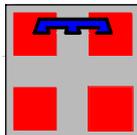




# Autostrada Asti-Cuneo



PROVINCIA DI ASTI



REGIONE PIEMONTE



PROVINCIA DI CUNEO

## COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE ASTI - CUNEO

TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)  
LOTTO 6 RODDI - DIGA ENEL

PROGETTO ESECUTIVO  
OPERE D'ARTE IN SEDE

GALLERIA DI VERDUNO  
PARTE GENERALE  
RELAZIONE GEOTECNICA

|             |            |  |            |              |                |                            |
|-------------|------------|--|------------|--------------|----------------|----------------------------|
| Aggiornato: | Data :     | Descrizione:                           | Redatto:   | Controllato: | Approvato:     | Codifica:                  |
| 00          | Apr. 2013  | EMISSIONE                              | Ing. Gatti | Ing. Ossezia | Ing. Ghislandi | 2.6 E - r D.2.1.03         |
| Aggiornato: | Data :     | Descrizione:                           | Redatto:   | Controllato: | Approvato:     | Lotto Prog. Tipo Elaborato |
| 01          | Marzo 2015 | Rev. a seguito richieste MIT-SVCA-V.A. | Ing. Gatti | Ing. Saurio  | Ing. Ghislandi | Marzo 2015                 |
| Aggiornato: | Data :     | Descrizione:                           | Redatto:   | Controllato: | Approvato:     | Scala:                     |
|             |            |  |            |              |                | -                          |



PROGETTISTA e RESP. INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:  
Dott. Ing. Enrico Ghislandi  
Albo di Milano  
N° A 16993

CONSULENZA SPECIALIZZATA



CONCESSIONARIA:







## INDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. PREMESSA.....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>3. DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO .....</b>   | <b>9</b>  |
| 3.1. DOCUMENTI PREGRESSI.....   | 9         |
| 3.1.1. <i>Indagini geognostiche.....</i>  | <i>9</i>  |
| 3.1.2. <i>Documento di Progetto/Expertise .....</i>                                       | <i>10</i> |
| 3.2. ELABORATI DI PROGETTO ESECUTIVO.....   | 12        |
| 3.2.1. <i>Indagini geognostiche.....</i>  | <i>12</i> |
| 3.2.2. <i>Documenti di Progetto.....</i>  | <i>12</i> |
| <b>4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO – GEOMORFOLOGICO .....</b>                                  | <b>14</b> |
| 4.1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO .....   | 14        |
| 4.2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE .....   | 15        |
| 4.3. ASSETTO GEOMORFOLOGICO GENERALE.....   | 17        |
| 4.4. CENSIMENTO DEI FENOMENI FRANOSI .....  | 19        |
| 4.5. ASSETTO STRATIGRAFICO DELL'AREA DI PROGETTO .....                                    | 23        |
| 4.5.1. <i>Marne di Sant'Agata Fossili (Tortoniano).....</i>                               | <i>23</i> |
| 4.5.2. <i>Formazione gessoso-solfifera (Messiniano) .....</i>                             | <i>24</i> |
| 4.5.3. <i>Argille di Lugagnano (Pliocene inferiore-medio) .....</i>                       | <i>24</i> |
| 4.5.4. <i>Depositi colluviali (Olocene-attuale).....</i>                                  | <i>25</i> |
| <b>5. INDAGINI GEOGNOSTICHE .....</b>   | <b>33</b> |
| 5.1. CAMPAGNE DI INDAGINI PREGRESSE .....   | 34        |
| 5.1.1. <i>Campagna di progetto preliminare della variante della S. S. n. 231 Alba-Bra</i> | <i>34</i> |
| 5.1.2. <i>Campagna Progetto Definitivo 1998.....</i>                                      | <i>35</i> |
| 5.1.3. <i>Campagna Progetto Esecutivo 2001 .....</i>                                      | <i>35</i> |
| 5.1.4. <i>Campagna di indagine integrativa 2006 .....</i>                                 | <i>36</i> |
| 5.2. CAMPAGNA DI INDAGINE INTEGRATIVA 2011-2012 .....                                     | 38        |
| 5.2.1. <i>Sondaggi geognostici.....</i>   | <i>39</i> |
| 5.2.2. <i>Campagna di indagine geofisica.....</i>   | <i>40</i> |
| 5.2.3. <i>Dati piezometrici.....</i>  | <i>42</i> |
| 5.2.4. <i>Dati inclinometrici .....</i>   | <i>47</i> |
| 5.2.5. <i>Analisi dati interferometrici .....</i>   | <i>51</i> |
| 5.3. ATTIVITÀ COMPLEMENTARI DI STUDIO .....   | 51        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>6. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....</b>   | <b>53</b>  |
| 6.1. PROVE IN SITO .....   | 56         |
| 6.1.1. Prove penetrometriche dinamiche .....   | 56         |
| 6.1.2. Prove pressiometriche MPM.....  | 64         |
| 6.1.3. Prove down-hole .....   | 67         |
| 6.2. PROVE DI LABORATORIO .....  | 84         |
| 6.2.1. Unità 3 - Depositi alluvionali attuali e medio-recenti.....   | 85         |
| 6.2.2. Unità 4 - coperture.....  | 86         |
| 6.2.3. Unità 5 - limi sabbiosi sovrapposti all'unità gessosa .....   | 90         |
| 6.2.4. Unità 6 - Gessi.....  | 94         |
| 6.2.5. Unità 7 - Argille marnose .....   | 100        |
| 6.3. PARAMETRI GEOTECNICI ATTRIBUITI ALLE UNITÀ .....  | 111        |
| 6.3.1. Unità 3 - Depositi alluvionali attuali e medio-recenti.....   | 111        |
| 6.3.2. Unità 4 - Coperture.....  | 111        |
| 6.3.3. Unità 5 - Limi sabbiosi sovrapposti all'unità gessosa .....   | 112        |
| 6.3.4. Unità 6 - Gessi.....  | 112        |
| 6.3.5. Unità 7 - Argille marnose .....   | 113        |
| 6.3.6. Tabella riassuntiva dei parametri geotecnici .....  | 114        |
| <b>7. SUDDIVISIONE DEL TRACCIATO IN ZONE OMOGENEE E DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOLOGICO-GEOTECNICO .....</b>               | <b>115</b> |
| 7.1. ZONA 1 - ZONA DELL'IMBOCCO LATO CHERASCO.....   | 120        |
| 7.2. ZONA 2 - ZONA DI GALLERIA INTERESSATA DALL'ATTRAVERSAMENTO DELLA ZONA DEI GESSI.....                                | 124        |
| 7.3. ZONA 3 - ZONA DI GALLERIA ALL'INTERNO DEL SUBSTRATO MARNOSO-ARGILLOSO   | 129        |
| 7.4. ZONA 4 - ZONA DI GALLERIA CON CORPI DETRITICI (GHIAIOSO-SABBIOSI) ALL'INTERNO DEL SUBSTRATO MARNOSO-ARGILLOSO ..... | 132        |
| 7.5. ZONA 5 – IMBOCCO LATO ALBA.....   | 139        |
| <b>8. DEFINIZIONE DELLE CRITICITA', DEGLI SCENARI DI RISCHIO E DEFINIZIONE DELLE SOLUZIONI PROGETTUALI .....</b>         | <b>146</b> |
| 8.1. ZONA 1 - ZONA DELL'IMBOCCO LATO CHERASCO .....  | 146        |
| 8.2. ZONA 2 - ZONA DI GALLERIA INTERESSATA DALL'ATTRAVERSAMENTO DELLA ZONA DEI GESSI.....                                | 149        |
| 8.3. ZONA 3 - ZONA DI GALLERIA ALL'INTERNO DEL SUBSTRATO MARNOSO-ARGILLOSO   | 155        |
| 8.4. ZONA 4 - ZONA DI GALLERIA CON CORPI DETRITICI (GHIAIOSO-SABBIOSI) ALL'INTERNO DEL SUBSTRATO MARNOSO-ARGILLOSO ..... | 156        |
| 8.5. ZONA 5 – IMBOCCO LATO ALBA.....   | 158        |
| 8.6. SCHEMA DI RIEPILOGO .....   | 159        |



|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>9.</b>  | <b>ANALISI NUMERICHE E MODELLAZIONI CONDOTTE .....</b>  | <b>162</b> |
| 9.1.       | VERIFICHE DI STABILITÀ IMBOCCO LATO CHERASCO .....  | 162        |
| 9.2.       | ANALISI DELLA CIRCOLAZIONE IDRAULICA NEL SETTORE DEI GESSI E VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DELLA GALLERIA SULL'ACQUIFERO ..... | 165        |
| 9.3.       | ACQUIFERO DEI CORPI DETRITICI ED IMPATTO IN FASE DI SCAVO .....   | 170        |
| 9.4.       | ANALISI DEGLI EFFETTI DELLO SCAVO IN SUPERFICIE .....   | 171        |
| 9.5.       | ANALISI DI STABILITÀ DEI FRONTI DI SCAVO .....  | 173        |
| 9.6.       | ANALISI DELLA STATICA DEI RIVESTIMENTI DELLA GALLERIA, DI PRIMA FASE E DEFINITIVI.....                                    | 175        |
| 9.7.       | VERIFICHE DI STABILITÀ IMBOCCO LATO ALBA .....  | 176        |
| 9.8.       | SINTESI DELLE GRANDEZZE DA MONITORARE ATTESE .....  | 180        |
| <b>10.</b> | <b>CONCLUSIONI.....</b>   | <b>181</b> |

**ALLEGATI:**

- *Figure*
- *Tabelle*

## 1. PREMESSA

Oggetto della presente relazione è la caratterizzazione geotecnica dei terreni interessati dallo scavo della galleria naturale “Verduno”, opera facente parte del Lotto 6, Tronco 2 del collegamento autostradale A6-A21 (Asti-Cuneo), nonché l’esame delle problematiche tecniche da affrontare nella realizzazione dell’opera.

Per il Lotto in esame, la galleria naturale, che dovrà attraversare la collina di Verduno, rappresenta infatti l’opera di maggiore complessità sul piano della fattibilità tecnica e dell’interazione con le preesistenze.

La galleria è composta da due fornici affiancati, ciascuno ospitante una carreggiata costituita da due corsie di marcia ed una corsia di emergenza; la lunghezza della galleria, nel tratto in naturale scavato a foro cieco, è pari a 3100 m circa in canna di valle e 3185 m in canna di monte. Lo scavo avviene con sistema meccanizzato, adottando una TBM del tipo EPB con diametro di scavo pari a 15,30 m; in corrispondenza degli imbocchi sono inoltre realizzati brevi tratti in tradizionale per consentire l’avvio della TBM.

Le due carreggiate (carreggiata Asti-Cuneo o “canna di valle” e carreggiata Cuneo-Asti o “canna di monte”) sono separate, ad eccezione dei tratti di imbocco e dei tratti in artificiale, da un setto di terreno da un minimo di 20 m sino ad un massimo di circa 70 m. La canna di monte ha una lunghezza complessiva (comprensiva di becco di flauto) di 3261.332 m, tra le progressive 0+515.448 (lato est, imbocco Alba) e 3+776.78 (lato ovest, imbocco Cherasco), con tratto in naturale, scavato a foro cieco di 3185 m (gli imbocchi in naturale sono ubicati rispettivamente alle progressive 0+559.88 e 3+747.38). La canna di valle ha una lunghezza complessiva (comprensiva di becco di flauto) di 3168.40 m, tra le progressive 4+308.00 (lato ovest, imbocco Cherasco) e 1+139.60 (lato est, imbocco Alba), con tratto in naturale di lunghezza pari a 3100 m; gli imbocchi in naturale sono ubicati rispettivamente alle progressive 4+263.60 e 1+159.02. Le coperture della galleria aumentano gradualmente:



dall'imbocco della galleria naturale lato Cuneo-Cherasco (da pochi metri in corrispondenza dell'imbocco, fino a 30 m a circa 500 m di distanza dall'imbocco) raggiungono valori compresi tra 40 e 95 m nel tratto centrale della galleria e infine diminuiscono progressivamente in corrispondenza dell'imbocco lato Asti-Alba (35 m a circa 300 m di distanza dall'imbocco, fino a pochi metri in corrispondenza dell'imbocco della galleria naturale).

Il progetto della Galleria Verduno e, più in generale del Lotto 6, ha subito un iter particolarmente complesso a partire dal primo progetto di massima, assoggettato a compatibilità ambientale con DEC VIA del 02.03.1994, passando attraverso il Progetto Esecutivo redatto dalla Società Selpro nel 2002-2003, fino al Progetto Definitivo redatto dalla Concessionaria nel 2008; su quest'ultimo progetto, nell'ambito della Conferenza dei Servizi del 06.05.2008, il Ministero dell'Ambiente ha richiesto la verifica di assoggettabilità secondo le modalità previste all'art. 20 del D.Lgs. n. 152/06 e s.m.i., così da ottenere una nuova compatibilità ambientale attinente ad un progetto ormai lontano, nei contenuti, da quello del 1994. Il DEC. VIA n. 576 del 28.10.2011, seguito alle pubblicazioni avvenute in data 17.04.2010 ed alle successive integrazioni e pubblicazioni, ha portato ad una revisione conclusiva del Progetto Definitivo.

In particolare, per quanto attiene agli aspetti geologico-geotecnici, il DEC VIA del 28.10.11 ha evidenziato la necessità dei seguenti approfondimenti (punto 2.2.5. Componente suolo e sottosuolo):

- Studio modellistico ad elementi finiti di valutazione dell'entità degli effetti di dissesto indotti sugli insediamenti residenziali e produttivi, in relazione al rischio di instaurazione di fenomeni significativi di subsidenza o crollo di strutture carsiche profonde.
- Studio per individuare la migliore tecnologia costruttiva per lo scavo della galleria che, con particolare riferimento al settore con litologie della Formazione gessoso-solfifera e alle zone di contatto con la Formazione delle marne di Sant'Agata, dovrà consentire di ridurre al minimo le interferenze con l'acquifero carsico contenute nei gessi.

- Predisposizione di un continuo monitoraggio durante l'opera di scavo della galleria, in considerazione che l'attraversamento di sedimenti sciolti sottofalda e di cavità carsiche, per natura non completamente monitorabili se non in corso d'opera, pone l'area circostante alla galleria a rischio idrogeologico.
- Definizione del monitoraggio ante-operam (almeno 1 anno prima dell'inizio dei lavori) preferibilmente mediante tecnologia GIS, con anche verifiche vibrazionali, ed esecuzione, sempre ante-operam, di indagini geoelettriche e sismiche per individuare le cavità carsiche.
- Verifiche delle zone di imbocco mediante approfondimenti geologici e geotecnici per verificare la stabilità secondo le NTC2008 (in considerazione della qualità scadente delle coperture detritiche è necessario che non vengano effettuati sbancamenti rilevanti (superiori ai 5 m), anche a breve termine, senza fare uso di opere di sostegno.
- Approfondimenti del contatto tra l'Unità 6 (Gessi) e l'Unità 7 (Marne).
- Predisporre, nella fase di sviluppo del progetto esecutivo, un Piano di Emergenza con definizione dei valori di allerta

Tali aspetti sono stati anche alla base della successiva progettazione, che ha visto la modifica delle modalità costruttive della galleria, dalla metodologia in tradizionale allo scavo meccanizzato, oggetto della presente verifica di ottemperanza.

La presente relazione prende quindi in carico questi aspetti, fornendo il commento agli approfondimenti richiesti. Nella fattispecie sono state esaminate le criticità geologico-geotecniche e sono stati valutati i conseguenti scenari di rischio, anche nell'ottica di impostare un sistema di monitoraggio per il controllo, in corso d'opera, dell'interferenza tra i lavori e le preesistenze.

Nel seguito, dopo un inquadramento geologico generale e dopo avere illustrato in dettaglio le campagne di indagini condotte, con particolare riguardo alla



**Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6**  
**PROGETTO ESECUTIVO**  
**Galleria Verduno - Relazione geotecnica**

campagna integrativa recentemente condotta, si descriverà la caratterizzazione geotecnica di progetto. Il tracciato della galleria sarà poi suddiviso in tratte a comportamento omogeneo, così da valutare in modo approfondito le singole criticità di ciascuna di esse. Verrà infine presentata una sintesi delle analisi numeriche condotte per verificare le condizioni di stabilità degli scavi e delle opere previste, nonché per verificarne i risentimenti sul territorio in cui si inserisce l'opera.



## 2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Per il presente lavoro sono state prese a riferimento le seguenti normative di legge:

- Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003 “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.”
- D.M. 14 gennaio 2008 “Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni.”
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici “Istruzioni per l’applicazione delle NTC2008”
- D.G.R. 19 gennaio 2010, n. 11-13058 “Aggiornamento e adeguamento dell’elenco delle zone sismiche (O.P.C.M. 3274/2033 e O.P.C.M. 3519/2006)” pubblicato su Bollettino Ufficiale Regione Piemonte n. 7 del 18/02/2010.
- D.G.R. 1 marzo 2010, n. 28-13422 “Differimento del termine di entrata in vigore della nuova classificazione sismica del territorio piemontese approvata con d.g.r. n. 11-13058 del 19/01/2010 e ulteriori disposizioni pubblicato su Bollettino Ufficiale Regione Piemonte n. 10 del 11/03/2010.

### 3. DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

#### 3.1. DOCUMENTI PREGRESSI

##### 3.1.1. Indagini geognostiche

La documentazione utilizzata per la caratterizzazione geologica, geomorfologica e geotecnica è rappresentata dai seguenti elaborati:

- Campagne di indagine del progetto preliminare della variante della S.S. n° 231 Alba-Bra:
  - stratigrafia dei sondaggi e foto delle cassette catalogatrici, prove geotecniche in sito - Vol. 1 - prima parte - emesso il 22/02/02 e revisionato l'08/04/03 - codice elaborato B.1.6.1.1;
- Campagne di indagine del progetto definitivo 1998:
  - stratigrafia dei sondaggi e foto delle cassette catalogatrici, prove geotecniche in sito - Vol. 1 - seconda parte - emesso il 22/02/02 e revisionato l'08/04/03 - codice elaborato B.1.6.1.1;
  - certificati delle prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi - Vol. I di IV - emesso il 22/2/02 - codice elaborato B.2.3.1;
- Campagna progetto esecutivo 2001:
  - “Ubicazione indagini geognostiche - Tav. 1” Rev. 1, del 08/04/03, codice elaborato B.1.5.1;
  - “Ubicazione indagini geognostiche - Tav. 2” Rev. 2, del 10/04/03, codice elaborato B.1.5.2;
  - “Ubicazione indagini geognostiche - Tav. 3” Rev. 2, del 10/04/03, codice elaborato B.1.5.3;
  - stratigrafia dei sondaggi e foto delle cassette catalogatrici, prove geotecniche in sito - Vol. 2 - emesso il 22/2/02 - codice elaborato

B.1.6.1.2;

- stratigrafia dei sondaggi e foto delle cassette catalogatrici, prove geotecniche in sito - Vol. 3 - emesso il 22/2/02 - codice elaborato

B.1.6.1.3;

- stratigrafia dei sondaggi e foto delle cassette catalogatrici, prove geotecniche in sito - Vol. 4 - emesso il 22/2/02 e revisionato l'8/4/03 - codice elaborato B.1.6.1.4;

- certificati delle prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi - Vol. II di IV - emesso il 22/2/02 - codice elaborato B.2.3.2;

- certificati delle prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi - Vol. III di IV - emesso il 22/2/02 - codice elaborato B.2.3.3;

- certificati delle prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi - Vol. IV di IV - emesso il 22/2/02 - codice elaborato B.2.3.4.

- Campagna di indagine integrativa 2006:

- “Indagini geognostiche integrative relative alla progettazione delle gallerie Alba e Verduno - Collegamento A6-A21 - Rapporto finale” del luglio 2006 redatto da Westgeo D. Minuto e Associati di Savona
- Certificati prove di laboratorio - preliminari -G.E.T. s.r.l. di Genova.

### 3.1.2. Documento di Progetto/Expertise

- Progetto Esecutivo 2001:

- “Relazione generale” Rev. 3 del 11/04/03, codice elaborato A.1.2;
- Studi e indagini: “Relazione geologica e idrogeologica” Rev. 1 del 08/04/03, codice elaborato B.1.1.1;

- “Caratterizzazione Geologico - Tecnica dell'area di progetto” del 08/04/03, codice elaborato B.1.1.2;
- “Relazione Geotecnica generale” Rev. 1 del 08/04/03, codice elaborato B.2.1.1
- “Profilo geotecnico longitudinale - Tav. 1” Rev. 0 del 22/02/02, codice elaborato B.2.2.1;
- “Profilo geotecnico longitudinale - Tav. 2” Rev. 0 del 22/02/02, codice elaborato B.2.2.2;
- Galleria Verduno:
  - “Relazione geotecnica” Rev. 1 del 08/04/03, codice elaborato D.2.1.2;
  - “Profilo geologico - tecnico in asse galleria - canna di monte” Rev. 0 del 22/02/02, codice elaborato D.2.1.3;
  - “Profilo geologico - tecnico in asse galleria - canna di valle” Rev. 0 del 22/02/02, codice elaborato D.2.1.4;
  - “Profilo geomeccanico canna di monte e canna di valle” Rev. 1 del 08/04/03, codice elaborato D.2.1.15;
- Expertise Geodes del 2006:
  - “Relazione illustrativa dello studio geologico-geotecnico per la valutazione della metodologia ottimale di scavo”
- Progetto Definitivo 2009 e successive rimissioni del 2010, 2011 e 2012:
  - Studi e indagini: “Relazione geologica e idrogeologica generale”
  - Studi ed indagini: “Relazione Geotecnica generale”
  - Galleria Verduno:
    - “Relazione geologico - geotecnica”
    - “Profilo geologico – geomeccanico in asse galleria - canna di monte”
    - “Profilo geologico – geomeccanico in asse galleria - canna

di valle”

- “Carta geologico – geomorfologica con ubicazione del monitoraggio”.

### **3.2. ELABORATI DI PROGETTO ESECUTIVO**

#### **3.2.1. Indagini geognostiche**

Per il dettaglio delle indagini eseguite si dovrà fare riferimento ai seguenti elaborati 2.6-E.rB.3.5.02 e 2.6-E.rB.3.5.03. L’ubicazione planimetrica è riportata nell’elaborato “Planimetria ubicazione indagini geognostiche”, documento 2.6-E.dD.2.1.04.

#### **3.2.2. Documenti di Progetto**

Nel dettaglio i nuovi elaborati geologici sono:

- “Carta geologica”
- “Carta geomorfologica”
- “Carta dei fenomeni franosi censiti”
- “Planimetria indagini geognostiche eseguite”
- “Planimetria di monitoraggio”
- “Planimetria edifici censiti”
- Profilo geologico-stratigrafico Canna di Monte e Canna di valle – tav. 1/2
- Profilo geologico-stratigrafico Canna di Monte e Canna di valle – tav. 2/2
- Profilo geologico e geomeccanico canna di monte
- Profilo geologico e geomeccanico canna di valle
- Profilo geologico e geomeccanico – Valutazione del rischio - canna di monte
- Profilo geologico e geomeccanico – Valutazione del rischio - canna di valle
- Confronto profili geologici PD/PE – canna di monte



**Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6**  
**PROGETTO ESECUTIVO**  
**Galleria Verduno - Relazione geotecnica**

- Confronto profili geologici PD/PE – canna di valle
- Sezioni geologiche AA'-BB'
- Sezioni geologiche CC'-DD'
- Sezioni geologiche EE'-FF'
- Sezioni geologiche GG'
- Sezioni geologiche HH' II' LL'
- Planimetria geologica e geomorfologica lato Cuneo
- Sezioni geologiche lato Cuneo
- Planimetria geologica e geomorfologica lato Asti
- Sezioni geologiche lato Asti
- Relazione geologica – Galleria Verduno
- Relazione idrogeologica – Galleria Verduno.

## 4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO – GEOMORFOLOGICO

Nel presente capitolo, dopo un breve inquadramento geografico, si riporta una sintesi del quadro geologico-geomorfologico ed idrogeologico generale, così come desunto dalla “Relazione geologica” (documento D.2.1.02) e dalla “Relazione idrogeologica” (documento D.2.1.04), alle quali si rimanda per maggiori approfondimenti.

### 4.1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L’area interessata dalla galleria a progetto (cfr. fig. 4.1) si trova al margine settentrionale del territorio delle Langhe, interamente in sponda destra del Fiume Tanaro. Il tracciato della galleria descrive un’ampia curva con la concavità rivolta verso il fiume Tanaro. La galleria si addentra all’interno del versante blandamente ondulato che, dalla dorsale collinare di La Morra – Verduno, degrada verso il fiume. Da ovest verso est, la galleria si trova ad interessare le aree dei seguenti comuni: Cherasco, La Morra, Verduno e Roddi.

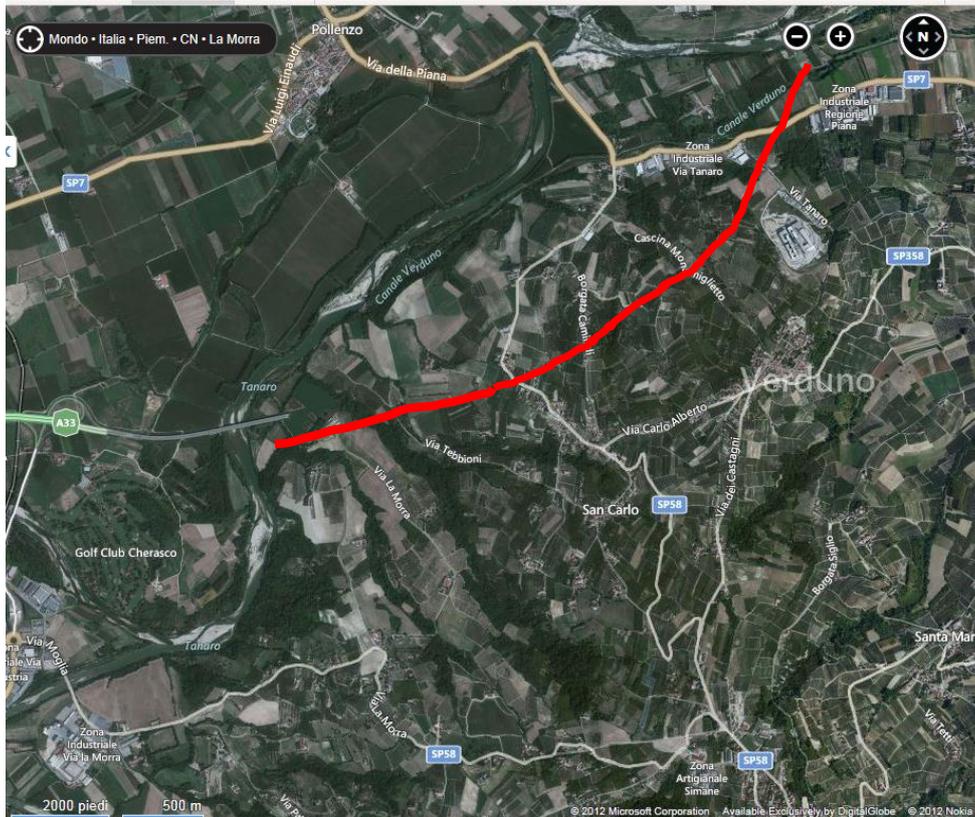


Figura 4.1 – Inquadramento generale dell'area

#### 4.2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE

Come già riportato al precedente paragrafo 4.3, il collegamento stradale Asti-Cuneo è compreso nei Fogli 68-Carmagnola, 69-Asti, 80-Cuneo e 81-Ceva della Carta Geologica d'Italia, a scala 1:100.000. Questo settore del Piemonte meridionale risulta caratterizzato da un substrato costituito da sedimenti marini appartenenti al Bacino Terziario Ligure-Piemontese e dalla presenza discontinua di coperture, generalmente di ridotto spessore, rappresentate da depositi quaternari.

Nel corso dell'Oligocene si individua, nell'area in parte corrispondente alle attuali Langhe, un ampio golfo marino descrivibile nell'insieme come un'ampia depressione sinclinale allungata da W verso E. Questo bacino consente la deposizione di una potente successione terrigena, che prosegue per tutto il Miocene, composta da arenarie, argille e conglomerati derivanti principalmente



dalla sedimentazione ad opera di correnti di torbida (Gelati & Gnaccolini, 1988; Giammarino, 1984).

La disposizione attuale della sequenza, descrivibile come una struttura a monoclinale abbastanza regolare, ben stratificata e con immersione rivolta verso NW e inclinazione di  $10^\circ \div 15^\circ$ , deriva dal successivo sollevamento iniziato durante l'orogenesi alpina e proseguito nel corso del Quaternario.

Per tutta la sua estensione, circa 50 km, il Tronco II dell'Autostrada Asti-Cuneo si sviluppa in direzione Est-Ovest lungo l'incisione del F. Tanaro, trasversalmente rispetto all'asse della struttura geologica nota come "sinclinale astigiana". In particolare, ne attraversa il fianco meridionale, dove affiorano unità stratigrafiche terziarie via via più recenti procedendo verso Asti, con l'avvicinarsi al nucleo della struttura, come più in dettaglio descritto al paragrafo 9.5. Il substrato è costituito da sequenze litologiche di età compresa tra il Tortoniano ed il Pliocene, per lo più a composizione marnoso-argillosa. I terreni di copertura, relativi al Quaternario-Attuale, sono riferibili fundamentalmente ai depositi alluvionali del F. Tanaro e del T. Stura di Demonte. La loro composizione granulometrica è variabile da grossolana (sabbie, ghiaie e ciottoli) a fine (limi e argille). Dal punto di vista delle deformazioni tettoniche fragili l'area è interessata da un sistema di faglie sub verticali con direzione NNE-SSO (fino a NNO-SSE) e ONO-ESE. La presenza di questi lineamenti risulta evidente da foto aeree e dalla geomorfologia: alcuni affluenti minori del Tanaro nel settore Ovest della galleria sembrano impostarsi su queste direttrici NNO-SSE e ONO-ESE.

La sequenza marina terziaria ed i depositi continentali furono oggetto sin dalla fine del secolo scorso di numerose ricerche (si veda, ad esempio, Sacco 1889-1890). Successivamente, ed in particolare dalla seconda metà di questo secolo, nuove indagini di carattere stratigrafico e sedimentologico (Martinis, 1954; Gelati, 1976; Gnaccolini et al., 1990), hanno consentito una migliore caratterizzazione dei meccanismi di deposizione, della distribuzione e della



collocazione cronologica dei singoli corpi sedimentari, ponendo le basi conoscitive per una ricostruzione rappresentativa dell'assetto del bacino.

#### 4.3. ASSETTO GEOMORFOLOGICO GENERALE

Le caratteristiche morfologiche dell'area risultano direttamente improntate dai fenomeni intercorsi a partire dal Pleistocene medio ed in particolare dall'evoluzione del reticolo idrografico. In corrispondenza del tratto Marene-Asti si riconoscono due assetti nettamente differenziati, separati dal brusco cambio di direzione del F. Tanaro che, all'altezza dell'abitato di Cherasco, abbandona la direzione Nord-Sud per assumere un andamento Est-Ovest fino ad Alba e proseguire poi in direzione SW-NE verso Asti.

Il tratto posto ad Ovest è contraddistinto morfologicamente da tre ordini di superfici terrazzate sospese a quote diverse rispetto all'alveo. Questa situazione è indicativa della generale tendenza all'erosione verticale, intervallata da modesti episodi di accumulo, che ha interessato l'intero settore meridionale della pianura cuneese. L'interpretazione di un modellamento "in negativo" avvenuto a spese del substrato terziario è confermato dal fatto che i depositi quaternari riconosciuti in corrispondenza di tutte le superfici terrazzate rappresentano sempre una copertura di modesto spessore, al massimo dell'ordine di poche decine di metri, con contatti di tipo erosionale rispetto ai vari termini della sequenza terziaria.

La superficie più alta (attorno ai 320 m), riconoscibile in sinistra dello Stura in corrispondenza dell'abitato di Marene, rappresenta l'estremità orientale dell'esteso altopiano di Fossano. Quest'unità morfologica costituisce insieme agli altopiani di Trinità e Magliano un sistema di superfici isolate, nel complesso sub-pianeggianti, ma decisamente ondulate nel dettaglio, rilevate rispetto alla pianura di 20 - 50 m, a cui sono riferibili depositi del Pleistocene medio.

Il livello di base attuale della pianura, costituitosi durante una fase deposizionale immediatamente precedente la diversione del Tanaro (Pleistocene superiore ?), ha un notevole sviluppo areale in tutto il cuneese e,

nel tratto considerato, si trova in corrispondenza degli abitati di Bricco dè Fauli e Roreto, in sinistra dello Stura, mentre sulla destra costituisce il lembo su cui sorge l'abitato di Cherasco. Si tratta di una superficie tabulare debolmente inclinata (0.4%) verso Nord-Est, sospesa di 70 - 80 m sul fondovalle attuale al quale si raccorda per mezzo di scarpate nette, profondamente incise dal reticolato idrografico locale.

La fascia di fondovalle è costituita da depositi recenti che costituiscono lembi di superfici terrazzate localmente caratterizzate da una certa continuità, come si osserva in sinistra idrografica ad Ovest di Cervere. Tale assetto è connesso al veloce approfondimento recente del corso d'acqua. In questo tratto il corso inferiore dello Stura presenta un andamento debolmente sinuoso all'interno di un alveo di piena curvilineo largo mediamente un centinaio di metri.

Nel tratto ad Est del punto di diversione, il Tanaro ha riutilizzato ed ampliato l'incisione operata da un suo affluente di destra e si sviluppa quindi in rapporto di sovraimposizione rispetto ad una morfologia preesistente. Attualmente il corso d'acqua scorre meandrizzando all'interno di una fascia di fondovalle, costituita da depositi recenti (Olocene), che a valle di Cherasco si sviluppa degradando dalla quota di 200 m sino ai 115 m circa, su una larghezza variabile tra 1.5 e 2.5 km. Ai margini dell'ampia valle del Tanaro si hanno rilievi collinari di modesta elevazione (300 - 350 m slm), caratterizzati da forme generalmente arrotondate che, soltanto nella zona soggetta al modellamento diretto da parte del corso d'acqua, assumono per lunghi tratti i caratteri di scarpate in erosione attiva, con evidente risalto morfologico.

Il fenomeno di diversione del Tanaro è stato seguito da una veloce ed intensa fase di approfondimento erosionale dell'intero sistema idrografico, sia a monte che a valle del punto di tracimazione. La nuova posizione del livello di base risulta, infatti, posta ad una quota di circa 150 m inferiore alla precedente; di conseguenza si innesca a livello regionale una ripresa dell'azione erosiva, che svolge tuttora un ruolo determinante nell'instaurare, in particolare, condizioni predisponenti ad una instabilità generalizzata dei versanti.

L'alternanza di strati a diverso comportamento meccanico ha favorito una erosione selettiva determinando un tracciato delle aste torrentizie sinuoso (più evidente nell'alto bacino) e un profilo di fondo a salti, con l'alternarsi di tratti a pendenza contenuta e gradoni di dislivello marcato.

In sequenza, la sotto-escavazione e lo scalzamento al piede del pendio sono i primi riflessi dell'approfondimento delle aste di drenaggio per erosione; successivamente si innescano frane di scivolamento traslativo per mancanza di sostegno alla base; infine la franosità migra verso l'alto del versante sino alle creste, le più stabili sotto il profilo dinamico-evolutivo.

In definitiva, per tutto l'Olocene (ultimi 10.000 anni) l'evoluzione morfologica e lo sviluppo dei processi sedimentari dell'area di interesse risultano fortemente condizionati dalla diversione del Tanaro. Questa ha determinato un abbassamento significativo del livello di base relativo e l'innescò di un fenomeno di erosione regressiva generale che ha interessato l'intero reticolato idrografico del Bacino Piemontese meridionale (Tanaro, Belbo, Ellero, Pesio, Stura), determinando le attuali profonde incisioni dei corsi d'acqua all'interno del livello fondamentale della pianura cuneese.

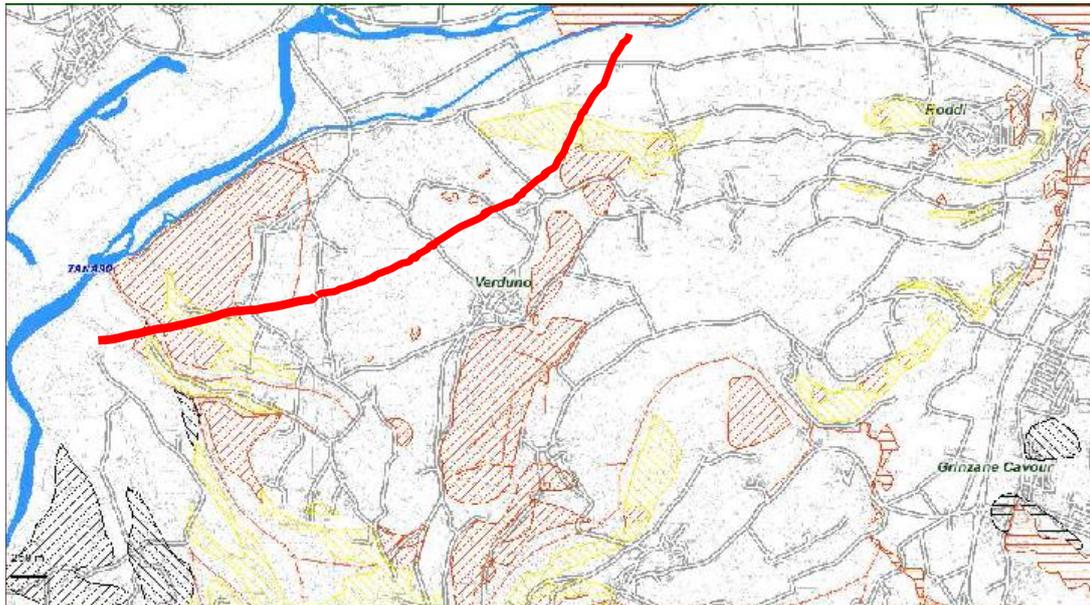
Nel tratto di Verduno l'approfondimento della valle del Tanaro ha originato una superficie del versante in destra orografica che ha assunto una pendenza media circa coincidente con la stratificazione del substrato locale (circa 10-15°), mentre si sono originati movimenti franosi che hanno coinvolto la coltre colluviale e i terreni della formazione evaporitica messiniana.

Una componente importante dell'assetto geomorfologico è rappresentata dalle forme carsiche, di cui si è discusso nella "Relazione geologica".

#### **4.4. CENSIMENTO DEI FENOMENI FRANOSI**

Per completare il quadro geomorfologico, in aggiunta all'attività di campagna, si è provveduto ad una ricerca sui fenomeni già censiti dagli Enti preposti alla tutela del territorio. Nel dettaglio si evidenziano le seguenti tematiche:

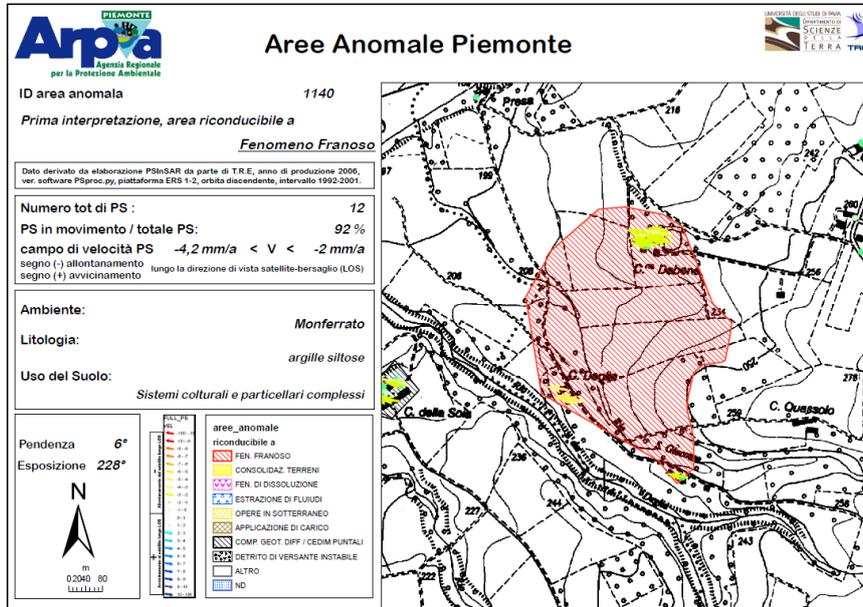
- Censimento dei dati ARPA – I.F.F.I.: riporta delle aree estese caratterizzate da “scivolamento rotazionale traslativo” che interessano marginalmente la zona dell’imbocco lato Asti. Gli altri fenomeni censiti sono localizzati nel settore di monte rispetto al tracciato della galleria. Le aree individuate da questo censimento mostrano un buon ricoprimento con le aree riportate come frana attiva/quiescente dai dati PAI aggiornato (Figura 4.2).



*Figura 4.2 – Aree riportate come frana attiva/quiescente dai dati PAI (in retino giallo le aree indicate come frane quiescenti, in retino rosso le aree indicate come frane attive, in nero le aree indicate come zone di dissesto)*

- Aree anomale desunte da analisi interferometrica radar satellitare riportate sul Sito ARPA Piemonte: viene individuata un’area come frana attiva in prossimità dell’ imbocco lato Cuneo; l’area appare comunque molto ridotta rispetto alle aree di frana riportate dal PAI nella stessa area. La scheda monografica AA 1140 riportata in Figura 4.3 indica entità degli spostamenti pari a 2-4,2 mm/anno. Nella stessa analisi viene individuata un’altra area di frana attiva (scheda AA 1142) esterna al tracciato e altre due aree interessate da fenomeni franosi quiescenti (schede AA 1137 e AA 1139). L’analisi interferometrica individua anche altre due aree ristrette caratterizzate dalla presenza di edifici (scheda

AA2160), da cedimenti differenziali (scheda AA 1141) e da fenomeni franosi (AA 140).



*Figura 4.3 – Scheda monografica AA 1140*

- I fenomeni franosi riportati dal PAI aggiornato, nel settore orientale (lato Alba), coincidono con le aree riportate dal censimento ARPA – I.F.F.I. Nel settore Occidentale (lato Cuneo) vengono individuati fenomeni franosi attivi che interessano l’area dell’imbocco Cherasco e si estendono a Nord fino al Tanaro.

Una sintesi delle aree indicate dai vari enti come soggette a fenomeni franosi (e delle loro eventuali sovrapposizioni) è presentata nella “Carta dei Fenomeni Franosi Censiti”, documento 2.6-E.dD.2.1.06, uno stralcio della quale è riportato nella Figura 4.4.

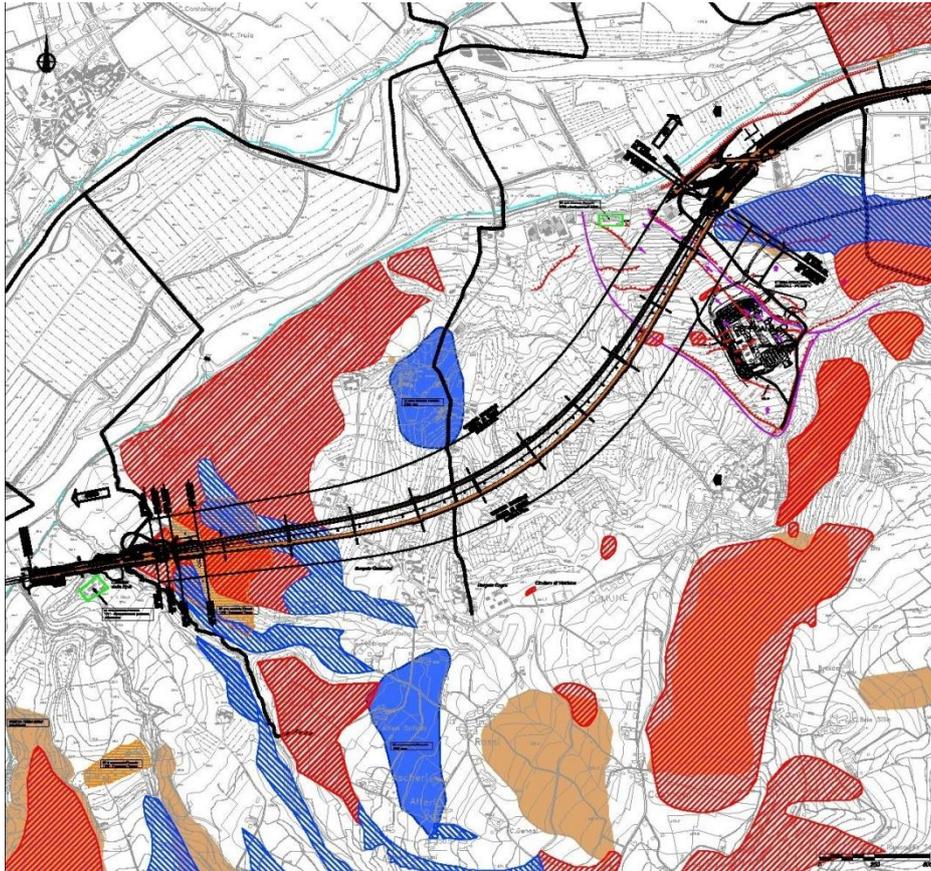


Figura 4.4 – Stralcio della Carta dei Fenomeni Franosi Censiti (si veda l'elaborato grafico per la legenda delle aree)

L'elaborazione SqueeSAR™ del RADARSAT-1 ascendente, svolta nell'ambito degli studi svolti per il Progetto Esecutivo, ha in particolare consentito di ottenere informazioni quantitative sulle eventuali deformazioni della superficie avvenuti nell'arco temporale marzo 2003 – settembre 2012, all'interno dell'area in esame. Nell'area sono stati individuati oltre 3100 punti di misura, ma la distribuzione è piuttosto disomogenea, a causa della presenza di estese aree agricole e/o vegetate che impediscono l'individuazione di bersagli radar stabili.

Mentre le cartografie IFFI, PAI, ARPAP, segnalano la presenza di numerosi fenomeni franosi nell'area, l'analisi dei dati SqueeSAR™ anche a causa della scarsità di bersagli sui dissesti segnalati, non ha rilevato movimenti significativi. Tuttavia occorre segnalare al riguardo la scarsa congruenza delle cartografie citate, per la presenza di aree sovrapposte con significato discordante.

L'interpretazione progettuale circa le criticità geomorfologiche dell'area di progetto, che tiene conto di tutte le informazioni esaminate, compreso i sopralluoghi sul posto, è riportata nel documento "Carta geomorfologica", documento 2.6-E.dD.2.1.06. Senza dubbio l'area più critica è rappresentata dal settore interessato dall'imbocco lato Alba e dal versante a monte dello stesso, in direzione del Nuovo Ospedale Alba-Bra, laddove è presente un'estesa area in frana attiva interessante i depositi di copertura, nonché si è evidenziata la presenza di piani di scorrimento traslazionale all'interno del substrato marnoso.

Si evidenzia che i fenomeni franosi che interessano la zona del Nuovo Ospedale e l'area estesa a Nord non sono riportati nei censimenti esaminati, né negli inventari sugli eventi franosi; gli elementi riportati nella carta geomorfologica di progetto sono basati sulle evidenze morfologiche riportate nelle carte geologico-geomorfologiche presenti tra i documenti del progetto delle fondazioni del Nuovo Ospedale.

#### **4.5. ASSETTO STRATIGRAFICO DELL'AREA DI PROGETTO**

La successione litologico - stratigrafica dell'area interessata dall'opera in progetto comprende, a partire dalle unità più antiche, stratigraficamente inferiori, i seguenti termini:

##### **4.5.1. Marne di Sant'Agata Fossili (Tortoniano)**

Si tratta di un complesso di argille, argilliti e marne di colore grigio-azzurro spesso a frattura irregolarmente concoide, cui localmente si intercalano livelli di peliti siltose grigie e corpi arenacei e conglomeratici. Esso rappresenta una fase di sedimentazione di mare aperto, come indicato anche dalle associazioni fossili presenti. L'assetto giaciturale è nel settore di Verduno monoclinale, debolmente inclinato ( $5^\circ \div 20^\circ$ ) verso N-NW. Lo spessore complessivo raggiunge i  $250 \div 300$  m. In funzione di questo assetto strutturale, la formazione affiora con notevole estensione in corrispondenza dei rilievi che bordano il

fianco destro della valle del Tanaro, dai dintorni di Roddi sino a Sant'Anna, presso Costigliole d'Asti, mentre in sinistra orografica è presente con estensioni minori e si immerge al di sotto delle unità più recenti.

#### **4.5.2. Formazione gessoso-solfifera (Messiniano)**

Tale formazione, che poggia, tramite una superficie di tipo erosivo, direttamente sulle Marne di Sant'Agata Fossili, è presente, in destra orografica al Tanaro, sulla zona collinare a Nord e a Ovest di Verduno. Dal punto di vista litologico la formazione comprende un'alternanza di peliti grigie, violacee o brune, gessi ed arenarie fini in strati sottili.

Questi sedimenti risultano spesso debolmente cementati, anche per la presenza di fenomeni di dissoluzione dei gessi, un'elevata percentuale di vuoti e vere e proprie cavità di tipo carsico. Lo spessore di questi terreni è molto variabile. Nel tratto in esame risulta generalmente di alcune decine di metri, mentre la potenza massima riscontrata raggiunge il centinaio di metri.

#### **4.5.3. Argille di Lugagnano (Pliocene inferiore-medio)**

La successione miocenica descritta è ricoperta dai depositi trasgressivi delle Argille di Lugagnano, costituiti essenzialmente da argille marnose e siltose grigio-azzurre, con locali intercalazioni arenacee giallastre più frequenti verso la base della formazione. L'aspetto litologico è molto simile a quello delle Marne di S. Agata Fossili, mentre risulta inferiore il tenore in carbonato di calcio. La giacitura dei banchi risulta da suborizzontale a debolmente inclinata verso N-NO ( $3^{\circ}$ ÷ $5^{\circ}$ ). Lo spessore della Formazione raggiunge i 150 m.

Sul lato destro della valle del Tanaro, costituisce solo limitate aree alla sommità del rilievo compreso tra Verduno e la borgata S. Michele (Cherasco). La loro giacitura risulta leggermente discordante rispetto ai terreni della sottostante Formazione Gessoso-Solfifera.

#### 4.5.4. Depositi colluviali (Olocene-attuale)

Questi depositi comprendono terreni sciolti a granulometria prevalentemente fine provenienti dal rimaneggiamento e da un limitato trasporto, ad opera delle acque di scorrimento superficiale non incanalate, dei prodotti di alterazione in posto del substrato e dei materiali dei corpi di frana: limi sabbiosi fini non addensati, limi argillosi poco consistenti inglobanti a tratti sabbie e ghiaie. Sono presenti localmente frammenti di cristalli di gessi e, raramente, ciottoli ( $d_{max} = 10 \div 20$  cm) e clasti di marna alterata. La distribuzione degli accumuli relativi a questa unità è controllata dal comportamento nei confronti dell'erosione areale dei terreni affioranti (granulometria, presenza di coesione, posizione morfologica favorevole all'erosione). I depositi principali, a granulometria limoso-argillosa (con spessori anche dell'ordine della decina di metri), si rinvengono alla base dei versanti impostati nelle sequenze marnose profondamente modellate dai fenomeni fluviali, come la dorsale di Roddi e le incisioni minori confluenti nella Valle del torrente Talloria.

Sulla base della lettura di tutti i logs stratigrafici è stata predisposta una legenda delle indagini geognostiche (cfr. fig. 4.5), che ha consentito una lettura schematica di tutti i sondaggi utilizzati per le ricostruzioni del modello geologico di riferimento.

