

# LIAISON LYON - TURIN / COLLEGAMENTO TORINO - LIONE

Partie commune franco-italienne  
Section transfrontalière

Parte comune italo-francese  
Sezione transfrontaliera

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

**PARTE IN TERRITORIO ITALIANO – PROGETTO IN VARIANTE  
(OTTEMPERANZA ALLA PRESCRIZIONE N. 235 DELLA DELIBERA CIPE 19/2015)**

**CUP C11J05000030001 – PROGETTO DEFINITIVO**

**GEOLOGIE – GEOLOGIA**

**GENERAL – GENERALE  
GEOMECHANIQUE – GEOMECCANICA**

**DOCUMENTS GÉOMÉCANIQUE CÔTÉ ITALIE – DOCUMENTI GEOMECCANICI LATO ITALIA**

**Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)**

Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérifié par / Controllato da	Autorisé par / Autorizzato da
0	07/01/2013	Première diffusion / Prima emissione	G.W. BIANCHI G. AIROLDI	R. TORRI. C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
A	31/01/2013	Prise en compte des commentaires LTF / Recepimento dei commenti LTF	G.W. BIANCHI G. AIROLDI L. FERRERO (SEA)	R. TORRI. C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
B	5/02/2013	Passage au status AP/ Passaggio allo stato AP	G.W. BIANCHI G. AIROLDI L. FERRERO (SEA)	R. TORRI. C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
C	23/11/2016	Première émission phase PRF-PRV / Prima emissione fase PRF-PRV	G. MANCARI A. RIELLA (GEODATA)	A. EUSEBIO C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
D	14/03/2017	Reception observations TTF / Recepimento osservazioni TTF	G. MANCARI A. RIELLA (GEODATA)	A. EUSEBIO C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
E	29/03/2017	Reception observations TTF / Recepimento osservazioni TTF	G. MANCARI A. RIELLA (GEODATA)	A. EUSEBIO C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI

CODE DOC	<b>P</b>	<b>R</b>	<b>V</b>	<b>C</b>	<b>3</b>	<b>B</b>	<b>T</b>	<b>S</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>E</b>
	Phase / Fase			Sigle étude / Sigla			Émetteur / Emittente			Numero				Indice

<b>A</b>	<b>P</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>T</b>
Statut / Stato		Type / Tipo		

ADRESSE GED INDIRIZZO GED	<b>C3B</b>	//	//	<b>00</b>	<b>03</b>	<b>03</b>	<b>10</b>	<b>01</b>
------------------------------	------------	----	----	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

ECHELLE / SCALA
-



TELT sas – Savoie Technolac - Bâtiment "Homère"  
13 allée du Lac de Constance – 73370 LE BOURGET DU LAC (France)  
Tél. : +33 (0)4.79.68.56.50 – Fax : +33 (0)4.79.68.56.75  
RCS Chambéry 439 556 952 – TVA FR 03439556952  
Propriété TELT Tous droits réservés – Proprietà TELT Tutti i diritti riservati

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



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

## SOMMAIRE / INDICE

1. INTRODUZIONE .....	9
1.1 Obiettivi dello studio .....	10
1.2 Inquadramento dell'area di studio .....	11
1.3 Attività svolte.....	12
2. SINTESI DELLE INDAGINI GEOLOGICHE REALIZZATE .....	13
3. CONTESTO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO .....	14
3.1 Tunnel di Base .....	15
3.2 Gallerie d'interconnessione .....	16
3.3 Zone di pianura .....	16
4. CONTESTO IDROGEOLOGICO DI RIFERIMENTO .....	17
5. CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA DI PROGETTO IN VARIANTE .....	19
5.1 Premessa .....	19
5.2 Metodo di definizione delle classi geomeccaniche .....	20
5.3 Descrizione delle unità geomeccaniche .....	22
5.4 Definizione generale del comportamento in fase di scavo degli ammassi analizzati	27
5.4.1 Definizione generale del comportamento in fase di scavo nel settore di ammasso del cunicolo della Maddalena .....	30
6. ANALISI DELL'AFFIDABILITÀ DEI DATI GEOMECCANICI – IL METODO GRA (GEOMECHANICAL RELIABILITY ANALYSIS) .....	36
6.1 Calcolo del grado di affidabilità (GR-index).....	38
6.2 Risultati del metodo GRA lungo il tracciato .....	39
7. STATO TENSIONALE IN SITU .....	41
8. BIBLIOGRAFIA .....	45
ALLEGATO 1 – SINTESI DEI VALORI DEI PARAMETRI GEOMECCANICI PER OGNI LITOTIPO - TRATTA ITALIANA - .....	46
ALLEGATO 2 - CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA DELLE LITOLOGIE ATTESE LUNGO LE OPERE SOTTERRANEE – TERRITORIO ITALIANO .....	48
ALLEGATO 3 – SINTESI DEI VALORI DI RIFERIMENTO PER I PARAMETRI DELLE CLASSI GEOMECCANICHE E STATO TENSIONALE SECONDO LE CLASSI AFTES – TERRITORIO ITALIANO .....	49
ALLEGATO 4 – METODO DI CALCOLO DEL GR-INDEX CON ESEMPI PER LE LITOLOGIE ATTESE LUNGO IL TUNNEL DI BASE .....	50
Dati di partenza e loro provenienza (parametro D) .....	51
Rilevanza dei dati disponibili (parametro N) .....	53
Dispersione statistica del set di dati (parametro S).....	54
Calcolo del grado di affidabilità (GR-index).....	55
ALLEGATO 5 - GR-INDEX PER LE LITOLOGIE ATTESE LUNGO IL TUNNEL DI BASE (LATO ITALIA) .....	57

ALLEGATO 6 - SINTESI DELLA CARATTERIZZAZIONE E CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA DEFINITA IN FASE DI APR .....	58
--	----

## RESUME / RIASSUNTO

L'actuelle phase d'étude du Projet en Variant (PRV) prévoit le déplacement de l'excavation de la partie italienne du Tunnel de Base, à partir de la nouvelle Galerie Maddalena 2, vers l'entrée Est du Tunnel de Base située à Susa.

Le Projet en Variant prévoit aussi le déplacement du Site de Clarea dans le secteur entre le Pk (BP) 51+700 – 50+600 du Tunnel de Base.

En outre ensemble la Galerie Maddalena 2 seront réalisés autres nouvelles œuvres comme les Galeries de Connexion 1 et 2 et la Galerie Maddalena 1bis, les premiers deux fonctionnels d'un point de vue logistique et de ventilation pour la phase des excavation, la Galerie Maddalena 1bis avec fonction de stockage irréversible des roches vertes provenant de l'excavation du Tunnel de Base.

Les paramètres géo-mécaniques qui ont conduit à la définition de 12 unités géo-mécaniques (UG) proposées dans cette phase de conception, se réfèrent à la classification déjà approuvée dans la phase précédente de Projet Définitive Approuvée. Dans la phase actuelle du Projet en Variant (PRV) à été seulement réalisé une mise à jour /intégration des données précédentes du Projet Définitive Approuvée, intégrations liées, pour la côté italien, principalement à les nouvelles données acquises grâce à le retour d'expérience de l'excavation du tunnel géognostique de la Maddalena (actuellement en cours), pour la côté français grâce à les nouvelles données acquises après le Projet de Référence (par exemple, les nouvelles données de l'excavation de la descenderie SMLP4 - rameau 3A et forage F170 en axe au puits d'Avrieux); pour les traitement spécifiques de ces données, voir le document PRF C3B 0016 00-03- 02 30-01.

Les nouvelles données provenant du tunnel de la Maddalena peuvent être projetées, sur le Tunnel de Base, le long de la section entre les pk 50 + 100 et 53 + 750, en particulier entre les pk 50 + 100 et 52 + 000, où les tracés des tunnels coïncident. L'estimation des conditions envisagés de l'amas sont

L'attuale fase di studio di Progetto in Variante (PRV) prevede lo spostamento dello scavo del lato italiano del Tunnel di Base partendo dalla nuova Galleria della Maddalena 2 verso l'imbocco est del Tunnel di Base ubicato a Susa.

Il Progetto in Variante prevede anche lo spostamento del Sito di Clarea nel settore compreso tra le Pk (BP) 51+700 – 52+600 del Tunnel di Base.

Inoltre insieme alla Galleria Maddalena 2 saranno realizzate ulteriori nuove opere quali le Gallerie di Connessione 1 e 2 e la Galleria della Maddalena 1bis, le prime due funzionali dal punto di vista logistico e di ventilazione per la fase di scavo dell'opera principale, la Galleria Maddalena 1bis con funzione di stoccaggio irreversibile delle rocce verdi provenienti dallo scavo del Tunnel di Base.

I parametri geomeccanici che hanno portato alla definizione di 12 unità geomeccaniche (UG) proposte in questa fase progettuale fanno riferimento alla classificazione già approvata nella precedente fase di Progetto Definitivo Approvato. Nell'attuale fase di Progetto di Variante (PRV) è stato unicamente eseguito un aggiornamento/integrazione ai precedenti dati di Progetto Definitivo Approvato, integrazioni legate, sul lato italiano, principalmente ai nuovi dati acquisiti attraverso il ritorno di esperienza dello scavo del cunicolo esplorativo della Maddalena (attualmente in corso), sul lato francese ai nuovi dati acquisiti successivamente il Progetto di Riferimento (es. dati di scavo nuova discenderia SMLP4 - ramo 3A e Sondaggio F170 in asse al pozzo di Avrieux), ove per la specifica trattazione si rimanda all'elaborato PRF C3B 0016 00-03- 02 30-01.

I nuovi dati relativi al cunicolo della Maddalena possono essere proiettati, sul Tunnel di Base, lungo il settore compreso tra le pk 50+100 – 53+750. Lungo tale

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

probablement assez comparables à ceux observés au cours de l'excavation du tunnel géognostique. Pour cette raison, dans cette section, il est préférable d'utiliser directement les paramètres acquis dans le tunnel de la Madeleine en place de celles proposées dans les unités géo-mécaniques.

Pour les autres secteurs, où la projection des données du tunnel de la Maddalena est plus incertain ou non exécutable, est confirme la classification géomécanique approuvés dans le Projet Définitive Approuvé.

Le tableau suivant reprend les lithologies attendues le long de l'ouvrage du projet, de Saint-Jean-de-Maurienne à la tête est du Tunnel de Base à Suse divisées en 12 unités géomécaniques.

settore, in particolar modo tra le pk 50+100 – 52+000 ove i tracciati dei tunnel coincidono, la stima delle condizioni di ammasso attese sono verosimilmente del tutto simili a quelle riscontrate in corso di scavo del cunicolo esplorativo. Per tale motivo in questo tratto è preferibile utilizzare direttamente i parametri acquisiti nel cunicolo della Maddalena al posto di quelli proposti nei gruppi geomeccanici.

Per le restanti settori, ove la proiezione dei dati del cunicolo della Maddalena risulta più incerta o non eseguibile, si conferma la classificazione geomeccanica già approvata in Progetto Definitivo Approvato.

La tabella seguente riporta le litologie attese lungo l'asse dell'opera in progetto, da Saint-Jean-de-Maurienne all'imbocco est del Tunnel di Base a Susa suddivise in 12 unità geomeccaniche.

Unité Géomécanique	Lithologie	Unità Geomeccanica	Litologia
A	Anhydrites et gypses	A	Anidriti e gessi
B	Quartzites, conglomérats quartzitiques schisteux de Loutraz	B	quarziti, conglomerati quarziticici scistosi di Loutraz
C	Marbres, dolomies, calcaires et argilites	C	Marmi, dolomie, calcari e argilliti
D	Calcmicaschistes, schistes carbonatés gneiss albitiques, mélange de paragneiss et quartzites (Dora Maira), gneiss leucocratiques, micaschistes conglomératiques quartzitiques d'Ambin, micaschistes et gneiss oeillés, quartzites micacés et conglomérats quartzitiques, gneiss, micaschistes	D	Calcmicascisti, scisti carbonatici, gneiss albitici, paragneiss e quarziti intercalate (Dora Maira), gneiss leucocratici, micascisti quarziticici conglomericati d'Ambin, micascisti e gneiss occhiadini, quarziti micacee e conglomerati quarziticici, gneiss, micascisti
E	Grès	E	Arenarie
F	Calcaires marneux	F	Calcari marnosi
G	Prasinites, Métabasites	G	Prasiniti, Metabasiti
H	Schistes, Flysch schisteux, Flysch schisto-greseux	H	Scisti, Flysch scistosi, Flysch scisto-arenacei

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

I	Charbon	I	Carbone
H1	Grès, Schistes, Roches intensément fracturées	H1	Arenarie, scisti, rocce molto fratturate
J	Roches de faille et cargneules	J	Rocce di faglia e carnirole
K	Dépot meubles	K	Depositi non consolidati

**Tronçon du tunnel de base entre Saint-Julien-Mont-Denis et Sapey-Orgère (PK 3+860 – 28+500)** - Le modèle global défini dans le cadre du PR n'a pas été modifié.

**Zone briançonnaise interne de Vanoise, secteur de Modane-Avrieux (pk 28+500 - 33+350)** - Le massif rocheux avec une fracturation moyenne a un comportement géomécanique de bon à moyen (UG B).

De mauvaises conditions géomécaniques sont attendues au niveau des groupes d'anhydrites et de gypses fracturés (UG J).

**Unités carbonatées et sulfatées de la Nappe des Gypses (pk 33+350 – 39+450)** - La formation de calcaires et de dolomite de l'Esseillon (pk 33+350-34+ 070) a un comportement géomécanique moyen (UG C).

Les roches de la Nappe des Gypses (Pk 34+070 - 36+900), ont un comportement géomécanique assez bon (UG A).

Les roches de l'Unité de Lozes (Pk 36+900 – Pk 39+450) ont un comportement géomécanique moyen (UG C).

Les roches de la couverture de l'Ambin (Pk 37+500 – Pk 38+500) ont un comportement géomécanique de bon à moyen (UG D).

**Série de Clarea et d'Ambin (pk 39+450 - 55+029)** - Jusqu'au pk 54+900 les roches de la Clarea présentent général caractéristiques géomécaniques par discrète à bonnes (UG B et UG D).

Au niveau des zones de failles il est prévu des caractéristiques géomécaniques de qualité médiocre à mauvaise. Les données du

**Tratto del Tunnel di Base tra Saint-Julien-Mont-Denis e Sapey-Orgère (PK 3+860 – 28+500)** - Il modello globale definito nell'ambito del PR non è stato modificato.

**Zona brianzonese interna di Vanoise, settore di Modane-Avrieux (pk 28+500 -33+350)** - L'ammasso roccioso in condizioni di media fratturazione ha un comportamento geomeccanico da buono a medio (UG B).

Cattive condizioni geomeccaniche sono attese in corrispondenza delle fasce d'anidriti e gessi fratturati (UG J).

**Unità carbonatiche e solfatiche della Falda dei Gessi (pk 33+350 – 39+450)** - La formazione di calcari e dolomie d'Esseillon (pk 33+350 - 34+070) ha comportamento geomeccanico discreto (UG C).

Le rocce della Falda dei Gessi (pk 34+070 - 36+900), hanno buona qualità geomeccanica (UG A).

Le rocce carbonatiche dell'Unità di Lozes (Pk 36+900 – Pk 39+450) hanno comportamento geomeccanico discreto (UG C).

Le rocce della copertura d'Ambin (Pk 37+500 – Pk 38+500) presentano caratteristiche geomeccaniche da buone a discrete (UG D).

**Serie di Clarea e d'Ambin (pk 39+450 - 55+029)** - Fino alla pk 54+900 le rocce della Serie di Clarea presentano generali caratteristiche geomeccaniche da discrete a buone (UG B e UG D).

In corrispondenza delle zone di faglia sono attese peggioramenti nelle caratteristiche geomeccaniche, stimabili

retour d'expérience de la Maddalena, projetable le long de la zone située entre le pk 50+100 et 53+750 ont montré cependant pour les zones de failles caractéristiques essentiellement médiocres.

Entre les pk 52+750 et 54+940, la qualité géomécanique du massif rocheux devrait être améliorée grâce à la présence des gneiss du Complexe d'Ambin.

Sur le tronçon compris entre le pk 54+940 et 55+029 les caractéristiques géomécaniques (UG B) sont encore principalement bonnes.

**Zone à Ecailles Tectoniques (pk 55+029 - 56+058)** - Toute cette section de tunnel est caractérisée par une succession hétérogène de « sous-tronçons » aux caractéristiques géomécaniques médiocres (UG D) de schistes lustrés de la Zone Piémontaise et d'autres géomécaniquement très faibles (J UG) correspondant à des horizons de cargneules et à des zones de failles.

**Val Cenischia (pk 56+058 - 57+160)** - Les dépôts meubles présents le long du tronçon en objet relèvent du groupe géomécanique UG K.

**Unité Puys - Venaus (Zone Piémontaise) (pk 57+160 - 60+711)** - Le massif présente des caractéristiques assez bonnes car elle relève du groupe géomécanique UG D des schistes lustrés de la Zone Piémontaise et des horizons de Gneiss de Charbonnel.

Au niveau de la Zone de faille de Venaus la roche relève principalement du groupe UG J.

**Unité Océanique (pk 60+711 - 61+090)** - Sur ce tronçon, le massif rocheux relève du groupe géomécanique UG G et présente des caractéristiques assez bonnes.

**Plaine de Susa** - Les dépôts quaternaires de la plaine de Suse ont été considérés comme faisant partie d'une unité unique géomécanique (UG K) «dépôts de sols à gros grains moyennement épais ou sols à grains fins moyennement consistants».

da mediocri a scadenti. I dati provenienti dal ritorno di esperienza della Maddalena, proiettabili lungo il settore compreso tra le pk 50+100 e 53+750 hanno tuttavia evidenziato per le zone di faglia caratteristiche per lo più mediocri.

Tra le pk 52+750 e 54+940, la qualità dell'ammasso migliora progressivamente grazie alla presenza degli gneiss del Complesso d'Ambin.

Nella tratta compresa tra le pk 54+940 e 55+029 prevalgono ancora buone caratteristiche geomeccaniche (gruppo UG B).

**Zona a Scaglie Tettoniche (pk 55+029 - 56+058)** - Quest'intero settore di galleria è caratterizzato da una successione eterogenea di 'sottotratte' con caratteristiche geomeccaniche mediocri (UG D) dei calcescisti della Zona Piemontese e altre geomeccanicamente molto scadenti (UG J), corrispondenti agli orizzonti di carnirole ed a zone di faglia.

**Val Cenischia (pk 56+058 - 57+160)** - I depositi sciolti presenti lungo la tratta in esame sono classificati come gruppo geomeccanico UG K.

**Unità Puys - Venaus (Zona Piemontese) (pk 57+160 - 60+711)** - L'ammasso presenta caratteristiche discrete, in quanto rientra nel gruppo geomeccanico UG D dei calcescisti della Zona Piemontese e degli orizzonti di Gneiss di Charbonnel.

In corrispondenza della Zona di faglia di Venaus la roccia ricade prevalentemente nel gruppo (UG J).

**Unità Oceaniche (pk 60+711 - 61+090)** - In questa tratta l'ammasso roccioso rientra nel gruppo geomeccanico UG G e presenta caratteristiche discrete.

**Piana di Susa** - I depositi quaternari della piana di Susa sono stati considerati facenti parte di un'unica unità geomeccanica (UG K), "depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti".

**Tunnel de l'Interconnexion** - Les paragneiss et les micaschistes du Dora Maira (Complexe de Meana – Mont Muretto) qui seront concernés par les tunnels d'interconnexion relèvent de l'UG D. Les caractéristiques du massif rocheux sont moyennes/bonnes.

**Synthèse du modèle géotechnique et géomécanique de référence du tronçon à l'aire libre dans la plaine de Suse et à Bussoleno** - La caractérisation géotechnique des sols qui constituent la plaine alluvionnaire de Suse et des cônes de déjection alluvionnaires a été effectuée en définissant des unités géotechniques qui regroupent des sols à comportement homogène.

Les sols de la plaine sont principalement constitués de dépôts alluvionnaires non cohésifs.

Dans la zone de Bussoleno (rive gauche de la Dora), il n'existe aucune donnée géologique et géotechnique résultant de reconnaissances directes. Toutefois, le long de la Vallée de Suse, de l'amont à l'aval, on observe une diminution générale de la granulométrie des sédiments liée à l'évolution stratigraphique du secteur. Pour cette raison, il a été émis l'hypothèse que les dépôts alluvionnaires de la zone de Bussoleno sont caractérisés par un plus grand pourcentage de fines par rapport aux dépôts alluvionnaires présents dans la zone de Susa.

**Gallerie d'interconnessione** - I paragneiss e i calcemicascisti del Dora Maira (Complesso di Meana – Monte Muretto) che verranno interessati dalle gallerie d'interconnessione sono classificati nell'UG D. Le caratteristiche dell'ammasso roccioso sono medio-buone.

**Sintesi del modello geotecnico e geomeccanico di riferimento del tratto all'aperto nella Piana di Susa e a Bussoleno** - La caratterizzazione geotecnica dei terreni che costituiscono la piana alluvionale di Susa e dei conoidi alluvionali è stata effettuata definendo unità geotecniche che raggruppano terreni a comportamento omogeneo.

I terreni della piana sono costituiti principalmente dai depositi alluvionali non coesivi.

Nel settore di Bussoleno (sinistra Dora) non è disponibile alcun dato geologico-geotecnico derivante da indagini dirette, tuttavia procedendo lungo la Valle di Susa, da monte verso valle, è osservabile una generale riduzione della granulometria dei sedimenti legata all'evoluzione stratigrafica del settore. Per questo motivo è stata fatta l'assunzione che i depositi alluvionali del settore di Bussoleno siano caratterizzati da una percentuale maggiore di porzione fine rispetto ai depositi alluvionali presenti nel settore di Susa.



## 1. Introduzione

Nell'ambito del Progetto di Riferimento in Variante della Nuova Linea Ferroviaria Torino-Lione, la presente relazione è finalizzata alla descrizione della caratterizzazione geomeccanica degli ammassi rocciosi previsti lungo il tracciato delle opere in sotterraneo, ossia il Tunnel di Base e la galleria d'interconnessione, e delle zone all'aperto, ossia la Piana di Susa e l'interconnessione a Bussoleno. Benché la relazione si inserisca nel Progetto di Riferimento in Variante della tratta compresa tra il confine franco-italiano (pk 48+672) e l'interconnessione con la linea storica a Bussoleno, la definizione del Modello Geomeccanico è stata realizzata sulla base degli elementi complessivi raccolti sull'intera tratta della NLT, ovvero tra il portale di St. Jean de Maurienne e l'interconnessione a Bussoleno. Questo per poter fornire un modello omogeneo che integri la complessità geologico-strutturale e geomeccanica per la valutazione dei rischi geologici il dimensionamento delle sezioni tipo e delle misure di mitigazione dei rischi geologici valutati in fase di scavo e residuali.

L'attuale fase di studio di Progetto in Variante prevede lo spostamento dello scavo del lato italiano del Tunnel di Base da realizzarsi partendo dalla nuova Galleria della Maddalena 2 verso l'imbocco est del Tunnel di Base ubicato a Susa.

Oltre agli aggiornamenti dovuti alla variante sopra descritta, i principali aggiornamenti eseguiti in questo elaborato, rispetto alla versione di Progetto Definitivo, sono legati, sul lato italiano, principalmente ai nuovi dati acquisiti attraverso il ritorno di esperienza dello scavo del cunicolo esplorativo della Maddalena (attualmente in corso), nonché ai nuovi dati acquisiti sul lato francese successivamente al Progetto di Riferimento (es. dati di scavo nuova discenderia SMLP4 - ramo 3A e Sondaggio F170 in asse al pozzo di Avrieux), ove per la specifica trattazione si rimanda all'elaborato PRF C3B 0016 00-03- 02 30-01.

In particolare relativamente al lato italiano, le modifiche/aggiornamenti apportati al seguente elaborato, rispetto a quanto descritto nella precedente fase di Progetto Definitivo Approvato, riguardano principalmente il tratto del Tunnel di Base compreso all'incirca tra le pk (BP) 50+100 e 53+750, in cui, a seguito delle nuove informazioni provenienti dal ritorno di esperienza della Maddalena, è stato possibile aggiornare il Modello Geologico di Riferimento. In particolare tra circa le pk 50+100 e 52+000 i tracciati dei due tunnel coincidono, pertanto si attende di trovare condizioni geologiche del tutto simili; tra circa le pk (BP) 52+000 e 53+750 i tracciati si allontanano progressivamente verso est, tuttavia le informazioni acquisite nello scavo del cunicolo esplorativo possono essere proiettate, con un certo grado di affidabilità, su tale settore del Tunnel di Base.

Inoltre anche per il settore relativo al Complesso di Ambin, nonostante esso sia ubicato oltre la pk 53+750, è stata eseguita una integrazione dei parametri geomeccanici provenienti dal Cunicolo della Maddalena. Sebbene, infatti, la distanza non permette di proiettare con affidabilità le diverse informazioni geologico-strutturali, a livello di parametrizzazione geomeccanica si è tuttavia deciso, anche per questi litotipi, di dare evidenza dei nuovi dati e utilizzarli per aggiornare il grado di affidabilità GR-Index.

Si ricorda inoltre che al momento della stesura del seguente rapporto, l'analisi dei dati *as built* del cunicolo della Maddalena si ferma alla data del 18 Luglio 2016, riferiti alla pk 5+510 del cunicolo. Per il motivo sopra esposto, per il successivo settore di ammasso del Tunnel di Base, dopo la pk 50+100, si è fatto riferimento alle condizioni previste in progetto in fase di Progetto Definitivo Approvato.

Per quanto riguarda le valutazioni di carattere geomeccanico lungo i restanti settori non interessati dai dati di nuova acquisizione, esse si fondano essenzialmente sul Modello Geologico di Riferimento descritto nella relazione geologica generale (doc n°

**Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)**

PRV C3B 0090 00-01 01-10-01) e richiamato qui in modo sintetico, insieme ad un breve inquadramento idrogeologico.

Più in dettaglio, la documentazione analizzata e utilizzata per la redazione del presente rapporto è la seguente:

- Relazione Geomeccanica redatta in fase di Progetto Definitivo Approvato (Relazione Geomeccanica per le opere in sotterraneo – PD2 C3B 0100 00-03-0110-01): tale relazione espone uno studio approfondito delle caratteristiche geomeccaniche dei litotipi previsti lungo il tracciato.
- Il manoscritto “Essais et auscultations dans la conception et l'exécution de quatre tunnels dans les schistes lustrés de la Vallée de Suse (Italie)” di Stragiotti et al. (1979), presentato all’International Congress on Rock Mechanics a Montreux (Svizzera), nel quale sono presentati i parametri meccanici misurati per i calcescisti Dora Maira, nelle fasi di scavo della galleria Tanze (Autostrada A32).

Le analisi e la classificazione geomeccanica presentate di seguito fanno riferimento alle carte geologiche e ai profili geologico-geomeccanici redatti nella presente fase di Progetto in Variante ed elencati in calce.

Titolo	scala	codice elaborato
Carta geologica	1:10'000	PRV C3B 0127 65-01-01 30-02
Carta idrogeologica	1:10'000	PRV C3B 0129 65-01-01 30-03
Profilo geologico-geomeccanico in asse Tunnel di Base BP	1:10'000	PRV C3B 0004 26-19-01 40-01-03
Profilo geologico-geomeccanico in asse Tunnel di Base BP	1:25'000	PRV C3B 0103 00-03-03 40-01
Profilo geomeccanico as-built con applicazione delle sezioni tipo - Galleria Maddalena 1	1:5'000	PRV C3B 7206 26-48-01 40-01
Profilo geologico-geomeccanico nuova galleria della Maddalena	1:5'000	PRV C3B 7207 26-48-01 40-03
Profilo geologico-geomeccanico gallerie di connessione 1 e 2	1:5'000	PRV C3B 7208 26-48-01 40-04
Profilo geologico-geomeccanico in asse tunnel d'interconnessione BP	1:10'000	PD2 C3B 0007 65-01-01 40-01
Profilo geologico-geomeccanico in asse tunnel d'interconnessione BD	1:10'000	PD2 C3B 0008 65-01-01 40-02

### 1.1 Obiettivi dello studio

La presente relazione s’inquadra nelle attività di Progetto di Riferimento in Variante della Nuova Linea Ferroviaria Torino – Lione per conto di LTF – SAS in ottemperanza alla prescrizione n.235 del CIPE del 19/2015.

