



Scuola di:
INGEGNERIA CIVILE
AMBIENTALE TERRITORIALE

Modellazione agli elementi finiti in 3D

GALLERIA FERROVIARIA DEL BRENNERO

Corso di laurea in Ingegneria Civile
INFRASTRUTTURE DI TRASPRTO

Marco Mattia Garoglio 784381
POLITECNICO DI MILANO | AA 2012/2013

RELATORE:
PROFESSORESSA LAURA SCESI

1 SOMMARIO

1	Abstract.....	10
2	Introduzione.....	12
3	Gallerie Naturali.....	13
3.1	Premessa – Opere in sotterraneo.....	13
3.2	Indagini geognostiche per la realizzazione di gallerie.....	17
3.2.1	Indagini geognostiche finalizzate alla scelta del tracciato.....	17
3.2.2	Indagini geognostiche per la realizzazione dello scavo di una galleria.....	18
3.2.2.1	Caratterizzazione delle tratte di imbocco.....	19
3.2.2.2	Caratterizzazione delle tratte centrali a bassa copertura.....	19
3.2.2.3	Caratterizzazione delle tratte centrali a copertura medio-alta.....	20
3.2.3	Indagini idrogeologiche.....	20
3.3	Soluzioni progettuali.....	23
3.3.1	Considerazioni preliminari.....	23
3.3.2	Definizione della qualità degli ammassi.....	23
3.3.2.1	Classificazione di Bieniawski.....	23
3.3.2.2	Classificazione di Barton.....	26
3.3.2.3	Classificazione di Hoek – Brown.....	31
3.3.2.4	Classificazione GSI.....	37
3.3.3	Definizione del comportamento degli ammassi rocciosi soggetti a escavazione.....	47
3.3.3.1	Momento della progettazione.....	47
3.3.3.2	Momento della costruzione.....	48
3.4	Mezzi di scavo, metodologie di avanzamento e tecniche costruttive.....	49
3.4.1	Mezzi di scavo.....	49
3.4.1.1	Scavo meccanico.....	49
3.4.1.2	Scavo mediante esplosivo.....	55
3.4.2	Metodologie di avanzamento: NATM.....	56
3.4.3	Tecniche costruttive.....	57
4	Opera in esame: Galleria ferroviaria Brennero.....	59
4.1	Introduzione all'opera.....	59
4.1.1	Sistema di Gallerie come supporto logistico.....	59

4.1.2	Il Cunicolo Esplorativo.....	60
4.1.3	Ubicazione delle opere oggetto della progettazione.....	61
4.1.4	Aspetti logistici.....	62
4.2	Situazione geologica e geotecnica coinvolta dal lotto del tunnel di Base del Brennero.....	63
4.2.1	Quadro generale degli ammassi rocciosi rispetto alla faglia periadriatica.....	63
4.2.1.1	Geologia a Sud della Periadriatica.....	63
4.2.1.2	La Linea Periadriatica.....	63
4.2.1.3	Geologia a Nord della Periadriatica.....	64
4.2.1.4	La finestra di Mules.....	65
4.2.2	Relazione geotecnica.....	66
4.2.2.1	Introduzione.....	66
4.2.2.2	Modello Geologico.....	67
4.2.2.3	Previsione Geologica.....	67
4.2.3	Modello Geologico dell'area di progetto.....	67
4.2.3.1	Contesto geologico regionale.....	68
4.2.3.2	Assetto litostratigrafico.....	68
4.2.3.3	Assetto geologico-strutturale.....	71
4.2.4	Dati acquisiti con lo scavo del cunicolo esplorativo e della finestra di accesso di Mules...75	
4.2.4.1	Cunicolo esplorativo.....	75
4.2.4.2	Galleria di accesso di Mules.....	77
4.3	Descrizione delle opere.....	78
4.3.1	Premessa.....	78
4.3.2	Il sistema di Gallerie come supporto logistico.....	78
4.3.2.1	Opere attribuibili al Settore Nord.....	79
4.3.2.2	Opere attribuibili al Settore Sud.....	82
4.3.2.3	Opere connesse al cunicolo esplorativo.....	85
4.3.2.4	Cunicolo Esplorativo Tratta lineamento Periadrico.....	87
5	Modellizzazione del sistema di gallerie con Midas GTS.....	89
5.1	Il software di calcolo midas gts.....	89
5.1.1	Metodo di lavoro per lo studio di un ammasso roccioso attraversato da tunnel in MIDAS GTS	89
5.1.1.1	Modellazione Geometrica.....	89
5.1.1.2	Generazione delle Mesh.....	90