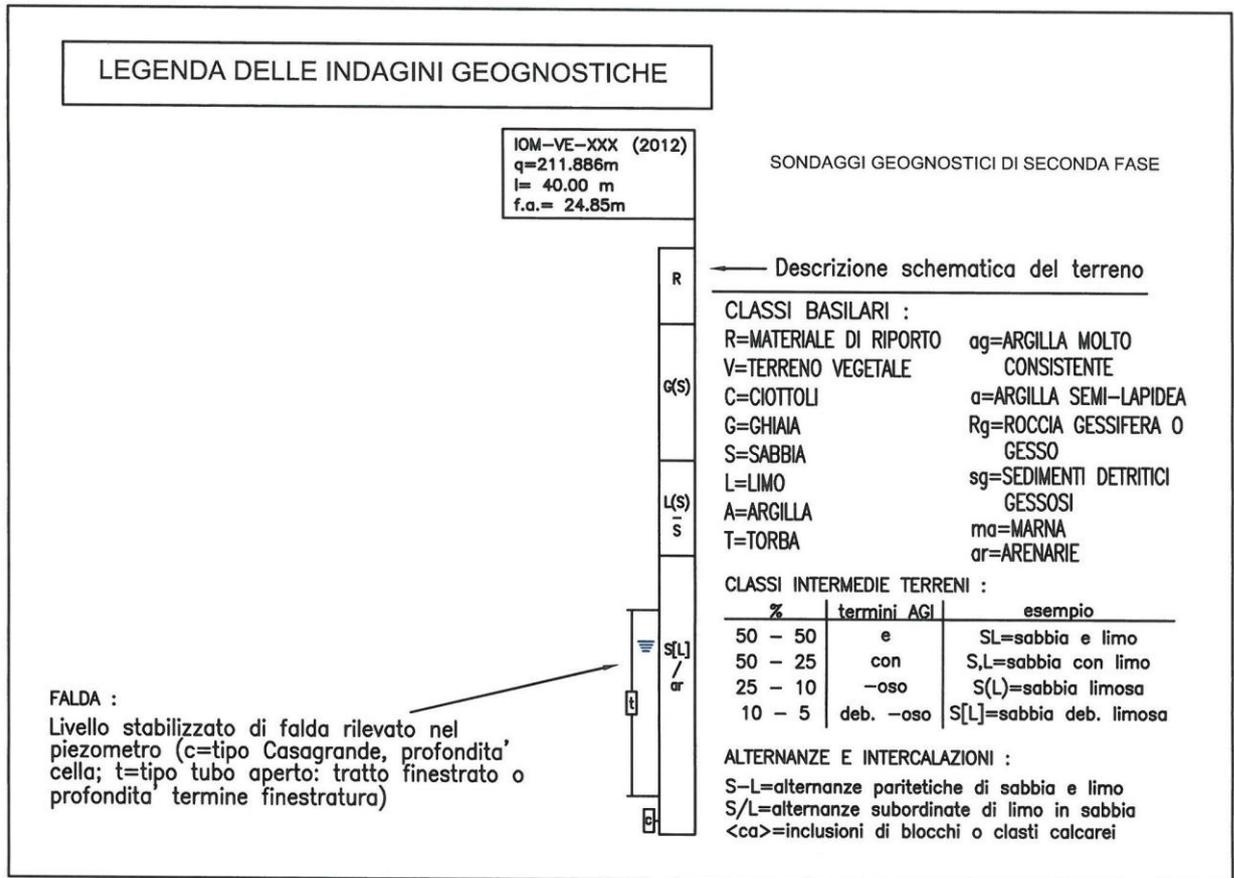


Figura 4.5

Successivamente l'analisi di tutti i dati stratigrafici, in particolare di quelli derivanti dall'ultima campagna di indagini (2011 – 2012), ha portato ad una schematizzazione stratigrafica ed alla identificazione di unità litologiche ben definite e confrontabili con le unità litologiche previste nel PD. Le differenti unità litologiche sono state interpretate secondo il seguente schema (cfr. figura 4.6):

| FORMAZIONI GEOLOGICHE  | UNITA' LITOLOGICHE | LEGENDA LITOLOGICA   |
|--|--------------------|--|
| - Riporto  | 1b                 |  Materiale di riporto/vegetale  |
| - Complesso ghiaioso-sabbioso/limo-sabbioso<br>- Corpi detritici grossolani all'interno argille-mamose   | 3 / 7a             |  Facies ghiaioso-sabbiosa   |
| FriCl<br>- Depositi di frana<br>- Limi sabbiosi fini, localmente argillosi, inglobanti ghiaie e ciottoli   | 4                  |  Limi prevalenti  |
| FriPa<br>- Depositi di frana<br>- Argille di Lugagnano.<br>Argille mamose e silteose grigio-azzurre con intercalazioni, verso l'alto, di banchi di sabbie (Pliocene inferiore-medio).  | 4 / 5              |  Argilla limosa, argilla sabbiosa   |
| Pa<br>- Argille di Lugagnano.<br>Argille mamose e silteose grigio-azzurre con intercalazioni, verso l'alto, di banchi di sabbie (Pliocene inferiore-medio).  | 5                  |  Argilla mamosa con noduli di gesso   |
| M4<br>- Mame di S. Agata Fossili.<br>Limi argillosi e argille mamoso-silteose grigio-azzurre con sottili livelli di limo e sabbie fini. Intercalazioni di corpi sabbiosi e ghiaiosi con spessore metrico più frequenti al tetto dell'unità. Locale presenza di livelli calcarenitici con spessore decimetrico. (Tortoniano-Miocene Sup.).      | 7                  |  Mama da grigia a verde, con granuli e noduli gessosi; alternanze di mama compatta grigio-azzurra ed argilla da molto consistente a dura, da debolmente limosa a limosa; stratificazione evidente |
| M5<br>- Formazione Gessoso-Solfifera.<br>Alternanze ben stratificate di limi argillosi, argille mamose e limi sabbiosi con gessi. I gessi costituiscono banchi litoidei con potenza metrica o si intercalano nella matrice limoso-argillosa sottoforma di sottili livelli e cristalli isolati. (Messiniano)<br>(g) - Blocchi di gesso litoide. | 6                  |  Roccia gessifera o gesso grigio-bianco con tessitura cristallina con macrocristalli chiari, da compatta a totalmente frantumata, con superfici di discontinuità riempite di materiale argilloso  |
|  Livello stabilizzato di falda rilevato nel piezometro<br> Letture piezometri pregressi.  |                    |  Limite stratigrafico<br> Superficie di discontinuità  |

Figura 4.6

Le ricostruzioni descritte al precedente paragrafo, rappresentano il risultato dell'analisi e dell'esame condotto sui logs stratigrafici. Di seguito si riportano alcuni esempi delle principali unità litologiche così come si presentano nei sondaggi eseguiti nell'ultima campagna di indagini, 2011-2012.



|       |       |
|-------|-------|
| CASSA | 10    |
| DA m  | 45,00 |
| A m   | 50,00 |

Figura 4.7 – Sondaggio SOT-VE-025: esempio di lenti sabbiose all'interno del substrato marnoso (unità 3 e 7a)



**CASSA**      3  
**DA m**      10,00  
**A m**      15,00



**CASSA**      4  
**DA m**      15,00  
**A m**      20,00

*Figura 4.8 – Sondaggio SOT-VE-070: esempio di depositi di copertura lato Alba (unità 4)*



|       |       |
|-------|-------|
| CASSA | 2     |
| DA m  | 5,00  |
| A m   | 10,00 |

Figura 4.9 – Sondaggio IOV-MO-045: esempio di depositi pliocenici (unità 5)



|       |       |
|-------|-------|
| CASSA | 4     |
| DA m  | 15,00 |
| A m   | 20,00 |

Figura 4.10 – Sondaggio IOV-VE-046: esempio di argilla marnosa tra m 17 e m 20 (depositi pliocenici) (unità 5)



|              |          |
|--------------|----------|
| <b>CASSA</b> | <b>9</b> |
| DA m         | 40,00    |
| A m          | 45,00    |



|              |           |
|--------------|-----------|
| <b>CASSA</b> | <b>10</b> |
| DA m         | 45,00     |
| A m          | 50,00     |

Figura 4.11 – Sondaggio IOM-MO-070: esempio di roccia gessifera (unità 6)



|       |       |
|-------|-------|
| CASSA | 13    |
| DA m  | 60,00 |
| A m   | 65,00 |

Figura 4.12 – Sondaggio IOM-MO-060: esempio di marna (unità 7)

## 5. INDAGINI GEOGNOSTICHE

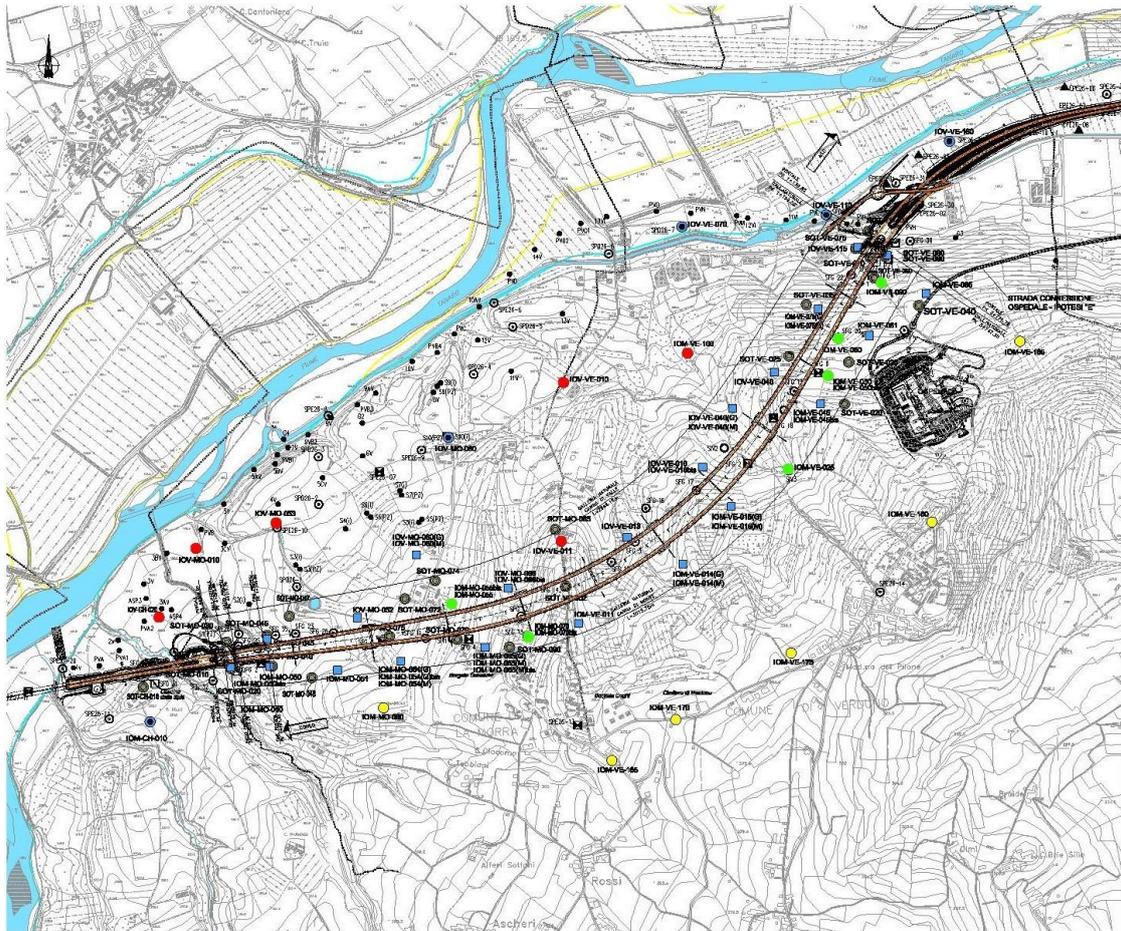
Nel corso dell'iter progettuale della Galleria Verduno sono state realizzate numerose campagne di indagini geognostiche; nel dettaglio:

- Campagna di progetto preliminare della variante della S. S. n. 231
- Campagna di progetto definitivo 1998
- Campagna di progetto esecutivo 2001
- Campagna di indagine integrativa 2006
- Campagna di progetto esecutivo 2011-2012

Nell'elaborato "Planimetria indagini geognostiche", documento 2.6E-d-D.2.1.04, sono riportati tutti i sondaggi eseguiti con le seguenti sigle:

- Sondaggi geognostici campagna Sicos (S10VI)
- Sondaggi geognostici Campagna Soreco (S1V)
- Sondaggi geognostici Campagna Radaelli Castellotti 1991 (G...)
- Sondaggi geognostici Campagna RCT 1996 (ASP)
- Sondaggio Regione Piemonte (PS1)
- Altri Sondaggi geognostici presenti nell'area a progetto (SI...)
- Sondaggi geognostici 2006 – studio di fattibilità (S....)
- Sondaggi expertise 2006 (SIV...)
- Sondaggi geognostici Geotecno - 2008 (SPD26)
- Sondaggi geognostici Geotecno - 2001 (SPE26)

Nel seguito si riporta una sintesi delle indagini condotte nelle singole campagne geognostiche condotte, e si discute nel dettaglio le nuove indagini condotte per la messa a punto del presente modello geologico di Progetto Esecutivo. In Figura 5.1 si riporta uno schema planimetrico con l'ubicazione dei punti di indagine.



*Figura 5.1 – Planimetria indagini geognostiche*

## **5.1. CAMPAGNE DI INDAGINI PREGRESSE**

### **5.1.1. Campagna di progetto preliminare della variante della S. S. n. 231 Alba-Bra**

Nell'ambito di questa campagna di indagine sono stati effettuati 26 sondaggi a rotazione e carotaggio continuo, indicati con le seguenti sigle 10VI, 11VI, 12VI, 13VI, 1V, 2V, 3V, 3AV, 3BV, 3CV, 4V, 5V, 5AV, 5BV, 5CV, 6V, 7V, 8V, 9V, 9AV, 10V, 10AV, 11V, 12V, 13V, 14V. Sono inoltre state eseguite una serie di prove penetrometriche dinamiche denominate con le sigle PVA, PVA1, PVA2, PVB, PVB1, PVB2, PVB3, PVB4, PVC, PVD, PVH, PVI, PVL, PVM, PVN, PVO, PVO1, PVO2. Le perforazioni sono state eseguite lungo il corso del fiume Tanaro e dell'adiacente canale ENEL (cfr. Tabella 5.1).

### 5.1.2. Campagna Progetto Definitivo 1998

Nella campagna geognostica del 1998 sono stati effettuati 20 sondaggi a rotazione e carotaggio continuo, indicati con le sigle G2, G3, G4, ASP3, ASP4 e con una numerazione progressiva da SPD26-01 a SPD26-07 e da SPD26-09 a SPD26-16 (cfr. Tabella 5.2). Le perforazioni sono state eseguite lungo lo sviluppo dell'intero Lotto 6 con profondità variabili fra i 10 e 40 m. Durante l'attività di perforazione sono stati posizionati 3 piezometri a tubo aperto (sondaggi G3, ASP3 e ASP4), sono state eseguite delle prove di permeabilità in foro di tipo Lefranc e Lugeon e sono stati descritti i profili stratigrafici. Nell'ambito di tale campagna sono stati eseguiti dei sondaggi elettrici con esecuzione di elaborazioni tomografiche, sezioni elettrostratigrafiche, profili elettrici tripotenziale e sondaggi elettrici verticali. Nel corso delle perforazioni di sondaggio di questa campagna è stata inoltre prelevata una serie di campioni rimaneggiati ed indisturbati su cui sono state eseguite delle indagini e delle prove di laboratorio.

### 5.1.3. Campagna Progetto Esecutivo 2001

La campagna svolta dalla ditta GeoTecno S.r.l. negli anni 2000 - 2001 ha previsto l'esecuzione di 61 sondaggi a rotazione e carotaggio continuo, indicati con una numerazione progressiva da SFG1 a SFG27, da SFG30 a SFG35, da SPE26-01 a SPE26-11, da SPE26-13 a SPE26-15 e da SPE26-19 a SPE26-32 (cfr. Tabella 5.3). Le perforazioni denominate con la sigla SFG sono state eseguite nel tratto di lotto interessato dallo scavo della galleria Verduno, mentre le altre perforazioni, indicate con la sigle SPE26 sono state eseguite nelle restanti parti del Lotto 6. Durante le perforazioni sono state eseguite 331 prove penetrometriche dinamiche tipo SPT, 66 prove pressiometriche con pressiometro tipo Menard e 30 prove di permeabilità tipo Lefranc e 4 Lugeon. Sulle carote estratte sono state eseguite sistematicamente prove mediante Pocket Penetrometer. Per valutare il livello della falda, sono stati realizzati 71

piezometri, 65 dei quali sono a tubo aperto semplice, 1 a tubo aperto con cella di Casagrande e 5 inclinopiezometri a fondo foro. Risultano dati piezometrici relativi soltanto al livello di rinvenimento durante la perforazione. I campioni indisturbati, prelevati durante le perforazioni, sono stati sottoposti alle seguenti prove di laboratorio:

- prove di classificazione: contenuto naturale d'acqua, pesi di volume totale e secco, peso specifico dei grani, limiti di Atterberg, analisi granulometrica per vagliatura e per sedimentazione, analisi diffrattometrica su campione in polvere tal quale con definizione del diffrattogramma, analisi diffrattometrica sulla frazione fine argillosa del campione in polvere in soluzione glicolata per la determinazione dei minerali argillosi rigonfianti, determinazione del contenuto di carbonati
- prove meccaniche: prova di compressione triassiale consolidata drenata CID eseguita sulle marne, prova di compressione triassiale consolidata non drenata con misura delle pressioni neutre CIU eseguita sui materiali coesivi, prova edometrica tipo IL con determinazione dei parametri di consolidazione, prova di compressione triassiale non consolidata non drenata UU, prove di taglio diretto su provini anulari con determinazione dei parametri di resistenza.
- prove di rigonfiamento: determinazione della deformazione di rigonfiamento su campione indisturbato (5 campioni di cui uno relativo alla galleria naturale prelevato dal sondaggio SFG06 nelle argille marnose).

#### 5.1.4. Campagna di indagine integrativa 2006

Nell'ambito degli approfondimenti del 2006, è stata condotta una campagna di indagini integrative finalizzata all'approfondimento delle conoscenze sui livelli sabbioso-ghiaiosi intercalati nelle argille-marnose, la cui presenza era stata rilevata nella zona di galleria adiacente all'imbocco lato Alba. In particolare

l'obiettivo è stato quello di valutare la continuità, sia in direzione longitudinale che trasversale all'asse della galleria, dei livelli più permeabili e conseguentemente di valutarne le potenzialità idriche in termini di volumi d'acqua mobilizzabili. La campagna di indagini ha previsto l'esecuzione di 4 sondaggi a rotazione e carotaggio continuo, denominati SIV1÷SIV4, in corrispondenza dei settori lungo il tracciato della galleria in cui era stata evidenziata una carenza di dati. Durante le perforazioni sono state eseguite 10 prove SPT e 10 prove tipo Lefranc. Sulle carote estratte sono state eseguite sistematicamente prove mediante Pocket Penetrometer. Per valutare il livello della falda, i fori sono stati attrezzati con piezometri a tubo aperto e/o tipo Casagrande; in particolare:

- SIV1: 1 piezometro a tubo aperto con tratto finestrato tra 24 e 42 m di profondità dal p.c.
- SIV2: 1 piezometro tipo Casagrande con cella alla profondità di 53 m e 1 piezometro a tubo aperto con tratto finestrato tra 19.5 e 1.5 m di profondità da p.c.
- SIV3: 1 piezometro tipo Casagrande con cella alla profondità di 53 m e 1 piezometro a tubo aperto con tratto finestrato tra 8 e 1.5 m di profondità da p.c.
- SIV4: 1 piezometro a tubo aperto con tratto finestrato tra 40 e 63 m di profondità dal p.c.

Sui campioni prelevati nel corso delle perforazioni sono state eseguite, dal Laboratorio Geotecnico G.E.T. s.r.l. di Genova, le seguenti prove di laboratorio:

- prove di classificazione: contenuto naturale d'acqua, pesi di volume totale e secco, peso specifico dei grani, limiti di Atterberg, analisi granulometrica per vagliatura e per sedimentazione, analisi diffrattometrica su campione in polvere tal quale con definizione del diffrattogramma, analisi diffrattometrica sulla frazione fine argillosa del

campione in polvere in soluzione glicolata per la determinazione dei minerali argillosi rigonfianti, determinazione del contenuto di carbonati

- prove meccaniche: prova di compressione triassiale consolidata non drenata con misura delle pressioni neutre CIU
- prove di rigonfiamento: determinazione della deformazione e della pressione di rigonfiamento su campione indisturbato secondo ASTM D4546-96.

Le Tabelle 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 riportano una sintesi schematizzata della stratigrafia dei singoli sondaggi eseguiti.

## 5.2. CAMPAGNA DI INDAGINE INTEGRATIVA 2011-2012

In fase di pianificazione delle attività finalizzate alla redazione del Progetto Esecutivo, anche alla luce degli approfondimenti richiesti in sede di valutazione della compatibilità ambientale (DEC VIA 576/2011), scaturiti dal confronto con gli Enti, si è ritenuto necessario programmare una indagine geognostica integrativa che si è posta i seguenti obiettivi:

- Affinare la ricostruzione stratigrafica, specie al passaggio tra diverse formazioni (in particolare al contatto tra la formazione dei gessi e delle marne), per approfondire la ricostruzione lito-stratigrafica del modello geologico e la localizzazione dei corpi detritici all'interno della formazione delle Marne di Sant'Agata.
- Definire in dettaglio la categoria di sottosuolo, al fine di valutare l'effetto della risposta sismica locale, da impiegare nella verifica delle opere geotecniche.
- Localizzare la presenza di cavità carsiche nel sottosuolo, attraverso il ricorso ad indagini geofisiche.
- Studiare le aree in frana, individuate a seguito di una prima analisi geomorfologica del versante, attraverso il ricorso ad indagini geofisiche.

- Predisporre una adeguata rete di monitoraggio ambientale della collina di Verduno, installando strumentazione inclinometrica e piezometrica finalizzata ad individuare eventuali movimenti di versante e a monitorare l'andamento dei livelli di falda in sottterraneo; sia in condizioni ante-operam, sia nel corso dei lavori e fino a stabilizzazione post-operam.
- Raccogliere informazioni puntuali sulle quote di falda, al fine di supportare la modellazione numerica dell'acquifero e la stima della sua evoluzione a seguito della realizzazione dell'opera.
- Ricercare eventuali correlazioni circa la circolazione idraulica sotterranea, mediante impiego di prove con traccianti.
- Valutare gli eventuali movimenti attivi nel versante, con specifico riguardo alle aree morfologicamente instabili, impiegando analisi di dati storici interferometrici.

Nel seguito si descrivono in dettaglio le attività condotte.

### 5.2.1. Sondaggi geognostici

Nel periodo settembre 2011 – luglio 2012, sono stati eseguiti una serie di sondaggi a carotaggio continuo, successivamente impiegati per l'installazione della strumentazione di monitoraggio ambientale. Nel dettaglio sono stati eseguiti (cfr. Tabelle 5.9 e 5.10):

- n. 67 perforazioni a carotaggio continuo per l'installazione di piezometri a tubo aperto, per il monitoraggio della falda lungo il tracciato della galleria e lungo tutto il versante (cfr. tabella riassuntiva piezometri 6.9), sia all'interno dei terreni gessiferi sia all'interno dei livelli marnoso-argilloso.
- n. 25 perforazioni a carotaggio continuo per l'installazione di inclinometri al fine di monitorare eventuali movimenti di versante in

fase ante – operam, nel corso degli scavi della galleria e post-operam (cfr. elenco riassuntivo degli inclinometri realizzati, Tabella 5.10).

- prove down-hole in corrispondenza dei fori DH2, DH3, DH5, DH7 agli imbocchi, lato Alba e lato Cherasco della galleria, finalizzati a definire nel dettaglio le categorie di sottosuolo, al fine di valutare l'effetto della risposta sismica locale.

La rete di monitoraggio inclino metrico e piezometrico installata è stata condivisa con Arpa Piemonte ed in ottemperanza alle Prescrizioni avanzate sia dal Ministero dell'Ambiente che dalla Regione Piemonte. I sondaggi realizzati a carotaggio continuo hanno consentito anche un affinamento della ricostruzione dell'assetto litologico-stratigrafico lungo il tracciato della galleria e lungo il versante della collina di Verduno, mediante la ricostruzione dei profili longitudinali lungo il tracciato delle due carreggiate e mediante sezioni trasversali rappresentative lungo il versante. I sondaggi eseguiti hanno una profondità variabile da un minimo di 20 metri circa fino ad un massimo di 80 metri.

### **5.2.2. Campagna di indagine geofisica**

La campagna di studio del 2011-2012 ha inoltre previsto indagini geofisiche, così come riportato nei rispettivi allegati progettuali (elaborati di interpretazione delle indagini, consistenti in una relazione illustrativa, planimetrie e sezioni geofisiche trasversali e longitudinali, documento 2.6-E.rD.2.1.05 “Relazione indagine sismica”). La campagna di indagini geofisiche è stata svolta per aree tematiche:

- aree all'interno delle quali è segnalata la possibile presenza di carsismo
- aree in frana.

L'indagine geofisica è consistita nelle seguenti tipologie di indagine:

- indagini elettriche, volte alla determinazione dei valori di resistività e ad una modellizzazione 2D/3D in continuo nel sottosuolo;

- indagini sismiche a rifrazione, con l'obiettivo di ricostruire mediante modellazione 2D le condizioni dei primi 10-30 metri del sottosuolo; tali indagini hanno avuto lo scopo di evidenziare la presenza di eventuali dissesti e, più specificatamente, aree carsiche o zone con presenza di fluidi;
- indagini sismiche a riflessione; con l'obiettivo di individuare gli orizzonti riflettenti, nonché riconoscere le zone di discontinuità o le possibili variazioni laterali degli orizzonti; vista la tipologia di indagine è stato possibile evidenziare la eventuale presenza di strutture geologiche anche complesse.

Quale sintesi degli studi condotti si può segnalare come le indagini geofisiche abbiano evidenziato una serie di microcavità di ordine metrico, nonché la presenza, nell'area, di numerose doline, a conferma delle evidenze geomorfologiche. In particolare le indagini con tomografia elettrica hanno portato all'individuazione del limite litologico tra i depositi argillosi superficiali e le rocce gessifere (posto ad una profondità variabile e compresa tra i 5 ed i 20m). La ricostruzione è ben definita in quanto la roccia gessifera è caratterizzata da valori di resistività elettrica superiori ai 30 Ohm.m, mentre i materiali argillosi presentano valori di resistività inferiori ai 30 Ohm.m.

Le linee di rilievo posizionate in corrispondenza delle aree caratterizzate da evidenze morfologiche, per la presenza di depressioni carsiche (doline) o inghiottitoi, hanno permesso di effettuare una taratura dell'intero sistema d'indagine. In corrispondenza di tali depressioni l'andamento dei valori di resistività risulta caotico e complesso, caratterizzato da valori di resistività molto bassi (inferiori ai 20 Ohm.m), ad indicare anche la presenza di fluidi.

Va evidenziato che l'evoluzione di un'area carsica è caratterizzata da un processo morfologico complesso, che si sviluppa in un arco di tempo estremamente lungo, decisamente superiore alla vita utile dell'opera;

ciononostante tale aspetto dovrà essere attentamente valutato in fase di progettazione delle opere.

L'indagine sismica in riflessione ha inoltre evidenziato una serie di riflettori principali riconducibili al contatto litologico tra i depositi argillosi superficiali e le rocce gessifere (cfr. figura 5.1.bis), nonché zone di debolezza riconducibili a discontinuità sub verticali, quali lineamenti tettonici già individuati dalla fotointerpretazione.

Le indagini in corrispondenza della zona del Nuovo Ospedale hanno infine evidenziato la presenza di una fascia di terreno detensionato, fino a profondità di circa 30 m, confermando la presenza della zona in frana già segnalata dalle stratigrafie dei sondaggi.

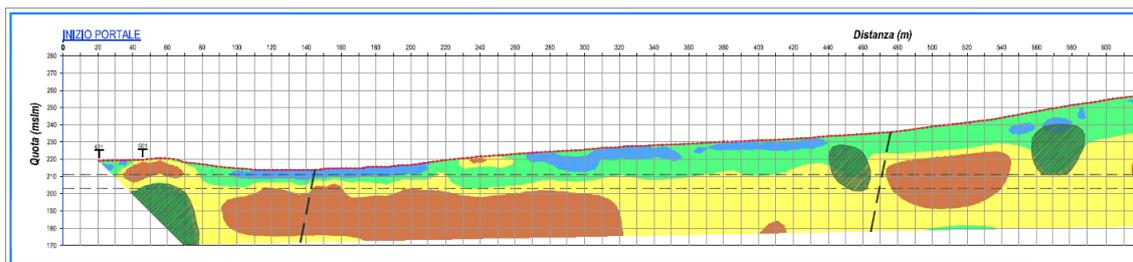


Figura 5.1bis – Restituzione indagini sismiche imbocco Cherasco (in verde i depositi limoso-argillosi, in giallo la roccia gessoso-solfifera)

### 5.2.3. Dati piezometrici

Le Tabelle 5.11a, 5.11b e 5.11c, riportano l'elenco dei fori attrezzati mediante piezometro a tubo aperto e le ultime letture disponibili a tutto luglio 2013.

Attraverso l'installazione di più di 60 piezometri, avvenuta tra il 2011-2012, è stato possibile effettuare una campagna di Monitoraggio Ambientale molto dettagliata del versante collinare di Verduno. Seppure i piezometri siano distribuiti principalmente in prossimità del tracciato della galleria, un numero di piezometri ubicati anche a monte ed a valle del tracciato consentono di avere a disposizione un elevato dettaglio del contesto piezometrico dei diversi acquiferi presenti sul versante collinare.



La campagna di monitoraggio è iniziata in Ottobre 2011 ed è ancora attiva (le ultime misure disponibili risalgono a Luglio 2013). Le letture di ottobre e novembre 2011 hanno avuto cadenza quindicinale, quindi la campagna è proseguita con letture a cadenza mensile. Ad oggi, sono pertanto disponibili un numero rappresentativo di letture, per un utile raffronto con i dati piezometrici relativi al Progetto Definitivo. Questa campagna di rilievo piezometrico è stata realizzata da Sina Spa, in condivisione con Arpa Piemonte ed in ottemperanza alle Prescrizioni avanzate sia dal Ministero dell'Ambiente che dalla Regione Piemonte.

Dal confronto dei valori misurati è possibile osservare che i vari piezometri mostrano variazioni di diversa entità. Questo dipende dal fatto che i vari piezometri hanno caratteristiche spesso molto differenti tra loro: sono installati a profondità differenti, hanno una diversa lunghezza dei filtri, la loro misura interessa porzioni di versanti che risentono naturalmente di diversi comportamenti idrodinamici (es. prossimi a zone di ricarica o a zone di emergenza). Queste diverse caratteristiche fanno sì che non sia possibile una sintesi univoca dei dati.

Per facilitare la lettura e l'interpretazione dei valori piezometrici, i dati sono stati separati in funzione della formazione litologica in cui sono state collocate le superfici filtranti dei piezometri. La restituzione in forma grafica dei valori è riportata in nelle figure seguenti, dove sono rappresentate le variazioni relativamente alle marne, ai gessi ed ai depositi quaternari; i grafici riportano una selezione di alcuni dei piezometri monitorati, in quanto la rappresentazione di tutto l'insieme dei dati disponibili impedirebbe una chiara lettura del diagramma.

Dall'osservazione dei grafici di variazione piezometrica, pur prescindendo da puntuali discostamenti che dipendono appunto dalle locali condizioni idrogeologiche in cui sono stati inseriti i piezometri, è possibile osservare quanto segue:

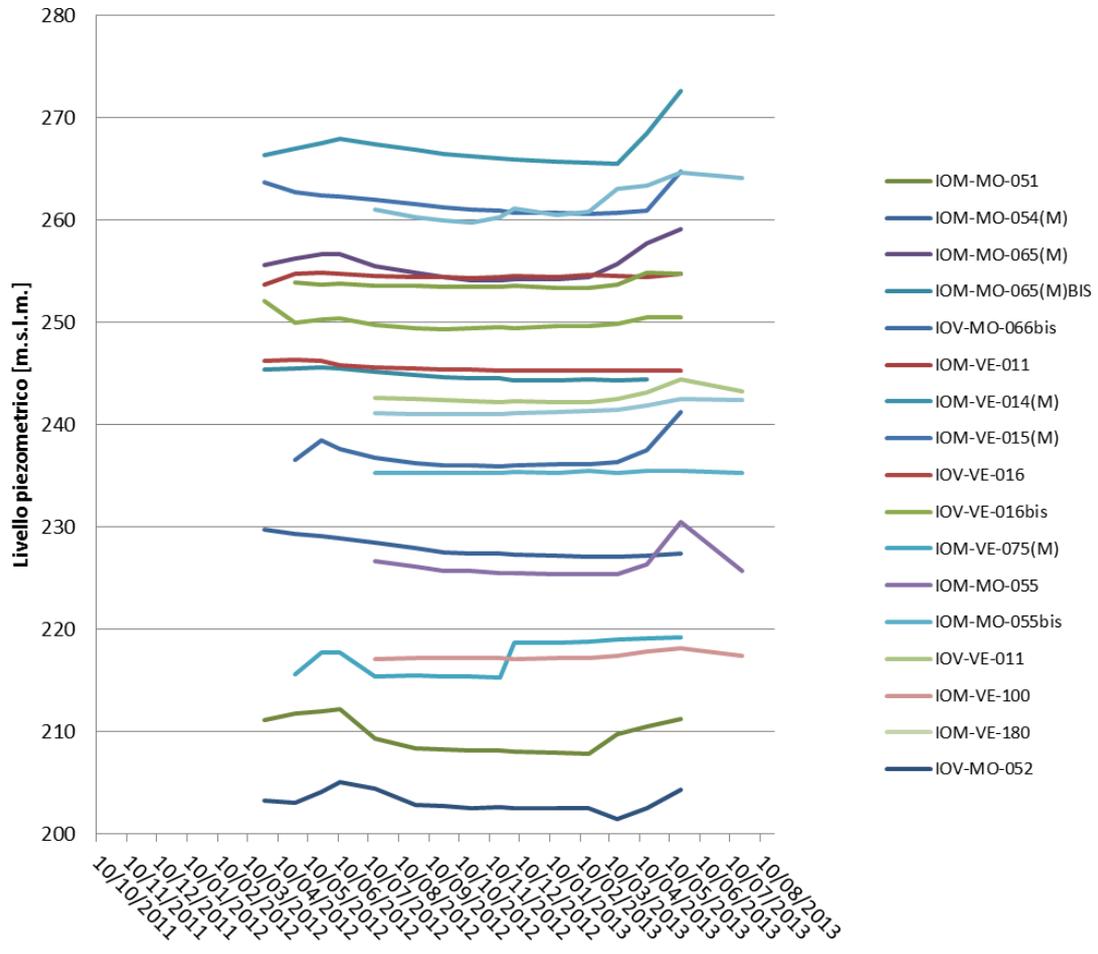
- esiste una tendenza dei valori piezometrici globalmente congruente. Questa riflette la diminuzione di piovosità, e quindi della ricarica dell'acquifero e la conseguente riduzione di livello, nel periodo autunnale - invernale, ed il successivo aumento dei valori di livello in corrispondenza del periodo primaverile - estivo;
- le variazioni osservate nei piezometri che misurano il livello della falda nei gessi sono soggette ad una maggiore variabilità rispetto a quelle relative ai piezometri con i filtri installati nelle altre formazioni. Questo comportamento riflette il fatto che, come discusso in dettaglio nella Relazione Idrogeologica allegata, l'acquifero dei gessi risente maggiormente delle variazioni dovute alla piovosità a causa di un diffuso carsismo.

L'analisi di dettaglio delle variazioni piezometriche è riportata nei capitoli relativi alla ricostruzione del modello idrogeologico concettuale e alle tratte di attraversamento della galleria contenuti nella Relazione Idrogeologica della Galleria di Verduno. In questi capitoli sono analizzati in dettaglio le possibili ripercussioni derivanti dallo scavo della galleria e dalle variazioni del livello di falda che si instaurano all'interno dei diversi acquiferi.



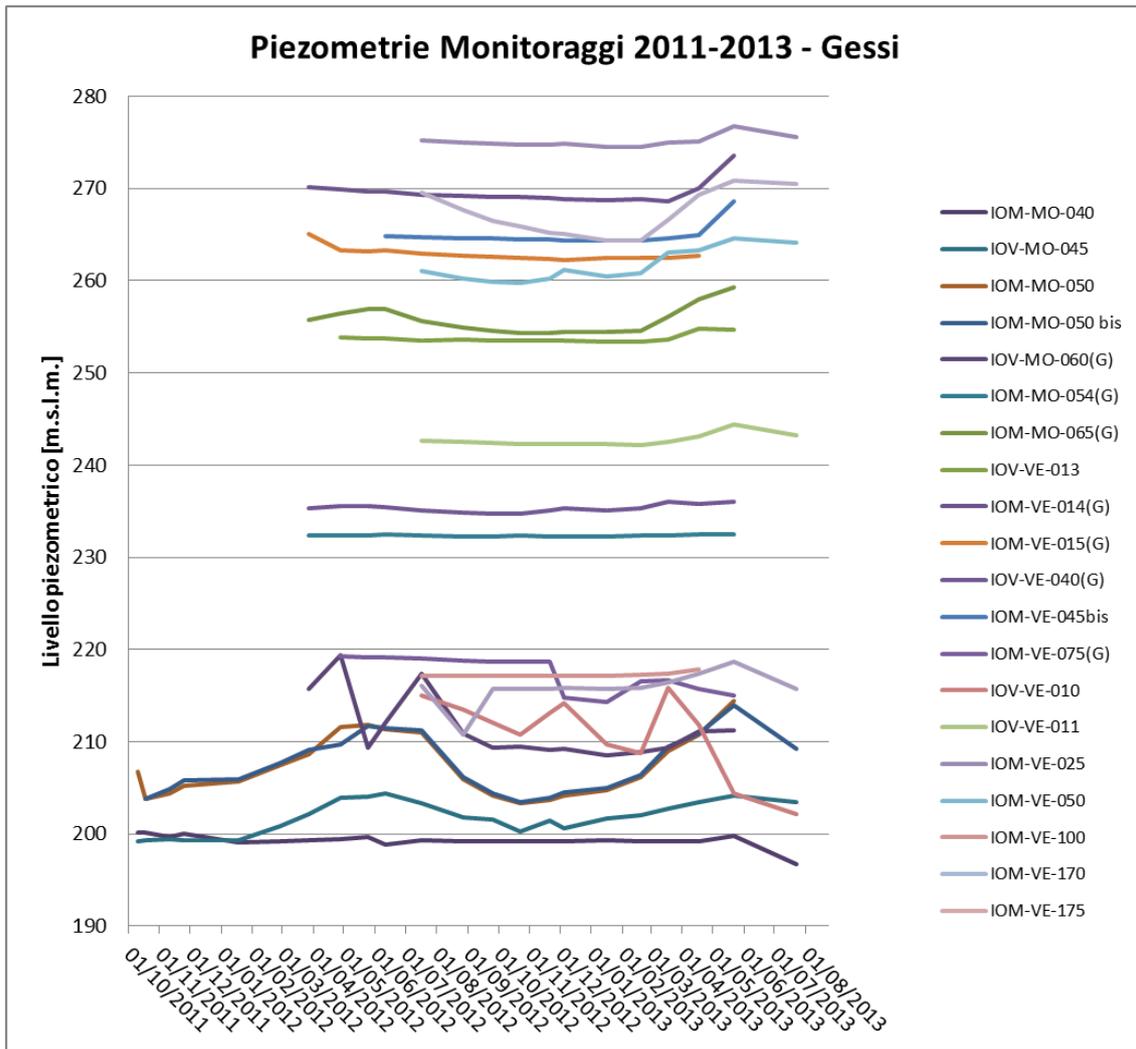
Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6  
PROGETTO ESECUTIVO  
Galleria Verduno - Relazione geotecnica

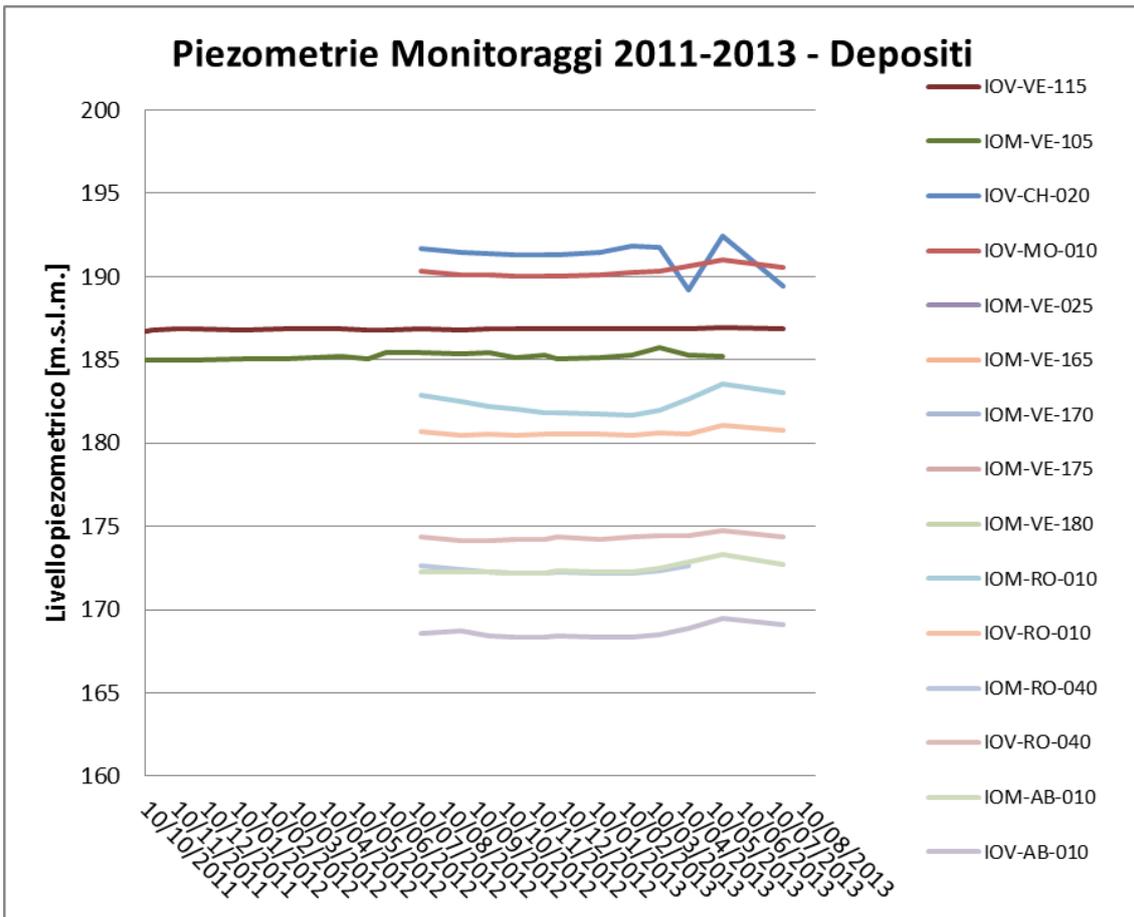
Piezometrie Monitoraggi 2011-2013 - Marne





Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6  
PROGETTO ESECUTIVO  
Galleria Verduno - Relazione geotecnica





Misure piezometriche relative al monitoraggio Ambientale effettuate nei piezometri con fenestratura rispettivamente nelle marne, nei gessi e nei depositi alluvionali di fondovalle (2011-2013).

#### 5.2.4. Dati inclinometrici

La Tabella 5.10 riporta l'elenco degli inclinometri installati.

Analogamente alla rete di piezometri, è stata attivata, a partire dall'ottobre 2011, una rete di inclinometri, disposti in alcuni settori di versante particolarmente sensibili alle problematiche di natura geomorfologica. La campagna di letture inclinometriche è iniziata ad ottobre 2011 ed è proseguita con cadenza mensile fino ad Aprile 2013. La strumentazione fa parte infatti del piano di monitoraggio ambientale, che consentirà di raccogliere informazioni ante-operam, durante lo svolgimento dei lavori e post-operam. Alcuni di questi inclinometri saranno attrezzati per eseguire letture in continuo, così da essere

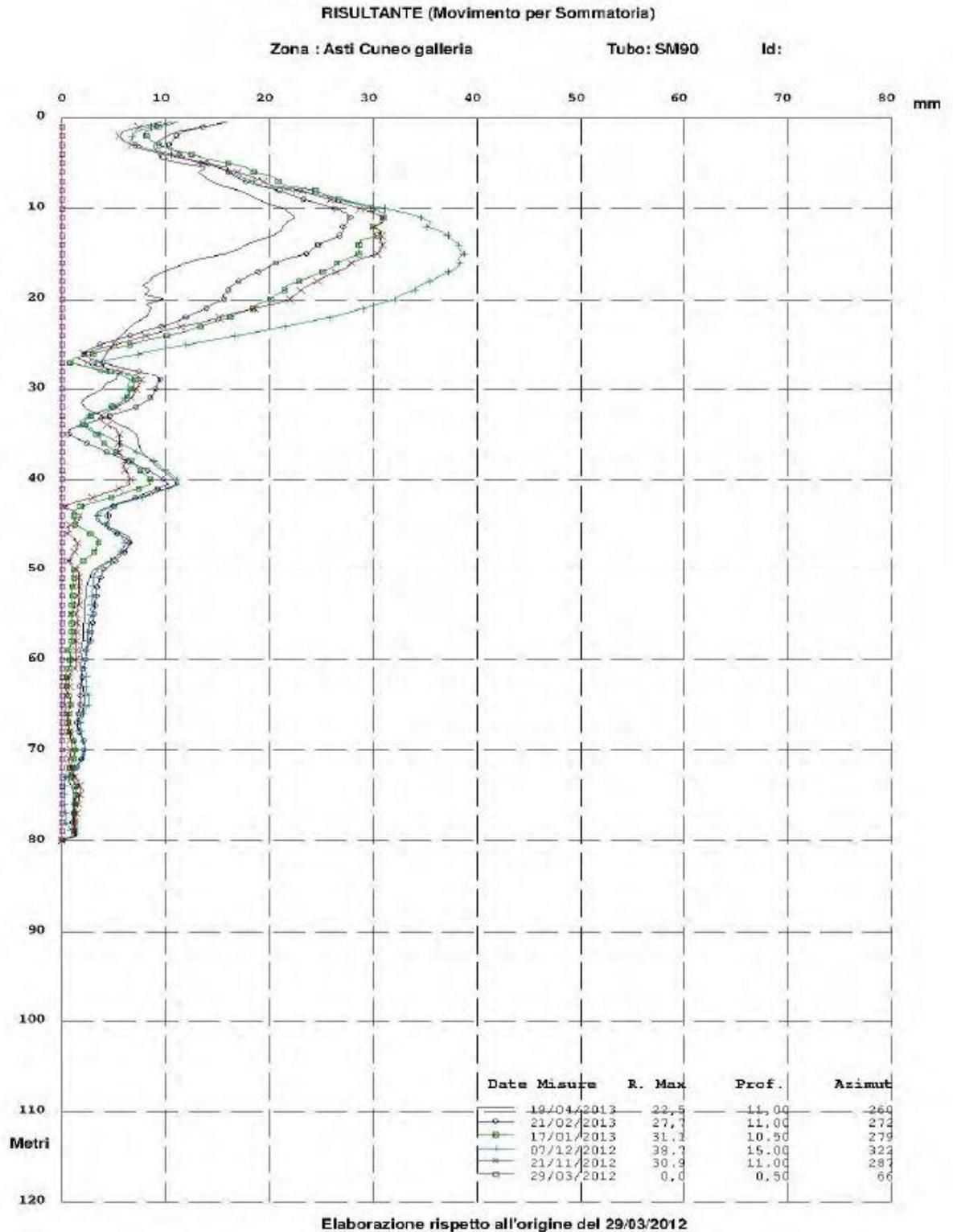
impiegati quale strumentazione di controllo nell'ambito del piano di gestione delle emergenze.

Le letture ad oggi raccolte mostrano come la maggior parte della strumentazione non ha evidenziato spostamenti significativi, tali da far presupporre la presenza di specifiche superfici di scivolamento o movimenti gravitativi di versante. I movimenti sono per lo più compresi entro 10 mm, mostrando spesso oscillazioni degli spostamenti.

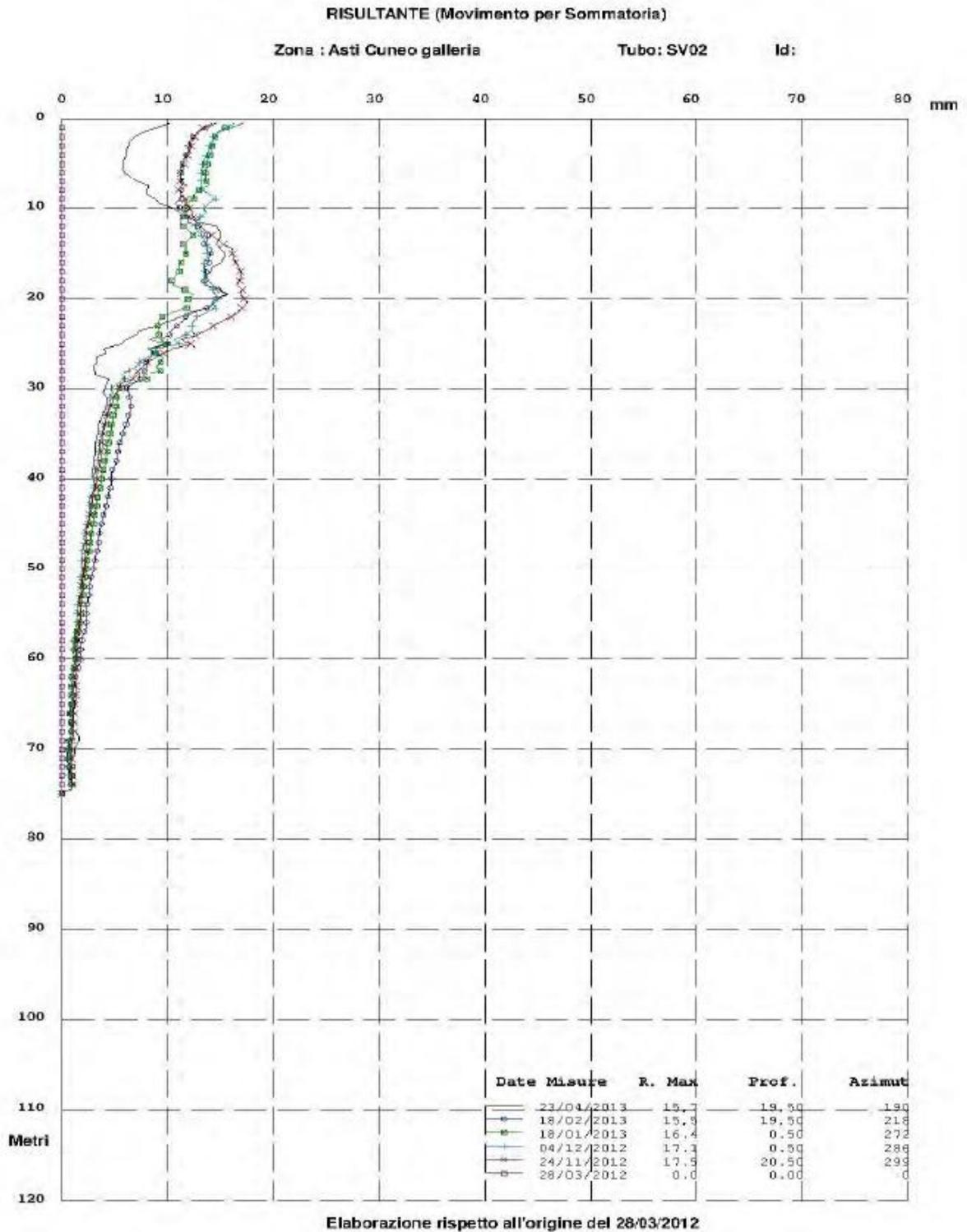
Gli strumenti che hanno mostrato i maggiori spostamenti sono:

- l'inclinometro SOT-MO-090 (cfr. fig. 5.2), ubicato nei pressi della "Cascina Reverdito", fino alla profondità di m 80 dal piano campagna, nel Comune di La Morra a valle della Borgata Garassini, il quale ha evidenziato spostamenti a partire da quota circa -50-30 m da testa tubo e valori massimi, pari a 40 mm circa, a quota -15-17 metri; la tipologia del movimento non consente di individuare una chiara superficie di scorrimento, quanto piuttosto un "allentamento" degli strati più superficiali; a Novembre 2012 ha però mostrato un movimento improvviso e importante tra -5 e -25 m che è proseguito per alcuni mesi (max escursione  $\approx$  37-38 mm) per poi iniziare a stabilizzarsi. Si fa notare come l'inizio del movimento sia coinciso con dei grossi lavori di movimento terra presso gli edifici vicini, che potrebbero spiegare l'insorgere di questa anomalia;
- l'inclinometro SOT-VE-020 (cfr. fig. 5.3), ubicato nel Comune di Verduno, ad ovest del Nuovo Ospedale di Alba-Bra, il quale evidenzia spostamenti compresi tra 10 e 20 mm nella parte più superficiale, a circa 15 metri di profondità.

