°)	Roccia (n°)
Ipotesi S4bis	S4b-1	carotato	S4bis IP5 rampa ingresso	40	piezometro t.a. 2"	40	13	1				2	3	2	
	S4b-2	carotato	S4bis IP2 rampa ingresso	40	tubo per prove down-hole	40	13	1			1	2	3	2	
	S4b-3	carotato	S4bis BP3;	40	piezometro t.a. 2"	40	13	1	1			2	3	2	3
	S4b-4	carotato	S4bis BP1;	40	tubo per prove down-hole	40	13	1	1		1	2	3	2	3
	S4b-5	carotato	S4bis UP6 rampa uscita	40	piezometro t.a. 2"	40	13	1				2	3	2	
	S4b-6	carotato	Sovrappasso strada per Borgo Clarea in progetto	50	piezometro t.a. 2"	50	16	2	2			3	5	2	3
	CH4b-1	carotato	S4bis IP7 rampa ingresso;	40	tubo per prove down-hole	40	13	1		1	1	2	3	2	
	CH4b-2	carotato	S4bis IP7 rampa ingresso;	40	tubo per prove down-hole	40	13	1		1		2	3	2	
	CH4b-3	carotato	S4bis UP8 rampa uscita;	40	tubo per prove down-hole	40	13	1		1	1	2	3	2	
	CH4b-4	carotato	S4bis UP8 rampa uscita;	40	tubo per prove down-hole	40	13	1		1		2	3	2	

Tab. 3 – Tabella riassuntiva del piano delle indagini geognostiche previste per l'ipotesi S4bis

Svincolo di Chiomonte: programma delle prove di laboratorio					Campioni rimaneggiati	Prelievo campioni indisturbati		Prove su terre						Prove su roccia			
Ipotesi progettuale	Codice sondaggio	Tipologia sondaggio	Opera di riferimento	Lunghezza	n°	Terreno (n°)	Roccia (n°)	Granulometrie	limiti di Atterberg	contenuto d'acqua naturale	Peso di volume	Taglio diretto	edometrica	triassiali UU	triassiale roccia	compressione uniassiale	Point load
Ipotesi S4bis	S4b-1	carotato	S4bis IP5 rampa ingresso	40	3	2		5	5	5	5	2					
	S4b-2	carotato	S4bis IP2 rampa ingresso	40	3	2		5	5	5	5	2					
	S4b-3	carotato	S4bis BP3;	40	3	2	3	5	5	5	5	1		1	2	1	5
	S4b-4	carotato	S4bis BP1;	40	3	2	3	5	5	5	5	2			2	1	5
	S4b-5	carotato	S4bis UP6 rampa uscita	40	3	2		5	5	5	5	2					
	S4b-6	carotato	Sovrappasso strada per Borgo Clarea in progetto	50	5	2	3	7	7	7	7	3		1	2	1	8
	CH4b-1	carotato	S4bis IP7 rampa ingresso;	40	3	2		5	5	5	5	2					
	CH4b-2	carotato	S4bis IP7 rampa ingresso;	40	3	2		5	5	5	5	1		1			
	CH4b-3	carotato	S4bis UP8 rampa uscita;	40	3	2		5	5	5	5	2					
	CH4b-4	carotato	S4bis UP8 rampa uscita;	40	3	2		5	5	5	5	2					

Tab. 4 – Tabella riassuntiva del programma delle prove di laboratorio previste per l'ipotesi S4bis

Attualmente sono stati realizzati solo 5 dei sondaggi previsti a supporto della progettazione definitiva: S4b-1, S4b-2, S4b-5, CH4b-1 e CH4b-2 (Tab. 5).

Nella tabella successiva sono elencate tutte le indagini che ricadono nell'area di progetto o nelle sue immediate vicinanze, realizzate in differenti fasi a supporto della progettazione di altri Progetti (A32, cunicolo de La Maddalena, cavidotto HVDC Italia-Francia) e a supporto della progettazione definitiva dello svincolo de La Maddalena, che sono state prese in considerazione ed interpretate per la redazione del Modello Geologico di Riferimento locale. L'ubicazione di tutte le indagini ad oggi disponibili è riportata nella Planimetria con ubicazione delle indagini (PD2-C3A-MUS-0905-A-AP-NOT).

All'interno di alcuni di questi sondaggi sono state realizzate prove in foro (S.P.T., prove di permeabilità, prove pressiometriche, dilatometriche e geofisiche) e sono stati prelevati alcuni campioni di terreno per le prove geotecniche di laboratorio.

Sulla base di questi dati è possibile individuare nell'area di studio due principali unità litotecniche.

Partendo dal basso è stato possibile distinguere:

- Basamento roccioso che dovrebbe essere costituito dai calcescisti della zona piemontese; tale unità non dovrebbe essere interessata dalla realizzazione delle fondazioni delle opere in progetto, dal momento che sulla base dei dati disponibili la roccia è stata incontrata solo dai sondaggi S91 e S92 a partire da circa 65 m di profondità. Sulla base delle conoscenze attuali non si può tuttavia escludere che il basamento roccioso possa essere incontrato durante la realizzazione della galleria della Parte comune.
- Depositi quaternari comprendenti depositi glaciali e fluvio-glaciali, depositi alluvionali e depositi gravitativi; dal punto di vista litologico si tratta di prevalenti depositi granulari ghiaioso sabbiosi o sabbioso ghiaiosi ai quali si possono trovare intercalati livelli di sedimenti più fini, costituiti da limi-sabbiosi, localmente con ghiaia, che possono formare orizzonti discontinui ma di potenza anche plurimetrica.

Progettazione definitiva Svincolo di Chiomonte: indagini esistenti									
Codice sondaggio	Profondità (m)	Fase progettuale	Posizione	Falda (m)	Litotipo	Prove Permeabilità k (m/sec)	Profondità (m) e tipo prova permeabilità	Prove pressiometriche	Prove dilatometriche
SG14	15,00	PD cavidotto Terna	Piazzale imbocco Ovest	assente	0-0,25: conglomerato bituminoso 0,25-9,8: ghiaia con ciottoli e blocchi in matrice sabbiosa; livello di limo sabbioso tra 8,5 e 8,7 9,8-15: ghiaia e sabbia				
SG13	15,00	PD cavidotto Terna	Piazzale imbocco Est	assente	0-0,7: conglomerato bituminoso e sottofondo 0,7-6: ghiaia con rari ciottoli in matrice sabbioso-limosa 6-9: sabbia da limosa a con limo con ghiaia 9-15: ghiaia con rari ciottoli in matrice sabbiosa	1,44E-04	Lefranc 4,5-6		
IRE	21,00	PE A32	Imbocco Est		0-2: terreno vegetale (?) 2-21: Ghiaia con ciottoli e blocchi in matrice sabbiosa-limosa (?)				
P2	32,00	PE A32	Viadotto Clarea pila n. 2	16,90	0-3: sabbia limosa con ciottoli di micascisto 3-16: terreno sabbioso con ciottoli 16-20,3: limo con intercalazioni di ghiaia con alcuni ciottoli 20,3-22,35: limo inglobante ghiaia con alcuni ciottoli 22,35-26: sabbia ghiaiosa con ciottoli 26-32: limo con ghiaia e ciottoli di micascisto				
SP1	24,50	PE A32	Viadotto Clarea spalla n. 1	17,00	0-4,9: terreno limoso con ghiaia e ciottoli 4,9-6,35: trovante di gneiss 6,35-6,9: terreno limoso con ghiaia 6,9-16,7: sabbia fine con ghiaia e ciottoli 16,7-17,2: limo argilloso 17,2-24,5: sabbia limosa con ciottoli				
P9	28,40	PE A32	Viadotto Clarea pila n. 9	11,00	0-3,2: terreno sabbioso con elementi ghiaiosi 3,2-14,2: sabbia ghiaiosa con ciottoli e locali trovanti di calcescisto (d. max 1 m) 14,2-16,6: limo inglobante ciottoli 16,6-23,4: sabbia ghiaiosa con livello di ciottoli micascistosi 23,4-25,9: limo inglobante sabbia e ghiaia 25,9-27,1: sabbia ghiaiosa 27,1-28,4: limo sabbioso con ciottoli con intercalazioni di livelli limosi				
P5	40,00	PE A32	Viadotto Clarea pila n. 5	12,00	0-3,3: sabbia con ghiaia e ciottoli 3,3-4: trovante di calcescisto 4-4,75: limo con ciottoli 4,75-5,05: trovante di calcescisto 5,05-7,9: sabbia ghiaiosa con ciottoli e trovanti 7,9-11,7: limo inglobante ghiaia e ciottoli con trovanti 11,7-20: sabbia limosa con ciottoli e trovanti 20-28,5: sabbia ghiaiosa con ciottoli 28,5-31,35: ghiaia con ciottoli e livelli limosi 31,35-40: limo con intercalazioni di livelli sabbiosi ciottolosi				
P12A	28,60	PE A32	Viadotto Clarea pila n. 12		0-6,2: sabbia limosa con ghiaia e ciottoli micascistosi 2-7: trovante 7-17,8: sabbia limosa con ghiaia e ciottoli micascistosi e trovanti 17,8-23,8: sabbia ghiaiosa con ciottoli micascistosi 23,8-24,8: limo con ciottoli 24,8-26,7: sabbia ghiaiosa con ciottoli micascistosi 26,7-28,6: conglomerato sabbioso limoso con ghiaia e ciottoli				
P12B	29,00	PE A32	Viadotto Clarea pila n. 12 (12 m in direzione pila n. 6)	18,00	0-13,85: sabbia limosa con ghiaia ciottoli micascistosi e trovanti 13,85-14,1: limo 14,1-18,4: sabbia limosa con ghiaia ciottoli micascistosi e trovanti 18,4-24,8: sabbia ghiaiosa con ciottoli micascistosi 24,8-25,6: limo con ciottoli 25,6-27,1: sabbia ghiaiosa con ciottoli micascistosi 27,1-29: conglomerato sabbioso limoso con ghiaia e ciottoli				
S12	24,00	PE A32	prossimità imbocco Est galleria Ramat		0-6: sabbia limosa e ciottoli 6-15: sabbia fine limosa 15-24: ghia in matrice limoso-sabbiosa con ciottoli e blocchi (max 1 m)				