Le finalità del progetto sono quelle descritte nelle norme vigenti<sup>1</sup>, ovvero sono quelle atte alla definizione delle criticità riconosciute sulla base delle indagini geologiche svolte e degli interventi, necessari per il superamento di dette criticità, da realizzare nel prosieguo dell'iter progettuale.

A partire da quanto svolto nelle fasi precedenti, nella fase progettuale in corso si è reso necessario un processo di revisione e aggiornamento legato ai seguenti fattori:

- variazioni apportate allo scavo del Tunnel di Base con lo spostamento dell'attacco nel settore della Maddalena e dell'ubicazione del sito di sicurezza di Clarea e relativamente alle nuove gallerie necessarie a tale variante (Galleria della Maddalena 2 e Gallerie di connessione 1 e 2);
- disponibilità di maggior dettaglio geologico e geomeccanico in funzione dei nuovi dati acquisiti nel corso dello scavo del cunicolo esplorativo della Maddalena;
- eventuale ottimizzazione della classificazione realizzata in precedenza;

Il fine è quello di fornire, per le singole tratte, i seguenti parametri:

- Valore in percentuale dei litotipi presenti;
- Valore dell'Indice RMR
- Valore dell'indice GSI
- Valore del rapporto  $\sigma_c/\sigma_0$  e suddivisione nelle classi CN secondo la classificazione proposta dall'AFTES (*Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains* – Raccomandazione del GT1 – 2003)
- Una classificazione geomeccanica che inquadri tutti i litotipi presenti lungo il tracciato attuale del Tunnel di Base e della galleria d'interconnessione.

Il presente studio ha quindi permesso di:

- Integrare gli studi precedenti e fornire un'analisi di maggiore dettaglio per mezzo delle risultanze dei nuovi scavi in sotterraneo, delle nuove indagini e delle nuove prove effettuate.

Nell'ambito del contesto sopra descritto, la presente nota è volta a descrivere la metodologia generale utilizzata nel processo di classificazione geomeccanica e a illustrare i risultati dello studio.

## 1.2 Inquadramento dell'area di studio

L'area di studio costituisce un corridoio di circa 4 km a cavallo dell'ipotesi di tracciato di riferimento. Per la presente relazione, essa si estende dal confine italo-francese (Col Clapier) verso la Val Cenischia e la media Valle di Susa in territorio italiano. In territorio italiano il tracciato del Tunnel di Base interessa i comuni di Chiomonte, Giaglione, Venaus, Mompantero e Susa. Nel comune di Chiomonte (in località Maddalena) è previsto l'imbocco della Galleria della Maddalena 2 ove partiranno gli scavi; nel Comune di Susa è invece previsto l'imbocco est de Tunnel di Base ove terminerà lo scavo.

Il Progetto in Variante prevede anche lo spostamento del Sito di Clarea nel settore compreso tra le Pk (BP) 51+700 – 52+600 del Tunnel di Base.

Inoltre insieme alla Galleria Maddalena 2 saranno realizzate ulteriori nuove opere quali le Gallerie di Connessione 1 e 2 e la Galleria della Maddalena 1bis, le prime due funzionali dal punto di vista logistico e di ventilazione per la fase di scavo dell'opera principale, la Galleria

<sup>1</sup> Per quanto attiene alla normativa vigente, le analisi e valutazioni nell'ambito della Revisione del Progetto Definitivo sono state eseguite in ottemperanza del D.Lgs 163/2006 "Codice dei contratti pubblici (ex Legge Merloni)" e del DM 14/01/2008 in cui sono descritte le Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC - 2008).

Maddalena Ibis con funzione di stoccaggio irreversibile delle rocce verdi provenienti dallo scavo del Tunnel di Base.

Il Tunnel di Base ha uno sviluppo di circa 28 km di cui circa 12.5 in territorio italiano. Di questi ultimi circa 11500 m sono scavati in roccia, mentre i restanti 1000 m circa corrispondono al tratto scavato in depositi quaternari del fondovalle Cenischia.

La tratta analizzata nel presente documento comprende la parte italiana relativa alla fase 1 della tratta transfrontaliera del Tunnel di Base, ovvero tra il Confine di Stato e l'imbocco est del Tunnel, a Mompantero; da Mompantero l'opera prosegue verso est, attraverso la Piana di Susa e fino alle gallerie d'interconnessione tra il Tunnel di Base e la linea ferroviaria storica Torino – Modane, nel Comune di Bussoleno. Le opere in progetto comprendono inoltre il cunicolo esplorativo della Maddalena, la Galleria della Maddalena 2, le Gallerie di connessione 1 e 2 e il Sito di Sicurezza di Clarea (Figura 1).

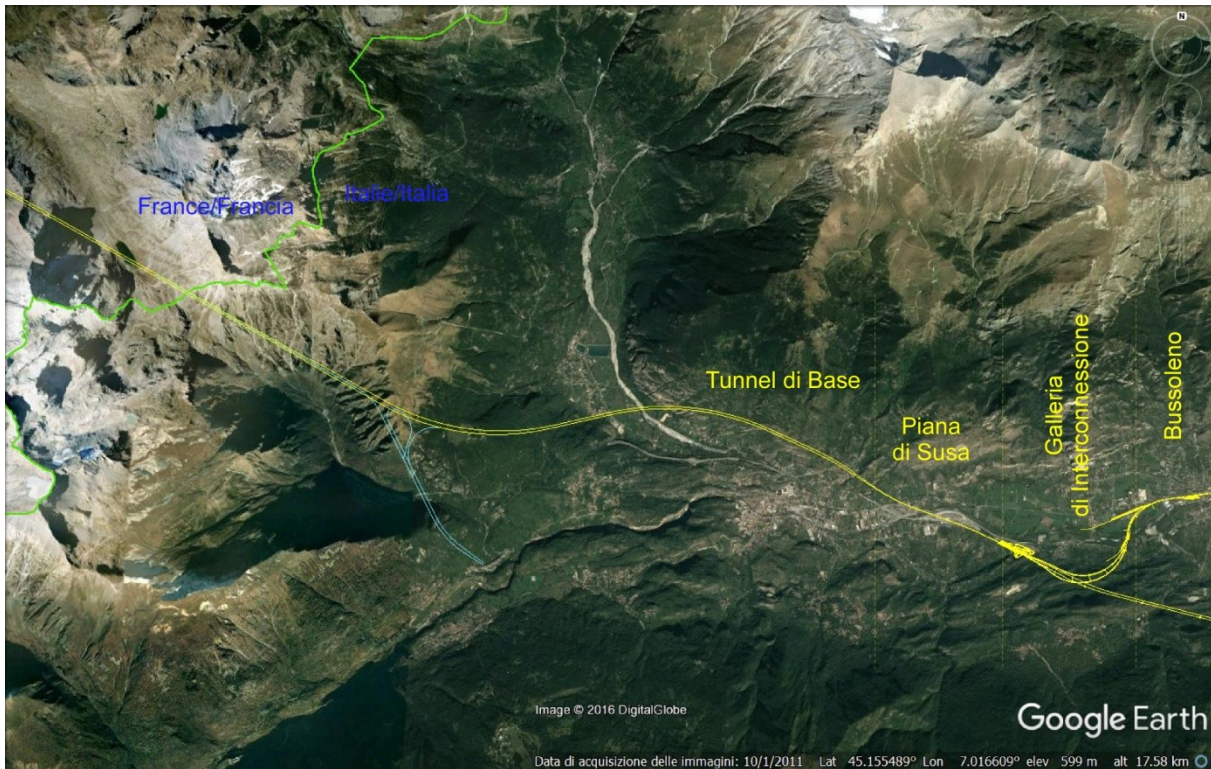


Figura 1 - Inquadramento dell'area di studio (Lato Italia) e opere principali in progetto.

### 1.3 Attività svolte

Questa fase progettuale ha compreso la revisione degli studi precedenti in funzione della variante al Progetto Definitivo e la loro integrazione con i dati geognostici e di terreno di nuova acquisizione.

L'analisi critica dei dati nuovi ed esistenti è stata eseguita in funzione della soluzione finale proposta per il tracciato e in funzione delle criticità peculiari di ogni tratta.

Nella tratta qui considerata sono integrati i dati geologici e geomeccanici provenienti dallo scavo del cunicolo esplorativo della Maddalena e dalle indagini geologiche e geomeccaniche eseguite lungo il suo tracciato.

Come già ricordato in precedenza, la revisione ha preso anche in considerazione i nuovi dati acquisiti anche sul lato francese, in particolare quelli legati allo scavo della galleria esplorativa 3A di SMLP4, dei nuovi dati geognostici del sondaggio F170 e di quello eseguito

al piede della discenderia di La Praz, per un'analisi specifica di tali dati si rimanda tuttavia allo specifico elaborato PRF C3B 0016 00-03- 02 30-01.

Per quanto riguarda il modello geomeccanico lungo la galleria d'interconnessione, esso fa riferimento a quanto già presentato e approvato in fase di Progetto Definitivo Approvato, a cui si rimanda.

## 2. Sintesi delle indagini geologiche realizzate

Le indagini geologiche realizzate sul lato Italia del Tunnel di Base sono rappresentate nell'elaborato 'Planimetria con ubicazione indagini e opere' (PRV C3B 0108 00-00-05 30-01).

Tra queste le indagini eseguite in superficie comprendono:

- sondaggi geognostici (codice 'S') con numerose prove in situ e di laboratorio;
- rilievi geostutturali (codice 'SG')
- indagini geofisiche: indagini geoelettriche, indagini sismiche a riflessione, indagini sismiche a rifrazione con tecnica tomografica.

Le indagini e in generale tutti dati provenienti dallo scavo del cunicolo della Maddalena, che costituiscono i principali dati di nuova acquisizione, sono descritti nel dettaglio negli specifici elaborati relativi al ritorno di esperienza dello scavo del cunicolo esplorativo della Maddalena (PRV C3B 7206 26-48-01 40-01 e PRV C3B 7200 26-48-01 10-01).

In generale essi comprendono:

- sondaggi geognostici a carotaggio e distruzione con prove in situ e di laboratorio;
- prove geomeccaniche in galleria e in nicchia;
- rilievi geologici dei paramenti della galleria;
- indagini geofisiche.

Nella carta sono inoltre riportati i sondaggi realizzati per progetti in prossimità del tracciato del Tunnel di Base e delle gallerie di interconnessione, in particolare il progetto dell'impianto idroelettrico AEM di Pont Ventoux e il tracciato delle opere sotterranee connesse, le gallerie autostradale dell'A32 e la galleria ferroviaria di Tanze.

Le principali indagini geognostiche eseguite da LTF in territorio italiano sono riportate nella tabella seguente e riferite alle macro-tratte lito-tettoniche omogenee di pertinenza.

Zona	Progressiva (Pk)	Unità litologiche	Litologie indagate	Sondaggi – rilievi strutturali
Brianzonese interna (Ambin)	48+672-55+029	Copertura meso-cenozoica, Complesso d'Ambin e di Clarea	Quarziti (QSE), gneiss e micascisti clorito-albitici con livelli di conglomerati quarziticci (AMA, AMC, AMD), micascisti e gneiss a glaucofane (CL) con intercalate metabasiti anfibolitiche (CL-b)	S4, S5, S23, SM05
Piemontese	55+029-56+058	Zona a scaglie tettoniche	Calcescisti, gneiss e carnirole	S5, S6/S6bis, S12
Depositi Cenischia	56+058-57+160	Depositi quaternari	Depositi alluvionali di fondovalle, torrentizi e di conoide alluvionale e misto (sabbie, ciottoli e blocchi in matrice limoso-sabbiosa) prevalenti, depositi antropici	S18, S19, S20
Piemontese	57+160-60+711	Unità Puys-Venaus	Calcescisti con Ofioliti (gcc) e Gneiss di Charbonnel (gck)	S1, S2, S3, S6/S6bis, S12, S14, S24, S42; SG047, SG048
	60+711-61+090	Unità Oceaniche (Zona Piemontese dei Calcescisti con Pietre Verdi)	Prasiniti, serpentiniti e serpentinoscisti	S8, S20, S9; SG010, SG011, SG045, SG046, SG047, SG048

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

<b>Piana di Susa</b>	<b>61+090-63+820</b>	Depositi quaternari	Depositi alluvionali di fondovalle e di conoide alluvionale / misto, depositi antropici	S65, S66, S67, S72, S68, S68/2, S69, S71
<b>Unità Dora Maira</b>	<b>63+820-1+943</b>	Coperture mesozoiche carbonatiche	Calcemiscascisti	SG001, SG003, SG004, SG005, SG037, SG041, SG042, SG043, SG044
<b>Bussoleno</b>	<b>1+943 -</b>	Depositi continentali e alluvionali	-	-

Tabella 1 – Ripartizione dei sondaggi in funzione della geologia attraversata dal Tunnel.

### 3. Contesto geologico di riferimento

Nel seguito viene descritto sinteticamente il contesto geologico di riferimento per le opere in sotterraneo cui si riferisce l'analisi geomeccanica presentata. Una descrizione dettagliata del contesto geologico e idrogeologico lungo l'asse del Tunnel di Base e di quello di Interconnessione è fornita nel documento PRV C3B 0090 00-01 01-10-01 Relazione Geologica Generale.

Il tracciato dei Tunnel di Base e d'interconnessione attraversa un contesto geologico estremamente complesso, sia per la varietà litologica sia per l'assetto geo-strutturale. L'area di studio ricade all'interno del dominio Pennidico delle Alpi Occidentali: nella tratta oggetto della presente relazione, dal confine a Susa sono presenti le rocce di basamento e copertura del Massiccio d'Ambin e le unità di copertura generalmente attribuite alla Zona Piemontese (lato Italia), separate da potenti orizzonti di scollamento; le gallerie di interconnessione si svilupperanno in paragneiss e calcemicascisti del Massiccio Dora Maira, mentre nell'attraversamento delle zone in pianura (Susa/Bussoleno) verranno interessati depositi quaternari alluvionali di fondovalle, torrentizi, di conoide e colluviali.

Lungo il settore in esame la strutturazione dell'ammasso roccioso è il risultato della sovrapposizione di diverse fasi deformative principali, il cui numero e i cui effetti variano da una zona all'altra. In sintesi, passando dall'esterno all'interno della catena (dalla Francia verso l'Italia) si osserva un incremento della deformazione, sia in termini di numero di fasi deformative che in termini di intensità deformativa per ogni singola fase. La sequenza delle Zone o Domini tettonici è presentata nel seguito (Figura 2):

- Zona Brianzonese interna, qui rappresentata dal Massiccio d'Ambin;
- La Zona a Scaglie Tettoniche: si tratta di una zona formata da un melange di diversi litotipi caratterizzati da una tettonizzazione molto elevata, che separa la Zona Brianzonese interna dalla Zona Piemontese;
- Un settore caratterizzato da depositi alluvionali di fondovalle del torrente Cenischia;
- La Zona Piemontese formata da calcescisti con associate rocce verdi;
- I depositi quaternari della Piana di Susa, corrispondenti principalmente alle alluvioni del Fiume Dora Riparia;
- Il Massiccio Dora Maira, rappresentato nella zona di studio da litotipi di copertura triassica.

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

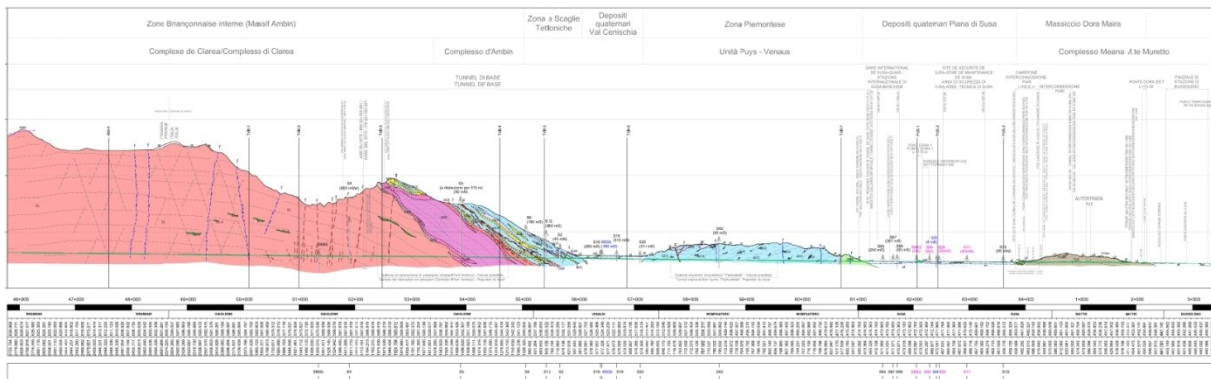


Figura 2 – Stralcio della sezione geologica del Tunnel di Base (Lato Italia) e distinzione dei domini tettonici da esso attraversati.

Nel seguito viene descritta la sequenza di litotipi attraversati dal Tunnel di Base e dalla galleria d'interconnessione.

### 3.1 Tunnel di Base

Nel presente paragrafo viene sintetizzato il contesto geologico lungo il tratto del Tunnel di Base in territorio italiano.

- **Da pk 48+672 a pk 55+029 le unità del Massiccio dell'Ambin:** questo settore è caratterizzato dai valori massimi di copertura (>2000 m) e attraversa il complesso di Clarea (formato prevalentemente da micascisti) e quello dell'Ambin (costituito principalmente da gneiss), entrambi afferenti al Massiccio d'Ambin. Fino alla pk 53+750 il tracciato interesserà gli gneiss aplitici del Complesso d'Ambin; sia negli scavi pregressi della Centrale di Pont Ventoux che durante lo scavo del cunicolo esplorativo della Maddalena questa roccia è risultata estremamente dura ed abrasiva, creando diverse criticità in termini di velocità di avanzamento e di usura dei materiali di scavo. Da un punto di vista della strutturazione fragile il tracciato dovrebbe attraversare una zona a fratturazione pervasiva, con spaziatura da metrica a plurimetrica e associata a potenziali faglie (es. zona di faglia Seguret/Col Clapier con direzione N 60°-70°E), dal confine di stato fino alla pk 50+100 circa. In questo settore i caratteri geologici e geomeccanici dell'ammasso roccioso saranno fortemente condizionati dall'elevato carico litostatico. Va inoltre menzionato che il modello geotermico proposto per questo settore fornisce temperature dell'ammasso che arrivano fino a oltre 40°C tra le pk 42 e 49 circa (valore massimo valutato pari a 47°C).
- **Da pk 55+029 a pk 56+058 la Zona a Scaglie Tettoniche:** la copertura rocciosa decresce regolarmente dalla progressiva 55+029 fino alla progressiva 56+000 passando da circa 500 a circa 100 metri. In questo settore lo scavo avverrà all'interno di livelli di calcescisti, gneiss e orizzonti evaporitici (gessi e carniole) che si alternano in una sequenza caotica tipica della Zona a Scaglie Tettonica che costituisce di fatto una potente banda di transizione tra il Massiccio d'Ambin e la Zona Piemontese. Essa è l'espressione del contatto tettonico tra le due unità: al suo interno si trovano infatti litotipi e lembi campionati da entrambe. Questo tratto è sostanzialmente caratterizzato da un ammasso di scadenti qualità geomeccaniche e dalla presenza di orizzonti in dissoluzione che possono formare veri e propri condotti carsici in corrispondenza dei quali è possibile si verifichino venute d'acqua anche importanti e sature in SO<sub>4</sub>.
- **Da pk 56+058 a pk 57+160 i depositi alluvionali della Val Cenischia** per passare sul versante sinistro della stessa valle: questa tratta prevede lo scavo in depositi alluvionali di fondovalle, generalmente sabbiosi e ghiaioso – sabbiosi, debolmente limosi e scarsamente coesivi. Il basamento roccioso al di sotto dei depositi quaternari si trova a

una quota inferiore alle opere in progetto. Il battente idraulico massimo previsto in questo settore è di circa 50-60 metri e coincidente con la copertura topografica. Infatti, la falda freatica dei depositi di fondovalle è in equilibrio con il T. Cenischia e presenta una soggiacenza variabile tra circa 5 e 20 metri. Inoltre, la falda di fondovalle è in connessione idraulica con la falda in roccia della Zona a Scaglie e alimenta le venute d'acqua nelle gallerie della centrale idroelettrica di Pont Ventoux.

- **Da pk 57+160 a pk 61+200 i calcescisti della Zona Piemontese:** questo settore è caratterizzato dai calcescisti della Zona Piemontese; in corrispondenza dell'ultimo tratto (350-400 metri) lo scavo interessa le rocce basiche e ultrabasiche afferenti alle Unità Oceaniche della Bassa Val di Susa e Valli di Lanzo. In questo settore non sono previste condizioni di criticità particolari dal punto di vista geomeccanico, se non la possibilità di intersecare zone di faglia lungo le quali possono essere presenti flussi idrici e l'ammasso si può presentare di scarsa qualità geomeccanica.

### 3.2 Gallerie d'interconnessione

Le Gallerie d'interconnessione attraversano con una prevedibile omogeneità, se non a livello puramente litologico per lo meno a livello di comportamento geomeccanico dell'ammasso roccioso, i litotipi di pertinenza del Massiccio Dora Maira.

In particolare le due canne della galleria d'interconnessione saranno scavate completamente all'interno dei calcemicascisti del Complesso di Meana-M.te Muretto. La copertura rocciosa aumenta progressivamente dagli imbocchi per raggiungere circa 150-170 metri nella tratta centrale dei tracciati. Sulla base dei dati a disposizione, non sono previste condizioni di criticità particolari lungo la parte principale del tracciato, salvo la possibile locale presenza di zone di faglia o di fratturazione, oggi non localizzabili ma che potrebbero determinare un ammaloramento dell'ammasso roccioso e conseguenti venute d'acqua puntuali in galleria.

In corrispondenza degli imbocchi è invece possibile la locale presenza di terreni sciolti. In corrispondenza dell'imbocco di monte (Traduerivi) va evidenziata la possibile presenza di uno spillway channel con riempimento in depositi glaciali. In corrispondenza dell'imbocco di valle, nei pressi di Bussoleno, il tunnel è localizzato all'interfaccia tra i depositi glaciali e di rimaneggiamento e i sottostanti calcemicascisti delle coperture Dora Maira.

### 3.3 Zone di pianura

Il settore della Piana di Susa comprende un breve tratto della valle principale a valle della confluenza del Cenischia e la tratta d'interconnessione con la Linea Storica nel settore di Bussoleno. I tratti distintivi del settore sono definiti dalla presenza dei depositi quaternari della piana alluvionale della Dora Riparia, da estesi conoidi alluvionali (Giandula, Grilli, Scaglione e Corrente) e dalla presenza alla base del versante destro di dorsali allungate in senso E - W riferibili al modellamento glaciale (area di Meana di Susa).

I terreni della piana sono costituiti principalmente da depositi alluvionali non coesivi; la facies dominante è rappresentata da ghiaie sabbioso - limose e da ghiaie ciottolose con sabbie.

Per quanto riguarda la profondità del basamento al di sotto dei depositi quaternari, nessuna indagine fornisce elementi certi. I sondaggi più profondi si sono spinti fino a 130 metri di profondità senza incontrare il basamento roccioso.

Si specifica che la realizzazione delle opere in progetto interesserà i soli depositi quaternari di fondovalle. Nessuna interazione con il basamento roccioso al di sotto dei depositi di fondovalle è prevista.



#### 4. Contesto idrogeologico di riferimento

Il modello idrogeologico elaborato per il Progetto di Riferimento in Variante fornisce i dati inerenti alla caratterizzazione idrodinamica dei litotipi attraversati dalle opere (e.g. grado di permeabilità e carichi idraulici), alla valutazione delle portate drenate dalle opere sotterranee nonché a loro chimismo e temperatura, e alle interferenze sulla risorsa idrica sotterranea e di superficie

I terreni attraversati dalle opere sono caratterizzati da permeabilità per porosità primaria pressoché nulla. Essi, infatti, sono costituiti da rocce di basamento e permeabili per porosità secondaria, ovvero con un grado di permeabilità connesso al loro stato di fratturazione e/o di carsismo. Fa eccezione il tratto in cui è previsto l'attraversamento del fondovalle Cenischia. Qui lo scavo avverrà in depositi sciolti di tipo alluvionale permeabili per porosità primaria connessa alla porosità efficace del sedimento. La tratta delle opere all'aperto nella Piana di Susa è anch'essa caratterizzata da terreni sciolti (depositi alluvionali quaternari) permeabili per porosità primaria.

Un altro elemento che condiziona fortemente la permeabilità dell'ammasso roccioso è la profondità a cui verranno realizzate le opere. È infatti noto come, per profondità elevate, si registri una tendenza del grado di permeabilità a diminuire in virtù dell'aumento del carico litostatico e del suo effetto 'saldante' sulle fratture. Tale fenomeno, tuttavia, non deve essere considerato in maniera generalizzata, in quanto il comportamento idrogeologico in profondità è funzione dell'orientazione delle strutture geologiche, della reologia della roccia (quindi del suo comportamento alla rottura) e della connettività dei sistemi di fratturazione e di faglia con le aree di ricarica ovvero con la superficie, oltre che della profondità.

I litotipi sono stati raggruppati in complessi idrogeologici caratterizzati ciascuno da comportamento idrogeologico omogeneo ovvero da un solo tipo di permeabilità (primario o secondario) che si mantiene in un campo di variazione piuttosto ristretto. Nella tabella che segue, oltre all'elenco dei complessi idrogeologici distinti in asse alle opere di progetto sono indicate le sigle dei litotipi che afferiscono a ciascuno di essi e il relativo campo di variabilità della permeabilità.

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

Complesso Idrogeologico			Classi di permeabilità			
Cod.	Nome	Codice	<1E-8	1E-8>K>1E-6	1E-6>K>1E-4	>1E-4
1	<i>Carniole, breccie tettoniche / Carnageules, breches tectoniques</i>	ATM, BCC, BCCs, eBr, K, Kng, Ksb, Kud, MMDk, ZSTm, ZSTs				
2	<i>Rocce carbonatiche (FR) / Roches carbonatées (FR)</i>	Cb, j4-7, jm, jmC, l1-4, ol-cs, ol-ci, t3-5, tC, tCd				
3	<i>Rocce carbonatiche e metadolomie (IT) / Roches carbonatées et métadolomies (IT)</i>	DGA, MCF				
4a	<i>Quarziti, conglomerati quarziti / Quartzites, conglomerats quartziriques</i>	ml, QSE, r-t, r-tCG, Tq				
4b	<i>Metabasiti e rocce verdi / Métabasites et roches vertes</i>	CLb, OMB, TCSg				
5	<i>Micascisti e gneiss / Micaschistes et gneiss</i>	AMA, AMC, AMD, AMF, CL, GS, S, SV				
6a	<i>Calcescisti e flysch (FR) / Calcschistes et flysch (FR)</i>	eFs, eFsg, e7G, j1, jmCM, t7				
6b	<i>Scisti, calcescisti filladici e calcemicascisti (IT) / Schistes, calcschists phyllitiques et calc-micaschistes (IT)</i>	GCC, GCK, TCS, TCSm, TPG				
7a	<i>Houillère arenaceo / Houiller gréseux</i>	hF, hLP				
7b	<i>Houillère scistoso / Houiller schisteux</i>	hBO, hE, h4-5				
8	<i>Anidriti e dolomie e marmi dolomitici con anidriti / Anhydrites et dolomies et marbres dolomitiques avec anhydrites</i>	CDng, Cng, cs-e, Dng, GDng, SGng, tcD, tDB, tG, tGng, tGsb, tng, tsD, t5S, t6				
Q1	<i>Depositi quaternari detritici e alluvionali / Dépôts quaternaires détritiques et alluviaux</i>	af1, af2, af3, ant, at, db, dc, df				
Q2	<i>Depositi glaciali indifferenziati / Dépôts glaciaires indifférenciés</i>	ac, af4, cd, cg, gi				
Q3	<i>Depositi lacustri / Dépôts lacustres</i>	af5, fg, la				

Tabella 2 – Elenco dei Complessi Idrogeologici e dei litotipi che li compongono con relativi valori attesi di permeabilità.