Sarà importante riscontrare nel dettaglio gli esiti delle letture inclinometriche prima dell'inizio delle lavorazioni per la costruzione dell'opera, così da disporre di un accurato quadro della situazione ante-operam.



*Figura 5.2 – Risultante movimenti inclinometro SOT-MO-090*



*Figura 5.3 – Risultante movimenti inclinometro SOT-VE-002*

### 5.2.5. Analisi dati interferometrici

In corrispondenza dell'area della Galleria Verduno è stata effettuata una analisi SqueeSAR™. L'analisi condotta ha previsto l'elaborazione di un dataset composto da 126 immagini acquisite dal satellite canadese RADARSAT-1 in geometria ascendente nel periodo compreso tra Marzo 2003 e Settembre 2012.

Per la descrizione delle immagini acquisite e per l'interpretazione dei dati si rimanda allo specifico elaborato di progetto "Analisi e monitoraggio con interferometria da satellite dell'area interessata dal progetto della galleria Verduno (CN)", documento 2.6-E.rD.2.1.06.

### 5.3. ATTIVITÀ COMPLEMENTARI DI STUDIO

In aggiunta alle indagini geognostiche integrative ed al sistema di monitoraggio oggi predisposto, la messa a punto dello studio geologico-geotecnico di Progetto Esecutivo ha potuto contare su una serie di approfondimenti; i principali sono qui nel seguito ricordati:

- analisi della documentazione relativa alle differenti fasi progettuali del costruendo "Nuovo Ospedale di Alba-Bra" e delle successive valutazioni sulle condizioni di stabilità del versante lato Alba;
- analisi della documentazione resa disponibile dal Comune di Verduno su uno "Studio delle Doline" presenti sul territorio comunale;
- analisi della documentazione relativa al Progetto Preliminare della strada di collegamento tra la viabilità ordinaria ed il costruendo ospedale, in corrispondenza del versante lato Alba del tracciato della galleria a progetto;
- rilievi geologici di campagna al fine di confermare/integrare quanto acquisito dagli studi precedentemente eseguiti;
- prove idrogeologiche con i traccianti (fluoresceina) allo scopo di ottenere informazioni relative alla conformazione dell'acquifero dei



gessi ed alle sue condizioni idrodinamiche (argomento trattato nel dettaglio nella “Relazione idrogeologica”);

- modellizzazione tridimensionale dell’acquifero principale di un settore della collina di Verduno interessato dall’attraversamento della galleria, allo scopo di simulare il flusso di falda in condizioni naturali (ante-operam), durante lo scavo delle due canne della galleria e al termine della realizzazione dell’opera (anche in questo caso l’argomento sarà trattato nel dettaglio nella “Relazione idrogeologica”), in recepimento alle prescrizioni del DEC VIA 576/2011, punto 2.31, 2.43;
- analisi di tutti i fenomeni franosi censiti dall’Arpa Piemonte e dal registro IFFI nel settore di versante interessato dal tracciato della galleria;
- analisi storica interferometrica dell’intera area al fine di valutare, per il periodo 2003-2012, i dati presenti sul territorio e l’indicazione di eventuali fenomeni di instabilità dell’area.

## 6. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Nel presente capitolo si riportano le valutazioni condotte per definire la parametrizzazione geotecnica dei terreni e degli ammassi coinvolti dalle opere. Si evidenzia che l'attuale fase progettuale non ha previsto la realizzazione di nuove prove geotecniche (in situ e in laboratorio), a meno di prove down-hole che sono state condotte nell'ottica di supportare la caratterizzazione sismica del suolo secondo quanto previsto dalle "Norme tecniche per le Costruzioni", 2008.

In accordo a quanto già individuato nella documentazione redatta nelle precedenti fasi progettuali i terreni interessati dallo scavo della galleria Verduno sono stati raggruppati in 7 unità litologico-geotecniche, intendendo per unità geotecnica un terreno, o un insieme di terreni, omogeneo in termini di caratteristiche fisiche, di resistenza e di deformabilità. Tale identificazione ha trovato riscontro anche dall'interpretazione geologica effettuata a seguito dell'esame di dettaglio delle stratigrafie dei sondaggi integrativi condotti nel 2011-2012. Le 7 unità litologiche-geotecniche sono così definite:

- Unità 1b: riporti relativi agli argini dei canali e dei corsi d'acqua minori. Sabbie limose e limi argillosi.
- Unità 2: terreno agricolo (distinto solo nel tratto di fondovalle). Limi sabbiosi e limi argillosi, localmente sabbia con ghiaia fine.
- Unità 3: depositi alluvionali attuali e medio recenti, distinti in:
  - **3a**: complesso ghiaioso sabbioso. Ghiaia eterometrica con ciottoli ( $D_{max}=12$  cm) e sabbia medio-grossolana, localmente prevalente. Grado di addensamento variabile da basso a medio;
  - **3b**: complesso limoso-sabbioso. Sabbia fine limosa poco addensata e limo con livelli di sabbia medio fine da sciolta a poco addensata.
- Unità 4: coperture; accumuli di frana e coltri di terreno rimaneggiato. Limi argillosi, limi sabbioso-fini, argilla limosa con sabbia e localmente frammenti di argilla marnosa alterata.

- Unità 5: limi sabbiosi sovrapposti all'unità gessosa. Limi sabbiosi localmente stratificati passanti verso il basso a limi argillosi e argilla marnosa. Presenza di livelli di argilla plastica.
- Unità 6: Gessi. Corpi gessosi litoidi con spessore sino ad alcuni metri, limi argillosi con intercalato gesso in livelli da millimetrici a decimetrici, argille marnose con inclusi di gesso. I corpi litoidi presentano in genere un'intensa fratturazione. L'unità è caratterizzata dalla presenza di unità carsiche derivanti dalla dissoluzione del gesso, con ampiezza variabile da decimetrica a plurimetrica.
- Unità 7: Argille marnose. Limo argilloso da molto a estremamente consistente passante ad argilla marnosa semilitoide, con livelli millimetrici di sabbia fine. A varie profondità sono stati rilevati in sede di sondaggio livelli limoso-argillosi (spessore centimetrico - decimetrico) a bassa consistenza e allo stato plastico, con elevato contenuto di acqua, che rappresentano probabilmente zone di deformazione del substrato;
  - **7a**: corpi detritici grossolani intercalati da argille marnose. Ghiaie medio-grossolane e sabbie poco addensate e sature in acqua. Spessori rilevati in sondaggio 3-12 m circa
  - **7c**: alternanze di livelli sabbioso limosi da centimetrici e decimetrici e livelli da centimetrici a metrici di marne limoso-argillose; da un punto di vista geotecnico il comportamento di questa sottounità litostratigrafica è assimilato a quello dell'unità 7, da cui si differenzia per la maggiore potenza dei livelli sabbioso limosi, che può determinare una riduzione dei parametri geotecnici dell'unità alla scala dell'opera.

Con le prime quattro unità geotecniche si intende descrivere l'insieme dei terreni di copertura sovrastanti il substrato marnoso o gessoso-solfifero descritti invece dalle ultime tre unità.

Lo studio delle proprietà meccaniche di ciascuna unità ha tenuto in conto tanto le risultanze delle prove eseguite in sito, quanto i dati derivati dalle prove di laboratorio ottenuti dalle diverse campagne di indagine.

Relativamente ai terreni di copertura si è fatto riferimento a:

- prove in sito:
  - prove penetrometriche dinamiche (SPT);
  - prove pressiometriche, eseguite con sonda tipo Menard (MPM);
  - prove down-hole.
- prove di laboratorio:
  - prove di taglio diretto su provini anulari, con determinazione dei parametri di resistenza di picco;
  - prova edometrica tipo ILE, con determinazione dei parametri di consolidazione.

Relativamente alle formazioni riferibili al substrato si è fatto riferimento a:

- prove in sito:
  - prove penetrometriche dinamiche (SPT);
  - prove pressiometriche, eseguite con sonda tipo Menard (MPM);
  - prove down-hole.
- prove di laboratorio:
  - prove di taglio diretto su provini anulari, con determinazione dei parametri di resistenza di picco;
  - prova edometrica tipo ILE, con determinazione dei parametri di consolidazione;
  - prova di compressione triassiale consolidata drenata (Tx-CID);
  - prova di compressione triassiale consolidata non drenata con misura delle pressioni neutre (Tx-CIU);
  - prova di compressione triassiale non consolidata non drenata (Tx - UU);
  - prove di rigonfiamento in edometro secondo standard ASTM D 4546-96.

L'analisi dei dati derivati dall'attività di laboratorio è avvenuta previo riconoscimento dell'unità geotecnica di appartenenza di ciascun campione prelevato, in funzione dei log stratigrafici e del profilo geologico della galleria.

Nei successivi paragrafi vengono raccolti i dati ottenuti dalle prove in situ e, dopo averne illustrato i metodi di interpretazione, vengono riportati i risultati che ne derivano. In ultimo, vengono riportate e commentate le risultanze delle prove di laboratorio per ciascuna unità geotecnica, esaminando le proprietà fisiche e meccaniche che possono essere ricavate dall'insieme dei dati raccolti.

## 6.1. PROVE IN SITO

### 6.1.1. Prove penetrometriche dinamiche

Durante le attività di perforazione sono state eseguite prove penetrometriche dinamiche tipo SPT, i cui risultati sono sintetizzati nella Tabella 6.1.

Si osserva che 163 prove su 341 hanno dato rifiuto, in particolare quelle eseguite nell'unità 6 (gessi) e nell'unità 7 (argille marnose). In fase di interpretazione dei risultati, le prove che hanno dato rifiuto non sono state considerate, per non sovrastimare i parametri di resistenza e deformabilità. Tra le 178 prove che non hanno dato rifiuto, 117 interessano direttamente il tracciato della galleria; tali prove sono state interpretate secondo correlazioni empiriche esistenti tra il valore di  $N_{SPT}$  ed i parametri di deformabilità e di resistenza del terreno in sito. Le prove che interessano livelli sabbiosi sono 15, mentre le restanti 102 interessano terreni a grana fine con comportamento coesivo (limi sabbiosi e limi argillosi).

#### 6.1.1.1. *Modalità di interpretazione delle prove tipo SPT nei terreni granulari*

Le correlazioni utilizzate nell'interpretazione delle prove eseguite nei terreni granulari sono le seguenti:

- $N_{SPT}$  - modulo di deformabilità  $E'$  (terreni normal-consolidati)

Jamiolkowski et al., 1988:  $E'_{25} = (10.5 - 3.5D_R)N_{SPT}$

D'Appolonia et al., 1968, 1970:  $E' = 16.2 + 0.73N_{SPT}$

Stroud, 1988:  $E' = 0.9N_{SPT}$

- $N_{SPT}$  - modulo di deformabilità  $E'$  (terreni sovraconsolidati)

Jamiolkowski et al., 1988:  $E'_{25} = (52.5 - 35D_R)N_{SPT}$

D'Appolonia et al., 1968, 1970:  $E' = 38.7 + 0.94N_{SPT}$

Stroud, 1988:  $E' = 1.3N_{SPT}$

- $N_{SPT}$  - angolo di resistenza al taglio  $\phi'$

Schmertman, 1978b:

considerando un inviluppo di rottura lineare tipo Mohr-Coulomb a resistenza coesiva nulla:

$$\tau = \sigma' \cdot \operatorname{tg} \phi'_p$$

l'angolo di attrito di picco  $\phi'_p$  può essere determinato secondo Schmertmann (1978b) come segue:

$$\phi'_p = a + b \cdot D_R$$

$$\phi'_p = 28.0 + 0.140D_R \text{ sabbia fine uniforme}$$

$$\phi'_p = 31.5 + 0.115D_R \text{ sabbia media uniforme - sabbie fini ben gradate}$$

$$\phi'_p = 34.5 + 0.100D_R \text{ sabbia grossa uniforme - sabbia media ben gradata}$$

$$\phi'_p = 38.0 + 0.080D_R \text{ ghiaietto uniforme - sabbie e ghiaie poco limose.}$$

In alternativa si può fare riferimento all'inviluppo di rottura curvilineo di Baligh (1976).

$$\tau = \sigma' \left[ \tan \phi'_o + \tan \alpha \cdot \left( \frac{1}{2.3} - \log \frac{\sigma'}{\sigma'_o} \right) \right]$$

dove  $\phi'_o$  e  $\alpha$  rappresentano i parametri che descrivono l'involuppo di resistenza non lineare di Baligh e si ottengono secondo Bolton (1986) e Jamiolkowski et al (1988) con le seguenti espressioni:

Bolton, 1986 
$$\phi'_o = \phi_{cv} + mD_R(Q - \ln\sigma'_{mf}) - 1$$

Jamiolkowski et al., 1988 
$$\alpha = \frac{D_R - 0.2}{0.8} 10$$

e  $D_R$  è la densità relativa del terreno ottenuta con la seguente espressione:

$$D_R = \sqrt{\frac{N_{SPT}}{A + B \cdot \sigma'_v}}$$

con A e B costituiti dai parametri di Skempton (1986).

#### **6.1.1.2. Modalità di interpretazione delle prove tipo SPT nei terreni coesivi**

Nei terreni a grana fine, le correlazioni tra  $N_{SPT}$  e la resistenza al taglio non drenata  $c_u$  devono essere considerate solamente indicative, in quanto le prove SPT possono fornire risultati contraddittori in tali terreni.

Per stimare la resistenza al taglio non drenata  $c_u$  a partire dai valori di  $N_{SPT}$  sono state utilizzate le seguenti correlazioni, che tengono conto dell'influenza dell'indice di plasticità (da Nav-Fac Design Manual, 1982, in Cestari "Prove geotecniche in sito", GEO-GRAPH, 1990):

1. Argille di bassa plasticità e limi argillosi :  $c_u = 0.4 N_{SPT}$
2. Argille di media plasticità :  $c_u = 0.8 N_{SPT}$
3. Argille di alta plasticità :  $c_u = 1.3 N_{SPT}$ .

#### **6.1.1.3. Interpretazione delle prove nei terreni granulari**

Nella Tabella 6.2 sono riportati i risultati dell'interpretazione delle prove eseguite nei terreni granulari. La maggior parte delle prove sono state eseguite entro le

unità geotecniche 4 (coperture, accumuli di frana e coltri di terreno rimaneggiato) e 5 (limi sabbiosi sovrapposti all'unità gessosa); alcune prove eseguite nel foro SFG17, SFG18 e SPE 26-30, hanno anche interessato le unità geotecniche 6 (gessi) e 3b (complesso limoso-sabbioso). Infine, nell'ambito della campagna di indagini integrative svolte nel 2006, è stata eseguita anche una prova entro l'unità 7a entro il sondaggio SIV2. Nel dettaglio, per le singole unità geotecniche, si ha:

#### **Unità 4**

L'interpretazione delle prove SPT eseguite nell'unità 4, è stata eseguita considerando i terreni in esame come normalconsolidati e la superficie piezometrica come rilevata in sito (Tabella 6.2); nell'interpretazione sono inoltre state tenute in conto le caratteristiche litologiche identificate sulla base dei dati stratigrafici di sondaggio. Il peso di volume è stato assunto pari a  $20 \text{ kN/m}^3$ , valore medio ricavato dalle prove di laboratorio. L'andamento con la profondità dei valori di  $D_R$  ottenuti dall'interpretazione è riportato nella Figura 6.1. Dai risultati delle elaborazioni si può notare che se si escludono i valori massimi e minimi, i valori di densità relative variano mediamente tra 65% e 95% tra i 4 e gli 8 m di profondità. Per la determinazione dell'angolo di attrito di picco  $\phi'_p$ , in funzione della granulometria del terreno nel tratto di prova, si è considerata una delle seguenti coppie di valori di a e b proposte da Schmertmann (1978b):

- a=31.5 e b=0.115 (sabbia media uniforme o sabbia fine ben gradata);
- a=34.5 e b=0.100 (sabbia grossa uniforme o sabbia media ben gradata);

con tali ipotesi i valori dell'angolo di attrito di picco sono compresi tra  $38^\circ$  e  $44^\circ$ . Nella Figura 6.2 sono riportati i valori di  $\phi'_p$  in funzione della profondità. Inoltre, con riferimento all'involuppo di rottura curvilineo di Baligh (1976), sono stati determinati i valori di  $\phi'_o$  e  $\alpha$ . La Figura 6.3 rappresenta la variazione, in funzione della profondità, dei valori ottenuti per  $\phi'_o$  assumendo  $m=3$  e  $m=5$  rispettivamente. La Figura 6.4 riporta invece la variazione del parametro  $\alpha$  con la profondità. Si osserva che l'angolo d'attrito  $\phi'_o$  varia tra  $40^\circ$  e  $46^\circ$ , mentre il

parametro  $\alpha$ , che determina la curvatura dell'involuppo di rottura, assume valori che vanno da 5° a 10°.

Nel caso di utilizzo di un involuppo di rottura lineare (tipo Mohr-Coulomb), i valori di angolo di attrito e di un eventuale coesione apparente potranno essere determinati come valori dell'angolo di inclinazione e dell'intercetta della retta tangente o secante all'involuppo curvilineo di Baligh in corrispondenza dello stato tensionale rappresentativo del caso esaminato.

La stima delle caratteristiche di deformabilità dei materiali in esame è stata condotta utilizzando tre metodi differenti (Jamiolkowski et al., 1988; D'Appolonia et al., 1968, 1970; Stroud, 1988). Gli andamenti con la profondità dei valori del modulo di deformabilità (secondo le tre correlazioni) sono riportati nella Figura 6.5.

I parametri relativi all'unità 4 sono sintetizzati nella tabella seguente:

|                     | Dr (-) | $\phi'p$   |       | $\phi\sigma'$ |       | $\alpha$ | Ed (MPa)     |             |        |
|---------------------|--------|------------|-------|---------------|-------|----------|--------------|-------------|--------|
|                     |        | Schmertman |       | m=3           | m=5   |          | Jamiolkowski | D'Appolonia | Stroud |
| <i>Minimo</i>       | 0.22   | 34.07      | 36.74 | 33.39         | 33.66 | 0.30     | 1.94         | 17.66       | 1.80   |
| <i>Massimo</i>      | 1.13   | 44.46      | 45.77 | 51.17         | 63.28 | 11.58    | 24.44        | 41.02       | 30.60  |
| <i>Medio</i>        | 0.73   | 39.91      | 41.82 | 41.60         | 47.34 | 6.65     | 16.69        | 32.36       | 19.93  |
| <i>Dev.standard</i> | 0.28   | 3.22       | 2.80  | 5.38          | 8.96  | 3.50     | 7.64         | 8.17        | 10.07  |

## **Unità 5**

Le prove SPT eseguite nell'unità 5, sono state interpretate assumendo un peso di volume medio, ricavato dalle prove di laboratorio, di 19.50 kN/m<sup>3</sup> e considerando i terreni in esame come normalconsolidati. Dai risultati delle elaborazioni, si può notare che i valori di  $D_R$ , se si esclude il valore massimo, variano mediamente tra 54% e 87% tra i 2 e i 10 m di profondità (Figura 6.1).

Per la determinazione dell'angolo di attrito di picco  $\phi'_p$ , in funzione della granulometria del terreno nel tratto di prova, si è considerata una delle seguenti coppie di valori di a e b proposte da Schmertmann (1978b):

- a=31.5 e b=0.115 (sabbia media uniforme o sabbia fine ben gradata);
- a=34.5 e b=0.100 (sabbia grossa uniforme o sabbia media ben gradata);

con tali ipotesi i valori dell'angolo di attrito di picco sono compresi tra 37 e 44°. Nella Figura 6.2 sono riportati i valori di  $\phi'_p$  in funzione della profondità. Inoltre, con riferimento all'involuppo di rottura curvilineo di Baligh (1976), sono stati determinati i valori di  $\phi'_o$  e  $\alpha$ . La Figura 6.3 rappresenta la variazione, in funzione della profondità, dei valori ottenuti per  $\phi'_o$  assumendo  $m=3$  e  $m=5$  rispettivamente. La Figura 6.4 riporta invece la variazione del parametro  $\alpha$  con la profondità. Si osserva che l'angolo d'attrito  $\phi'_o$  varia tra 38° e 47°, mentre il parametro  $\alpha$ , che determina la curvatura dell'involuppo di rottura, assume valori che vanno da 4° a 9°.

La stima delle caratteristiche di deformabilità dei materiali in esame è stata condotta utilizzando tre metodi differenti (Jamiolkowski et al., 1988; D'Appolonia et al., 1968, 1970; Stroud, 1988). Gli andamenti con la profondità dei valori del modulo di deformabilità (secondo le tre correlazioni) sono riportati nella Figura 6.5.

I parametri relativi all'unità 5 sono sintetizzati nella tabella seguente:

|                     | Dr (-) | $\phi'_p$  |       | $\phi'_o$ |       | $\alpha$ | Ed (MPa)     |             |        |
|---------------------|--------|------------|-------|-----------|-------|----------|--------------|-------------|--------|
|                     |        | Schmertman |       | m=3       | m=5   |          | Jamiolkowski | D'Appolonia | Stroud |
| <i>Minimo</i>       | 0.54   | 37.66      | 39.86 | 38.27     | 41.78 | 4.20     | 9.49         | 24.23       | 9.90   |
| <i>Massimo</i>      | 0.87   | 41.51      | 43.20 | 44.60     | 52.34 | 8.38     | 29.47        | 44.67       | 35.10  |
| <i>Medio</i>        | 0.74   | 40.01      | 41.90 | 41.17     | 46.62 | 6.75     | 18.62        | 33.72       | 21.60  |
| <i>Dev.standard</i> | 0.15   | 1.75       | 1.52  | 2.63      | 4.38  | 1.91     | 8.22         | 8.41        | 10.37  |

### **Unità 3b, 6 e 7a**

Nelle unità 3b, 6 e 7a sono state eseguite rispettivamente 1, 2 ed 1 prova tipo SPT, essendo molte di queste andate a rifiuto; si ritiene pertanto che il loro numero non sia sufficiente per poter stimare le caratteristiche di resistenza e deformabilità in modo significativo. I risultati dell'interpretazione sono riportati nella Tabella 6.2. e sono da ritenersi indicativi.

#### 6.1.1.4. Interpretazione delle prove nei terreni coesivi

Per le prove eseguite nei terreni a comportamento di tipo coesivo, in base ai valori di  $N_{SPT}$  e ad una stima dell'indice di plasticità del terreno, è stata valutata la resistenza al taglio non drenata  $c_u$ . Le prove SPT, in questo caso, sono state eseguite nei terreni (livelli di limo argilloso e limo sabbioso) incontrati all'interno dell'unità 4 (coperture), dell'unità 5 (limi sabbiosi sovrapposti all'unità gessosa), dell'unità 6 (gessi) e dell'unità 7 (argille marnose). Una sola prova è stata eseguita in un livello di materiale coesivo all'interno dell'unità 3a (complesso ghiaioso sabbioso) ed una nell'unità 3b (complesso limoso-sabbioso).

La correlazione utilizzata per ottenere la resistenza al taglio non drenata è valida per valori di  $NSPT$  inferiori a 30; poiché una parte, in alcuni casi rilevante, dei valori di  $NSPT$  è risultata maggiore di 30, i valori stimati per la  $c_u$  devono essere considerati come rappresentativi dei parametri non drenati per i livelli meno consistenti presenti all'interno di formazioni più consistenti (unità 6 e 7) o per le minori profondità (unità 3a, 3b, 4 e 5).

Nell'unità 4 (coperture) 13 prove su un totale di 29 prove eseguite, hanno valori di  $NSPT$  inferiori a 30 (Figura 6.6). Considerando i terreni come "argille di media plasticità" i valori di  $c_u$  risultanti sono riportati nella Figura 6.6; si nota un aumento della resistenza al taglio non drenata con la profondità secondo la relazione:

$$c_u = 30.96 \cdot z \quad [c_u \text{ in kPa per } z \text{ in m}]$$

Le prove SPT che hanno interessato l'unità 5 (limi sabbiosi sovrapposti all'unità gessosa) sono 9, di cui 4 utili per stimare la resistenza al taglio non drenata, in quanto caratterizzate da un valore di  $N_{SPT}$  inferiore a 30 (Figura 6.6). Seppure i valori di  $N_{SPT}$  aumentano con la profondità, per cui è ipotizzabile un aumento di consistenza dei terreni con la profondità, i valori di  $c_u$ , ottenuti considerando i terreni come "argille di media plasticità", non presentano tale comportamento, probabilmente a causa del ridotto numero di determinazioni disponibili; i valori ottenuti dall'interpretazione sono sintetizzati nella tabella seguente:

| Unità 5        |             |
|----------------|-------------|
|                | $c_u$ (kPa) |
| <i>minimo</i>  | 53.85       |
| <i>massimo</i> | 192.31      |
| <i>media</i>   | 100.00      |

Anche per prove nell'unità 6 (Figura 6.7) si osserva un lieve incremento dei valori di  $N_{SPT}$  con la profondità, per cui è ipotizzabile un incremento della consistenza con la profondità. Sono disponibili 37 determinazioni dell'indice  $N_{SPT}$ , con 11 prove che hanno fornito valori inferiori a 30; in questo caso i valori di  $c_u$  derivati dalla correlazione non mostrano un incremento con la profondità e pertanto possono essere considerati rappresentativi dei livelli meno consistenti presenti all'interno dell'unità geotecnica; i valori minimi, massimi e medi caratteristici di tali livelli risultano:

| Unità 6        |             |
|----------------|-------------|
|                | $c_u$ (kPa) |
| <i>minimo</i>  | 123.08      |
| <i>massimo</i> | 223.08      |
| <i>media</i>   | 184.62      |

L'unità 7 appare subito più consistente: i valori di  $N_{SPT}$ , quando non sono rifiuti, variano mediamente tra 55 e 75 (Figura 6.7) e su un totale di 25 prove eseguite, solamente 3 prove possono essere utilizzate per una stima della resistenza al taglio non drenata. In questo caso non si osserva alcun incremento dei valori di  $N_{SPT}$  con la profondità; i risultati delle prove possono fornire un'indicazione della resistenza al taglio non drenata nei livelli meno consistenti presenti all'interno dell'unità geotecnica; i valori minimi, massimi e medi caratteristici di tali livelli risultano:

| Unità 7        |             |
|----------------|-------------|
|                | $c_u$ (kPa) |
| <i>Minimo</i>  | 115.38      |
| <i>Massimo</i> | 207.69      |
| <i>Media</i>   | 156.41      |

### 6.1.2. Prove pressiometriche MPM

I risultati dell'interpretazione delle 63 prove pressiometriche con sonda tipo Menard eseguite nei vari sondaggi sono riepilogati nella Tabella 6.3, nella quale sono riportate le seguenti grandezze caratteristiche:

- $(v_0, p_0)$ : valori di volume e pressione della sonda, in corrispondenza dei quali si ha il contatto tra la sonda e il terreno e dai quali ha inizio il tratto lineare della curva
- $(v_F, p_F)$ : valori di volume e pressione di scorrimento, in corrispondenza dei quali termina il tratto lineare della curva
- $p_{lim}$ : pressione limite, con cui viene indicato il valore ideale di pressione in corrispondenza della quale si avrebbe deformazione infinita.

In base ai parametri sopraelencati, e ricorrendo alle correlazioni empiriche reperibili in letteratura tecnica, è possibile determinare le caratteristiche di deformabilità e di resistenza dei materiali in sito. In particolare, sono state adottate le seguenti espressioni:

$$G = v_m \frac{\Delta_p}{\Delta_v}$$

$$E_p = 2(1 + \nu) v_m \frac{\Delta_p}{\Delta_v}$$

$$c_u = \frac{p_{lim} - p_0}{\beta}$$

dove:

$$v_m = v_0 + \frac{v_F + v_0}{2}$$

$$\Delta_p = p_F - p_0$$

$$\Delta_v = v_F - v_0$$

essendo:

G      modulo di taglio

$E_p$     modulo pressiometrico

- $c_u$  resistenza al taglio non drenata
- $\nu$  rapporto di Poisson, assunto pari a 0.4
- $\beta$  coefficiente adimensionale, funzione del valore  $(p_{lim}-p_0)$
- $V_0$  volume iniziale della sonda a pressione atmosferica (valore derivato dalla curva di taratura).

Sulla base del valore del modulo pressiométrico è possibile determinare il modulo elastico di compressione “sferica”  $E_Y$ , come  $E_Y=E_p/\alpha$ , con la costante reologica  $\alpha$  determinata sulla base della seguente tabella di valori:

| Tipo di terreno         | Argilla       |          | Limo          |          | Sabbia        |          | Sabbia e ghiaia |          |
|-------------------------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|-----------------|----------|
|                         | $E_p/p_{lim}$ | $\alpha$ | $E_p/p_{lim}$ | $\alpha$ | $E_p/p_{lim}$ | $\alpha$ | $E_p/p_{lim}$   | $\alpha$ |
| Sovraconsolidato        | >16           | 1        | >14           | 0.67     | >12           | 0.5      | >10             | 0.33     |
| Normal-consolidato      | 9-16          | 0.67     | 8-14          | 0.5      | 7-12          | 0.33     | 6-10            | 0.25     |
| Alterato e rimaneggiato | 7-9           | 0.5      | <8            | 0.5      | <7            | 0.33     | <6              | 0.25     |

Nella Tabella 6.3 vengono sintetizzati i risultati dell’interpretazione eseguita, riportando i valori del modulo pressiométrico e della resistenza al taglio non drenata per gli strati coesivi.

Le prove sono state eseguite principalmente nell’unità 7 (argille marnose) ad eccezione di sei prove che interessano l’unità 6 (gessi), eseguite all’interno del foro SGF08, e delle prove n°1 e n°2 all’interno del foro SGF19, che interessano l’unità 7a (corpi detritici grossolani intercalati da argille marnose).

Nell’interpretazione delle prove pressiométriche sono stati esclusi i valori ottenuti da prove in cui i valori di fluage non sono stati raggiunti a causa del raggiungimento del fondo scala strumentale e da prove in cui il parametro  $(p_{lim}-p_0)/(p_F-p_0)$  ha raggiunto valori anomali.

Il modulo pressiométrico  $E_p(z)$  nella formazione 6 (gessi), in base alle uniche tre prove utili ottenute sulla verticale SFG08, assume valori che vanno da 75 MPa ad una profondità di 30 m circa a 150 MPa ad una profondità di 40 m circa; il modulo dunque pare crescere linearmente con la profondità secondo una retta avente la seguente equazione (Figura 6.8):

$$E_p(z) = 3.441z \quad [E_p \text{ in MPa per } z \text{ in m}]$$

La Figura 6.9 che riguarda l'unità 7 (argille marnose), mette in luce il duplice andamento del modulo  $E_p$  all'interno delle profondità indagate. In corrispondenza della zona più superficiale si delinea un andamento crescente e il modulo si assesta su valori prossimi a 100 MPa ad una profondità di 25 m circa. Al di sotto dei 25 m il modulo mediamente assume valori nell'intervallo 50÷150 MPa.

I valori del modulo pressiométrico relativi all'unità 7 sono sintetizzati nella tabella seguente:

| Unità 7             |             |
|---------------------|-------------|
|                     | $E_p$ (MPa) |
| <i>Minimo</i>       | 6.99        |
| <i>Massimo</i>      | 193.47      |
| <i>Medio</i>        | 96.41       |
| <i>Dev.standard</i> | 38.20       |

La distribuzione dei dati derivati dall'interpretazione delle prove, suddivise in base alle progressive di sviluppo della galleria è riportata nella Figura 6.10. Per le profondità maggiori di 50 m si osserva un lieve incremento dei valori di  $E_p$  nel tratto tra le progressive 1735-2378 m, mentre si ha una lieve riduzione di valori di  $E_p$  nel tratto tra le progressive 2939-3636 m. Per tutti i settori di galleria possono essere considerate valide le leggi di variazione con la profondità ricavate con la globalità dei dati e riportate nella Figura 6.9.

Il valori di resistenza al taglio non drenata  $c_u$  relativi alla formazione gessoso-solfifera (Figura 6.11), assumono un andamento lineare crescente con la profondità, descritto dalla seguente equazione:

$$c_u(z) = 18.47z \quad [c_u \text{ in kPa per } z \text{ in m}]$$

In termini di resistenza al taglio non drenata  $c_u$ , alle argille marnose compete un valore che tra i 10 m e i 25 m pare crescere linearmente con la profondità

(Figura 6.12), in quanto i valori ottenuti si allineano su una retta avente la seguente equazione:

$$c_u(z) = 24.79z - 43.71 \quad (R^2=0.566) \quad [c_u \text{ in kPa per } z \text{ in m}]$$

Per profondità maggiori di 25 m il valore della resistenza al taglio non drenata, rimane pressoché costante e assume valori che vanno da 400 a 700 kPa.

I valori della resistenza al taglio non drenata relativi all'unità 7 sono sintetizzati nella tabella seguente:

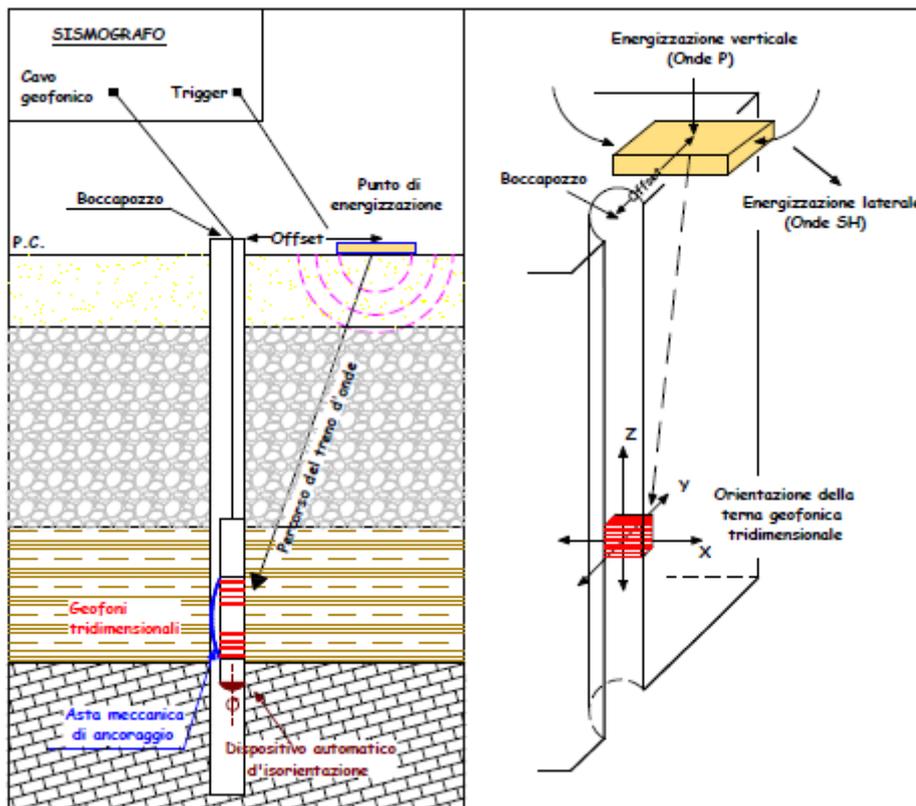
| Unità 7             |             |
|---------------------|-------------|
|                     | $c_u$ (kPa) |
| <i>Minimo</i>       | 73.80       |
| <i>Massimo</i>      | 930.20      |
| <i>Medio</i>        | 548.84      |
| <i>Dev.standard</i> | 141.37      |

La suddivisione dei dati in base alle progressive è riportata nella Figura 6.13. Si ritiene pertanto che le caratteristiche di resistenza della formazione marnosa siano omogenee lungo tutto lo sviluppo della galleria.

### 6.1.3. Prove down-hole

Nell'ambito della campagna di indagini integrativa 2011-2012 sono stati realizzati 4 carotaggi sismici down-hole. L'indagine geofisica è stata condotta all'interno dei sondaggi meccanici DH2, DH3, DH5 e DH7. Lo scopo dell'indagine è la caratterizzazione dinamica dei terreni attraverso il parametro della velocità sismica delle onde P e delle onde SH e la definizione del valore di  $V_{S30}$  ai fini della classificazione dei suoli di fondazione secondo le categorie di suolo previste dalla vigente normativa antisismica. I 4 sondaggi utilizzati per la indagine geofisica hanno tutti una profondità di 40 m dal piano campagna. Molto sinteticamente, la prova down-hole consiste nel determinare la velocità di propagazione delle onde di compressione (onde P) e di taglio (onde  $S_H$ ), calcolando il tempo ad esse necessario per raggiungere il geofono ricevitore (posto all'interno del foro di sondaggio) dalla zona sorgente (posta a piano

campagna a distanza nota dal foro). Si suppone che il volume di terreno, interessato dalle indagini sia stratificato orizzontalmente e che all'interno d'ogni strato il comportamento del terreno si possa considerare elastico, omogeneo ed isotropo. La prova consiste nel produrre in superficie sollecitazioni verticali per la generazione di onde di compressione P, ed orizzontali per la generazione di onde di taglio polarizzate orizzontalmente,  $S_H$ , e, nel registrare l'istante di primo arrivo del treno d'onde ad un sistema composto da una terna di geofoni, ancorati a profondità nota nel foro di sondaggio (cfr. fig. 6.1.3/1).



*Fig. 6.1.3/1 – Rappresentazione schematica di un carotaggio sismico down-hole  
 Una volta nota la distanza tra la sorgente ed i ricevitori e determinato il tempo di propagazione, è possibile stimare in maniera accurata la distribuzione delle velocità sismiche ( $P$  e  $S_H$ ) in corrispondenza della verticale di misura.*

Nel seguito si analizzano singolarmente i 4 carotaggi geofisici eseguiti.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6  
PROGETTO ESECUTIVO  
Galleria Verduno - Relazione geotecnica

**DH2**

La tabella 1 riporta i tempi d'arrivo originali e quelli corretti in funzione della profondità per il carotaggio DH2.

| Profondità<br>m | Onde P                | Onde SH               | Onde P                   | Onde SH                  |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
|                 | tempi verticali<br>ms | tempi verticali<br>ms | tempi sperimentali<br>ms | tempi sperimentali<br>ms |
| 0               | 0,00                  | 0,00                  | 0,00                     | 0,00                     |
| 1               | 3,92                  | 11,61                 | 12,40                    | 36,70                    |
| 2               | 6,93                  | 21,63                 | 12,50                    | 39,00                    |
| 3               | 8,98                  | 29,2                  | 12,70                    | 41,30                    |
| 4               | 10,64                 | 36,72                 | 13,30                    | 45,90                    |
| 5               | 11,92                 | 40,3                  | 13,90                    | 47,00                    |
| 6               | 12,88                 | 43,11                 | 14,40                    | 48,20                    |
| 7               | 13,51                 | 46,42                 | 14,70                    | 50,50                    |
| 8               | 14,14                 | 48,41                 | 15,10                    | 51,70                    |
| 9               | 14,61                 | 50,94                 | 15,40                    | 53,70                    |
| 10              | 15,13                 | 53,45                 | 15,80                    | 55,80                    |
| 11              | 15,53                 | 55,76                 | 16,10                    | 57,80                    |
| 12              | 16,01                 | 58,69                 | 16,50                    | 60,50                    |
| 13              | 16,37                 | 60,9                  | 16,80                    | 62,50                    |
| 14              | 16,82                 | 63,85                 | 17,20                    | 65,30                    |
| 15              | 17,16                 | 65,99                 | 17,50                    | 67,30                    |
| 16              | 17,50                 | 68,8                  | 17,80                    | 70,00                    |
| 17              | 17,92                 | 70,9                  | 18,20                    | 72,00                    |
| 18              | 18,45                 | 73,09                 | 18,70                    | 74,10                    |
| 19              | 18,97                 | 75,86                 | 19,20                    | 76,80                    |
| 20              | 20,08                 | 77,93                 | 20,30                    | 78,80                    |
| 21              | 20,79                 | 80,09                 | 21,00                    | 80,90                    |
| 22              | 21,10                 | 82,14                 | 21,30                    | 82,90                    |
| 23              | 21,62                 | 82,9                  | 21,80                    | 83,60                    |
| 24              | 22,03                 | 84,24                 | 22,20                    | 84,90                    |
| 25              | 22,34                 | 86,38                 | 22,50                    | 87,00                    |
| 26              | 22,75                 | 87,72                 | 22,90                    | 88,30                    |
| 27              | 23,26                 | 89,15                 | 23,40                    | 89,70                    |
| 28              | 23,66                 | 91,18                 | 23,80                    | 91,70                    |
| 29              | 23,97                 | 92,61                 | 24,10                    | 93,10                    |
| 30              | 24,48                 | 94,63                 | 24,60                    | 95,10                    |
| 31              | 24,88                 | 96,65                 | 25,00                    | 97,10                    |
| 32              | 25,39                 | 98,77                 | 25,50                    | 99,20                    |
| 33              | 25,59                 | 100,09                | 25,70                    | 100,50                   |
| 34              | 25,90                 | 101,51                | 26,00                    | 101,90                   |
| 35              | 26,30                 | 102,82                | 26,40                    | 103,20                   |
| 36              | 26,61                 | 104,94                | 26,70                    | 105,30                   |
| 37              | 27,11                 | 106,95                | 27,20                    | 107,30                   |
| 38              | 27,71                 | 109,06                | 27,80                    | 109,40                   |
| 39              | 28,02                 | 110,37                | 28,10                    | 110,70                   |
| 40              | 28,32                 | 112,38                | 28,40                    | 112,70                   |

Tabella 1

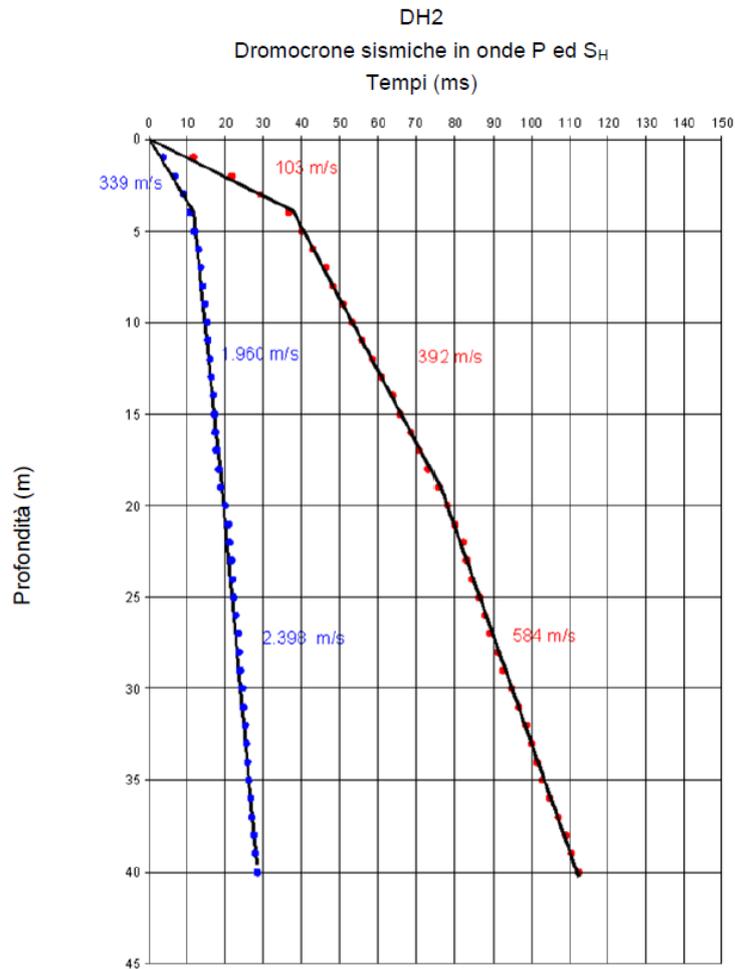


Fig. 6.1.3/2 – andamento delle dromocrome con la profondità – DH2

La fig. 6.1.3/2 riporta l'andamento delle dromocrome che può essere schematizzata come segue, nella tabella 2:

| Profondità m (da – a) |      | Velocità onde P<br>(m/sec) | Velocità onde SH<br>(m/sec) |
|-----------------------|------|----------------------------|-----------------------------|
| 0.0                   | 4.0  | 339                        | 103                         |
| 4.0                   | 19.0 | 1960                       | 392                         |
| 19.0                  | 40.0 | 2397                       | 584                         |

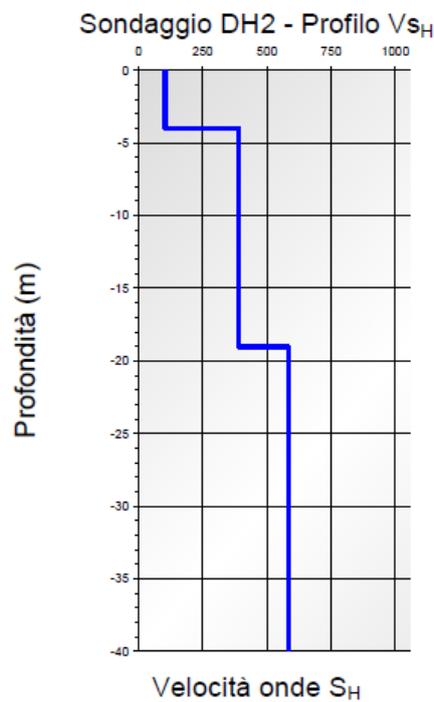
Tabella 2



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6  
PROGETTO ESECUTIVO  
Galleria Verduno - Relazione geotecnica

In base alle velocità sismiche  $V_p$  e  $V_{sh}$ , sono inoltre stati calcolati i moduli elastici dinamici dei terreni attraversati nel corso del carotaggio geofisico.

| Profondità<br>m (da – a) |      | Densità<br>$\text{kN/m}^3$ | $\nu$<br>- | VP<br>(m/sec) | VSH<br>(m/sec) | Mod.Taglio<br>dinamico<br>$\text{kN/m}^2$ | Modulo<br>Young<br>$\text{kN/m}^2$ | Bulk<br>modulus<br>$\text{kN/m}^2$ |
|--------------------------|------|----------------------------|------------|---------------|----------------|---|------------------------------------|------------------------------------|
| 0.0                      | 4.0  | 19.5                       | 0.45       | 339           | 103            | 2.11e+04                                  | 6.1e+04                            | 2.00e+05                           |
| 4.0                      | 19.0 | 20.0                       | 0.48       | 1960          | 392            | 3.13e+05                                  | 9.27e+05                           | 7.41e+06                           |
| 19.0                     | 40.0 | 20.5                       | 0.47       | 2397          | 584            | 7.13e+05                                  | 2.09e+06                           | 1.11e+07                           |



In base alle velocità delle onde di taglio  $V_{sh}$  è stato inoltre possibile fornire il valore delle onde di taglio ed il valore  $V_{s30}$ , a partire dal piano campagna, per la classificazione delle categorie del suolo di fondazione previsto dalla normativa antisismica.

| Litologia               | Spessore<br>m | Vsh<br>m/sec |
|-------------------------|---------------|--------------|
| Argilla limoso-sabbiosa | 4.0           | 103          |
| Argilla limosa          | 15.0          | 392          |
| Argilla limosa          | 11.0          | 584          |

Pertanto, per quest'area il valore di Vs30, se riferito al piano campagna, risulta pari a 313 m/s. L'area di indagine rientra quindi, secondo quanto previsto dalle NTC2008, nella categoria di suolo di tipo C.

### **DH3**

La tabella 3 riporta i tempi d'arrivo originali e quelli corretti in funzione della profondità per il carotaggio DH2.