Progettazione definitiva Svincolo di Chiomonte: indagini esistenti										
Codice sondaggio	Profondità (m)	Fase progettuale	Posizione	Falda (m)	Litotipo	Prove Permeabilità k (m/sec)	Profondità (m) e tipo prova permeabilità	Prove pressiometriche	Prove dilatometriche	
S13	24,10	PE A32	prossimità imbocco Ovest galleria Giaglione		0-2,7: sabbia fine e media limosa con ghiaia e ciottoli 2,7-14,6: ghiaia in matrice sabbiosa con ciottoli e blocchi 14,6-19,4: sabbia media e grossa limosa con ghiaia 19,4-24,1: ghiaia in matrice sabbiosa grossolana con ciottoli					
S1	30,00	Tunnel della Maddalena	Discarica per accumulo di materiale di risulta	18,00	0-5,3: terreno di riporto ghiaia sabbiosa con scarsa frazione limosa e ciottoli sparsi moderatamente addensata 5,3-7,2: siltite debolmente sabbiosa moderatamente addensata 7,2-16,2: limo debolmente argilloso con intercalati subordinati livelli limoso sabbiosi da poco a moderatamente consistente 16,2-23,6: ghiaia eterometrica con sabbia da debolmente limosa a limosa; debole alterazione e ossidazione, da moderatamente addensata a addensata 23,6-30: ghiaia eterometrica con ciottoli e sabbia da debolmente limosa a limosa; debole alterazione e ossidazione, addensata					
S2	20,00	Tunnel della Maddalena	Discarica per accumulo di materiale di risulta	19,00	0-3,8: terreno di riporto ghiaia sabbiosa con scarsa frazione limosa e ciottoli sparsi moderatamente addensata 3,8-7,4: ghiaia ciottolosa con sabbia debolmente limosa addensata 7,4-13,7: sabbia limosa con subordinata frazione ghiaiosa e ciottoli sparsi; discreta ossidazione da moderatamente addensata a addensata 13,7-15: siltite debolmente sabbioso fine moderatamente addensata 15-18,1: limo debolmente argilloso con intercalati subordinati livelli limoso sabbioso, da poco a moderatamente consistente 18,1-20: sabbia limosa con raro ghiaietto sparso discreta ossidazione, moderatamente addensata					
S90	75,00	Tunnel della Maddalena	Discarica per accumulo di materiale di risulta	27,50	0-7,9: terreno di riporto ghiaioso-sabbioso con ciottoli 7,9-10,1: terreno vegetale sabbioso-limoso 10,1-20: ghiaia in matrice sabbioso-limoso con ciottoli 20-21: limo sabbioso 21-49,5: sabbia limosa e ghiaia 49,5-51,5: ghiaia e ciottoli 51,5-60: alternanza di livelli di ghiaia sabbiosa e limo sabbioso con ghiaia 60-73: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limoso 73-75: limo-sabbioso grigiastro	2,78E-03	Lefranc 19,5-20	4	2	
						4,17E-03	Lefranc 30-31			
S91	80,00	Tunnel della Maddalena	Discarica per accumulo di materiale di risulta	24,20	0-7,6: terreno di riporto ghiaioso-sabbioso con ciottoli 7,6-10,4: terreno vegetale sabbioso-limoso 10,4-20,2: ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limoso 20,2-23,4: sabbia limosa con ghiaia 23,4-42: ghiaia parzialmente alterata in matrice sabbioso-limoso 42-46,2: sabbia limosa e ghiaia 46,2-50: ghiaia in matrice sabbioso-limoso 50-60,5: sabbia limosa con ghiaia 60,5-64,5: ghiaia in matrice limoso-sabbiosa 64,5-80: calcescisti filladici fratturati ed alterati	1,11E-04	Lefranc 16,5-17			
						2,29E-04	Lefranc 27-27,5			
						1,11E-04	Lefranc 36-36,5			
S92	75,00	Tunnel della Maddalena	Discarica per accumulo di materiale di risulta		0-9,1: terreno di presumibile riporto; ghiaia con sabbia limosa e ciottoli 9,1-34,5: ghiaia con sabbia medio-grossa limosa con ciottoli e blocchi 34,5-44,5: sabbia grossa e media limosa, localmente limo sabbioso, con ghiaia 44,5-54,5: ghiaia con ciottoli e sabbia medio-grossa limosa nocciola 54,5-60,7: limo sabbioso grigiastro con ghiaia 60,7-65,8: calcescisto fratturato o in scaglie e frammenti in matrice sabbioso-limoso grigiastra 65,8-75: calcescisto fratturato, localmente molto fratturato e alterato			3	2	
S1	30,00	Tunnel della Maddalena	berlinese versante imbocco galleria		0-3: Sabbia ghiaiosa con ciottoli 3-10: Sabbia limosa con ghiaia e ciottoli 10-12,5: ghiaia sabbiosa 12,5-20,2: limo sabbioso, passante a sabbia limosa, con ghiaia 20,2-27: ghiaia e sabbia limosa 27-30: sabbia limosa con ghiaia	1,81E-06	Lefranc 7,5-8	1		
						2,05E-07	Lefranc 15,5-16			
S2	40,00	Tunnel della Maddalena	berlinese versante imbocco galleria		0-2: terreno vegetale limoso-sabbioso con ghiaia 2-30: sabbia limosa nocciola, localmente limo sabbioso, con ghiaia e rari ciottoli 30-35: sabbia limosa grigiastra e ghiaia 35-40: limo sabbioso con ghiaia	2,19E-07	Lefranc 17,5-18	4		
						1,19E-07	Lefranc 23,5-24			
S3	30,00	Tunnel della Maddalena	berlinese versante imbocco galleria		0-0,4: terreno vegetale limoso-sabbioso con ghiaia 0,4-9,2: ghiaia sabbiosa con ciottoli 9,2-18: sabbia limosa nocciola con ghiaia e rari ciottoli 18-19: ghiaia sabbiosa con ciottoli 19-30: sabbia limosa con ghiaia	1,79E-05	Lefranc 12,5-13			
						1,80E-05	Lefranc 24-24,5			
S4	30,00	Tunnel della Maddalena	muro sostegno strada accesso cantiere		0-1: terreno vegetale 1-7: limo sabbioso con rara ghiaia 7-10: limo sabbioso e ghiaia 10-11,3: ghiaia con ciottoli 11,3-22: limo sabbioso e sabbia limosa con ghiaia e ciottoli 22-25: ghiaia e blocchi in matrice sabbioso-limoso 25-30: limo sabbioso con ghiaia					
S5	30,00	Tunnel della Maddalena	berlinese a monte strada accesso cantiere		0-8: sabbia limosa con ghiaia e ciottoli 8-10: ghiaia e blocchi in matrice sabbiosa 10-26,8: sabbia limosa, localmente limo sabbioso, con ghiaia 26,8-30: sabbia limosa e ghiaia			2		

Svincolo di Chiomonte: indagini 2012-2013 a supporto della progettazione definitiva									
Codice sondaggio	Profondità (m)	Fase progettuale	Posizione	Falda (m)	Litotipo	Prove Permeabilità k (m/sec)	Profondità (m) e tipo prova permeabilità	Prove pressiometriche	Prove dilatometriche
S4b-1	40,00	PD Svincolo Chiomonte	IP5 rampa ingresso	14,48	0-9,5: terreno di riporto costituito da ghiaia con ciottoli e blocchi in matrice sabbiosa 9,5-12: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limosa 12-16,1: limo sabbioso con ghiaia 16,1-19: ghiaia in matrice sabbioso-limosa 19-20: limo sabbioso con ghiaia 20-33,2: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limosa 33,2-35: sabbia limosa e ghiaia 35-40: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limosa	5,10E-04	Lefranc 20-21	2	
S4b-2	40,00	PD Svincolo Chiomonte	IP2 rampa ingresso		0-15,9: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limosa 15,9-18,7: limo sabbioso con ghiaia 18,7-20: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limosa 20-26,85: limo sabbioso, localmente sabbia limosa, con ghiaia 26,85-40: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limosa	> 10E-01	Lefranc 14-15	2	
S4b-5	40,00	PD Svincolo Chiomonte	UP5 rampa uscita	20,79	0-5: terreno di riporto costituito da ghiaia con ciottoli e blocchi in matrice sabbiosa 5-13: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limosa 13-14,1: limo sabbioso con ghiaia 14,1-20: sabbia limosa con ghiaia 20-22: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limosa 22-24: limo sabbioso con ghiaia 24-40: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limosa	> 10E-01	Lefranc 11-12	2	
CH4b-1	40,00	PD Svincolo Chiomonte	IP6 rampa ingresso		0-11,6: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limosa 11,6-18: sabbia limosa con ghiaia 18-23,5: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limosa 23,5-25,5: limo sabbioso con ghiaia 25,5-40: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limosa	9,80E-04	Lefranc 13-14	2	
CH4b-2	40,00	PD Svincolo Chiomonte	UP8 rampa uscita		0-1,5: terreno di riporto costituito da ghiaia con ciottoli in matrice sabbiosa 1,5-5,3: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limosa 5,3-8: sabbia limosa con ghiaia 8-19: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limosa 19-25: sabbia limosa con ghiaia 25-37,8: ghiaia con ciottoli in matrice sabbioso-limosa 37,8-40: sabbia limosa con ghiaia	> 10E-01	Lefranc 7-8	2	

Tab. 5 – Elenco delle indagini attualmente disponibili nell'area di Progetto

7. Caratterizzazione geotecnica

In tale capitolo verranno caratterizzati da un punto di vista geotecnico i litotipi presenti nell'area di progetto, rappresentati dai depositi quaternari, che costituiscono i terreni di appoggio delle opere d'arte previste, e dal basamento roccioso sottostante. L'analisi delle stratigrafie dei sondaggi realizzati in tale settore ha permesso di ricostruire una sequenza stratigrafica locale caratterizzata dalla presenza di una potente successione di depositi quaternari costituiti da prevalenti depositi glaciali e fluvioglaciali e da depositi di conoide alluvionale. Si tratta di sedimenti prevalentemente di tipo ghiaioso, localmente molto grossolani, e sabbioso con subordinati livelli discontinui di tipo limoso-sabbioso di potenza sino a plurimetrica intercalati nei depositi più grossolani. I sedimenti recenti di origine torrentizia, costituiti prevalentemente da ciottoli e blocchi eterometrici con scarsa o nulla matrice ghiaioso-sabbiosa, sono presenti con modesto spessore limitatamente lungo l'asta del torrente Clarea e del fiume Dora Riparia.

Il basamento roccioso costituito dai calcescisti della Zona Piemontese non dovrebbe essere incontrato durante la realizzazione delle fondazioni dei viadotti, ma non è possibile escludere che il substrato roccioso, affiorante sui versanti delle gorge del Fiume Dora, non possa essere intercettato in corrispondenza della dorsale che separa la valle del torrente Clarea dalle gorge della Dora stessa.

In base alle unità litostratigrafiche principali descritte più nel dettaglio nel capitolo 5.3, in base ai risultati delle prove in foro e di laboratorio realizzate, è possibile riconoscere nell'area di studio cinque unità geotecniche principali:

- unità geotecnica UG1: corrispondente ai depositi superficiali meno addensati di tipo prevalentemente sabbioso-limoso con subordinata ghiaia e ciottoli, che corrispondono all'orizzonte di alterazione superficiale; fanno parte di questa unità anche i terreni descritti nelle stratigrafie dei sondaggi come terreno di riporto;
- unità geotecnica UG2: corrispondente ai depositi prevalentemente costituiti da sabbia (mediamente circa il 40%) e sabbia limosa con ghiaia e subordinati ciottoli. Tali litotipi sono presenti generalmente a partire da circa 15-20 metri di profondità e formano degli orizzonti continui di potenza variabile intercalati ai depositi più grossolani.
- unità geotecnica UG3: comprende i depositi quaternari più grossolani rappresentati principalmente da ghiaie con ciottoli e blocchi (mediamente oltre il 50%) in matrice sabbiosa o sabbioso-limosa subordinata. Tale unità costituisce l'unità dominante
- unità geotecnica UG4: è costituita da depositi più fini limosi o limoso-sabbiosi (contenuto medio in limo circa 50%) con subordinata sabbia e ghiaia e rari ciottoli. Tali terreni formano livelli discontinui di potenza generalmente ridotta (localmente possono tuttavia raggiungere uno spessore di circa 6-7 metri) intercalati a differenti profondità all'interno dei litotipi delle unità sopradescritte.
- unità geotecnica UG5: corrisponde al basamento roccioso rappresentato dai calcescisti della zona piemontese. Il basamento è stato incontrato a partire da circa 65 m di profondità solo dai sondaggi S91 e S92.