5.1.1.3	Condizioni di Analisi	90
5.1.1.4	Post-Processing e valutazione dei Risultati	90
5.2	Creazione del modello Geometrico.....	91
5.2.1	Realizzazione del sistema di gallerie	91
5.2.1.1	Canna Est.....	92
5.2.1.2	Canna Ovest.....	95
5.2.1.3	Cunicolo Esplorativo.....	98
5.2.1.4	Opere ausiliare	101
5.2.1.5	Superficie topografica.....	103
5.2.1.6	Caratterizzazione geologica in 3D delle zone interessanti il sistema di gallerie.....	105
5.3	Creazione della Mesh	106
5.3.1	Definizione dei parametri geologici e geotecnici dei litotipi presenti	106
5.3.1.1	Granito di Bressanone.....	108
5.3.1.2	Tonalite	109
5.3.1.3	Paragneiss	110
5.3.1.4	Faglia della Pusteria	111
5.3.1.5	Faglia periadriatica	112
5.3.2	Condizioni al contorno	113
5.4	Considerazioni sul software Midas GTS	114
6	Risultati delle analisi sul modello.....	115
6.1	Scenari ipotizzati	115
6.1.1	Studio del blocco in analisi nelle condizioni iniziali.....	115
6.1.1.1	Condizioni	115
6.1.1.2	Risultati	115
6.1.2	Studio del blocco dopo l'assessamento e con le gallerie scavate.....	117
6.1.2.1	Faglia della Pusteria	117
6.1.2.2	Zona dei cameroni logistici.....	121
6.1.2.3	Faglia Periadriatica	125
7	Conclusioni	129
8	Bibliografia.....	130

2 INDICE FIGURE

Figura 3-1 Esempio di galleria naturale, il tunnel si inserisce direttamente nella montagna.....	14
Figura 3-2 Esempio di galleria artificiale, si noti l'assenza di copertura.....	15
Figura 3-3 Terminologia delle diverse parti di una galleria.....	16
Figura 3-4 Prospetto riassuntivo delle indagini geognostiche per la realizzazione di gallerie	22
Figura 3-5 Parametri della classificazione di Bieniawski e loro coefficienti numerici.....	24
Figura 3-6 Compensazione dei coefficienti numeri in funzione dell'orientamento delle discontinuità, classi di roccia e loro significato.....	25
Figura 3-7 Classificazione dell'ammasso roccioso secondo Bieniawski	25
Figura 3-8 Modalità di avanzamento e armature in funzione delle cinque classi previste dal RMR.....	26
Figura 3-9 Parametri RQD, J_n e J_r	27
Figura 3-10 Parametro J_a	28
Figura 3-11 Parametro J_w	28
Figura 3-12 Parametro SRF	29
Figura 3-13 Parametro Q e qualità della roccia	30
Figura 3-14 Valori del coefficiente ESR (Excavation Support Ratio) in funzione del tipo di cavità sotterranea.....	30
Figura 3-15 Relazione fra Q e dimensione equivalente	31
Figura 3-16 Involuppo di rottura secondo Hoek - Brown.....	32
Figura 3-17 Critero di Hoek - Brown rappresentato su un cerchio di Mohr	33
Figura 3-18 Valori tipici del fattore D nell'equazione di Hoek-Brown.....	34
Figura 3-19 Applicazione del metodo dei minimi quadrati ad una prova triassiale in cella di Hoek.....	36
Figura 3-20 Valori di m.....	36