## 5. Classificazione geomeccanica di progetto in variante

### 5.1 Premessa

Nella classificazione geomeccanica proposta in fase di Progetto Definitivo Approvato la discriminante principale è legata al litotipo. In sintesi, all'interno di una stessa classe geomeccanica sono stati raggruppati litotipi analoghi o simili e che mostrassero caratteristiche geomeccaniche, rappresentate dai valori dei parametri fondamentali, simili. Ciò ha permesso di raggruppare litotipi aventi composizione, caratteristiche tessiturali e strutturali e valori dei parametri geomeccanici simili, e caratterizzati pertanto da un comportamento simile in fase di scavo.

Secondo il sistema classificativo proposto ogni litotipo è quindi inquadrabile in maniera univoca all'interno di una sola classe geomeccanica, facilitando pertanto l'applicazione della classificazione.

Nell'attuale fase di Progetto in Variante non si sono eseguite modifiche al sistema classificativo proposto e approvato in fase di Progetto Definitivo, è stata effettuato unicamente un'integrazione dei dati geomeccanici alla luce delle nuove informazioni acquisite dopo il Progetto Definitivo Approvato (lato Italia) e Progetto di Riferimento (lato Francia).

In linea generale i nuovi dati recentemente acquisiti confermano la classificazione proposta in sede di Progetto Definitivo Approvato. Tuttavia in alcuni casi specifici, come ad esempio nei gruppi geomeccanici UG J afferente alle rocce di faglia, si sono riscontrate delle sostanziali differenze, che inducono a non utilizzare la parametrizzazione proposta in Progetto Definitivo Approvato, la quale, alla luce delle evidenze di scavo, risulterebbe oltre modo conservativa.

Nel caso specifico delle rocce di faglia, i dati geomeccanici acquisiti durante lo scavo del cunicolo della Maddalena mostrano, in generale, una caratterizzazione meno pessimistica rispetto a quanto indicato in Progetto Definitivo Approvato nel gruppo UG J (esempio nei valori di GSI e RMR).

Se è pur vero che per i settori del Tunnel di Base che intercetteranno le stesse strutture attraversate alla Maddalena, è possibile, con ottima approssimazione, utilizzare direttamente i parametri *as-built* di quest'ultimo, diversamente, un'extrapolazione di tali condizioni su tutte le strutture fragili previste negli altri settori di ammasso del Tunnel di Base non terrebbe conto di effetti legati al contesto geo-litologico.

Non si può inoltre dimenticare che la classificazione geomeccanica definita in Progetto Definitivo Approvato, seppur di tipo generale e apparentemente più conservativa, è frutto di un'analisi dati acquisiti su tutto il tracciato e non in un limitato settore di ammasso. Non si può pertanto escludere che negli altri settori, non indagati dal cunicolo esplorativo, si possano avere lungo le faglie condizioni geomeccaniche più scadenti, verosimilmente più simili a quelle definite in Progetto Definitivo Approvato per il gruppo UG J.

Lo stesso discorso può essere evidenziato per il gruppo geomeccanico UG H1, relativo ai settori di ammasso intensamente fratturati. In particolare nel cunicolo della Maddalena, un po' come per le rocce di faglia, non si sono riscontrati settori di ammasso fratturato con condizioni geomeccaniche simili a quelle definite dai parametri attribuiti al gruppo UG H1 nel Progetto Definitivo Approvato. Generalmente, se si escludono limitati settori, l'ammasso roccioso è risultato meno scadente.

Per i motivi sopra indicati, in termini generali, per i tratti coperti dal ritorno di esperienza della Maddalena, ai fini di una rigorosa scelta dei migliori parametri di calcolo, è consigliabile utilizzare gli effettivi parametri *as built* che definiscono le condizioni riscontrate in fase di

scavo. Per gli altri settori non direttamente interessati dallo scavo del cunicolo esplorativo, o dove le condizioni geologico-geomeccaniche non possono essere estrapolate sul Tunnel di Base, rimane valida la classificazione definita in fase di Progetto Definitivo Approvato, a cui è preferibile far riferimento.

In linea generale i dati *as built* derivanti dal cunicolo della Maddalena coprono, lungo il Tunnel di Base, un settore di massiccio compreso tra le pk (BP) 50+100 e 53+750, in particolare tra circa le pk 50+100 e 52+000 i tracciati dei due tunnel coincidono, pertanto si attende di trovare condizioni del tutto simili; tra circa le pk (BP) 52+000 e 53+750 i tracciati si allontanano progressivamente verso est, tuttavia le informazioni acquisite nello scavo del cunicolo esplorativo possono essere proiettate, con un certo grado di affidabilità, su tale settore del Tunnel di Base.

Si ricorda inoltre che al momento della stesura del seguente rapporto, l'analisi dei dati *as built* del cunicolo della Maddalena si ferma alla data del 18 Luglio 2016, riferiti alla pk 5+510 del cunicolo. Per il motivo sopra esposto, per il successivo settore di ammasso del Tunnel di Base, dopo la pk 50+100, si è fatto riferimento alle condizioni previste in progetto in fase di Progetto Definitivo Approvato.

## 5.2 Metodo di definizione delle classi geomeccaniche

Il processo di aggiornamento delle classi geomeccaniche in fase di Progetto in Variante è stato sviluppato a partire dalla tabella di sintesi dei valori dei parametri geomeccanici disponibili in fase di Progetto Definitivo Approvato e integrati con i dati acquisiti successivamente, dettagliati nell'elaborato PRV C3B 7200 26-48-01 10-01.

Nella tabella seguente è proposta una sintesi dei principali valori assegnati a tutti i litotipi previsti lungo il tracciato delle opere, mentre la tabella completa è fornita in Allegato 1.

Il confronto con i dati acquisiti nel ritorno di esperienza del cunicolo esplorativo della Maddalena, ove disponibile, è proposto nelle colonne in rosso a fianco ai diversi gruppi geomeccanici di Progetto Definitivo Approvato.

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

Lithologie / Litologia		1	2		3		4	5		6	7		9	10
		TCS	gcc	gcc (Venaus)	gck	GCK; TPG	OMB; cl-b	AMC	AMC (Maddalena 1)	AMA, AMD	CL	CL (Maddalena 1)	DGA	tQ/ CSE
$\gamma$ [KN/m <sup>3</sup> ]	min	27,6	27,2	26,6	26,3	26,7	26,8	26,1	26,3	27,5	27,2	26,5	26,9	26,1
	noy / med	27,8	27,6	27,4	27,3	27,2	27,4	26,8	26,8	27,9	27,8	27,6	28,2	26,5
	max	28,5	27,8	28,8	28,4	28,6	28,5	28,1	27,2	28,7	28,3	29,0	29,2	26,8
	st. dev.	0,5	0,2	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,6	0,7	0,2
	n	3	13	32	10	26	7	55	7	23	34	15	55	12
	$\sigma_c$ [MPa]	min	42,8	14,4	10,6	3,8	63,4	9,8	34,5	138,8	26,5	36,9	37,7	34,5
noy / med		72,4	41,7	55,4	41,4	87,4	55	149,5	183,8	76,2	97,9	85,7	99	132,4
max		117,5	88,5	108,8	95,5	141,1	129,9	386,1	236,0	136,2	193,9	152,3	224,3	209,1
st. dev.		24,6	21,1	20,6	23,1	19,8	38,9	78,7	27,5	30,3	36,2	31,9	40,5	50,2
n		10	26	50	24	26	11	34	21	20	67	16	48	12
$\sigma_t$ [MPa]		min	2,5	4,9	2,4	4	8,6	1	4,9	8,3	5,1	7,1	7,2	1,8
	noy / med	8,52	9,4	7,7	9,2	11,5	7,3	12,3	8,5	6,9	12	13,9	5,7	11,4
	max	16,2	14	15	16,2	14,3	12,6	17,4	8,7	8,7	16,9	22,8	10,3	19,9
	st. dev.	4,8	2,8	3,5	4,3	1,9	3,9	3,3	0,3	2,5	2,8	4,1	1,8	4,5
	n	10	17	26	10	11	9	23	2	2	33	16	32	10

Tabella 3 – Stralcio della tabella di sintesi dei valori dei parametri geomeccanici per i diversi litotipi previsti lungo il Tunnel di Base in territorio italiano e la galleria d'interconnessione. I valori dei parametri illustrati derivano dai dati forniti durante le fasi progettuali precedenti integrati con i dati e le indagini aggiuntive realizzate dopo la fase Progetto Definitivo Approvato. I valori in rosso indicano i dati derivati da indagini successive alla fase di Progetto Definitivo Approvato (es. cunicolo della Maddalena);  $\gamma$  – peso di volume,  $\sigma_c$  – resistenza a compressione monoassiale,  $\sigma_t$  – resistenza alla trazione.

Come illustrato nella tabella in Allegato 1, sono stati individuati N. 21 litotipi distinti lungo il tracciato del Tunnel di Base e della galleria d'interconnessione.

I litotipi che presentano analogie composizionali e tessiturali-strutturali, nonché valori simili dei parametri geomeccanici, sono stati dunque raggruppati in N. 11 unità geomeccaniche principali (indicate con le sigle da UG A a UG J), alle quali si aggiunge la classe geomeccanica UG K, propria dei depositi sciolti.

Una sintesi delle classi geomeccaniche e dei relativi valori per i diversi parametri geomeccanici e per i sistemi classificativi GSI e RMR (valori minimi, massimi, medi e valori di riferimento) è presentata negli allegati 2 e 3. L'elenco delle classi geomeccaniche è presentato nelle tabelle seguenti e descritto nel seguito.

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

UG	Lithologie Litologia
B	Quartzites / Quarziti (QSE)
C	Marbres, dolomies et calcaires / Marmi, dolomie e calcari (DGA)
D	Gneiss et schistes / Gneiss e scisti (AMA, AMC, AMD, AMF, GCK, CI, TCS, TPG)
G	Prasinites et mesabasites / Prasiniti e metabasiti (OMB, cl-b)
H1	Roches très fracturées / Rocce molto fratturate
J	Roche de faille et cargneules / Roccia di faglia e carnirole (BCC)

Tabella 4 – Elenco delle classi geomeccaniche identificate nel presente studio e litotipi corrispondenti.

UG	Lithologie Litologia
K	ac, af, at, gi dépôts non-consolidés depositi non consolidati

Tabella 5 – Elenco dei depositi afferenti alla classe geomeccanica K.

### 5.3 Descrizione delle unità geomeccaniche

Di seguito viene fornita una breve descrizione delle unità geomeccaniche individuate e delle loro caratteristiche. Le stesse unità e tutti i loro parametri tipici si trovano nelle tabelle degli allegati 1, 2 e 3. Per ogni unità geomeccanica viene anche fornita la classe CN di riferimento secondo la classificazione proposta dall'AFTES (*Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains* – Raccomandazione del GT1 – 2003) e basata sul rapporto  $\sigma/\sigma_0$ . Per quanto riguarda i valori dei parametri assunti come riferimento, questi dipendono essenzialmente dal tipo di distribuzione dei valori misurati: nel caso in cui i valori misurati di ogni parametri mostrino una distribuzione normale, il valore di riferimento coinciderà col valore medio mentre valori di riferimento più bassi o più alti si avranno

laddove le curve di distribuzione mostreranno un'asimmetria verso il basso o verso l'alto, rispettivamente.

- **Unità geomeccanica A:** corrisponde all'unità litologica delle anidriti e dei gessi presenti in diverse tratte del Tunnel di Base sul versante francese. I parametri di riferimento forniti nella classificazione geomeccanica sono quelli attribuibili alle anidriti piuttosto che ai gessi, anche e soprattutto in virtù del fatto che alla quota del Tunnel di Base non sono stati incontrati gessi nei sondaggi e/o nelle gallerie geognostiche già realizzate (Discenderia di Modane). La classe A mostra caratteristiche geomeccaniche da discrete a buone, con valori di  $\sigma_c$  di riferimento prossimi a 100 MPa e valori di GSI di circa 70. Per quanto riguarda il comportamento in fase di scavo, le criticità maggiori possono essere legate all'instaurarsi di fenomeni di rockburst o di spalling;
- **Unità geomeccanica B:** nella classe B sono inquadrati le quarziti e le quarziti conglomeratiche. Si tratta di rocce caratterizzate da valori di  $\sigma_c$  elevati (valore di riferimento di circa 110 MPa) e con valori di GSI di circa 65-70. Tra le principali criticità riscontrabili vanno evidenziate la possibilità di rockburst e di spalling in presenza di coperture elevate;
- **Unità geomeccanica C:** in questa classe sono inquadrati litotipi a composizione prevalentemente carbonatica ovvero marmi, calcari, dolomie e argilliti presenti in diverse tratte, per lo più sul versante francese dell'opera. Si tratta di ammassi rocciosi con buone caratteristiche geomeccaniche con valori di  $\sigma_c$  di riferimento circa 90 MPa e valori di GSI di circa 60. Come per l'unità precedente, le criticità principali in fase di scavo possono essere riconducibili principalmente a insorgere di fenomeni di rockburst e di spalling in presenza di coperture elevate;
- **Unità geomeccanica D:** in questa unità geomeccanica sono raggruppati litotipi, caratterizzati da marcate anisotropie planari, ovvero da alternanze composizionali ad una scala da millimetrica a centimetrica. Questa include quindi micascisti, calce-micascisti, gneiss e alternanze tra questi litotipi. Si tratta di ammassi con valori di resistenza alla compressione monoassiale molto variabili, compresi tra circa 4 MPa e oltre 200 MPa, sebbene valori di riferimento assunti corrispondano a circa 100 MPa. I valori di GSI assunti come riferimento corrispondono invece a circa 60. Analogamente per il comportamento durante lo scavo si noti una certa variabilità, in funzione dei valori di copertura, dei valori dei parametri di resistenza e del grado di fratturazione rappresentato dal GSI, tra condizioni di locale instabilità di cunei rocciosi, di rockburst e/o di squeezing;
- **Unità geomeccanica E:** corrisponde ai litotipi delle unità Brianzonesi della zona Houillère caratterizzati da una prevalenza di arenarie rispetto alla componente scistosa. Essa è quindi presente all'interno delle unità di Forneaux (hF), di La Praz (hLP) e di Brequin-Orelle (hBO) in proporzione variabile e decrescente procedendo da est verso ovest, come illustrato nel Profilo Geomeccanico in scala 1:25.000. Si tratta di un'unità caratterizzata da valori di  $\sigma_c$  che variano in un ampio intervallo, compresi cioè tra circa 15 MPa e oltre 200 Mpa e verosimilmente indicativi di gradi di alterazione e/o di cementazione altrettanto variabili. Il campo di valori di GSI è invece abbastanza ristretto (tra circa 45 e circa 65) con valori medi di riferimento di 55. In fase di scavo le rocce afferenti a tale unità, in presenza di elevate coperture e per deboli valori di resistenza della roccia e bassi valori di GSI, possono dar luogo a fenomeni di squeezing;
- **Unità geomeccanica F:** in questa classe sono stati inquadrati i calcari marnosi della zona sub-Brianzonese, previsti nella tratta francese del Tunnel di Base tra il Fronte

Pennidico e il Fronte Houillere. Tale litotipo è stato quindi distinto rispetto ai calcari e dolomie inquadrati nell'unità geomeccanica C in quanto la presenza di una frazione marnosa importante ne condiziona le caratteristiche geomeccaniche. Il valore di riferimento per il parametro  $\sigma_c$  corrisponde a circa 55 MPa, quindi decisamente più basso rispetto ai circa 95 MPa dell'unità C, così come decisamente più bassi risultano i valori ad esempio del modulo  $E_i$ . L'analisi del comportamento allo scavo non evidenzia particolari criticità, a parte la possibile presenza di cunei instabili in funzione dell'orientazione delle discontinuità principali;

- **Unità geomeccanica G:** in essa sono inquadrati i litotipi a composizione basica presenti localmente lungo il tracciato del Tunnel di Base, in particolare in corrispondenza dell'imbocco est del tunnel, e localizzati in lenti all'interno del complesso di Clarea. Si tratta di rocce caratterizzate da valori di riferimento della resistenza alla compressione  $\sigma_c$  di circa 55 MPa, sebbene valori più elevati e superiori ai 100 MPa possano essere abbastanza comuni. Dal punto di vista del comportamento in fase di scavo non sono evidenziate criticità particolari, a parte la presenza di cunei instabili e in funzione dell'orientazione delle discontinuità principali;
- **Unità geomeccanica H:** essa comprende sia le rocce di natura flyschoidale della zona Ultra-Delfinese (settore occidentale del Tunnel di Base in prossimità dell'imbocco di St. Jean de Maurienne) sia quei litotipi delle unità Brianzonesi della zona Houillère caratterizzati da una prevalenza di scisti rispetto alla componente arenacea (inquadrati nell'unità E sopra descritta). I litotipi compresi in questa unità sono quindi caratterizzati da una componente scistosa prevalente, sebbene i valori dei parametri possano essere molto variabili. I valori di  $\sigma_c$  risultano, infatti, compresi tra 3 e oltre 200 MPa mentre valori di GSI tipici sono compresi tra 25 e 65, con valori di riferimento di circa 45. Per quanto riguarda il comportamento in fase di scavo, criticità principali possono essere legate all'insorgere di instabilità del fronte di scavo o di squeezing in presenza di coperture più elevate, mentre la presenza di cunei instabili è più tipicamente prevedibile per le porzioni caratterizzate da valori più elevati dei parametri di resistenza e di GSI.
- **Unità geomeccanica H1:** comprende principalmente gli scisti neri con associate arenarie e conglomerati dell'Unità des Encombres e gli scisti verdi della Falda dei Gessi (va sottolineato che la presenza di scisti verdi è stata evidenziata dal sondaggio F67 che ha attraversato tre livelli di scisti alle profondità 200-250 m, 800 m circa e 850-900 m; non sussistono tuttavia evidenze dirette della presenza di tali scisti verdi alla profondità del tunnel nel settore della Falda dei Gessi). Sono state incluse in questa classe geomeccanica anche gli ammassi rocciosi caratterizzati da un grado di fratturazione molto elevato (GSI compreso tra 30 e 35), nei quali il comportamento in fase di scavo è controllato dall'elevata fratturazione.
- La scelta di includere gli scisti neri dell'Unità des Encombres in un'unità geomeccanica distinta rispetto ai litotipi delle altre unità della Zona Houillere (hF, hLP, hBO) è legata alle problematiche di convergenza molto elevata riscontrate durante lo scavo della Discenderia di St. Martin La Porte, all'interno degli scisti neri. In tal modo si è quindi voluto permettere di identificare in modo diretto e univoco tali scisti e la particolare intensità dei fenomeni di squeezing ad essi associati nelle condizioni di copertura previste per il Tunnel di Base.
- Gli ammassi inclusi nell'unità geomeccanica H1 sono caratterizzati da valori di  $\sigma_c$  relativamente bassi, compresi tra circa 10 e 33 MPa, e un grado di fratturazione elevato con valori di GSI tipicamente compresi tra 25 e 40. Come già sottolineato, fenomeni di squeezing anche severi possono essere previsti durante lo scavo in condizioni di copertura elevate;



Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

- **Unità geomeccanica I:** essa comprende gli orizzonti di carbone presenti localmente all'interno della Zona Houillere. I parametri relativi a questa classe sono stati stimati in base a dati reperibili in letteratura, in assenza di prove dirette eseguite nell'ambito del presente progetto. Sono quindi stati stimati valori medi di  $\sigma_c$  di circa 10 MPa e valori medi di GSI di circa 35-40. E' tuttavia opportuno notare che la distinzione degli orizzonti di carbone (caratterizzati da una potenza di ordine da decimetrico a più raramente metrico) in una classe geomeccanica distinta è per lo più finalizzata a metterne in risalto la possibile presenza all'interno degli scisti e arenarie piuttosto che a permetterne una reale ed affidabile caratterizzazione geomeccanica e ciò anche in virtù della potenza limitata di tali livelli.
- **Unità geomeccanica J:** comprende gli ammassi lungo le zone di faglia e i livelli di carniole presenti in diverse tratte del tracciato. Si tratta di ammassi con caratteristiche mediamente scadenti con valori di  $\sigma_c$  medi di circa 10-15 MPa e valori di GSI medi di 25. Per quanto riguarda il comportamento allo scavo, l'insorgere di fenomeni di squeezing ed eventualmente di instabilità del fronte rappresentano le criticità principali.
- **Unità geomeccanica K:** include tutti i depositi non consolidati, corrispondenti principalmente ai depositi alluvionali del torrente Cenischia, nel versante italiano dell'opera, e ai depositi dei conoidi di deiezione presenti in corrispondenza dell'imbocco occidentale del Tunnel di Base.

UG	Lithologie / Litologie	UCS (MPa)	GSI	Comportement à l'excavation Comportamento allo scavo	
				dominant / dominante	subordonné / subordinato
B	tQ quartzites / quarziti	125	67	R / sp	IW
C	DGA marbres, dolomies, calcaires et argilites / marmi, dolomie, calcari e argilliti	113	60	R / sp	IW
D	TCS calc-micaschistes / calcemicascisti *	72	61	IW	Sp
	GCC schistes carbonatés / scisti carbonatici *	50	55	IW	Sp
	GCK gneiss albitiques / gneiss albitici; TPG Paragneiss et quartzites	50	55	IW	Sp
	AMC gneiss leucocratiques / gneiss leucocratici	120	66	R / s	IW
	AMA, AMD micaschistes quartzitiques ± conglomeratiques d'Ambin / Cl micaschistes et gneiss micro-oillés / micascisti e gneiss occhadini	90	60	R / s	IW
G	OMB prasinites / prasiniti; cl-b metabasites / metabasiti	55	56	IW	
	Roches très fracturées / rocce molto fratturate	20	35	Sq	IW
J	Roche de faille et cargneules / roccia di faglia e carniole (BCC)	12	25	Sq	
K	ac, af, at, gi: dépôts non-consolidés / depositi non consolidati	-	-	-	-

Tabella 6 – Sintesi delle unità geomeccaniche classificate nella tratta italiana del Tunnel di Base, con i loro parametri distintivi UCS (uniaxial compression strength) e GSI (Geological strength index), e relativi possibili comportamenti allo scavo (R= rockburst; sp= spalling; IW= cunei instabili; Sq= squeezing)

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

UG	<i>Lithologie</i> Litologia	<i>États de contrainte</i> Stato tensionale (clas / classe AFTES)
B	<i>Quartzites / Quarziti</i> (QSE)	CN1
C	<i>Marbres, dolomies et calcaires / Marmi, dolomie e calcari</i> (DGA)	CN2
D	<i>Gneiss et schistes / Gneiss e scisti</i> (AMA, AMC, AMD, GCC, GCK, CI, TCS, TPG)	CN2
G	<i>Prasinites et mesabasites / Prasiniti e metabasiti</i> (OMB, cl-b)	CN1
H1	<i>Roches très fracturées / Rocce molto fratturate</i>	CN3
J	<i>Roche de faille et cargneules / Roccia di faglia e carniole</i> (BCC)	CN3

Tabella 7 – Definizione dello stato tensionale secondo la classificazione AFTES (GT1) per le diverse unità geomeccaniche.

#### 5.4 Definizione generale del comportamento in fase di scavo degli ammassi analizzati

Al fine di fornire un inquadramento generale del comportamento in fase di scavo viene utilizzato lo schema classificativo, presentato in Figura 3. Tale schema permette di coniugare il valore dell'indice RMR, che fornisce indicazioni circa la capacità autoportante degli ammassi, con una classificazione basata su analisi relative allo stato tensionale della roccia. In particolare lo stato tensionale dell'ammasso viene definita in funzione della deformazione radiale al fronte di scavo e dello sviluppo della fascia plastica al contorno del cavo stesso.

Le sei categorie di comportamento identificate da Russo et al. (1998) sono definite nel seguito:

- **Classi a - b:** in queste classi la resistenza dell'ammasso permette di sopportare le sollecitazioni derivate dallo scavo. Le deformazioni si mantengono in campo elastico e sono di entità per lo più trascurabile. Locali instabilità sono dovute a cinematismi gravitativi di cunei di roccia e sono influenzate dall'orientazione delle discontinuità principali. Tali instabilità sono maggiormente accentuate per la classe b;
- **Classe c:** lo stato tensionale in prossimità del fronte dovuto all'apertura del cavo può raggiungere la resistenza dell'ammasso e condurre a deformazioni di tipo elasto-plastico o plastico con possibili condizioni di instabilità. A distanza maggiore dal fronte, le sollecitazioni possono superare la resistenza dell'ammasso e quindi dar luogo ad una fascia di plasticizzazione, di estensione inferiore al valore di un raggio del tunnel, con innescarsi di convergenze anche significative;
- **Classe d:** nella classe d le sollecitazioni nella zona del fronte superano la resistenza dell'ammasso. Il fronte appare elasticizzato ma le deformazioni si sviluppano in tempi relativamente lenti e non comportano il collasso del fronte di scavo, ciò a causa della moderata entità del superamento della resistenza dell'ammasso e/o per particolari proprietà della roccia. Deformazioni di tipo plastico si osservano già al fronte di scavo mentre a distanza maggiore la fascia di plasticizzazione si estende su dimensioni superiori al raggio del tunnel;
- **Classe e:** tale classe si differenzia dalla precedente per l'accentuazione dei fenomeni deformativi sia in corrispondenza del fronte che a distanza da questo. In prossimità del fronte lo squilibrio tensionale porta ad instabilità del fronte stesso (con deformazione scontata al fronte  $\delta_0 > 1\%$ ). A distanza dal fronte le convergenze radiali risultano molto elevate;
- **Classe f:** la classe f è caratterizzata da instabilità del fronte a breve termine con collasso immediato a seguito delle operazioni di scavo. A questa classe sono riconducibili terreni incoerenti o masse rocciose cataclamate in corrispondenza delle zone di faglia.

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

↓ ANALISI →		Geostrutturale →		Ammasso roccioso				
				Continuo ?	Discontinuo ?	Continuo equivalente		
Tensionale ↓				RMR				
Risposta deformativa ↓	$\delta_0$ (%)	Rp/Ro	Categoria di Comportamento ↓	I	II	III	IV	V
Elastica ( $\sigma_\theta < \sigma_{cm}$ )	trascurab.	-	a	STABILE	CUNEIFI INSTABILI	G	H	FRANOSO
			b					
Elasto-Plastica ( $\sigma_\theta \geq \sigma_{cm}$ )	<0.5	1-2	c	COLPI DI TENSIONE	A, B, C, D, E, F, H1, J	E	H	SPINGENTE
	0.5-1.0	2-4	d					
	>1.0	>4	e					
			(f)					

→ Immediato collasso del fronte ↑

Figura 3 – Schema per l'inquadramento classificativo generale del comportamento allo scavo per valori di  $k_0=1$  (da Russo et al., 1998). La figura mostra il comportamento atteso per le unità geomeccaniche A-J. Simboli:  $\delta_0$ =deformazione radiale al fronte di scavo;  $R_p$ ( $R_0$ =raggio plastico / raggio equivalente della cavità;  $\sigma_\theta$ =sollecitazione tangenziale massima sul contorno del cavo;  $\sigma_{cm}$ =resistenza a compressione monoassiale dell'ammasso roccioso.

NOTE: in maiuscolo sono indicati i fenomeni deformativi caratteristici. I colpi di tensione sono ipotizzabili in ammassi contraddistinti da una elevata resistenza della matrice; per tali particolari fenomeni i limiti classificativi perdono di significato e sono unicamente da intendersi come indicatori di un crescente squilibrio tensionale e quindi di una maggiore intensità potenziale.