La distribuzione nel sottosuolo delle unità geotecniche sopradescritte è riportata graficamente nei profili geologico-geotecnici realizzati in asse alle rampe di entrata ed uscita del nuovo svincolo de La Maddalena (PD2-C3A-MUS-0907-A-AP-PLA; PD2-C3A-MUS-0908-A-AP-PLA). La ricostruzione dell'assetto litostratigrafico locale è stata effettuata prendendo in considerazione i risultati delle indagini preesistenti e delle indagini condotte a

supporto della progettazione definitiva dello svincolo de La Maddalena (capitolo 6.8). Tuttavia, dal momento che per le indagini realizzate a supporto della progettazione della A32 sono disponibili solo i risultati delle prove SPT e le stratigrafie dei sondaggi, mentre mancano la documentazione fotografica dei campioni di terreno e le prove di laboratorio, maggior peso è stato attribuito alle indagini realizzate nel 2011 e 2012 nelle aree di cantiere e di deposito del tunnel de La Maddalena, per le quali è disponibile una documentazione completa (stratigrafie, foto delle cassette dei sondaggi, risultati delle prove in foro e di laboratorio etc.) che ha permesso un'analisi critica dei dati e la possibilità di ricostruzione del dato stesso e ai sondaggi ad oggi realizzati per il Progetto Definitivo dello svincolo de La Maddalena.

Occorre inoltre sottolineare che in particolare per il settore della dorsale che separa il Clarea dalle gorge di Susa alcun dato è attualmente disponibile. In tale settore si prevede la presenza di depositi di origine glaciale costituiti presumibilmente da sabbie e sabbie limose con ghiaia con locale presenza di ciottoli e blocchi di dimensioni anche considerevoli. Tali litotipi sono stati cautelativamente considerati nei profili geologico-geotecnici come appartenenti all'unità geotecnica UG2 (sabbie e sabbie limose con ghiaia e blocchi). In tale settore non può inoltre essere esclusa la presenza di basamento roccioso più superficiale, dal momento che la roccia affiora lungo le pareti delle gorge di Susa, ma alla luce dei dati attuali non è possibile definire con maggior precisione l'assetto litostratigrafico locale, con le conseguenti implicazioni per la realizzazione delle fondazioni delle opere in progetto. Nei profili geologici-geotecnici pertanto la posizione e l'andamento del basamento roccioso sono puramente indicativi e sono stati ipotizzati sulla base della quota degli affioramenti di calcescisti osservati in corrispondenza dell'alveo del Clarea e della profondità alla quale i sondaggi S91 e S92 hanno incontrato il basamento stesso. Cautelativamente nei profili si è pertanto deciso di posizionare il basamento al di sotto della quota prevista per le fondazioni delle rampe del viadotto. Solo il completamento delle indagini previste a supporto della Progettazione Definitiva potrà permettere la ricostruzione dell'assetto litostratigrafico e geotecnico del settore.

Va sottolineato che tale classificazione geotecnica rappresenta comunque una semplificazione dell'assetto litostratigrafico presente nell'area in esame, viste le numerose intercalazioni reciproche delle diverse facies. Pertanto all'interno dell'unità geotecnica rappresentata dalle ghiaie prevalenti, ad esempio, è possibile la presenza di orizzonti sabbiosi e/o limoso-sabbiosi. Le unità geotecniche vanno pertanto intese come unità le cui caratteristiche geotecniche sono definite prevalentemente dalla facies dominante; locali variazioni di granulometria e quindi di caratteristiche geotecniche, vanno comunque prese in considerazione.

La classificazione proposta è basata principalmente sulla distinzione granulometrica dei terreni incontrati dedotta dalle descrizioni delle stratigrafie dei sondaggi e dalle prove granulometriche attualmente disponibili. Nell'ambito dei terreni analizzati, infatti, la granulometria rappresenta il fattore discriminante principale che influenza le caratteristiche e i parametri geotecnici necessari ai fini della progettazione. La presenza di limo piuttosto che di argilla all'interno di una sabbia, infatti, può determinare una netta variazione delle caratteristiche geotecniche (quali ad esempio la coesione, l'angolo di attrito interno, il modulo, la permeabilità etc.) e determina una diversa risposta del terreno allo scavo (maggiore o minore plasticità) o una diversa capacità portante nel caso di fondazioni dirette.

Nella tabella seguente sono riassunti, per le unità geotecniche interessate dall'opera in progetto, i contenuti medi di ciascuna classe granulometrica, ricavati dai risultati delle prove di laboratorio attualmente disponibili. Relativamente ai litotipi appartenenti all'unità UG1 ad

oggi è disponibile tuttavia una sola prova di laboratorio, che pertanto non può essere considerata come rappresentativa.

Valori medi	Unità geotecnica	Ghiaia + blocchi	Sabbia	Limo	Argilla
Terreno di riporto	UG1	22,8	40,3	29,8	7,1
Sabbia limosa con ghiaia	UG2	27,54	40,89	26,59	4,98
Ghiaia con sabbia limosa	UG3	54,58	26,72	16,16	2,94
Limo e sabbia ghiaiosa	UG4	17,61	25,12	50,26	7,01

Tab. 6 – Contenuti medi di ciascuna classe granulometrica, ricavati dai risultati delle prove di laboratorio attualmente disponibili

Dalle curve granulometriche riportate nel seguito emerge una netta distinzione granulometrica tra le unità presenti; infatti il contenuto in sabbia dei litotipi appartenenti all'unità UG2 è decisamente superiore rispetto a quello delle ghiaie delle unità UG3. Quest'ultima infatti è caratterizzata da una prevalenza netta della frazione grossolana (ghiaia + blocchi) rispetto alla frazione sabbiosa e limoso-argillosa. L'unità UG4 invece presenta una composizione prevalentemente fine (limo + argilla circa 60%) con un ridotto contenuto in sabbia e ghiaia.

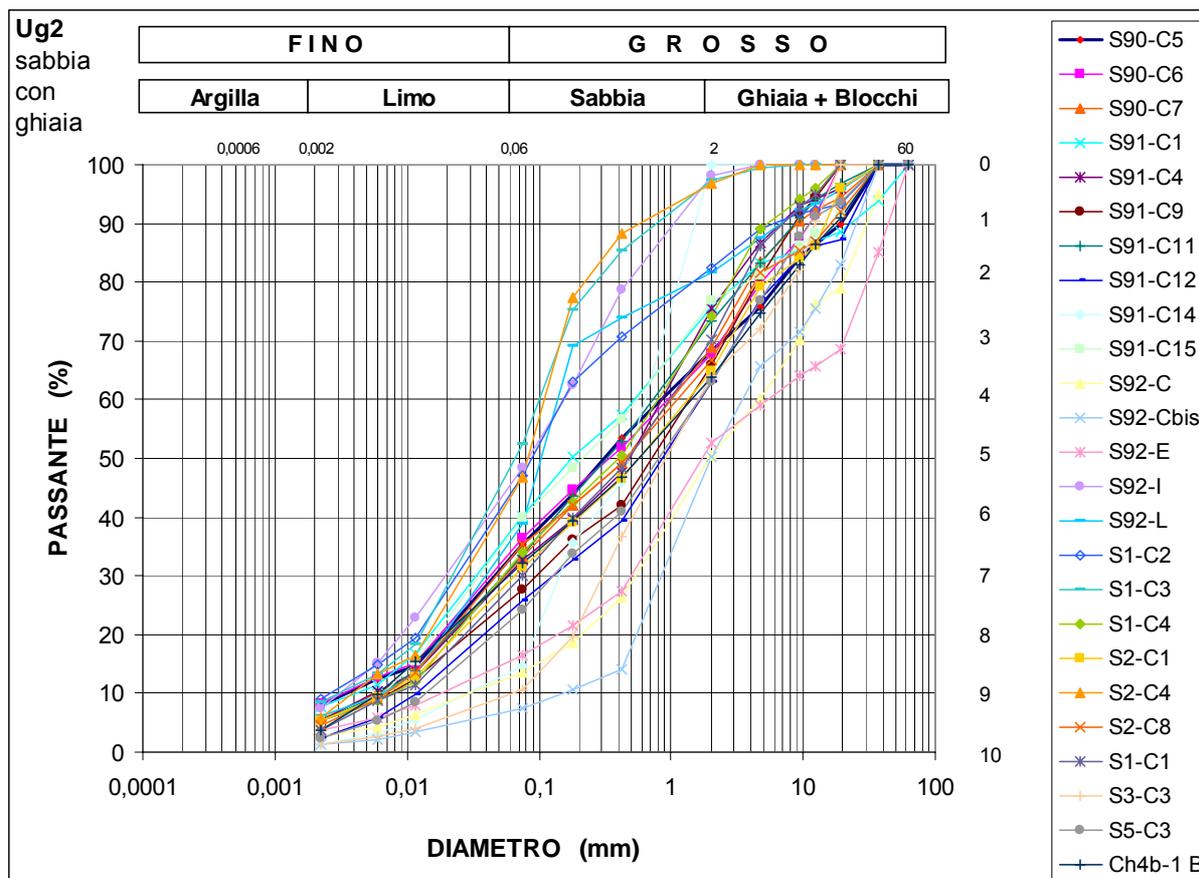


Fig. 13 – Curve granulometriche dei campioni di Sabbia e sabbia limosa con ghiaia (Ug2)