Figura 3-21 Valori di mi.....	37
Figura 3-22 Abaco GSI (Hoek).....	39
Figura 3-23 Valori tipici di GSI per rocce calcaree	40
Figura 3-24 Valori tipici di GSI per Arenarie	41
Figura 3-25 Valori tipici di GSI per rocce a componente argillosa.....	41
Figura 3-26 Valori tipici di GSI per rocce granitoidi	42
Figura 3-27 Valori tipici di GSI per rocce ultrabasiche.....	42
Figura 3-28 Valori tipici di GSI per rocce gneissiche	43
Figura 3-29 Valori tipici di GSI per rocce metamorfiche	43
Figura 3-30 Parametro SCR dal valore di J_w	44
Figura 3-31 Tavole parametriche SCR (Ulusay & Sonmez).....	44
Figura 3-32 Determinazione del GSI secondo Ulusay & Sonmez.....	45
Figura 3-33 Determinazione del GSI per rocce flyschoidi	46
Figura 3-34 Valori degli sforzi e del parametro mi correlati alle classi di Flysch	46
Figura 3-35 Pale meccaniche.....	49
Figura 3-37 Martello demolitore.....	50
Figura 3-36 Ripper.....	50
Figura 3-38 Fresa ad attacco integrale	50
Figura 3-39 Fresa ad attacco puntuale	50
Figura 3-40 Scudo Aperto ad attacco integrale	51
Figura 3-41 Jumbo.....	55
Figura 4-1 Corografia d'insieme.....	61
Figura 4-2 Descrizione breve delle unità litologiche previste per il cunicolo esplorativo e loro presenza nei sondaggi esplorativi BBT.....	69
Figura 4-3 Carta Tettonica generale della Finestra dei Tauri occidentale. Modificato Brandner, 1980, integrato secondo Mancktlelow et al. 2001.	70

Figura 4-4 Carta Tettonica generale per il settore meridionale dell'area di progetto della galleria di base del Brennero.....	72
Figura 4-5 Tabella riassuntiva dei sistemi di faglia più importanti nell'area del lotto in progettazione e nelle sue vicinanze	73
Figura 4-6 Classificazione delle faglie attive/potenzialmente attive sulla base dei dati (Buncio et al. 2004, modificato secondo Galadini et al., 2000).....	74
Figura 4-7 Classificazione delle faglie attive secondo la percentuale media di movimento v (Matsuda, 1976). E' indicato anche il tempo di ritorno dei terremoti (R.I.) a seconda del valore caratteristico di movimento u , secondo la relazione di Wallace, 1970.	74
Figura 4-8 Classificazione delle faglie nell'area del lotto in progettazione rispetto all'attività tettonica. Per i dati e i tassi di spostamento si veda l'illustrazione 6Figura 4-9	74
Figura 4-10 Proiezione equiareale di Schmidt per le faglie intersecate dal cunicolo esplorativo tra le progressive 10 + 710 e 10 + 800; a = cerchi massimi; b = diagrammi di densità	75
Figura 4-11Proiezione equiareale di Schmidt per i sistemi di giunti nel cunicolo esplorativo tra il piede della galleria d'accesso di Mules e la progressiva 10 + 800; a = cerchi massimi; b = diagramma di densità.....	76
Figura 4-12Proiezione equiareale di Schmidt per il sistema di giunti del cunicolo esplorativo tra la progressiva 10 + 800 e la progressiva 10 + 916; a = cerchi massimi; b = diagramma di densità	77
Figura 4-13 Proiezione equiareale di Schmidt per i sistemi di giunti nella Galleria di accesso di Mules tra la progressiva 1 + 550 e la progressiva 1 + 700; a = cerchi massimi; b = diagramma di intensità.....	78
Figura 4-14 Corografia d'insieme delle opere a nord dell'innesto all'asse delle gallerie principali.	80
Figura 4-15 Corografia d'insieme delle Opere a Sud dell'innesto all'asse delle gallerie principali – Schema	84
Figura 4-16 Corografia d'insieme delle opere connesse al cunicolo-Schema.....	86
Figura 5-1 Prodotto finale della modellazione geometrica e geologica del Blocco di Studio utilizzato per le analisi strutturali.....	91
Figura 5-2 Canna Est	94
Figura 5-3 Canna Ovest.....	97