In funzione dell'analisi illustrata nella figura precedente, i seguenti fenomeni deformativi caratteristici possono essere previsti per le diverse classi geomeccaniche:

- Condizioni di relativa stabilità o presenza di cunei instabili: condizioni di relativa stabilità o presenza di cunei instabili sono riscontrabili durante lo scavo in pressoché tutte le classi geomeccaniche ad eccezione delle unità H1 e J. Tali condizioni sono tuttavia subordinate a valori di RMR elevati (classe II o in misura minore classe III) e in presenza di ammassi caratterizzati da valori dei resistenza più elevati all'interno del campo di variabilità di ciascuna classe geomeccanica;
- Presenza di colpi di tensione (rockburst) e/o di spalling (distacco di placche di roccia): il possibile insorgere di fenomeni di colpi di tensione o il distacco di placche di roccia (spalling) non viene evidenziato in modo chiaro dallo schema della figura precedente. Va evidenziato, come specificato nella didascalia della figura, che i colpi di tensione sono ipotizzabili in ammassi contraddistinti da una elevata resistenza della matrice e per tali particolari fenomeni i limiti classificativi perdono di significato: essi sono pertanto unicamente da intendersi come indicatori di un crescente squilibrio tensionale e quindi di una maggiore intensità potenziale. Come anche evidenziato nella figura seguente basata sull'uso dell'Indice di Danno, il potenziale di fenomeni di decompressione violenta è più elevato per l'unità geomeccanica D e, in misura minore, per le unità geomeccaniche A, B e C e D in presenza di coperture elevate (> 900-1000 m) e di valori di  $\sigma_c > 100$  MPa. Va inoltre evidenziato come la dimensione dei grani della matrice possa svolgere un'influenza significativa nel verificarsi di tali fenomeni, che sono favoriti in presenza di rocce a matrice fine (Kaiser et al., 2005): nel caso in

esame tale occorrenza può essere più facilmente riscontrabile nelle anidriti, (UG A), nelle quarziti (UG B) e nei calcari (UG C).

- Insorgere di fenomeni franosi al fronte: instabilità del fronte di scavo (o instabilità in calotta) sono riscontrabili durante lo scavo nelle zone di faglia o all'interno di orizzonti di carniole (UG J), caratterizzate da caratteristiche scadenti riconducibili ad una classe RMR V;
- Comportamento spingente: comportamento di tipo spingente e fenomeni di convergenza anche elevati sono prevedibili in presenza di rocce appartenenti all'unità geomeccanica J (zone di faglie e carniole) e sono favoriti da condizioni scadenti degli ammassi (classe RMR V, bassi valori di resistenza dell'ammasso) e da coperture elevate. Un comportamento di tipo spingente può verificarsi durante lo scavo all'interno delle unità geomeccaniche H e H1, in presenza di valori di resistenza più bassi all'interno del campo di variabilità di queste unità geomeccaniche, in caso di coperture elevate e condizioni generali dell'ammasso più scadenti. Per una verifica puntuale più dettagliata dei valori di convergenza attesi lungo il Tunnel di Base si rimanda alle analisi offerte nella Relazione Tecnica e di calcolo (PRV C3A TS3 3949);
- Immediato collasso del fronte: un collasso immediato del fronte è possibile laddove siano riscontrati valori di resistenza dell'ammasso molto bassi rispetto allo stato tensionale. Tali condizioni sono facilmente riscontrabili in presenza dell'unità geomeccanica J, in condizioni di elevate copertura. Tuttavia non si esclude la locale occorrenza di instabilità a breve termine anche in presenza delle unità geomeccaniche D, F e H1, laddove l'ammasso sia caratterizzato da valori dei parametri di resistenza più bassi nel campo di variabilità di ciascuna classe e in presenza di coperture elevate.

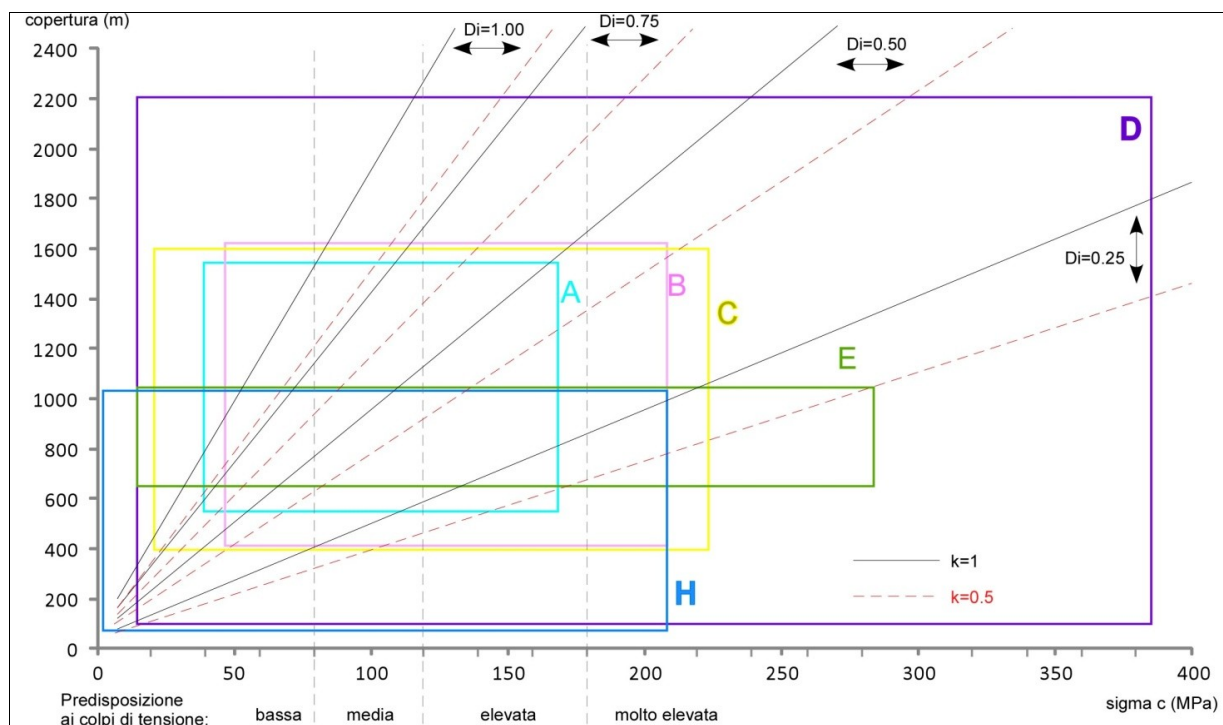


Figura 4 – Schema per la valutazione della potenzialità dei colpi di tensione in funzione dell'Indice di Danno per le diverse classi geomeccaniche suscettibili di fenomeni di decompressione violenta. I valori dell'Indice di Danno  $D_i$  sono basati su quelli riportati da diversi autori e illustrati nella tabella sottostante.

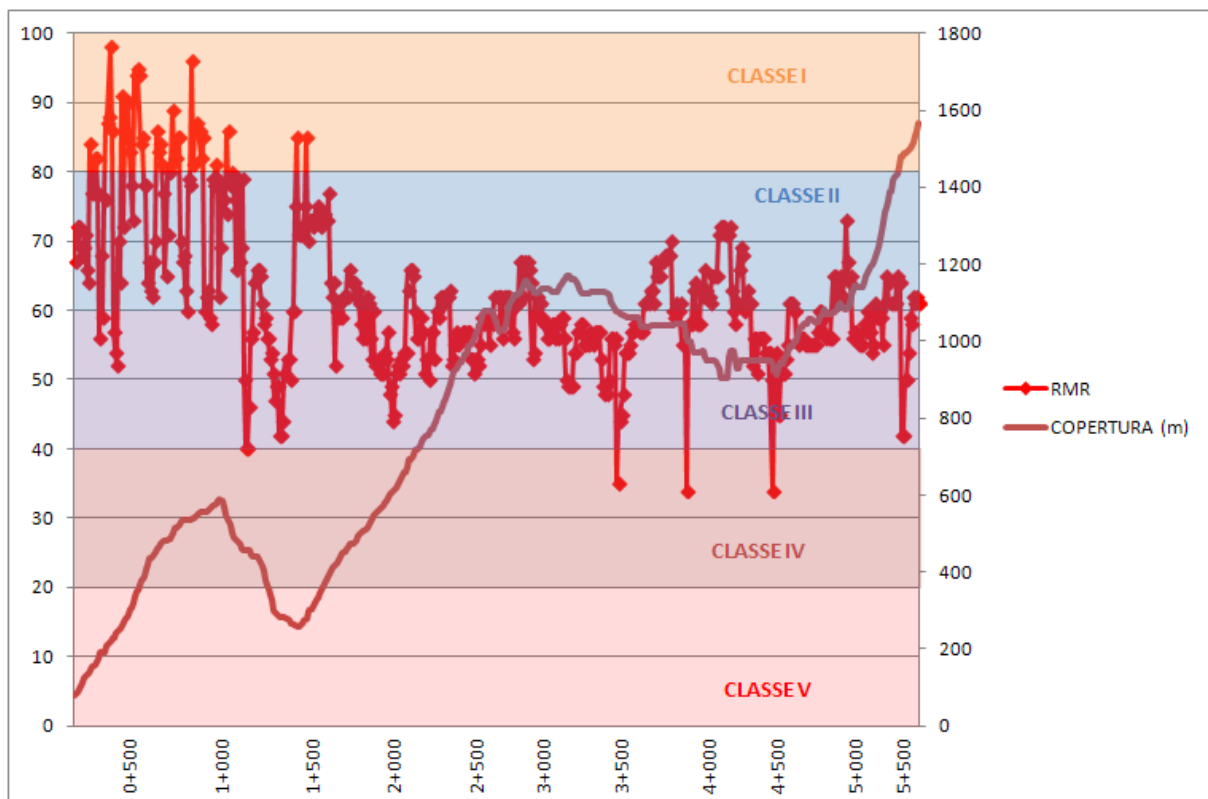
Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

Di = $\sigma_{max}/\sigma_c$		
Hoek & Brown (1980)	Russenes (1974)	Grimstad & Barton (1993)
< 0.25 (stabile)	< 0.25 (spalling assente)	< 0.33 (condizioni tensionali favorevoli)
0.25 - 0.5 (lieve spalling)	0.25 - 0.33 (lieve spalling)	0.33 - 0.5 (condizioni tensionali elevate)
0.50-0.75 (spalling intenso)	0.33-0.67 (moderato spalling)	0.50-0.67 (moderati splaccaggi dopo 1 ora)
0.75-1.00 (possibili rockburst)	> 0.67 (spalling intenso)	0.67-1.00 (splaccaggi e rockburst)
> 1 (probabili rockburst)		> 1 (pesanti rockburst)

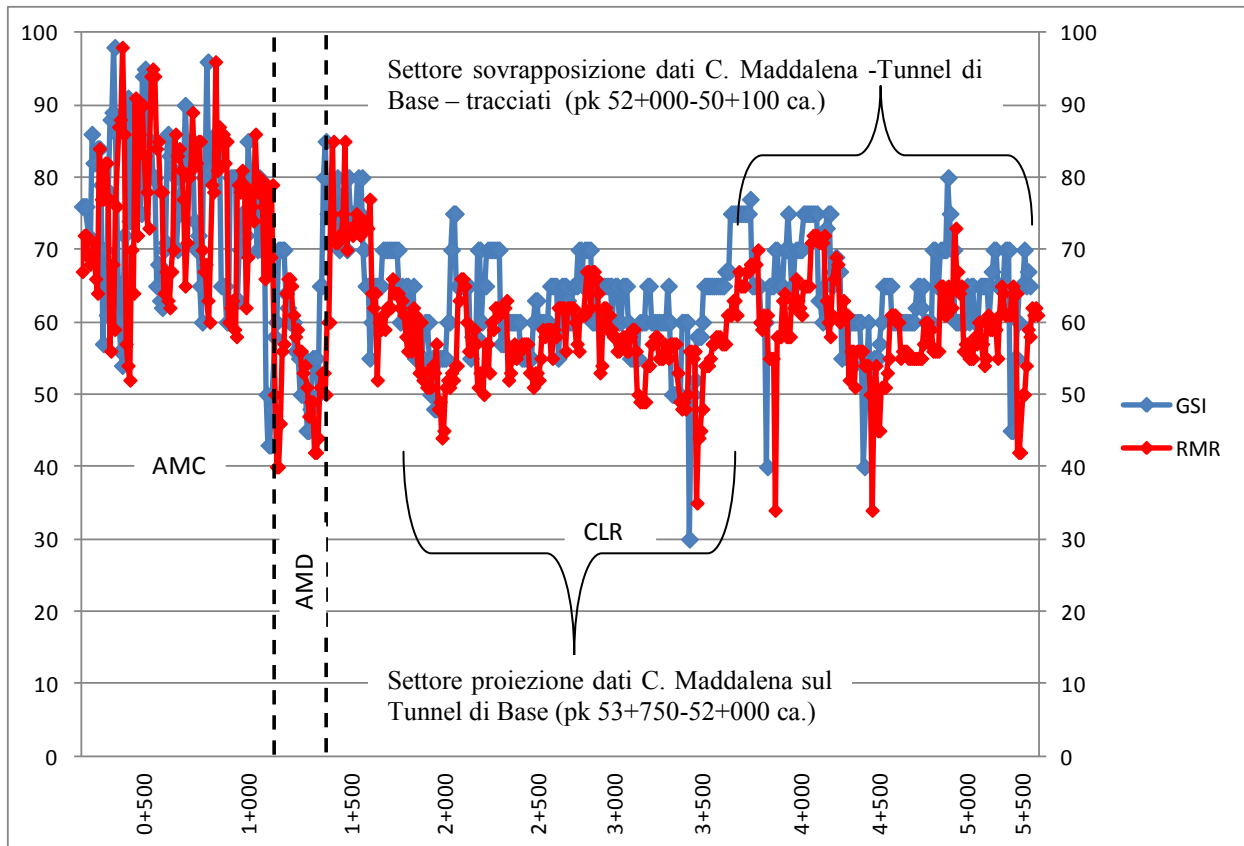
Tabella 8 – Classificazione dell'intensità dei fenomeni di spalling e di rockburst in funzione del valore dell'Indice di Danni (Di). Nota:  $\sigma_{max}$  = sollecitazione tangenziale massima sul contorno del cavo

### 5.4.1 Definizione generale del comportamento in fase di scavo nel settore di ammasso del cunicolo della Maddalena

Relativamente ai settori di ammasso corrispondenti alle condizioni di qualità dell'ammasso sono sintetizzate nelle figure che seguono.

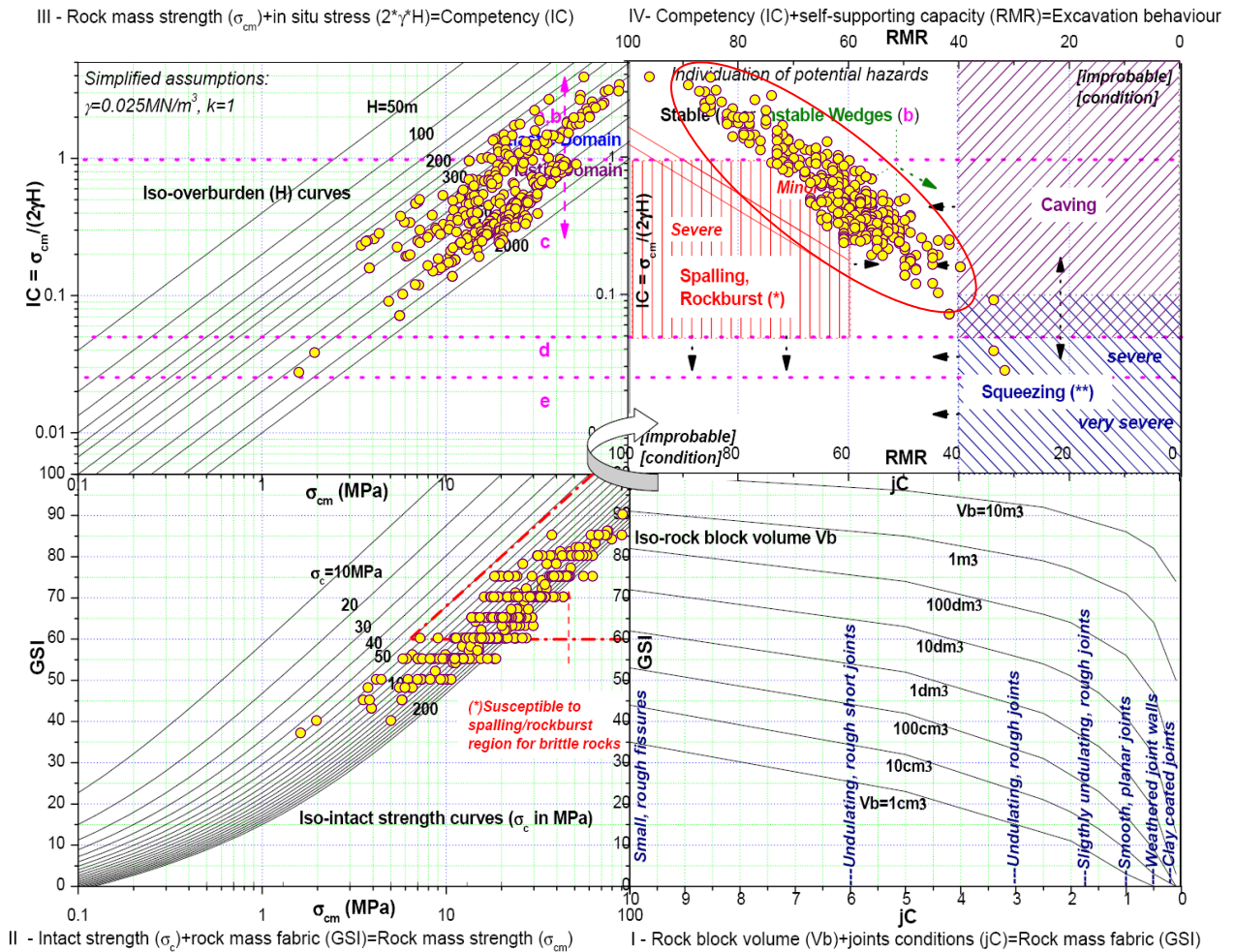


Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)



Relativamente alle condizioni riscontrate durante lo scavo del cunicolo esplorativo della Maddalena, il comportamento in fase di scavo è sintetizzato nella Figura 5 attraverso il grafico di G. Russo (2014).

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)



(\*) only for the susceptible region, otherwise the development of plastic region and moderate radial convergences are more probable

(\*\*) depending also from the length of the potential proned zone: given a possible "silo effect", for short zones included in good quality rocks, a caving behaviour it is most likely

Figura 5 - Comportamento allo scavo del settore di ammasso roccioso lungo cunicolo esplorativo della Maddalena fino alla pk 5+510, analisi eseguita secondo il sistema proposto da G. Russo (2014).

Dal grafico sopra riportato si evince come, il settore di ammasso attraversato dal cunicolo esplorativo della Maddalena (si veda anche elaborato PRV C3B 7200 26-48-01 10-01), mostri comportamento teorico in assenza di interventi di stabilizzazione, compreso tra la generale stabilità in condizioni elastiche al rilascio gravitativo caratterizzate di cunei/blocchi rocciosi (cerchio rosso), con locale potenziale sviluppo di fenomeni minori di rottura fragile (spalling/rockburst).

Relativamente a tale comportamento è necessario segnalare l'occorrenza di un fenomeno di maggiore intensità manifestatosi intorno a pk 4+200 (circa pk 51+400 del BP del Tunnel di Base) interessando circa 10-12m di scavo.

La massa rocciosa interessata era stata classificata con valori di RMR=61÷72 (quindi in classe II di Bieniawski) e GSI= 62÷75, presenza di scistosità sub-orizzontale interessata da discontinuità inclinate spesso con riempimenti carbonatici e copertura topografica di circa 1000m.

Nella tratta in cui si è verificato il fenomeno era applicata la sezione F3c\_1 composta da rete metallica elettrosaldata e archi di centine UPN120 con passo 0.9m, ancorati con bulloni tipo Swellex L=3m.



Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

Le maestranze hanno indicato di aver udito un improvviso boato a cui ha fatto seguito una immediata forte deformazione del sostegno applicato (spostamenti radiali pluridecimetri del sostegno superficiale tra i bulloni).

La frammentazione della roccia e le caratteristiche dell'evento hanno permesso di evidenziare un meccanismo di danno classificabile secondo CRRP (1996) in "Bulking without ejection": l'energia accumulata si è consumata nel processo di fratturazione, con conseguente importante aumento di volume per dilatanza.

Di riflesso non si sono determinate condizioni per un significativo rilascio di energia cinetica, associato ad elevate velocità di proiezione di blocchi rocciosi.



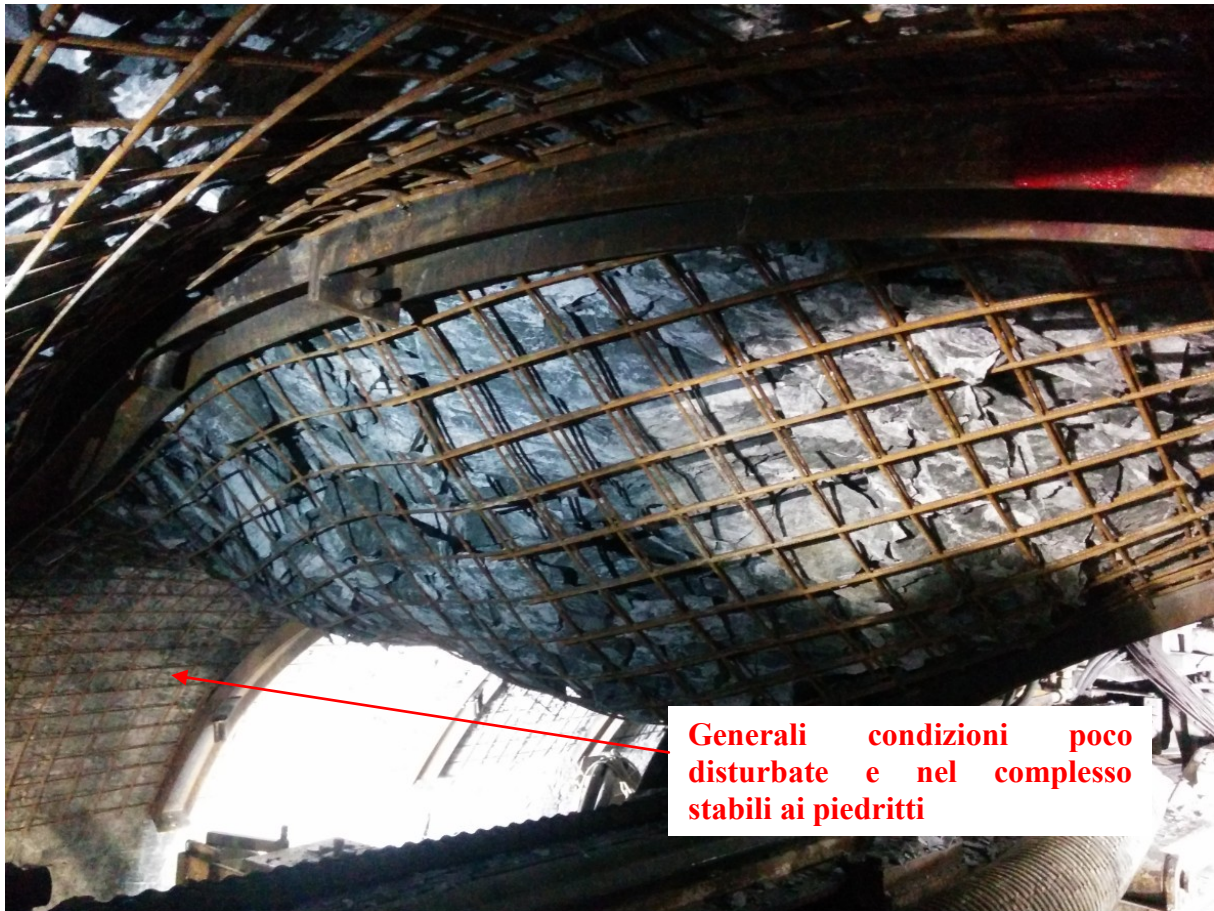


Figura 6 e Figura 7- Fenomeno legato a rottura fragile verificatosi alla pk 4+200 circa del cunicolo esplorativo della Maddalena.

Table 2.1 Rockburst damage mechanisms and nature of the anticipated damage

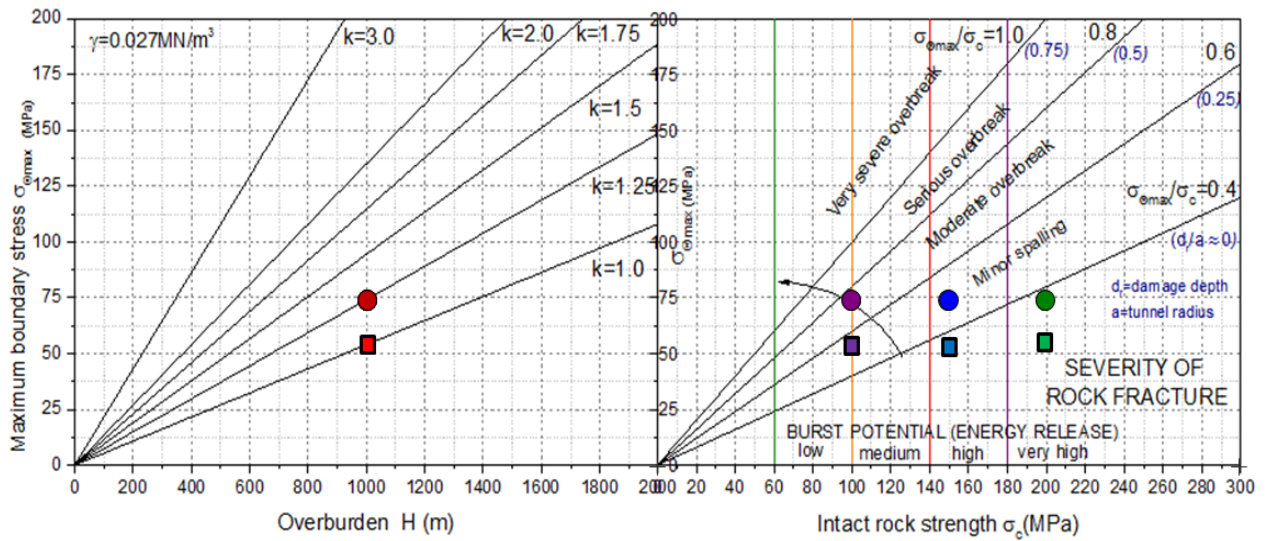
Damage mechanism	Damage severity	Cause of rockburst damage	Thickness [m]	Weight [kN/m <sup>2</sup> ]	Closure* [mm]	$v_e$ [m/s]	Energy [kJ/m <sup>2</sup> ]
Bulking without ejection	Minor	highly stressed rock	< 0.25	< 7	15	< 1.5	not critical
	Moderate	with little excess	< 0.75	< 20	30	< 1.5	not critical
	Major	stored strain energy	< 1.5	< 50	60	< 1.5	not critical
Bulking causing ejection	Minor	highly stressed rock	< 0.25	< 7	50	1.5 to 3	not critical
	Moderate	with significant	< 0.75	< 20	150	1.5 to 3	2 to 10
	Major	excess strain energy	< 1.5	< 50	300	1.5 to 3	5 to 25
Ejection by remote seismic event	Minor	seismic energy	< 0.25	< 7	< 150	> 3	3 to 10
	Moderate	transfer to	< 0.75	< 20	< 300	> 3	10 to 20
	Major	jointed or broken rock	< 1.5	< 50	> 300	> 3	20 to 50
Rockfall	Minor	inadequate strength,	< 0.25	< 7g/(a+g)	na	na	na
	Moderate	forces increased	< 0.75	< 20g/(a+g)	na	na	na
	Major	by seismic acceleration	< 1.5	< 50g/(a+g)	na	na	na

Il fenomeno di rottura fragile può essere inquadrato (secondo Martin et al., 1999; Hoek, 2010; Diederichs, 2010) con:

- Indice di danno  $ID = s_{max}/s_c \approx 0.5-0.75$

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

- Profondità di danno  $df = (1.25 \cdot ID - 0.51) \cdot a \approx 0.5 - 1.5 \text{ m}$



In sintesi alla pk 4+200 si è avuto:

- Fronte di scavo globalmente stabile per favorevole orientazione scistosità (locali distacchi di blocchi) ;
- Inizio fessurazione ("damage") circa al fronte di scavo con sviluppo di rottura fragile concentrata in calotta e arco rovescio;
- Condizioni potenziali per rockburst entro circa un diametro di scavo;
- Profondità di danno max 1-(1.5)m .