La fig. 6.1.3/3 riporta l'andamento delle dromocrome che può essere schematizzata come segue, nella tabella 4:

| Profondità m (da – a) |      | Velocità onde P<br>(m/sec) | Velocità onde SH<br>(m/sec) |
|-----------------------|------|----------------------------|-----------------------------|
| 0.0                   | 4.0  | 447                        | 115                         |
| 4.0                   | 14.0 | 957                        | 314                         |
| 14.0                  | 29.0 | 1239                       | 447                         |
| 29.0                  | 40.0 | 1813                       | 4646                        |

Tabella 4



**Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6**  
**PROGETTO ESECUTIVO**  
**Galleria Verduno - Relazione geotecnica**

| Profondità<br>m | Onde P                   | Onde SH                  | Onde P                      | Onde SH                     |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                 | tempi verticali<br>m/sec | tempi verticali<br>m/sec | tempi sperimentali<br>m/sec | tempi sperimentali<br>m/sec |
| 0               | 0,00                     | 0,00                     | 0,00                        | 0,00                        |
| 1               | 1,99                     | 10,12                    | 6,30                        | 32,00                       |
| 2               | 4,49                     | 19,19                    | 8,10                        | 34,60                       |
| 3               | 6,86                     | 26,38                    | 9,70                        | 37,30                       |
| 4               | 8,88                     | 32,48                    | 11,10                       | 40,60                       |
| 5               | 10,20                    | 36,53                    | 11,90                       | 42,60                       |
| 6               | 11,27                    | 40,43                    | 12,60                       | 45,20                       |
| 7               | 12,59                    | 43,38                    | 13,70                       | 47,20                       |
| 8               | 13,48                    | 46,63                    | 14,40                       | 49,80                       |
| 9               | 14,51                    | 48,57                    | 15,30                       | 51,20                       |
| 10              | 15,52                    | 51,53                    | 16,20                       | 53,80                       |
| 11              | 16,50                    | 55,09                    | 17,10                       | 57,10                       |
| 12              | 17,46                    | 58,69                    | 18,00                       | 60,50                       |
| 13              | 18,42                    | 61,48                    | 18,90                       | 63,10                       |
| 14              | 19,56                    | 65,61                    | 20,00                       | 67,10                       |
| 15              | 20,79                    | 67,76                    | 21,20                       | 69,10                       |
| 16              | 21,92                    | 70,47                    | 22,30                       | 71,70                       |
| 17              | 23,14                    | 72,58                    | 23,50                       | 73,70                       |
| 18              | 24,07                    | 73,39                    | 24,40                       | 74,40                       |
| 19              | 24,99                    | 76,06                    | 25,30                       | 77,00                       |
| 20              | 25,91                    | 78,13                    | 26,20                       | 79,00                       |
| 21              | 26,63                    | 80,88                    | 26,90                       | 81,70                       |
| 22              | 27,35                    | 83,53                    | 27,60                       | 84,30                       |
| 23              | 27,76                    | 85,58                    | 28,00                       | 86,30                       |
| 24              | 26,68                    | 88,31                    | 28,90                       | 89,00                       |
| 25              | 29,39                    | 90,95                    | 29,60                       | 91,60                       |
| 26              | 29,90                    | 92,98                    | 30,10                       | 93,60                       |
| 27              | 30,61                    | 95,02                    | 30,80                       | 95,60                       |
| 28              | 31,32                    | 96,35                    | 31,50                       | 96,90                       |
| 29              | 31,93                    | 97,68                    | 32,10                       | 98,20                       |
| 30              | 32,64                    | 99,7                     | 32,80                       | 100,20                      |
| 31              | 33,15                    | 101,13                   | 33,30                       | 101,60                      |
| 32              | 33,55                    | 103,05                   | 33,70                       | 103,50                      |
| 33              | 34,26                    | 104,47                   | 34,40                       | 104,90                      |
| 34              | 34,96                    | 106,49                   | 35,10                       | 106,90                      |
| 35              | 35,17                    | 107,8                    | 35,30                       | 108,20                      |
| 36              | 35,88                    | 109,12                   | 36,00                       | 109,50                      |
| 37              | 36,38                    | 110,44                   | 36,50                       | 110,80                      |
| 38              | 36,79                    | 111,85                   | 36,90                       | 112,20                      |
| 39              | 37,49                    | 113,17                   | 37,60                       | 113,50                      |
| 40              | 38,19                    | 115,18                   | 38,30                       | 115,50                      |

Tabella 3

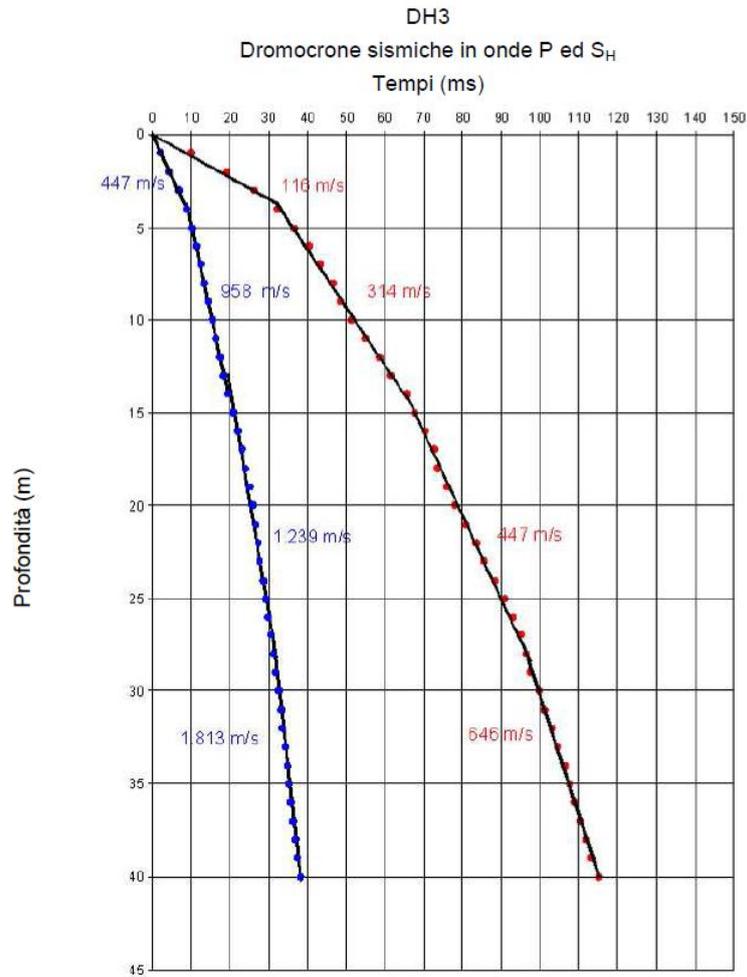
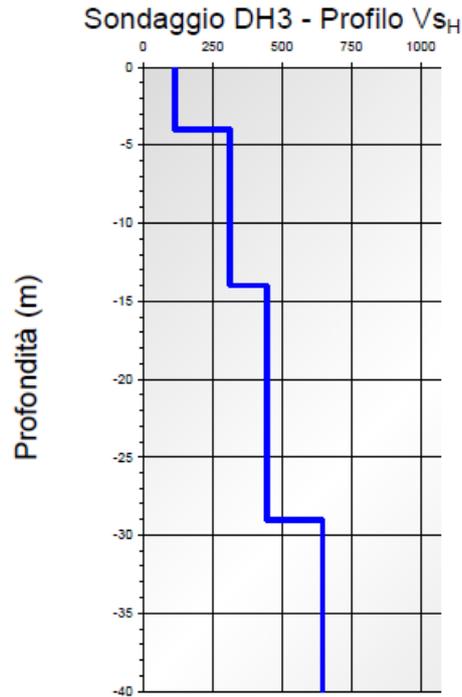


Fig. 6.1.3/3 – andamento delle dromocrome con la profondità – DH2

In base alle velocità sismiche  $V_p$  e  $V_{sh}$ , sono inoltre stati calcolati i moduli elastici dinamici dei terreni attraversati nel corso del carotaggio geofisico.

| Profondità<br>m (da – a) |      | Densità<br>kN/m <sup>3</sup> | $\nu$<br>- | VP<br>(m/sec) | VSH<br>(m/sec) | Mod.Taglio<br>dinamico<br>kN/m <sup>2</sup> | Modulo<br>Young<br>kN/m <sup>2</sup> | Bulk<br>modulus<br>kN/m <sup>2</sup> |
|--------------------------|------|------------------------------|------------|---------------|----------------|---|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 0.0                      | 4.0  | 19.5                         | 0.46       | 447           | 115            | 2.63e+04                                    | 7.70e+04                             | 3.62e+05                             |
| 4.0                      | 14.0 | 20.0                         | 0.44       | 957           | 314            | 2.01e+05                                    | 5.79e+05                             | 1.60e+06                             |
| 14.0                     | 29.0 | 20.5                         | 0.43       | 1239          | 447            | 4.18e+05                                    | 1.19e+06                             | 2.65e+06                             |
| 29.0                     | 40.0 | 21.0                         | 0.43       | 1813          | 646            | 8.93e+05                                    | 2.55e+06                             | 5.85e+06                             |



In base alle velocità delle onde di taglio  $V_{sh}$  è stato inoltre possibile fornire il valore delle onde di taglio ed il valore  $V_{s30}$ , a partire dal piano campagna, per la classificazione delle categorie del suolo di fondazione previsto dalla normativa antisismica.

| <b>Litologia</b> | <b>Spessore<br/>m</b> | <b><math>V_{sh}</math><br/>m/sec</b> |
|------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| Argilla sabbiosa | 4.0                   | 115                                  |
| Argilla limosa   | 10.0                  | 314                                  |
| Argilla limosa   | 15.0                  | 447                                  |
| Argilla limosa   | 1.0                   | 646                                  |

Pertanto, per quest'area il valore di  $V_{s30}$ , se riferito al piano campagna, risulta pari a 295 m/s. L'area di indagine rientra nella categoria di suolo di tipo C.

**DH5**

La tabella 5 riporta i tempi d'arrivo originali e quelli corretti in funzione della profondità per il carotaggio DH5. La fig. 6.1.3/4 riporta l'andamento delle dromocrome che può essere schematizzata come riportato nella tabella 6.

| Profondità<br>m | Onde P                   | Onde SH                  | Onde P                      | Onde SH                     |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                 | tempi verticali<br>m/sec | tempi verticali<br>m/sec | tempi sperimentali<br>m/sec | tempi sperimentali<br>m/sec |
| 0               | 0,00                     | 0,00                     | 0,00                        | 0,00                        |
| 1               | 2,53                     | 4,33                     | 8,00                        | 13,70                       |
| 2               | 4,94                     | 11,82                    | 8,90                        | 21,30                       |
| 3               | 6,93                     | 17,68                    | 9,80                        | 25,00                       |
| 4               | 8,40                     | 22,40                    | 10,50                       | 28,00                       |
| 5               | 9,60                     | 27,35                    | 11,20                       | 31,90                       |
| 6               | 10,64                    | 31,57                    | 11,9                        | 35,30                       |
| 7               | 11,49                    | 35,48                    | 12,5                        | 38,60                       |
| 8               | 12,36                    | 38,01                    | 13,2                        | 40,60                       |
| 9               | 13,09                    | 42,22                    | 13,8                        | 44,50                       |
| 10              | 13,79                    | 44,54                    | 14,4                        | 46,50                       |
| 11              | 14,57                    | 47,47                    | 15,1                        | 49,20                       |
| 12              | 15,23                    | 50,25                    | 15,7                        | 51,80                       |
| 13              | 15,79                    | 53,01                    | 16,2                        | 54,40                       |
| 14              | 16,52                    | 55,83                    | 16,9                        | 57,10                       |
| 15              | 16,87                    | 59,33                    | 17,2                        | 60,50                       |
| 16              | 17,40                    | 62,02                    | 17,7                        | 63,10                       |
| 17              | 17,82                    | 64,8                     | 18,1                        | 65,80                       |
| 18              | 18,54                    | 67,47                    | 18,8                        | 68,40                       |
| 19              | 19,06                    | 70,23                    | 19,3                        | 71,10                       |
| 20              | 19,58                    | 72,88                    | 19,8                        | 73,70                       |
| 21              | 20,10                    | 75,63                    | 20,3                        | 76,40                       |
| 22              | 20,71                    | 77,19                    | 20,9                        | 77,90                       |
| 23              | 21,12                    | 78,93                    | 21,3                        | 79,60                       |
| 24              | 21,53                    | 80,67                    | 21,70                       | 81,30                       |
| 25              | 21,94                    | 82,51                    | 22,10                       | 83,10                       |
| 26              | 22,35                    | 84,24                    | 22,50                       | 84,80                       |
| 27              | 22,86                    | 85,37                    | 23,00                       | 85,90                       |
| 28              | 23,27                    | 87,1                     | 23,40                       | 87,60                       |
| 29              | 23,38                    | 88,33                    | 23,50                       | 88,80                       |
| 30              | 23,88                    | 89,85                    | 24,00                       | 90,30                       |
| 31              | 24,29                    | 92,97                    | 24,40                       | 93,40                       |
| 32              | 24,79                    | 95,18                    | 24,90                       | 95,60                       |
| 33              | 25,00                    | 97                       | 25,10                       | 97,40                       |
| 34              | 25,30                    | 99,21                    | 25,40                       | 99,60                       |
| 35              | 25,71                    | 101,03                   | 25,80                       | 101,40                      |
| 36              | 26,01                    | 103,24                   | 26,10                       | 103,60                      |
| 37              | 26,31                    | 104,46                   | 26,40                       | 104,80                      |
| 38              | 26,62                    | 106,17                   | 26,70                       | 106,50                      |
| 39              | 26,82                    | 107,28                   | 26,90                       | 107,60                      |
| 40              | 27,22                    | 108,69                   | 27,30                       | 109,00                      |

*Tabella 5*

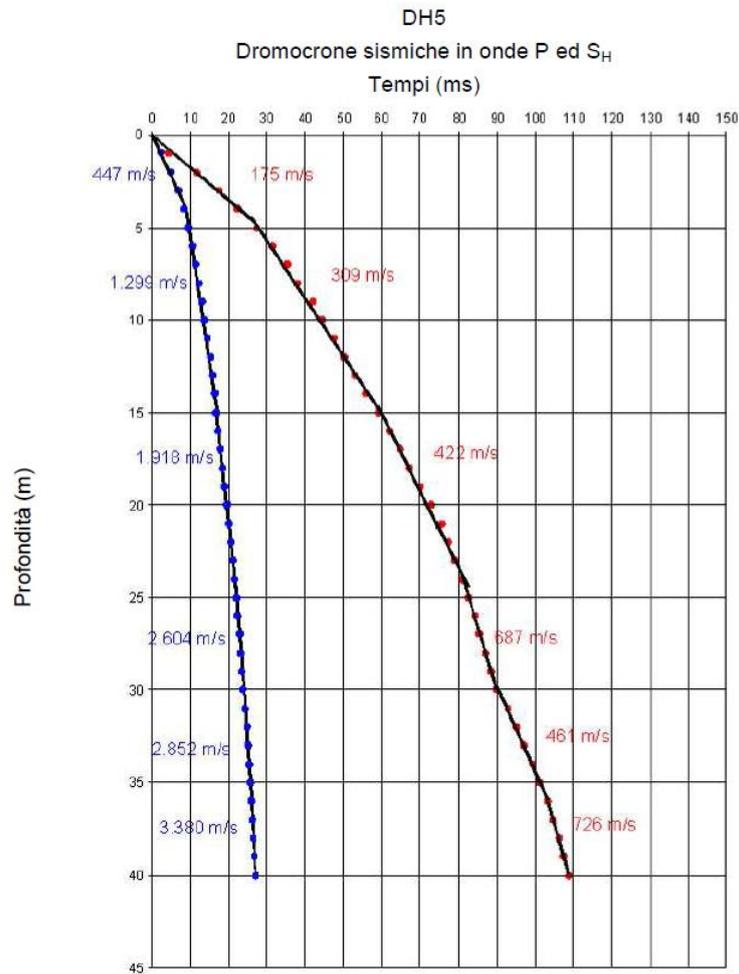


Fig. 6.1.3/4 – andamento delle dromocrome con la profondità – DH5

| Profondità m (da – a) |      | Velocità onde P<br>(m/sec) | Velocità onde SH<br>(m/sec) |
|-----------------------|------|----------------------------|-----------------------------|
| 0.0                   | 4.0  | 447                        | 175                         |
| 4.0                   | 15.0 | 1299                       | 309                         |
| 15.0                  | 25.0 | 1918                       | 422                         |
| 25.0                  | 30.0 | 2604                       | 689                         |
| 30.0                  | 36.0 | 2852                       | 461                         |
| 36.0                  | 40.0 | 3380                       | 726                         |

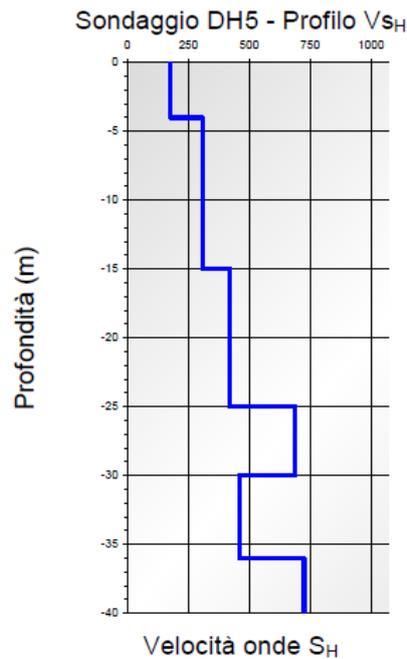
Tabella 6



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6  
PROGETTO ESECUTIVO  
Galleria Verduno - Relazione geotecnica

In base alle velocità sismiche  $V_p$  e  $V_{sh}$ , sono inoltre stati calcolati i moduli elastici dinamici dei terreni attraversati nel corso del carotaggio geofisico.

| Profondità<br>m (da – a) |      | Densità<br>$\text{kN/m}^3$ | $\nu$<br>- | VP<br>(m/sec) | VSH<br>(m/sec) | Mod.Taglio<br>dinamico<br>$\text{kN/m}^2$ | Modulo<br>Young<br>$\text{kN/m}^2$ | Bulk<br>modulus<br>$\text{kN/m}^2$ |
|--------------------------|------|----------------------------|------------|---------------|----------------|---|------------------------------------|------------------------------------|
| 0.0                      | 4.0  | 19.5                       | 0.41       | 447           | 175            | 6.09e+04                                  | 1.72e+05                           | 3.16e+05                           |
| 4.0                      | 15.0 | 20.0                       | 0.47       | 1299          | 309            | 1.95e+05                                  | 5.72e+05                           | 3.18e+06                           |
| 15.0                     | 25.0 | 20.5                       | 0.47       | 1918          | 422            | 3.72e+05                                  | 1.10e+06                           | 7.19e+06                           |
| 25.0                     | 30.0 | 21.0                       | 0.46       | 2604          | 689            | 1.02e+06                                  | 2.97e+06                           | 1.32e+07                           |
| 30.0                     | 36.0 | 20.5                       | 0.49       | 2852          | 461            | 4.44e+05                                  | 1.32e+06                           | 1.64e+07                           |
| 36.0                     | 40.0 | 21.5                       | 0.48       | 3380          | 726            | 1.16e+06                                  | 3.41e+06                           | 2.35e+07                           |



In base alle velocità delle onde di taglio  $V_{sh}$  è stato inoltre possibile fornire il valore delle onde di taglio ed il valore  $V_{s30}$ , a partire dal piano campagna, per la classificazione delle categorie del suolo di fondazione previsto dalla normativa antisismica.



**Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6**  
**PROGETTO ESECUTIVO**  
**Galleria Verduno - Relazione geotecnica**

| <b>Litologia</b> | <b>Spessore<br/>m</b> | <b>Vsh<br/>m/sec</b> |
|------------------|-----------------------|----------------------|
| Limo sabbioso    | 4.0                   | 175                  |
| Limo sabbioso    | 11.0                  | 309                  |
| Argilla limosa   | 10.0                  | 422                  |
| Roccia gessosa   | 5.0                   | 689                  |

Pertanto, per quest'area il valore di Vs30, se riferito al piano campagna, risulta pari a 336 m/s. L'area di indagine rientra nella categoria di suolo di tipo C.

### **DH7**

La tabella 7 riporta i tempi d'arrivo originali e quelli corretti in funzione della profondità per il carotaggio DH7.

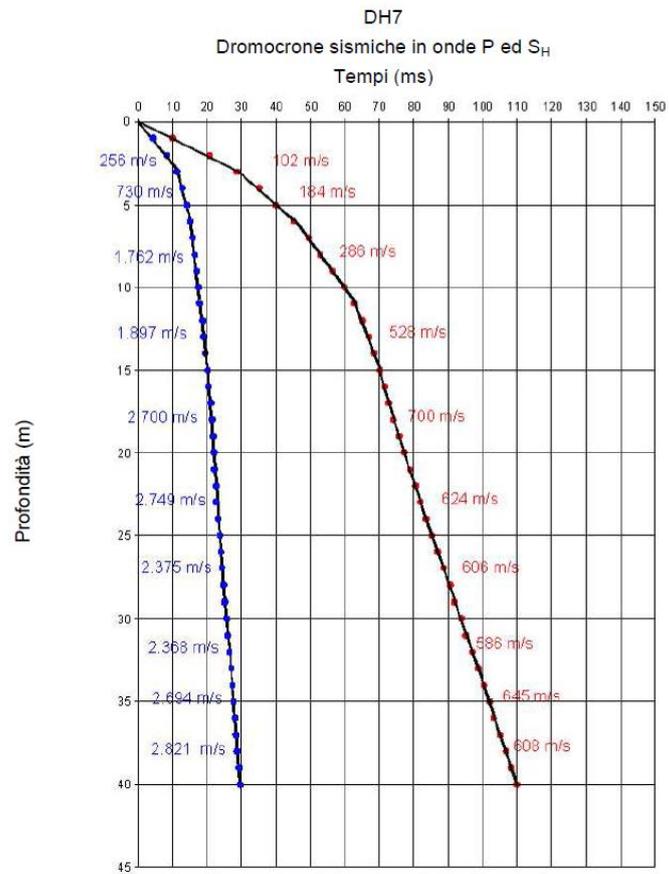
La fig. 6.1.3/5 riporta l'andamento delle dromocrome che può essere schematizzata come segue, nella tabella 8.



**Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6**  
**PROGETTO ESECUTIVO**  
**Galleria Verduno - Relazione geotecnica**

| Profondità<br>m | Onde P                   | Onde SH                  | Onde P                      | Onde SH                     |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                 | tempi verticali<br>m/sec | tempi verticali<br>m/sec | tempi sperimentali<br>m/sec | tempi sperimentali<br>m/sec |
| 0               | 0,00                     | 0,00                     | 0,00                        | 0,00                        |
| 1               | 4,52                     | 10,09                    | 14,30                       | 31,90                       |
| 2               | 8,32                     | 20,69                    | 15,00                       | 37,30                       |
| 3               | 11,10                    | 28,71                    | 15,70                       | 40,60                       |
| 4               | 12,88                    | 35,12                    | 16,10                       | 43,90                       |
| 5               | 14,23                    | 39,87                    | 16,60                       | 46,50                       |
| 6               | 15,12                    | 45,17                    | 16,9                        | 50,50                       |
| 7               | 15,90                    | 49,45                    | 17,3                        | 53,80                       |
| 8               | 16,48                    | 52,9                     | 17,6                        | 56,50                       |
| 9               | 17,08                    | 56,54                    | 18                          | 59,60                       |
| 10              | 17,53                    | 59,86                    | 18,3                        | 62,50                       |
| 11              | 17,94                    | 62,52                    | 18,6                        | 64,80                       |
| 12              | 18,63                    | 65                       | 19,2                        | 67,00                       |
| 13              | 19,10                    | 67,04                    | 19,6                        | 68,80                       |
| 14              | 19,56                    | 68,35                    | 20                          | 69,90                       |
| 15              | 20,10                    | 70,21                    | 20,5                        | 71,60                       |
| 16              | 20,54                    | 71,55                    | 20,9                        | 72,80                       |
| 17              | 21,27                    | 72,78                    | 21,6                        | 73,90                       |
| 18              | 21,60                    | 73,98                    | 21,9                        | 75,00                       |
| 19              | 21,83                    | 75,86                    | 22,1                        | 76,80                       |
| 20              | 21,95                    | 77,04                    | 22,2                        | 77,90                       |
| 21              | 22,17                    | 78,8                     | 22,4                        | 79,60                       |
| 22              | 22,59                    | 80,55                    | 22,8                        | 81,30                       |
| 23              | 22,71                    | 81,81                    | 22,9                        | 82,50                       |
| 24              | 23,22                    | 83,55                    | 23,40                       | 84,20                       |
| 25              | 23,63                    | 85,29                    | 23,80                       | 85,90                       |
| 26              | 23,94                    | 87,02                    | 24,10                       | 87,60                       |
| 27              | 24,35                    | 88,75                    | 24,50                       | 89,30                       |
| 28              | 24,86                    | 90,58                    | 25,00                       | 91,10                       |
| 29              | 25,27                    | 91,71                    | 25,40                       | 92,20                       |
| 30              | 25,77                    | 94,03                    | 25,90                       | 94,50                       |
| 31              | 25,98                    | 95,16                    | 26,10                       | 95,60                       |
| 32              | 26,48                    | 96,97                    | 26,60                       | 97,40                       |
| 33              | 26,99                    | 98,69                    | 27,10                       | 99,10                       |
| 34              | 27,29                    | 100,41                   | 27,40                       | 100,80                      |
| 35              | 27,60                    | 102,13                   | 27,70                       | 102,50                      |
| 36              | 28,10                    | 103,24                   | 28,20                       | 103,60                      |
| 37              | 28,51                    | 105,06                   | 28,60                       | 105,40                      |
| 38              | 28,81                    | 106,77                   | 28,90                       | 107,10                      |
| 39              | 29,21                    | 108,18                   | 29,30                       | 108,50                      |
| 40              | 29,52                    | 109,89                   | 29,60                       | 110,20                      |

*Tabella 7*



*Fig. 6.1.3/5 – andamento delle dromocrome con la profondità – DH7*



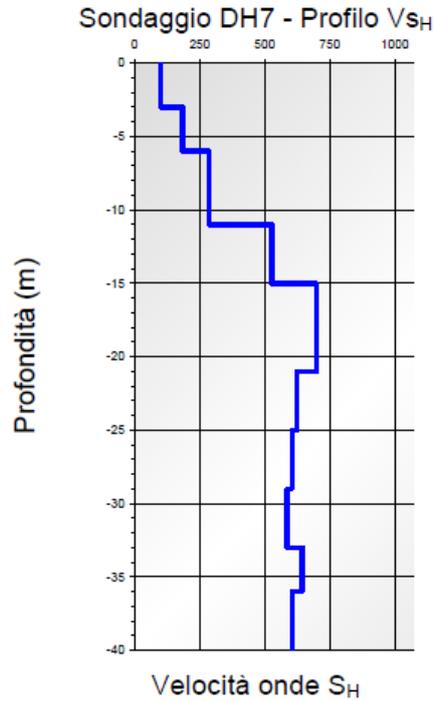
**Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6**  
**PROGETTO ESECUTIVO**  
**Galleria Verduno - Relazione geotecnica**

| Profondità m (da – a) |      | Velocità onde P<br>(m/sec) | Velocità onde SH<br>(m/sec) |
|-----------------------|------|----------------------------|-----------------------------|
| 0.0                   | 3.0  | 256                        | 102                         |
| 3.0                   | 6.0  | 730                        | 184                         |
| 6.0                   | 11.0 | 1762                       | 286                         |
| 11.0                  | 15.0 | 1897                       | 528                         |
| 15.0                  | 21.0 | 2700                       | 700                         |
| 21.0                  | 25.0 | 2749                       | 624                         |
| 25.0                  | 29.0 | 2375                       | 606                         |
| 29.0                  | 33.0 | 2368                       | 587                         |
| 33.0                  | 36.0 | 2694                       | 645                         |
| 36.0                  | 40.0 | 2821                       | 608                         |

Tabella 8

In base alle velocità sismiche  $V_p$  e  $V_{sh}$ , sono inoltre stati calcolati i moduli elastici dinamici dei terreni attraversati nel corso del carotaggio geofisico.

| Profondità<br>m (da – a) |      | Densità<br>$\text{kN/m}^3$ | $\nu$<br>- | VP<br>(m/sec) | VSH<br>(m/sec) | Mod.Taglio<br>dinamico<br>$\text{kN/m}^2$ | Modulo<br>Young<br>$\text{kN/m}^2$ | Bulk<br>modulus<br>$\text{kN/m}^2$ |
|--------------------------|------|----------------------------|------------|---------------|----------------|---|------------------------------------|------------------------------------|
| 0.0                      | 3.0  | 19.5                       | 0.41       | 256           | 102            | 2.07e+04                                  | 5.81e+04                           | 1.03e+05                           |
| 3.0                      | 6.0  | 19.8                       | 0.47       | 730           | 184            | 6.83e+04                                  | 2.00e+05                           | 9.84e+05                           |
| 6.0                      | 11.0 | 20.                        | 0.49       | 1762          | 286            | 1.67e+05                                  | 4.96e+05                           | 6.11e+06                           |
| 11.0                     | 15.0 | 20.5                       | 0.46       | 1897          | 528            | 5.83e+05                                  | 1.70e+06                           | 6.74e+06                           |
| 15.0                     | 21.0 | 21.0                       | 0.46       | 2700          | 700            | 1.05e+06                                  | 3.07e+06                           | 1.42e+07                           |
| 21.0                     | 25.0 | 21.5                       | 0.47       | 2749          | 624            | 8.53e+05                                  | 2.51e+06                           | 1.54e+07                           |
| 25.0                     | 29.0 | 22.0                       | 0.47       | 2375          | 606            | 8.24e+05                                  | 2.41e+06                           | 1.16e+07                           |
| 29.0                     | 33.0 | 21.5                       | 0.47       | 2368          | 587            | 7.55e+05                                  | 2.22e+06                           | 1.13e+07                           |
| 33.0                     | 36.0 | 22.5                       | 0.47       | 2694          | 645            | 9.54e+05                                  | 2.80e+06                           | 1.54e+07                           |
| 36.0                     | 40.0 | 22.0                       | 0.48       | 2821          | 608            | 8.29e+05                                  | 2.45e+06                           | 1.67e+07                           |



In base alle velocità delle onde di taglio  $V_{sh}$  è stato inoltre possibile fornire il valore delle onde di taglio ed il valore  $V_{s30}$ , a partire dal piano campagna, per la classificazione delle categorie del suolo di fondazione previsto dalla normativa antisismica.

| Litologia        | Spessore<br>m | $V_{sh}$<br>m/sec |
|------------------|---------------|-------------------|
| Limo argilloso   | 3.0           | 102               |
| Limo argilloso   | 3.0           | 184               |
| Argilla limosa   | 5.0           | 286               |
| Argilla limosa   | 4.0           | 528               |
| Roccia marnosa   | 6.0           | 700               |
| Roccia argillosa | 4.0           | 624               |
| Roccia gessosa   | 4.0           | 606               |
| Argilla limosa   | 1.0           | 587               |

Pertanto, per quest'area il valore di Vs30, se riferito al piano campagna, risulta pari a 319 m/s. L'area di indagine rientra nella categoria di suolo di tipo C.

## 6.2. PROVE DI LABORATORIO

Nel presente paragrafo sono state raccolte ed interpretate le prove di laboratorio svolte nelle diverse campagne di indagine eseguite nell'ambito del Lotto 6 dell'opera, alla luce delle unità geotecniche individuate. Nelle Tabelle 6.4 e 6.5 sono raccolte le risultanze delle prove volte a determinare la granulometria, le caratteristiche fisiche e i limiti di Atterberg delle diverse unità, suddivise in base alla zona di prelievo. Per ciascun parametro è stato individuato il valore medio e la corrispondente deviazione standard allo scopo di dare un'indicazione sul livello di dispersione dei dati disponibili. Per quanto concerne le analisi granulometriche sono stati evidenziati (carattere in colore rosso nelle tabelle) ed esclusi dalla valutazione dei valori medi i risultati delle analisi anomale.

Dove possibile è stato determinato l'indice di attività dei terreni coesivi secondo la correlazione di Skempton (1953) che prevede la determinazione di un indice di attività così definito:

$$A = \frac{IP}{CF}$$

dove:

IP     Indice di plasticità;

CF     % in peso con diametro inferiore a 0.002 mm.

In base ai valori di A i terreni coesivi possono essere distinti in:

- inattivi                    A<0.75;
- normalmente attivi    0.75<A<1.25
- attivi                     A>1.25.

Per i campioni in cui l'analisi granulometrica risultava affidabile è stata eseguita una classificazione dei terreni sulla base delle raccomandazioni AGI 1977.

Nelle Tabelle 6.6÷6.9 è riportato l'elenco dei campioni di cui si dispone di risultati di prove di laboratorio con l'indicazione, ove significativo, dei valori medi dei parametri determinati. Non sono disponibili prove di laboratorio riconducibili alle unità 1b, 2, 3, 3a, 3b e 3c.

Tutti i risultati di prova sono stati distinti in base alla zona di prelievo, separando i campioni prelevati nella zona della collina di Verduno, interessata dallo scavo della galleria, da quelli prelevati nella zona di valle del fiume Tanaro, dove il tracciato si sviluppa in superficie.

### **6.2.1. Unità 3 - Depositi alluvionali attuali e medio-recenti**

I campioni disponibili nell'unità 3 sono stati sottoposti alle seguenti prove:

- analisi granulometriche
- determinazione di contenuto d'acqua, densità, peso specifico
- determinazione dei limiti di Atterberg
- determinazione del contenuto di carbonati

Non sono disponibili risultati di prove per la determinazione delle caratteristiche di resistenza.

#### **6.2.1.1. Caratteristiche fisiche**

Per l'unità 3 propriamente detta è disponibile un unico campione, sul quale è stata effettuata l'analisi granulometrica da cui risulta che il terreno è classificabile, secondo la classificazione AGI 1977, come una *sabbia con limo con tracce di ghiaia e argilla*.

Per la sotto-unità 3a sono disponibili 6 campioni, di cui 5 riconducibili alla zona della valle del Tanaro e uno soltanto alla collina di Verduno. L'analisi granulometrica di tutti i campioni porta secondo la classificazione AGI ad una *ghiaia con sabbia con tracce di limo*.



L'analisi granulometrica della sotto-unità 3b, eseguita solo per vagliatura, non consente di distinguere la frazione limosa da quella argillosa e pertanto non è possibile eseguire una classificazione secondo le indicazioni AGI; la frazione sabbiosa è pari al 68% e la frazione fine al 32%. La determinazione dei limiti di Atterberg e delle caratteristiche fisiche è riassunta nella tabella seguente:

| $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $W_n$ (%) | $e_0$ (-) | $W_L$ (%) | $W_P$ (%) | IP (-) |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 18.9                          | 29.5      | 0.83      | 22.2      | 21.3      | 0.9    |

dove:

$\gamma$  peso di volume naturale

$W_n$  contenuto naturale d'acqua

$W_L$  limite liquido secondo la classificazione di Atterberg

$W_P$  limite plastico secondo la classificazione di Atterberg.

L'analisi granulometrica dell'unico campione disponibile nella sotto-unità 3c 3b, eseguita solo per vagliatura, non consente di eseguire una classificazione secondo le indicazioni AGI; in questo caso la frazione fine risulta largamente preponderante (90%). Sono stati registrati i soli valori dei limiti di Atterberg  $W_L$  e  $W_P$  con valori in percentuale rispettivamente di 38.2 e 20.7 da cui deriva un indice di plasticità IP di 17.5.

#### 6.2.2. Unità 4 - coperture

I campioni disponibili nell'unità 4 sono stati sottoposti in laboratorio alle seguenti prove:

- analisi granulometriche;
- determinazione di contenuto d'acqua, densità, peso specifico;
- determinazione dei limiti di Atterberg;
- determinazione del contenuto di carbonati;

- prove di taglio diretto su provini anulari, con determinazione dei parametri di resistenza di picco;
- prova edometrica tipo IL.

I prelievi sono avvenuti tutti nella zona della collina di Verduno.

#### 6.2.2.1. **Caratteristiche fisiche**

I terreni dell'unità 4 possono essere caratterizzati, da un punto di vista fisico, secondo quanto sintetizzato nel seguito:

|                 | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $W_n$<br>(%) | $e_0$<br>(-) | $G_s$<br>(-) | $W_L$<br>(%) | $W_P$<br>(%) | IP<br>(-) | IC<br>(-) | CaCO <sub>3</sub><br>(%) |
|-----------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|--------------------------|
| <i>Max</i>      | 20.2                             | 22.7         | 0.6          | 2.7          | 50.1         | 26.4         | 24.3      | 1.2       | 18.3                     |
| <i>Min</i>      | 19.8                             | 21.8         | 0.6          | 2.7          | 24.1         | 19.1         | 4.9       | 0.5       | 12.4                     |
| <i>Media</i>    | 20.0                             | 22.3         | 0.6          | 2.7          | 39.5         | 23.2         | 16.3      | 0.8       | 15.6                     |
| <i>Dev. St.</i> | 0.3                              | 0.7          | -            | -            | 11.6         | 3.5          | 8.3       | 0.5       | 3.0                      |

con:

$\gamma$  peso di volume naturale;

$e_0$  indice dei vuoti;

$G_s$  peso specifico dei grani;

IP indice di plasticità;

IC indice di consistenza;

CaCO<sub>3</sub> contenuto di carbonati in %.

I dati relativi al peso di volume e il parametro relativo al contenuto d'acqua ( $W_n$ ) risultano poco dispersi. Per contro, i dati relativi ai limiti di Atterberg, e specialmente il limite liquido  $W_L$  e l'indice di plasticità IP derivato, sono caratterizzati da una dispersione significativa. Poco disperso risulta invece il dato relativo alla percentuale di carbonati presenti.

La tabella seguente riassume i risultati delle prove granulometriche effettuate sull'unità 4:

|               | ghiaia (%) | sabbia (%) | limo (%) | argilla (%) |
|---------------|------------|------------|----------|-------------|
| <i>medio</i>  | 0.5        | 4.8        | 70.8     | 24.2        |
| <i>dev.st</i> | 0.6        | 2.7        | 15.4     | 15.7        |

la percentuale limosa è fortemente prevalente, con valori medi prossimi a 70%, l'argilla è anch'essa in quantità rilevanti con una media del 24%, mentre la sabbia risulta presente solo in tracce. Il materiale viene classificato come *limo con argilla o argilloso con tracce di sabbia*, in base alle Raccomandazioni AGI (1977).

#### 6.2.2.2. **Caratteristiche di resistenza**

Sono disponibili due prove di taglio diretto consolidate e drenate su provino anulare eseguite presso i laboratori dei Servizi Geotecnici Liguri su campioni prelevati nel sondaggio SFG21. Le prove, eseguite entrambe su 3 provini, hanno portato alla determinazione dell'angolo di attrito e della coesione di picco. La tabella seguente riporta i risultati della prova:

|                | $\phi'_p$ (°) | $c'_p$ (kPa) |
|----------------|---------------|--------------|
| <i>Prova 1</i> | 33.3          | 14.1         |
| <i>Prova 2</i> | 28.5          | 0.3          |

dove:

$\phi'_p$  angolo di attrito di picco;

$c'_p$  coesione di picco.

L'angolo d'attrito ha un valore medio di circa 31°, mentre il valore della coesione di picco varia tra circa 0 e 14 kPa. Si osserva che il provino più superficiale (6.75 m) ha caratteristiche di resistenza migliori del provino più profondo (11.75

m); ciò potrebbe legato al fatto che il sondaggio SFG21 incontra la formazione 4 entro il corpo di frana presente in corrispondenza dell'imbocco lato Asti e che il campione C4, più profondo, è stato prelevato in corrispondenza della superficie di contatto fra le argille marnose ed i depositi superficiali, presumibilmente in prossimità di una superficie di scorrimento.

La prova edometrica disponibile per l'unità 4 è stata condotta sul campione C2 prelevato a 6.75 m di profondità nel sondaggio SFG21.

Dall'esame del diagramma di prova (Figura 6.17) si nota un tratto di carico pressoché orizzontale sino al raggiungimento del valore di pressione di circa 100 kPa seguito da un tratto di compressione con deformazione verticale massima prossima al 10% per uno stato tensionale verticale di 1600 kPa.

La determinazione del grado di sovraconsolidazione OCR è stata condotta applicando il metodo grafico di Casagrande per determinare il valore della tensione di preconsolidazione  $\sigma'_p$ , applicando successivamente la relazione:

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}}$$

Non essendo disponibile la lettura del livello piezometrico all'interno del sondaggio SFG21 il valore di  $\sigma'_{v0}$  è stato calcolato facendo una duplice ipotesi di superficie di falda al livello di prelievo del campione ( $u=0$ ) e di superficie di falda a piano campagna ( $u=\max$ ). L'elaborazione grafica è riportata in Figura 5.17. e il risultato che ne derivano è riportato nel seguente prospetto:

| Camp. | Prof. (m) | $\sigma'_p$ (kPa) | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $\sigma_v$ (kPa) | $Z_W$ prov. (m) | $Z_W$ p.c. (m) | $\sigma'_{v\text{ prov.}}$ (kPa) | $\sigma'_{v\text{ p.c.}}$ (kPa) | OCR prov. | OCR p.c. |
|-------|-----------|-------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|----------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------|----------|
| C2    | 6.3       | 75.8              | 20.2                          | 126.3            | 0.0             | 6.3            | 126.3                            | 65.0                            | 0.6       | 1.2      |

dove:

$\gamma$  peso di volume naturale;

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| $\sigma'_p$                 | tensione di preconsolidazione;   |
| $\sigma_v$                  | tensione verticale totale alla quota di prelievo del campione;                               |
| $Z_{W \text{ prov.}}$       | quota di falda supposta coincidente con la quota di prelievo del campione;                   |
| $Z_{W \text{ p.c.}}$        | quota di falda supposta coincidente con il piano campagna;                                   |
| $\sigma'_{v \text{ prov.}}$ | tensione verticale efficace alla quota del campione supponendo di avere $u=0$ ;              |
| $\sigma'_{v \text{ p.c.}}$  | tensione verticale efficace alla quota del campione supponendo di la falda a piano campagna; |
| $OCR_{\text{ prov.}}$       | valore del grado di sovraconsolidazione nell'ipotesi di falda alla quota del campionamento;  |
| $OCR_{\text{ p.c.}}$        | valore del grado di sovraconsolidazione nell'ipotesi di falda a piano campagna.              |

Il valore di OCR varia a seconda dell'ipotesi della posizione di falda da 0.6 a 1.2 mantenendosi comunque nell'ambito dei valori di terreno normalconsolidato.

La galleria interessa in corrispondenza dell'imbocco lato Asti la formazione 4 con coperture che variano dai 10 ai 20 m. A queste profondità si ha uno stato tensionale variabile fra i 200 e i 400 kPa a cui corrisponde una variazione del modulo edometrico fra 6.15 e 11.98 MPa.

### 6.2.3. Unità 5 - limi sabbiosi sovrapposti all'unità gessosa

Sono disponibili 7 campioni indisturbati e 4 campioni rimaneggiati; 5 campioni sono stati prelevati nella zona della collina di Verduno, mentre i restanti 6 nella valle del Tanaro. I campioni sono stati sottoposti ai seguenti tipi di prove:

- analisi granulometriche;
- determinazione di contenuto d'acqua, densità, peso specifico;
- determinazione dei limiti di Atterberg;
- determinazione del contenuto di carbonati;
- prove di taglio diretto su provini anulari, con determinazione dei parametri di resistenza di picco;

- prova edometrica tipo IL.

I risultati delle prove di laboratorio sono riportate nelle Tabelle 6.6÷6.9.

### 6.2.3.1. *Caratteristiche fisiche*

I terreni dell'unità 5 possono essere caratterizzati, da un punto di vista fisico, secondo quanto sintetizzato nel seguito:

| <b>Collina di Verduno</b> |                                  |              |              |              |              |              |           |           |          |                          |
|---------------------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|----------|--------------------------|
|                           | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $W_n$<br>(%) | $e_0$<br>(-) | $G_s$<br>(-) | $W_L$<br>(%) | $W_P$<br>(%) | IP<br>(-) | IC<br>(-) | A<br>(-) | CaCO <sub>3</sub><br>(%) |
| <i>Max</i>                | 19.9                             | 25.7         | 0.8          | 2.7          | 41.9         | 26.0         | 11.1      | 1.5       | 1.6      | 26.3                     |
| <i>Min</i>                | 18.5                             | 17.2         | 0.7          | 2.7          | 33.4         | 21.5         | 8.7       | 1.2       | 0.9      | 13.9                     |
| <i>Media</i>              | 19.5                             | 22.7         | 0.7          | 2.7          | 38.7         | 24.0         | 9.9       | 1.3       | 1.3      | 17.5                     |
| <i>Dev. St.</i>           | 0.6                              | 3.2          | 0.1          | -            | 4.3          | 2.0          | 1.7       | 0.2       | 0.5      | 5.0                      |

| <b>Valle del Tanaro</b> |                                  |              |              |              |              |              |           |           |          |                          |
|-------------------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|----------|--------------------------|
|                         | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $W_n$<br>(%) | $e_0$<br>(-) | $G_s$<br>(-) | $W_L$<br>(%) | $W_P$<br>(%) | IP<br>(-) | IC<br>(-) | A<br>(-) | CaCO <sub>3</sub><br>(%) |
| <i>Max</i>              | -                                | 20.1         | -            | 2.7          | 57.6         | 30.9         | 26.7      | 1.4       | 1.0      | 20.2                     |
| <i>Min</i>              | -                                | 17.9         | -            | 2.7          | 35.3         | 21.9         | 13.4      | 1.2       | 0.4      | 11.6                     |
| <i>media</i>            | -                                | 19.0         | -            | -            | 47.3         | 26.1         | 21.3      | 1.3       | 0.8      | 12.2                     |
| <i>Dev. St.</i>         | -                                | 1.6          | -            | -            | 9.3          | 3.5          | 5.9       | 0.1       | 0.3      | 0.9                      |

con:

A indice di attività dei materiali argillosi secondo Skempton (1953).

I dati relativi ai campioni prelevati nella collina di Verduno risultano completi e nell'insieme poco dispersi. Il massimo valore di dispersione si registra nell'ambito dei limiti di Atterberg per il limite liquido  $W_L$  e nella valutazione della percentuale di carbonato di calcio. Il valore del parametro di attività A è ricavabile su soltanto due campioni e corrisponde ad un materiale attivo.

I dati relativi ai campioni prelevati nella valle del Tanaro risultano incompleti per quanto riguarda le caratteristiche fisiche del materiale. I dati relativi ai limiti di Atterberg sono invece completi ma presentano dispersioni marcate per  $W_L$  e  $IP$ . Il contenuto di carbonati è mediamente pari a 12% con una dispersione contenuta, mentre il valore medio dell'indice di attività di Skempton porta ad un valore di materiale *normalmente attivo*.

La tabella seguente riassume i risultati delle prove granulometriche effettuate sull'unità 5:

| Collina di Verduno |            |            |          |             |
|--------------------|------------|------------|----------|-------------|
|                    | ghiaia (%) | sabbia (%) | limo (%) | argilla (%) |
| <i>media</i>       | 0          | 8          | 76       | 16          |
| <i>dev.st</i>      | 1          | 8          | 12       | 10          |

| Valle del Tanaro |            |            |          |             |
|------------------|------------|------------|----------|-------------|
|                  | ghiaia (%) | sabbia (%) | limo (%) | argilla (%) |
| <i>media</i>     | 0          | 2          | 69       | 30          |
| <i>dev.st</i>    | 0          | 2          | 10       | 9           |

Si nota come per la collina di Verduno la frazione limosa prevalente sia accompagnata in maniera significativa sia da sabbia che da argilla, mentre, per la zona della valle del Tanaro la frazione sabbiosa si riduce per lasciar spazio ad una più marcata presenza di argilla. Secondo la classificazione AGI, fatta sui valori medi per la collina di Verduno, si è in presenza di *limi argillosi debolmente sabbiosi*, mentre, per la valle del fiume Tanaro, di *limi con argilla con tracce di sabbia*.

### 6.2.3.2. Caratteristiche di resistenza

Sono disponibili due prove di taglio diretto consolidate e drenate su provino anulare e due prove edometriche a gradini di carico eseguite presso i laboratori dei Servizi Geotecnici Liguri.

Le prove di taglio diretto, eseguite entrambe su 3 provini ricavati rispettivamente dal campione C1 prelevato alla profondità di 3.25 m nel sondaggio SFG24, e dal campione C1 prelevato alla profondità di 10.75 m nell'ambito del sondaggio SFG09. Esse hanno portato alla determinazione dei parametri di resistenza di picco in termini di angolo di attrito e di coesione. La tabella seguente riassume per intero i risultati della prova:

|                | $\phi'_P$<br>(°) | $c'_P$<br>(kPa) |
|----------------|------------------|-----------------|
| <i>Prova 1</i> | 26.4             | 13.1            |
| <i>Prova 2</i> | 28.3             | 4.7             |

L'angolo d'attrito risulta poco variabile fra le due prove con un valore medio di circa 27° e la coesione varia fra circa 5 kPa e 13 kPa con un valore medio collocabile attorno ai 10 kPa.

Le prove edometriche disponibili per l'unità 5 sono state condotte su campioni prelevati dai sondaggi SFG09 e SFG25 entrambi verso l'imbocco Cherasco nella zona di collina. Per il campione C1 dell'SFG09 la profondità di prelievo è di 10.9 m mentre per il campione C1 dell'SFG25 la profondità è di 4.8 m.

Analizzando i diagrammi delle prove riportate nelle Figure 6.16 e 6.18, eseguite entrambe nei laboratori dei Servizi Geotecnici Liguri, si nota come sia perfettamente distinguibile il tratto di ricarico della prova rispetto a quello di carico e pertanto con il metodo di Casagrande è stato possibile determinare il valore di  $\sigma'_p$  in modo agevole. La tabella seguente riassume i valori di OCR ottenuti; il materiale si presenta come normalconsolidato.

| Camp. | Prof.<br>(m) | $\sigma'_p$<br>(kPa) | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\sigma_{v0}$<br>(kPa) | $z_w$<br>(m) | $\sigma'_v$<br>(kPa) | OCR<br>(-) |
|-------|--------------|----------------------|----------------------------------|------------------------|--------------|----------------------|------------|
| C1    | 4.8          | 111.9                | 18.5                             | 88.1                   | -12.9        | 88.1                 | 1.3        |



|    |      |       |      |       |       |       |     |
|----|------|-------|------|-------|-------|-------|-----|
| C1 | 10.8 | 110.3 | 19.6 | 210.9 | -11.4 | 210.9 | 0.5 |
|----|------|-------|------|-------|-------|-------|-----|

Analizzando i diagrammi delle Figure 6.16 e 6.18 si leggono deformazioni di 13.3% e di 15.7%, per una tensione verticale massima di 1600 kPa, rispettivamente per il campione dell'SFG25 e per quello dell'SFG09.

In corrispondenza dell'imbocco lato Cherasco la galleria interessa l'unità 5 con coperture massime intorno ai 6÷10 m a cui corrisponde uno stato tensionale verticale variabile fra 100 e 200 kPa circa; in tale ambito il modulo edometrico ricavabile dalle prove eseguite varia tra i 3 e 6 MPa.

#### 6.2.4. Unità 6 - Gessi

Nella formazione gessoso-solfifera sono stati prelevati e analizzati 16 provini rimaneggiati e 11 provini indisturbati per un totale di 27 campionamenti lungo tutto lo sviluppo del lotto 6. I campionamenti prelevati nel tratto interessato dallo scavo della galleria sono 16, mentre sono 11 quelli nel tratto più superficiale (Tabella 6.5).

I campioni sono stati sottoposti ai seguenti tipi di prove:

- analisi granulometriche;
- determinazione di contenuto d'acqua, densità, peso specifico;
- determinazione dei limiti di Atterberg;
- determinazione del contenuto di carbonati;
- prove di taglio diretto su provini anulari, con determinazione dei parametri di resistenza di picco;
- prova di compressione triassiale non consolidata non drenata (Tx - UU);
- prova edometrica tipo IL.

I risultati delle prove di laboratorio sono riportate nelle Tabelle 6.6÷6.9 .

##### 6.2.4.1. Caratteristiche fisiche



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6  
PROGETTO ESECUTIVO  
Galleria Verduno - Relazione geotecnica

Nel seguente prospetto vengono riportati i valori massimi, minimi e medi e le deviazioni standard delle caratteristiche fisiche derivate dalle prove di laboratorio:

| Collina di Verduno |                                  |              |              |              |              |              |           |           |          |                          |
|--------------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|----------|--------------------------|
|                    | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $W_n$<br>(%) | $e_0$<br>(-) | $G_s$<br>(-) | $W_L$<br>(%) | $W_P$<br>(%) | IP<br>(-) | IC<br>(-) | A<br>(-) | CaCO <sub>3</sub><br>(%) |
| Max                | 20.1                             | 27.2         | 0.7          | 2.7          | 72.1         | 52.2         | 25.3      | 1.8       | 2.2      | 48.1                     |
| Min                | 19.0                             | 15.0         | 0.5          | 2.6          | 35.4         | 20.6         | 10.7      | 0.9       | 0.5      | 1.9                      |
| Media              | 19.7                             | 22.3         | 0.6          | 2.7          | 48.8         | 29.1         | 19.4      | 1.4       | 1.1      | 16.6                     |
| Dev. St.           | 0.5                              | 4.5          | 0.1          | 0.1          | 9.1          | 7.2          | 3.9       | 0.4       | 0.5      | 12.8                     |

| Valle del Tanaro |                                  |              |              |              |              |              |           |           |          |                          |
|------------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|----------|--------------------------|
|                  | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $W_n$<br>(%) | $e_0$<br>(-) | $G_s$<br>(-) | $W_L$<br>(%) | $W_P$<br>(%) | IP<br>(-) | IC<br>(-) | A<br>(-) | CaCO <sub>3</sub><br>(%) |
| Max              | 21.0                             | 26.3         | 0.7          | -            | 64.5         | 42.2         | 24.6      | -         | 4.2      | 3.7                      |
| Min              | 21.0                             | 11.7         | 0.5          | -            | 33.6         | 22.8         | 10.8      | -         | 3.0      | 3.7                      |
| Media            | 21.0                             | 19.5         | 0.6          | -            | 43.6         | 27.0         | 16.5      | -         | 3.6      | 3.7                      |
| Dev. St.         | -                                | 5.5          | 0.1          | -            | 9.8          | 5.8          | 5.2       | -         | 0.8      | -                        |

I campioni analizzati nella zona della collina di Verduno presentano valori praticamente costanti  $\gamma$ ,  $e_0$ , e  $G_s$ , mentre i valori di  $W_n$  risultano più dispersi. I limiti di Atterberg sono piuttosto dispersi. Il valore medio dell'indice di plasticità attorno a 19, con un valore di deviazione standard di circa 4, porta a ipotizzare per la frazione argillosa dell'unità 6 un comportamento da *plastico* a *poco plastico*. Facendo una valutazione sul valore medio del parametro A di Skempton il materiale si presenta come *normalmente attivo*. I valori delle percentuali di carbonati risultano estremamente dispersi con valori che variano da 2% a 48% il che può indicare che il materiale fine presente nella matrice del materiale si può presentare sia come argilla vera e propria (% di CaCO<sub>3</sub> < 35%), argille marnosa (% di CaCO<sub>3</sub> 35% < CaCO<sub>3</sub> < 50%), sia come marna vera e propria (% di CaCO<sub>3</sub> > 35%).

I valori relativi ai campioni prelevati nella valle del Tanaro risultano molto più frammentari con ad esempio un'unica determinazione di  $\gamma$ , e 5 determinazioni su 11 campioni di  $e_0$  e di  $W_n$ . I valori di indice dei vuoti e di contenuto di acqua naturale riportati risultano poco dispersi. I limiti di Atterberg non risultano molto dispersi e il materiale si presenta mediamente come *normalmente attivo* sulla base della classificazione di Skempton. Anche in questo caso il comportamento della frazione argillosa risulta poco plastico. Il contenuto di carbonati in questa parte di campioni non è stato determinato se non in un caso in cui la percentuale risulta molto bassa (3.7 %), pertanto non è possibile esprimere valutazioni sulla natura marnosa o argillosa del materiale.