Figura 5-4 Cunicolo Esplorativo	100
Figura 5-5 Opere Ausiliarie legate al sistema logistico.....	103
Figura 5-6 Superficie Topografica nell'interfaccia di Revit.....	104
Figura 5-7 Blocco di Studio con superficie topografica	104
Figura 5-8 5 Unità litologiche che costituiscono il blocco di studio	105
Figura 5-9 Interfaccia per la definizione dei parametri geo-meccanici degli ammassi rocciosi.....	107
Figura 5-10 Granito di Bressanone, parametri Geotecnici.....	108
Figura 5-11 Tonalite, parametri geomeccanici	109
Figura 5-12 Paragneiss, parametri Geomeccanici	110
Figura 5-13 Faglia della Pusteria, parametri Geomeccanici.....	111
Figura 5-14 Faglia Periadriatica, parametri Geomeccanici	112
Figura 5-15 In figura sono evidenziate le condizioni al contorno imposte al blocco di studio	113
Figura 6-1 Dislocamenti dovuti al processo di compattazione.....	115
Figura 6-2 Dettaglio Blocco di studio per il tratto nella faglia della pusteria	117
Figura 6-3 In figura si nota quanto sia piccolo il blocco di studio rispetto alla faglia della Pusteria.....	118
Figura 6-4 In figura si può notare già la suddivisione in elementi tetraedrici, gli elementi finit.....	118
Figura 6-5 Dislocamento degli elementi finiti rispetto all'asse Z, sulla destra della figura la legenda.	119
Figura 6-6 Sforzi lungo la verticale,.....	120
Figura 6-7 Dislocamenti rispetto all'asse trasversale a quello delle gallerie	120
Figura 6-8 Il sistema delle gallerie nella zona dei cameroni logistici.....	121
Figura 6-9 Blocco di studio con Mesh ben visibile.....	122
Figura 6-10 Dislocamenti lungo l'asse Z per le zone del camerone logistico.....	122
Figura 6-11 Sforzi lungo l'asse Z.....	123

Figura 6-12 Dislocamenti rispetto all'asse X	124
Figura 6-13 Blocco di studio per la faglia periadriatica	125
Figura 6-14 Blocco di studio suddiviso in elementi finiti.....	125
Figura 6-15 Dislocamenti lungo l'asse Z	126
Figura 6-16 Sforzi lungo l'asse Z.....	127
Figura 6-17 Dislocamenti lungo l'asse X	127

3 INDICE DELLE TABELLE

Tabella 5-1 Riassunto dei dati piano altimetrici ricavati dal progetto.	92
Tabella 5-2 Punti utilizzati per il tracciamento degli assi della galleria.....	93
Tabella 5-3 Riassunto dei dati piano altimetrici ricavati dal progetto.	95
Tabella 5-4 Punti utilizzati per il tracciamento degli assi della galleria.....	96
Tabella 5-5 Riassunto dei dati piano altimetrici ricavati dal progetto.	98
Tabella 5-6 Riassunto dei dati piano altimetrici ricavati dal progetto.	99
Tabella 5-7 Di seguito le tabelle riassuntive dei punti utilizzati per il tracciamento delle opere di supporto per la logistica	101

1 ABSTRACT

Il presente lavoro di tesi si occupa della modellazione di alcuni aspetti strutturali legati alla realizzazione di un sistema di gallerie all'interno di una complessa e particolare situazione geologica, la faglia periadriatica.

L'unicità del contesto rende interessante l'analisi dei fenomeni tensionali e deformativi dovuti alla realizzazione dell'opera, caratterizzata da due canne principali per il transito di veicoli ferroviari e da diverse gallerie e cameroni logistici a supporto della realizzazione delle stesse. Le due canne si estendono per circa 55 km interessando quindi un lungo tragitto.

Il lavoro si articolerà in due fasi, prima di tutto una parte introduttiva che descriva la situazione geologica e geotecnica, inquadrando i parametri e definendo il contesto in cui si svilupperà la seconda parte, questa relativa a una vera e propria analisi strutturale realizzata attraverso il programma Midas GTS e al confronto con dati reali.

Qui, introdotto il programma e le sue peculiarità si procederà nella modellizzazione geometrica vera e propria del sistema di gallerie per poi passare alla definizione degli elementi finiti intorno ai quali si costruiranno i presupposti la definizione di uno studio tenso-deformativo degli ammassi rocciosi scavati dalle gallerie.