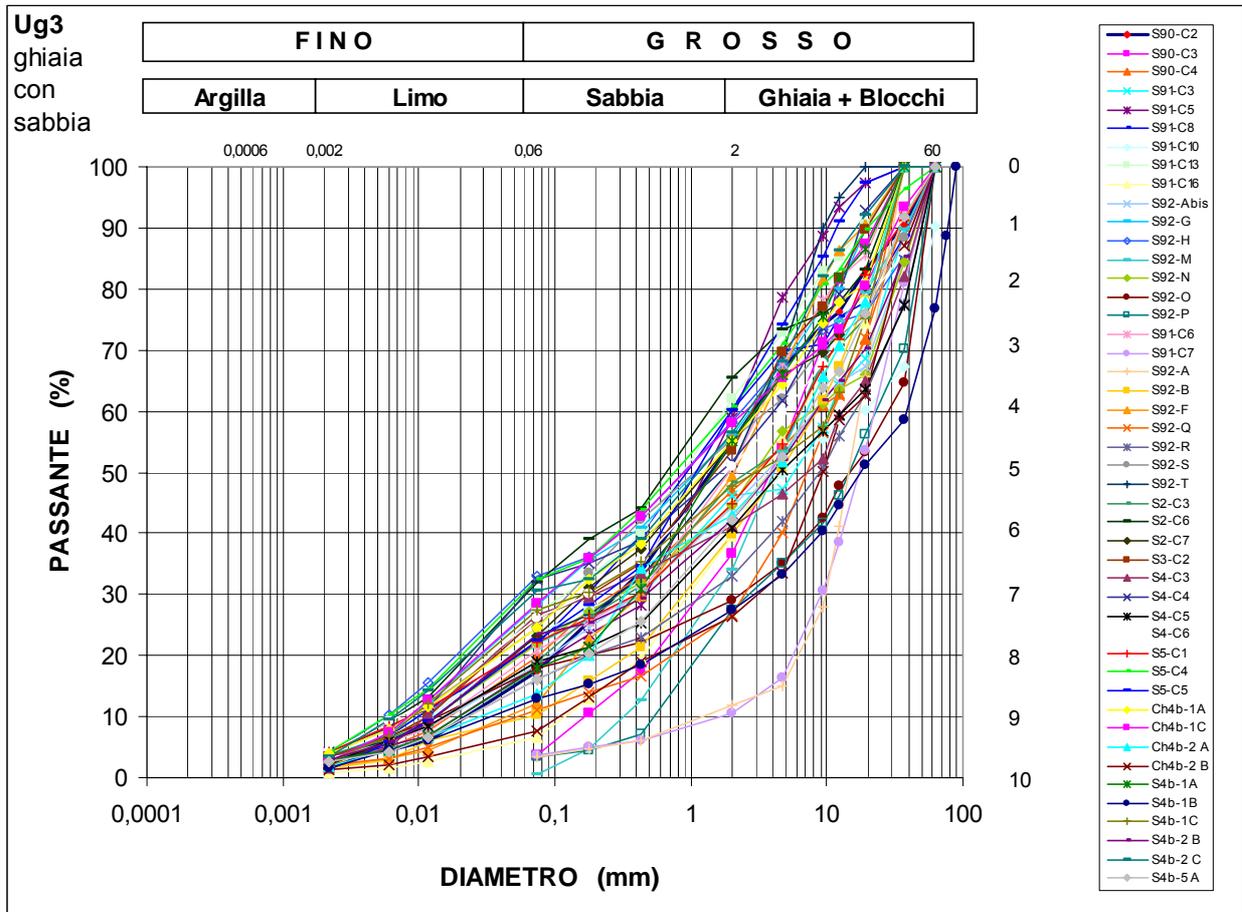


Fig. 14 – Curve granulometriche dei campioni di Ghiaia con sabbia limosa (Ug3)

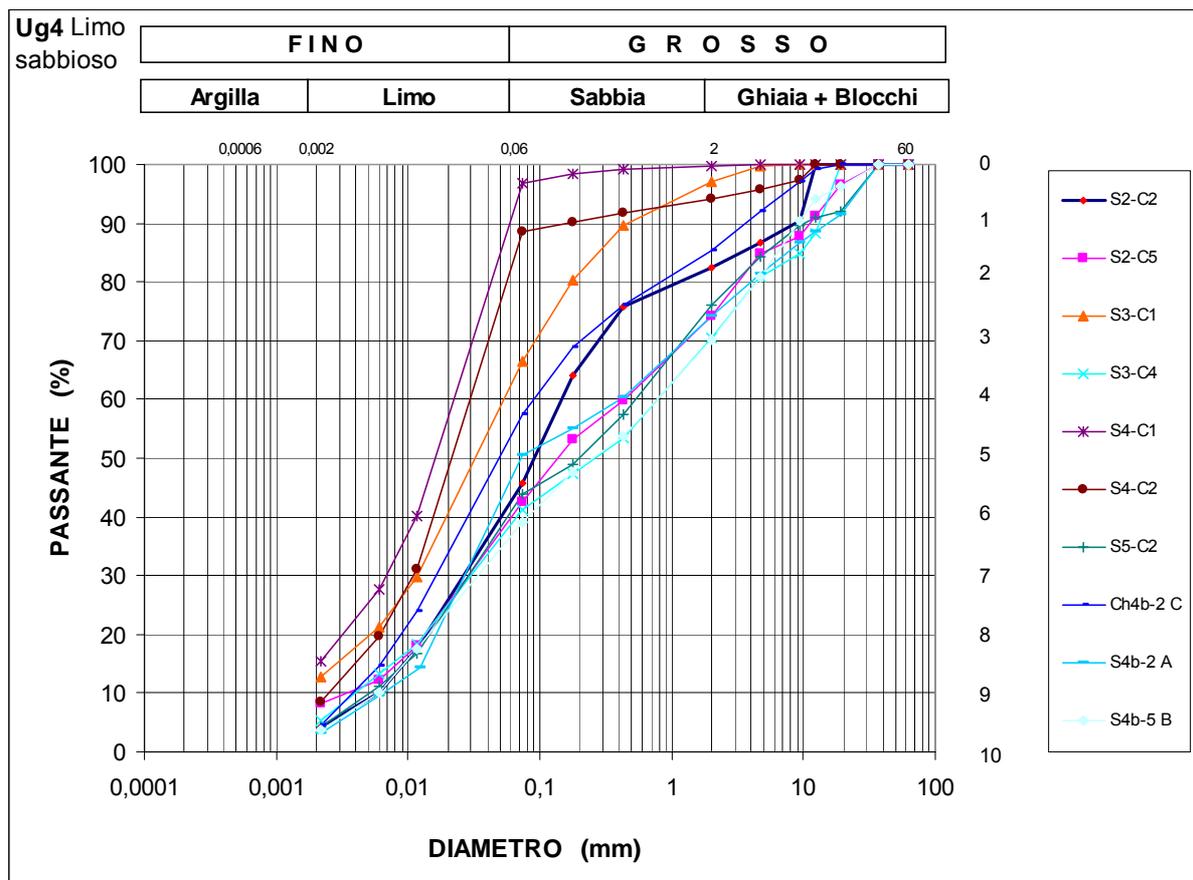


Fig. 15 – Curve granulometriche dei campioni di Limo sabbioso con ghiaia (Ug4)

7.1 Parametrizzazione geotecnica

Per la caratterizzazione geotecnica, ovvero per la definizione dei principali parametri geotecnici delle unità distinte, sono stati utilizzati i dati attualmente disponibili ovvero i risultati delle prove in foro di tipo S.P.T., i risultati delle prove pressiometriche e delle prove dilatometriche in foro, nonché i risultati delle prove di laboratorio realizzate durante le differenti campagne di indagini.

I risultati di tutte le indagini attualmente disponibili sono stati sintetizzati nei capitoli che seguono, mentre i certificati delle indagini in sito ed in laboratorio disponibili sono riportati nella Relazione delle indagini geonostiche (PD2-C3A-MUS-0900-A-AP-NOT).

7.1.1 Prove penetrometriche S.P.T.

All'interno dei fori di sondaggio sono state eseguite sistematicamente le prove penetrometriche dinamiche di tipo S.P.T (Standard Penetration Test). Esse consistono nell'infissione di una punta conica posata in fondo al foro per tre tratti successivi di 15.00 cm e nella registrazione del numero di colpi del maglio necessari per l'approfondimento. Il maglio utilizzato ha un peso di 63.50 Kg e viene lasciato cadere da un'altezza di 0.76 m, mentre la punta conica ha un diametro esterno di 51 mm e un'apertura di 60°. Sommando i numeri di colpi misurati negli ultimi due tratti di avanzamento si ottiene il valore di NSPT che può essere utilizzato tramite opportune correlazioni per dedurre alcuni dei principali parametri geotecnici del terreno.

Nella tabella seguente sono stati riassunti i risultati delle prove penetrometriche SPT realizzate nell'area di progetto.

Codice sondaggio	Progetto	Posizione	Profondità prova (m)	Litotipo	Prove SPT			
					N1	N2	N3	NSPT
SG13	PD Cavidotto	Ramat imbocco Est	3	ghiaia con rari ciottoli in matrice sabbioso-limosa	15	16	20	36
			6	sabbia da limosa a con limo con ghiaia	7	6	5	11
			9	ghiaia con rari ciottoli in matrice sabbiosa	8	6	6	12
			12	ghiaia con rari ciottoli in matrice sabbiosa	32	R2		R
			15	ghiaia con rari ciottoli in matrice sabbiosa	18	R9		R
SG14	PD Cavidotto	Giaglione imbocco Ovest	3	ghiaia con ciottoli e blocchi in matrice sabbiosa	16	15	13	28
			6	ghiaia con ciottoli e blocchi in matrice sabbiosa	15	19	24	43
			9	ghiaia con ciottoli e blocchi in matrice sabbiosa	34	R		R
			12	ghiaia e sabbia	36	R		R
			15	ghiaia e sabbia	44	R		R
S2	Discarica per accumulo di materiale di risulta	Maddalena	3	presumibile terreno di riporto: ghiaia sabbiosa debolmente limosa e ciottoli	11	9	7	16
			4,5	ghiaia ciottolosa con sabbia debolmente limosa	13	17	19	36
			6	ghiaia ciottolosa con sabbia debolmente limosa	11	19	20	39
			7,5	sabbia limosa debolmente ghiaiosa e ciottoli sparsi	10	12	15	27
			9	sabbia limosa debolmente ghiaiosa e ciottoli sparsi	11	10	14	24
			12	sabbia limosa debolmente ghiaiosa e ciottoli sparsi	16	17	17	34
			15	limo debolmente argilloso con subordinati livelli limoso sabbioso	5	7	7	14
			18	sabbia limosa con raro ghiaietto	19	22	25	47
S1	Discarica per accumulo di materiale di risulta	Maddalena	3	presumibile terreno di riporto: ghiaia sabbiosa debolmente limosa e ciottoli	15	10	9	19
			4,5	presumibile terreno di riporto: ghiaia sabbiosa debolmente limosa e ciottoli	9	9	13	22
			6	siltite debolmente sabbiosa	7	8	8	16
			7,5	limo debolmente argilloso con subordinati livelli limoso sabbiosi	6	7	8	15
			9	limo debolmente argilloso con subordinati livelli limoso sabbiosi	9	6	6	12
			10,5	limo debolmente argilloso con subordinati livelli limoso sabbiosi	7	7	8	15
			12	limo debolmente argilloso con subordinati livelli limoso sabbiosi	5	6	8	14
			15	limo debolmente argilloso con subordinati livelli limoso sabbiosi	11	11	12	23
			18	ghiaia eterometrica con sabbia da debolmente limosa a limosa	18	19	21	40
			21	ghiaia eterometrica con sabbia da debolmente limosa a limosa	17	19	23	42
P12A	PE A32	Viadotto Clarea pila n. 12	12,05	sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	12	21	27	48
			19,6	sabbia ghiaiosa con ciottoli	5	18	R	R
SP1	PE A32	Viadotto Clarea spalla n. 1	9,8	sabbia fine con ghiaia e ciottoli	7	7	8	15
			17,9	sabbia limosa con ciottoli	10	R		R
			24,05	sabbia limosa con ciottoli	12	17	20	37
S90	Tunnel della Maddalena	Discarica per accumulo di materiale di risulta	13,5	ghiaia in matrice sabbioso-limosa	10	R		R
			15	ghiaia in matrice sabbioso-limosa	R			R
			22,6	sabbia limosa e ghiaia	19	R		R
			44	sabbia limosa e ghiaia	13	22	R	R
S91	Tunnel della Maddalena	Discarica per accumulo di materiale di risulta	13,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	22	R		R
			15	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	18	20	R	R
			16,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	23	R		R
			18	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	39	R		R
S92	Tunnel della Maddalena	Discarica per accumulo di materiale di risulta	18	ghiaia con sabbia meido-grossa limosa con ciottoli e blocchi	25	36	R	R
			23,5	ghiaia con sabbia meido-grossa limosa con ciottoli e blocchi	16	33	R	R
			28,5	ghiaia con sabbia meido-grossa limosa con ciottoli e blocchi	36	R		R
			32	ghiaia con sabbia meido-grossa limosa con ciottoli e blocchi	21	30	46	76