Distacchi di roccia probabilmente relazionati almeno in parte a fenomeni di rottura fragile, seppur non intensi come quello avuto alla pk 4+200, hanno interessato buona parte della calotta ed in alcuni casi il settore superiore dei paramenti, tra le pk 3+500 e 5+500 ca. (circa tra le pk 52+100 e 50+100 del BP del Tunnel di Base) in corrispondenza di un ammasso con valori di RMR > 50 e GSI > 55.

Lo sviluppo dell'instabilità in calotta è anche favorito dalla presenza di una famiglia di discontinuità F4b ad alto angolo e dalla scistosità a basso angolo con direzione sub parallela all'andamento del cunicolo.

In base a quanto evidenziato sopra ed in relazione al fatto che nel tratto corrispondente il Tunnel di Base presenta il suo tracciato circa in asse al cunicolo, è ragionevole aspettarsi il potenziale sviluppo di simili fenomeni di instabilità anche nel corso dello scavo del Tunnel di Base in relazione ai fattori predisponenti quali famiglie di discontinuità, orientazione della scistosità principale e stato tensionale in sito. Tuttavia, nel caso dello scavo del Tunnel di Base, l'eventuale sviluppo di simili fenomeni di instabilità potranno verosimilmente essere meglio gestiti e limitati, sia per l'eventuale differente tipo di macchina TBM sia per il tipo di supporti/rivestimenti che si prevede di mettere in opera.

## 6. Analisi dell'affidabilità dei dati geomeccanici – il metodo GRA (Geomechanical Reliability Analysis)

Nei capitoli precedenti sono stati illustrati sinteticamente i dati di partenza per la modellizzazione geomeccanica delle litologie interessate dal progetto delle opere previste per la realizzazione della NLTL. In questo capitolo è definito il grado di affidabilità delle caratteristiche geomeccaniche stimate per gli ammassi rocciosi.

La valutazione dell'affidabilità dei parametri geomeccanici nel caso in esame è stata eseguita mediante l'applicazione del GR-Index (Bianchi & Airoidi, in prep.). La relativa Geomechanical Reliability Analysis, o GRA, è illustrata in dettaglio nella Relazione di Sintesi dell'analisi dei rischi geologici (PRV C3B TS3 0088 00-06-00 10-01) e nell'Allegato 4. Nei paragrafi successivi si riporta una sintesi del metodo, seguita dalla descrizione dei risultati dell'analisi per il caso in esame.

In linea generale, il grado di affidabilità dei dati geomeccanici stimati in base alle prove in situ e / o di laboratorio eseguite, è funzione del grado di INCERTEZZA legata alla rappresentatività dei campioni raccolti e a quella dei valori ottenuti per i parametri rispetto al volume complessivo di ammasso roccioso interessato dallo scavo. Quanto maggiori saranno il numero e la distribuzione dei campioni raccolti e delle prove eseguite, tanto maggiore sarà la loro rappresentatività e l'affidabilità delle caratteristiche geomeccaniche stimate.

L'incertezza legata alle caratteristiche geomeccaniche stimate si può esprimere in termini percentuali come risultante dal prodotto di tre parametri principali, anch'essi classificati in termini percentuali. I tre parametri sono D (provenienza del dato), N (rilevanza del dato, o numero di dati rapportati alla lunghezza del tratto lungo il quale l'opera attraversa una medesima litologia), e S (dispersione statistica del set di dati disponibili).

Per ciascuno dei tre parametri i dati sono stati classificati in modo da attribuire loro uno specifico valore percentuale, inversamente proporzionale all'affidabilità del dato per il corridoio progettuale oggetto d'analisi. A ogni parametro così calcolato corrisponde, infine, un 'peso percentuale' stabilito arbitrariamente in base all'importanza attribuita allo specifico parametro.

La metodologia proposta è illustrata schematicamente nella figura seguente.

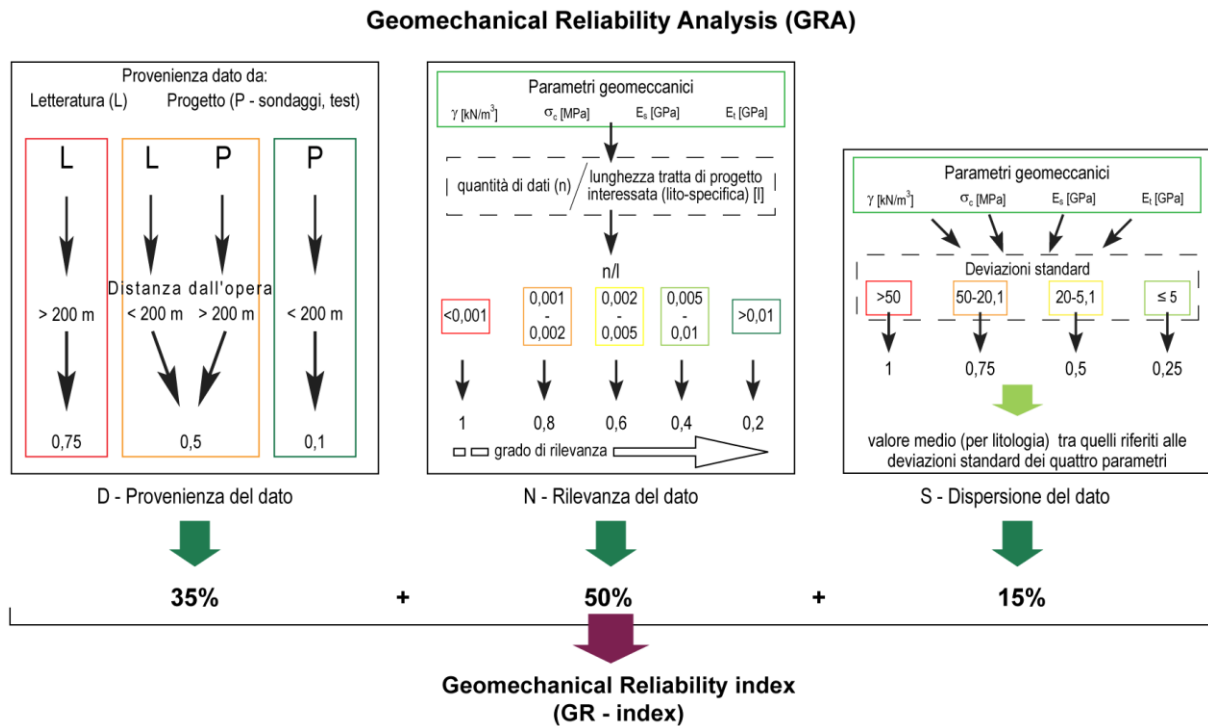


Figura 8 – Grafico di sintesi della metodologia di analisi dell'affidabilità dei dati geomeccanici (GRA)

I risultati del processo di discriminazione dei tre parametri di valutazione di cui sopra sono definiti di seguito, e esposti integralmente nella Tabella in Allegato 5 e nella fincatura "Grado di affidabilità dei dati geomeccanici" del profilo in scala 1:25,000 di corredo alla presente relazione.

## 6.1 Calcolo del grado di affidabilità (GR-index)

Il grado finale di incertezza dei dati geomeccanici (GR-Index) è calcolato come la somma dei valori dei tre parametri D, N e S e viene espresso in termini percentuali. Nella tabella seguente sono riportate le tre classi di incertezza identificate. Il GR-index è inversamente proporzionale al range percentuale che rappresenta ogni classe. Valori percentuali più alti (o 'gradi d'incertezza') corrispondono a gradi d'affidabilità inferiori, e viceversa.

GR-index = (D, 35%) + (N, 50%) + (S, 15%)		Litologia <i>Lithologie</i>		GR-index
Grado d'incertezza <i>Degré d'incertitude</i>	Descrizione <i>Description</i>	1	TCS	62%
<b>ELEVATO</b> <i>ELEVE</i> (bassa affidabilità) $\geq 67$ % <i>fiabilité basse</i> )	Dati da sondaggi e test di laboratorio eseguiti al di fuori di questo progetto; dispersione dei dati elevata e rapporto n° sondaggi / lunghezza tratta in galleria $\leq 0.001$ <i>Données de forage et de laboratoire n'exécutées pas pour ce projet; dispersion élevée des données et rapport n° forages / longueur traite galerie <math>\leq 0.001</math></i>	5	AMC	21%
<b>MEDIO</b> <i>MOYEN</i> (affidabilità media) 34 - 66 % <i>fiabilité moyenne</i> )	Dati da sondaggi e test di laboratorio eseguiti per questo progetto; dispersione dei dati medio-alta e rapporto n° sondaggi / lunghezza tratta in galleria 0.001 - 0.005 <i>Données de forage et de laboratoire exécutées pour ce projet; dispersion moyenne-élevée des données et/ou données incomplètes (valeurs manquants); rapport n° forages / longueur traite galerie 0.001 - 0.005</i>	7	Cl	44%
<b>BASSO</b> <i>BAS</i> (affidabilità elevata) $\leq 33$ % <i>fiabilité élevée</i> )	Dati da sondaggi e test di laboratorio eseguiti per questo progetto; dispersione dei dati bassa e rapporto n° sondaggi / lunghezza tratta in galleria $\geq 0.01$ <i>Données de forage et de laboratoire exécutées pour ce projet; dispersion basse des données; rapport n° forages / longueur traite galerie <math>\geq 0.01</math></i>	23	rocce di faglia, carnirole <i>roches de faille, cargneules</i>	84%

Tabella 9 – Classi d'affidabilità suddivise per i parametri geomeccanici considerati nella progettazione, e loro descrizione. A destra è riportata la classificazione delle litologie considerate in questo capitolo.

Come si vede a destra in Tabella 9, le caratteristiche geomeccaniche definite per i calcescisti del Complesso Dora Maira e le rocce del Complesso di Clarea sono mediamente affidabili; elevata è invece l'affidabilità dei parametri relativi agli gneiss leucocratici dell'Ambin, e scarsa, infine, l'affidabilità dei parametri stimati per le rocce di faglia.

Un quadro completo di questa classificazione per tutte le litologie interessate dal tracciato progettuale della NLTL si ritrova nel paragrafo successivo e nell'Allegato 5.

## 6.2 Risultati del metodo GRA lungo il tracciato

I valori del GR-Index sono riferiti alle litologie prese separatamente, in modo analogo a quanto fatto nella classificazione delle unità geomeccaniche. La tabella seguente è uno stralcio di quella nell'Allegato 4 e sintetizza i risultati del processo di calcolo descritto in precedenza.

I valori riportati in rosso nella tabella sono quelli ottenuti per litologie di cui per la classificazione geomeccanica fossero disponibili o solo valori di letteratura, o set 'incompleti' di dati geotecnici. Per facilità di visualizzazione nella Tabella 10 i valori calcolati per le rocce fratturate, le rocce di faglia e le carnirole sono in nero ma esse, come già specificato in precedenza, sono state determinate e caratterizzate 'solo' in termini geologici, e non geotecnicamente mediante dati derivati dai sondaggi geognostici.

	<b>Litologia Lithologie</b>	Lunghezza <i>longueur</i> [m]	<b>D</b>	<b>N</b>	<b>S</b>	<b>GR-index</b>
1	<b>TCS</b>	2160	0.175	0.35	0.09	62%
2	<b>Gcc</b>	4410	0.035	0.4	0.11	55%
3	<b>gck, TPG</b>	120	0.035	0.3	0.11	45%
4	<b>OMB, cl-b</b>	330	0.035	0.25	0.11	40%
5	<b>AMC</b>	738	0.035	0.1	0.08	21%
6	<b>AMA, AMD, AMF</b>	2611	0.035	0.35	0.07	45%
7	<b>CI</b>	12450	0.035	0.325	0.08	44%
9	<b>DGA</b>	1830	0.035	0.2	0.10	34%
10	<b>QSE</b>	2550	0.035	0.35	0.08	47%
22	<b>rocce fratturate roches fracturées</b>	2054	0.175	0.45	0.08	70%
23	<b>rocce di faglia, carnirole roches de faille, cargneules</b>	2490	0.263	0.5	0.08	84%
	<b>Depositi / dépôts ac, af, at, gi</b>	1470	0.035	0.1	0.075	21%

Tabella 10 – Classificazione delle litologie lungo la tratta in analisi del TdB in base al GR-index.

Come si vede dalla Tabella 10 i valori del GR-index classificano come buona o media l'affidabilità dei dati geomeccanici relativi alla maggior parte delle litologie (campi verdi e/o gialli), mentre scarsa è l'affidabilità per le rocce di faglia e le carnirole.

Una descrizione dettagliata della variazione del GR-index longitudinalmente al tracciato è complicata, in quanto tutte e tre le classi d'affidabilità si succedono irregolarmente o a causa di frequenti alternanze litologiche, o per la presenza di contatti tettonici e zone di fratturazione.

In ogni caso si possono suddividere tre sottozone principali:

- ZONA 1: Pk 48+672-56+058: le rocce dei complessi di Clarea e d'Ambin sono caratterizzate da GR-index circa omogeneo, principalmente compreso tra 34% e 47%, salvo in corrispondenza delle zone di faglia (GR-index 84%, affidabilità bassa) e negli gneiss aplitici della formazione AMC (GR-index 21%, affidabilità elevata), il grado d'affidabilità della caratterizzazione geomeccanica in questa lunga tratta è dunque principalmente 'medio'.

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

---

- ZONA 2: Pk 56+058-57+160: la caratterizzazione dei depositi quaternari risulta affidabile: il GR-index è infatti pari a 21% e risulta dalla somma di valori di D, N e S relativi a un set quantitativamente e qualitativamente significativo di dati da indagini e sondaggi eseguiti nell'ambito del progetto del Tunnel di Base. Il grado d'affidabilità della caratterizzazione geomeccanica in questa lunga tratta è dunque principalmente 'elevato'.
- ZONA 3: Pk 57+160-61+076 e pk 63+870-1+943 (interconnessione): eccezion fatta per le fasce affette da deformazione fragile (GR-index puntuale elevato e scarsa affidabilità del modello geomeccanico), le rocce della zona Piemontese e del Massiccio Dora Maira che verranno attraversate negli ultimi chilometri dell'opera in progetto sono caratterizzate da GR-index intermedio (40-62%) e corrispondente grado d'affidabilità dei dati geomeccanici. Il grado d'affidabilità della caratterizzazione geomeccanica in questa lunga tratta è dunque principalmente 'medio'.

Il tipo di informazione fornita dal metodo GR-Index riguarda esclusivamente l'affidabilità, per ogni litotipo, dei parametri e della caratterizzazione geomeccanica offerti. Il valore del GR-Index ci dice quindi se i parametri geomeccanici utilizzati siano più o meno affidabili e considerati rappresentativi dell'ammasso analizzato. Non si fornisce quindi alcuna informazione circa la qualità geomeccanica del litotipo e il suo comportamento (valore della resistenza alla compressione o del modulo di deformazione). La presenza di un valore di GR-index basso non è quindi indicativa di un ammasso con caratteristiche scadenti, così come un valore di GR-index elevato non è garanzia di una roccia con buone caratteristiche dal punto geomeccanico.



## 7. Stato tensionale in situ

Per quanto riguarda la definizione dello stato tensionale in situ per il versante italiano, ai dati disponibili nella precedente fase di Progetto Definitivo Approvato, si aggiungono le nuove misure eseguite nelle prove realizzate nel Cunicolo esplorativo della Maddalena, in particolare prove di sovracarotaggio CSIRO e di HTPF (Hydraulic Testing on Preexisting Fractures).

Nelle tabelle seguenti sono presentati tutti i dati relativi alle misure dello stato tensionale disponibili per il lato italiano, effettuate nei sondaggi S4, S5 e S23 e quelli di nuova acquisizione eseguiti nelle nicchie del cunicolo esplorativo e lungo la galleria stessa.

Sondaggio	z (m)	$\gamma h$ (MPa)	$\sigma_v$ (MPa)	$\sigma_h$ (MPa) e azimut	$\sigma_H$ (MPa) e azimut
S4	624	21	17	20 (N143)	30 (N53)
S5	780	20	19	10 (N75)	30 (N53)
S23	569	13	14	7 (N148)	9 (N58)

Tabella 11 – Sintesi dei risultati delle misure dello stato tensionale in situ effettuate nei sondaggi sul versante italiano dell'opera nella zona del Massiccio dell'Ambin. ( $z$  = altitudine della zona di misura;  $\gamma h$  = carico litostatico;  $\sigma_v$  = valore della tensione verticale;  $\sigma_h$ ,  $\sigma_H$  e azimut = valore della tensione orizzontale minore e maggiore e relativa orientazione)

	PROGRESSIVA	z	$\Psi_H$ [°]	$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\sigma_L$	NOTE
		(m)		[MPa]	[MPa]	[MPa]	
NICCHIA 1	pk 0+587	389 m	82° - 262°	16,6	7,7	10,5	RISULTATO DELLA MISURA CSIRO
NICCHIA 2	pk 1+420	260 m	102° - 282°	23,1	8,0	7,0	RISULTATO DELLA MISURA HF
NICCHIA 3	pk 2+805	1130 m	13° - 193°	43,2	16,7	30,5	RISULTATO DELLA MISURA CSIRO
SOND. SM05	pk 4+260		12° - 192°	45,4	25,0		RISULTATO DELLA PROVA HF1
	HF1	1163 m				31,4	
	HF2	1070 m				28,9	
PK 4+900	pk 4+900	1090 m	10° - 190°	39,80	13,2	29,4	RISULTATO DELLA MISURA CSIRO

Tabella 12 – Sintesi dei risultati delle misure dello stato tensionale in situ effettuate all'interno del cunicolo esplorativo della Maddalena sul lato italiano dell'opera nella zona del Massiccio dell'Ambin. ( $z$  = altitudine della zona di misura;  $\Psi_H$ : direzione di massima compressione;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ : tensioni principali massima e minima;  $\sigma_L$ : tensione litostatica teorica calcolata con  $\gamma=27$  kN/m<sup>3</sup>)

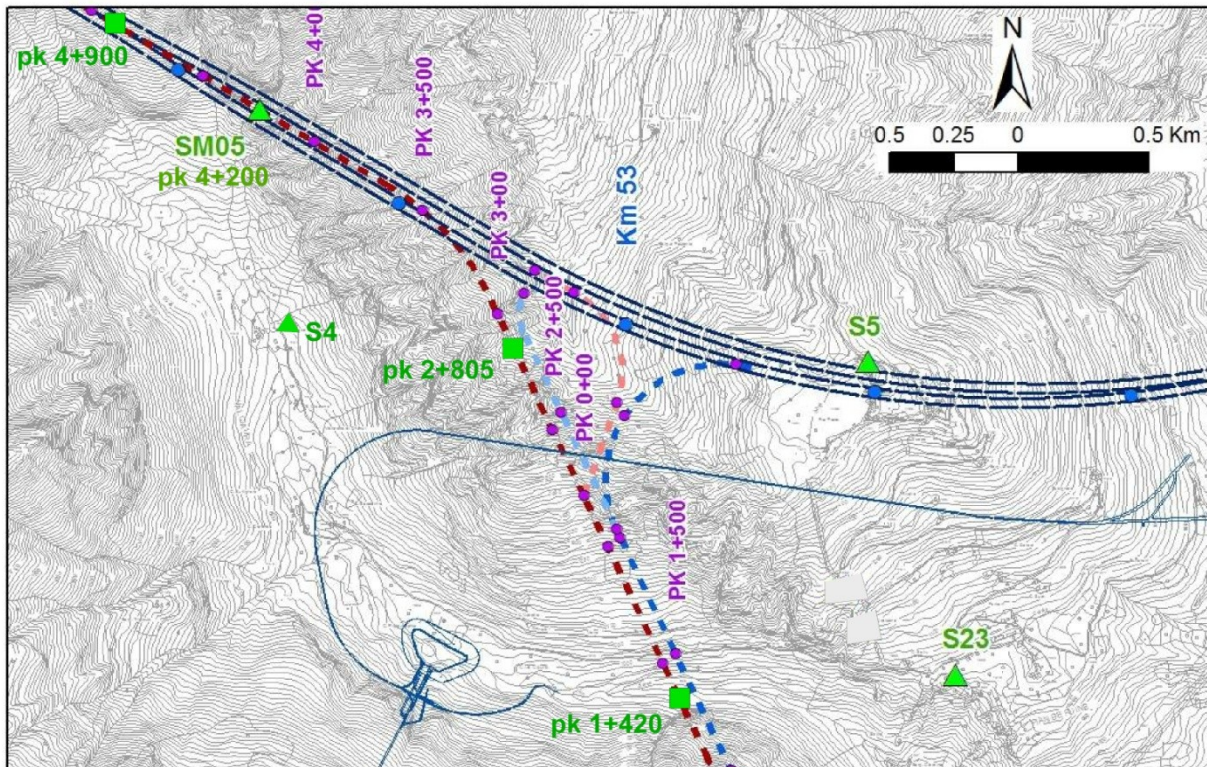


Figura 9 – Ubicazione delle misure dello stato tensionale eseguite nei sondaggi di superficie (triangoli verdi) e nel cunicolo esplorativo della Maddalena (quadrati verdi).

In base alle risultanze delle diverse misure possono essere fornite le seguenti considerazioni:

- Nel sondaggio S4 si osserva che la tensione verticale è inferiore a quella orizzontale, con  $\sigma_v < \sigma_h < \sigma_H$  e si registra un valore di  $\sigma_v$  inferiore al valore del carico litostatico, ovvero si registra un deficit di tensione verticale;
- Nel sondaggio S23 il valore della tensione verticale risulta maggiore di quelle orizzontali con  $\sigma_h/\sigma_v = 0.5$  e la tensione verticale è prossima al valore del carico litostatico. Inoltre i valori delle tensioni orizzontali massima e minima sono simili;
- Il sondaggio S5 mostra una condizione intermedia per quanto riguarda il rapporto tra tensioni verticali e orizzontali, con  $\sigma_h < \sigma_v < \sigma_H$  mentre la tensione verticale è all'incirca assimilabile al carico litostatico.

Relativamente i dati di nuova acquisizione relativi alle misure eseguite nel Cunicolo esplorativo della Maddalena:

- Alla pk 0+587 della Maddalena si osserva che la tensione verticale misurata nella prova CSIRO è confrontabile con il carico litostatico corrispondente alla copertura in quel settore. Le direzioni principali di tensione sono in buon accordo sia con la morfologia di quel tratto del versante.

$$\sigma_{LIT} = 27 \text{ kN/m}^3 * 389 \text{ m} = 10.5 \text{ MPa tensione litostatica}$$

$$\sigma_v = 10.6 \pm 0.4 \text{ MPa componente di tensione verticale misurata}$$

Le stesse misure della prova HF, eseguite nel medesimo settore, son in generale in buon accordo con quelle delle prove CSIRO.

- Alla pk 1+420 della Maddalena si osserva che la tensione verticale misurata nella prova CSIRO è confrontabile con il carico litostatico corrispondente alla copertura in

quel settore. La direzione di massima compressione orizzontale è ENE-WSW. La tensione massima ( $\sigma$  massima) ha un valore sorprendentemente elevato in relazione alla copertura (38 MPa).

$$\sigma_{LIT} = 27 \text{ kN/m}^3 * 260 \text{ m} = 7.02 \text{ MPa tensione litostatica}$$

$$\sigma_V = 8.68 \pm 6.16 \text{ MPa componente di tensione verticale misurata}$$

Nella prova HF eseguita nel medesimo settore la tensione verticale misurata è confrontabile con il carico corrispondente alla copertura nel punto di prova:

Le stesse misure della prova HF, eseguite nel medesimo settore, sono in generale in buon accordo con quelle delle prove CSIRO; l'unica differenza significativa è il valore della  $\sigma$  massima, che nella prova CSIRO è sorprendentemente elevato per la modesta copertura, mentre nella fratturazione idraulica è decisamente inferiore (23 MPa contro 38 MPa).

- Alla pk 2+805 della Maddalena si osserva che la tensione verticale misurata nella prova CSIRO, sebbene sia un po' bassa, in prima approssimazione è confrontabile con il carico corrispondente alla copertura nel punto di prova. La direzione di massima compressione orizzontale è NNE-SSW.

$$\sigma_{LIT} = 27 \text{ kN/m}^3 * 1130 \text{ m} = 30.51 \text{ MPa tensione litostatica}$$

$$\sigma_V = 22.24 \pm 1.26 \text{ MPa componente di tensione verticale misurata}$$

Per quanto riguarda la prova HF il risultato non sembra essere del tutto convincente. Le direzioni principali sono in ottimo accordo con quelle della prova CSIRO, tuttavia, la tensione verticale misurata non è confrontabile con il carico corrispondente alla copertura nel punto di prova, il valore calcolato per la tensione minima non è statisticamente attendibile.

- Alla pk 4+260, nel sondaggio verticale SM05 sono state eseguite 2 prove HF.

La prova HF1 ha prodotto i seguenti risultati relativamente la stima del tensore piano orizzontale:

Tensione orizzontale massima :  $SH = 3P_s - P_r - P_o = 45.4 \text{ MPa}$  direzione  $\alpha_H = 12^\circ - 192^\circ$

Tensione orizzontale minima :  $Sh = P_s = 25.0 \text{ MPa}$  direzione  $\alpha_h = 102^\circ - 282^\circ$

La prova HF2, a causa di una discontinuità inclinata preesistente, non è adatta ad essere interpretata con la teoria classica usata per la prova HF1.

- Alla pk 4+900 della Maddalena si osserva che la tensione verticale misurata nella prova CSIRO è poco maggiore del carico litostatico corrispondente alla copertura nel punto di prova. La direzione di massima compressione orizzontale è NNE-SSW.

$$\sigma_{LIT} = 27 \text{ kN/m}^3 * 1090 \text{ m} = 29.43 \text{ MPa tensione litostatica}$$

$$\sigma_V = 32.76 \pm 1.59 \text{ MPa componente di tensione verticale misurata}$$

La prova HF, eseguita nello stesso settore, presenta una buona confrontabilità con le risultanze della prova CSIRO.

Infine sono comunque da ricordare le considerazioni in termini di stato tensionale, relativamente il quadro generale di riferimento alla scala regionale, derivanti dai risultati del progetto “*Rapport sur la Sismotectonique et la Néotectonique dans le secteur du tunnel de Lyon-Turin*” (Sue, 2005), e le cui indicazioni generali sono sintetizzate nel seguito:

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

---

- le strutture tettonicamente potenzialmente attive mostrano un'orientazione circa longitudinale rispetto all'asse locale dell'arco alpino e sono caratterizzate da movimenti di tipo estensionale;
- il campo tensionale risulta quindi di tipo distensivo, con direzione d'estensione circa E-W e quindi sub-parallela all'asse del tracciato. Nel versante italiano sono riscontrabili movimenti di tipo trascorrente.

Relativamente dati provenienti dalle prove tensionali realizzate, con particolare riferimento a quelle eseguite nel Cunicolo esplorativo della Maddalena, una constatazione che può essere estrapolata per il Tunnel di Base è quella relativa al settore compreso tra le pk 2+800 e 4+200 del Cunicolo, circa corrispondenti al settore di pk 52+800 - 51+400 del Tunnel di Base, ove in generale si osserva che la tensione verticale è inferiore a quella orizzontale. Tale aspetto può determinare a una maggiore concentrazione dello stress in calotta rispetto che sui piedritti e, in ragione della direzione di scavo e dell'orientazione delle discontinuità in quel settore, in particolare della scistosità sub-orizzontale, far sì che si possano innescare gli stessi fenomeni di instabilità in calotta incontrati alla Maddalena (cfr. 5.4.1).