I risultati delle analisi granulometriche sono raccolte nelle tabelle seguenti:

|               | <b>Collina di Verduno</b> |                       |                     |                        |
|---------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|
|               | <b>ghiaia<br/>(%)</b>     | <b>sabbia<br/>(%)</b> | <b>limo<br/>(%)</b> | <b>argilla<br/>(%)</b> |
| <i>Max</i>    | 91                        | 37                    | 80                  | 34                     |
| <i>Min</i>    | 0                         | 1                     | 4                   | 0                      |
| <i>Media</i>  | 11                        | 11                    | 59                  | 18                     |
| <i>Dev.st</i> | 24                        | 11                    | 19                  | 11                     |

|               | <b>Valle del Tanaro</b> |                       |                     |                        |
|---------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|
|               | <b>ghiaia<br/>(%)</b>   | <b>sabbia<br/>(%)</b> | <b>limo<br/>(%)</b> | <b>argilla<br/>(%)</b> |
| <i>Max</i>    | 0                       | 15                    | 92                  | 5                      |
| <i>Min</i>    | 0                       | 3                     | 80                  | 5                      |
| <i>Media</i>  | 0                       | 9                     | 86                  | 5                      |
| <i>Dev.st</i> | 0                       | 9                     | 8                   | 0                      |

Nella collina di Verduno la formazione 6 presenta apparentemente una forte eterogeneità in quanto mediamente sono presenti percentuali considerevoli di tutte le 4 frazioni. In realtà, analizzando più in dettaglio la Tabella 6.5, si nota che la frazione ghiaiosa compare soltanto in corrispondenza di sondaggi come l'SFG03, l'SFG05 e l'SPE2609 che hanno attraversato cavità di natura carsica, di cui probabilmente queste frazioni ghiaiose costituiscono il riempimento.

Escludendo tali valori granulometrici “anomali” i restanti valori presentano dispersioni inferiori permettendo di classificare il materiale come *limo argilloso con tracce di sabbia* (AGI 1977).

Per l'analisi granulometrica dei campioni prelevati nella zona della valle del Tanaro va sottolineata la non completezza dei dati di 9 prove riportati (non viene fatta una distinzione di percentuale fra le frazioni argillose e le frazioni limose) su 11 presenti. Gli unici campioni descrivibili secondo le raccomandazioni AGI (1977) sono ascrivibili ai sondaggi SPE2607 e SPE2608. Basandosi su questi risultati la formazione è classificabile come un *limo sabbioso debolmente argilloso*. Nei rimanenti campioni la frazione fine rimane comunque ampiamente preponderante.

#### 6.2.4.2. **Caratteristiche di resistenza**

Per determinare i parametri di resistenza che caratterizzano l'unità 6 si dispone di un'unica prova triassiale non consolidata e non drenata eseguita nella zona della collina di Verduno entro il sondaggio SFG16 alla profondità di 6 m (la galleria in questa zona è posta circa 55 m al di sotto di tale quota entro l'unità 7). Inoltre si dispone di 5 prove di taglio diretto su provino anulare realizzate nella zona della valle del Tanaro, e di 6 prove edometriche a gradini di carico eseguite anch'esse per la più parte nella valle del Tanaro.

La prova triassiale è stata eseguita nei laboratori dei Servizi Geotecnici Liguri su due soli provini con pressioni in cella piuttosto contenute e rispettivamente di 100 e 150 kPa. I risultati di prova sono raccolti per intero nella tabella seguente:

|           | Collina di Verduno  |                       |                                  |                   |                       |
|-----------|---------------------|-----------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------------|
|           | $\sigma_1$<br>(kPa) | $V_{def}$<br>(mm/min) | $(\sigma_1 - \sigma_3)$<br>(kPa) | $\epsilon$<br>(%) | $\tau_{max}$<br>(kPa) |
| Provino 1 | 100                 | 0.50                  | 445                              | 12.47             | 222.5                 |
| Provino 2 | 150                 | 0.50                  | 471                              | 13.12             | 235.5                 |

con:

- $\sigma_1$  tensione principale massima (verticale);  
 $\sigma_1 - \sigma_3$  sforzo deviatorico a rottura;  
 $V_{def.}$  velocità di deformazione mantenuta nel corso della prova;  
 $\varepsilon$  deformazione;  
 $\tau_{max}$  tensione tangenziale massima a rottura.

In base a tale prova si ricava un valore medio di  $C_u$  pari a 229 kPa.

Le prove di taglio diretto sono state eseguite tutte su 3 provini presso il laboratorio Tecno-Piemonte, tranne una che è stata eseguita presso il laboratorio GEOTER e su 2 soli provini. I risultati ottenuti sono raccolti nella tabella seguente:

| Valle del Tanaro |                  |                 |
|------------------|------------------|-----------------|
| Laboratorio      | $\phi'_P$<br>(°) | $C'_P$<br>(kPa) |
| GEOTER           | 29.25            | 36.0            |
| Tecno-Piemonte   | 21.6             | 46.0            |
| Tecno-Piemonte   | 18.1             | 22.7            |
| Tecno-Piemonte   | 27.8             | 45.7            |
| Tecno-Piemonte   | 20.7             | 34.3            |

Dall'analisi dei dati si ricava un angolo di attrito di picco medio di 23.5° ed una coesione di picco media di 37.0 kPa (Tabella 6.7)

L'unica prova edometrica disponibile per l'unità 6 nell'ambito della collina di Verduno è stata eseguita presso i laboratori dei Servizi Geotecnici Liguri su un campione prelevato entro il sondaggio SFG24 situato nella vicinanze dell'imbocco lato Cherasco. Le restanti prove sono state eseguite nei laboratori della Tecno-Piemonte su campioni prelevati entro la valle del Tanaro.

In Figura 6.17 analizzando il diagramma della prova eseguita sul campione del sondaggio SFG24, si nota come sia perfettamente distinguibile il tratto di

ricarico della prova rispetto a quello di carico e pertanto con il metodo di Casagrande è stato possibile determinare il valore di  $\sigma'_p$  in modo agevole.

Analizzando invece la Figura 6.19 si può notare, per i due campioni del sondaggio SPD26-04, come sia difficilmente distinguibile il tratto di “ricarico” da quello di “carico” nella prova. Poiché sin dalle prime fasi di prova, anche per tensioni inferiori alle tensioni verticali geostatiche originarie, sono presenti grandi deformazione, si ritiene che in fase di campionamento sia stato indotto un disturbo con la conseguente perdita di rappresentatività delle prove.

Le restanti 3 prove condotte dalla Tecno-Piemonte non presentano un comportamento simile. Anche per i sondaggi SPD26-04 ÷ SPD26-06 non risulta disponibile un valore di lettura piezometrica per determinare la posizione della falda e pertanto si è fatta la duplice ipotesi di falda al livello del campionamento e di falda a piano campagna. La tabella seguente riassume i risultati delle prove:

| Collina di Verduno |           |                   |                               |                  |           |                   |     |
|--------------------|-----------|-------------------|-------------------------------|------------------|-----------|-------------------|-----|
| Sond.              | Prof. (m) | $\sigma'_p$ (kPa) | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $\sigma_v$ (kPa) | $z_w$ (m) | $\sigma'_v$ (kPa) | OCR |
| SFG24              | 23.5      | 420.7             | 19.8                          | 465.7            | 14.2      | 326.0             | 1.3 |
|                    |           |                   |                               |                  |           |                   |     |

| Valle del Tanaro |           |                   |                               |                  |                 |                |                         |                        |           |          |  |
|------------------|-----------|-------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------|------------------------|-----------|----------|--|
| Sond.            | Prof. (m) | $\sigma'_p$ (kPa) | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $\sigma_v$ (kPa) | $z_w$ prov. (m) | $z_w$ p.c. (m) | $\sigma'_v$ prov. (kPa) | $\sigma'_v$ p.c. (kPa) | OCR prov. | OCR p.c. |  |
| SPD26 - 05       | 10.2      | 226.5             | 21.0                          | 213.1            | 0.0             | 10.2           | 213.1                   | 113.5                  | 1.1       | 2.0      |  |
| SPD26 - 06       | 15.1      | 73.4              | 17.0                          | 257.2            | 0.0             | 15.1           | 257.2                   | 109.0                  | 0.3       | 0.7      |  |
| SPD26 - 06       | 25.3      | 117.5             | 15.6                          | 395.1            | 0.0             | 25.3           | 395.1                   | 147.4                  | 0.3       | 0.8      |  |

Si può ipotizzare un lieve grado di sovraconsolidazione nei primi metri di profondità, mentre al di sotto dei 15 m il terreno è normalconsolidato (Figura 6.25).

Le coperture con cui la galleria attraversa la formazione 6 vanno dai 4-5 m, del tratto iniziale lato Cherasco, ai circa 45 m del tratto in corrispondenza del sondaggio SFG08. A tale range di coperture corrispondono stati tensionali

variabili da 100 kPa per i tratti iniziali a 900 kPa per il tratto a massima copertura. Considerando la prova sul campione del sondaggio SFG24, il modulo edometrico è pari a circa 17 MPa per le coperture minori e a circa 25 MPa per le coperture maggiori. Considerando invece i campioni dei sondaggi della zona della valle del Tanaro i valori medi del modulo edometrico per le due classi di copertura sono 9 MPa e 26 MPa, in buon accordo con i valori risultanti per la zona di collina.

Allo scopo di indagare l'eventuale comportamento rigonfiante dell'unità 6 sono state eseguite 4 prove di rigonfiamento impedito in edometro i cui risultati sono riportati nella tabella seguente.

| <b>Valle del Tanaro</b> |                 |                      |
|-------------------------|-----------------|----------------------|
| <b>Sondaggio</b>        | <b>Campione</b> | <b>ISP<br/>(kPa)</b> |
| SPD2604                 | 1               | 63                   |
| SPD2604                 | 2               | 100                  |
| SPD2606                 | 1               | 25                   |
| SPD2606                 | 2               | 125                  |

Le prove, eseguite su campioni provenienti dalla valle del Tanaro, presentano valori della pressione di rigonfiamento ISP non elevati, con valore massimo di 125 kPa.

#### **6.2.5. Unità 7 - Argille marnose**

Si dispone di 71 campioni (18 campioni rimaneggiati e 53 campioni indisturbati) rappresentativi dell'unità 7, dei quali 39 sono stati prelevati da sondaggi eseguiti nella zona della collina di Verduno mentre 32 sono riconducibili alla zona della valle del Tanaro.

I dati a disposizione, raccolti nelle T Tabelle 6.6÷6.9 , derivano dalle seguenti determinazioni:

- contenuto naturale d'acqua
- pesi di volume totale
- peso specifico dei grani
- limiti di Atterberg
- analisi granulometrica (per vagliatura e per sedimentazione)
- analisi diffrattometrica su campione in polvere tal quale con definizione del diffrattogramma
- analisi diffrattometrica sulla frazione fine (argillosa) del campione in polvere in soluzione glicolata per la determinazione dei minerali argillosi rigonfianti
- determinazione del contenuto di carbonati
- prova di compressione triassiale consolidata non drenata con misura delle pressioni neutre (TX-CIU)
- prove di taglio diretto consolidate drenate (DS)
- prove edometriche II per gradini di carico
- determinazione della deformazione di rigonfiamento su campione indisturbato.

#### **6.2.5.1. Caratteristiche fisiche**

Nel seguente prospetto vengono riportati i valori massimi, minimi e medi e le deviazioni standard delle caratteristiche fisiche derivate dalle prove di laboratorio:

| <b>Collina di Verduno</b> |       |       |       |       |       |    |    |   |                   |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----|----|---|-------------------|
| $\gamma$                  | $W_n$ | $e_0$ | $G_s$ | $W_L$ | $W_P$ | IP | IC | A | CaCO <sub>3</sub> |



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6  
PROGETTO ESECUTIVO  
Galleria Verduno - Relazione geotecnica

|          | (kN/m <sup>3</sup> ) | (%)  | (-) | (-) | (%)  | (%)  | (-)  | (-) | (-) | (%)  |
|----------|----------------------|------|-----|-----|------|------|------|-----|-----|------|
| Max      | 21.6                 | 29.3 | 0.6 | 2.8 | 54.8 | 52.8 | 24.3 | 1.6 | 1.3 | 50.8 |
| Min      | 19.3                 | 15.1 | 0.5 | 2.7 | 20.3 | 16.4 | 1.9  | 0.7 | 0.1 | 8.4  |
| media    | 20.7                 | 19.6 | 0.5 | 2.7 | 42.7 | 25.0 | 17.7 | 1.3 | 0.7 | 22.2 |
| Dev. St. | 0.6                  | 3.0  | 0.1 | 0.0 | 6.4  | 5.4  | 5.1  | 0.2 | 0.3 | 8.2  |

| Valle del Tanaro |                                  |              |              |              |              |              |           |           |          |                          |
|------------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|----------|--------------------------|
|                  | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $W_n$<br>(%) | $e_0$<br>(-) | $G_s$<br>(-) | $W_L$<br>(%) | $W_P$<br>(%) | IP<br>(-) | IC<br>(-) | A<br>(-) | CaCO <sub>3</sub><br>(%) |
| Max              | 21.7                             | 26.5         | 0.7          | 2.8          | 75.2         | 27.9         | 56.4      | 1.5       | 1.7      | 31.1                     |
| Min              | 19.1                             | 15.0         | 0.4          | 2.7          | 35.0         | 16.4         | 11.1      | 0.9       | 0.5      | 7.0                      |
| Media            | 20.8                             | 19.3         | 0.6          | 2.7          | 47.1         | 22.5         | 24.6      | 1.1       | 1.0      | 25.6                     |
| Dev. St.         | 0.8                              | 2.8          | 0.1          | 0.0          | 8.5          | 3.3          | 10.3      | 0.2       | 0.3      | 5.9                      |

Per la zona di collina i dati soggetti alla maggior dispersione sono quelli relativi ai limiti di Atterberg e in particolare il limite liquido  $W_L$ . Il valore medio di IP è prossimo a 18, con un valore di deviazione standard di circa 5; ciò porta a ipotizzare un comportamento del materiale da *poco plastico* a francamente *plastico*. L'indice di attività secondo Skempton si mantiene generalmente basso, riconducendo secondo la classificazione ad un *materiale inattivo*. Il valore medio della percentuale in carbonati è relativamente basso ed intorno al 20%, ma si nota che gli estremi di circa 8% e di circa 50% indicano una variabilità all'interno dell'unità 7 con presenza di frazioni eminentemente argillose alternate a porzioni marcatamente marnose (valori di CaCO<sub>3</sub> attorno al 50%).

Anche i risultati relativi ai campioni della zona della valle del Tanaro non presentano un'elevata dispersione, tranne che per i limiti di Atterberg con limite liquido  $W_L$  e indice di plasticità IP che presentano valori di deviazione standard rispettivamente di 8.5 e 10 rispetto a valori medi di circa 47 e 25. Il comportamento del materiale è ipotizzabile come mediamente *plastico* con un indice di attività medio di 1 che corrisponde ad un materiale *normalmente attivo*. La percentuale di CaCO<sub>3</sub>, la cui determinazione è stata effettuata soltanto su 15

dei 32 campioni disponibili, è compresa tra circa 7% e 30% e permette di classificare il terreno più come una argilla marnosa piuttosto che come una marna vera e propria.

Nelle Figure 6.28 e 6.29 sono riportate le carte di attività secondo Skempton per i materiali della valle del Tanaro e per quelli della collina di Verduno.

I risultati delle analisi granulometriche sono raccolte nelle tabelle seguenti:

|        | Collina di Verduno |            |          |             |
|--------|--------------------|------------|----------|-------------|
|        | ghiaia (%)         | sabbia (%) | limo (%) | argilla (%) |
| Max    | 2                  | 29         | 83       | 46          |
| Min    | 0                  | 0          | 38       | 14          |
| Media  | 0                  | 8          | 64       | 29          |
| Dev.st | 0                  | 9          | 12       | 9           |

|        | Valle del Tanaro |            |          |             |
|--------|------------------|------------|----------|-------------|
|        | ghiaia (%)       | sabbia (%) | limo (%) | argilla (%) |
| Max    | 0                | 7          | 79       | 42          |
| Min    | 0                | 1          | 56       | 20          |
| Media  | 0                | 2          | 68       | 31          |
| Dev.st | 0                | 2          | 7        | 7           |

La frazione preponderante rimane la frazione limosa con punte dell'83%. Mediamente il materiale può essere definito come *limo con argilla debolmente sabbioso* secondo le definizioni AGI (1977). Non sono presenti frazioni ghiaiose.

Per la zona della valle del Tanaro è da sottolineare che su 32 prove eseguite 17 sono state effettuate solo per setacciatura e quindi non hanno permesso la distinzione fra le frazioni fini argillose e quelle limose. Considerando le sole prove complete si giunge ad una classificazione del materiale basata sui valori medi come *limo con argilla con tracce di sabbia*.

In ultimo, vengono esaminati i risultati delle prove diffrattometriche. Oltre ai dati disponibili relativi ai sondaggi SPE26-24, SPE26-02 e SPE25-01, e quindi

relativi a zone distanti dalla galleria Verduno o addirittura comprese entro il lotto 5 dell'opera (galleria Alba), sono disponibili i risultati di una estesa campagna di prove di analisi mineralogica mediante diffrattometria a raggi X svolte, nell'ambito dell'indagine per il progetto esecutivo del 2001, presso i Laboratori del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pavia e presso il laboratorio di geotecnica ALTAIR s.a.s. di Cinisello Balsamo. L'elenco completo dei risultati di prova è raccolto nell'elaborato di progetto "B.1.1.2. - Caratterizzazione geologico-tecnica dell'area di progetto". La campagna di indagine era mirata a determinare:

- Composizione mineralogica dei gessi per accertare l'assenza di anidride
- Composizione dei minerali argillosi presenti nelle unità argilloso marnose.

Da quanto emerge dallo studio effettuato i costituenti principali dei terreni esaminati sono:

- Calcite: quasi sempre presente con percentuali superiori al 10% e in alcuni casi raggiunge il 40%;
- Clorite: spesso presente con contenuti superiori al 20%;
- Dolomite: in genere presente con percentuali inferiori al 10%, ma in alcuni casi è minerale predominante;
- Feldspato: presente, ma tranne in rari casi in percentuali inferiori al 10%;
- Gesso: presente come materiale predominante nella zona verso l'imbocco lato Cuneo con percentuali superiori al 20%, mentre risulta molto scarso nelle altre zone con percentuali inferiori al 2%;
- Quarzo: contenuti variabili fra 5 e 15%;
- Mica: presente con contenuti fra 15 e 20%;
- Smectite: vengono inclusi in questo termine tutti i minerali argillosi potenzialmente rigonfianti; sono state riscontrate presenze di illite e caolinite con tracce di montmorillonite. Le percentuali massime di minerali rigonfianti raggiungono il 16% entro i sondaggi SFG8 e SFG14 e quindi nella zona dell'imbocco lato Cuneo entro la formazione gessoso-solfifera al di sopra

della galleria. Nelle restanti parti del tracciato le percentuali si mantengono più basse e generalmente al di sotto del 10%.

In conclusione, sulla base delle analisi mineralogiche e delle determinazioni di laboratorio, emerge un basso potenziale rigonfiante per i materiali incontrabili nella fase di scavo della galleria.

### **6.2.5.2. Caratteristiche di resistenza e deformabilità**

Per determinare i parametri di resistenza che caratterizzano l'unità 7 si dispone di 3 prove triassiali di compressione, del tipo consolidate non drenate, di 22 prove di taglio diretto del tipo consolidate drenate, tutte condotte soltanto sino alla determinazione dei parametri di resistenza di picco, di 12 prove di compressione triassiale di tipo non consolidata e non drenata e infine di 4 prove di compressione triassiale di tipo consolidata isotropicamente e drenata.

Nel seguente prospetto si riportano i risultati delle interpretazioni delle singole prove, così come forniti dai certificati di laboratorio:

|                     | <b>DS</b>              |              |                     |              |
|---------------------|------------------------|--------------|---------------------|--------------|
|                     | <b>Collina Verduno</b> |              | <b>Valle Tanaro</b> |              |
|                     | $\phi'_p$ (°)          | $c'_p$ (kPa) | $\phi'_p$ (°)       | $c'_p$ (kPa) |
| <i>Max</i>          | 55.1                   | 242.8        | 40.9                | 250.8        |
| <i>Min</i>          | 18.0                   | 2.8          | 12.0                | 0.0          |
| <i>Media</i>        | 31.8                   | 100.3        | 28.0                | 73.3         |
| <i>Dev.standard</i> | 11.0                   | 89.6         | 7.7                 | 74.8         |

|                      | <b>TX-CIU</b>             |             |            |
|----------------------|---------------------------|-------------|------------|
|                      | <b>Collina di Verduno</b> |             |            |
|                      | <b>Sondaggio</b>          | $\phi'$ (°) | $c'$ (kPa) |
| <i>SPE26-02 - C4</i> | 37.0                      | 17.9        | 715.0      |
| <i>SIV2 - Ci4</i>    | 30.9                      | 20.1        | 807.5      |
| <i>SIV2 - Ci5</i>    | 30.4                      | 20.1        | 826.0      |
|                      |                           |             |            |



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6  
PROGETTO ESECUTIVO  
Galleria Verduno - Relazione geotecnica

|                     |       |       |        |
|---------------------|-------|-------|--------|
| <i>Media</i>        | 32.77 | 19.37 | 782.83 |
| <i>Dev.standard</i> | 3.67  | 1.27  | 59.47  |

| TX - CID            |             |          |
|---------------------|-------------|----------|
| Collina di Verduno  |             |          |
|                     | $\phi'$ (°) | c' (kPa) |
| <i>Max</i>          | 38.1        | 158.1    |
| <i>Min</i>          | 13.9        | 21.2     |
| <i>Media</i>        | 24.8        | 94.3     |
| <i>Dev.standard</i> | 12.3        | 69.0     |

con:

- $\phi'$             angolo di attrito drenato;  
c'              coesione drenata del materiale;  
 $C_{u, med}$        resistenza al taglio non drenata.

Le prove di taglio diretto sui campioni della collina di Verduno indicano che, l'angolo d'attrito di picco ha un valore medio attorno a 30°, il che potrebbe portare a considerare un intervallo di variabilità per il parametro da 25 a 35°; i valori della coesione di picco invece appaiono così dispersi da rendere solo indicativo il valore medio di 100 kPa risultante dalle prove.

Le prove triassiali CIU, realizzata nei laboratori ALTAIR e G.E.T., forniscono un valore medio di  $\phi'$  di circa 33° che si pone fra i valori medi e massimi registrati dalle prove CID realizzate nei laboratori dell'ENEL HYDRO. Tenendo conto sia dei risultati forniti dalle prove CIU che di quelli forniti dalle prove CID si può individuare un intervallo di variabilità per l'angolo d'attrito fra 25 e 30°. Per la coesione drenata i valori che emergono dalle prove triassiali risultano estremamente dispersi e l'intervallo significativo di variazione per tale parametro è fra 20 e 100 kPa.

La tabella seguente riassume i valori ritenuti significativi per i parametri nella collina di Verduno:

| $\phi'$<br>(°) | $c'$<br>(kPa) | $\phi'_p$<br>(°) | $c'_p$<br>(kPa) |
|----------------|---------------|------------------|-----------------|
| 25-30          | 20-100        | 30-35            | 100             |

Per la zona della valle del Tanaro sono soltanto disponibili valori relativi alle prove di taglio diretto con un valore dell'angolo di attrito non molto disperso con un valore medio intorno ai 28° ed un intervallo di variazione significativo fra i 25 e i 35°. Il valore di coesione di picco risulta anche in questo caso estremamente disperso, con valore medio di circa 70 kPa.

Va infine ricordato che le prove di taglio DS-CD non risultano adeguate a descrivere le variazioni tensionali conseguenti ad uno scavo in sotterraneo, per il quale le condizioni di una prova triassiale risultano maggiormente rappresentative.

Dai certificati di prova delle prove triassiali Tx-CID è stata fatta una valutazione grafica del modulo elastico di deformabilità secante corrispondente al 50% della deformazione finale di prova ( $E_{50}$ ). Nella tabella seguente si riportano i valori medi ricavati in corrispondenza di ciascun campione:

| Sondaggio | Campione<br>(MPa) | $E_{50}$ medio<br>(MPa) |
|-----------|-------------------|-------------------------|
| SFG01     | C5                | 8.7                     |
| SFG02     | C3                | 28.8                    |
| SFG03     | C4                | 48.3                    |
| SFG04     | C4                | 48.2                    |

Ne emerge un valore per il modulo compreso  $E_{50}$  tra 30 e 50 MPa.

L'analisi dei risultati delle prove Tx-UU condotte sui campioni del lotto 6 porta alla determinazione dei valori di resistenza a taglio non drenati raccolti nella tabella seguente (Tabella 2.7):

|                     | TX - UU     |             |
|---------------------|-------------|-------------|
|                     | Collina     | Valle       |
|                     | $c_u$ (kPa) | $c_u$ (kPa) |
| <i>Max</i>          | 2050.0      | 2039.4      |
| <i>Min</i>          | 219.8       | 803.6       |
| <i>Media</i>        | 1019.3      | 1452.1      |
| <i>Dev.standard</i> | 775.1       | 429.9       |

I valori si presentano molto dispersi (Figure 6.30 e 6.31), con valori medi per ciascuna delle due zone di molto superiori al valore medio di 783 kPa risultante dalle prove Tx-CIU disponibili, che invece si accordano bene ai valori risultanti dalle prove pressiometriche in sito descritte precedentemente. Si rileva che soltanto le 3 prove riguardanti la collina di Verduno sono state eseguite su 3 provini, mentre, per la zona della valle del Tanaro, 4 delle 9 prove disponibili sono state eseguite su un unico provino il che ne riduce l'affidabilità.

Si dispone di 22 prove edometriche condotte nei laboratori della Tecno-Piemonte, dei servizi Geotecnici Liguri e dell'ENEL HYDRO. Le prove collocabili nella zona di collina sono 9 mentre sono 13 nella zona della valle del Tanaro (Tabelle 6.6÷6.9).

Da un esame delle Figure 6.14÷6.18 si può notare come mediamente, nella zona della collina di Verduno, in tutti i diagrammi di prova il tratto di ricarica sia ben distinguibile rispetto al tratto di carico il che ha permesso un'agevole valutazione del grado di sovraconsolidazione OCR attraverso il metodo di Casagrande. Per quanto riguarda i valori relativi alla valle del Tanaro si registrano alcune anomalie nella fase di ricarica per le prove sul campione C2 del sondaggio SPD26-10, per il campione C1 del sondaggio SPD26-12, per il

campione C1 del sondaggio SPD26-09 e infine per il campione C1 dell'SPD26-07, ma nel complesso le prove hanno permesso un'agevole determinazione del grado di sovraconsolidazione del materiale. I risultati ottenuti sono raccolti nella tabella seguente e nelle Figure 6.19÷6.24:

|                     | Collina Verduno | Valle Tanaro              |                           |
|---------------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|
|                     | OCR<br>(-)      | OCR <sub>min</sub><br>(-) | OCR <sub>max</sub><br>(-) |
| <i>Max</i>          | 1.8             | 3.5                       | 6.3                       |
| <i>Min</i>          | 0.2             | 0.3                       | 0.6                       |
| <i>Media</i>        | 0.9             | 1.2                       | 2.3                       |
| <i>Dev.standard</i> | 0.7             | 1.1                       | 2.0                       |

Dall'analisi delle figure con l'andamento dell'OCR e della tabella si deduce che, nella zona interessata dallo scavo della galleria l'unità 7, si presenta come normalconsolidata o al più leggermente sovraconsolidata nelle parti più superficiali. Per la zona della valle del Tanaro per 9 dei 13 campioni disponibili non era possibile avere la posizione della falda e pertanto si è fatta una duplice ipotesi di falda a piano campagna e di falda alla quota del provino che hanno dato in due estremi possibili di OCR per ciascuna prova. Il materiale in questa zona si presenta come leggermente sovraconsolidato o sovraconsolidato nei primi 10÷15 m di profondità, mentre al di sotto si presenta come normalconsolidato.

La galleria attraversa la formazione delle argille marnose con coperture minime intorno ai 30 m per arrivare sino a coperture massime intorno ai 90 m; su questa base risultano significativi intervalli tensionali tra 400 e 800 kPa per le coperture inferiori e 800 1600 kPa per quelle più elevate. Dalle prove effettuate, e considerando soltanto i campioni relativi a sondaggi nella zona della galleria, il modulo edometrico corrispondente risulta fortemente variabile; i valori medi sono riassunti nella tabella seguente:

|                        | <b>Collina di Verduno</b>           |            |             |
|------------------------|-------------------------------------|------------|-------------|
|                        | <b>E<sub>edometrico</sub> (MPa)</b> |            |             |
| Tensione in sito (kPa) | <b>400</b>                          | <b>800</b> | <b>1600</b> |
| <i>Media</i>           | 45.9                                | 45.1       | 67.3        |
| <i>Dev. Standard</i>   | 31.6                                | 27.5       | 39.6        |

Allo scopo di indagare l'eventuale comportamento rigonfiante del materiale dell'unità 7, nelle precedenti campagne di indagine sono state effettuate 5 prove di rigonfiamento libero in edometro, di cui soltanto una nella zona interessata dalla galleria in corrispondenza dell'SFG06, e 4 prove di rigonfiamento impedito in edometro, tutte nella zona della valle del Tanaro. Nella campagna di indagine integrativa svolta nel 2006 sono state effettuate due nuove prove di rigonfiamento libero in edometro, seguito da una fase di ricomprensione, nell'ambito dei sondaggi SIV2 e SIV3. I valori dell'indice di deformazione di rigonfiamento ISS e dell'indice di pressione di rigonfiamento ISP risultanti dalle prove sono riportati nella tabella seguente:

| <b>Collina di Verduno</b> |                 |                  |                |
|---------------------------|-----------------|------------------|----------------|
| <b>Sondaggio</b>          | <b>Campione</b> | <b>ISP (kPa)</b> | <b>ISS (%)</b> |
| SFG06                     | C4              | -                | 1.46           |
| SIV2                      | Ci3             | -                | 5.07           |
| SIV3                      | Ci3             | -                | 0.93           |

| <b>Valle del Tanaro</b> |                 |                  |                |
|-------------------------|-----------------|------------------|----------------|
| <b>Sondaggio</b>        | <b>Campione</b> | <b>ISP (kPa)</b> | <b>ISS (%)</b> |
| SPE2601                 | C2              | -                | 0.51           |
| SPE2602                 | C4              | 50               | -              |
| SPE2603                 | C2              | -                | 1.18           |
| SPE2605                 | C2              | 200              | 1.81           |
| SPE2605                 | C4              | -                | 4.20           |
| SPD2607                 | C1              | 125              | -              |
| SPD2607                 | C2              | 125              | -              |

La deformazione percentuale di rigonfiamento al termine della prova risulta in genere molto bassa. I valori della massima pressione necessaria ad impedire un rigonfiamento in edometro presentano un valore massimo di 200 kPa. Si può quindi stimare un potenziale di rigonfiamento medio-basso.

### 6.3. PARAMETRI GEOTECNICI ATTRIBUITI ALLE UNITÀ

Nel presente paragrafo vengono riassunti i parametri geotecnici che caratterizzano le unità geotecniche individuate *lungo il tracciato della galleria*, sulla base delle risultanze di tutte le indagini in sito ed in laboratorio.

#### 6.3.1. Unità 3 - Depositi alluvionali attuali e medio-recenti

I parametri fisici, di deformabilità e di resistenza che, sulla base delle indagini svolte, è possibile attribuire all'unità in esame sono:

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 19.0 |
|-------------------------------|------|

con:

$\gamma$  peso di volume naturale;

#### 6.3.2. Unità 4 - Coperture

I parametri di resistenza sono stati determinati sia con riferimento ad un involucro di rottura lineare tipo Mohr-Coulomb sia ad un involucro curvilineo tipo Baligh. I parametri geotecnici definiti da attribuire ai livelli sabbiosi sono riportati nella tabella seguente:

|                               |             |
|-------------------------------|-------------|
| $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 20.0        |
| $E_d$ (MPa)                   | 15.0 - 20.0 |
| $\nu$ (-)                     | 0.30        |

|               |             |
|---------------|-------------|
| $\phi_P'$ (°) | 28.0 - 35.0 |
| $c_P'$ (kPa)  | 0.0 - 10.0  |
| $\phi_0'$ (°) | 40.0 - 45.0 |
| $\alpha$ (°)  | 5.0 - 10.0  |

dove:

$E_d$  modulo di deformabilità;

$\nu$  rapporto di Poisson;

$\phi_P'$  angolo di attrito di picco (criterio di resistenza di Mohr-Coulomb);

$c_P'$  coesione di picco (criterio di resistenza di Mohr-Coulomb);

$\phi_0'$  angolo di attrito riferito a pressioni  $\sigma_{ff} = 272$  kPa (criterio di resistenza di Baligh);

$\alpha$  angolo che determina la curvatura dell'involuppo di rottura di Baligh.

### 6.3.3. Unità 5 - Limi sabbiosi sovrapposti all'unità gessosa

|                               |             |
|-------------------------------|-------------|
| $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 19.5        |
| $E_d$ (MPa)                   | 15.0 - 25.0 |
| $\nu$ (-)                     | 0.30        |
| $E_{edom}$ (MPa)              | 3.0 - 6.0   |
| $\phi_P'$ (°)                 | 27.0 - 35.0 |
| $c_P'$ (kPa)                  | 5.0 - 10.0  |

dove le grandezze hanno lo stesso significato indicato in precedenza.

### 6.3.4. Unità 6 - Gessi

Questa unità geotecnica ha caratteristiche granulometriche e geotecniche molto eterogenee, essendo costituita da livelli gessosi di aspetto lapideo e da livelli limo argillosi o sabbioso limosi mediamente consistenti. Per questa unità sono stati individuati i parametri relativi al solo involucpo lineare di Mohr-Coulomb ed è stata fornita una valutazione dei parametri di resistenza non drenata.

I parametri che caratterizzano questa unità sono riportati nello specchio sottostante:

|   |               |
|---|---------------|
| $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )               | 20.0          |
| $E_y$ (MPa)                                 | 150.0 - 250.0 |
| $\nu$ (-)                                   | 0.30-         |
| $E_{edom}$ (MPa)                            | 10.0-25.0     |
| $E_{edom}$ (MPa) - copertura $\approx$ 45 m | 25.0          |
| $\phi'_p$ (°)                               | 23.5          |
| $c'_p$ (kPa)                                | 37.0          |
| $c_u$ (kPa)                                 | 400.0 - 800.0 |

i simboli utilizzati hanno il significato specificato in precedenza con l'aggiunta di:

$E_y$  modulo elastico "sferico" da interpretazione di prove pressiometriche Menard;

$c_u$  resistenza al taglio non drenata.

### 6.3.5. Unità 7 - Argille marnose

Per questa unità sono stati individuati i parametri relativi al solo involucro lineare di Mohr-Coulomb ed è stata fornita una valutazione dei parametri di resistenza non drenata.

I parametri che caratterizzano questa unità sono riportati nello specchio sottostante:

|   |               |
|---|---------------|
| $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )               | 21.0          |
| $E_y$ (MPa)                                 | 150.0 - 250.0 |
| $\nu$ (-)                                   | 0.30          |
| $E_{edom}$ (MPa) - copertura $\approx$ 20 m | 45.0-65.0     |
| $\phi'$ (°)                                 | 20.0 - 25.0   |
| $c'$ (kPa)                                  | 50.0 - 100.0  |

|                                  |                           |
|----------------------------------|---------------------------|
| $\phi_p'$ (°)                    | 25.0 - 35.0               |
| $c_p'$ (kPa)                     | 50.0 - 150.0              |
| $c_u$ (kPa)                      | 800.0 - 1200.0            |
| $c_u$ (kPa) per $6.5 < z < 24$ m | $30.917 \cdot z - 191.37$ |
| $c_u$ (kPa) per $z > 24$ m       | $1.0273 \cdot z + 500$    |

i simboli utilizzati hanno il significato specificato in precedenza.

### 6.3.6. Tabella riassuntiva dei parametri geotecnici

Nel seguito si riporta una tabella di sintesi della caratterizzazione geotecnica per ciascuna unità litologica, presentate nelle differenti fasi progettuali.

I prospetti di seguito elencati riportano range di parametri che sostanzialmente, nonostante le successive revisioni non sono sostanzialmente modificati.

| PARAMETRI                     | 4     | 5     | 6                | 7                |
|-------------------------------|-------|-------|------------------|------------------|
| $\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> ) | 19-20 | 19.5  | 20               | 21               |
| Dr (%)                        |       |       |                  |                  |
| $\phi_p$ (°)                  | 28-35 | 27-35 | 23-25            | 25               |
| $\phi_r$ (°)                  |       |       |                  |                  |
| $c'_p$ (kPa)                  | 0-10  | 5-10  | 30-40            | 50-100           |
| $c'_r$ (kPa)                  |       |       |                  |                  |
| $c_u$ (kPa)                   |       |       | 400-800          | 800-1200         |
| $E'_p$ (MPa)                  | 15-20 | 15-25 | 10-25<br>150-250 | 45-65<br>150-250 |
| $E'_r$ (MPa)                  |       |       |                  |                  |
| $\nu$                         | 0.3   | 0.3   | 0.25             | 0.25             |

Dal punto di vista della caratterizzazione sismica i terreni in oggetto, in particolare quelli interessati dalle opere di imbocco, alla categoria C “*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti 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 fra 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)*”.

## 7. SUDDIVISIONE DEL TRACCIATO IN ZONE OMOGENEE E DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOLOGICO-GEOTECNICO

Gli studi e le indagini svolte in ambito geologico, geotecnico ed idrogeologico hanno consentito di meglio approfondire le criticità presenti lungo il tracciato della galleria e di suddividerlo in zone omogenee; per ciascuna di queste zone si è definito in dettaglio il modello geologico-geotecnico. Sono state individuate le seguenti cinque zone omogenee:

1. Zona di imbocco lato Cherasco, caratterizzata in parte dalla presenza di depositi di frana, costituiti da argille limose, in parte dalla formazione dei gessi (da Progr. 0+559.88 a progr. 0+730.88 in canna di monte e da progr. 4+263.60 a progr. 4+103.60 in canna di valle).
2. Zona di galleria interessata dall'attraverso della formazione dei gessi (da Progr. 0+730.88 a progr. 1+137.88 in canna di monte e da Progr. 4+103.60 a progr. 3+569.02 in canna di valle).
3. Zona di galleria interamente impostata all'interno del substrato marnoso-argilloso della Formazione delle Marne di Sant'Agata (da progr. 1+137.88 a progr. 2+923.88 in canna di monte e da Progr. 3+569.02 a progr. 2+361.02 in canna di valle).
4. Zona di galleria in cui, già sulla base delle indagini pregresse (e con necessità di approfondimenti dalle nuove indagini), si rileva la presenza, a quota scavo, o poco sopra la calotta, di lenti ghiaiose – sabbiose, all'interno del substrato marnoso-argilloso (corpi detritici caratterizzati dalla presenza di acqua in pressione) (da Progr. 2+923.88 a progr. 3+657.38 in canna di monte e da progr. 2+361.02 a progr. 1+346.84 in canna di valle).
5. Zona di imbocco lato Alba, caratterizzata dalla presenza di depositi di frana, costituiti da limi sabbiosi fini, localmente argillosi, inglobanti ghiaie e ciotoli. L'area si caratterizza anche per una forte criticità geomorfologica e di

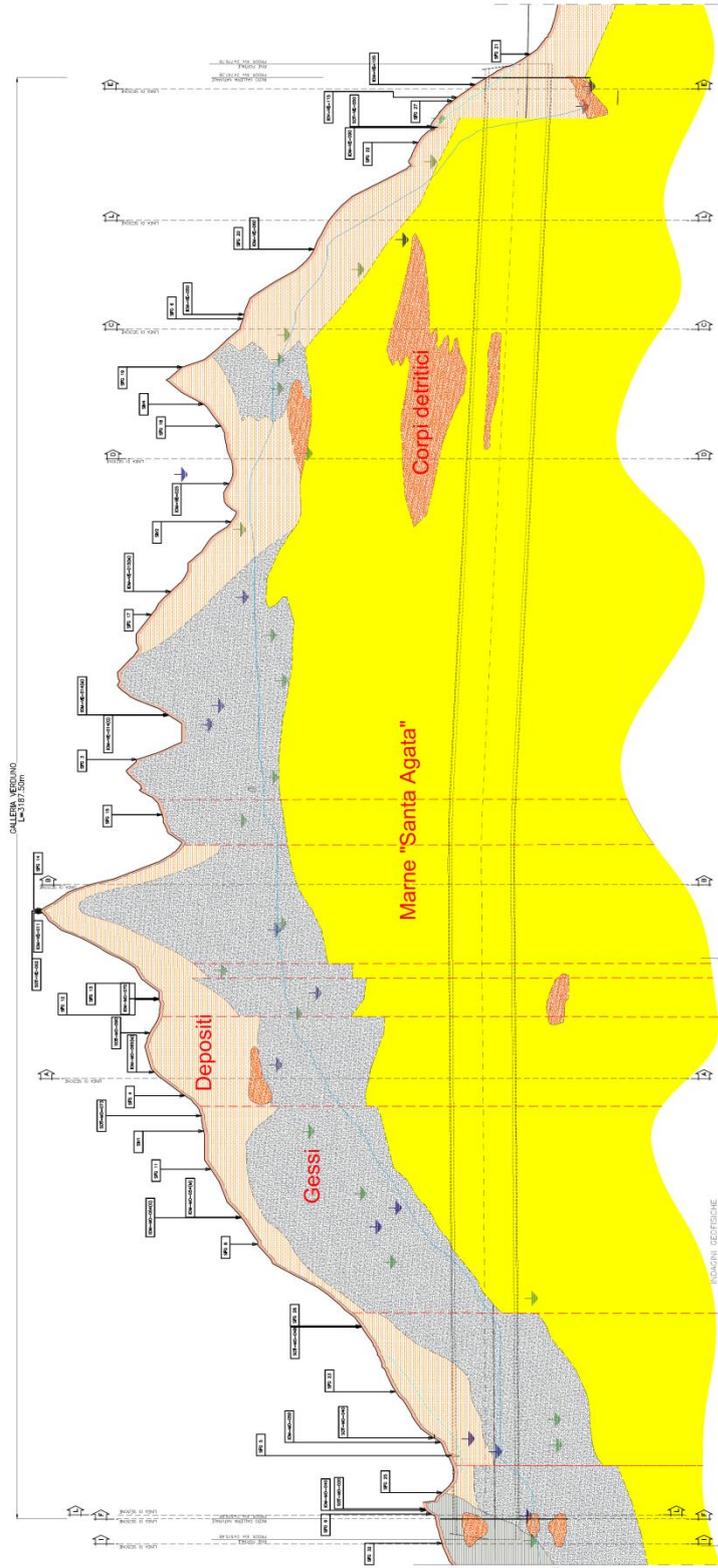


**Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6**  
**PROGETTO ESECUTIVO**  
**Galleria Verduno - Relazione geotecnica**

propensione al dissesto (da Progr. 3+657.38 a progr. 3+747.38 in canna di monte e da progr. 1+346.84 a progr. 1+159.02 in canna di valle).

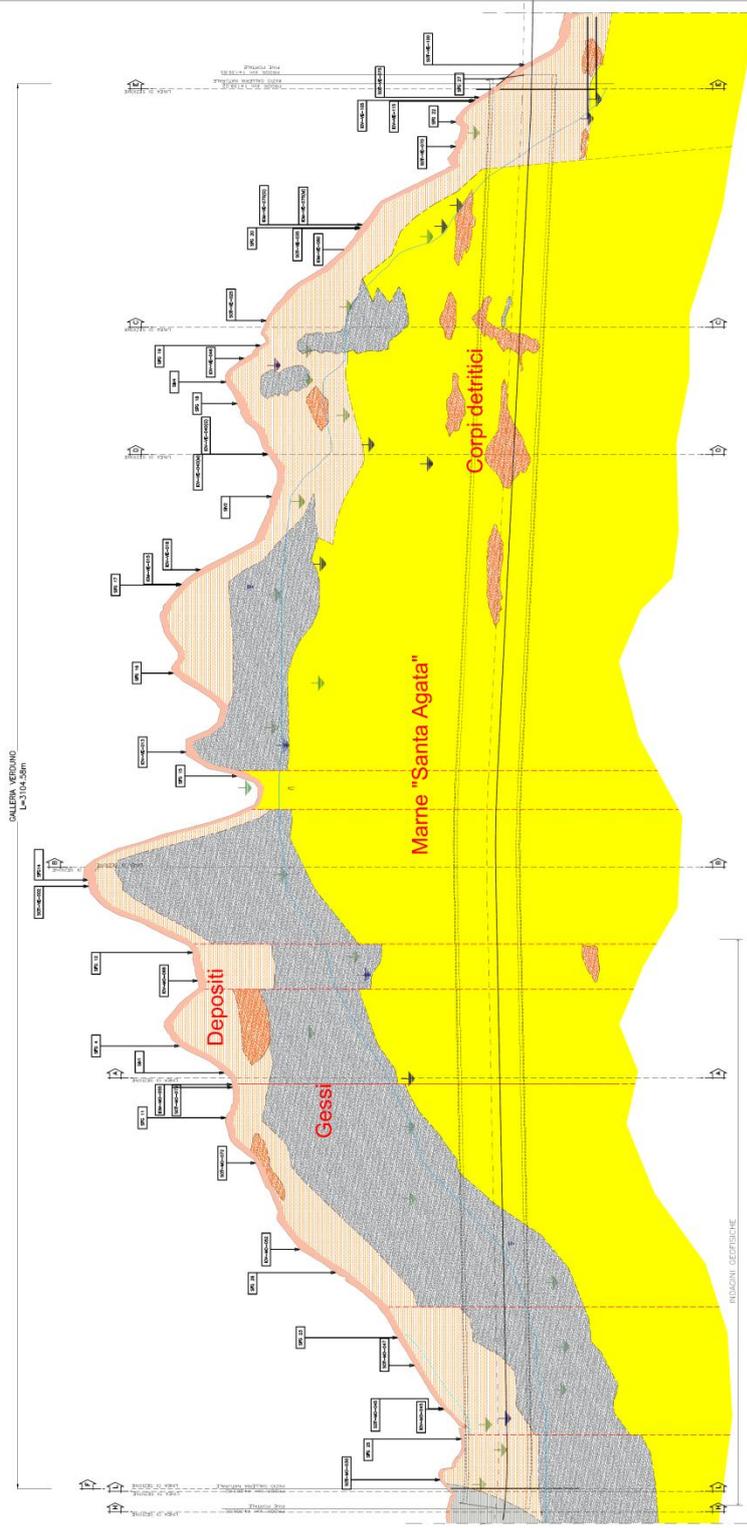
Nel seguito si descrivono nel dettaglio i cinque differenti contesti e le relative problematiche. Dapprima si riportano i profili di monte e di valle ed un inquadramento planimetrico con l'indicazione delle cinque zone individuate.

**CANNA DI MONTE - TRATTE OMOGENEE**



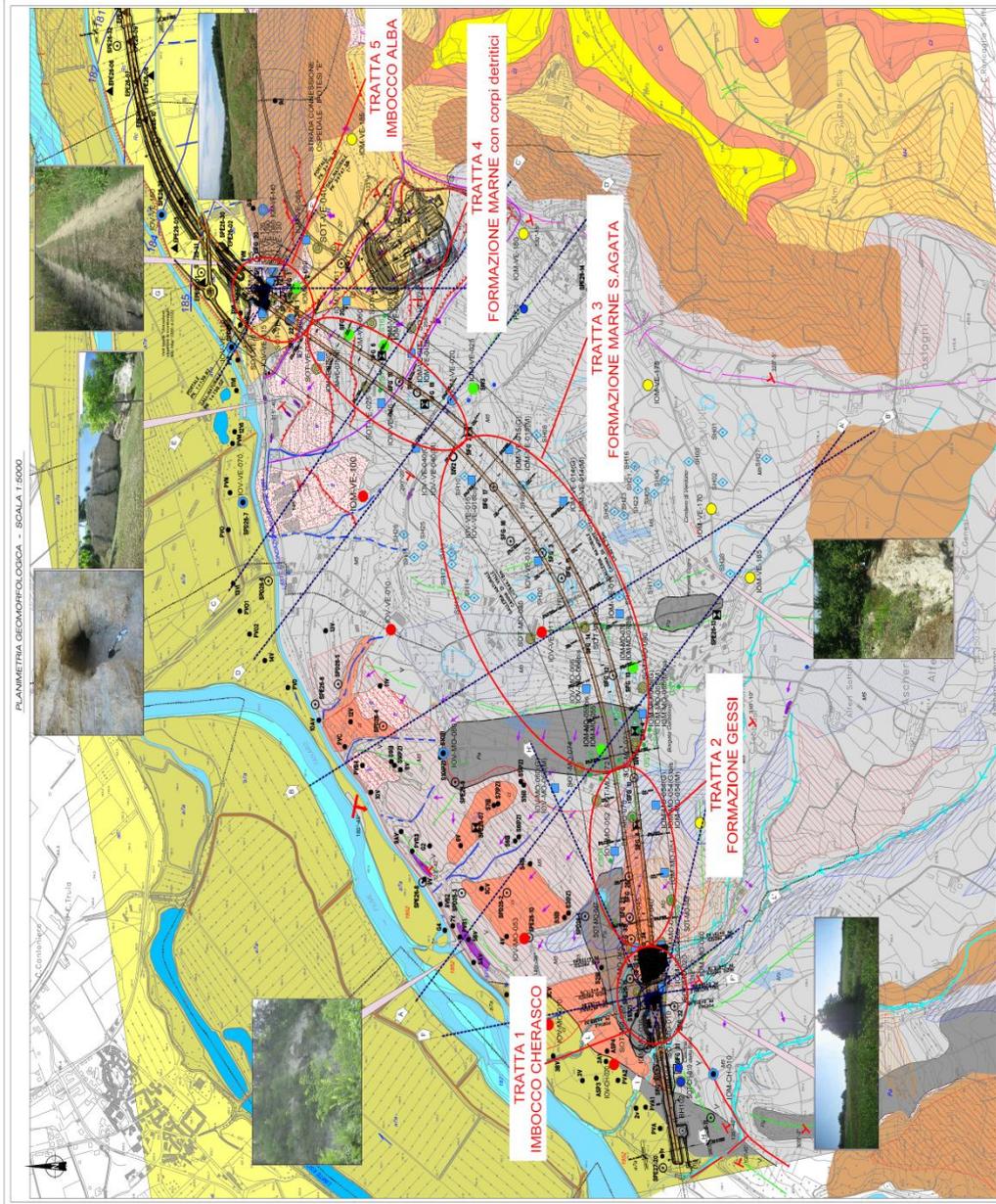
|  |  |  |  |                                    |
|--|--|--|--|------------------------------------|
| <b>Tratta 1</b><br>Imbocco<br>Cherasco | <b>Tratta 2</b><br>Formazione<br>Gessi | <b>Tratta 3</b><br>Formazione<br>Marne "Santa Agata" | <b>Tratta 4</b><br>Formazione<br>Marne/Corpi detritici | <b>Tratta 5</b><br>Imbocco<br>Alba |
|--|--|--|--|------------------------------------|

**CANNA DI VALLE - TRATTE OMOGENEE**



|  |  |   |   |                                    |
|--|--|---|---|------------------------------------|
| <b>Tratta 1</b><br>Imbocco<br>Cherasco | <b>Tratta 2</b><br>Formazione<br>Gessi | <b>Tratta 3</b><br>Formazione<br>Mame "Santa Agata" | <b>Tratta 4</b><br>Formazione<br>Mame/Corpi detritici | <b>Tratta 5</b><br>Imbocco<br>Alba |
|--|--|---|---|------------------------------------|

INQUADRAMENTO PLANIMETRICO



## 7.1. ZONA 1 - ZONA DELL'IMBOCCO LATO CHERASCO

La zona in esame interessa l'imbocco lato Cherasco della galleria, il quale è interessato da un versante estremamente blando a rappresentare la presenza di terreni di scadenti caratteristiche geotecniche. L'imbocco si colloca sul fianco in sinistra idrografica di una vallecola; l'asse della vallecola non è inciso da alcun corso d'acqua, mentre sono presenti due rii, il San Giacomo e il Deglia, che attraversano trasversalmente la vallecola in direzione ca. N-S.

Il modello geologico è ben rappresentato dalla sezione interpretativa FF', eseguita in corrispondenza dell'imbocco in naturale della galleria; in essa si osserva che le due carreggiate si trovano all'interno dei depositi detritici di copertura, costituita da argilla limosa, argilla sabbiosa, argilla limosa con sabbia e presenza di lenti granulari a componente ghiaioso-sabbiosa prevalente (Unità 4 e 5); parte degli scavi interesseranno la roccia gessifera poggiate sul substrato marnoso; in questo settore le Marne di S. Agata Fossili mostrano la presenza di lenti di terreno granulare, costituite da ghiaie e sabbie; i terreni che caratterizzano il versante possono essere così schematizzati dall'alto verso il basso (cfr. fig. 7.1):

- Presenza di spessori ridotti di terreno di riporto e/o vegetale di circa 2/4 metri,
- Presenza a valle delle due carreggiate, di spessori variabili da circa 15 a 20 metri circa di depositi limosi prevalenti costituiti da limi sabbiosi fini localmente argillosi (Unità 4 e 5),
- Formazione dei gessi (6) e substrato marnoso (7).