Codice sondaggio	Progetto	Posizione	Profondità prova	Litotipo	Prove SPT			
					N1	N2	N3	NSPT
			(m)					
S1	Tunnel Maddalena	berlinese versante imbocco galleria	3	sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	22	R		R
			6	sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	5	14	12	26
			9	sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	22	28	R	R
			12	sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	26	24	28	52
			15	sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	30	R		R
			18	sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	19	24	22	46
			21	sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	9	14	16	30
			24	sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	14	20	24	44
			27	sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	18	R		R
			30	sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	10	16	21	37
S2	Tunnel Maddalena	berlinese versante imbocco galleria	3	sabbia limosa nocciola, localmente limo sabbioso, con ghiaia e rari ciottoli	10	18	R	R
			6	sabbia limosa nocciola, localmente limo sabbioso, con ghiaia e rari ciottoli	18	22	28	50
			9	sabbia limosa nocciola, localmente limo sabbioso, con ghiaia e rari ciottoli	19	25	30	55
			12	sabbia limosa nocciola, localmente limo sabbioso, con ghiaia e rari ciottoli	31	25	R	R
			15	sabbia limosa nocciola, localmente limo sabbioso, con ghiaia e rari ciottoli	25	21	30	51
			18	sabbia limosa nocciola, localmente limo sabbioso, con ghiaia e rari ciottoli	9	12	15	27
			21	sabbia limosa nocciola, localmente limo sabbioso, con ghiaia e rari ciottoli	18	10	R	R
			24	sabbia limosa nocciola, localmente limo sabbioso, con ghiaia e rari ciottoli	6	8	10	18
			27	sabbia limosa nocciola, localmente limo sabbioso, con ghiaia e rari ciottoli	27	30	35	65
			30	sabbia limosa grigiastra e ghiaia	R			R
			33	sabbia limosa grigiastra e ghiaia	10	17	18	35
			36	limo sabbioso con ghiaia	5	6	10	16
			39	limo sabbioso con ghiaia	40	R		R
S3	Tunnel Maddalena	berlinese versante imbocco galleria	3	ghiaia sabbiosa con ciottoli	R			R
			6	ghiaia sabbiosa con ciottoli	27	R		R
			9	ghiaia sabbiosa con ciottoli	R			R
			12	sabbia limosa nocciola con ghiaia e rari ciottoli	15	18	25	43
			15	sabbia limosa nocciola con ghiaia e rari ciottoli	11	18	27	45
			18	ghiaia sabbiosa con ciottoli	20	R		R
			21	sabbia limosa con ghiaia	18	19	21	40
			24	sabbia limosa con ghiaia	12	R		R
			27	sabbia limosa con ghiaia	18	20	23	43
			30	sabbia limosa con ghiaia	R			R
S4	Tunnel Maddalena	muro sostegno strada accesso cantiere	3	limo sabbioso con rara ghiaia	15	20	22	42
			6	limo sabbioso con rara ghiaia	17	22	22	44
			9	limo sabbioso e ghiaia	18	R		R
			12	limo sabbioso e sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	R			R
			15	limo sabbioso e sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	10	R		R
			18	limo sabbioso e sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	R			R
			21	limo sabbioso e sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	18	15	18	33
			24	ghiaia e blocchi in matrice sabbioso-limosa	15	R		R
			27	limo sabbioso con ghiaia	8	12	15	27
			30	limo sabbioso con ghiaia	15	18	20	38
S5	Tunnel Maddalena	berlinese a monte della nuova strada di accesso cantiere	3	sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	26	31	34	65
			6	sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	19	21	21	42
			9	ghiaia e blocchi in matrice sabbiosa	21	30	31	61
			12	sabbia limosa, localmente limo sabbioso, con ghiaia	31	13	10	23
			15	sabbia limosa, localmente limo sabbioso, con ghiaia	16	21	18	39
			18	sabbia limosa, localmente limo sabbioso, con ghiaia	12	19	28	47
			21	sabbia limosa, localmente limo sabbioso, con ghiaia	6	10	10	20
			24	sabbia limosa, localmente limo sabbioso, con ghiaia	10	18	26	44
			27	sabbia limosa e ghiaia	37	R		R
			30	sabbia limosa e ghiaia	14	20	28	48

Codice sondaggio	Progetto	Posizione	Profondità prova	Litotipo	Prove SPT			
					N1	N2	N3	NSPT
S4b-1	Svincolo di Chiomonte	IP5 rampa ingresso	(m)					
			1,5	terreno di riporto	26	R		R7
			4,5	terreno di riporto	R			R14
			10,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	34	R		R6
			12	limo sabbioso con ghiaia	5	8	12	20
			14	limo sabbioso con ghiaia	12	13	12	25
			15	limo sabbioso con ghiaia	17	26	33	59
			16,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	21	31	38	69
			18	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	31	36	42	78
			20	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	20	28	38	66
			22	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	27	39	42	81
			24	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	10	19	26	45
			25,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	17	12	31	43
27	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	28	43	R	R5			
S4b-2	Svincolo di Chiomonte	IP2 rampa ingresso	1,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	6	15	27	42
			3	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	18	34	R	R8
			4,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	27	34	R	R12
			6	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	20	40	R	R3
			7,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	16	33	48	81
			9	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	7	14	24	38
			10,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	8	18	16	34
			12	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	8	17	17	34
			13,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	7	R		R11
			15	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	8	18	26	44
			16,5	limo sabbioso con ghiaia	7	16	19	35
			18	limo sabbioso con ghiaia	6	9	13	22
			21	limo sabbioso con ghiaia	16	26	33	59
S4b-5	Svincolo di Chiomonte	UP5 rampa uscita	1,5	terreno di riporto	5	8	12	20
			3	terreno di riporto	4	6	8	14
			4,5	terreno di riporto	5	9	12	21
			6	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	8	R		R11
			7,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	6	R		R8
			9,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	13	32	R	R6
			11	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	7	16	15	31
			12,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	16	41	R	R1
			14	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	24	R		R3
			16,5	sabbia limosa con ghiaia	7	14	14	28
			18	sabbia limosa con ghiaia	8	9	16	25
			19,5	sabbia limosa con ghiaia	8	14	18	32
			24,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	9	19	15	34
CH4b-1	Svincolo di Chiomonte	IP6 rampa ingresso	1,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	38	12	10	22
			3	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	9	12	12	24
			4,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	R			R12
			6	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	10	12	12	24
			9	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	16	R		R7
			12	sabbia limosa con ghiaia	14	29	31	60
			13,5	sabbia limosa con ghiaia	7	15	17	32
			15	sabbia limosa con ghiaia	9	17	29	46
			16,5	sabbia limosa con ghiaia	12	14	16	30
			18	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	R			R2
			19,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	9	19	28	47
			21	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	12	9	24	33
			22,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	24	R		R7
CH4b-2	Svincolo di Chiomonte	UP8 rampa uscita	1,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	R			R1
			6	sabbia limosa con ghiaia	8	15	24	39
			7	sabbia limosa con ghiaia	7	13	19	32
			10,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	13	20	22	42
			12	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	18	24	30	54
			13,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	14	R		R2
			15	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	19	25	29	54
			16,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	21	36	R	R3
			18	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	R			R8
			19,5	sabbia limosa con ghiaia	6	10	26	36
			21	sabbia limosa con ghiaia	10	16	22	38
			22,5	sabbia limosa con ghiaia	20	24	30	54
			26,5	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	10	16	22	38

Tab. 7 – Sintesi dei risultati delle prove penetrometriche S.P.T. realizzate nei sondaggi preesistenti all'interno dell'area di progetto; (R = rifiuto)

I risultati delle prove S.P.T. che non hanno raggiunto il rifiuto sono stati utilizzati per determinare, tramite opportune correlazioni reperibili in bibliografia, alcuni dei principali parametri geotecnici dei terreni presenti in sito.

In particolare sono stati ricavati i seguenti parametri geotecnici:

- angolo di attrito ϕ ($^{\circ}$): metodo diretto “Japanese National Railway” e metodo diretto “Peck-Hanson & Thornburn”;
- modulo di Young E (Kg/cm²): metodo di “Menzenbach & Malcev”;
- Modulo di taglio dinamico G₀ (MPa): metodo di “Crespellani e Vannucchi”;

7.1.2 Prove pressiometriche

Nei fori dei sondaggi carotati realizzati da LTF nell’area di cantiere de La Maddalena e nei 5 sondaggi realizzati a supporto della progettazione definitiva dello Svincolo de La Maddalena inoltre sono state realizzate una serie di prove pressiometriche tipo Menard. La prova con pressiometro tipo Menard si esegue misurando in un foro di sondaggio la deformazione del terreno quando questo viene sollecitato mediante l’espansione radiale di una sonda cilindrica posta a contatto con le pareti del foro stesso. La prova consiste nell’incrementare gradualmente la pressione con gradini prefissati, possibilmente sino alla rottura del terreno, misurando il volume d’acqua assorbito dalla cella di misura e, di conseguenza, la deformazione del terreno.

I volumi d’acqua iniettati nella cella di misura sono diagrammati in funzione della pressione applicata, ottenendo così una curva dalla quale si ricavano:

- Pressione di ricompressione (P₀);
- Pressione di fluage (P_f);
- Pressione limite (P_l);

A partire dalla curva sperimentale corretta si possono determinare, oltre ai parametri sopraindicati, alcuni dei parametri geotecnici caratteristici del terreno:

- Modulo di taglio (G)
- Modulo pressiometrico (E_m)

Il valore del modulo pressiometrico è stato utilizzato per il calcolo del modulo di Young dei terreni presenti tramite la relazione di Briaud (1992): $E = E_m / \alpha$ dove α rappresenta il coefficiente reologico dato dalla tabella successiva:

Natura del terreno	Torba		Argilla		Limo		Sabbia		Sabbia e ghiaia		Roccia	
	α	$\frac{E_M}{P_l}$	α	$\frac{E_M}{P_l}$	α	$\frac{E_M}{P_l}$	α	$\frac{E_M}{P_l}$	α	Stato di fratturazione	α	
Iperconsolidato troppo costipato	–	>16	1	>14	2/3	>12	1/2	>10	1/3	Scarsamente fratturato	2/3	
Normalconsolidato normalmente costipato	1	9-16	2/3	8-14	1/2	1-12	1/3	6-10	1/4	Normale	1/2	
										Molto fratturato	1/3	
Iperconsolidato alterato rimaneggiato o sciolto	–	7-9	1/2	5-8	1/2	5-7	1/3	–	–	Molto alterato	2/3	

α : coefficiente reologico; E_M: modulo pressiometrico del terreno; P_l.