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering Classification of Jointed Rock masses, *Transaction, South Africa Inst. Of Civil Engineers*, 15, pp 335-344, doi.
- Hoek, E. & Brown, E.T., 1980. Underground Excavations in Rock, pp. 527 pp. The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek, E. & Brown, E.T., 1997. Practical estimates of rock mass strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34, 1165-1186, doi: 10.1016/s1365-1609(97)80069-x.
- Kaiser, P.K., Grasselli, G., Cai, M., Suorineni, F. & Maloney, S., 2005. Sintesi sui fenomeni di rottura dinamica durante lo scavo di gallerie. in *MIRARCO Internal Report*.
- Palmstrom, A., 2000. Recent developments in rock support estimates by the RMi, *Journal of Rock Mechanics and tunnelling technology*, 6, pp 1-9, doi.
- Russo, G., Kalamaras, G.S. & Grasso, P., 1998. A discussion on the concept of geomechanical classes, behavior categories and technical classes for an underground project, *Gallerie e grandi opere sotterranee*, 54, pp. 40-51.
- Russo, G. 2014. "An update of the "multiple graph" approach for the preliminary assessment of the excavation behaviour in rock tunnelling". *Tunnelling and Underground Space Technology* n.41 (2014) pp. 74–81.
- Stragiotti, L., Armando, E., Barisone, G.P., Del Greco, O., Innaurato, N., Lunardi, P., Pelizza, S., Polino, R. & Ventosi, U., 1979. Essais et auscultations dans la conception et l'exécution de quatre tunnels dans les schistes lustrés de la Vallée de Suse (Italie). in *International Congress on Rock Mechanics*, pp. 15, ed mechanics, I. S. f. R. Poligrafico Pedrazzini, Locarno, Montreux, Suisse.

**ALLEGATO 1 – SINTESI DEI VALORI DEI PARAMETRI GEOMECCANICI PER OGNI LITOTIPO  
 - TRATTA ITALIANA -**

Lithologie / Litologia		1			2		3		4	5		6	7		9	10
		TCS	TCS <sub>m</sub>	TCS <sub>g</sub>	GCC	gcc (Venaus)	gck	GCK; TPG	OMB, cl-b	AMC	AMC (Maddalena 1)	AMA, AMD	CL	CL (Maddalena 1)	DGA	QSE
γ [kN/m <sup>3</sup> ]	min	27,6	-	-	27,2	26,6	26,3	26,7	26,8	26,1	26,3	27,5	27,2	26,5	26,9	26,1
	moy / med	27,8	-	-	27,6	27,4	27,3	27,2	27,4	26,8	26,8	27,9	27,8	27,6	28,2	26,5
	max	28,5	-	-	27,8	28,8	28,4	28,6	28,5	28,1	27,2	28,7	28,3	29,0	29,2	26,8
	st. dev.	0,5	-	-	0,2	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,6	0,7	0,2
	n	3	-	-	13	32	10	26	7	55	7	23	34	15	55	12
σ <sub>c</sub> [MPa]	min	42,8	-	-	14,4	10,6	3,8	63,4	9,8	34,5	138,8	26,5	36,9	37,7	34,5	57,1
	moy / med	72,4	-	-	41,7	55,4	41,4	87,4	55	149,5	183,8	76,2	97,9	85,7	99	132,4
	max	117,5	-	-	88,5	108,8	95,5	141,1	129,9	386,1	236,0	136,2	193,9	152,3	224,3	209,1
	st. dev.	24,6	-	-	21,1	20,6	23,1	19,8	38,9	78,7	27,5	30,3	36,2	31,9	40,5	50,2
	n	10	-	-	26	50	24	26	11	34	21	20	67	16	48	12
σ <sub>t</sub> [MPa]	min	2,5	-	-	4,9	2,4	4	8,6	1	4,9	8,3	5,1	7,1	7,2	1,8	7,3
	moy / med	8,52	-	-	9,4	7,7	9,2	11,5	7,3	12,3	8,5	6,9	12	13,9	5,7	11,4
	max	16,2	-	-	14	15	16,2	14,3	12,6	17,4	8,7	8,7	16,9	22,8	10,3	19,9
	st. dev.	4,8	-	-	2,8	3,5	4,3	1,9	3,9	3,3	0,3	2,5	2,8	4,1	1,8	4,5
	n	10	-	-	17	26	10	11	9	23	2	2	33	16	32	10
E <sub>s</sub> [GPa]	min	23,7	-	-	9,7	11,3	-	11,2	-	27	33,5	20,1	31,2	17,3	11,8	17,3
	moy / med	43,34	-	-	9,7	27,7	-	21,6	-	42,3	37,5	21,8	49,6	46,8	11,8	17,6
	max	102,8	-	-	9,7	48,2	-	34,9	-	71,4	50,7	23,5	86,1	76,0	11,8	17,9
	st. dev.	25,0	-	-	-	14,1	-	7,1	-	14,4	5,8	2,4	19,5	19,9	-	0,4
	n	10	-	-	1	6	-	9	-	14	8	2	8	16	1	2
E <sub>t</sub> [GPa]	min	29,4	-	-	6,7	20,6	-	19	2,2	20,2	46,2	25,3	36,7	20,9	10,3	15,8
	moy / med	49,5	-	-	6,7	38,5	-	35	2,2	50	55,5	29,9	54,5	52,3	48,6	46,7
	max	102,2	-	-	6,7	62,4	-	40,8	2,2	75,9	70,8	34,5	73,4	75,2	89,2	79,4
	st. dev.	21,1	-	-	-	17,3	-	6,7	-	15,5	8,5	6,5	14,4	16,9	22,1	23,1
	n	10	-	-	1	6	-	9	1	14	8	2	8	16	40	8
n <sub>t</sub>	min	-	-	-	0,15	0,23	-	0,1	0,27	0,1	0,0	0,35	0,12	0,1	0,22	0,1
	moy / med	-	-	-	0,15	0,23	-	0,24	0,27	0,38	0,2	0,35	0,2	0,2	0,22	0,11
	max	-	-	-	0,15	0,23	-	0,31	0,27	0,81	0,5	0,35	0,25	0,3	0,22	0,11
	st. dev.	-	-	-	-	-	-	0,04	-	0,22	0,2	-	0,05	0,1	-	0,01
	n	-	-	-	1	1	-	7	1	10	8	1	7	16	1	2
c [MPa]	min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	17
	moy / med	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33	34
	max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	59	50
	st. dev.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	23
	n	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31	2
f [°]	min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21	13
	moy / med	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41	21
	max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57	28
	st. dev.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	11
	n	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31	2
C <sub>pic</sub> [MPa]	min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	moy / med	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	st. dev.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	n	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

Lithologie / Litologia		1			2		3		4	5		6	7		9	10
		TCS	TCS <sub>m</sub>	TCS <sub>g</sub>	GCC	gcc (Venaus)	gck	GCK; TPG	OMB, cl-b	AMC	AMC (Maddalena 1)	AMA, AMD	CL	CL (Maddalena 1)	DGA	QSE
f <sub>pic</sub> [°]	min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	moy / med	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	st. dev.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	n	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C <sub>res</sub> [MPa]	min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	moy / med	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	st. dev.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	n	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
f <sub>res</sub> [°]	min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	moy / med	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	st. dev.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	n	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m <sub>i</sub>	min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-
	moy / med	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	-
	max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-
	st. dev.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-
	n	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	-
m <sub>i</sub> (s <sub>c</sub> /s <sub>t</sub> )	min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,7	5,3
	moy / med	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15,4	13,1
	max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,8	26,3
	st. dev.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,1	6,5
	n	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	10

$\gamma$  - peso di volume,  $\sigma_c$  – resistenza a compressione monoassiale,  $E_s$  - modulo d'elasticità per la roccia intatta,  $\nu_s$  - modulo di Poisson secante,  $E_t$  - modulo di deformazione,  $\nu_t$  - modulo di Poisson tangente,  $c$  – coesione (<sub>pic, res:</sub> di picco e residuale),  $\phi$  - angolo d'attrito interno (<sub>pic, res:</sub> di picco e residuale),  $m_i$  costante di Hoek e Brown (1980) della roccia intatta. In rosso i dati derivanti dal ritorno di esperienza del cunicolo della Maddalena.

**ALLEGATO 2 - CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA DELLE LITOLOGIE ATTESE LUNGO LE OPERE SOTTERRANEE – TERRITORIO ITALIANO**

UG	Lithologie Litologie	UCS [Mpa]			GSI			Couverture Copertura [m]			RMR			$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]		E <sub>i</sub> [Gpa] *		E <sub>m</sub> [Gpa] *		C [Mpa] *		$\Phi$ [°] *		Rés, à traction Res. a trazione [MPa]		m <sub>i</sub> *		
		moy. med.	min	MAX	moy. med.	min	MAX	moy. med.	min	MAX	moy. med.	min	MAX	min	MAX	min	MAX	min	MAX	min	MAX	min	MAX	min	MAX			
B	10	QSE quartzites / quarziti		132.4	57.1	209.1	65	59	71	800	400	1200	63	54	72	26.1	26.8	17	63	8.5	47	2	9	46.5	51	7.3	19.9	17
C	9	DGA marbres, dolomies et calcaires marmi, dolomie e calcari		99	34.5	224.3	66	61	71	1005	400	1610	65	57	73	26.9	29.2	12	78.5	7	59	1.4	10.5	34	39	1.8	10.3	6
D	1	TCS calc-micaschistes calcemicascisti *		72.4	42.8	117.5	61	52	69	82.4	0	165	60	52	67	27.6	28.5	10.7	29.4	3.7	21	0.4	3.5	50	61	2.5	16.2	7
	2	GCC schistes carbonatés scisti carbonatici *		41.7	14.4	88.5	57	48	66	280	60	500	53	45	60	27.2	27.8	3.6	22.1	1	14.5	0.3	3.1	39	41.5	4.9	14	7
	3	GCK gneiss albitiques gneiss albitici; TPG Paragneiss et quartzites intercalées paragneiss e quarziti intercalate (Dora Maira)		41.4	3.8	95.5	53	48	58	280	60	500	55	48	61	26.3	28.4	1.1	28.6	0.3	13.6	0.2	3	40	50	4	16.2	23
	5	AMC gneiss leucocratiques gneiss leucocratici		149.5 (183,8)	34.5 (138,8)	386.1 (236)	68 (77)	62 (50)	74 (98)	870	640	1100	72 (75)	66 (50)	77 (98)	26.1 (26,3)	28.1 (27,2)	8.6	96.5	5	77.3	1.8	16	32	47	4.9 (8,3)	17.4 (8,7)	7
	6	AMA, AMD micaschistes quartzitiques ± conglomeratiques d'Ambin micascisti quarzitici ± conglomeratici d'Ambin		76.2	26.5	136.2	64 (57)	59 (43)	68 (70)	1200	1000	1400	63 (53)	57 (40)	68 (66)	27.5	28.7	6.6	34	3.3	23.6	2	6.5	25.6	37	5.1	8.7	7
	7	CI micaschistes et gneiss micro- oillés micascisti e gneiss occhiadini		97.9 (85,7)	36.9 (37,7)	193.9 (152,3)	62 (64)	57 (45)	67 (85)	1595	960	2230	64 (59)	58 (42)	70 (85)	27.2 (26,5)	28.3 (28,9)	25	131	11	88	2	10	31	40	7.1 (7,2)	16.9 (22,8)	10
G	4	OMB prasinites / prasiniti; cl-b metabasites / metabasiti		55	9.8	129.9	56	50	61	75	20	130	52	47	56	26.8	28.5	6.6	88	2	48	0.1	1.1	48	54.5	1	12.6	10
H1	22	Roches très fracturées Rocce molto fratturate		21.3	9.8	32.7	33	25	40	0	2230	1115	39	32	46	23.4	28.2	0.9	25	0.01	4	0.3	1.8	11.9	34.4	0.1	8	10
J	23	Roche de faille et cargneules Roccia di faglia e carnirole : BCC		13	5	20	25 (39)	15 (30)	35 (43)	865	690	1040	20 (37)	10 (34)	30 (40)	23	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7

UG	Lithologie Litologie	UCS (MPa)	GSI	Couverture copertura (m)	RMR	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E <sub>i</sub> (GPa) *	E <sub>m</sub> (GPa) *	C' (MPa) *	$\Phi'$ (°) *	$\nu$	m <sub>i</sub> *
K	ac, af, at, gi dépos meubles depositi non consolidati	-	-	0 - 60	-	20-22	-	0.05 - 0.2	0 - 0.01	33-37	0.3	-

UCS – uniaxial compression strength, GSI - geological strength index, RMR – Rock Mass Rating,  $\gamma$  – peso di volume, E<sub>i</sub> - modulo d'elasticità per la roccia intatta, E<sub>m</sub> - modulo di deformazione, c - coesione,  $\phi$  – angolo d'attrito,  $\nu$  - coefficiente di Poisson, m<sub>i</sub> - costante di Hoek & Brown; \* valori calcolati dai parametri disponibili o derivati da parametri di letteratura. Nelle parentesi in rosso sono indicati i valori derivanti dal ritorno di esperienza dello scavo del cunicolo della Maddalena.



**ALLEGATO 3 – SINTESI DEI VALORI DI RIFERIMENTO PER I PARAMETRI DELLE CLASSI GEOMECCANICHE  
 E STATO TENSIONALE SECONDO LE CLASSI AFTES – TERRITORIO ITALIANO**

UG	Lithologie Litologia		UCS (MPa)	GSI	Couverture Copertura (m)	RQD	RMR	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E <sub>i</sub> (GPa) *	E <sub>m</sub> (GPa) *	C (MPa) *	$\Phi$ (°) *	Rés. à traction Res. a trazione (MPa)	m <sub>i</sub> *	États de contrainte Stato tensionale (clas / classe AFTES)
B	Quartzites / Quarziti (QSE)	min	46.7	59	400	-	54	26.1	14	6.9	1.7	43	3.3	13	CN1
		max	209.1	75	1600	-	74	28.1	63	51	11.5	51	22.1	20	
		moy / med	111.7	67	1000	-	64	27.1	38.5	29.0	5.3	46	13.2	17	
		rèf.	<b>112</b>	<b>67</b>		-	<b>64</b>	<b>27.1</b>	<b>38.5</b>	<b>29.0</b>			<b>13.2</b>	<b>17</b>	
C	Marbres, dolomies et calcaires / Marmi, dolomie e calcari (DGA)	min	21.2	50	400	-	52	25.9	7.4	2.3	0.8	27.5	1.8	6	CN2
		max	224.3	71	1610	-	73	29.2	78.5	59	10.4	43	10.7	10	
		moy / med	94.2	61	1005	-	63	27.6	40	21.0	4	37.0	6.5	8	
		rèf.	<b>94</b>	<b>61</b>		-	<b>63</b>	<b>27.6</b>	<b>40</b>	<b>21.0</b>			<b>6.5</b>	<b>8</b>	
D	Gneiss et schistes / Gneiss e scisti (AMA, AMC, AMD, GCC, GCK, CI, TCS, TPG)	min	3.8	48	20	-	45	22.3	3.1	0.85	0.07	37	2.5	6	CN2
		max	386.1	75	2230	-	77	28.7	96.5	78.7	18.7	51	17.4	18	
		moy / med	73.2	62	1115	-	61	25.5	27.1	15.3	3.8	39	9.4	12	
		rèf.	<b>99</b>	<b>62</b>		-	<b>61</b>	<b>25.5</b>	<b>27</b>	<b>15.3</b>			<b>9.4</b>	<b>12</b>	
G	Prasinities et mesabasites / Prasiniti e metabasiti (OMB, cl-b)	min	9.8	50	20	-	47	26.8	6.6	2	0.13	45	1	7	CN1
		max	129.9	61	130	-	56	28.5	88	47.7	2.1	55	12.6	11	
		moy / med	55.0	56	75	-	52	27.7	47.3	20.3	0.8	51.0	6.8	9	
		rèf.	<b>65</b>	<b>56</b>		-	<b>52</b>	<b>27.7</b>	<b>47.3</b>	<b>20.3</b>			<b>6.8</b>	<b>9</b>	
H1	Roches très fracturées / Rocce molto fratturate	min	9.8	25	530	-	32	23.4	0.9	0.05	0.4	16	0.1	7	CN3
		max	32.7	40	600	-	46	28.2	25	3.9	1.1	25	8	7	
		moy / med	19.2	33	565	-	39	25.8	10	1	0.73	21.0	3.7	7	
		rèf.	<b>19</b>	<b>33</b>		-	<b>39</b>	<b>25.8</b>	<b>10</b>	<b>1</b>			<b>3.7</b>	<b>7</b>	
J	Roche de faille et cagneules / Roccia di faglia e carnirole (BCC)	min	5	15	10	-	10	23	-	-	-	-	-	6	CN3
		max	20	35	2230	-	30	26	-	-	-	-	-	8	
		moy / med	13	25	1120	-	20	24.5	-	-	-	-	-	7	
		rèf.	<b>12.5</b>	<b>25</b>		-	<b>20</b>	<b>25.0</b>	-	-	-	-	-	<b>7</b>	

UCS – uniaxial compression strength, GSI - geological strength index, RMR – Rock Mass Rating,  $\gamma$  – peso di volume, E<sub>i</sub> - modulo d'elasticità per la roccia intatta,  
 E<sub>m</sub> - modulo di deformazione, c - coesione,  $\phi$  – angolo d'attrito, m<sub>i</sub> - costante di Hoek & Brown; \* valori calcolati da parametri di letteratura.

## ALLEGATO 4 – METODO DI CALCOLO DEL GR-INDEX CON ESEMPI PER LE LITOLOGIE ATTESE LUNGO IL TUNNEL DI BASE

In linea generale, il grado di affidabilità dei dati geomeccanici stimati in base alle prove in situ e / o di laboratorio eseguite, è funzione essenzialmente del grado di INCERTEZZA legata alla rappresentatività dei campioni raccolti e alla rappresentatività dei valori ottenuti per i parametri rispetto al volume complessivo di ammasso roccioso interessato dallo scavo. Quanto maggiori saranno il numero e la distribuzione dei campioni raccolti e delle prove eseguite, tanto maggiore sarà la loro rappresentatività e l'affidabilità delle caratteristiche geomeccaniche stimate.

E' quindi possibile esprimere l'incertezza legata alle caratteristiche geomeccaniche stimate in termini percentuali come risultante dal prodotto di tre parametri principali, anch'essi classificati in termini percentuali. I tre parametri sono:

- D o provenienza del dato,
- N o rilevanza del dato (numero di dati rapportati alla lunghezza del tratto lungo il quale l'opera attraversa una medesima litologia),
- S o dispersione statistica del set di dati disponibili.

Per ciascuno dei tre parametri i dati sono stati classificati in modo da attribuire loro uno specifico valore percentuale, inversamente proporzionale all'affidabilità del dato per il corridoio progettuale oggetto d'analisi. A ogni parametro così calcolato corrisponde, infine, un 'peso percentuale' stabilito arbitrariamente in base all'importanza attribuita allo specifico parametro.

Questa metodologia ha il duplice scopo di:

- valutare in modo obiettivo il set dei dati geomeccanici, anche in termini di possibili indagini integrative successive e
- integrare la valutazione dei rischi nella progettazione di un'opera in sotterraneo quale il Tunnel di Base della NLTL.

La metodologia proposta è illustrata schematicamente nella figura seguente.

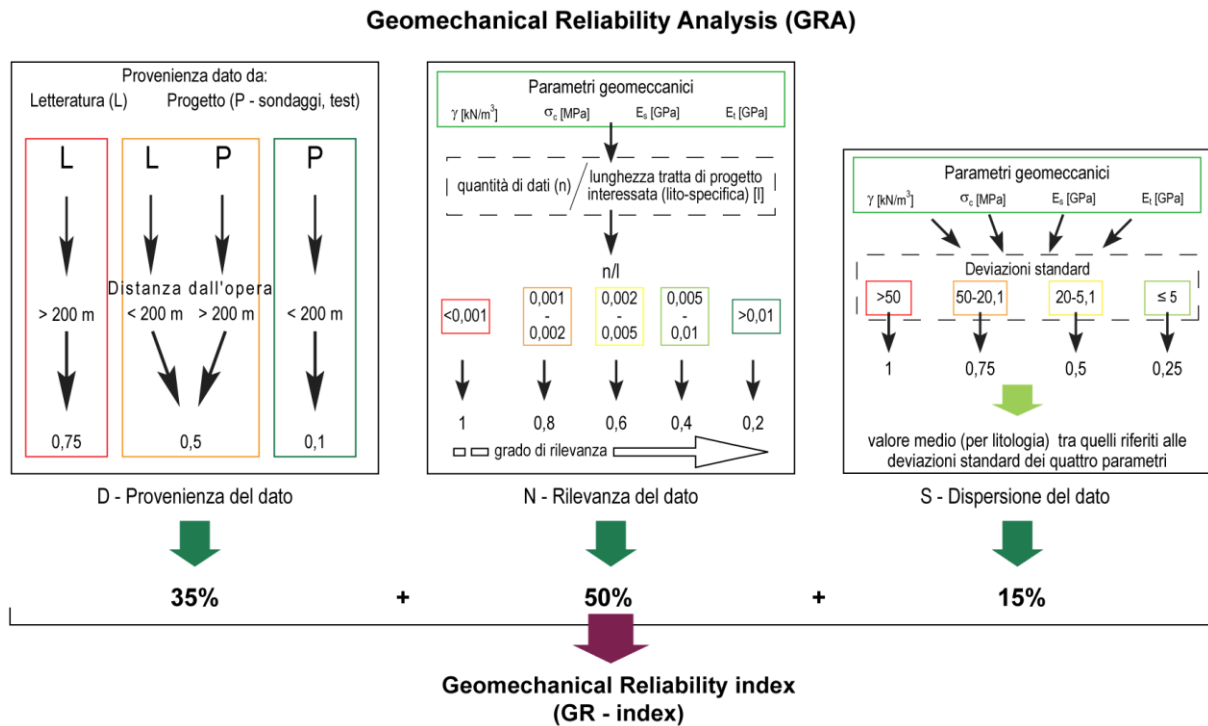


Figura A4-1 - Grafico di sintesi della metodologia di analisi dell'affidabilità dei dati geomeccanici (GRA)

Di seguito si espone il processo di discriminazione dei tre parametri di valutazione di cui sopra.

### Dati di partenza e loro provenienza (parametro D)

Come visto nei capitoli precedenti, i parametri geomeccanici usati per la definizione delle 11 unità geomeccaniche (UG) proposte in questa fase progettuale risultano dall'integrazione di

- dati di sondaggi, test e rilievi eseguiti in fasi progettuali precedenti, elaborati e sintetizzati nella "Relazione geomeccanica per le opere in sotterraneo" APR-B2/-TS2-0055-C;
- dati da sondaggi, test e rilievi eseguiti più recentemente nell'ambito di questo progetto;
- dati di letteratura, da studi eseguiti nell'ambito di altri progetti, per le litologie interessate dalla NLTL ma delle quali non fossero disponibili altri dati oppure ad integrazione dei dati disponibili.
- Dati provenienti dal ritorno di esperienza dello scavo del Cunicolo Esplorativo della Maddalena

La Tabella seguente è uno stralcio della tabella di sintesi dei parametri geomeccanici elaborata, per le diverse litologie, e presentata per intero nell'Allegato 1. In essa sono distinte, nelle litologie interessate, le informazioni oggetto di integrazione provenienti dal ritorno di esperienza della Maddalena (in rosso tra parentesi).

In termini generali, per i tratti coperti dal ritorno di esperienza della Maddalena, ai fini di una rigorosa scelta dei migliori parametri di calcolo, è consigliabile utilizzare gli effettivi parametri *as built* che definiscono le condizioni riscontrate in fase di scavo. Per gli altri settori non direttamente interessati dallo scavo del cunicolo esplorativo, o dove le condizioni geologico-geomeccaniche non possono essere estrapolate sul Tunnel di Base, rimane valida la

classificazione definita in fase di Progetto Definitivo Approvato, a cui è preferibile far riferimento.

Litologia <i>Lithologie</i>		$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]			$\sigma_c$ [MPa]			$E_s$ [GPa]			$E_t$ [GPa]		
		min	med <i>moy</i>	max	min	med <i>moy</i>	max	min	med <i>moy</i>	max	min	med <i>moy</i>	max
1	TCS	27.6	27.8	28.5	42.8	72.4	117.5	23.7	43.3	102.8	29.4	49.5	102.2
5	AMC	26,1 (26.3)	26,8 (26.8)	28,1 (27.2)	34,5 (138.8)	149,5 (183.8)	386,1 (236.0)	27.0 (33.5)	42,3 (37.5)	71,4 (50.7)	20,2 (46.2)	50.0 (55.5)	75,9 (70.8)
7	Cl	27.2 (26,5)	27.8 (27,6)	28.3 (29,0)	36.9 (37,7)	97.9 (85,7)	193.9 (152)	31.2 (17,3)	49.6 (46,8)	86.1 (76,0)	36.7 (20,9)	54.5 (52,3)	73.4 (75,2)

Tabella A4-1 – Sintesi dei parametri utilizzati nella valutazione del grado d'affidabilità dei dati geomeccanici - esempio per tre delle litologie interessate dalla NLTL ('TCS' calcemicascisti Dora Maira; 'Cl' micascisti e gneiss minuti del Complesso di Clarea; 'GDng, tG, tng, tGsb' anidriti e gessi). Per ogni litologia sono riportati i valori minimo (min), medio (med/moy) e massimo (max) del set di dati.  $\gamma$  - peso di volume,  $\sigma_c$  - resistenza a compressione monoassiale,  $E_s$  - modulo d'elasticità per la roccia intatta,  $E_t$  - modulo di deformazione. In rosso tra parentesi i dati derivanti dal ritorno di esperienza del cunicolo della Maddalena.

Il primo parametro di valutazione della qualità dei dati geomeccanici nasce appunto dalla constatazione sulla provenienza dei dati direttamente da sondaggi/prove eseguite nelle fasi di progettazione della NLTL, o da sorgenti esterne. Appartengono a questa seconda categoria i dati relativi ai calcemicascisti del complesso Dora Maira, ottenuti dalla pubblicazione di Stragiotti *et al.* (1979) in seguito agli studi fatti per la realizzazione della Galleria Tanze nel settore di Bussoleno, e i parametri geomeccanici assunti per le rocce di faglia. Questo porta ad una prima distinzione tra:

- dati ricavati da indagini eseguite nell'ambito del progetto (P)
- dati ricavati da letteratura disponibile e riguardanti la stessa area o zone limitrofe (L).

Un ulteriore criterio di distinzione è dato dalla distanza della fonte del dato rispetto all'asse del tunnel. I dati disponibili sono quindi stati ulteriormente distinti in:

- dati da sondaggi / test 'vicini' ( $\leq 200$  m) all'opera,
- dati da sondaggi / test 'lontani' ( $> 200$  m) dall'opera,

I valori attribuiti ai diversi tipi di dati sono definiti come segue:

- ai dati di letteratura (L) "lontani" è stato attribuito un valore 0.75 (o 75% d'INAFFIDABILITÀ);
- ai dati di progetto (P) 'lontani' e a quelli di letteratura (L) 'vicini' è stato dato un valore 0.5 (o 50% d'INAFFIDABILITÀ);
- ai dati di progetto (P) 'vicini', infine, è stato attribuito il valore 0.1 (o 10% d'INAFFIDABILITÀ).

Ne consegue l'attribuzione dei tre specifici valori ai parametri relativi ad ogni litologia considerata ('P, L') (Tabella A4-1).