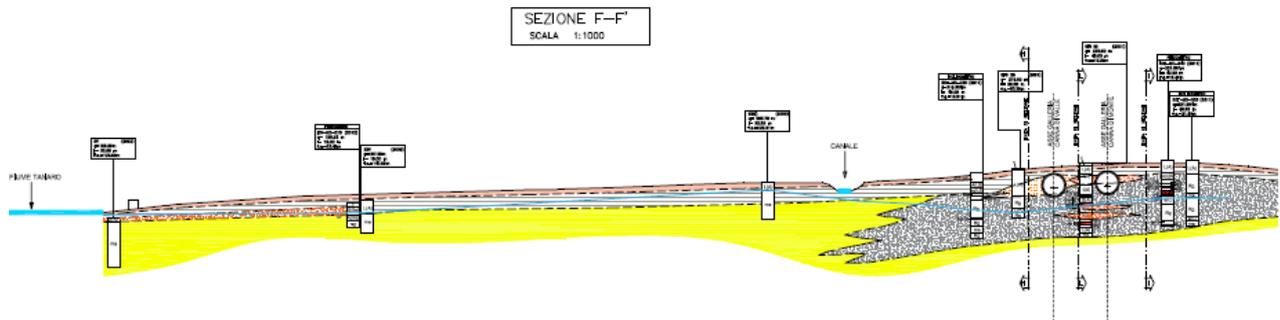
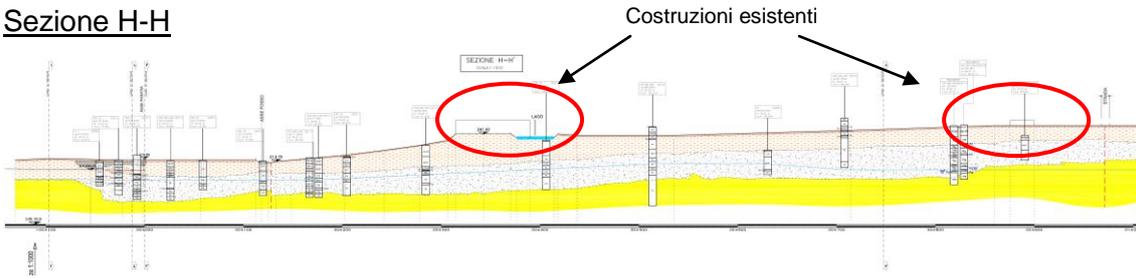


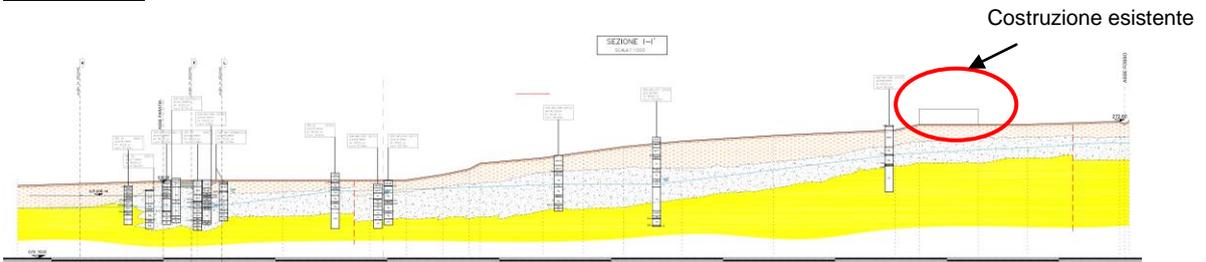
Figura 7.1 – Sezione F-F' (Imbocco Cherasco)

La quota di falda si colloca al di sotto del piano di lavoro per la realizzazione delle opere, anche se non si possono escludere temporanee risalite fino a 8-10 m da piano campagna a seguito di eventi meteorici particolarmente intensi. Ulteriori sezioni rappresentative del modello geologico sono le sezioni H-H', I-I' ed L-L', tracciate a partire dall'imbocco verso le principali linee di pendenza dei versanti a monte delle opere di imbocco; la ricostruzione stratigrafica è riportata in figura 7.2, la posizione planimetrica in Figura 7.3. Sulle sezioni si evidenziano alcune preesistenze che dovranno essere prese in considerazione nell'esame di interazione con le lavorazioni per lo scavo della galleria.

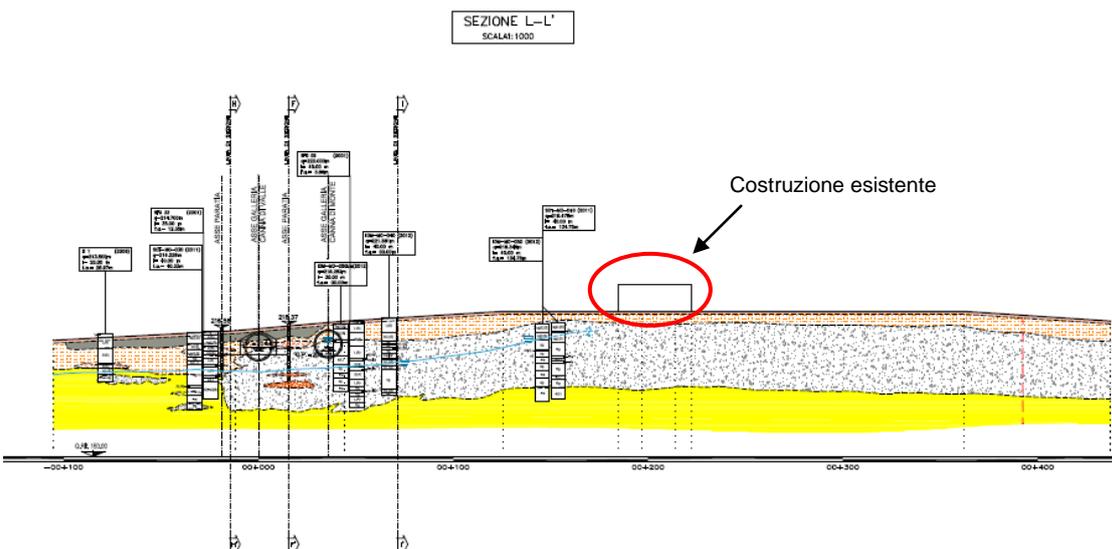
**Sezione H-H**



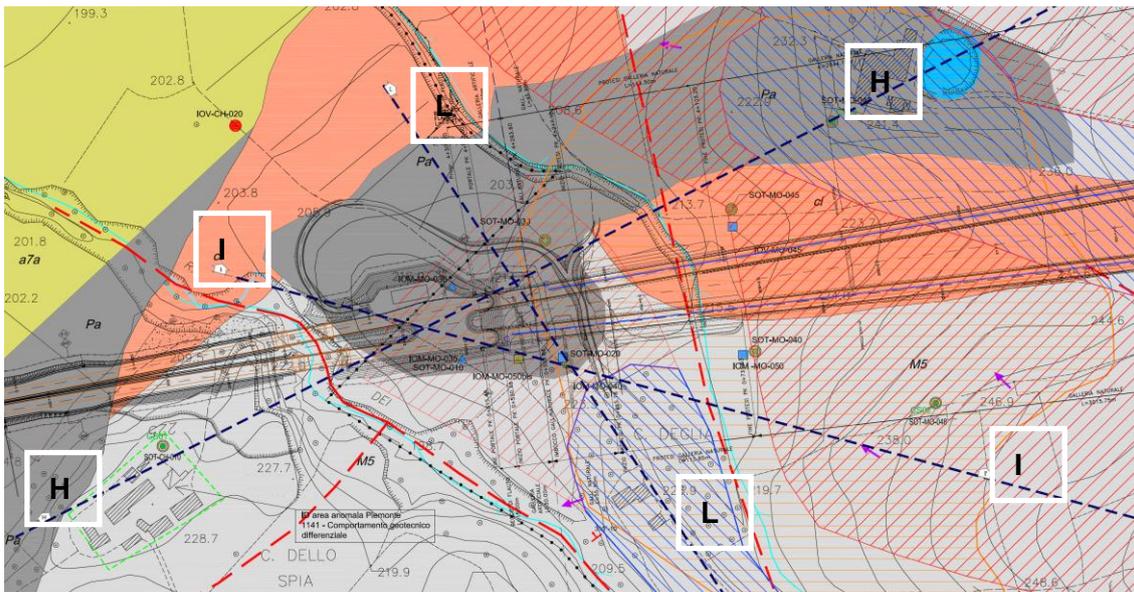
**Sezione I-I**



**Sezione L-L**



*Figura 7.2 – Sezioni H-H', I-I' ed L-L' (Imbocco Cherasco)*



*Figura 7.3 – Inquadramento planimetrico (Imbocco Cherasco)*

Dal punto di vista idrogeologico, si osserva che nelle coltri dei depositi di frana e colluviali è presente dell'acqua interstiziale, che tuttavia non fa parte di un sistema di circolazione sviluppato ed alimentato con continuità. L'acqua è perlopiù presente in lenticelle corrispondenti a piccole falde sospese impostate nei limi sabbiosi e nelle argille limose. Tali circuiti sono alimentati direttamente dal sottobacino imbrifero rappresentato dalla vallecchia, peraltro con bassi tassi di infiltrazione a causa delle permeabilità relativamente basse dei terreni di copertura (es. la stratigrafia del sondaggio IOV-MO-045 mostra la presenza di prevalenti argille e argille limose).

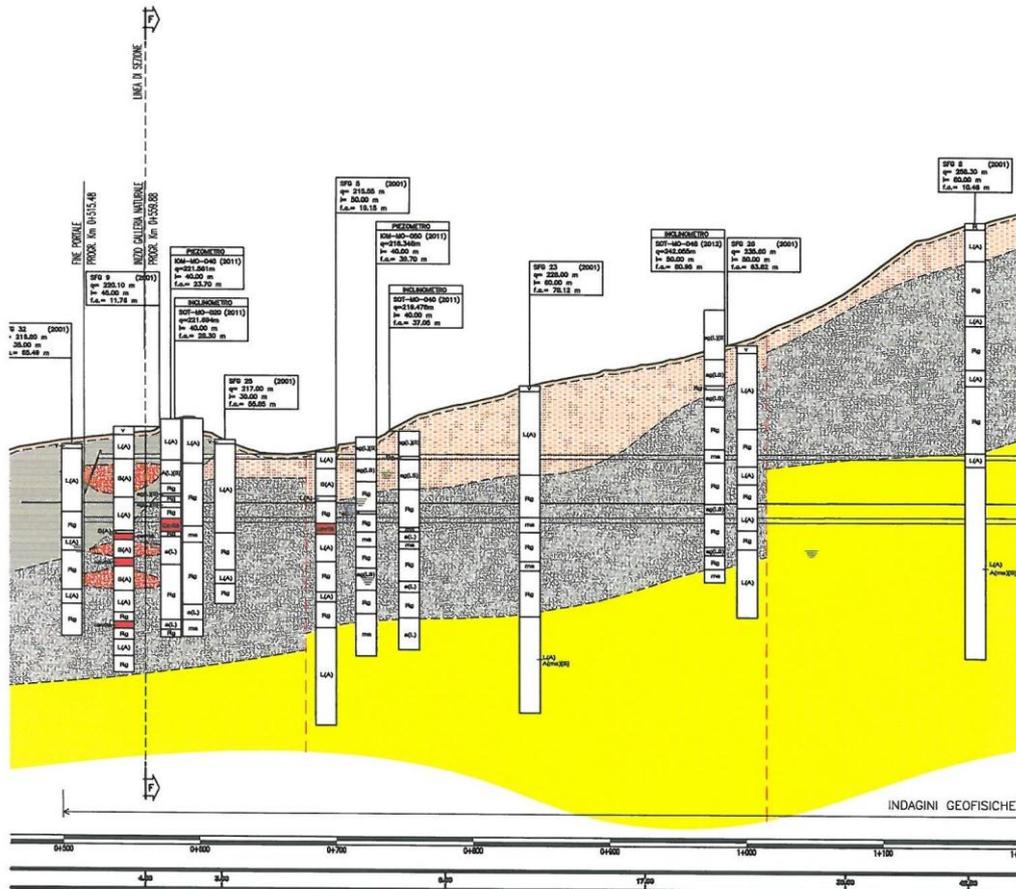
Per quanto riguarda la falda profonda, invece, ad inizio lotto questa è impostata nei gessi i quali sono ubicati a letto delle coltri detritico-colluviali. La canna di monte intercetta la falda dei gessi attorno alla pk 0+700, mentre quella di valle rimane costantemente ad un livello superiore alla falda per l'intero settore di attraversamento (procedendo lungo la canna di monte il livello di falda rimane costante su valori di 1-2 m sopra l'arco rovescio fino alla fine del settore di pertinenza. Il motivo per cui in questa tratta si instaura un gradiente idraulico estremamente basso trova giustificazione nel particolare assetto idrogeologico che caratterizza i gessi a monte della tratta dell'imbocco.

Un aspetto molto importante da rimarcare riguarda l'entità delle oscillazioni attese del livello di falda dei gessi sul tratto dell'imbocco. Infatti, le misure piezometriche mettono in evidenza che tali variazioni possono essere in questo tratto molto consistenti, con escursioni dell'ordine di qualche metro. Per valutare l'entità delle oscillazioni di falda in questo tratto sono stati considerati i piezometri con fenestratura nei gessi di cui si dispone di un intervallo di registrazione completo (Ottobre 2011-Novembre 2012): piezometri IOM-MO-040, IOV-MO-045, IOM-MO-050, IOM-MO-050 bis. Oltre a questi è stato analizzato il piezometro IOV-MO-060 che, sebbene non sia di stretta pertinenza di questa tratta (per quanto collocato in un contesto idrogeologico simile e poco distante) mostra comunque delle oscillazioni di livello piezometrico simili a quelle degli altri piezometri; in questi piezometri il range di escursione può variare da un minimo di 2-5 m (IOM-MO-040, IOV-MO-045), fino ad un massimo di 7-10 m (IOM-MO-050, IOM-MO-050 bis). Il piezometro IOV-MO-060 ha un range di oscillazione ancora più elevato con valori di 12 m. Gli studi idrogeologici condotti evidenziano in sintesi che il contesto idrogeologico dell'imbocco lato Cuneo è particolarmente dinamico e può registrare variazioni positive di 10 m (è possibile ipotizzare addirittura oltre in condizioni di piovosità molto intensa) rispetto al livello medio nei profili previsionali longitudinali.

## **7.2. ZONA 2 - ZONA DI GALLERIA INTERESSATA DALL'ATTRAVERSAMENTO DELLA ZONA DEI GESSI**

Questo settore rappresenta una delle zone più critiche lungo il tracciato della galleria vedendo l'interferenza del cavo con la formazione dei gessi e con l'acquifero in esso presente. Il modello geologico viene rappresentato dalle sezioni litologico-stratigrafiche FF' ed HH', oltre che dal profilo in asse galleria. Lungo i profili longitudinali in asse alle due canne si osserva che lo scavo della galleria si sviluppa parte all'interno della roccia gessifera appartenente alla formazione Gessoso-solfifera (unità 6), parte all'interno dei depositi pliocenici (unità 5), parte all'interno dei depositi detritici costituiti da limi sabbiosi fini,

localmente argillosi inglobanti ghiaie e ciottoli (unità 4); uno schema rappresentativo è riportato nel profilo della canna di monte (figura 7.4).



*Figura 7.4 – Profilo canna di monte*

In questo settore le due canne della galleria attraversano interamente l'acquifero dei gessi. Per quanto riguarda la ricostruzione piezometrica, sono stati messi a punto due possibili scenari, il primo considerando i soli dati relativi al Monitoraggio Ambientale (2011-2013), il secondo combinando i dati del Monitoraggio Ambientale con i dati relativi alla campagna 2001-2002, i quali non sono più nelle condizioni di fornire dati piezometrici affidabili. Entrambe le scelte, come in dettaglio discusso nella relazione idrogeologica, hanno dei pro e dei contro: il vantaggio derivante dall'integrazione dei dati piezometrici relativi alle serie 2001-2002 e 2011-2013 è quello di poter ottenere una ricostruzione

piezometrica basata su numero di campioni più elevato e con una maggiore distribuzione areale. L'extrapolazione basata sui soli valori derivanti dal piezometri del Monitoraggio Ambientale implica infatti la correlazione tra un numero inferiore di dati e quindi il ricorso ad un maggior grado di libertà nella ricostruzione della superficie piezometrica, pur presentando il vantaggio di considerare dati coevi e quindi non soggetti a differenti condizioni di alimentazione/drenaggio.

Considerando i soli dati piezometrici della Monitoraggio ambientale (2011-2013) la superficie piezometrica presenta un andamento circa monoclinale con direzione media verso NW-SE; in questa rappresentazione non emergano né spartiacque, né assi di drenaggio idrogeologici. Considerando anche i dati 2001-2002, si determina invece la presenza di un'insenatura molto pronunciata della piezometria in corrispondenza del tracciato della canna di valle della futura Galleria di Verduno, fino a 4-5 m più bassa di quella rappresentata considerando i soli dati 2011-2013. Gli approfondimenti progettuali, volti ad individuare le criticità connesse alla realizzazione delle nuove opere, sono condotti con riferimento ad entrambi gli scenari, anche se l'insieme dei dati geologici-idrogeologici raccolti – stratigrafie, cavità rilevate ... - fanno preferire l'inserimento nel modello idrogeologico di un asse di drenaggio compatibile con i dati rilevati nel periodo 2001-2002 nella zona prossima alla canna sud, dove non sono attualmente disponibili nuove informazioni piezometriche, quindi con la distribuzione piezometrica riportata in Figura 7.5.

Pur essendo diffusa sull'intero versante tra La Morra e Verduno, la circolazione di questo acquifero risulta essere principalmente condizionata dalla geometria del sistema di condotti carsici formati per la dissoluzione del gesso. Questo tratto di galleria attraversa infatti un contesto idrogeologico con particolari caratteristiche: a Nord della canna di valle la ricostruzione piezometrica effettuata indica la presenza di due assi di drenaggio, rispettivamente a direzione ca. Est-Ovest ed a direzione Nord-Sud.





zone di fatturazione, piuttosto che ad una compartimentazione idraulica ad opera di una faglia. L'esame della variabilità della piezometrica, a monte ed a valle della faglia, sembra evidenziare un unico sistema di circolazione e quindi l'assenza di una barriera idraulica. Tale modello interpretativo è stato inoltre supportato non solo dall'esame delle letture piezometriche, ma anche dalle evidenze stratigrafiche e dagli esiti delle indagini geofisiche. Tale ricostruzione, pur con le difficoltà e le problematiche del caso, rende meno critico l'avanzamento in galleria lungo il salto piezometrico, rispetto al dover affrontare il superamento di una barriera idraulica con il passaggio da una zona con carichi idraulici bassi ad una con carichi alti con il rischio di riscontrare venute improvvise in galleria.

Il sistema di condotti carsici funge da asse di drenaggio, veicolando il deflusso di falda da Est a Ovest sul fondovalle del Fiume Tanaro e nei tratti inferiori dei Rii San Michele e dei Deglia (anche la modellizzazione numerica conferma questo quadro conoscitivo, in quanto, per ottenere una calibrazione soddisfacente della piezometria di questo settore è stato necessario inserire una fascia a direzione Est-Ovest con valori di conducibilità idraulica molto elevati, fino a  $1 \times 10^{-2}$  m/s). Similmente, anche l'asse di drenaggio ad orientazione Nord-Sud è probabilmente associato ad una fascia di condotti carsici di maggiore permeabilità.

In condizioni di assenza di precipitazioni importanti, il battente idraulico sulla canna di monte si attesta per un lungo tratto (pk 0+700-0+970) su valori pressoché costanti corrispondenti a 2-3 m sopra la quota di progetto. Al passaggio con il settore successivo (settore delle marne) il battente si innalza raggiungendo valori di 2 m sopra la calotta della galleria. La canna di valle invece intercetta la falda acquifera ad una progressiva più avanzata rispetto alla canna di monte (verso la pk 3+850 ca). Questo è dovuto al fatto che la canna di valle si trova in posizione prossima all'asse di drenaggio Est-Ovest, il quale esercita un controllo sul sistema di circolazione abbattendo significativamente il carico idraulico. Sono comunque possibili variazioni significative e repentine del livello piezometrico. Infatti, nell'area delle due canne, le misure

piezometriche indicano che incrementi di livello superiori anche ai 10 m possono verificarsi in seguito ad eventi piovosi di una certa importanza. Pertanto, il livello piezometrico incontrato durante lo scavo può essere diverso da quello definito nei profili previsionali se nel corso dell'avanzamento si verificano precipitazioni intense o prolungate.

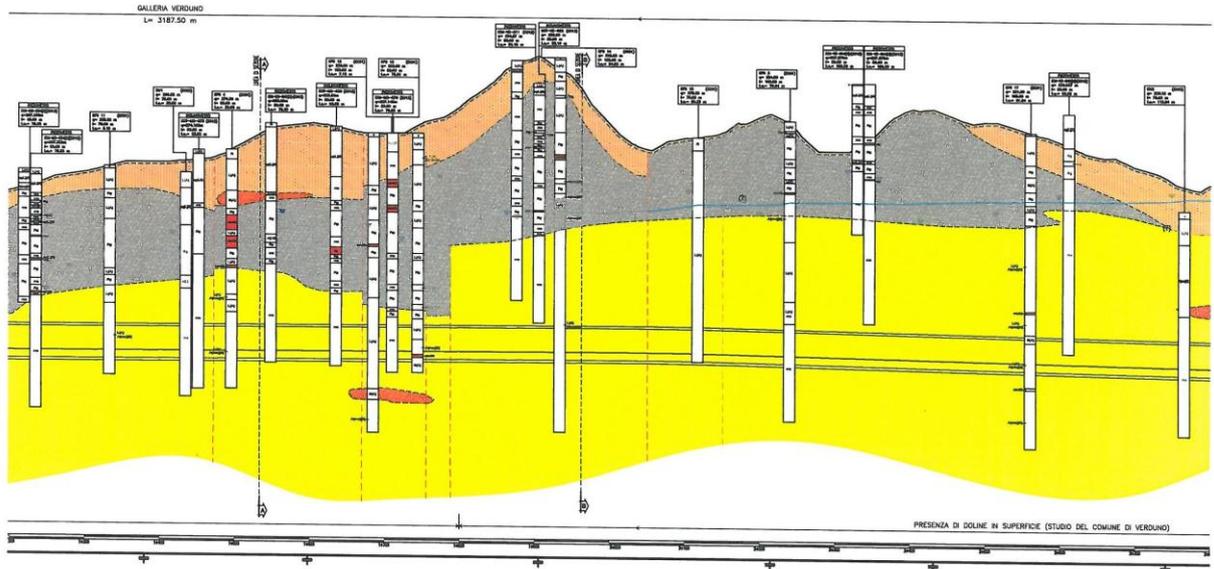
Dal punto di vista dello scavo, la previsione è che mentre la canna di valle attraversi la parte intermedia ed alta della fascia drenante Est-Ovest, quella di monte rimanga esterna ad essa, anche se le stratigrafie di sondaggio comunque indicano che lo scavo interesserà una zona di intensa fratturazione e carsismo.

Un ultimo aspetto critico di questo settore, riguarda la stabilità della galleria nel lungo termine, in relazione ad una possibile progressiva dissoluzione dei gessi, a causa della circolazione idrica sotterranea, tale da comportare una riduzione del volume dell'ammasso e quindi potenziali cedimenti differenziali, deleteri per il rivestimento in conci prefabbricati.

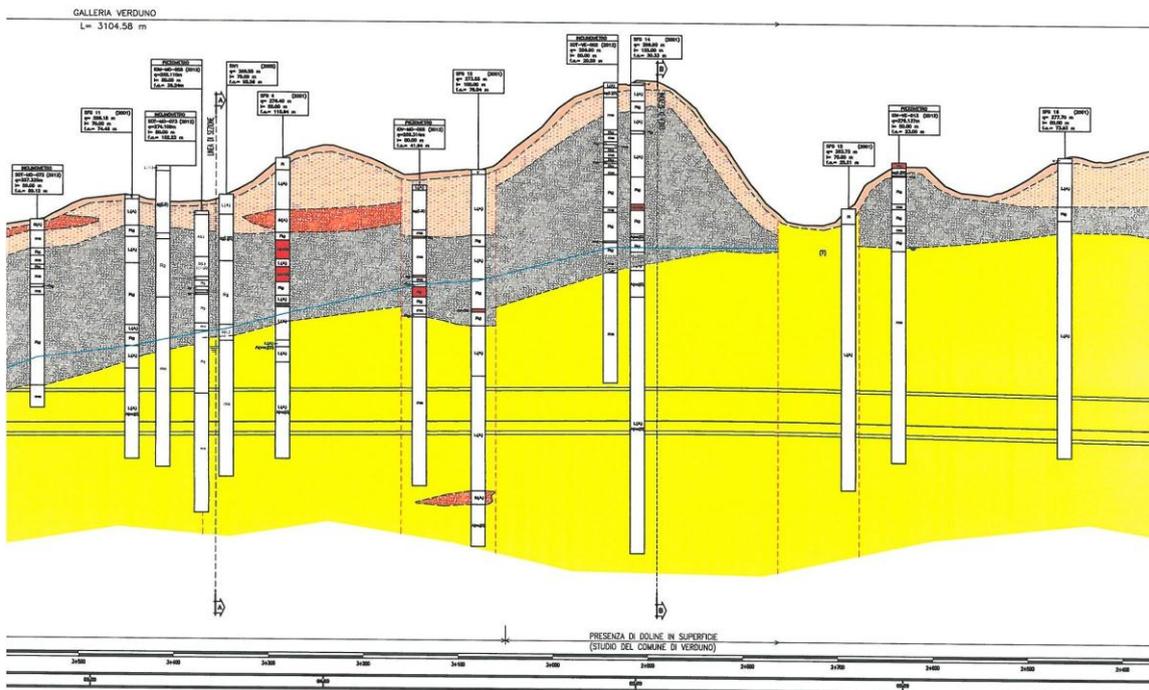
### **7.3. ZONA 3 - ZONA DI GALLERIA ALL'INTERNO DEL SUBSTRATO MARNOSO-ARGILLOSO**

Questo settore è compreso, tra le progressive 1+137.88 e 2+923.88 (canna di monte), e le progressive 3+569.02 e 2+361.02 (canna di valle), con lunghezze rispettivamente pari a 1786 m e 1208 circa rispettivamente in canna di monte e di valle. Il modello geologico è rappresentato dalle sezioni stratigrafiche , AA' e BB', oltre che dai profili in asse alle due canne. Lo scavo della galleria si sviluppa interamente all'interno del substrato marnoso appartenente alla formazione delle Marne di S. Agata Fossili, con coperture significative, variabili da 60 a 90 metri circa (cfr. figg. 7.6 e 7.7). La sezione interpretativa AA' rileva che le due carreggiate sono entrambe all'interno del substrato marnoso (Marne di S. Agata Fossili, unità 7); i terreni che caratterizzano il versante possono essere così schematizzati dall'alto verso il basso (cfr. fig. 7.8):

- Presenza lungo tutto il versante di spessori ridotti di terreno di riporto e/o vegetale di circa 2/3 metri,
- Presenza lungo tutto il versante di spessori variabili da circa 15 a 30 metri circa di depositi di copertura costituiti da argilla limosa, argilla



*Figura 7.6 – Profilo canna di monte*



*Figura 7.7 – Profilo canna di valle*

- siltosa grigio azzurra, argilla sabbiosa, attribuibili all'unità 5 (depositi pliocenici),
- Presenza lungo tutto il versante di spessori variabili da circa 10 a 30 metri circa di roccia gessifera appartenente alla formazione Gessoso-solfifera (unità 6),
- Quindi il substrato marnoso (Unità 7).

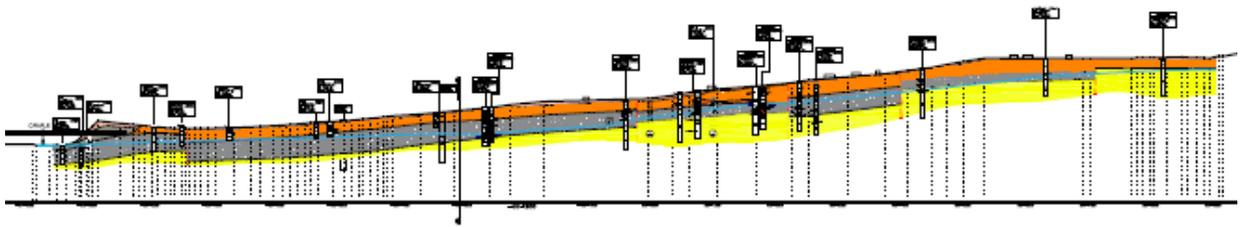


Figura 7.8 – Sezione A-A'

Tutte le analisi hanno consentito di evidenziare che, per questa zona, non ci sono particolari criticità. Lo scavo avviene interamente all'interno del substrato marnoso-argilloso sotto coperture significative. Si evidenzia però che verso il termine della zona, lato Cherasco, lo spessore del substrato marnoso che ricopre la calotta si riduce progressivamente, fino a 5-10 m (oltre che nel tratto, in canna di monte, prossimo alla progr. 1+700). In questa tratta terminale dovrà essere posta particolare attenzione ai cedimenti in calotta galleria, onde evitare che si instaurino richiami verso lo spessore della soprastante formazione gessosa; tale passaggio è l'unico che va affrontato con attenzione anche dal punto di vista idrogeologico. Infatti, in corrispondenza del primo tratto di questo settore è possibile che le marne risentano indirettamente delle fenomenologie carsiche che interessano l'acquifero dei gessi. In pratica, non è possibile escludere che lo scavo della galleria attraverso i primi metri delle marne, in cui la copertura è ridotta, possa potenzialmente determinare il rilascio improvviso di acqua circolante attraverso condotti carsici alla base dell'acquifero dei gessi oppure intrappolata in cavità chiuse e separate dal sistema di circolazione.



Nel resto della tratta della marne invece non si ravvisano particolari criticità, anche perché le maggiori cavità carsiche si localizzano sempre a quote significativamente superiori alle gallerie (10 ÷ 20 m al di sopra della calotta) e in questo caso non sono coinvolte direttamente dagli scavi. Peraltro, la permeabilità delle marne è bassa e, di conseguenza, anche i deflussi previsti nella galleria sono previsti di piccola entità (come illustrato in dettaglio nella Relazione idrogeologica). In compenso, si prevede che i battenti idraulici insistenti sulle due canne della galleria siano piuttosto alti, sebbene variabili in funzione della profondità del tetto del substrato. Dal settore dei gessi, nei primi tratti delle due canne attraverso le marne i battenti sono dell'ordine di 4-5 m, ed aumentano a 45-50 m nel tratto di spartiacque della galleria, raggiungendo valori massimi di quasi 60 m nel tratto precedentemente l'attraversamento del settore dei corpi detritici (cfr. paragrafo successivo). Dopo l'attraversamento del settore dei corpi detritici i battenti si diminuiscono progressivamente da 50 m fino ad un abbattimento totale in corrispondenza del passaggio con il settore dell'imbocco lato Asti.

#### **7.4. ZONA 4 - ZONA DI GALLERIA CON CORPI DETRITICI (GHIAIOSO-SABBIOSI) ALL'INTERNO DEL SUBSTRATO MARNOSO-ARGILLOSO**

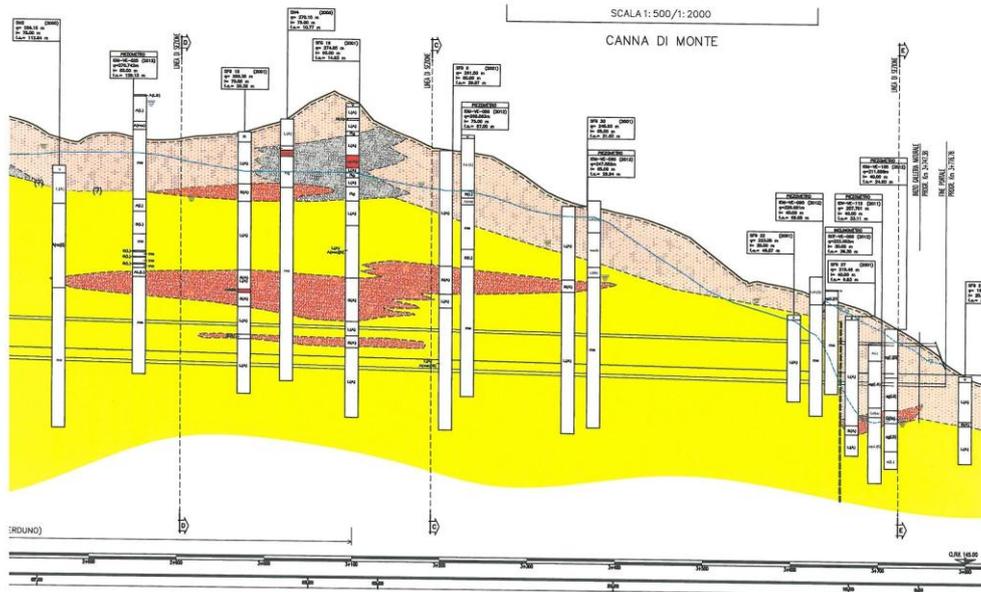
Questa zona è compresa tra le progressive 2+923.88 e 3+657.38 (canna di monte) e le progressive 2+361.02 e 1+346.84 (canna di valle), per un'estensione di circa 733.5 m in canna di monte e 1014 m in canna di valle. In questo settore si sono inserite anche alcune zone ove non si ha, localmente, la presenza di corpi detritici per entrambe le canne; spesso le lenti detritiche sono presenti solo in una delle due canne, specie in quella di valle dove si sono riscontrati corpi di minori dimensioni, ma più diffusi. E' comunque un settore di galleria dove gli avanzamenti dovranno essere condotti con attenzione verso la problematica in questione.

Mentre non vi è un riscontro diretto in affioramento, le varie intercalazioni sono state ricostruite spazialmente attraverso i numerosi sondaggi che le hanno



intercettate in diversi sondaggi ubicati in prossimità del tracciato della galleria: SFG 2, SFG 6, SFG 18, SFG 19, SFG 20, IOV-VE-046, IOV-VE-040(M) e IOV-VE-075(M); inoltre, esse sono state riconosciute attraverso il sondaggio SPE 26-14 nel settore sommitale della collina (nei pressi dell'abitato di Verduno) e dal sondaggio effettuato nell'ambito degli studi realizzati dalla Provincia di Cuneo per la realizzazione della strada di collegamento al Nuovo Ospedale Alba – Bra. Lo spessore complessivo delle lenti rilevato tramite sondaggio varia da 2 m a 20 circa e, come si può osservare anche dai profili geologici e geomeccanici, esse sono fortemente eterogenee lateralmente. Lungo il profilo della canna di monte sono state ricostruite due intercalazioni: una con una lunghezza di poco meno di 300 m è prevista essere intersecata dallo scavo, mentre l'altra con un'estensione complessiva di ca. 500 m è ubicata a distanze variabili sopra la calotta. Lungo il profilo della canna di valle invece i sondaggi hanno dato evidenza della presenza di un numero maggiore di corpi, come detto singolarmente meno estesi di quelli precedenti.

Il modello geologico di riferimento viene rappresentato dai profili longitudinali, in asse alle due canne, e dalle sezioni trasversali lungo il versante CC' e DD'. Lungo i profili longitudinali in asse alle due canne si osserva la presenza, a quota scavo, o poco sopra la calotta, di lenti ghiaioso-sabbiose (Unità 7a), all'interno del substrato marnoso appartenente alla formazione delle Marne di S. Agata Fossili (unità 7); le geometrie di questi corpi detritici sono state definite in base alle nuove indagini (cfr. figg. 7.8 e 7.9). All'interno di questi corpi detritici si rileva la presenza di acqua, talora in pressione, in quanto si ritiene che le lenti, costituite da materiale ad elevata permeabilità, siano idraulicamente alimentate da circolazioni sotterranee; i battenti idraulici, in questa zona di galleria, sono pari a 30-50 m (quindi si hanno 3-5 bar di pressione neutra).

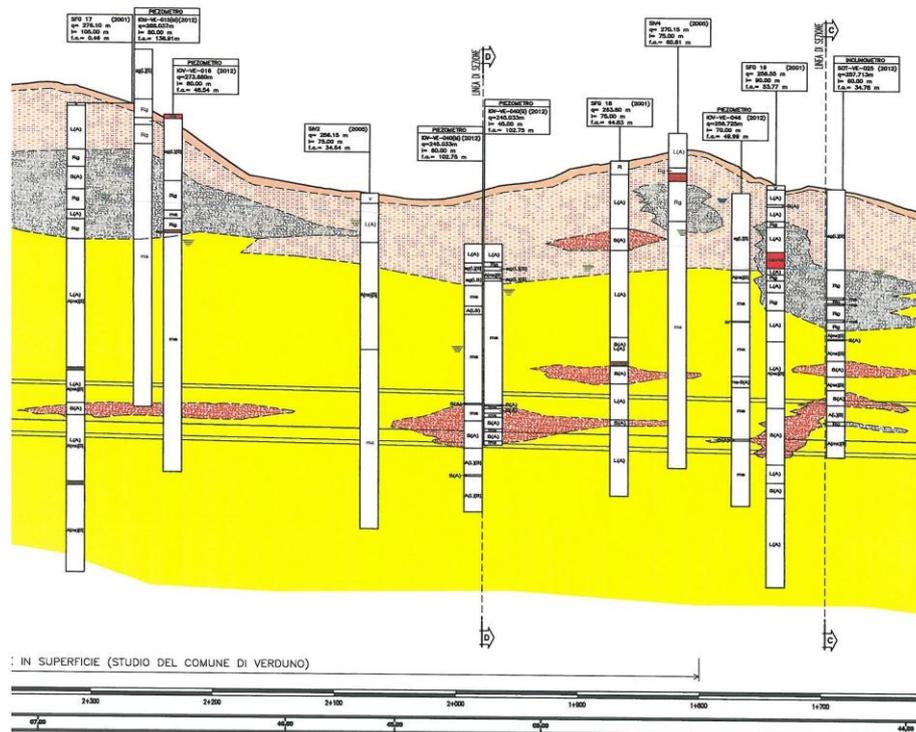


*Figura 7.8 – Profilo canna di monte*

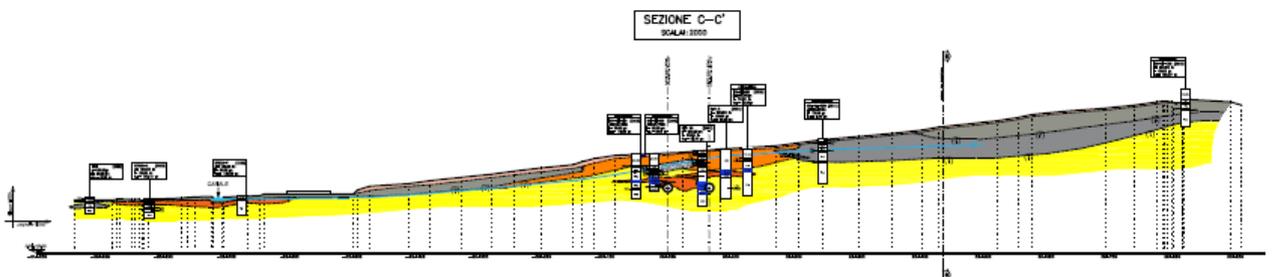
La sezione trasversale CC' evidenzia come le due carreggiate siano entrambe all'interno del substrato marnoso (Marne di S. Agata Fossili, unità 7), con la presenza di lenti di terreno granulare costituite da ghiaie e sabbie; i ricoprimenti sono variabili da 30 a 60 m. I terreni che caratterizzano il versante possono essere così schematizzati, dall'alto verso il basso, (cfr. fig. 7.10 e 7.11):

- Presenza lungo tutto il versante di spessori ridotti di terreno di riporto e/o vegetale di circa 2/4 metri
- Presenza nella parte finale del versante a valle delle due carreggiate e nella parte a monte del versante, di spessori variabili da circa 6 a 25 metri circa (4-15 m, in sezione D-D') di depositi limosi prevalenti costituiti da limi sabbiosi fini localmente argillosi (Unità 4)
- Presenza nella parte centrale del versante, in corrispondenza delle due carreggiate, di spessori variabili da circa 15 a 30 metri circa (15-20 m in sezione D-D') di depositi di copertura costituiti da argilla limosa, argilla siltosa grigio azzurra, argilla sabbiosa, attribuibili all'unità 5 (depositi pliocenici),

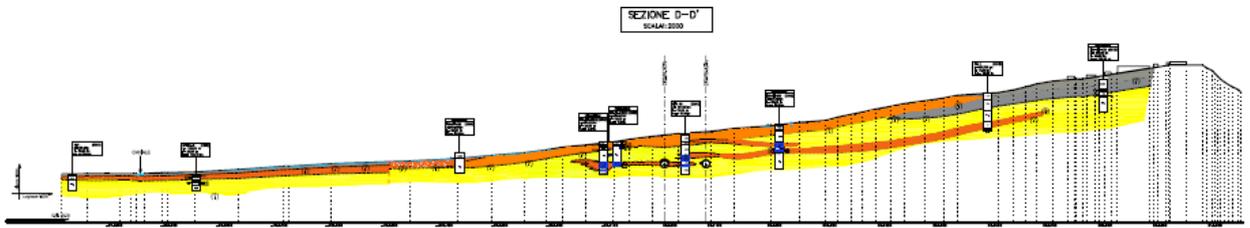
- Presenza nella parte alta del versante e, localmente in corrispondenza della canna di valle, di spessori variabili da circa 15 a 35 metri (15-20 m in sezione D-D') circa di roccia gessifera appartenente alla formazione Gessoso-solfifera (unità 6),
- Quindi il substrato marnoso (Unità 7), con all'interno i corpi detritici sabbio-ghiaiosi (Unità 7a).



*Figura 7.9 – Profilo canna di valle*

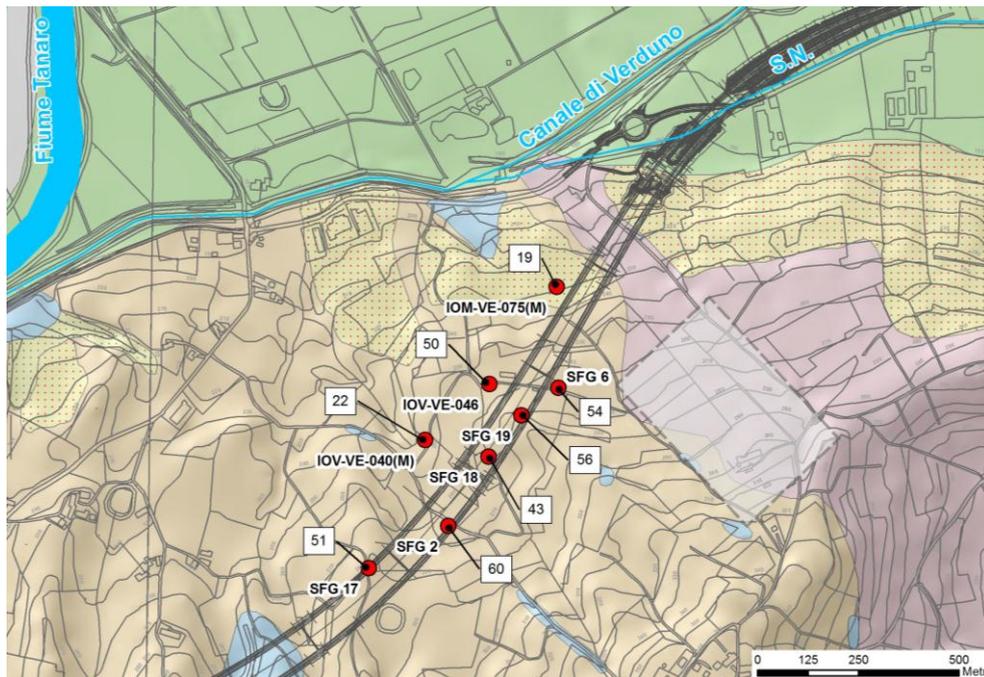


*Figura 7.10 - Sezione C-C'*



*Figura 7.11 – Sezione D-D'*

In corrispondenza delle zone di imbocco lato Alba, nel tratto subito a seguire la zona 5 interessata dai depositi di versante è presente in canna di valle una lente di sabbia, che sarà, procedendo dall'imbocco, il primo elemento di interferenza con lo scavo.



*Figura 7.12 - Carta con ubicazione dei piezometri con fenestrazione nelle intercalazioni detritiche. Il valore riportato è relativo al carico idraulico medio [m] misurato rispetto alla quota di progetto della galleria.*

I corpi detritici ospitano falde in pressione con quote piezometriche anche superiori alla falda libera superficiale, con valori fino a 1 - 3 m dal piano campagna. La Figura 7.12 riporta i valori di carico idraulico medio misurato in ciascun piezometro e previsti alla quota della galleria. Come si può osservare, i valori attesi di carico sono elevati e compresi tra ca. 20 e 60 m dalla quota di progetto. Non è possibile stabilire dai dati piezometrici quale sia il grado di interconnessione idraulica di questi corpi e pertanto non risulta facile effettuare una stima precisa di quanto il drenaggio da parte della galleria possa interessare tali corpi e a quale distanza si possa estendere la perturbazione innescata dal drenaggio. In ogni caso, è importante sottolineare che questi corpi rappresentano un elemento di criticità idrogeologica per le problematiche che la loro intercettazione da parte della galleria comporta a livello di venute d'acqua e materiale fine, oltre ai possibili effetti che il drenaggio da parte della galleria può comportare in superficie in termini di subsidenze o di innesco di fenomeni gravitativi di versante. Va inoltre rimarcato che se la galleria agirà da elemento impermeabile essa potrà originare dei fenomeni di riduzione della sezione di deflusso all'interno delle lenti, con eventuale conseguente aumento dei battenti idrici a monte. Questi effetti sono tuttavia difficilmente stimabili, poiché non è chiara l'entità del flusso all'interno dei corpi detritici.

In questo settore, oltre alla falda delle intercalazioni detritiche sono presenti altri sistemi di circolazione più superficiali. Il principale tra questi è il sistema ospitato negli accumuli misti di frana relativi ai due grandi movimenti franosi che hanno interessato questa porzione di versante (Complesso Idrogeologico 3a). Questi depositi sono misti a coltri di depositi colluviali (Complesso 3b). Questi depositi sono sede di circolazioni con carattere permanente e alimentate direttamente dagli apporti meteorici. La ricostruzione piezometrica fornita nella Carta Idrogeologica di progetto, riproposta in *Figura 7.13*, è relativa a questa falda; si noti come in questa porzione di versante i gessi (che in altri settori invece costituiscono l'acquifero principale) non siano presenti, o circoscritti a blocchi di limitata estensione e ruolo idrogeologico.

Un altro sistema di circolazione a carattere semi-permanente è ospitato all'interno le porzioni di substrato diffusamente interessato da fratturazione ed alterazione. Questo sistema è stato principalmente caratterizzato attraverso lo scavo delle trincee realizzate in questo settore per il progetto di consolidamento del versante, nell'ambito della costruzione del Nuovo Ospedale Alba – Bra. Le misure del monitoraggio piezometrico estese a gran parte del versante, confermano la presenza di livelli idrici superficiali e transitori attestati nell'ambito dei terreni di copertura e del substrato alterato a partire da profondità di - 1/ - 9 m circa da p.c..

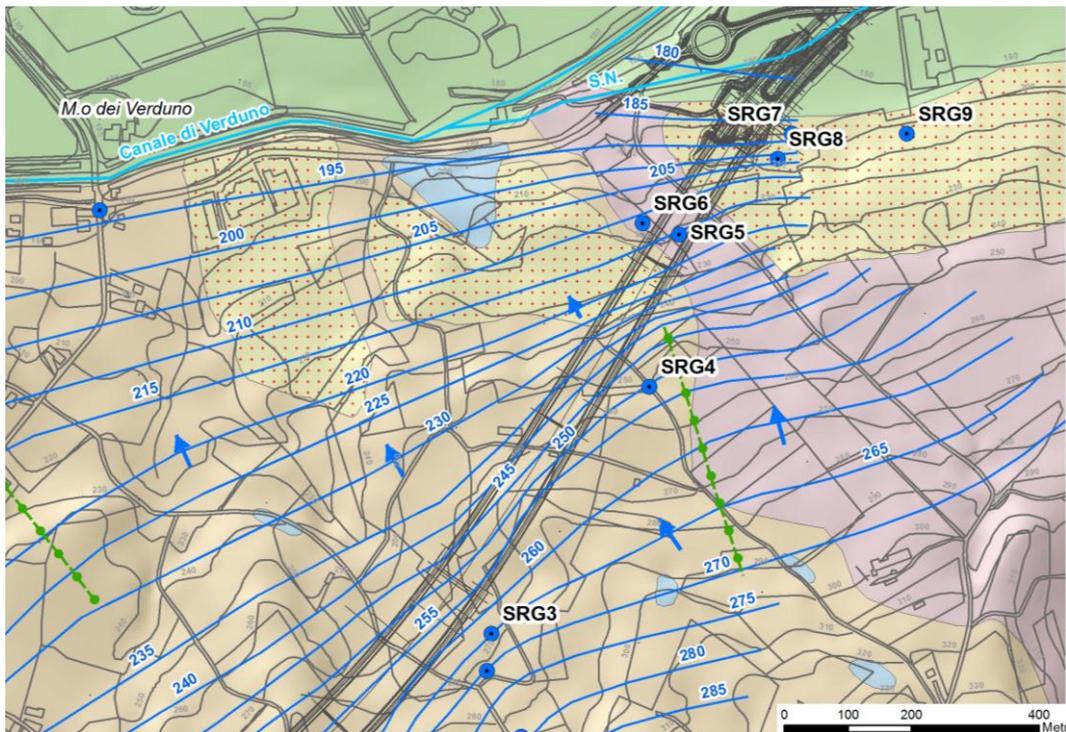


Figura 7.13 - Distribuzione piezometrica del sistema di circolazione principale. Con i cerchi blu è riportata l'ubicazione delle principali sorgenti di questo settore

Dai profili geologici previsionali lungo il tracciato del tunnel e dalle indicazioni idrogeologiche a disposizione non vi sono gli elementi per supporre che vi sia una connessione diretta tra i sistemi di circolazione più superficiali e quello profondo localizzato nell'acquifero dei corpi detritici. Questa considerazione

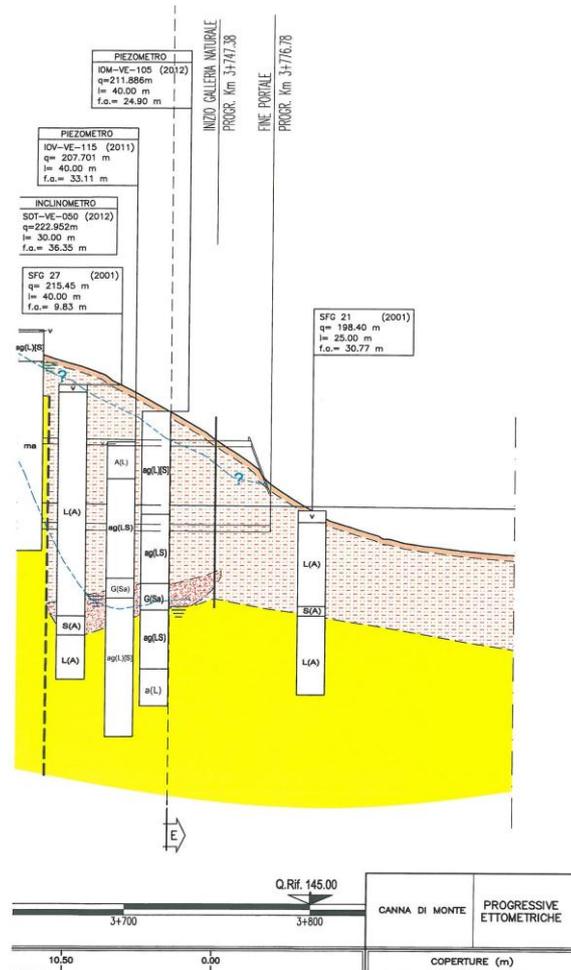
deriva anche dalla constatazione del diverso livello piezometrico che caratterizza gli acquiferi superficiali e quello profondo. Tuttavia, non è possibile escludere che lungo il versante vi siano delle zone di limitata intercomunicazione idraulica, specialmente nelle zone in cui il substrato è maggiormente fratturato.