Tab. 8 – Valori dei coefficienti reologici α da Briaud (1992)

Nella tabella seguente si riportano sinteticamente i risultati delle prove pressiometriche realizzate nell'area di progetto:

Codice sondaggio	Profondità prova	Litologia	Pressione limite	Pressione di fluage	Em/PL	Modulo pressiometrico	Modulo de Young	Modulo di taglio	Unità geotecnica
	(m)		PL (Mpa)	PF (Mpa)		Em (Mpa)	E (Mpa)	G (Mpa)	UG
S91	15,75	ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limoso	7,92	3,4	10,87	86,1	260,9	32,3	UG3
	27,9	ghiaia parzialmente alterata in matrice sabbioso-limoso	2,34	1,4	11,45	26,8	81,2	10,1	UG3
	30,6	ghiaia parzialmente alterata in matrice sabbioso-limoso	1,64	0,93	6,46	10,6	42,4	4,0	UG3
	49,3	ghiaia in matrice sabbioso-limoso	2,44	1,37	8,52	20,8	83,2	7,8	UG3
S92	27,9	ghiaia con sabbia medio-grossa limosa con ciottoli e blocchi	2,85	2,18	14,05	40,0	121,3	15,1	UG3
	38,7	sabbia grossa e media limosa, localmente limo sabbioso, con ghiaia	6,4	4,18	17,13	109,6	219,2	41,2	UG2
	43,9	sabbia grossa e media limosa, localmente limo sabbioso, con ghiaia	6,27	3,98	12,91	81,0	161,9	30,4	UG2
S1	11	ghiaia sabbiosa	3,43	2,02	10,13	34,7	105,3	13,1	UG3
S2	13,5	sabbia limosa con ghiaia e rari ciottoli	3,24	1,26	11,38	36,9	111,8	13,9	UG2
	21	sabbia limosa con ghiaia e rari ciottoli	4,82	3,55	11,76	56,7	171,8	21,3	UG2
	30,5	sabbia limosa grigiastra e ghiaia	4,76	2,78	12,39	59,0	178,7	22,2	UG2
	35,5	limo sabbioso con ghiaia	5,99	3,72	20,19	120,9	180,5	45,5	UG3
S5	15	sabbia limosa, localmente limo sabbioso, con ghiaia	4,04	2,5	9,75	39,4	119,4	14,8	UG2
	22	sabbia limosa, localmente limo sabbioso, con ghiaia	2,698	1,69	7,29	19,7	59,6	7,4	UG2
Ch4b-1	16,5	sabbia limosa con ghiaia e rari ciottoli	3,36	2,377	5,96	20,0	80,2	7,5	UG2
	24,5	limo sabbioso con ghiaia	4,855	2,688	24,25	117,7	175,7	44,3	UG4
Ch4b-2	24	sabbia limosa con ghiaia	4,408	2,16	6,88	30,3	121,3	11,4	UG2
	6,5	sabbia limosa con ghiaia	3,157	1,727	37,42	118,1	358,0	44,4	UG2
S4b-5	13,5	limo sabbioso con ghiaia	4,443	3,099	9,04	40,2	80,3	15,1	UG4
	23,5	limo sabbioso con ghiaia	4,467	3,158	9,61	42,9	85,9	16,1	UG4
S4b-1	13,5	limo sabbioso con ghiaia	3,136	1,881	8,57	26,9	53,7	10,1	UG4
	19,5	limo sabbioso con ghiaia	2,725	1,58	14,44	39,3	58,7	14,8	UG4
S4b-2	20,5	limo sabbioso con ghiaia	4,712	3,368	29,98	141,3	210,8	53,1	UG4
	26,5	limo sabbioso con ghiaia	6,349	3,565	27,16	172,5	257,4	64,8	UG4

Tab. 9 – Sintesi dei risultati delle prove pressiometriche realizzate nell'area di progetto

Il valore del modulo di Young del terreno ottenuto a partire dalle prove pressiometriche realizzate è stato utilizzato per valutare il valore del modulo di taglio operativo G tramite la relazione:

$$\nu = E/2G - 1$$

dove:

ν = coefficiente di Poisson (assunto uguale a 0,33)

E = modulo elastico

7.1.3 Prove dilatometriche

All'interno dei sondaggi S91 e S92 realizzati durante la campagna indagini LTF per il progetto del Tunnel della Maddalena sono state anche realizzate alcune prove dilatometriche nella parte in roccia, per la determinazione in situ della deformabilità dell'ammasso. La prova

viene realizzata tramite l'introduzione nel foro di una sonda cilindrica che, applicando una pressione radiale uniforme alla parete, produce un incremento del diametro del foro stesso misurandolo in funzione della pressione applicata. Tale prova permette la determinazione in situ del modulo di elasticità statico dell'ammasso roccioso nel tratto testato.

Nel complesso sono state realizzate 4 prove dilatometriche, i cui risultati sono sinteticamente riassunti nella tabella che segue:

Risultati delle prove dilatometriche realizzate nell'area di progetto						
Codice sondaggio	Progetto	Posizione	Profondità prova	Litotipo	Modulo elastico	unità geotecnica
			(m)		E (Mpa)	
S91	sondaggi LTF	Discarica per accumulo materiali di risulta	66,5	Calcescisto alterato e fratturato	505	UG5
			77,5	Calcescisto	2266	UG5
S92	sondaggi LTF	Discarica per accumulo materiali di risulta	62	Calcescisto fratturato	2421	UG5
			68	Calcescisto fratturato	2484	UG5

Tab. 10 – Sintesi dei risultati delle prove dilatometriche realizzate nell'area di progetto

7.1.4 Prove di permeabilità in foro

Durante le differenti campagne di indagini sono state anche realizzate alcune prove di permeabilità in foro di tipo Lefranc per la determinazione del coefficiente di permeabilità di un terreno (K m/sec); tale prova può essere eseguita in due differenti modalità: a carico costante ed a carico variabile.

Nel seguito viene data una sintesi dei risultati di tutte le prove disponibili per l'area di progetto:

Risultati delle prove di permeabilità in foro realizzate nell'area di progetto									
Codice sondaggio	Profondità (m)	Fase progettuale	Tipo sondaggio	Opera di pertinenza	Posizione	Falda (m)	Litotipo	coefficiente Permeabilità k (m/sec)	Tipologia prova permeabilità e Profondità prova (m)
SG13	15,00	PD cavidotto Terna	carotato verticale	galleria Ramat	Piazzale imbocco Est	assente	Ghiaia con rari ciottoli in matrice sabbioso-limosa	1,44E-04	Lefranc 4,5-6
S90	75,00	Tunnel della Maddalena	carotato verticale	tunnel Maddalena	Discarica per accumulo di materiale di risulta	27,50	Ghiaia in matrice sabbioso-limosa con ciottoli	2,78E-03	Lefranc 19,5-20
							Sabbia limosa e ghiaia	4,17E-03	Lefranc 30-31
S91	80,00	Tunnel della Maddalena	carotato verticale	tunnel Maddalena	Discarica per accumulo di materiale di risulta	24,20	Ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	1,11E-04	Lefranc 16,5-17
							Ghiaia parzialmente alterata in matrice sabbioso-limosa	2,29E-04	Lefranc 27-27,5
							Ghiaia parzialmente alterata in matrice sabbioso-limosa	1,11E-04	Lefranc 36-36,5
S1	30,00	Tunnel della Maddalena	carotato verticale	Tunnel Maddalena	berlinese versante imbocco galleria		Sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	1,81E-06	Lefranc 7,5-8
							Limo sabbioso con ghiaia	2,05E-07	Lefranc 15,5-16
S2	40,00	Tunnel della Maddalena	carotato verticale	Tunnel Maddalena	berlinese versante imbocco galleria		Sabbia limosa, localmente limo sabbioso, con ghiaia e rari ciottoli	2,19E-07	Lefranc 17,5-18
							Sabbia limosa, localmente limo sabbioso, con ghiaia e rari ciottoli	1,19E-07	Lefranc 23,5-24
S3	30,00	Tunnel della Maddalena	carotato verticale	Tunnel Maddalena	berlinese versante imbocco galleria		Sabbia limosa nocciola con ghiaia e rari ciottoli	1,79E-05	Lefranc 12,5-13
							Sabbia limosa con ghiaia	1,80E-05	Lefranc 24-24,5
S4b-1	40,00	PD Svincolo Chiomonte	carotato verticale	Svincolo di Chiomonte	IP5 rampa ingresso	14,48	Ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	5,10E-04	Lefranc 20-21
S4b-2	40,00	PD Svincolo Chiomonte	carotato verticale	Svincolo di Chiomonte	IP2 rampa ingresso		Ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	> 10E-01	Lefranc 14-15
S4b-5	40,00	PD Svincolo Chiomonte	carotato verticale	Svincolo di Chiomonte	UP5 rampa uscita	20,79	Ghiaia e ciottoli in matrice sabbioso-limosa	> 10E-01	Lefranc 11-12
CH4b-1	40,00	PD Svincolo Chiomonte	carotato verticale	Svincolo di Chiomonte	IP6 rampa ingresso		Sabbia limosa con ghiaia	9,80E-04	Lefranc 13-14
CH4b-2	40,00	PD Svincolo Chiomonte	carotato verticale	Svincolo di Chiomonte	UP8 rampa uscita		Sabbia limosa con ghiaia	> 10E-01	Lefranc 7-8

Tab. 11 – Sintesi dei risultati delle prove di permeabilità in foro realizzate nell'area di progetto

7.1.5 Prove di laboratorio

All'interno di alcuni dei sondaggi realizzati per differenti progetti sono stati prelevati una serie di campioni di terreno e di roccia per essere sottoposti a prove di laboratorio. Sono

state realizzate sia prove per la determinazione delle caratteristiche fisiche dei terreni, sia prove per determinare i principali parametri geotecnici dei litotipi incontrati.

I risultati di tutte le prove di laboratorio ad oggi disponibili sono riassunti nelle tabelle successive:

Codice sondaggio	Posizione	Codice campione	Profondità campione (m)	Litotipo	Unità geotecnica	Sviluppo di Chionometri: Risultati delle prove di laboratorio							Umidità naturale	Taglio diretto		Rigonfiamento	Peso di volume	Peso specifico dei grani	compressione uniaassiale	Point load test (Is50) a angolo carico/scistosità		
						Ghiaia +blocchi	Sabbia	Limo	Argilla	LL	LP	IP		%	ϕ (°)					c' (Kpa)	pressione di rigonfiamento (kpa)	indice di rigonfiamento (%)
SG13	galleria Ramat imbocco Est		3	Ghiaia con sabbia	UG3	64	30	6		30	24	6,0										
SG13	galleria Ramat imbocco Est		3	Ghiaie con sabbia	UG3	62	34	4														
SG14	galleria Giaglione imbocco Ovest		3	Ghiaia con sabbia e blocchi	UG3	65	28	7														
SG14	galleria Giaglione imbocco Ovest		5	Ghiaia con sabbia	UG3	67	27	6														
S90	Discarica per accumulo di materiale di risulta	C1	9,3	9,5	Sabbia limosa-gliatosa	UG1	22,8	40,3	29,8	7,1	23,3	17,5	5,8		28,8	5,2						
		C2	10	10,15	Ghiaia sabbiosa con limo	UG3	45	37,6	14,5	2,8	18,5											
		C3	13,7	14	Ghiaia sabbiosa con limo	UG3	63,3	33,1	3	0,6	23,4					36,9	2,9					
		C4	19,6	19,8	Ghiaia sabbiosa con limo	UG3	53,1	27,1	17,9	3,9	19,4	17,5	1,9									
		C5	20,6	21	Sabbia limosa-gliatosa	UG2	31,7	32,9	27,5	7,9	21,6	19,3	2,3			26,1	15,3					
		C6	22,5	22,7	Sabbia limosa-gliatosa	UG2	32,2	31,2	28,4	8,2	18,8	14,2	4,7									
		C7	42	42,2	Sabbia limosa-gliatosa	UG2	31,1	35,6	27,6	5,7	19,6	14,6	5,0					35				4,18
		C8	12,4	12,55	Sabbia limosa-gliatosa	UG2	24,3	35,6	32,4	7,7	20	16,7	3,3									
		C9	15,65	15,8	Ghiaia sabbiosa con limo	UG3	50,7	29,4	16,1	3,8	20,2											
		C10	19,4	19,55	Ghiaia sabbiosa con limo	UG3	53,9	24,2	18,4	3,5	18,2											
C11	20,6	20,75	Sabbia limosa-gliatosa	UG2	24,4	42,8	27,5	5,3	18,4	12,3	6,1			29,2	2							
C12	44,4	44,6	Ghiaia e Sabbia limosa	UG3	41,1	40,7	15,9	2,3	20,8	12,3	8,9			32,6	2,4							
C13	45,5	45,6	Ghiaia sabbiosa con limo	UG3	49,3	30	18,1	2,7	21,6	17,1	4,5			36,9	18,1							
C14	50,75	50,85	Sabbia limosa	UG2	89,4	6,9	3	0,7														
C15	57,4	57,6	Sabbia limosa-gliatosa	UG2	23,1	36,9	36,1	3,9	18,2	14,8	3,4											
C16	63,8	64	Ghiaia sabbiosa con limo	UG3	60,5	32,8	5,8	0,9	23	15,4	7,6			24,2	4							
GAQ1			76,6	calcescisto	UG5															44,3		
			64,9		UG5																	
			66,7		UG5																	
			65,9	calcescisto filadico con passaggi gneissici	UG5																	
			71,8		UG5																	
			73,6		UG5																	
			76,6		UG5																	
GAQ3			76,4	calcescisto	UG5									34,1	70							