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

	tipo <i>type</i>	Descrizione <i>description</i>	val	Litologia <i>Lithologie</i>			D	
				P, L	%			
<b>Données / Dati - D</b>	P	Dati del progetto <i>Données du projet</i>	0.1	1	TCS	0.5	0.35	0.175
		Dati di progetto relativi a volumi/tipi di roccia geograficamente lontani dall'opera (> 200m) o <i>Données de projet rapportées aux volumes/types de roche géographiquement loin de l'ouvrage (&gt; 200m) ou</i>	0.5	5	AMC	0.1	0.35	0.035
	L	Dati di letteratura relativi a volumi/tipi di roccia paragonabili a quelli di progetto <i>Données de littérature rapportées aux volumes/types de roche comparables à celles du projet</i>		7	CI	0.1	0.35	0.035
		Dati da letteratura <i>Données de littérature</i>	0.75	23	rocce di faglia, carniole <i>roches de faille, cargneules</i>	0.75	0.35	0.2625

Tabella A4-2 – (Sinistra) Distinzione e parametrizzazione del 'dato' geomeccanico e (destra) esempio del calcolo eseguito per tre delle litologie di cui alla Tabella A4-1 e per le rocce di faglia (v. testo); val'- valore calcolato per il parametro D.

Poiché al parametro D è attribuito un peso percentuale uguale a 35% per la contribuzione alla definizione del grado di incertezza delle caratteristiche geomeccaniche, il valore percentuale ottenuto per i parametri P ed L è moltiplicato per 0.35 al fine di ottenere il valore di D da usare per il calcolo del GR-Index.

Si noti che, anche se le indagini superficiali e i sondaggi profondi eseguiti per il progetto del Tunnel di Base hanno interessato tutte le litologie, per alcune di esse mancano del tutto o in parte informazioni geotecniche dirette. Un caso è quello delle rocce di faglia e delle carniole ed è riportato in Tabella A4-2 e in quelle dei tre capitoli che seguono, mentre altri casi sono evidenziati nei paragrafi d'analisi pertinenti. Di qui l'attribuzione di valori che esprimono 'scarsa affidabilità' (0.75 nel caso del parametro D) alle rocce di faglia e alle carniole. Il fatto che tali tipi di roccia siano stati attraversati durante lo scavo delle discenderie o di opere vicine (ad esempio l'impianto idroelettrico di Pont Ventoux) da solo non implica una maggiore affidabilità della caratterizzazione geomeccanica che può essere implementata solo mediante l'esecuzione di prove in situ e/o di laboratorio.

### Rilevanza dei dati disponibili (parametro N)

Il parametro N di rilevanza dei dati disponibili è rappresentativo del numero di dati disponibili per ciascuno dei litotipi interessati dall'opera.

Il parametro N si calcola come rapporto tra il numero di dati disponibili e la lunghezza complessiva della tratta di tunnel interessata dal litotipo esaminato. Quindi:

$N = \text{numero prove eseguite per il parametro geomeccanico di interesse} / \text{lunghezza del tunnel nel litotipo esaminato}$ .

In maniera analoga a quanto fatto per il parametro D, i valori del rapporto tra il numero di dati geomeccanici (i 4 principali considerati, Tabella A4-3) e la lunghezza complessiva della tratta

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

progettuale interessata dalla medesima litologia sono stati raggruppati in 5 classi; ad ognuna di tali classi è stato attribuito un valore percentuale. Le classi identificate sono elencate nel seguito:

- Classe 1: rapporto  $n/l > 0.01$ . Valore percentuale = 0.2
- Classe 2:  $0.005 < n/l < 0.01$ . Valore percentuale = 0.4
- Classe 3:  $0.002 < n/l < 0.005$ . Valore percentuale = 0.6
- Classe 4:  $0.002 < n/l < 0.001$ . Valore percentuale = 0.8
- Classe 5: rapporto  $n/l < 0.001$ . Valore percentuale = 1

N		Litologia <i>Lithologie</i>	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	$E_s$ [GPa]	$E_t$ [GPa]	l [m]	n/l				n/l med / moy	%	Z
n/l	val							$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	$E_s$ [GPa]	$E_t$ [GPa]			
< 0.001	1 *x													
0.001 0.002	0.8	1 TCS	3	10	10	10	2160	0.8	0.8	0.6	0.6	0.7	0.5	0.35
0.002 0.005	0.6	8 AMC	62	55	22	22	738	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.1
0.005 0.01	0.4	7 CI	49	83	24	24	12450	0.6	0.4	0.8	0.8	0.65	0.5	0.325
> 0.01	0.2	23 rocce di faglia, carniole <i>roches de faille, cargneules</i>	-	-	-	-	2490	1	1	1	1	1	0.5	0.32

Tabella A4-3 – (Sinistra) Parametrizzazione della rilevanza dei dati geomeccanici. 'n/l' è la quantità di dati (n) sulla tratta complessiva occupata dalla litologia (l). l \*x 'o nessun dato'. (Destra) Esempio del calcolo di N eseguito per le tre litologie e per le rocce di faglia (v. testo); val' - valore calcolato per il parametro N;  $\gamma$  - peso di volume,  $\sigma_c$  - resistenza a compressione monoassiale,  $E_s$  - modulo d'elasticità per la roccia intatta,  $E_t$  - modulo di deformazione. In verde i valori aggiornati sulla base dei dati di nuova acquisizione.

Al parametro N è attribuito un peso percentuale uguale a 50% per la contribuzione alla definizione del grado di incertezza delle caratteristiche geomeccaniche. Quindi il valore percentuale ottenuto per il rapporto n/l per ognuno dei 4 parametri geomeccanici principali è moltiplicato per 0.5 al fine di ottenere il valore di N da usare per il calcolo del GR-Index come illustrato nella Tabella A4-313.

**Dispersione statistica del set di dati (parametro S)**

L'ultimo parametro considerato riflette la dispersione statistica del set di dati disponibili per ciascun parametro geomeccanico.

Il parametro S corrisponde alla deviazione standard dei parametri geomeccanici  $\gamma$ ,  $\sigma_c$ ,  $E_s$  e  $E_t$  delle varie litologie.

Per computare S, i valori di deviazione standard sono quindi suddivisi in quattro classi, ad ognuna delle quali è attribuito un valore percentuale:

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

- Classe 1: dev.st.  $\leq 5$ . Valore percentuale = 0.25
- Classe 2:  $5.1 < \text{dev.st.} < 20$ . Valore percentuale = 0.5
- Classe 3:  $20.1 < \text{dev.st.} < 50$ . Valore percentuale = 0.75
- Classe 4: dev.st.  $> 50.1$ . Valore percentuale = 1

Dev. std - S	val	Litologia Lithologie	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	$E_s$ [GPa]	$E_t$ [GPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	$E_s$ [GPa]	$E_t$ [GPa]			S
			st. dev.	st. dev.	st. dev.	st. dev.	st. dev.	st. dev.	st. dev.	st. dev.	%	med moy	
>50	1 *x	1 TCS	0.5	24.6	25.0	21.1	0.25	0.75	0.75	0.75	0.15	0.63	0.09
50 20.1	0.75	5 AMC	0.4	27.5	49.1	11.3	0.25	0.75	0.50	0.50	0.15	0.50	0.08
20 5.1	0.5	7 CI	0.4	35.4	19.8	17.5	0.25	0.75	0.50	0.50	0.15	0.50	0.08
$\leq 5$	0.25	23 rocce di faglia, carniole roches de faille, cargneules	-	-	-	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.15	0.50	0.09

Tabella A4-4 – (Sinistra) Parametrizzazione della dispersione dei dati geomeccanici. 1\*<sup>x</sup> 'o nessun dato'. (Destra) Calcolo di S eseguito per le tre litologie e per le rocce di faglia (v. testo). 'val' - valore calcolato per il parametro S; 'st. dev.' - deviazione standard del set di dati;  $\gamma$  - peso di volume,  $\sigma_c$  - resistenza a compressione monoassiale,  $E_s$  - modulo d'elasticità per la roccia intatta,  $E_t$  - modulo di deformazione. In verde i valori aggiornati sulla base dei dati di nuova acquisizione.

Al parametro S è attribuito un peso percentuale uguale a 15% per la contribuzione alla definizione del grado di incertezza delle caratteristiche geomeccaniche. Quindi il valore percentuale ottenuto per la deviazione standard per ognuno dei 4 parametri geomeccanici principali è moltiplicato per 0.15 al fine di ottenere il valore di S da usare per il calcolo del GR-Index come illustrato nella Tabella A4-144.

### Calcolo del grado di affidabilità (GR-index)

Il grado finale di incertezza dei dati geomeccanici (GR-Index) è calcolato come la somma dei valori dei tre parametri D, N e S e viene espresso in termini percentuali. Nella tabella seguente sono riportate le tre classi di incertezza identificate. Il GR-index è inversamente proporzionale al range percentuale che rappresenta ogni classe. Valori percentuali più alti (o 'gradi d'incertezza') corrispondono a gradi d'affidabilità inferiori, e viceversa.

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

GR-index = (D, 35%) + (N, 50%) + (S, 15%)		Litologia <i>Lithologie</i>		GR- index
Grado d'incertezza <i>Degré d'incertitude</i>	Descrizione <i>Description</i>			
<b>ELEVATO</b> <i>ELEVE</i> (bassa affidabilità <i>fiabilité basse</i> ) ≥ 67 %	Dati da sondaggi e test di laboratorio eseguiti al di fuori di questo progetto; dispersione dei dati elevata e rapporto n° sondaggi / lunghezza tratta in galleria ≤ 0.001 <i>Données de forage et de laboratoire n'exécutées pas pour ce projet; dispersion élevée des données et rapport n° forages / longueur traite galerie ≤ 0.001</i>	1	TCS	62%
<b>MEDIO</b> <i>MOYEN</i> (affidabilità media <i>fiabilité moyenne</i> ) 34 - 66 %	Dati da sondaggi e test di laboratorio eseguiti per questo progetto; dispersione dei dati medio-alta e rapporto n° sondaggi / lunghezza tratta in galleria 0.001 - 0.005 <i>Données de forage et de laboratoire exécutées pour ce projet; dispersion moyenne-élevée des données et/ou données incomplètes (valeurs manquants); rapport n° forages / longueur traite galerie 0.001 - 0.005</i>	7	AMC	21%
<b>BASSO</b> <i>BAS</i> (affidabilità elevata <i>fiabilité élevée</i> ) ≤ 33 %	Dati da sondaggi e test di laboratorio eseguiti per questo progetto; dispersione dei dati bassa e rapporto n° sondaggi / lunghezza tratta in galleria ≥ 0.01 <i>Données de forage et de laboratoire exécutées pour ce projet; dispersion basse des données; rapport n° forages / longueur traite galerie ≥ 0.01</i>	5	CI	44%
		23	rocce di faglia, carniole <i>roches de faille, cargneules</i>	84%

Tabella A4-5 – Classi d'affidabilità suddivise per i parametri geomeccanici considerati nella progettazione, e loro descrizione. A destra è riportata la classificazione delle litologie considerate in questo capitolo.

Come si vede a destra in Tabella A4-5, le caratteristiche geomeccaniche definite per i calcescisti del Complesso Dora Maira e le rocce del Complesso di Clarea sono mediamente affidabili; elevata è invece l'affidabilità dei parametri relativi agli gneiss aplitici del Complesso di Ambin attesi lungo il tracciato del Tunnel di Base, e scarso, infine, il grado d'affidabilità dei parametri stimati per le rocce di faglia.



**ALLEGATO 5 - GR-INDEX PER LE LITOLOGIE ATTESE LUNGO IL TUNNEL DI BASE (lato Italia)**

Lithologie Litologia	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]		$\sigma_c$ [MPa]		$E_s$ [GPa]		$E_t$ [GPa]		Longueur Lunghezza [m]	D			(n/l)				N			S						GR index					
	st. dev.	n	st. dev.	n	st. dev.	n	st. dev.	n		P, L	%		$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	$E_s$ [GPa]	$E_t$ [GPa]	med moy	%	val.	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	$E_s$ [GPa]	$E_t$ [GPa]	%	dev. std.		val.				
1 TCS	0,5	3	24,6	10	25,0	10	21,1	10	2160	0,5	0,35	0,175	0,001	0,8	0,0046	0,8	0,0046	0,6	0,0046	0,6	0,7	0,5	0,35	0,25	0,75	0,75	0,75	0,15	0,63	0,09	62%
2 gcc	0,2	13	21,1	26	-	1	-	1	4410	0,1	0,35	0,035	0,003	0,6	0,0059	0,6	0,0002	1	0,0002	1	0,8	0,5	0,4	0,25	0,75	1	1	0,15	0,75	0,11	55%
3 gck, TPG	0,6	10	23,1	24	-	-	-	-	120	0,1	0,35	0,035	0,083	0,2	0,2000	0,2		1		1	0,6	0,5	0,3	0,25	0,75	1	1	0,15	0,75	0,11	45%
4 OMB, cl-b	0,6	7	38,9	11	-	-	-	1	330	0,1	0,35	0,035	0,021	0,2	0,0333	0,2		1	0,0030	0,6	0,5	0,5	0,25	0,25	0,75	1	1	0,15	0,75	0,11	40%
5 AMC	0,4	62	49,1	55	11,3	22	12,9	22	738	0,1	0,35	0,035	0,084	0,2	0,0745	0,2	0,0298	0,2	0,0298	0,2	0,2	0,5	0,1	0,25	0,75	0,50	0,50	0,15	0,50	0,08	21%
6 AMD, AMF	0,3	23	30,3	20	2,4	2	6,5	2	2611	0,1	0,35	0,035	0,009	0,4	0,0077	0,4	0,0008	1	0,0008	1	0,7	0,5	0,35	0,25	0,75	0,25	0,50	0,15	0,44	0,07	45%
7 CI	0,4	49	35,4	83	19,8	24	17,5	24	12450	0,1	0,35	0,035	0,004	0,6	0,0067	0,4	0,0019	0,8	0,0019	0,8	0,65	0,5	0,325	0,25	0,75	0,50	0,50	0,15	0,50	0,08	44%
9 DGA	0,7	55	40,5	48	-	1	22,1	40	1830	0,1	0,35	0,035	0,030	0,2	0,0262	0,2	0,0005	1	0,0219	0,2	0,4	0,5	0,2	0,25	0,75	1	0,75	0,15	0,69	0,10	34%
10 QSE	0,2	12	50,2	12	0,4	2	23,1	8	2550	0,1	0,35	0,035	0,005	0,6	0,0047	0,6	0,0008	1	0,0031	0,6	0,7	0,5	0,35	0,25	1,00	0,25	0,75	0,15	0,56	0,08	47%
22 roches fracturées rocce fratturate	-	-	-	-	-	-	-	-	2054	0,5	0,35	0,175	-	0,8	-	0,8	-	1	-	1	0,9	0,5	0,45	0,5	0,5	0,5	0,5	0,15	0,50	0,08	70%
23 roches de failles, cagneules rocce di faglia, carnirole	-	-	-	-	-	-	-	-	2490	0,75	0,35	0,2625	-	1	-	1	-	1	-	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,15	0,50	0,08	84%

Lithologie Litologia	$\gamma_h$ [kN/m <sup>3</sup> ]		$C_{uu}$ (kPa)		$E_m$ (MPa)		$PI$ (MPa)		Longueur Lunghezza [m]	D			(n/l)				N			S						GR Index					
										P, L	%		$\gamma_h$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$C_{uu}$ (kPa)	$E_m$ (MPa)	$PI$ (MPa)	n/l moy.	%	val.	$\gamma_h$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$C_{uu}$ (kPa)	$E_m$ (MPa)	$PI$ (MPa)	%	dev. std.		val.				
dépôts meubles / depositi non consolidati (ac, af, at, EJ, Ez, gi)	0,71	47	14,7	19	723	433	2,5	433	1470	0,1	0,35	0,035	0,03	0,2	0,013	0,2	0,295	0,2	0,295	0,2	0,2	0,5	0,1	0,25	0,5	1	0,25	0,15	0,5	0,075	21%

Tabella A5-1 – Classificazione delle litologie lungo la tratta in analisi del TdB in base al GR-index. I valori riportati in rosso nella tabella sono quelli ottenuti per litologie di cui per la classificazione geomeccanica fossero disponibili o solo valori di letteratura, o set 'incompleti' di dati geotecnici. I valori in verde corrispondono a quelli interessati dall'aggiornamento con i dati di nuova acquisizione (ritorno di esperienza della Maddalena).

## **ALLEGATO 6 - SINTESI DELLA CARATTERIZZAZIONE E CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA DEFINITA IN FASE DI APR**

Il presente rapporto costituisce un aggiornamento della caratterizzazione e classificazione geomeccanica fornite nella fase APR/PR. Al fine di meglio inquadrare l'attività svolta nella fase progettuale attuale, nel seguito viene quindi fornita una sintesi degli studi svolti nelle fasi precedenti e dei relativi risultati.

Va evidenziato che gli aspetti relativi all'analisi del comportamento dell'ammasso durante lo scavo e la verifica delle condizioni di squeezing, nonché i valori di convergenza attesi, sono descritti e presentati nelle relazioni di calcolo delle singole opere o tratte specifiche alle quali si rimanda per un'analisi di tali problematiche. Nel seguito si fa principalmente riferimento al sistema classificativo adottato in fase APR, principale oggetto di analisi della presente relazione.

### **Caratterizzazione degli ammassi rocciosi**

Il processo di caratterizzazione geomeccanica degli ammassi rocciosi descritto in fase APR si basa essenzialmente sulla definizione ed analisi delle caratteristiche della matrice rocciosa (roccia intatta) e delle discontinuità dell'ammasso. L'insieme e la combinazione di questi due fattori porta a definire le caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso.

#### *Caratteristiche strutturali degli ammassi*

Per quanto riguarda le caratteristiche strutturali degli ammassi, una prima distinzione viene fatta tra le zone "ordinarie" dell'ammasso e le zone cosiddette "particolari" corrispondenti alle fasce cataclastiche, ovvero alle zone di fratturazione.

Le fasce cataclastiche vengono definite per ciascun litotipo in funzione del loro spessore e della loro spaziatura. Si tratta quindi di una valutazione geometrica, relativa alla frequenza di tali zone all'interno dei singoli litotipi e alla loro potenza come desumibile dall'analisi dei sondaggi. Va tuttavia osservato che, affinché tale valutazione possa essere realmente significativa dal punto di vista statistico, sarebbe necessaria una distribuzione omogenea dei sondaggi all'interno dei vari litotipi: in tal modo si potrebbe effettivamente valutare la reale incidenza delle zone fratturate nei diversi litotipi. Laddove invece la distribuzione dei sondaggi non sia omogenea, si potrebbe osservare una maggiore frequenza delle fasce cataclastiche all'interno dei litotipi con maggior numero di sondaggi.

Le zone ordinarie degli ammassi sono state caratterizzate analizzando le caratteristiche geostrutturali fondamentali dei diversi sistemi di discontinuità quali:

- Spaziatura
- Persistenza
- Scabrezza
- Apertura
- Alterazione
- Riempimento
- Scabrezza o rugosità (JRC)

#### *Caratteristiche della roccia intatta*

Le caratteristiche della roccia intatta vengono definite sulla base dei risultati delle prove di laboratorio su provini di roccia prelevati dai sondaggi effettuati.

I principali parametri considerati nella caratterizzazione della roccia intatta sono elencati nel seguito:

- Resistenza a compressione monoassiale  $\sigma_c$
- Costante  $m_i$  di Hoek & Brown
- Il peso dell'unità di volume  $\gamma$
- La resistenza alla trazione  $\sigma_t$
- Il valore del modulo secante  $E_s$
- Il valore del modulo tangente  $E_t$
- Il valore della costante di Poisson  $\nu$
- I valori di coesione e di angolo di attrito ( $c, \varphi$ ), laddove disponibili.

I valori dei parametri sopra elencati per la roccia intatta rappresentano uno dei punti di partenza fondamentali dello studio effettuato in fase di progettazione definitiva. Come verrà illustrato nei capitoli seguenti, tali valori sono stati integrati con i risultati delle prove di laboratorio effettuate in tempi successivi alla fase APR.

#### *Caratteristiche della discontinuità*

L'analisi delle caratteristiche geotecniche delle discontinuità presentata in fase di APR/PR ha permesso di:

- Definire i parametri di ingresso per le verifiche basate sulla modellazione discontinua quale, ad esempio, l'analisi dei cunei instabili con metodo di equilibrio limite e metodi numerici agli elementi distinti;
- Quantificare parametri tipici delle classificazioni geomeccaniche quali RMR, GSI, RMI.

I parametri di ingresso sono stati derivati dalle prove di taglio diretto effettuate lungo le discontinuità e alle misure effettuate nei rilievi geostrutturali.

Tali analisi hanno permesso di definire i parametri di Mohr-Coulomb rappresentativi della resistenza al taglio delle discontinuità principali dei diversi litotipi, come illustrato nella tabella seguente.

Rapport géomécanique de synthèse / Relazione geomeccanica di sintesi

m.r. #	Litologia prevalente  (sigla geologica)	Barton-Bandis							Mohr-Coulomb <sup>1</sup> L <sub>n</sub> =0,15m		Mohr-Coulomb <sup>1</sup> L <sub>n</sub> =2,5m	
		Prove di laboratorio		Valori utilizzati					c (MPa)	φ (°)	c (MPa)	φ (°)
		n.	JRC <sub>2</sub>	JCS <sub>0</sub> <sup>2</sup> (MPa)	JRC <sub>0</sub> <sup>3</sup>	JCS <sub>n</sub> <sup>4</sup> (MPa)	JRC <sub>n</sub> <sup>4</sup>	φ <sub>b</sub> <sup>5</sup> (°)				
<b>Zona Dora Maira</b>												
1	Micascisti (b-DM)	18	7	65	6	39	4	30	0,12	36	0,07	34
2	marmi dolomitici (mmd)	-	-	50	6	30	4	30	0,11	36	0,07	33
3	calcescisti (mcs)	11	8	70	6	42	4	32	0,12	38	0,08	36
4	metadolomie alterate (mmd)	6	3	20	3	16	3	25	0,04	27	0,04	28
<b>Zona Piemontese</b>												
5	calcescisti (gcc)	17	6	60	6	36	4	32	0,12	38	0,08	35
6	scisti cloritici e gneiss (gck)	14	9	50	6	30	4	27	0,10	33	0,07	30
7	rocce verdi (oph)	10	7	55	6	33	4	30	0,11	36	0,07	33
<b>Zona Brianzonese interna</b>												
8	gneiss (GAm)	4	4	150	4	107	3	32	0,08	38	0,06	36
9	micascisti (Mam, GA2)	1	4	60	4	43	3	30	0,07	34	0,05	33
10	micascisti (SC)	5	6	90	4	64	3	30	0,07	35	0,05	33
<b>Zona Etache-Sapey</b>												
11	anidriti (tGng, tGsb)	-	-	75	4	54	3	32	0,08	36	0,06	35
12	calcari e dolomie (fC, tCD, tD, Cb, c-e)	-	-	90	6	54	4	30	0,12	37	0,08	34
13	quarziti (tQ)	-	-	100	3	78	3	32	0,05	36	0,04	35
14	micascisti (r-f)	-	-	45	4	32	3	30	0,07	34	0,05	32
15	quarziti conglomeratiche (rtCg)	-	-	90	4	64	3	32	0,08	37	0,06	35
16	micascisti basamento/gneiss Sapey (SV, GS)	-	-	60	4	43	3	30	0,07	34	0,05	33
<b>Zona Houiller</b>												
17	scisti grafitici e arenarie (Fomeaux) (hF)	-	-	50	4	36	3	25	0,06	29	0,05	28
18	arenarie con scisti grafitici (La Praz) (hLP)	-	-	70	4	50	3	30	0,07	34	0,05	33
19	scisti grafitici e arenarie (Brequin) (hBO)	-	-	50	4	36	3	25	0,06	29	0,05	28
20	scisti grafitici e arenarie (Encombres) (hE)	-	-	15	2	13	2	22	0,03	23	0,02	23
<b>Zona Sub-Brianzonese2/Ultra-Delfinese</b>												
21	calcari e dolomie (mC, t, tsD)	-	-	70	4	50	3	30	0,07	34	0,05	33
22	calcari marnosi (mCM)	-	-	90	4	64	3	30	0,07	35	0,05	33
23	flysch scistoso (eFs)	-	-	30	4	36	3	27	0,07	31	0,05	30
24	flysch arenaceo (eFg)	-	-	70	4	50	3	30	0,07	34	0,05	33

**Note:**  
<sup>1</sup> regressione lineare nell'intervallo σ<sub>n</sub> = 0 -5 MPa  
<sup>2</sup> da σ<sub>c</sub> della roccia intatta (condizione sfavorevole)  
<sup>3</sup> da rilievi geostretturali  
<sup>4</sup> calcolato con L<sub>n</sub> = 2.5 m (Barton e Bandis, 1982)  
<sup>5</sup> in base ai dati disponibili in letteratura e precedenti esperienze, si sono considerati i valori minimi dei seguenti intervalli:

Tipi litologici	φ <sub>base</sub> [°]
quarziti, anidriti, gneiss, calcescisti	32-37
micascisti, prasiniti, calcari, flysch arenaceo	30-35
scisti cloritici, flysch scistoso	27-32
alternanze scisti grafitici e arenarie	25-30
scisti grafitici con arenarie	22-27

Dove:

n: numero di campioni

JCS<sub>2</sub>: Joint Wall Compressive Strength (scala provino: L<sub>o</sub> = 0,15 )

JRC<sub>2</sub>: Joint Roughness Coefficient (scala provino: L<sub>o</sub> = 0,15 )

JCS<sub>n</sub>: Joint Wall Compressive Strength (discontinuità in situ: L<sub>n</sub> = 2,5 )

JRC<sub>n</sub>: Joint Roughness Coefficient ((discontinuità in situ: L<sub>n</sub> = 2,5 )

φ<sub>b</sub>: angolo di attrito di base

c, φ: coesione, angolo d'attrito

Tabella A7-1 - Sintesi delle caratteristiche di resistenza al taglio delle discontinuità riportata nella relazione geomeccanica APR/PR.

### *Classificazione geomeccanica degli ammassi*

La classificazione geomeccanica presentata in fase di APR/PR si è basata sull'applicazione di tre indici principali:

- Il GSI (Geological Strength Index, Hoek and Brown, 1997)
- Il Joint Parameter (JP) del sistema R<sub>Mi</sub> (Palmstrom, 2000)
- Il Rock Mass Rating (RMR, Bieniawski, 1973).

I primi due indici sono finalizzati alla riduzione delle proprietà della roccia intatta alla scala dell'ammasso roccioso; il terzo è stato utilizzato come indice empirico per un comportamento in termini di capacità di autosostentamento degli ammassi.

L'insieme delle analisi descritte nel presente capitolo ed effettuate durante la fase APR/PR ha portato a definire, per ogni litotipo, un campo di variabilità dei parametri della roccia intatta e dei sistemi classificativi GSI, R<sub>Mi</sub> e RMR. Per ognuno di tali parametri vengono forniti intervalli di valori di riferimento per tre scenari diversi: scenario sfavorevole, scenario più probabile e scenario favorevole. Il processo di analisi ha permesso di distinguere n. 25 principali masse rocciose che, combinate con i tre diversi scenari proposti, ha condotto alla definizione di n. 75 tipi di ammasso differenti.

La sintesi presentata nei documenti APR/PR è fornita nelle due tabelle seguenti.