#### **7.5. ZONA 5 – IMBOCCO LATO ALBA**

Questa zona si trova coinvolta nella realizzazione delle opere di imbocco della galleria, e dal punto di vista geologico ricade in un settore di versante ampiamente indagato sia dagli studi eseguiti per progettazione esecutiva sia dagli studi eseguiti per la realizzazione del nuovo Ospedale e della relativa strada di accesso, opere che insistono sul medesimo versante, circa 600 metri a monte dell'imbocco della galleria. La lunghezza della zona è pari a 90 metri per la canna di monte (progressiva 3+747.38) e pari a circa 160 metri per la canna di valle (progressiva 1+159.02).

Per la ricostruzione dell'area sono state utilizzate le stratigrafie dei sondaggi, le indagini geofisiche e gli studi pregressi eseguiti (anche il progetto del costruendo ospedale e della strada di accesso all'ospedale). Il modello geologico è nel dettaglio rappresentato da una serie di sezioni, due lungo i profili litologico-stratigrafici delle due canne della galleria, una (sezione EE') trasversale all'imbocco ed infine una (sezione GG') disposta lungo la massima pendenza del versante. Lungo i profili longitudinali in asse alle due canne si osserva la presenza di una copertura detritica, costituita da argilla limosa, argilla sabbiosa, argilla limosa con sabbia e presenza di lenti granulari a componente ghiaioso-sabbiosa prevalente, attribuibili a coltri di frana (unità 4), per uno spessore di circa 20-35 metri, poggiante sul substrato marnoso della formazione delle Marne di S. Agata Fossili (Unità 7) (cfr. figg. 7.14 e 7.15). La sezione EE', trasversale all'imbocco, rileva che le due carreggiate si trovano interamente all'interno dei depositi detritici di copertura, costituita da argilla limosa, argilla sabbiosa, argilla limosa con sabbia (attribuibili all'unità 4), e

presenza di lenti granulari a componente ghiaioso-sabbiosa prevalente, poggianti sul substrato marnoso (Marne di S. Agata Fossili); i terreni che caratterizzano il versante possono nel dettaglio essere così schematizzati, dall'alto verso il basso (cfr. fig. 7.16):



*Figura 7.14 – Profilo canna di monte*

- Presenza di spessori ridotti di terreno di riporto e/o vegetale di circa 2/4 metri,
- Presenza lungo il versante, di spessori variabili da circa 4 a 15 metri circa di depositi limosi prevalenti costituiti da limi sabbiosi fini localmente argillosi,



è stato interessato dagli scavi per la costruzione del Nuovo Ospedale; si evidenzia inoltre la presenza di una lente di roccia gessifera nella parte alta del versante, di spessori variabili da 5 a 30 metri circa (cfr. fig. 7.17).

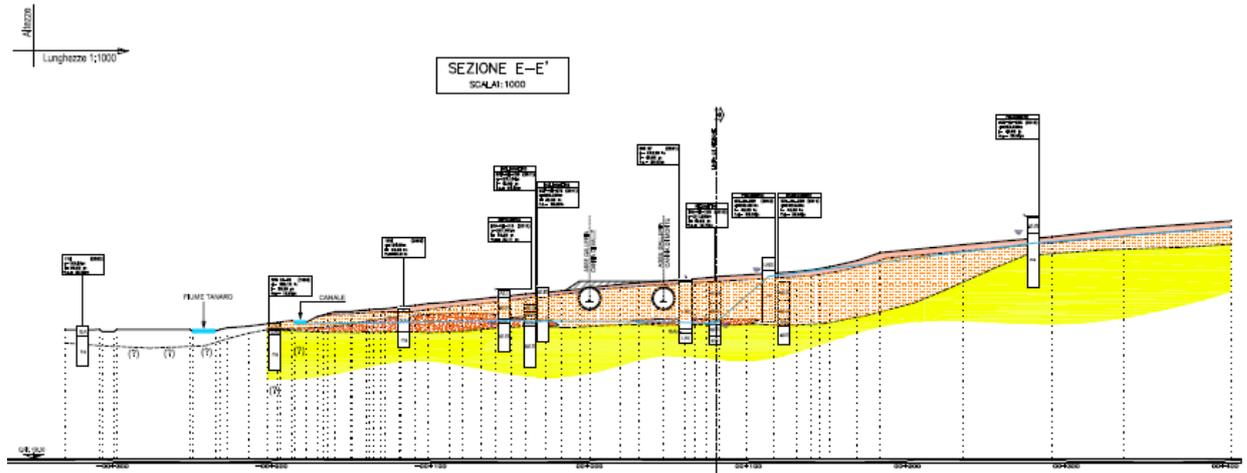


Figura 7.16 – Sezione E-E' (trasversale imbocco)

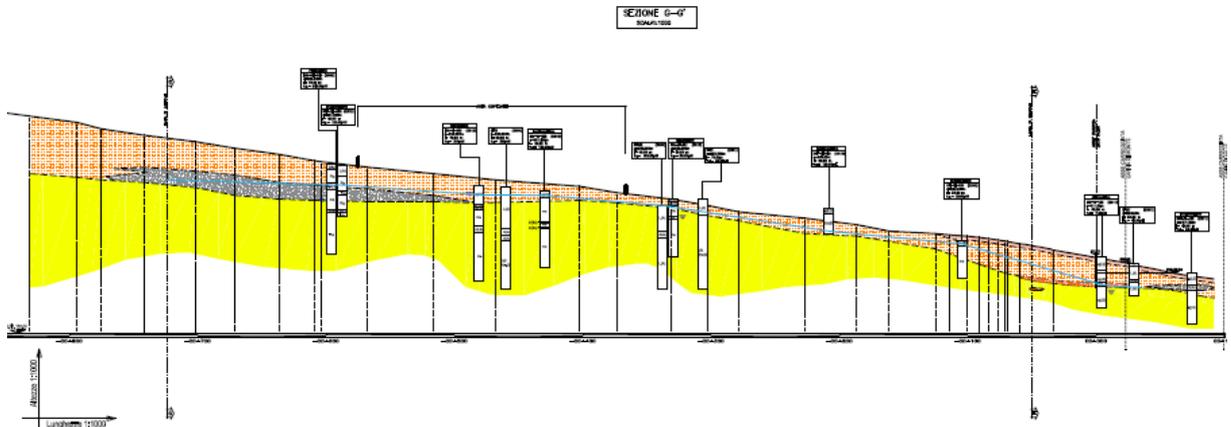
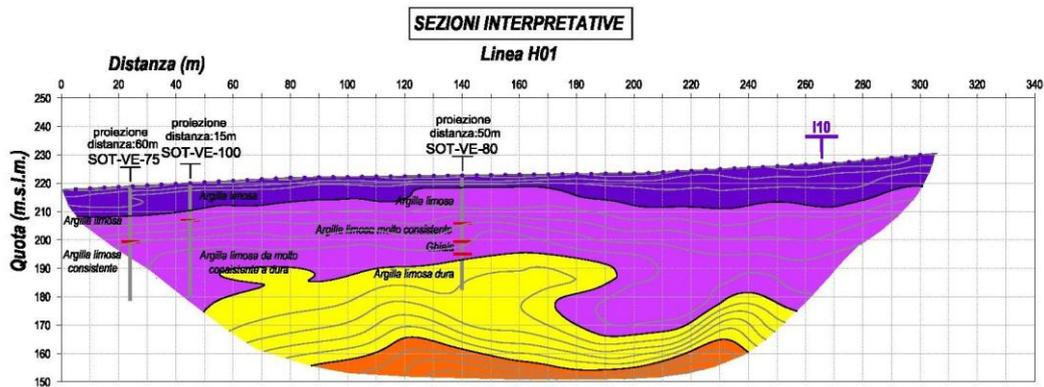


Figura 7.17 – Sezione G-G'

Anche le indagini geofisiche, come mostrato nell'elaborato di dettaglio "Sezioni geologiche lato Asti" (documento D.2.1.20), indicano la presenza di importanti accumuli di terreno argillo-limoso, come riportato in Figura 7.18. Dal punto di vista geomorfologico, questa zona di galleria, appare molto critica in considerazione della presenza dei depositi di frana che interessano il pendio

per 70-80 m a monte dall'inizio della galleria naturale. Questi fenomeni di dissesto vengono censiti, con geometrie del tutto simili a quelle riportate nella carta geomorfologica di progetto (cfr. fig. 7.19), sia nell'inventario IFFI-ARPA, come scivolamento rotazionale-traslattivo, sia come frana quiescente, nel censimento PAI aggiornato.



*Figura 7.18 – Sezione G-G' (indagini sismica)*

Nell'analisi di questo settore è indispensabile ricordare che, a monte dell'imbocco è presente l'area interessata dalla costruzione del nuovo ospedale, interessata da una serie di trincee con segni evidenti di instabilità diffuse. Tali fenomeni si sono determinati in seguito alle prime fasi di costruzione dell'ospedale stesso. Gli scavi hanno interessato direttamente il substrato marnoso, che, in questo settore corticale, ha mostrato alterazioni diffuse e la presenza di piani di scorrimento traslativi localizzati entro i giunti di strato al contatto tra livelli di marna e livelli di sabbia, sabbia-limosa. Durante i lavori si sono riscontrati movimenti significativi nel versante, che hanno portato a rivedere le modalità di esecuzione degli scavi e le opere di stabilizzazioni. Quest'area non è ad oggi segnalata in letteratura come area soggetta ad instabilità, anche se sono evidenti scarpate e nicchie di distacco.

Il monitoraggio in atto nella zona di imbocco e nel versante retrostante, mediante inclinometri profondi, indica spostamenti prevalentemente superficiali, interessanti i primi 4-5 m da quota campagna, di entità millimetrica. Alcuni

movimenti, sempre di entità millimetrica, sono presenti a profondità superiori ma devono essere oggetto di verifica nelle misure future, mostrando un'oscillazione dei dati che potrebbe anche essere ricondotta a tolleranze strumentali. Si riporta a titolo esemplificativo l'inclinometro SOT-VE-050, all'interno del quale sono stati registrati movimenti pari a circa 8 mm a circa 3 metri di profondità.

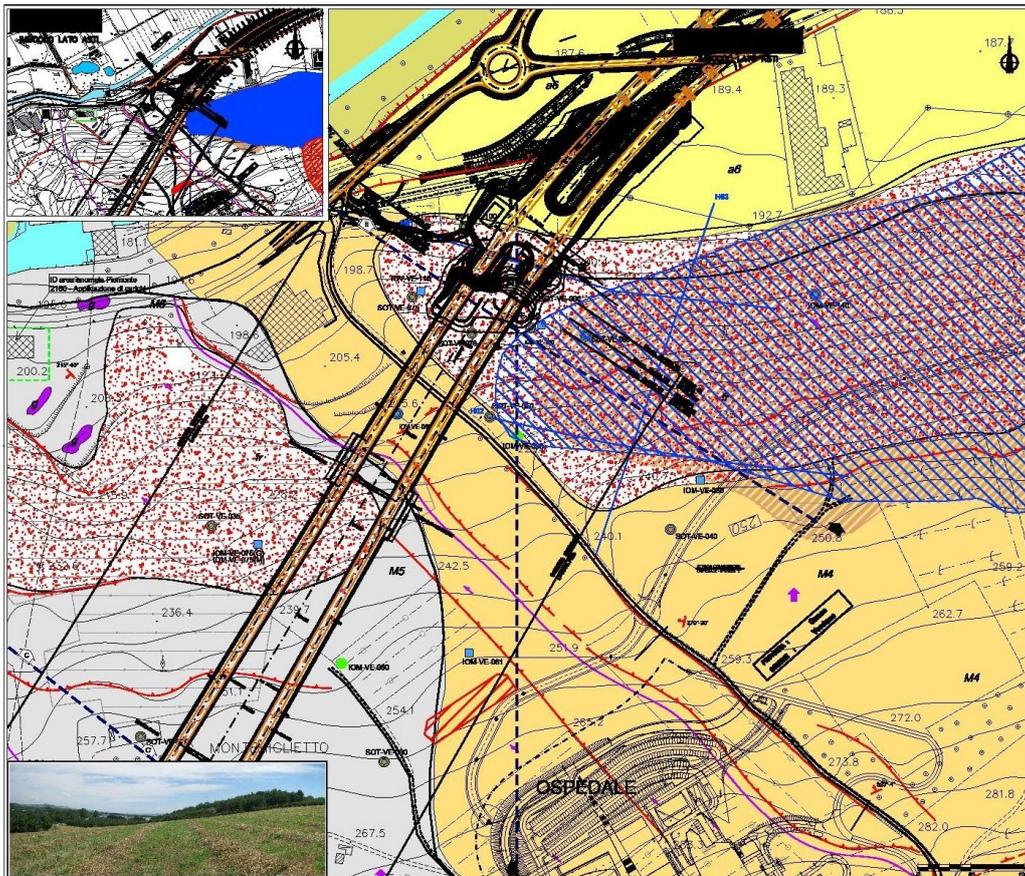


Figura 7.19 – Planimetria inquadramento Imbocco Alba

Nell'area dell'imbocco lato Alba, il sistema di circolazione principale è localizzato negli estesi affioramenti di terreni rimaneggiati per frana e nei depositi colluviali, oltre che nelle porzioni di substrato alterato e diffusamente fratturato. In questo settore le due canne della galleria attraversano le coltri di depositi superficiali; l'interazione principale dello scavo avviene quindi con le falde acquifere superficiali. Dalla revisione dei dati piezometrici relativi alle

campagne di monitoraggio 2001-2002 e 2011-2012 emerge una distribuzione dei livelli di falda come quella mostrata in *Figura 7.13*, senza particolari oscillazioni causate da apporti meteorici. Ciò che si desume da questa ricostruzione è che la falda drena verso l'alveo recente del F. Tanaro registrando un aumento importante del gradiente idraulico. Un'interpretazione è che il gradiente aumenti per una riduzione della trasmissività della falda, causata da una riduzione del deflusso sotterraneo. Una riduzione potrebbe essere giustificata dal fatto che nella parte intermedia del versante (sopra all'imbocco), buona parte del deflusso sotterraneo viene probabilmente diretto verso le numerose sorgenti presenti. Sebbene, dai documenti di progetto del Nuovo Ospedale Alba-Bra, relativi all'osservazione di centraline automatiche nel periodo marzo 1999 – marzo 2003, emerga, come più in dettaglio descritto nella Relazione idrogeologica, che nel settore limitrofo all'ospedale vi è una falda che in occasioni di particolari eventi meteorici reagisce con incrementi significativi di livello idraulico, nel settore dell'imbocco i livelli piezometrici non subiscono variazioni altrettanto significative (almeno nell'intervallo di tempo in cui è stato effettuato il monitoraggio). Questo potrebbe essere dovuto alla presenza di numerose emergenze idriche poste sopra l'imbocco che, in presenza di precipitazioni intense, si potrebbero comportare come dei "troppo pieni" in grado di smaltire una parte sostanziale di deflusso, preservando le parti più basse del versante da sostanziali innalzamenti. In ogni caso, cautelativamente, nelle analisi di stabilità delle opere di imbocco si sono considerate risalite temporanee della falda fino a -6 m da piano campagna.

## 8. DEFINIZIONE DELLE CRITICITA', DEGLI SCENARI DI RISCHIO E DEFINIZIONE DELLE SOLUZIONI PROGETTUALI

L'analisi del modello geologico-geotecnico predisposto per ciascuna zona omogenea ha consentito di evidenziare le criticità e le problematiche da affrontare in ambito progettuale, individuando i possibili scenari di rischio, dal più probabile al meno probabile, e le conseguenti azioni di progetto. In questo capitolo si illustra questo processo di analisi delle problematiche e di scelta delle soluzioni progettuali più adeguate per risolverle o gestirle, in corso d'opera, anche in funzione delle evidenze raccolte durante lo scavo della galleria e di quanto emerso dal sistema di monitoraggio predisposto. Tali informazioni, insieme agli esiti delle analisi numeriche descritte al capitolo 8 e, più in dettaglio, nelle relazioni specialistiche, consentiranno la predisposizione delle linee guida per la redazione del "Piano delle Emergenze", specificatamente richiesto nell'ambito delle prescrizioni del DEC VIA 576/2011 (punto 2.49). L'esame delle criticità e delle soluzioni progettuali verrà affrontato per ciascuna zona omogenea.

### 8.1. ZONA 1 - ZONA DELL'IMBOCCO LATO CHERASCO

Le ricostruzioni geologiche eseguite rilevano, nella zona in esame, le seguenti criticità:

- la presenza di depositi di copertura con propensione al dissesto, così come per l'imbocco lato Alba (pur non avendo riscontrato, in quest'area della collina di Verduno, chiare evidenze di scarpate di frana o di nicchie di distacco);
- l'interferenza delle opere in costruzione con la formazione dei gessi, e quindi con le problematiche legate alla presenza di cavità: i fenomeni di dissoluzione e la circolazione dell'acquifero in esso contenuto. In particolare, occorrerà valutare l'escursione della falda a seguito delle lavorazioni condotte e gli effetti sull'equilibrio idrogeologico preesistente.

Gli scenari di rischio ad essi correlati sono quindi associati:

- al verificarsi di fenomeni di dissesto nei versanti a monte delle opere di imbocco, a seguito delle lavorazioni ed in particolare degli scavi per la realizzazione dei fronti di attacco delle gallerie; va valutato, in particolare, il rischio di innesco di superfici di scorrimento profonde;
- il prodursi di danni agli edifici ed ai manufatti presenti a tergo dell'imbocco, in particolare alla cascina in località Rivalta;
- l'interessamento di cavità carsiche che possano rendere non efficienti le opere di stabilizzazioni per la realizzazione degli imbocchi (in primis la esecuzione dei tiranti di contrasto delle paratie di imbocco);
- l'interessamento di cavità carsiche con il rischio di intercettare sacche d'acqua e di sedimenti fini intrappolati in cavità carsiche non connesse (o solo parzialmente connesse) con il resto del sistema di circolazione. Infatti, anche a fronte delle numerose indagini svolte in questo settore e degli studi idrogeologici svolti, non è possibile escludere del tutto che le opere per la costruzione della galleria attraversino questi sistemi chiusi liberando improvvisamente volumi d'acqua e di materiale fine.

Al fine di limitare le ripercussioni sui versanti interessati dalla realizzazione delle opere si è, in progetto, cercato di limitare gli scavi a cielo aperto, ovvero si sono ridotte le geometrie di sbancamento, specie non protette da specifiche opere di sostegno. Confermando la soluzione di Progetto Definitivo si è avanzata la posizione dell'imbocco della galleria naturale, ubicandolo alle progr. 0+559.88 per la canna di monte e 4+263.60 pr la canna di valle. Per l'attraversamento del tratto di galleria tra le progr. 0+615 – 0+731 (canna di monte) e 4+217.70 – 4+103.20 (canna di valle), dove i ricoprimenti non sono sufficienti a condurre uno scavo a foro cieco (non essendo presenti i necessari ricoprimenti in calotta), si è previsto l'impiego di una protesi in misto stabilizzato, così da



evitare la realizzazione delle importanti opere di sbancamento qualora si fosse impostato l'imbocco della galleria naturale direttamente alle progr. 0+731 e 4+103.

Quali opere di sostegno degli scavi per la realizzazione dell'imbocco si è previsto l'impiego di pali di diametro 1200 mm, contrastati da tiranti in trefoli, così da garantire una adeguata rigidità delle opere di sostegno e minimizzare le deformazioni del versante a tergo dell'imbocco. Inoltre, per evitare il prodursi di instabilità delle coltri superficiali, si sono ridotte le altezze di sbancamento in assenza di opere di sostegno (altezza massima pari a 5 m) e soprattutto si sono adottate, anche in fase provvisoria, pendenze di sbancamento più ridotte, pari a 2 (verticale) su 3 (orizzontale), rispetto a quanto si è soliti fare.

Per la gestione delle eventuali pressioni idrauliche a tergo delle opere di sostegno, si è prevista la posa in opera di drenaggi, di lunghezza pari a 20.0 m, realizzati in fase di ribasso degli scavi dell'imbocco nell'interspazio dei pali, così come i tiranti di contrasto. Per il dettaglio si rimanda all'elaborato D.2.3.2.27 "Paratia di imbocco – Sviluppata opere di sostegno".

Per quanto riguarda il rischio di intercettare cavità carsiche il progetto si è messo su due direzioni principali: la prima è quella di prevedere un adeguato sistema di monitoraggio di tipo geofisico, per cercare di individuare, in anticipo rispetto alla realizzazione delle opere, le eventuali cavità presenti. In particolare, con riferimento all'elaborato D.2.3.2.48 "Intervento tipologico per l'individuazione delle cavità", si è prevista la realizzazione di coppie di perforazioni di lunghezza pari a 22-24 m, disposte ai lati della sagoma delle gallerie, dai quali eseguire indagini tipo cross-hole. Questo ad integrazione di quanto già eseguito da piano campagna mediante la campagna sismica; ulteriori investigazioni saranno anche condotte in avanzamento dal fronte di scavo, sia per le tratte in tradizionale (drenaggi al contorno con valore di prospezioni), sia per lo scavo in meccanizzato (sistemi di rilevamento geoelettrico, tipo BEAM System, ed eventuali perforazioni).

La seconda è quella di mettere a punto metodologie di gestione delle cavità intercettate, principalmente realizzandone un riempimento controllato, mediante specifiche perforazioni attrezzate con tubi in PVC valvolati.

Per quanto attiene alle metodologie di riempimento delle cavità, in ambito opere di imbocco la principale problematica è rappresentata dalla realizzazione dei bulbi di ancoraggio dei tiranti, la cui non perfetta esecuzione, a causa di possibili cavità, può determinare una riduzione di efficienza del contrasto sulla paratia. Per questo motivo l'esecuzione dei bulbi dovrà avvenire mediante due passate di iniezione; la prima di riempimento a gravità (pressioni di mandata di 2-3 bar), con verifica sia dei volumi iniettati sia delle pressioni residue a fine riempimento (si dovrà in particolare riscontrare, verso il termine della fase di riempimento, un aumento progressivo delle pressioni fino a valori di 8-10 bar). Verrà poi effettuata una seconda fase di iniezione, ad alta pressione (pressione di mandata 15-25 bar), attraverso le valvole disposte ad interasse di 1.0 m lungo il tratto di bulbo del tirante. Qualora, in presenza di una cavità dal volume rilevante in relazione alla geometria dell'ancoraggio, non si riesca durante la prima fase di riempimento a riscontrare pressioni residue significative, occorrerà eseguire il riempimento in più passate, così da evitare che si verifichi il rifluimento di miscela di iniezione lontano dalla zona del bulbo attraverso spaccature nella roccia o condotti carsici. In ogni caso tutti i tiranti dovranno essere sottoposti a collaudo secondo le prescrizioni contenute nelle "Raccomandazioni AICAP", così da verificare puntualmente la tenuta dell'ancoraggio per i valori di azioni previste a progetto.

## **8.2. ZONA 2 - ZONA DI GALLERIA INTERESSATA DALL'ATTRAVERSAMENTO DELLA ZONA DEI GESSI**

Gli studi geologici ed idrogeologici condotti in questo settore di galleria, dove principalmente si sono rivolte le richieste di approfondimenti nell'ambito del DEC VIA 576/2011, hanno evidenziato le seguenti criticità:

- la presenza di un ammasso gessoso, spesso non compatto bensì brecciato, con la presenza, rilevate sia dai sondaggi che dalle indagini geofisiche, di cavità dell'ordine metrico, non localizzabili a priori. L'ammasso gessoso può presentarsi o sotto forma di gesso cristallino, o sotto forma di sedimenti sciolti, in parte già soggetti a fenomeni di dissoluzione, o sotto forma di gesso brecciato o ancora sotto forma di una roccia gessifera caratterizzata da microcavità; quindi occorre aspettarsi una notevole variabilità litologica e soprattutto riguardo alle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso;
- la presenza di possibili cavità, non identificabili a priori, che possano condizionare le modalità di avanzamento in galleria; inoltre la consapevolezza che, a fronte delle numerose indagini svolte in questo settore e dello studio idrogeologico dettagliato svolto, non è tuttavia possibile escludere del tutto che il tunnel intercetti sacche d'acqua e di sedimenti fini intrappolati in cavità carsiche non connesse (o solo parzialmente connesse) con il resto del sistema di circolazione.
- la circolazione di acqua all'interno della formazione e la sua interferenza con le attività di scavo.
- all'interno dell'ammasso gessoso si verificano fenomeni di dissoluzione con la conseguente formazione di acque aggressive per la presenza di solfati; questo costituisce, senza dubbio, una esposizione particolarmente severa per i rivestimenti definitivi, ancorché protetti in calotta dal telo di impermeabilizzazione.
- la circolazione d'acqua favorisce inoltre la progressiva dissoluzione dei gessi tale da comportare una riduzione del volume dell'ammasso e quindi potenziali cedimenti differenziali che potrebbero risultare deleteri per il rivestimento delle gallerie, realizzato in conci prefabbricati.

Gli scenari di rischio ad essi correlati sono quindi associati:

- a situazioni di instabilità dei fronti di scavo in ragione del repentino peggioramento delle caratteristiche geomeccaniche, non del tutto preventivabili a causa della variabilità delle caratteristiche geomeccaniche; tale situazione può generare, in ragione delle non elevate coperture, pari a 10-30 m, significativi risentimenti a piano campagna;
- a possibili rilasci del fronte di scavo o richiami verso strutture carsiche poste al contorno del cavo galleria a causa dell'intercettazione di cavità, vuote o con sacche d'acqua e/o di sedimenti fini; il tutto con risentimenti verso la superficie topografica; con riferimento all'impiego di una TBM-EPB la perdita del materiale condizionato in camera di scavo con riduzione/annullamento della pressione di confinamento del fronte di scavo;
- a possibili rilasci dei fronti della galleria per trascinarsi di porzioni di ammasso a causa di ingenti venute d'acqua in galleria, specie nella fase transitoria subito a seguito dell'intercettazione di sacche o in concomitanza ad eventi meteorici intensi;
- a risentimenti in superficie, in termini di subsidenza, a causa dell'azione di drenaggio operata dalla galleria;
- difficoltà nel mantenimento dell'assetto della TBM, durante gli avanzamenti, qualora vengano intercettate cavità carsiche o strati di ammasso in avanzata fase di dissoluzione;
- cedimenti del cavo della galleria, connessi alla dissoluzione di porzioni di ammasso ubicate in corrispondenza delle gallerie, specie al di sotto dell'arco rovescio.

Quindi lo scenario di rischio principale è che lo scavo della galleria possa generare risentimenti significativi a piano campagna, quali depressioni, sprofondamenti, nuovi inghiottitoi a causa di rilasci dei fronti di scavo in sotterraneo per eventi imprevisti, quali zone di ammasso gessoso estremamente scadenti, intercettazione di cavità, vuote o riempite di acqua e/o materiale fine, ingenti venute d'acque.

A questo scenario principale si aggiunge il rischio che circolazioni preferenziali di acqua a tergo dei rivestimenti possano nel lungo termine generare la formazione di cavità a tergo del cavo della galleria o cedimenti delle gallerie stesse, nonché che l'aggressività delle acque, a causa della dissoluzione dei gessi, possano minare la durabilità dei calcestruzzi dei rivestimenti definitivi.

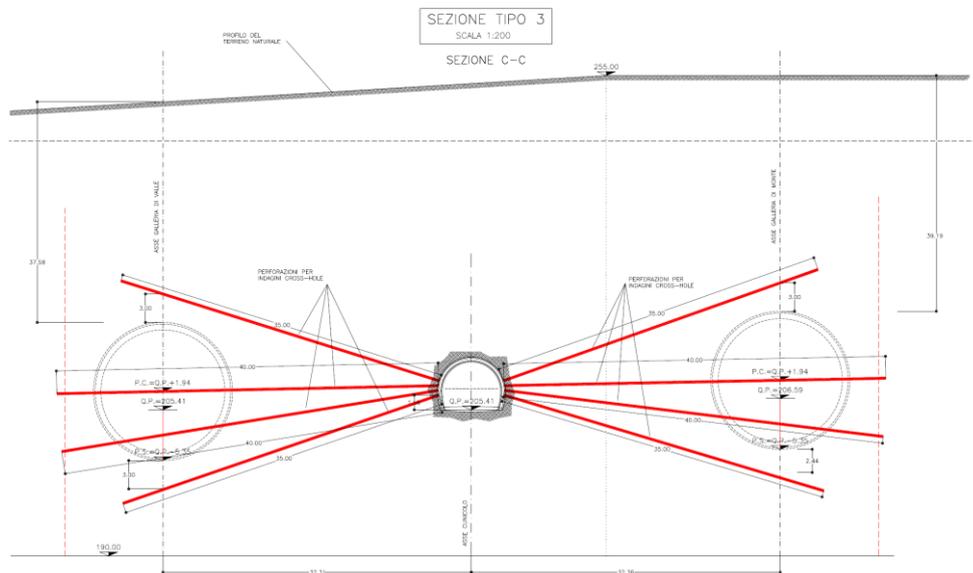
Per quest'ultimo aspetto, il progetto, ipotizzando una classe di esposizione XA3, ha previsto una idonea classe di resistenza del calcestruzzo, a prescindere dal tasso di lavoro del materiale: si è impiegato cls di classe minima C35-45 (i conci prefabbricati sono realizzati con cls C40-50). Si è inoltre operata la scelta di realizzare un by-pass drenante, eseguito a partire dalla galleria ed ubicato in corrispondenza del contatto tra la formazione dei gessi (Unità 6) e la sottostante formazione delle marne (Unità 7), come rappresentato in dettaglio nell'elaborato "By-pass drenante", documento D.2.2.82. Il by-pass risulta attrezzato con raggiere di dreni così da intercettare il flusso d'acqua sotterraneo ed evitare circolazione in corrispondenza della galleria.

La problematica principale, legata al rischio di risentimenti a piano campagna a fronte di imprevedibilità nella gestione degli scavi, specie nell'intercettamento di cavità, è stata invece affrontata progettualmente predisponendo:

- 1) la realizzazione di un cunicolo, ubicato nel setto tra le due canne, con la finalità di diagnosticare in maniera precoce la presenza di cavità o criticità interessanti il fronte di scavo e la fascia ubicata al di sotto dell'arco rovescio della galleria, e procedere al loro riempimento mediante iniezione di miscele cementizie;
- 2) l'impiego, per la realizzazione della galleria, di una TBM, del tipo EPB, con fronte in pressione, in grado di garantire un adeguato confinamento del fronte di scavo e quindi condizioni di stabilità in avanzamento;
- 3) la predisposizione in superficie di una rete di monitoraggio ambientale e strutturale in grado di segnalare tempestivamente eventuali movimenti incipienti del piano campagna (rete topografica), movimenti in profondità

(inclinometri) o variazioni significative delle quote di falda (rete di controllo piezometrico).

Nella seguente figura 8.1 si riporta lo schema delle indagini in avanzamento per il settore di galleria interessato dai gessi (il dettaglio è riportato anche nell'elaborato grafico D2.3.1.15); si tratta di indagini sismiche di tipo cross-hole. Si prevede la predisposizione di 4 perforazioni, dirette verso l'area interessata dallo scavo della galleria, una in calotta, una al piano dei centri e due in arco rovescio, di lunghezza variabile tra 25 e 40 m, disposte ad interasse longitudinale di 10-12 m.



*Figura 8.1 – Indagini dal cunicolo esplorativo*

I dettagli di questo sistema di monitoraggio sono riportati nella “Relazione di monitoraggio”, alla quale si rimanda per maggiori informazioni. Ulteriori investigazioni sono previste direttamente dal fronte di scavo in avanzamento, mediante esecuzione sistematica di perforazioni a distruzione dal fronte di scavo nei tratti scavati con metodo tradizionale in corrispondenza degli imbocchi (con rilevazione dei principali parametri di perforazione, come la velocità di perforazione, la coppia di rotazione ...) e mediante indagini di tipo geoelettrico (tipo BEAM System) durante lo scavo meccanizzato.

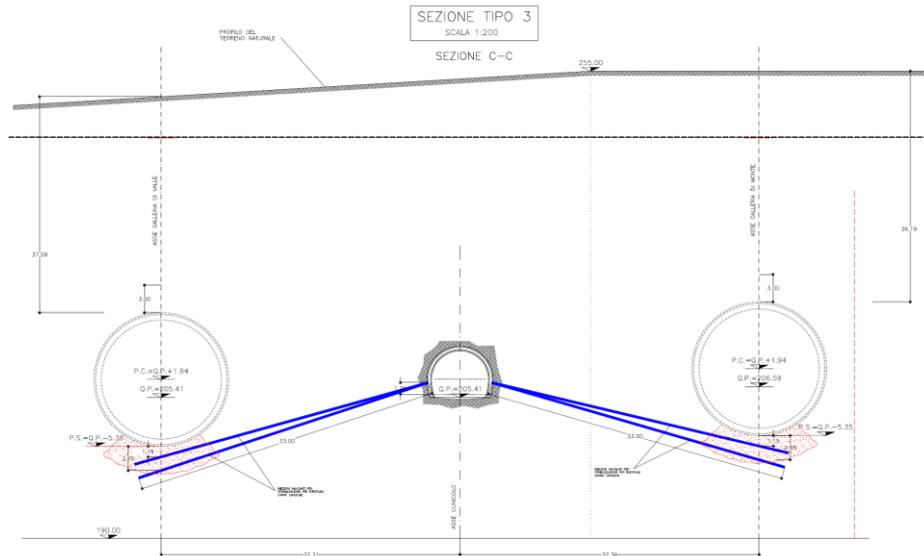
Una volta individuata la presenza della cavità (vuota, con riempimento, con acqua ...), e soprattutto le sue presunte geometrie, a livello operativo, l'intervento da prevedersi consiste unicamente nell'intasamento e cementazione delle cavità stessa. Le fasi esecutive sono le seguenti:

1. Individuazione e valutazione geometrica della cavità
2. Asportazione dell'eventuale acqua in essa contenuta
3. Riempimento con cls magro o miscela cementizia
4. Verifica dell'avvenuto riempimento

Il pompaggio avverrà a bassa pressione, da tubi in PVC inseriti in apposite perforazioni, impiegando miscele d'intasamento che offrano contestualmente le seguenti caratteristiche:

- sufficiente fluidità per la fase di pompaggio;
- medio-elevati valori di resistenza, sviluppata entro poche ore dalla messa in opera;
- debole espansività;
- rapido indurimento.

La metodologia e la successione delle fasi esecutive sono descritte nell'elaborato D.3.1.16; nella seguente figura 8.2. si riporta un esempio di schema operativo relativo alla zona di ammasso posta al di sotto della base del rivestimento della galleria, per la quale saranno anche condotte, se necessario, iniezioni di miglioramento delle caratteristiche di ammassi in eventuale fase di dissoluzione.



*Figura 8.2 – Esempio di interventi di riempimento*

### 8.3. ZONA 3 - ZONA DI GALLERIA ALL'INTERNO DEL SUBSTRATO MARNOSO-ARGILLOSO

In questo settore di galleria non si ravvisano particolari criticità. L'attenzione andrà posta principalmente nel primo settore, a contatto della zona 2, dei gessi. Lo spessore del substrato marnoso, che ricopre la calotta, si riduce in questo tratto fino a 5-10 m (oltre che nel tratto, in canna di monte, prossimo alla progr. 1+700). Dovrà essere posta particolare attenzione ai cedimenti in calotta galleria, onde evitare che si instaurino richiami verso lo spessore della soprastante formazione gessosa; tale passaggio è l'unico che va affrontato con attenzione anche dal punto di vista idrogeologico. Le cavità carsiche, assai diffuse a piano campagna in questo settore di galleria, ricadente nel Comune di Verduno, si localizzano sempre a quote significativamente superiori alle gallerie (10 ÷ 20 m al di sopra della calotta) e in questo caso non sono coinvolte direttamente dagli scavi.

#### **8.4. ZONA 4 - ZONA DI GALLERIA CON CORPI DETRITICI (GHIAIOSO-SABBIOSI) ALL'INTERNO DEL SUBSTRATO MARNOSO-ARGILLOSO**

Il modello geologico di previsione, descritto al capitolo 7.4, evidenzia le seguenti criticità:

- innanzitutto la presenza di corpi detritici, costituiti da ghiaie e sabbie, all'interno del substrato marnoso-argilloso a bassa permeabilità, a quota galleria o comunque nell'interno del cavo; tali corpi detritici sono saturi con acqua in pressione fino a 2-6 bar;
- a monte del versante si osserva la presenza diffusa di ammasso gessoso, spesso in blocchi disarticolati lungo il versante, all'interno del quale sono state osservate le numerose doline rilevate dal censimento del Comune di Verduno. Nella zona sovrastante la galleria, fino al fondo valle del Tanaro, si evidenzia invece la presenza dei depositi di frana e dei depositi colluviali.

Gli scenari di rischio, connessi alla presenza di questi corpi detritici all'interno del substrato marnosi, sono principalmente da associarsi alla loro mutua interferenza con gli avanzamenti in galleria: da un lato i corpi detritici possono infatti influire negativamente sulle condizioni di stabilità del nucleo-fronte e del cavo, qualora intercettati durante lo scavo della galleria senza preventivi interventi di confinamento del cavo. Dall'altra, gli stessi corpi detritici possono subire modifiche del loro assetto, specie delle pressioni idrostatiche in esse contenute, qualora, pur in assenza di interferenza diretta con il fronte di scavo della galleria, subiscano variazioni del contenuto d'acqua per effetto di un'azione di drenaggio operata dalla galleria o, più semplicemente, siano soggetti a deformazioni o cedimenti per effetto a causa dei volumi persi in fase di scavo della galleria.

Tale interferenza in sottterraneo determina, quale scenario collaterale, il prodursi di cedimenti e spostamenti a piano campagna, con possibili danni su pre-esistenze in superficie, o innesco di fenomeni gravitativi di versante.

Dal punto di vista progettuale, anche in questo caso, come per l'interferenza con le cavità carsiche, gioca un ruolo fondamentale la definizione delle geometrie del problema, in parte già individuate mediante le indagini geognostiche da piano campagna. La testa della TBM sarà attrezzata con sistemi di diagnostica in avanzamento di tipo geoelettrico (tipo BEAM System), i quali, rilevando i valori di resistività e porosità efficace delle porzioni di ammasso poste oltre il fronte di scavo, fino a 40-50 m, sono in grado di segnalare la presenza di sacche di materiale granulare con presenza di acqua. Eventuali perforazioni, attrezzate con preventer, potranno inoltre essere eseguite sempre dall'interno della TBM in avanzamento.

Inoltre l'adozione di una TBM del tipo EPB, con fronte in pressione, appare la migliore soluzione tecnica per affrontare la problematica in questione, in quanto l'avanzamento sarà condotto sistematicamente mediante pressione in camera di scavo di entità tale di controbilanciare il più possibile le spinte esterne ed in particolare le spinte idrostatiche. Tali pressioni al fronte, nelle maggior parte dei casi, consentiranno di avanzare in condizioni di idrostatismo, ovvero senza drenaggio di falda, mantenendo nel contempo l'ammasso al fronte in condizioni il più possibile indisturbate, con deformazioni molto contenute. In presenza dei massimi battenti idrostatici, fino a 6 bar, potranno verificarsi situazioni di drenaggio controllato, comunque di entità molto inferiore rispetto a quanto sarebbe stato necessario nel caso di metodologia di scavo in tradizionale.

Occorrerà infine valutare l'influenza della galleria nel lungo termine sui flussi idraulici all'interno dei corpi detritici, così da determinare se sia necessario operare un'azione di drenaggio qualora la galleria impedisca una normale circolazione (effetto diga) con possibile risalita della piezometrica a monte delle gallerie.

## 8.5. ZONA 5 – IMBOCCO LATO ALBA

Con riferimento al quadro geologico-geotecnico precedentemente presentato, la costruzione dell'imbocco lato Alba pone problematiche principalmente correlate al contesto geomorfologico dell'area, che appare molto delicato sia per la presenza di un esteso deposito detritico ritenuto in frana, sia, più in generale, per la vulnerabilità che il versante in cui si inserisce l'opera ha mostrato in passato a seguito di lavorazioni di scavo, come in occasione dei lavori per la realizzazione del "Nuovo Ospedale di Alba-Bra". Questo sia per le caratteristiche dei terreni, specie corticali, che costituiscono il versante sia per la presenza di falda che, soprattutto in occasione eventi meteorici intensi, potrebbe operare negativamente sulle condizioni di stabilità generale del versante e sui primi metri di coltri, favorendone dissesti. Le criticità che devono essere quindi esaminate in sede di progetto dell'imbocco sono principalmente le seguenti:

- possibili instabilità delle coltri superficiali in fase di realizzazione degli scavi di imbocco;
- innesco di possibili superfici di scivolamento profonde interessanti il versante, sia nei depositi di frana, sia nel substrato marnoso;
- interferenza con le preesistenze a monte dell'imbocco, rappresentate in particolare dalle strutture del nuovo ospedale in fase di costruzione.

Tali criticità costituiscono quindi i principali scenari di rischio, che sono stati attentamente valutati in fase progettuale. Al fine di mitigare le problematiche prima evidenziate, l'impostazione delle modalità di esecuzione dell'imbocco ha privilegiato la limitazione delle altezze di sbancamento, così da evitare di intagliare significativamente il versante in corrispondenza del piede. La posizione dell'imbocco, come già proposto in sede di Progetto Definitivo, è stata quindi arretrata rispetto a dove sarebbe stato necessario ubicarla per avere adeguati ricoprimenti in corrispondenza dell'attacco degli scavi; è stata

introdotta la realizzazione di una “protesi”, ovvero di un rilevato al piede del versante. L'altezza degli scavi in corrispondenza della paratia di imbocco interessa quindi solo parzialmente il terreno in posto; lo strato più superficiale è infatti in parte costituito dalla protesi stessa, realizzata in misto stabilizzato. Questo rappresenta sicuramente un'azione di presidio nei confronti delle condizioni di stabilità generale del versante. Inoltre, per evitare il prodursi di instabilità delle coltri superficiali, si sono ridotte le altezze di sbancamento in assenza di opere di sostegno (altezza massima pari a 5 m) e soprattutto si sono adottate, anche in fase provvisoria, pendenze di sbancamento più ridotte, pari a 2 (verticale) su 3 (orizzontale), rispetto a quanto solito fare. La problematica connessa alla falda è stata affrontata con due azioni principali; la prima, volta agli strati più corticali, spesso messi in crisi da eventi meteorici intensi, ha previsto la realizzazione di trincee drenanti, di profondità pari a 4-5 m, finalizzate a favorire un corretto deflusso delle acque meteoriche e ad evitare l'instaurarsi di pressioni neutre. La seconda è finalizzata a mantenere bassa la quota di falda a tergo delle paratie di imbocco, ed è svolta da un sistema di drenaggi profondi realizzati in fase di ribasso, contestualmente ai tiranti; questo in particolare sul lato di paratia a sinistra dell'imbocco, ovvero sulla porzione rivolta verso il versante.

## 8.6. SCHEMA DI RIEPILOGO

Nella tabella seguente si riporta, per ciascuna zona omogenea, una sintesi delle caratteristiche geologico-geotecniche, delle criticità e degli scenari di rischio, nonché delle azioni di progetto intraprese. Alcuni scenari di rischio risultano invece comuni a tutto il tracciato della galleria (parte generale).



**Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6**

**PROGETTO ESECUTIVO**

**Galleria Verduno - Relazione geotecnica**

| N | Zona               | Geologia-geotecnica   | Scenari di rischio  |  | Azioni di progetto   |
|---|--------------------|---|---|--|--|
|   |                    |   | Più probabili   | Meno probabili   |  |
| 1 | Imbocco Cherasco   | Depositi detritici di copertura (4-5) e gessi (6). Presenza di cavità, vuote o con riempimento di acqua o materiale fine. Falda a a 2-3 m sopra la QP, con escursioni fino a 10m  | Instabilità coltri superficiali   |  | Sbancamenti con pendenze 2/3, protetti da opere (H> 5 m)   |
|   |                    |   |   | Dissesti gravitativi profondi  | Riduzione scavi a cielo aperto, opere di sostegno di adeguata rigidità   |
|   |                    |   |   | Danni alle preesistenze  | Controllo degli spostamenti  |
|   |                    |   | Intercettazione di cavità nei gessi   |  | Sistema di investigazione da p.c. e in avanzamento + modalità di riempimento   |
|   |                    |   | Variazione della quota piezometrica   |  | Drenaggio controllato e monitoraggio piezometrico e topografico  |
| 2 | Galleria nei gessi | Principalmente la unità litologica dei gessi (6), con sovrastanti depositi detritici (4-5). Presenza di cavità, vuote o con riempimento di acqua o materiale fine. Falda a a 2-3 m sopra la QP, con escursioni fino a 10m | Instabilità locali del fronte per variabilità caratt. geomecc.  | Risentimenti significativi a piano campagna, quali depressioni, sprofondamenti, nuovi inghiottitoi | Cunicolo esplorativo + sistema di investigazione in avanzamento + TBM-EPB con confinamento del fronte                                |
|   |                    |   | Instabilità locali del fronte per intercettazione cavità (vuote o con riempimento) – Perdita di pressione al fronte della TBM |  | Cunicolo esplorativo + sistema di investigazione in avanzamento + modalità di riempimento  |
|   |                    |   | Instabilità locali del fronte per ingenti venute d'acqua  |  | Sistema di investigazione in avanzamento + TBM-EPB con confinamento del fronte + eventuale drenaggio controllato                     |
|   |                    |   | Perdita di assetto della TBM per intercettazione cavità   |  |  |
|   |                    |   |   | Subsidenze a piano campagna  | Monitoraggio piezometrico e topografico  |
|   |                    |   | Aggressività acque verso durabilità cls   |  | Cls classe min. C35/45   |
|   |                    |   | Circolazioni preferenziali a tergo dei rivestimenti   |  | Sistema impermeabilizzato, ma localmente drenante  |
|   |                    |   |   | Cedimenti per dissoluzione degli ammassi gessosi a causa della circolazione sotterranea            | Realizzazione di un by-pass drenante per controllare la circolazione sotterranea ed impedire che interessi la zona del cavo galleria |



**Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6**

**PROGETTO ESECUTIVO**

**Galleria Verduno - Relazione geotecnica**

| N        | Zona                                     | Geologia-geotecnica  | Scenari di rischio  |  | Azioni di progetto  |
|----------|--|--|---|--|---|
|          |  |  | Più probabili   | Meno probabili   |   |
| 3        | Galleria nelle marne                     | Principalmente la unità litologica delle marne (7). I gessi sono generalmente posti a distanze > 20 m sopra la calotta. Battenti idraulici fino a 50-60 m, ma basse permeabilità (venute ridotte)            |   | Elevate venute d'acqua in galleria (per elevati battenti)  | Pressione di bilanciamento al fronte TBM ed eventuale parziale drenaggio  |
|          |  |  |   | Interferenze con le cavità che stanno a 20 m sopra la calotta  | Indagini in avanzamento (eventuali)   |
| 4        | Galleria nelle marne con corpi detritici | Unità litologica delle marne (7), con presenza di corpi detritici con acqua in pressione, fino a 6 bar (7a).   | Instabilità del fronte di scavo e del cavo galleria                                   | Risentimenti significativi a piano campagna, con danni a preesistenze e innesci di movimenti gravitativi | Indagini in avanzamento + azione combinata di pressione di confinamento al fronte TBM ed eventuale parziale drenaggio in presenza di elevati battenti idrostatici |
|          |  |  | Elevate venute d'acqua in galleria, in pressione, con trascinamento di materiale fine |  |   |
|          |  |  | Cedimenti a piano campagna  |  | Controllo mediante piano di monitoraggio  |
| 5        | Imbocco Alba                             | Depositi di copertura e di frana (4), fino a profondità di 23-24 m, poggianti sul substrato marnoso (7). Falda a -20 m da piano campagna, con possibili risalite in concomitanza di eventi meteorici intensi | Instabilità coltri superficiali   |  | Sbancamenti con pendenze 2/3, protetti da opere (H> 5 m)  |
|          |  |  |   | Dissesti gravitativi profondi  | Riduzione scavi a cielo aperto, opere di sostegno di adeguata rigidità Trincee drenanti e drenaggi dalla paratia  |
|          |  |  |   | Danni alle preesistenze  | Controllo degli spostamenti   |
|          |  |  | Variazione della quota piezometrica   |  | Drenaggio controllato e monitoraggio piezometrico e topografico   |
| Generale |  |  | Instabilità del fronte di scavo   |  | Mantenimento di adeguate pressioni al fronte TBM  |
|          |  |  | Attraversamento di faglie   |  | Mantenimento di adeguate pressioni al fronte TBM ed eventuale drenaggio   |
|          |  |  | Cedimenti a piano campagna  | Danni alle preesistenze  | Mantenimento di adeguate pressioni al fronte TBM  |

## 9. ANALISI NUMERICHE E MODELLAZIONI CONDOTTE

Con riferimento agli scenari di rischio individuati nel precedente capitolo, nel seguito si riporta una sintesi delle principali analisi numeriche condotte per verificare gli interventi proposti a progetto (ad esempio la stabilità delle opere di sostegno, dei fronti di scavo, le deformazioni indotte nei versanti a tergo delle opere di imbocco ed i relativi fattori di sicurezza, le analisi di interazione tra le lavorazioni condotte e le pre-esistenze, sia riguardo al contesto idrogeologico, sia in termini di cedimenti e deformazioni a piano campagna ...); per una descrizione più dettagliata delle analisi condotte si rimanda alle relazioni specialistiche nel seguito richiamate.

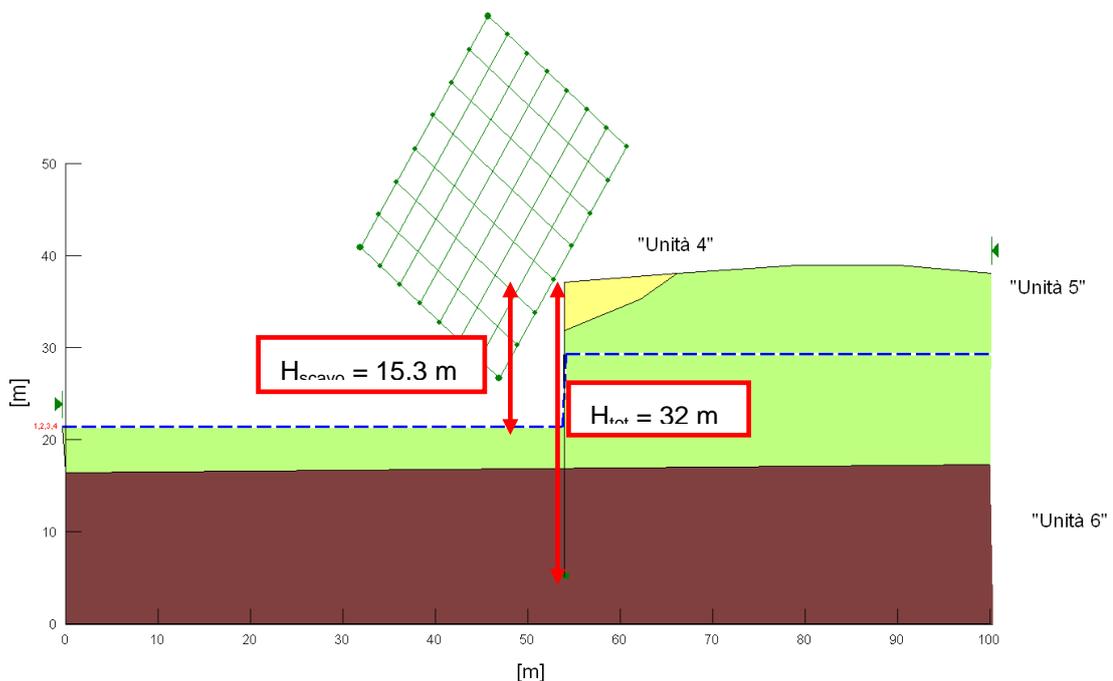
### 9.1. VERIFICHE DI STABILITÀ IMBOCCO LATO CHERASCO

Le analisi numeriche condotte per la verifica delle condizioni di stabilità delle opere dell'imbocco lato Cherasco sono in dettaglio riportate nella relazione D.2.3.2.01 "Relazione di calcolo opere di imbocco lato Cherasco". In essa, dopo la descrizione dettagliata degli interventi previsti per la realizzazione delle opere e della successione delle fasi esecutive, si riportano gli esiti delle verifiche statiche riguardo a:

- Opere di sostegno degli scavi mediante esecuzione di paratie in pali di diametro 1200 mm, disposti a passo 1.40 m, contrastati mediante tiranti in trefoli; le verifiche sono state condotte simulando la successione delle fasi di ribasso e di posa dei tiranti mediante il codice agli elementi finiti "Paratie" dell'Harpaceas, che ha consentito di valutare in dettaglio le sollecitazioni agenti nelle opere (pali e tiranti) e gli spostamenti della paratia, sia in condizioni statiche sia sismiche, secondo le NTC2008. Note le sollecitazioni agenti, sono state effettuate le verifiche dei pali in c.a. riscontrando fattori di sicurezza adeguati sia a SLU sia a SLE. Sono state quindi effettuate le

verifiche dei tiranti, in particolare con riferimento ai bulbi di ancoraggio, e delle travi di testa e di ripartizione dei tiranti. Si è valutato un regime di spostamento della paratia tra 20 e 35 mm, in funzione delle diverse sezioni esaminate (55 mm per la paratia a sbalzo a seguito del taglio del fronte).