Codice sondaggio	Posizione	Codice campione	Profondità campione (m)		Litotipo	Unità geotecnica	Sintesi di Chimometrie: Risultati delle prove di laboratorio						Umidità naturale	Taglio diretto	Rigonfiamento		Peso di volume dei granuli	compressione uniaxiale	Point load test (IS50) angolo carico/scissosità			
			da	a			Ghiaia +blocchi	Sabbia	Limo	Argilla	LL	LP			IP	%			ϕ (°)	c' (kPa)	pressione di rigonfiamento (kPa)	indice di rigonfiamento (%)
S92	Discarica per accumulo di materiale di risulta	A-bis	14,8	15	Ghiaia sabbiosa con limo	UG3	55,6	26	14,9	3,5	24,2											
		A	16	16,1	Ghiaia con sabbia limosa	UG3	88,1	8,5	3,4													
		B	18,5	18,7	Ghiaia sabbiosa con limo	UG3	60,2	29,4	8,7	1,7	21,2											
		C	20,6	20,8	Ghiaia e sabbia con limo	UG2	49,4	37	11	2,6	19,2											
		C-bis	21,65	21,75	Ghiaia e sabbia con limo	UG2	49,8	42,6	6,1	1,5	21,8											
		E	25,35	25,6	Ghiaia e sabbia con limo	UG2	47,2	36,3	12,8	3,7	21,6											
		F	28,7	28,85	Ghiaia con sabbia limosa	UG3	50,8	37,2	10,1	1,9	21,6											
		G	30	30,25	Ghiaia con sabbia limosa	UG3	43,9	27,8	24,8	3,5	21,6	4,4										
		H	33,6	33,75	Ghiaia con sabbia limosa	UG3	41,6	25,3	29	4,1	21,7	16,4	5,3									
		I	35,85	36	Sabbia e limo argilloso	UG2	1,9	49,7	40,8	7,6	17,2	13,8	3,4									
		L	39,8	40	Sabbia e limo argilloso con ghiaia	UG2	18,4	42,8	32,8	6	22											
		M	40,8	41	Ghiaia con sabbia	UG3	66,1	33,4	0,5		18,5	16,1	2,5									
		N	43,2	43,4	Ghiaia con sabbia limosa	UG3	55,3	22,7	18,5	3,5	21,1	1,7	4,1									
		O	47,75	47,9	Ghiaia con sabbia limosa	UG3	71,1	10,9	14,5	3,5	24,5	18,1	6,4									
		P	49	49,2	Ghiaia con sabbia limosa	UG3	72,6	24,1	3,3		19,8	16,5	3,3									
		Q	50	50,2	Ghiaia con sabbia limosa	UG3	73,2	15,6	9	2,2	19,8	16,8	3									
R	53,9	54	Ghiaia con sabbia limosa	UG3	67,1	16,8	12,5	3,6	23,8	16,7	7,1											
S	56,3	56,5	Ghiaia e sabbia con limo	UG3	44,5	30,9	20,6	4	17,5													
T	58,8	59	Ghiaia con sabbia limosa	UG3	48,9	27,8	19,5	3,8	22,4	15,1	7,3											
U	60,8	61	Calcestruzzo	UG5																		
V	61,8	62	Calcestruzzo	UG5																		
Y	65,8	66	Calcestruzzo	UG5																		
Z	67,4	67,55	Calcestruzzo	UG5																		
J	67,55	67,75	Calcestruzzo	UG5																		
K	67,75	67,95	Calcestruzzo	UG5																		
L	70,45	70,7	Calcestruzzo	UG5																		
S1	berlinese versante imbocco galleria	C1	7,7	8	Sabbia limosa ghiaiosa	UG2	29,9	39,9	26,3	3,9	22,9											
		C2	12,5	12,75	Sabbia e limo ghiaioso	UG2	17,6	35,3	36,1	9	23											
		C3	19,5	19,9	Sabbia e limo debolmente ghiaioso	UG2	2,8	44,7	44,1	8,4	21,9											
		C4	22,5	23	Sabbia limosa-ghiaiosa	UG2	25,9	40,1	28,6	5,4	20,4											
		C1	2,5	2,7	Ghiaia e Sabbia limosa	UG2	35,2	33,5	26	5,3	19											
		C2	6,4	6,8	Limo e sabbia ghiaiosa	UG4	17,6	36,5	41,5	4,4	20,1											
		C3	11,4	11,7	Ghiaia con sabbia limosa	UG3	51,7	29,4	15,3	3,6	22											
		C4	18,6	19	Sabbia e limo debolmente ghiaioso	UG2	3,3	50	40,8	5,9	16,9											
		C5	22	22,3	Limo e sabbia ghiaiosa	UG4	25,8	31,6	34,5	8,1	18,2											
		S2	berlinese versante imbocco galleria	C6	27,6	28	Ghiaia e Sabbia limosa	UG3	37,5	30,7	27,8	4	20,6	16,6	4							
C7	33,8			34	Ghiaia e Sabbia limosa	UG3	45,1	31,6	21,1	2,2	20,7											
C8	35,7			36	Sabbia e ghiaia limosa	UG2	33,3	31,3	30,9	4,5	19,8											
C1	7,3			7,55	Limo sabbioso-argilloso	UG4	3	30,6	53,7	12,7	21,2											
C2	14,4			14,8	Ghiaia sabbioso-limosa	UG3	46,5	27,4	22,8	3,3	23											
C3	19			19,4	Sabbia ghiaiosa	UG2	36	53,3	9,3	1,4	16,4											
C4	28,1			28,4	Limo e sabbia con ghiaia	UG4	29,5	29,2	36	5,3	21											
C1	1,7			2	Limo argilloso	UG4	0,2	2,9	81,5	15,4	27	18,8	8,2	24,37	23,7	25,7						
C2	6			6,4	Limo argilloso	UG4	5,8	5,6	80,1	8,5	28	21	7	13,15	26,1	25,4						
S3	berlinese versante imbocco galleria			C3	13,7	14	Ghiaia limoso-sabbiosa	UG3	58,8	14,4	25,1	1,7	21,8									
		C4	17,3	17,6	Ghiaia limoso-sabbiosa	UG3	48,4	19,2	28,3	4,1	23											
		C5	20,6	21	Ghiaia limoso-sabbiosa	UG3	59	22,1	16,5	2,4	23,1											
		C6	29,3	29,7	Ghiaia limoso-sabbiosa	UG3	49	25	21,9	4,1	24											
		C1	7	7,3	Ghiaia sabbioso-limosa	UG3	55,1	22,9	17,8	4,2	27	19,8	7,2	1,87	35,4	2,6						
		C2	14,6	14,8	Limo e sabbia ghiaiosa	UG4	23,9	32,3	39,6	4,2	24,5											
		C3	16	16,3	Sabbia e ghiaia limosa	UG2	37	38,7	22	2,3	21											
		C4	24,7	25	Ghiaia e Sabbia limosa	UG3	39,3	28,2	28,3	4,1	22,8											
		C5	28	28,4	Ghiaia e Sabbia limosa	UG3	39,7	38	20,9	1,4	22											
		S4	muro sostegno strada accesso cantiere	C1	1,7	2	Limo argilloso	UG4	0,2	2,9	81,5	15,4	27	18,8	8,2	24,37	23,7	25,7				
C2	6			6,4	Limo argilloso	UG4	5,8	5,6	80,1	8,5	28	21	7	13,15	26,1	25,4						
C3	13,7			14	Ghiaia limoso-sabbiosa	UG3	58,8	14,4	25,1	1,7	21,8											
C4	17,3			17,6	Ghiaia limoso-sabbiosa	UG3	48,4	19,2	28,3	4,1	23											
C5	20,6			21	Ghiaia limoso-sabbiosa	UG3	59	22,1	16,5	2,4	23,1											
C6	29,3			29,7	Ghiaia limoso-sabbiosa	UG3	49	25	21,9	4,1	24											
C1	7			7,3	Ghiaia sabbioso-limosa	UG3	55,1	22,9	17,8	4,2	27	19,8	7,2	1,87	35,4	2,6						
C2	14,6			14,8	Limo e sabbia ghiaiosa	UG4	23,9	32,3	39,6	4,2	24,5											
C3	16			16,3	Sabbia e ghiaia limosa	UG2	37	38,7	22	2,3	21											
S5	berlinese a monte strada accesso cantiere			C4	24,7	25	Ghiaia e Sabbia limosa	UG3	39,3	28,2	28,3	4,1	22,8									
		C5	28	28,4	Ghiaia e Sabbia limosa	UG3	39,7	38	20,9	1,4	22											
		C1	1,7	2	Limo argilloso	UG4	0,2	2,9	81,5	15,4	27	18,8	8,2	24,37	23,7	25,7						
		C2	6	6,4	Limo argilloso	UG4	5,8	5,6	80,1	8,5	28	21	7	13,15	26,1	25,4						
		C3	13,7	14	Ghiaia limoso-sabbiosa	UG3	58,8	14,4	25,1	1,7	21,8											
		C4	17,3	17,6	Ghiaia limoso-sabbiosa	UG3	48,4	19,2	28,3	4,1	23											
		C5	20,6	21	Ghiaia limoso-sabbiosa	UG3	59	22,1	16,5	2,4	23,1											
		C6	29,3	29,7	Ghiaia limoso-sabbiosa	UG3	49	25	21,9	4,1	24											
		C1	7	7,3	Ghiaia sabbioso-limosa	UG3	55,1	22,9	17,8	4,2	27	19,8	7,2	1,87	35,4	2,6						
		C2	14,6	14,8	Limo e sabbia ghiaiosa	UG4	23,9	32,3	39,6	4,2	24,5											