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

m.r. #	litologia prevalente (sigla geologica)	C	Parametri della roccia intatta			Classificazione Geomeccanica		
			m <sub>i</sub>	$\sigma_{\text{cmin}, \sigma_{\text{cmax}}$ (MPa)	$\sigma_c$ (MPa)	GSI	RMR	RMi
<b>Zona Dora Maira</b>								
1	Micascisti ( <i>b-DM</i> )	-	4-6	20-109	50-65	40-51	36-52	2,0-5,6
		↔	6-8		65-85	51-61	52-64	5,6-13,0
		+	8-10		85-100	61-74	64-73	13,0-30,0
2	marmi dolomitici ( <i>mmd</i> )	-	6-8	10-184	30-50	34-43	25-40	0,4-1,5
		↔	8-10		50-75	43-54	40-53	1,5-4,5
		+	10-12		75-100	54-66	53-66	4,5-13,3
3	calcescisti ( <i>mcs</i> )	-	6-8	7-159	50-70	40-52	35-52	1,9-5,7
		↔	8-10		70-90	52-62	52-64	5,7-12,6
		+	10-12		90-110	62-72	64-74	12,6-30,7
4	metadolomie alterate ( <i>mmd</i> )	-	6-7	(5-45)	10-20	28-34	17-28	0,1-0,19
		↔	7-8		20-30	34-40	28-39	0,19-0,47
		+	8-9		30-40	40-47	39-49	0,47-1,2
<b>Zona Piemontese</b>								
5	Calcescisti ( <i>gcc</i> )	-	4-6	15-109	40-60	40-51	32-48	1,7-5,0
		↔	6-8		60-80	51-61	48-60	5,0-10,9
		+	8-10		80-100	61-72	60-70	10,9-26,4
6	scisti cloritici e gneiss ( <i>gck</i> )	-	4-6	4-96 scl 63-111 gn	30-50	39-48	33-48	1,2-3,3
		↔	6-8		50-70	48-58	48-61	3,3-8,1
		+	8-12		70-110	58-69	61-72	8,1-20,8
7	prasiniti <sup>1</sup> ( <i>oph</i> )	-	5-7	10-130	40-55	39-47	34-50	1-3
		↔	7-9		55-75	47-56	50-61	3-6,6
		+	9-11		75-90	56-66	61-71	6,6-15,3
<b>Zona Brianzonese interna</b>								
8	Gneiss ( <i>Gam</i> )	-	9-12	35-386	80-150	48-62	48-66	9,0-31,6
		↔	12-15		150-220	62-74	66-77	31,6-71,4
		+	15-18		220-300	74-83	77-84	71,4-127,9
9	Micascisti ( <i>Mam, GA2</i> )	-	6-8	27-136	40-60	49-59	38-57	3-10,6
		↔	8-10		60-85	59-68	57-68	10,6-26,2
		+	10-12		85-110	68-79	68-78	26,2-49,1
10	micascisti ( <i>SC</i> )	-	6-8	37-194	60-90	43-57	44-58	3,9-13,3
		↔	8-10		90-135	57-67	58-70	13,3-33,8
		+	10-12		135-180	67-78	70-79	33,8-67,9
<b>Zona Etache-Sapey</b>								
11	Anidriti ( <i>tGng, tGsb</i> )	-	8-10	40-169	40-75	51-67	46-62	5,44-22,3
		↔	10-12		75-110	67-78	62-75	22,3-46,1
		+	12-14		110-165	78-88	75-87	46,1-89,2
12	calcarei e dolomie ( <i>tC, tCD, tD, Cb, c-e</i> )	-	7-9	35-224	40-90	46-61	36-57	3,45-14,6
		↔	9-11		90-130	61-71	57-73	14,6-38,2
		+	11-13		130-200	71-85	73-84	38,2-77,4
13	Quarziti ( <i>tQ</i> )	-	10-13	57-209	60-100	46-59	37-54	5,4-16,4
		↔	13-16		100-140	59-71	54-72	16,4-39,7
		+	16-20		140-200	71-84	72-84	39,7-76,0

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

m.r. #	litologia prevalente (sigla geologica)	C	Parametri della roccia intatta			Classificazione Geomeccanica		
			$m_i$	$\sigma_{c\max}$ (MPa)	$\sigma_c$ (MPa)	GSI	RMR	RMi
14	Micascisti (r-t)	-	8-10	18-84	30-45	42-54	30-49	1,6-5,4
		↔	10-12		45-65	54-63	49-63	5,4-12,3
		+	12-14		65-80	63-74	63-75	12,3-24,0
15	quarziti conglomeratiche (rtCg)	-	8-12	47-146	50-90	49-64	41-60	5,7-19,4
		↔	12-16		90-110	64-75	60-74	19,4-38,4
		+	16-20		110-140	75-85	74-84	38,4-66,8
16	micascisti /gneiss Sapey (SV, GS)	-	7-10	12-108 mcs 135-192 gn	30-60	44-59	36-56	2,7-11,7
		↔	10-15		60-90	59-70	56-71	11,7-29,1
		+	15-20		90-150	70-82	71-80	29,1-59,1
<b>Zona Houiller</b>								
17	scisti grafitici e arenarie (Forneaux) (hF)	-	-		-	-	-	-
		↔	-		-	-	-	-
		+	-		-	-	-	-
18	arenarie con scisti grafitici (La Praz) (hLP)	-	6-8	21-206	40-70	42-55	35-57	1,5-6,5
		↔	8-10		70-100	55-66	57-69	6,5-16,8
		+	10-12		100-135	66-78	69-79	16,8-45,4
19	scisti grafitici e arenarie (Brequin) (hBO)	-	5-7	15-191	22-50	32-40	22-40	0,4-1,3
		↔	7-9		50-70	40-51	40-57	1,3-5,6
		+	9-11		70-90	51-65	57-71	5,6-18,9
20	scisti grafitici e arenarie (Encombres) (hE)	-	7	10-33	10-15	20-30	16-32	0,07-0,25
		↔	7		15-25	30-40	32-46	0,25-0,9
		+	7		25-35	40-50	46-61	0,9-3,5
<b>Zona Sub-Brianzonese<sup>2</sup>/Ultra-Delfinese</b>								
21	calcarei e dolomie (jmC, I, tsD)	-	6-8	21-174	50-70	40-50	36-52	1,5-5,1
		↔	8-10		70-120	50-60	52-63	5,1-13,6
		+	10-12		120-170	60-75	63-78	13,6-35,5
22	calcarei marnosi (jmCM)	-	4-6	9-108	80-90	40-50	32-48	1,6-4,6
		↔	6-8		90-100	50-60	48-63	4,6-11,2
		+	8-10		100-110	60-70	63-76	11,2-31,6
23	flysch scistoso (eFs)	-	4-6	9-92	10-30	36-46	26-43	0,4-1,9
		↔	6-8		30-50	46-56	43-55	1,9-6,4
		+	8-10		50-80	56-69	55-65	6,4-14,8
24	flysch arenaceo (eFg)	-	6-8	55-149	55-70	40-50	30-45	-
		↔	8-10		70-100	50-60	45-65	-
		+	10-12		100-140	60-75	65-85	-
<b>Zone di faglia e/o di accentuato disturbo tettonico</b>								
25	rocce molto fratturate (breccie, gouge) >facies laminate scistose cataclastiti tipo "carniole"	a	7		30	15-30	<20	
		b	7		20	15-25	<20	
		c	10		10	15-25	<20	

Tabella A7-2 (anche pagina precedente) – Parametrizzazione geomeccanica di APR/PR, dalla "Relazione Geomeccanica per le opere in sotterraneo" B2\_00\_03////01. m.r.= massa rocciosa;  $m_i$  = costante di Hoek e Brown (1980) della roccia intatta;  $\sigma_c$ = resistenza monoassiale della roccia intatta; GSI (Hoek et al., 1995); RMR (Bieniawski, 1989); Rmi (Palmstrom, 1996). ↔ Condizione (C) prevalente; - Condizione subordinata sfavorevole; + Condizione subordinata favorevole. <sup>1</sup>I serpentinoscisti sono trattati nell'ambito delle zone di faglia (#25b); <sup>2</sup>Le anidriti del Sub-brianzonese sono trattate nel Gruppo Etache Sapey (#11). Gli estremi sottolineati della forcella di variazione dei parametri indicano maggiori probabilità di occorrenza dei valori prossimi al termine evidenziato.

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

---

La classificazione geomeccanica presentata nelle tabelle precedenti fornisce, per ogni litotipo previsto lungo il Tunnel di Base, i seguenti parametri:

- Il valore della resistenza a compressione uni assiale della roccia intatta ( $\sigma_c$ ) e il relativo campo di variabilità ( $\sigma_{cmin}$ -  $\sigma_{cmax}$ );
- Il valore di  $m_i$  della costante di Hoek & Brown (1980);
- Le forchette di valori per i sistemi classificativi GSI, RMR e RMI.

Tali parametri sono definiti per i tre scenari previsti: condizione prevalente, condizione subordinata sfavorevole; situazione subordinata favorevole.

Si osserva quindi una grande variabilità, per ciascun litotipo, dei parametri geomeccanici di riferimento. Ciò può essere dovuto:

- Da una parte ad un'effettiva ampiezza dei valori dei parametri misurati quali ad esempio la resistenza alla compressione uniassiale (ciò può essere dovuto ad esempio a gradi di alterazione molto ampi per i singoli litotipi) o il valore di GSI (che può essere indicativo del grado di fratturazione molto variabile all'interno di ciascun litotipo);
- al fatto che, mediante l'introduzione di tre scenari o condizioni dalla più favorevole alla più sfavorevole per ogni litotipo, vengono presi in considerazione i valori estremi, seppur possibili, dei diversi parametri geomeccanici.

A partire dall'insieme dei valori e degli scenari sopra illustrati (quindi a partire dai 75 tipi di ammasso presentati in tabella), in fase APR/PR i litotipi vengono raggruppati in N. 11 gruppi geomeccanici principali, come illustrato nel seguito.

#### *Definizione dei Gruppi Geomeccanici principali*

Il criterio adottato in fase APR/PR per la definizione dei raggruppamenti geomeccanici si basa essenzialmente sulla relativa resistenza dell'ammasso. Questa viene rappresentata nei seguenti modi:

- Sul piano  $GSI/\sigma_{cm}$  con rappresentazione delle curve di iso-resistenza alla compressione monoassiale della roccia intatta e delle condizioni relative alle masse rocciose analizzate (Figura A7-1);
- Sul piano  $\sigma_{cm}/\sigma_{cm}$  (globale) con rappresentazione delle condizioni relative alle masse rocciose analizzate (Figura A7-2/Figura A7-2).



### Definizione dei Raggruppamenti Geomeccanici

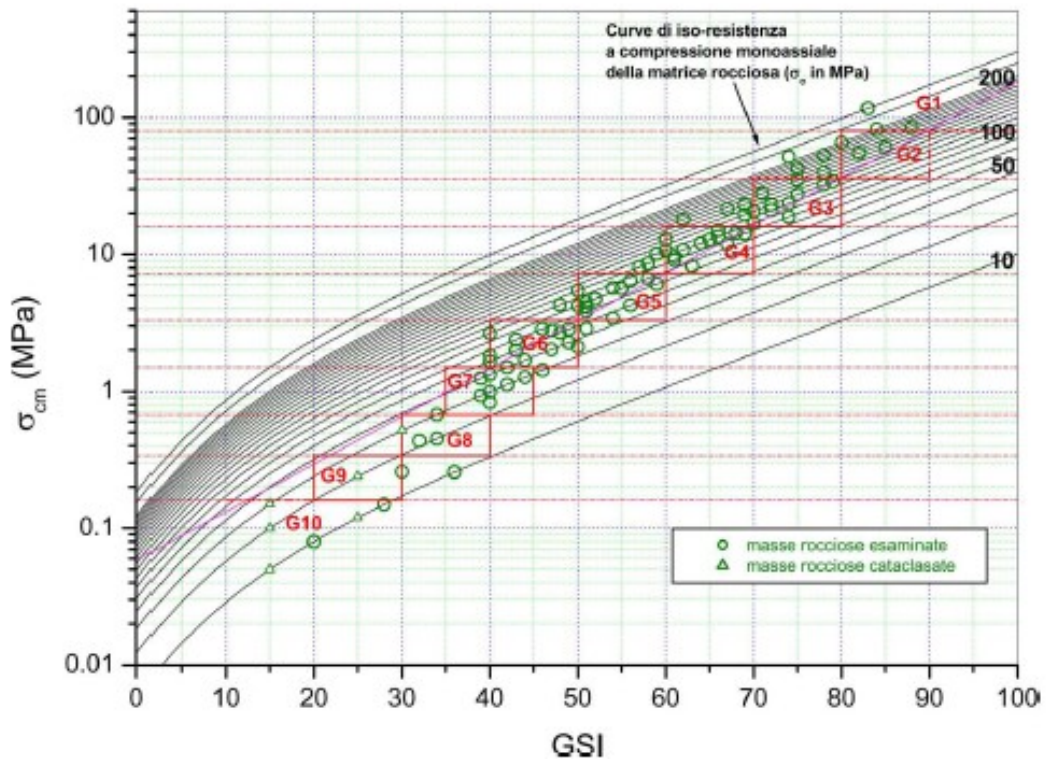


Figura A7-1– Definizione dei gruppi geomeccanici identificati in fase di APR/PR nella “Relazione Geomeccanica per le opere in sotterraneo” B2\_00\_03///01. riportati sul piano GSI/ $\sigma_{cm}$ . Sono altresì rappresentate le curve di iso-resistenza alla compressione monoassiale della roccia intatta

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

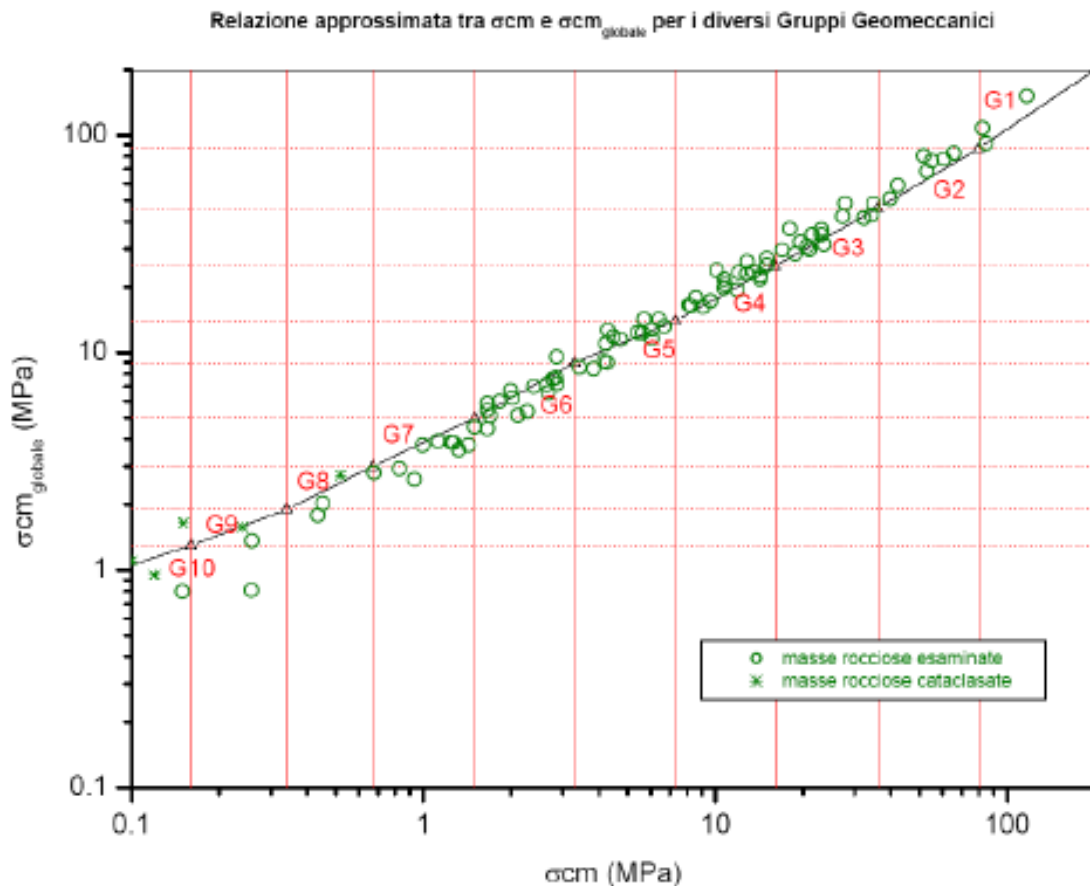


Figura A7-2 – Definizione dei gruppi geomeccanici, identificati in fase di APR/PR nella “Relazione Geomeccanica per le opere in sotterraneo” B2\_00\_03///01, riportati sul piano  $\sigma_{cm}/\sigma_{cm}$  (globale).

In base alla resistenza dell’ammasso sono stati quindi distinti N. 10 Gruppi Geomeccanici principali a cui vengono associati intervalli di valori tipici di GSI. Per ogni gruppo vengono inoltre definite le condizioni caratteristiche di associazione dell’indice GSI con le proprietà della roccia intatta, così da descrivere adeguatamente i campi di variazione della resistenza d’ammasso associata ( “ordinaria” e “ globale”).

Dalla Figura A7-1 si evince come il campo di variabilità del GSI tra 0 e 100 sia stato quindi suddiviso in N. 10 campi omogenei che corrispondono essenzialmente ai valori tipici per i n. 10 Gruppi Geomeccanici identificati.

Una sintesi dei valori tipici dei parametri geomeccanici per ciascun Gruppo Geomeccanico, così come definiti in fase APR/PR, è riportata nella tabella seguente.

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

SINTESI CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DEGLI AMMASSI ROCCIOSI												
<b>CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA</b>												
Gruppo Geomeccanico (G.G.)		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	
GSI (valori tipici)	min	80	80	70	60	50	40	35	30	20	15	
	med	85	85	75	65	55	45	40	35	25	15	
	max	90	80	80	70	60	50	45	40	30	20	
RMR (Classe tipica indicativa)		I	III	II	III	III	III/IV	IV	IV/V	IV/V	V	
<b>PARAMETRI ROCCIA INTATTA</b>												
mi	min	18	14	13	10	8	7	7	7	7	10	
	med	18	15	14	11	9	8	7	7	7	10	
	max	20	18	15	13	11	9	7	7	7	10	
σc	min	250	170	80	85	55	45	30	20	20	10	
	med	250	125	95	72	57	50	32	20	20	15	
	max	250	140	110	80	60	55	35	20	20	15	
<b>PARAMETRI MASSA ROCCIOSA</b>												
γ	min	27	27	27	27	27	26	25	24	23	20	
	med	28	28	28	27	27	27	26	25	24	22	
	max	29	29	29	28	28	28	27	26	26	24	
<b>Resistenza al taglio (valori di picco)</b>												
mb	min	7.833	5.854	4.453	2.287	1.341	0.621	0.697	0.575	0.402	0.490	
	med	10.535	8.778	5.733	3.152	1.804	1.122	0.621	0.687	0.481	0.490	
	max	13.843	11.195	7.343	4.453	2.539	1.509	0.802	0.621	0.575	0.574	
σ	min	0.10837	0.10837	0.03587	0.01174	0.00387	0.00127	0.00073	0.00042	0.00014	0.00008	
	med	0.18888	0.18888	0.06218	0.02047	0.00874	0.00222	0.00127	0.00073	0.00024	0.00008	
	max	0.32919	0.32919	0.10837	0.03587	0.01174	0.00387	0.00222	0.00127	0.00042	0.00014	
σ	min	0.501	0.501	0.501	0.503	0.508	0.511	0.518	0.522	0.544	0.581	
	med	0.500	0.500	0.501	0.502	0.504	0.508	0.511	0.518	0.531	0.581	
	max	0.500	0.500	0.501	0.501	0.503	0.506	0.508	0.511	0.522	0.544	
<b>Resistenza al taglio (valori residui)</b>												
mr	min	1.258	1.101	0.899	0.687	0.549	0.481	0.481	0.481	0.402	0.490	
	med	1.510	1.258	1.032	0.755	0.618	0.549	0.481	0.481	0.481	0.490	
	max	1.789	1.431	1.190	0.899	0.755	0.618	0.481	0.481	0.481	0.574	
sr	min	0.00037	0.00037	0.00025	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00014	0.00008	
	med	0.00045	0.00045	0.00030	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00008	
	max	0.00055	0.00055	0.00037	0.00025	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00024	0.00014	
sr	min	0.524	0.524	0.531	0.531	0.531	0.531	0.531	0.531	0.544	0.581	
	med	0.521	0.521	0.527	0.531	0.531	0.531	0.531	0.531	0.531	0.581	
	max	0.519	0.519	0.524	0.531	0.531	0.531	0.531	0.531	0.531	0.544	
<b>Resistenza d'ammasso (valori parametrici medi)</b>												
σcm	[MPa]	108.8	54.3	23.8	10.2	4.8	2.2	1.1	0.5	0.2	0.1	
σcm,global	[MPa]	184.4	63.7	34.8	18.5	10.6	7.0	3.7	2.1	1.6	1.0	
<b>Deformabilità</b>												
Ed	min	61	61	39	20	9.3	4.0	2.8	1.8	0.7	0.4	
	med	71	71	50	29	14.0	8.1	4.0	2.8	1.1	0.4	
	max	80	80	61	39	20.4	9.3	6.1	4.0	1.8	0.7	
v		0.20	0.20	0.20	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	0.35	
<b>Parametri equivalenti di Mohr-Coulomb per diverse coperture (H) di riferimento (valori parametrici medi)</b>												
H1 (m)	400	c [MPa]	13.7	7.9	4.1	2.4	1.6	1.2	0.8	0.6	0.5	0.3
		φ (°)	60	55	52	46	40	35	29	24	22	20
H2 (m)	800	c [MPa]	15.1	8.1	5.3	3.4	2.4	1.8	1.3	0.9	0.7	0.5
		φ (°)	57	51	47	41	34	29	24	20	18	16
H3 (m)	1200	c [MPa]	16.5	10.3	6.4	4.2	3.0	2.3	1.6	1.2	0.9	0.7
		φ (°)	55	49	44	37	31	28	21	17	15	14
<b>Indici di Competenza (valori parametrici medi)</b>												
H1 (m)	400	<sup>0</sup> σcm,global / (γH)	12.002	5.684	3.105	1.710	0.980	0.649	0.361	0.208	0.165	0.114
		<sup>0</sup> σcm,global / (2 <sup>2</sup> γH)	4.847	2.424	1.055	0.473	0.212	0.104	0.051	0.024	0.012	0.004
		<sup>0</sup> σc / (γH)	22.32	11.16	8.48	6.87	5.28	4.83	3.08	2.00	2.06	1.70
		AFTES	CN1	CN1	CN1	CN1	CN1	CN2	CN3	CN2	CN3	
H2 (m)	800	<sup>0</sup> σcm,global / (γH)	8.001	2.842	1.552	0.855	0.490	0.325	0.180	0.104	0.082	0.057
		<sup>0</sup> σcm,global / (2 <sup>2</sup> γH)	2.424	1.212	0.527	0.257	0.106	0.052	0.025	0.012	0.005	0.002
		<sup>0</sup> σc / (γH)	11.16	5.58	4.24	3.33	2.64	2.31	1.54	1.00	1.04	0.85
		AFTES	CN1	CN1	CN1	CN1	CN1	CN2	CN3	CN2	CN3	
H3 (m)	1200	<sup>0</sup> σcm,global / (γH)	4.001	1.895	1.035	0.570	0.327	0.218	0.120	0.080	0.055	0.038
		<sup>0</sup> σcm,global / (2 <sup>2</sup> γH)	1.819	0.898	0.352	0.158	0.071	0.035	0.017	0.008	0.004	0.001
		<sup>0</sup> σc / (γH)	7.44	3.72	2.83	2.22	1.75	1.54	1.03	0.67	0.69	0.57
		AFTES	CN1	CN1	CN1	CN1	CN1	CN2	CN3	CN2	CN3	
Note: <sup>0</sup> Hook e Marins, 2000; <sup>0</sup> Plasticizzazione per valori <=1; <sup>0</sup> AFTES 2003; Ed=modulo di deformabilità; v=coefficiente di Poisson; mi, mb, σ, mr, sr= costanti di Hook-Bravi della roccia intatta e della massa rocciosa, picco e residuo (2002); H=capertura (m); σc, σcm, σcm,global= resistenza della roccia intatta, massa rocciosa, globale (Hook et al 2002); γ= peso di volume; φ, p=coesione, angolo di attrito												

SINTESI CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI S.S.						
Gruppo Geomeccanico (G.G.)	G11	γ (kN/m3)	c' (MPa)	φ' (°)	Ed (GPa)	v
				20-22	0-0.010	33-37

Note: γ= peso di volume; c, φ=coesione, angolo di attrito; Ed=modulo di deformabilità; v=coefficiente di Poisson

Tabella A7-3 - Sintesi della caratterizzazione geomeccanica degli ammassi rocciosi definita in fase APR/PR, nella "Relazione Geomeccanica per le opere in sotterraneo" B2\_00\_03////01

Ai dieci Gruppi Geomeccanici identificati per gli ammassi rocciosi va aggiunto un Gruppo Geomeccanico G11 riferito ai terreni s.s. ovvero ai depositi sciolti.

Rapport géomécanique général (côté Italie) / Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)

L'attribuzione dei diversi litotipi ai gruppi geomeccanici così identificati è illustrata nella tabella seguente.

m.r. #	litologia prevalente (sigla geol.)	Gruppo Geomeccanico		
		Condizione subordinata sfavorevole (-)	Condizione prevalente(↔)	Condizione subordinata favorevole(+)
<b>Zona Dora Maira</b>				
1	Micascisti ( <i>b-DM</i> )	G6/G5	G4/G5	G4
2	marmi dolomitici ( <i>mmd</i> )	G7/G6	G5/G6	G4
3	calcescisti ( <i>mcs</i> )	G6/G5	G5/G4	G4/G3
4	metadolomie alterate ( <i>mmd</i> )	G9/G8	G7/G8	G7
<b>Zona Piemontese</b>				
5	calcescisti ( <i>gcc</i> )	G6	G5	G4
6	scisti cloritici e gneiss ( <i>gck</i> )	G7/G6	G5	G4
7	prasiniti <sup>1</sup> ( <i>oph</i> )	G7/G6	G5/G4	G4
<b>Zona Brianzonese interna</b>				
8	gneiss ( <i>GA<sub>m</sub></i> )	G5/G4	G3/G2	G2/G1
9	micascisti ( <i>MA<sub>m</sub>, GA2</i> )	G6/G5	G4	G3/G2
10	micascisti ( <i>SC</i> )	G6→G4	G4/G3	G3/G2
<b>Zona Etache-Sapey</b>				
11	Anidriti ( <i>tGng, tGsb</i> )	G5-G4	G4-G3	G2-G1
12	calcarei e dolomie ( <i>tC, tCD, tD, Cb, c-e</i> )	G6-G5	G4-G3	G3-G2
13	quarziti ( <i>tQ</i> )	G5-G4	G4-G3	G3-G2
14	micascisti ( <i>f-t</i> )	G6-G5	G5-G4	G4-G3
15	quarziti conglomeratiche ( <i>riCg</i> )	G5-G4	G4-G3	G3-G2
16	micascisti basamento/gneiss Sapey ( <i>SV, GS</i> )	G6-G5	G5-G4	G3-G2
<b>Zona Houiller</b>				
17	scisti grafittici e arenarie (Forneaux) ( <i>hF</i> )	-	-	-
18	arenarie con scisti grafittici (La Praz) ( <i>hLP</i> )	G6-G5	G5-G4	G3-G2
19	scisti grafittici e arenarie (Brequin) ( <i>hBO</i> )	G8-G7	G6-G5	G5-G4
20	scisti grafittici e arenarie (Encombres) ( <i>hE</i> )	G10-G9	G8-G7 <sup>19</sup>	G7-G6
<b>Zona Sub-Brianzonese<sup>2</sup>/Ultra-Delfinese</b>				
21	calcarei e dolomie ( <i>jmC, l, tsD</i> )	G6-G5	G5-G4	G3-G2
22	calcarei marnosi ( <i>jmCM</i> )	G6-G5	G5-G4	G4-G3
23	flysch scistoso ( <i>eFs</i> )	G8-G7	G6-G5	G5-G4
24	flysch arenaceo ( <i>eFg</i> )	G6-G5	G5-G4	G4-G3
<b>Zone di faglie e/o di accentuato disturbo tettonico</b>				
25	a	rocce molto fratturate (breccie, gouge)		
	b	>facies laminate scistose		
	c	cataclastiti tipo "carniole"		

Tabella A7-4 - Classificazione delle masse rocciose nei Gruppi Geomeccanici principali definiti in fase APR/PR, nella "Relazione Geomeccanica per le opere in sotterraneo" B2\_00\_03////01 (cfr. tabella precedente)

Nella fase attuale del progetto (PD2) è stata effettuata un'analisi critica della classificazione rappresentata nella Tabella A7-3.