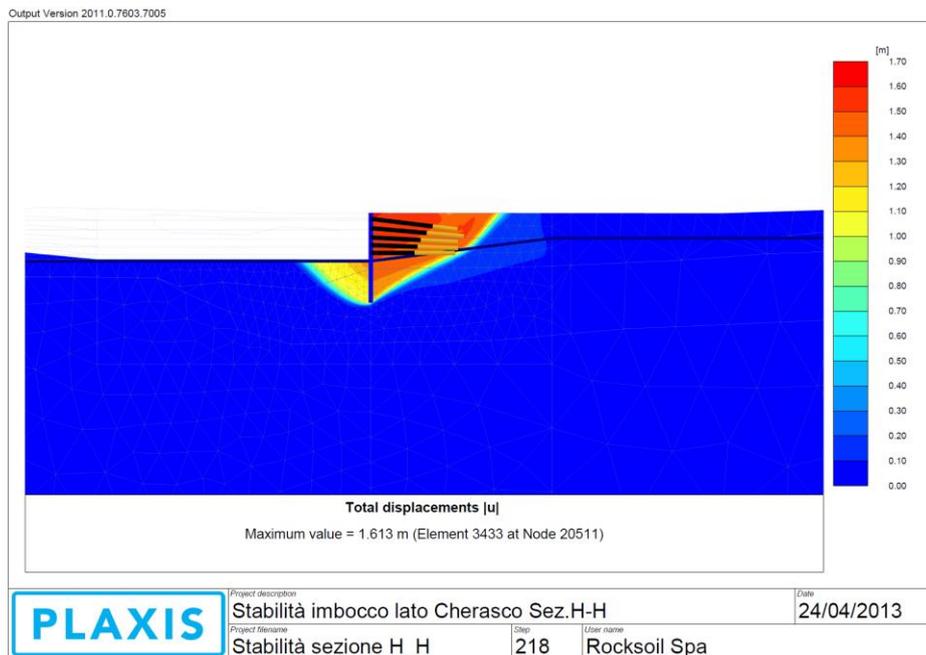
- Opere di protezione degli scavi per la realizzazione delle protesi in misto stabilizzato, mediante esecuzione di paratie con trattamenti in jet-grouting, armati con tubi metallici; le analisi sono state condotte mediante codice agli elementi finiti "Plaxis". Le analisi sono state volte alla verifica delle condizioni di stabilità locali della paratia ed al controllo delle tensioni agenti nei materiali costituenti. Lo stato de formativo di queste opere risulta trascurabile.
- Condizioni di stabilità globale del sistema paratia-versante, mediante analisi all'equilibrio limite condotte con l'ausilio del codice di calcolo "Geoslope". Nel seguito si riporta il modello geotecnico di riferimento assunto nell'analisi, dove la falda è stata cautelativamente assunta a -8 m da piano campagna:



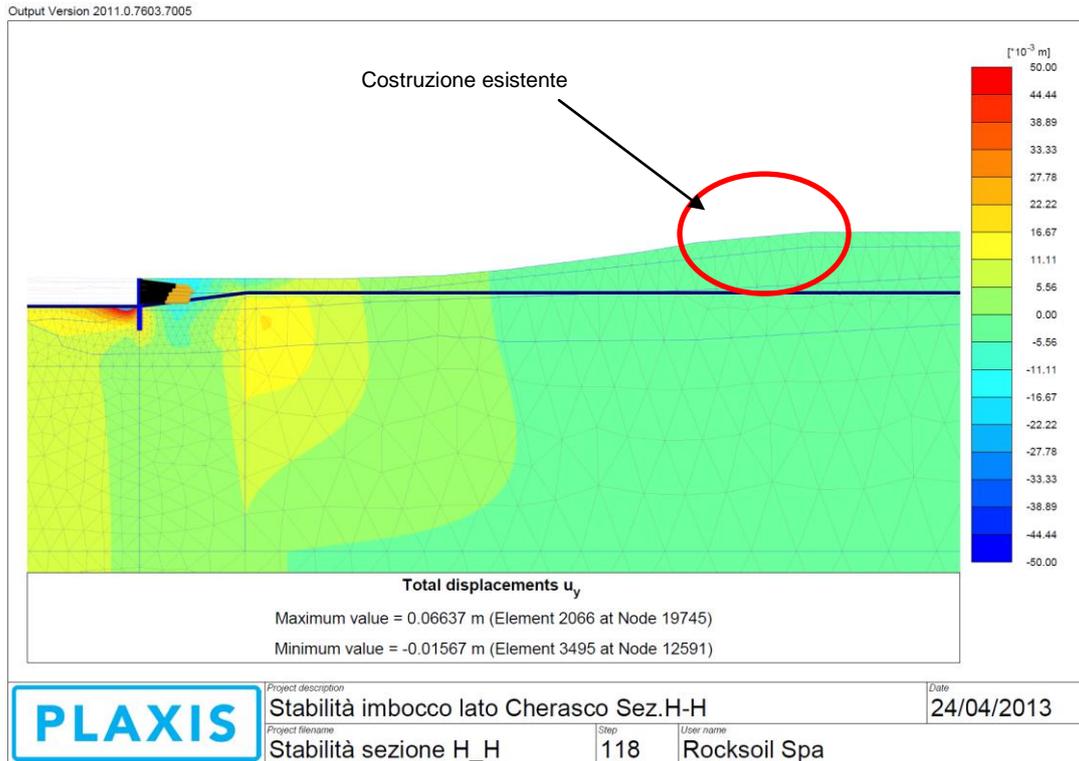
*Figura 9.1 – Sezione di calcolo imbocco lato Cherasco*

Le verifiche condotte hanno fornito valori dei coefficienti di sicurezza pari a 1.589 in condizioni statiche e 1.325 in condizioni sismiche.

- Analisi dell'interferenza tra gli scavi per la realizzazione dell'imbocco e i versanti disposti a monte dello stesso mediante modelli ad elementi finiti con l'ausilio del codice di calcolo Plaxis; le analisi numeriche hanno consentito di ricostruire, per step di calcolo successivi, le fasi di costruzione dell'imbocco individuando fattori di sicurezza, nei confronti di superfici di scivolamento profonde, in linea con i modelli all'equilibrio limite; inoltre si sono simulate le condizioni di innesco di superfici di debolezza nel versante, con l'assunzione di parametri ridotti (parametri residui), riscontrando anche in questo caso fattori di sicurezza superiori all'unità. I risentimenti a tergo dell'imbocco si propagano per un'estensione di 50-100 m max., con spostamenti in corrispondenza della paratia di ordine centimetrico e nella zona dei fabbricati inferiori a 5-6 mm. Alcune esemplificazioni delle analisi condotte sono riportate in Figura 9.2 e 9.3..



*Figura 9.2 – Sezione H-H di calcolo – Superficie critica*



*Figura 9.3 – Sezione H-H di calcolo – Spostamenti nel versante*

## 9.2. ANALISI DELLA CIRCOLAZIONE IDRAULICA NEL SETTORE DEI GESSI E VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DELLA GALLERIA SULL'ACQUIFERO

L'analisi delle condizioni idrogeologiche nel settore di galleria interessato dai gessi è stata effettuata attraverso l'implementazione di uno specifico modello tridimensionale, descritto in dettaglio nella "Relazione idrogeologica", documento D.2.1.04.. Il modello è stato ricostruito sulla base dei dati piezometrici raccolti dal sistema di monitoraggio predisposto, nonché considerando le misure delle quote di falda desunte da tutte le indagini, nel tempo, eseguite nella collina di Verduno (come discusso in dettaglio nella "Relazione idrogeologica" risultanze simili si ottengono anche nell'ipotesi di considerare i soli dati piezometrici della campagna di monitoraggio ambientale 2011-2013). Una volta ricostruita la situazione ante-operam si è provveduto ad inserire le gallerie, secondo il tracciato di progetto, ed a simulare le fasi di realizzazione dell'opera al fine di valutare la variazione del regime piezometrico

nel modello. Sono state considerate tre fasi di studio, in linea con le principali fasi costruttive:

1. Realizzazione del cunicolo esplorativo, ubicato nel setto tra le due canne con l'obiettivo di investigare la presenza di cavità all'interno dei gessi; il cunicolo andrà ad intercettare la falda dell'acquifero dei gessi negli ultimi 70-80 m.
2. Scavo delle due gallerie autostradali, mediante TBM del tipo EPB.
3. Realizzazione del by-pass drenante, e relative raggere di drenaggi, finalizzato a realizzare un drenaggio quanto più possibile efficiente nell'ottica di una riduzione del deflusso al di sotto delle due cannel settore della formazione dei gessi e

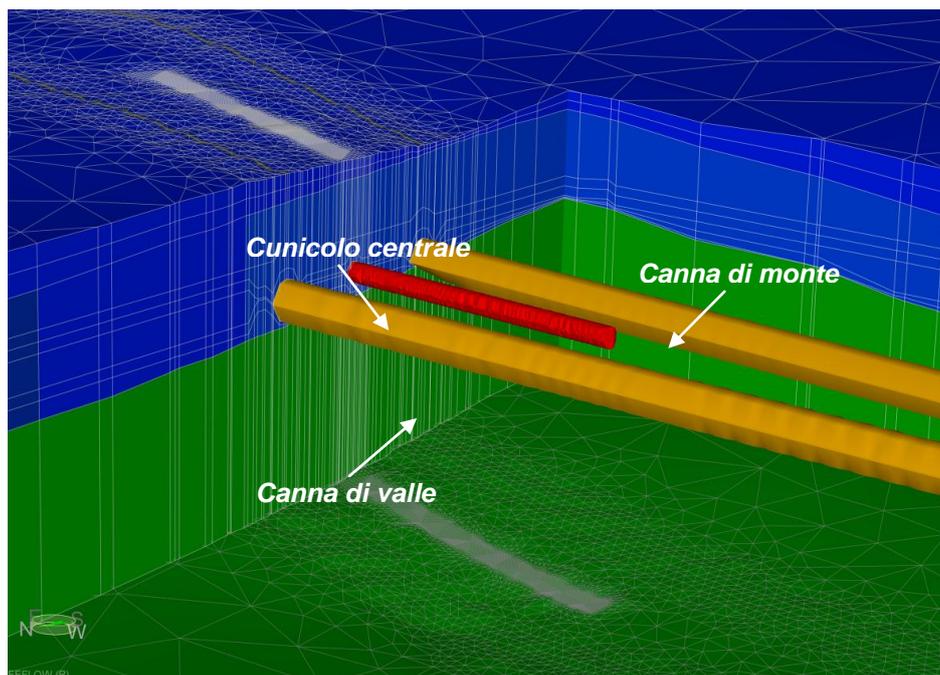


Figura 9.4 - Dettaglio delle due canne del tunnel utilizzate e del cunicolo centrale, con spaccato utile per comprendere le geometrie interne dei layer con cui è stato costruito il modello numerico.

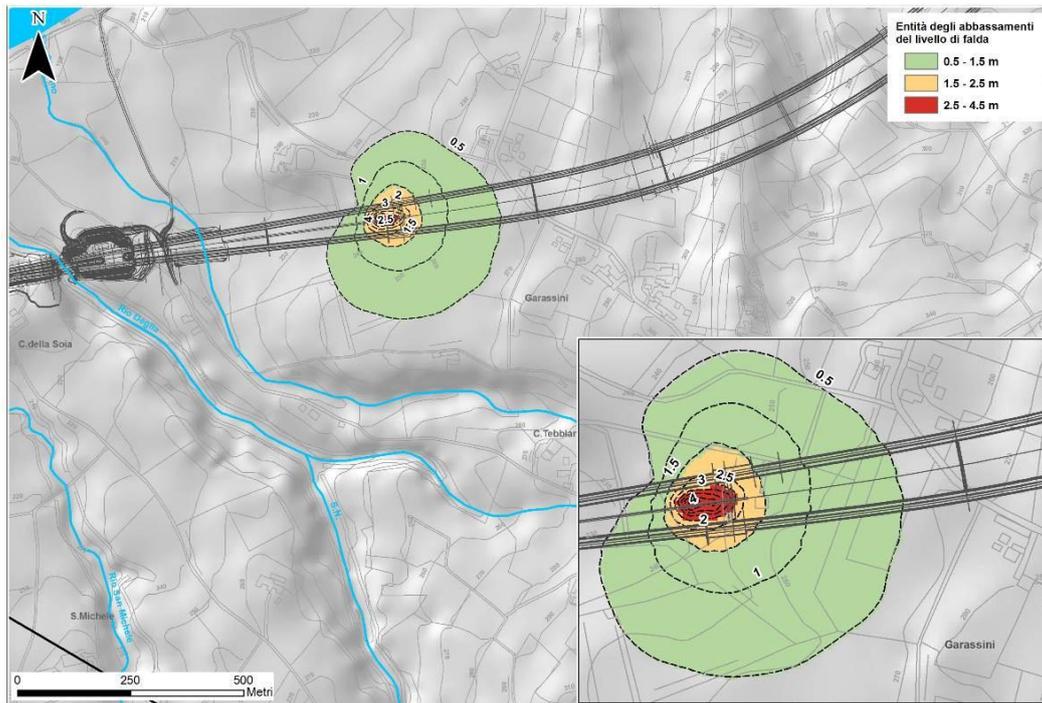
Attraverso il confronto geospaziale (in ambiente ArcGis) dei valori di livello relativi ad una situazione ante-operam (stato naturale della falda) e quelli



ottenuti assumendo l'inserimento delle diverse opere in sotterraneo è stato possibile ottenere una serie di elaborazioni grafiche utili a valutare il grado di impatto prevedibile sull'acquifero.

#### Impatti attesi a breve termine

Al termine dei lavori per la realizzazione del cunicolo centrale alle due canne l'abbassamento del livello di falda atteso è quello rappresentato in Figura 9.5. Tale figura mostra una zonizzazione degli abbassamenti attesi, suddividendo tre fasce: un settore in cui gli abbassamenti sono di lieve entità (0.5-1.5 m), uno in cui sono di media entità (1.5-2.5 m) ed un in cui sono di forte entità (2.5-4.5 m). L'abbassamento di lieve entità (fino a 0.5 m) si estende fino a 250 m dalla zona ipocentrale definita tramite l'elaborazione dei dati di simulazione, mentre un abbassamento di massima entità (3.5-4.5 m) ha un'estensione al massimo di 40 m. L'abitato della Borgata Garassini rimane ubicato su una fascia esterna anche alla zona di minimo abbassamento previsto. L'aspetto importante da rimarcare è che gli abbassamenti stimati, compresi quelli massimi, sono di una grandezza inferiore rispetto alle variazioni stagionali misurate attraverso i piezometri della rete di Monitoraggio Ambientale, che hanno mostrato escursioni anche di oltre 10 m.



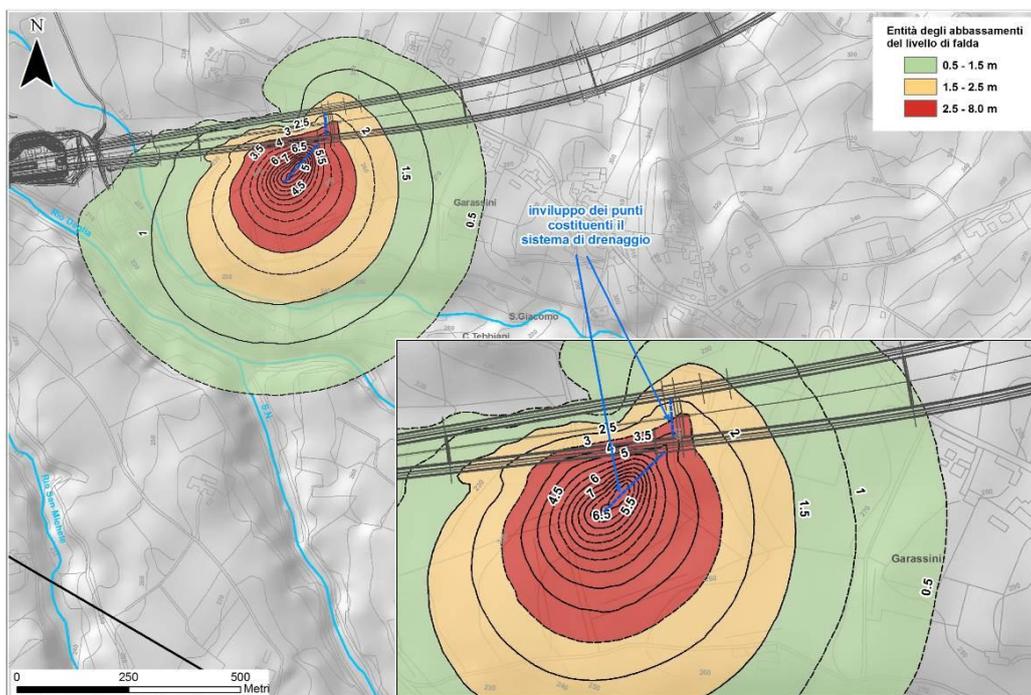
*Figura 9.5. - Rappresentazione degli abbassamenti attesi del livello piezometrico dovuto al drenaggio del cunicolo centrale*

Successivamente a questa fase, i risultati della simulazione con l'inserimento delle due canne della galleria hanno permesso di valutare come la superficie di abbassamento rimanga complessivamente la stessa di quella evidenziata a seguito dello scavo del cunicolo (questo considerato che l'avanzamento verrà condotto con TBM del tipo EPB, con fronte in pressione). Unica differenza è che l'inserimento nel modello delle due canne ha l'effetto di produrre un innalzamento piuttosto localizzato dell'ordine di 0.5-1.5 m nelle vicinanze della canna di monte. Tuttavia, l'entità di questo innalzamento non è tale da ritenere che esso possa determinare qualche significativo effetto in superficie.

#### Impatti attesi a lungo termine

In assenza di drenaggio dalle canne principali e dal cunicolo assiale che sarà ritombato a chiusura dei lavori, l'inserimento dei vari fori drenanti connessi ai due by-pass della galleria provoca comunque lo sviluppo di un abbassamento della superficie naturale di falda comparabilmente maggiore di quello osservato nelle fasi costruttive precedenti. L'abbassamento massimo si registra a qualche

decina di metri a Sud della canna di monte e raggiunge valori di 8 m rispetto alla condizione naturale (ante-operam). Un abbassamento di 2.5 m è atteso in una fascia compresa tra 150-190 m di distanza dal punto di abbassamento massimo, mentre un abbassamento di 1.5 m è atteso in una fascia compresa tra 400-450 m di distanza dal punto di abbassamento massimo. Un aspetto molto importante è che anche in questo caso la Borgata Garassini ricade in una fascia di territorio esterna al cono di abbassamento illustrato in Figura 9.6 e pertanto gli effetti dell'abbassamento in corrispondenza dell'abitato possono essere considerati influenti ai fini dei rischi di innesco di fenomeni d'instabilità in superficie (es. cedimenti, franamenti).



*Figura 9.6. - Rappresentazione delle variazioni di livello piezometrico dovute in seguito alla somma degli effetti derivanti dalla messa in funzione del sistema di fasci di fori drenanti*

- Va rimarcato che l'inserimento dei fasci di dreni ha lo scopo di produrre intenzionalmente un controllo del livello piezometrico della falda in questo settore in quanto esso consentirà di operare positivamente come un sistema di smorzamento, o un "troppo pieno", per i carichi idraulici che si potranno produrre nell'acquifero in corrispondenza di precipitazioni

di elevata intensità. Infatti, se non si provvedesse ad un sistema di questo tipo, l'aumento dei carichi provocati dalle piogge, combinato con l'effetto di locale aumento dei carichi idraulici a monte del rivestimento della galleria (in particolare della canna di monte), potrebbe provocare un'eccessiva risalita di livello, che localmente si attesterebbe a quote prossime alla superficie. In questo caso non si potrebbe escludere che a lungo andare una redistribuzione del flusso di questo tipo possa provocare una dissoluzione progressiva nelle parti più superficiali dei gessi, dovuta ad un incremento delle velocità di flusso nell'intorno della galleria, ed una conseguente accelerazione di fenomenologie tipo sink-holes. Per questo motivo, in aggiunta agli interventi previsti in corrispondenza del by-pass drenante, il progetto prevede anche nelle tratte interessate dall'acquifero dei gessi (e dei corpi detritici in zona 4, descritta più avanti), la posa in opera di drenaggi laterali, diametro 100 mm, al fine di evitare fenomeni di innalzamento della falda. L'intensità dell'intervento potrà essere regolata in corso d'opera in funzione dei dati raccolti dal sistema di monitoraggio topografico.

### **9.3. ACQUIFERO DEI CORPI DETRITICI ED IMPATTO IN FASE DI SCAVO**

Nel caso delle intercalazioni detritiche sabbiose (corpi detritici) all'interno delle marne la valutazione di impatto risulta di difficile definizione in quanto la loro forte eterogeneità spaziale non consente di pervenire ad un quadro idrogeologico sufficientemente rappresentativo, in particolare per l'incertezza che riguarda l'estensione di tali corpi nella porzione di versante a monte della galleria. Pertanto, anche il tasso di alimentazione di questo acquifero, che può compensare più o meno l'effetto di svuotamento prodotto dalla galleria, non è noto. Si può tuttavia ipotizzare che lo scenario più probabile, sia quello che l'attraversamento della galleria produca un limitato svuotamento che è comunque circoscritto temporalmente al periodo intercorrente allo scavo con TBM-EPB e immediato successivo alla posa in opera dei conci che avviene a tergo della testa della fresa. Al fine di poter valutare i possibili

risentimenti a piano campagna connessi con il drenaggio di tali corpi detritici in fase di avanzamento, sono state condotte specifiche analisi numeriche, come in dettaglio riportato nella “Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie”, documento D.2.1.07. Si sono valutati i cedimenti massimi a piano campagna in funzione delle pressioni mantenute in camera di scavo, variabili tra 0 e 3 bar. Si osserva che il cedimento risulta maggiore al diminuire della pressione di confinamento operata, con valore minimo pari a 1,8 mm e massimo pari a 8.8 mm, come mostrato in Figura 9.7.. Si evince comunque dai risultati delle analisi condotte, che i cedimenti indotti dal possibile abbattimento del livello di falda al passaggio della TBM risultano inferiori al centimetro. Tramite un corretto avanzamento degli scavi ed una corretta valutazione della pressione da applicare al fronte di scavo i cedimenti causati dall’abbattimento di falda potrebbero quindi essere del tutto trascurabili.

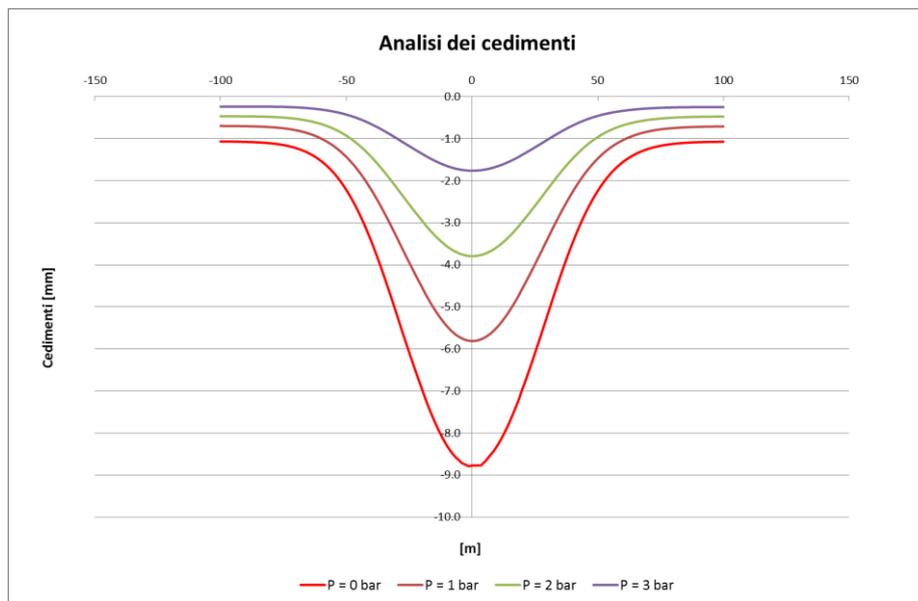


Figura 9.7 – Cedimenti a piano campagna per drenaggio corpi detritici

#### 9.4. ANALISI DEGLI EFFETTI DELLO SCAVO IN SUPERFICIE

Sempre nella “Relazione sugli effetti dello scavo sugli edifici in superficie”, documento D.2.1.07, si sono inoltre valutati gli effetti prodotti in superficie dallo



scavo in sotterraneo delle gallerie autostradali, con specifico riferimento agli edifici ed ai manufatti presenti in superficie. Sono state dapprima condotte valutazioni dei cedimenti impiegando le formulazioni empiriche di letteratura, in presenza di volumi persi pari allo 0.5, 1.0 e 1.5% del volume di scavo (i valori più elevati sono da correlarsi, nell'ambito di una analisi di rischio, ad una non perfetta performance dell'avanzamento con TBM) ed impiegando valori  $k$  pari a 0.4 e 0.6. I valori di cedimento massimo in asse galleria risultano variabili tra 9 mm, in corrispondenza di una copertura pari a 90 m,  $k = 0,6$  e  $V_p = 0.5\%$ , e valore massimo pari a 112 mm, per copertura pari a 15 m,  $k = 0,4$  e  $V_p = 1.5\%$ .

L'ampiezza del bacino risulta analogamente compresa tra 104 m, in corrispondenza di una copertura pari a 15 m e  $k = 0,4$ , e 434 m, per una copertura pari a 90 m e  $k = 0,6$ .

In corrispondenza degli edifici i cedimenti risultano inferiori, nella maggior parte dei casi trascurabili, dell'ordine di pochi millimetri. Il valore di cedimento massimo si riscontra per l'interferenza 10 in condizioni di  $V_p=1.5\%$  e  $k = 0,4$ , attestandosi su un valore pari a 47 mm. Le deformazioni massime a cui sono soggetti i fabbricati risultano essere all'interno di un range definito da  $0\% \leq \epsilon_{\max,h} \leq 0,077\%$  nella zona di hogging e da un range pari a  $0\% \leq \epsilon_{\max,s} \leq 0,015\%$  nella zona di sagging, quindi con categorie di danno sempre uguali a 0 e solo in un caso, l'interferenza 02, peraltro legata ad elevati volumi persi e quindi decisamente cautelativi, raggiunge una classe di danno pari a 1-2. I risultati ottenuti hanno mostrato che nessun edificio presente lungo la tratta ricade nelle classi di rischio tali da generare danni strutturali ai fabbricati o lesioni severe nelle opere di finitura; sono quindi attese solo lievi fessurazioni o danni di natura "cosmetica". Anche le analisi più approfondite mediante modelli alle differenze finite confermano i risultati delle analisi empiriche condotte. Gli esiti delle analisi e la fascia di territorio interessata dal bacino di subsidenza sono riportati nell'elaborato 2.6E-dD.2.1.28 "Planimetria con valutazione delle subsidenze".

## 9.5. ANALISI DI STABILITÀ DEI FRONTI DI SCAVO

Nella “Relazione di calcolo della galleria naturale”, documento D.2.2.01, si è affrontata la verifica delle condizioni di stabilità dei fronti di scavo, dapprima in assenza di interventi, così da valutare (fase di diagnosi) il comportamento del fronte di scavo nei differenti contesti geomeccanici riscontrati durante lo scavo della galleria naturale, in funzione delle coperture e della relativa caratterizzazione geotecnica, sia in condizioni drenate che non drenate. Successivamente in presenza degli interventi previsti in progetto per garantire adeguate condizioni di stabilità. Le analisi sono state condotte impiegando il Metodo delle Linee Caratteristiche, le formulazioni di Tamez (condizioni drenate) e di Broms e Bennermark (condizioni non drenate), specifici modelli assialsimmetrici alle differenze finite.

Per il contesto geomeccanico della Formazione gessoso-solfifera, **Unità 6**, si è condotta l’analisi delle Linee caratteristiche per la massima copertura pari a 40 m, risultando tali analisi poco significativa per coperture inferiori, per le quali si è proceduto con le verifiche di stabilità del fronte secondo le formulazioni di Tamez ed il rapporto di stabilità definito da Broms e Bennermark. Dalla Linea Caratteristica calcolata, il comportamento del fronte di scavo è di tipo B, con convergenze al fronte, in assenza di interventi, pari a 12 cm (deformazioni radiali, rapportate al raggio della galleria, pari al 1.7%) e fascia plastica sviluppata al fronte pari a circa 10 m. Le analisi di stabilità del fronte hanno evidenziato condizioni di sostanziale stabilità con riferimento sia alla condizione drenata (ad eccezione delle zone a basse coperture in assenza di falda) che alla condizione non drenata. Tale comportamento è stato inoltre confermato dagli approfondimenti condotti mediante analisi assialsimmetriche, le quali hanno indicato generali condizioni di stabilità, pur evidenziando anch’esse valori di estrusione cumulati pari a 12 cm circa.

Nel contesto geomeccanico della Formazione delle marne di Sant’Agata, costituita dai limi argillosi, **Unità 7**, le Linee Caratteristiche condotte alle diverse coperture evidenziano un comportamento del fronte di scavo di tipo B, “stabile a



breve termine”. Si hanno convergenze al fronte comprese tra 5 cm e 18 cm, con deformazioni radiali al fronte dell’ordine dell’0.7%-2.6%, in presenza di valori di fascia plastica inferiori al diametro (3-6 m in funzione delle coperture). Le analisi di stabilità del fronte hanno evidenziato anche in questo caso condizioni di sostanziale stabilità con riferimento sia alla condizione drenata, che alla condizione non drenata. Tale comportamento è stato inoltre confermato dalle analisi assialsimmetriche, condotte tramite un codice di calcolo a differenze finite: si sono rilevate condizioni di generale stabilità, modeste plasticizzazioni, ma evoluzioni deformative comunque significative.

In entrambe le situazioni geomeccaniche studiate, si ritiene che sia comunque necessario prevedere il mantenimento di una pressione di confinamento in camera di scavo della TBM, al fine di contenere le deformazioni al fronte e conseguentemente i volumi persi in fase di avanzamento.

Per le zone di imbocco della galleria, in presenza di basse coperture e di terreni appartenenti alle **Unità 4 e 5**, le analisi di stabilità del fronte di scavo condotte mediante le formulazioni di Tamez hanno evidenziato condizioni di instabilità del nucleo-fronte, richiedendo quindi la messa in opera di interventi di consolidamento, mediante elementi strutturali in vetroresina o trattamenti colonnari in jet-grouting (sezione C1 e C2p), al fine di contenere l’evoluzione del comportamento deformativo e guidare il fronte verso condizioni di stabilità.

Nella “Relazione di calcolo cunicolo”, documento D.2.3.1.01, si sono condotte analoghe analisi per il cunicolo esplorativo; per il contesto geomeccanico dei gessi, **Unità 6**, si è condotta l’analisi delle Linee caratteristiche per la massima copertura pari a 45 m. Dalla linea caratteristica il comportamento del fronte di scavo è risultato di tipo B “stabile a breve termine”, con valore di estrusione al fronte pari a circa 6 cm, deformazioni specifiche al fronte del 2% e la formazione di una fascia plastica presso il fronte, in assenza di interventi, pari a

circa 4.5 0 m. Tale comportamento è stato inoltre confermato da analisi assialsimmetriche, che hanno evidenziato estrusioni al fronte pari a 5 cm, con plasticizzazioni molto molto contenute. Le analisi di stabilità del fronte, condotte mediante il metodo di Tamez, hanno evidenziato condizioni di sostanziale stabilità nel breve termine specie alle maggiori coperture; in presenza di coperture più ridotte, al passaggio tra i depositi di copertura ed i gessi (valore di ricoprimento pari a circa 10 m) si hanno fattori di sicurezza prossimi all'unità, che suggeriscono di impiegare interventi di confinamento del fronte di scavo. Per lo scavo all'interno dell'unità 6, si ritiene possibile procedere con soli interventi di confinamento del cavo (sezione tipo B0), con la messa in opera di interventi di consolidamento del fronte mediante elementi in vetroresina ed azioni di presostegno in calotta con tubi metallici in corrispondenza delle zone dell'ammasso con caratteristiche geomeccaniche più scadenti, specie in prossimità delle basse coperture ed al passaggio tra la formazione in questione ed i depositi di copertura (sezione tipo B2V). Nel contesto geomeccanico dei depositi di versante, depositi di frana, **Unità 4 e 5**, siamo in presenza di coperture ridotte e le analisi di stabilità del fronte hanno evidenziato fattori di sicurezza ampiamente inferiori all'unità, indicativi di condizioni di instabilità. Tale comportamento è stato inoltre confermato da analisi mediante modello assilsimmetrico, che ha mostrato valori di estrusione al fronte molto elevate, pari a 25 cm, nonostante il ridotto diametro di scavo. Occorre prevedere interventi di consolidamento del cavo e di pre-sostegno in calotta (sezione tipo B2V).

#### **9.6. ANALISI DELLA STATICA DEI RIVESTIMENTI DELLA GALLERIA, DI PRIMA FASE E DEFINITIVI**

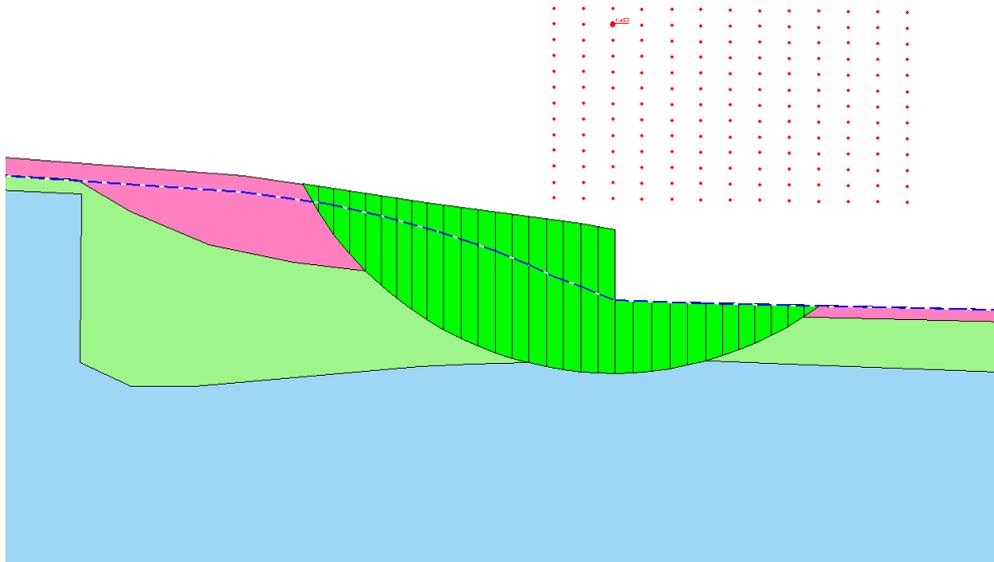
Nelle relazioni richiamate al capitolo 9.5, sono anche riportate le analisi condotte per la verifica dei rivestimenti di prima fase, per gli scavi provvisori condotti con metodo tradizionale, e per il rivestimento definitivo in conci prefabbricati per scavo meccanizzato.

## 9.7. VERIFICHE DI STABILITÀ IMBOCCO LATO ALBA

Le analisi numeriche condotte per la verifica delle condizioni di stabilità delle opere dell'imbocco lato Alba sono in dettaglio riportate nella relazione D.2.3.2.01 "Relazione di calcolo opere di imbocco lato Alba". In essa, dopo la descrizione dettagliata degli interventi previsti per la realizzazione delle opere e della successione delle fasi esecutive, si riportano gli esiti delle verifiche statiche riguardo a:

- Opere di sostegno degli scavi mediante esecuzione di paratie in pali di diametro 1200 mm, disposti a passo 1.40 m, contrastati mediante tiranti in trefoli; le verifiche sono state condotte simulando la successione delle fasi di ribasso e di posa dei tiranti mediante il codice agli elementi finiti "Paratie" dell'Harpaceas, che ha consentito di valutare in dettaglio le sollecitazioni agenti nelle opere (pali e tiranti) e gli spostamenti della paratia, sia in condizioni statiche sia sismiche, secondo le NTC2008. Note le sollecitazioni agenti, sono state effettuate le verifiche dei pali in c.a. riscontrando fattori di sicurezza adeguati sia a SLU sia a SLE. Sono state quindi effettuate le verifiche dei tiranti, in particolare con riferimento ai bulbi di ancoraggio, e delle travi di testa e di ripartizione dei tiranti. Si è valutato un regime di spostamento della paratia tra 15 e 40 mm, in funzione delle diverse sezioni esaminate.
- Opere di protezione degli scavi per la realizzazione delle protesi in misto stabilizzato, mediante esecuzione di paratie con trattamenti in jet-grouting, armati con tubi metallici; le analisi sono state condotte mediante codice agli elementi finiti "Plaxis". Le analisi sono state volte alla verifica delle condizioni di stabilità locali della paratia ed al controllo delle tensioni agenti nei materiali costituenti. Gli spostamenti sono trascurabili.
- Condizioni di stabilità globale del sistema paratia-versante, mediante analisi all'equilibrio limite condotte con l'ausilio del codice di calcolo "Geoslope". Nel

seguito si riporta il modello geotecnico di riferimento assunto nell'analisi, dove la falda è stata cautelativamente assunta a -8 m da piano campagna:



*Figura 9.9 – Sezione di calcolo imbocco lato Alba*

Le verifiche condotte hanno fornito valori dei coefficienti di sicurezza pari a 1.45 in condizioni statiche e 1.29 in condizioni sismiche.

- Analisi dell'interferenza tra gli scavi per la realizzazione dell'imbocco e i versanti disposti a monte dello stesso mediante modelli ad elementi finiti con l'ausilio del codice di calcolo Plaxis; le analisi numeriche hanno consentito di ricostruire, per step di calcolo successivi, le fasi di costruzione dell'imbocco individuando fattori di sicurezza, nei confronti di superfici di scivolamento profonde, in linea con i modelli all'equilibrio limite; inoltre si sono simulate le condizioni di innesco di superfici di debolezza nel versante, con l'assunzione di parametri ridotti (parametri residui), riscontrando anche in questo caso fattori di sicurezza di poco superiori all'unità. Per i materiali, in questa prima analisi, si è assunto modello costitutivo elasto-plastico di tipo Mohr-Coulomb. I risentimenti a tergo dell'imbocco si propagano per un'estensione di 80-120 m, con spostamenti nella zona dei fabbricati di poco inferiori a 10 mm. Alcune esemplificazioni delle analisi condotte sono riportate in Figura 9.10 e 9.11.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6  
PROGETTO ESECUTIVO  
Galleria Verduno - Relazione geotecnica

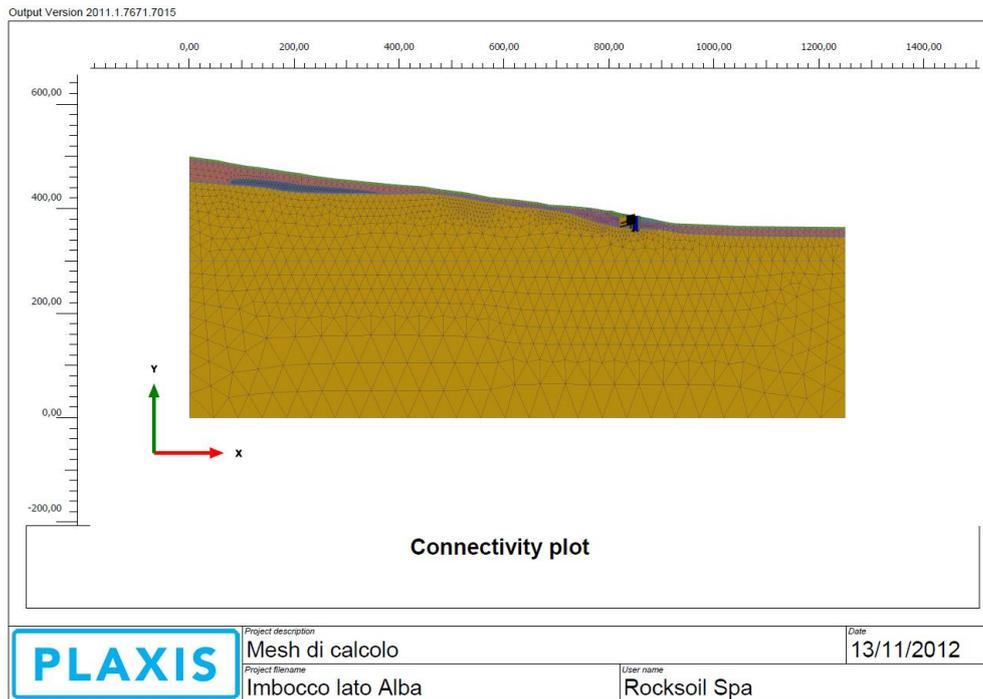


Figura 9.10 – Sezione G-G di calcolo – Mesh di calcolo

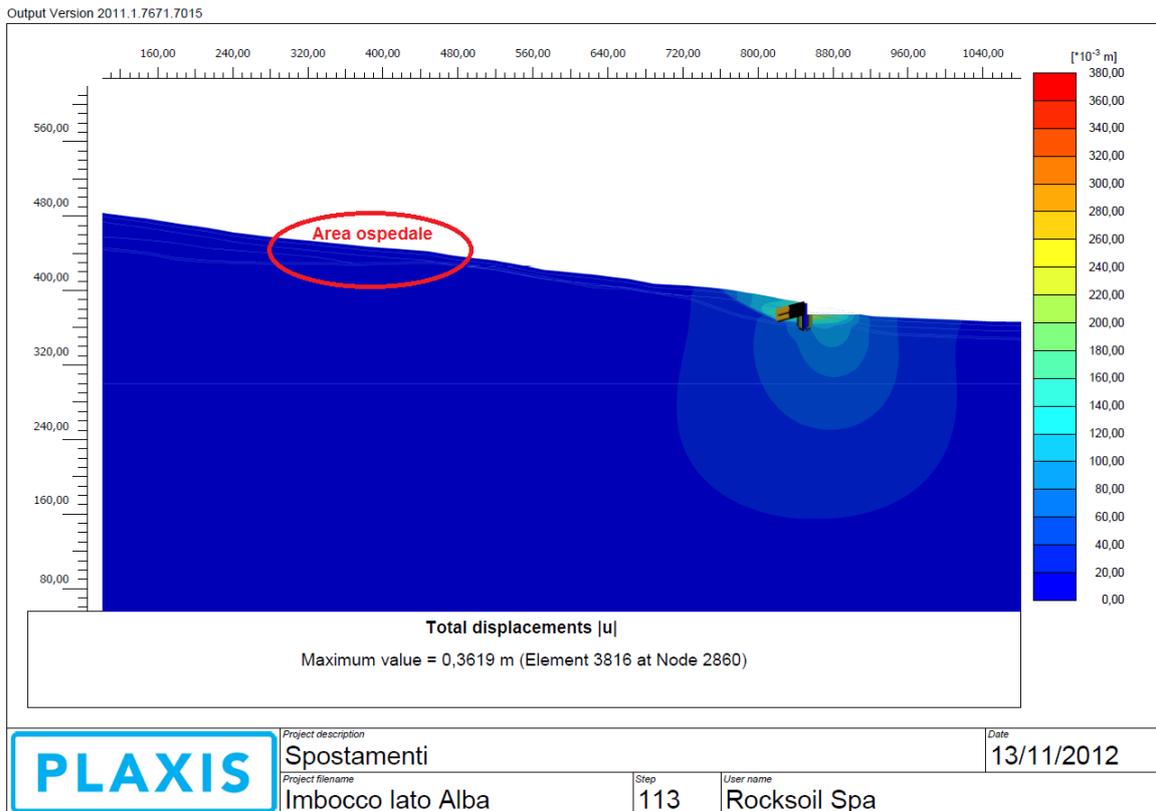
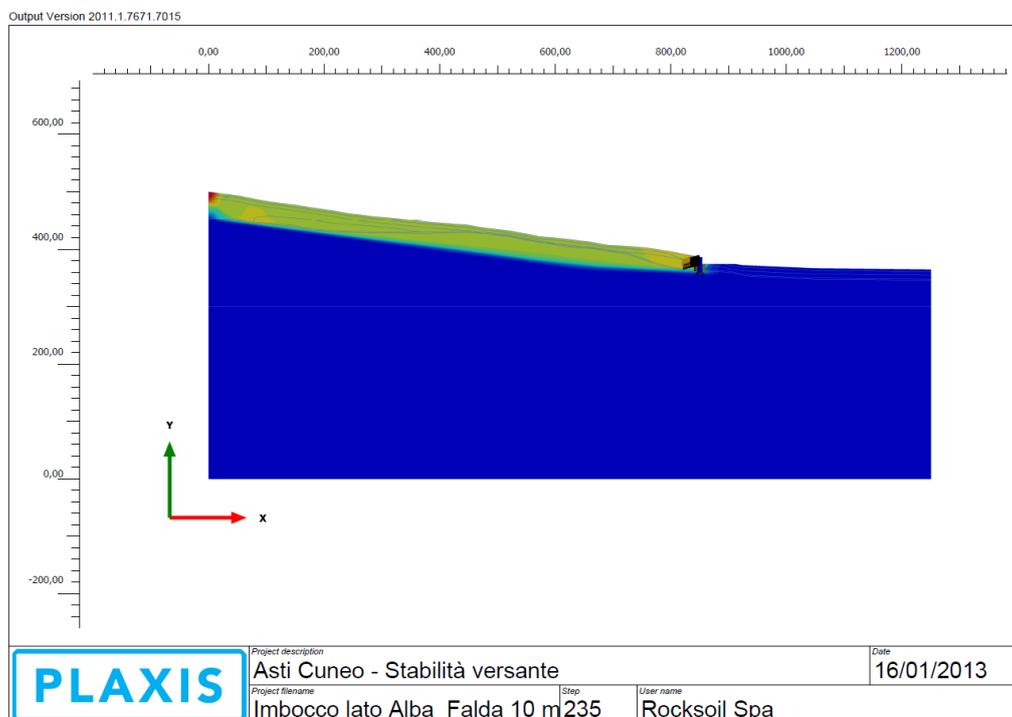


Figura 9.11 – Sezione G-G di calcolo – Spostamenti nel versante

- Nel corso della costruzione del Nuovo Ospedale di Alba-Bra si è osservato che il substrato marnoso-argilloso, identificato come Unità 7, può essere interessato da “piani di scorrimento traslativo (superfici localizzate lungo giunti di strato al contatto tra un livello di marna ed uno di sabbia o tra strati di marna) con angoli di attrito residuo dell’ordine dei 10 - 15°”. Si è così svolta una ulteriore analisi utilizzando, per modellare questo strato, il modello costitutivo “Jointed Rock” il quale e’ un modello elasto-plastico anisotropo in cui può manifestarsi soltanto plasticizzazione per taglio lungo massimo tre direzioni (piani) e che può essere quindi adottato per simulare il comportamento di rocce stratificate o fratturate. Sono state considerate tre possibili famiglie di discontinuità con inclinazioni pari a 2, 6 e 8°. La simulazione, per step successivi, della realizzazione dell’imbocco, ha mostrato l’innesco della superficie di rottura riportata in Fig. 9.12, con spostamenti orizzontali indotti dallo scavo nell’area in cui risulta ubicato l’ospedale dell’ordine dei 6 ÷ 8 mm e spostamenti verticali inferiori ai 2,5 mm. Conducendo l’analisi di stabilità, si ottiene un fattore di sicurezza, nella fase geostatica, pari a 1,183 mentre a scavo ultimato si ottiene un Fs pari 1,170. Si nota pertanto che il fattore di sicurezza risulta sempre maggiore di 1 e che lo scavo influisce minimamente sulla stabilità del versante.



*Figura 9.12. - Fase 14 – Superficie di rottura – Falda 10 m da p.c.*

## 9.8. SINTESI DELLE GRANDEZZE DA MONITORARE ATTESE

Nel seguito si riporta una sintesi delle principali grandezze attese che saranno oggetto di monitoraggio:

- Imbocco lato Cherasco: Spostamenti paratia pari a 20-35 mm; risentimenti entro 70-100 m a tergo dell'imbocco, con spostamenti minori di 10 mm; spostamenti millimetrici in corrispondenza delle preesistenze a 200-300 m dall'imbocco.
- Imbocco lato Alba: Spostamenti paratia pari a 20-40 mm; risentimenti entro 80-120 m a tergo dell'imbocco, con spostamenti minori di 10 mm; spostamenti orizzontali di 6-8 mm e cedimenti di 2 mm in corrispondenza del nuovo Ospedale posto a circa 350 m dall'imbocco
- Variazione della piezometria zona gessi: Fase costruttiva: 4.5 m per fascia di 40 m e 0.5 m per 250 m; Fase definitiva (by-pass drenante): 2.5 m per fascia 150-190 m, 1.5 m per 400-450 m.
- Cedimenti a piano campagna: i valori di cedimento massimo in asse galleria risultano variabili tra 9 mm e 112 mm; in corrispondenza dei fabbricati da 5 mm a 47 mm. A questi si possono associare cedimenti ulteriori di 5-10 mm per effetto del drenaggio operato

I valori di sintesi sopra riportati sono derivati principalmente da analisi numeriche e possono quindi essere affetti dalle semplificazioni che sono insite nelle metodologie di calcolo e, soprattutto, nei modelli numerici adottati, i quali non possono ovviamente tener conto di una serie di fattori difficilmente schematizzabili nelle computazioni eseguite. Al fine di impiegarli quali valori di soglia da confrontare con gli esiti dell'attività di monitoraggio previste, dovranno essere opportunamente innalzati in funzione del livello di attenzione o allarme considerati.

## 10. CONCLUSIONI

Oggetto della presente relazione è stata da un lato la caratterizzazione geotecnica dei terreni interessati dallo scavo della galleria naturale “Verduno”, opera facente parte del Lotto 6, Tronco 2 del collegamento autostradale A6-A21 (Asti-Cuneo), dall’altra l’esame delle criticità geologico-geotecniche ed idrogeologiche presenti lungo il tracciato da affrontare nella realizzazione dell’opera. L’evidenza di tali problematiche ha portato ad individuare i conseguenti scenari di rischio, più o meno probabili, verso i quali è stata posta l’attenzione progettuale, individuando le azioni e le soluzioni da mettere in campo per risolvere o mitigare la problematica esaminata. Sono state quindi riportati gli esiti di alcuni approfondimenti condotti mediante analisi numeriche, finalizzati a quantificare il problema ed a fornire utili informazioni per la gestione del “Piano delle Emergenze”, la cui redazione è stata richiesta nell’ambito delle prescrizioni del DEC VIA 576/2011. Per i dettagli delle analisi condotte si rimanda alle relazioni specialistiche via via richiamate.

Infine si evidenzia che alcune problematiche, nonostante le indagini geognostiche integrative condotte e gli studi e gli approfondimenti eseguiti, non potranno essere compiutamente definite se non in corso d’opera, durante lo svolgimento dei lavori, grazie alle informazioni acquisite in galleria ed ai dati di un sistema di monitoraggio ambientale e geotecnico, che riveste un ruolo fondamentale nella gestione dei lavori e, più in particolare, del “Piano delle Emergenze”. Il piano di monitoraggio è in dettaglio descritto nel documento D.2.1.08.