Codice sondaggio	Posizione	Codice campione	Profondità campione (m)		Litotipo	Unità geotecnica	Granulometrie (CNR B.U. n°23)				Limiti di Atterberg			Umidità naturale		Taglio diretto		Rigonfiamento		Peso di volume dei grani	Peso specifico dei grani	compressione uniaxiale	Point load test (150) angolo carico/scissosità			
			da	a			Ghiaia +blocchi	Sabbia	Limo	Argilla	LL	LP	IP	%	ϕ' (°)	c' (Kpa)	pressione di rigonfiamento (Kpa)	indice di rigonfiamento (%)	KN/m3				KN/m3	Mpa	0°	90°
Ch4b-1	IP6	A	3.6	4	Ghiaia sabbioso-limosa	UG3	44.9	30.6	20.6	3.9	19				6.7					27.2						
		1	13	13.5	Sabbia limosa con ghiaia	UG2																				
		B	19.2	19.6	Sabbia e ghiaia con limo	UG2	36.3	31.4	28.7	3.6	20.6	15.6	5	15.14						26.9						
		C	29	29.2	Ghiaia con sabbia e limo	UG3	42	29.6	25.6	2.8	20.4	17.6	2.8	14.84						26.9						
Ch4b-2	UP8	2	34	34.4	Ghiaia e Sabbia limosa	UG3																				
		A	2.5	2.7	Ghiaia sabbioso-limosa	UG3	57	29.2	12.1	1.8	20				0.21					27.2						
		B	13	13.25	Ghiaia sabbiosa	UG3	73.6	18.9	6.3	1.2	22.6				0.77					27.2						
		C	23.7	24	Limo sabbioso-gliatoso	UG4	14.5	28	52.9	4.6	17.9				6.88					26.7						
S4b-1	IP5	1	28	28.3	Ghiaia con sabbia e limo	UG3																				
		2	30.3	30.55	Ghiaia e Sabbia limosa	UG3																				
		1	12.48	12.78	Limo sabbioso-gliatoso	UG4																				
		2	15.73	16	Limo sabbioso-gliatoso	UG4																				
S4b-2	IP2	A	18.6	19	Ghiaia con sabbia limosa	UG3	44.9	37.1	15.1	2.9	16.3									27						
		B	34.15	34.65	Ghiaia sabbioso-limosa con ciottoli	UG3	72.5	14.5	11.4	1.6	20.9	15.6	6.3	13.9					27.3							
		C	36.65	37	Ghiaia limoso-sabbiosa	UG3	52.3	20.3	24.9	2.5	19.5				15.49				27							
		A	15.5	15.9	Limo Ghiaioso-sabbioso	UG4	25.9	23.5	47.5	3.1	19				13.4					26.6						
S4b-5	UP5	1	17.45	17.75	Limo sabbioso-gliatoso	UG4																				
		B	27.4	27.7	Ghiaia limoso-sabbiosa	UG3	57.8	18.6	20.7	2.9	18.5				13.71				27							
		C	30.5	30.7	Ghiaia con sabbia e limo	UG3	43.6	25.8	27.1	3.5	20				14.86				26.9							
		2	32.45	32.75	Ghiaia e Sabbia limosa	UG3																				
S4b-5	UP5	A	17.7	18	Ghiaia con sabbia limosa	UG3	57.8	26.1	13.5	2.6	20									26.9						
		1	22.3	22.6	Limo sabbioso-gliatoso	UG4																				
		B	30	30.3	Limo con sabbia e ghiaia	UG4	29.9	31	35.3	3.8	18.4									26.6						
		2	26	26.5	Ghiaia e Sabbia limosa	UG3																				

7.1.6 Indagini geofisiche

Durante le campagne di indagini LTF 2011-2012 per il cantiere de La Maddalena sono state anche realizzate una serie di indagini geofisiche, al fine di determinare:

- la profondità e la geometria del substrato roccioso;
- la distribuzione delle onde di taglio in funzione della profondità sui primi 30 m (dati Vs30) e la determinazione della categoria sismica di sottosuolo;

La distribuzione delle velocità delle onde di taglio in funzione della profondità è stata determinata a partire dal metodo MASW; in particolare sono state realizzati:

- un sondaggio Vs30
- due profili Vs30

Sondaggio Vs30 (SVs1): la velocità equivalente Vs30 calcolata è pari a 410 m/sec; conseguentemente la categoria sismica di sottosuolo risulta B (Vs30 compresa tra 360 e 800 m/sec).

Profili Vs30 (PVs1 e PVs2): la velocità equivalente Vs30 calcolata è pari a 350 m/sec per il profilo PVs1 e 323 m/sec per il profilo PVs2. Pertanto la categoria sismica di sottosuolo risulta C (Vs30 compresa tra 180 e 360 m/sec).

Anche durante la realizzazione della campagna indagini a supporto della progettazione definitiva dello svincolo de La Maddalena sono state realizzate all'interno di 3 sondaggi (Ch4b-1, Ch4b-2 e S4b-2) altrettante indagini geofisiche in foro tipo down-hole per la determinazione della distribuzione delle onde di taglio in funzione della profondità e per il calcolo della Vs30, necessaria alla determinazione della categoria sismica di sottosuolo.

Le prove down-hole realizzate hanno fornito in sintesi i seguenti risultati:

- sondaggio Ch4b-1: la velocità equivalente Vs30 calcolata è pari a circa 330 m/sec; conseguentemente la categoria sismica di sottosuolo risulta C (Vs30 compresa tra 180 e 360 m/sec).
- sondaggio Ch4b-2: la velocità equivalente Vs30 calcolata è pari a circa 350 m/sec; conseguentemente la categoria sismica di sottosuolo risulta C (Vs30 compresa tra 180 e 360 m/sec).
- sondaggio S4b-2: la velocità equivalente Vs30 calcolata è pari a circa 385 m/sec; conseguentemente la categoria sismica di sottosuolo risulta B (Vs30 compresa tra 360 e 800 m/sec).

Sulla base delle considerazioni espresse sopra e sulla base delle indicazioni espresse nella normativa, i terreni presenti lungo in corridoio di progetto presentano caratteristiche al limite tra le classi B e C; in via cautelativa tali litotipi possono essere considerati appartenenti alla categoria sismica C.

I valori di Vs determinati tramite le prove down-hole sono stati inoltre utilizzati per determinare il valore del modulo di taglio G0 (modulo a piccole deformazioni) tramite la relazione di OHTA Y.,GOTO N.,1978:

$$G0 = \gamma/g \times (Vs)^2 \text{ dove:}$$

γ = peso di volume naturale;

g = accelerazione di gravità;

V_s = velocità delle onde di taglio;

I certificati, le tabelle numeriche e i grafici inerenti alle velocità di propagazione delle onde P ed S sono riportati all'interno della Relazione delle Indagini Geognostiche (PD2-C3A-MUS-0900-A-AP-NOT).

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

Fig. 16 – Tabella riassuntiva delle categorie di sottosuolo estratta dalle “Norme tecniche per le costruzioni” (D.M. 14 gennaio 2008)

Nell'area di progetto sono state realizzate durante le campagne di indagini LTF 2011-2012 per il cantiere de La Maddalena, anche tre linee sismiche a rifrazione in onde di taglio e in onde di compressione (TSR1, TSR2 e TSR3) allo scopo di ricostruire la successione litostratigrafica del sottosuolo e la stima del grado di addensamento, direttamente proporzionale alle onde di compressione.

I modelli tomografici delle sezioni sismiche a rifrazione permettono di identificare tre sismostrati a velocità omogenea:

Strato	Velocità onde P [m/s]	Velocità onde S [m/s]
1	< 1000 m/s	200 < Vs < 600 m/s
2	1000 < Vp < 2000 m/s	600 < Vs < 1200 m/s
3	2000 < Vp < 3500 m/s	1200 < Vs < 2000 m/s

Tab. 12 – Sintesi dei valori delle velocità delle onde P ed S ottenuti dalle indagini geofisiche realizzate nell'area di progetto

I tre differenti sismostrati non sono rappresentativi di cambi litologici significativi, ma piuttosto di un costante incremento del grado di addensamento dei depositi quaternari. Il gradiente di velocità è, infatti, regolare, e non manifesta incrementi legati a superfici di contatto nette.

In conclusione, le sezioni tomografiche di velocità delle onde P e S hanno messo in luce la presenza di una situazione lito-stratigrafica caratterizzata da:

- Terreni scarsamente addensati con spessore fino a circa 10-12 metri – strato 1
- Terreni mediamente addensati (tra 10-12 m e 28-30 m di profondità) con grado di consistenza gradualmente crescente con la profondità - strato 2
- Terreni da addensati a molto addensati oltre i 30 metri ca. di profondità

7.2 Sintesi dei parametri geotecnici delle Unità geotecniche distinte nel settore di Progetto

Sulla base delle considerazioni e dell'analisi dei dati esposti nei capitoli precedenti, nel settore di progetto le unità geotecniche che sono state distinte e saranno interessate dalla realizzazione delle opere in progetto sono le unità UG1, UG2, UG3, UG4 e UG5, le cui caratteristiche litologiche e geotecniche sono state descritte nel dettaglio nel Capitolo 7. Di seguito si propone una tabella riassuntiva dei principali parametri geotecnici ricavati a partire dai risultati di tutte le indagini realizzate per differenti progetti nell'area di studio, distinti per ciascuna unità geotecnica.

Si tratta di una parametrizzazione basata sui dati attualmente disponibili; viene pertanto proposta per ciascun parametro una forchetta abbastanza ampia di valori, per tener conto della grande variabilità litologica del settore e del numero abbastanza ridotto di dati, soprattutto per quanto riguarda le prove di laboratorio. Ad oggi inoltre alcuna indagine è stata realizzata nel settore della dorsale che separa l'area di progetto dalle gorge della Dora il cui assetto litostratigrafico e geotecnico è pertanto sconosciuto.

La caratterizzazione geologica e geotecnica dell'area di progetto dovranno essere pertanto affinate e attualizzate a valle della completa realizzazione del piano delle indagini previsto per la fase di progettazione definitiva dello Svincolo de La Maddalena.

Svincolo di Chiomonte: Sintesi dei principali parametri geotecnici delle Unità interessate dal progetto										
Unità geotecnica	Litotipo	Peso di volume naturale	Coesione	Angolo di attrito	Modulo di Young	Modulo di taglio G da prove pressiometriche	Modulo di taglio operativo ($\nu = E/2G - 1$)	Modulo di taglio G0 da Vs	Coefficiente di permeabilità	Resistenza a compressione semplice
		γ (KN/m ³)	c' (KPa)	ϕ' (°)	E (MPa)	G (MPa)	G (MPa)	G0 (MPa)	K (m/sec)	MPa
UG1	Terreno di riporto costituito da sabbia limosa con subordinata ghiaia	18-20	0	25-30	20-25	-	-	-	1E-03 - 1E-05	-
UG2	Sabbia e sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	18-20	0-10	30-35	80-170	10-40	50-150	100-300	1E-03 - 1E-05	-
UG3	Ghiaia con ciottoli in matrice sabbiosa o sabbioso-limosa subordinata	19-21	0-5	30-35	80-180	10-40	50-150	100-400	1E-03 - 1E-05	-
UG4	Limi sabbiosi con subordinata ghiaia	18-20	0-20	25-30	20-40	10-50	50-120	250-300	1E-06 - 1E-08	-
UG5	Calcescisto	26-28	70-110*	30-35*	1500-2500	-	-	-	1E-06 - 1E-08	20-80

* = valori residui

Tab. 13 – Tabella riassuntiva dei principali parametri geotecnici per ciascuna delle unità geotecniche interessate dalle opere in progetto