Per concludere si confronteranno i dati ottenuti con il monitoraggio durante le fasi di scavo con quelli ricavati dalla modellazione, in modo da poter affinare alcuni aspetti modellativi e snellire il processo per renderlo più rapido, economico ed efficiente.

The present Master's thesis work deals with the modeling of a system of galleries within a complex and unique geological situation, known as the Periadriatic fault.

The uniqueness of the context reveals itself as interesting in order to analyze the phenomena of stress and strains due to the work's implementation, which is characterized by two main tubes for railway vehicles transit and several galleries and logistics warehouses supporting their realization. The two tubes extend for about 55 km, affecting so a long way.

The work is divided into two phases, first of all an introduction that describes the geological and geotechnical premises, framing the parameters and defining the context in which the second part will develop, related to a real structural analysis carried out through the program Midas GTS and in comparison with real data.

Once introduced the program and its features, a geometric modeling of the real system of tunnels will be shown, and then the definition of finite elements, around which the basis for the definition of a study on the stress-strain state of rock masses excavated from the tunnels can be built.

In conclusion there will be a comparison of the data obtained by monitoring during excavation and those obtained from modeling, so some methodological aspects can be refined, the most incisive geotechnical parameters understood and it will be possible to streamline the process to make it faster, cheaper and more efficient.

2 INTRODUZIONE

Con il passare degli anni e l'aumento della potenza dei calcolatori a disposizione del grande pubblico proliferano una serie di programmi atti a creare dei modelli esemplificativi della realtà. Essi si differenziano tra loro per il modo in cui cercano di ricreare l'unicità e la complessità di ogni elemento che ci circonda, sia esso naturale o artificiale.

Si avranno quindi codici di calcolo agli elementi finiti, agli elementi distinti e così via. Ognuno dei quali si presta ad affrontare meglio alcune realtà piuttosto che altre

Il problema connesso all'utilizzo di questi programmi è che spesso le competenze possedute da un ingegnere sono molto distanti da quelle necessarie per l'utilizzo in maniera adeguata di questi complessi codici di calcolo e non è sufficiente riuscire a trattare i dati se non si hanno le competenze per produrli.

D'altro canto i rilievi geologici e geotecnici sono molto costosi e per contesti geologici particolari neanche necessariamente precisi e caratterizzanti. Risulta quindi importante che l'ingegnere sia in grado di approcciarsi ai codici di calcolo e di realizzare dei processi operativi che gli permettano attraverso dati di letteratura o qualche prova su terreni o rocce di realizzare modelli concettuali che sintetizzano la realtà caratterizzandola nei suoi aspetti più interessanti da un punto di vista geostrutturale.

In questo elaborato di tesi si approccerà il noto software MIDAS GTS con lo scopo di seguire un cantiere già in funzione, di cui si hanno a disposizione le documentazioni fino al livello di progetto esecutivo e di cui sono noti i risultati di alcune prove geomeccaniche per la caratterizzazione degli ammassi coinvolti dalle operazioni di scavo.

Oltre a queste considerazioni lato modellistico la galleria ferroviaria del Brennero intercetta una delle situazioni geologiche più rare al mondo, cioè lo scontro tra due zolle tettoniche. La faglia prende il nome di faglia Periadriatica e secondo diversi studiosi rappresenta lo scontro tra la placca eurasiatica e la placca adriatica.

Per finire le scelte progettuali per la realizzazione degli scavi sono state innovative e consistono nella realizzazione dei cameroni e dei tunnel logistici all'interno dell'ammasso roccioso stesso, creando delle sollecitazioni più alte rispetto a quelle tipiche di uno scavo di una galleria rendendone quindi interessante lo studio per capire se effettivamente sia un'opzione valida o meno.

Quindi individuato un contesto geologico unico, delle scelte progettuali innovative e la volontà di analizzare entrambi questi aspetti con un codice di calcolo potente e diffuso prende corpo questo elaborato di tesi, che avrà come scopo ultimo l'apprendimento di un metodo, che possa diventare il più ripetibile possibile e che non comporti un eccessivo tempo realizzativo.

3 GALLERIE NATURALI

In questa prima parte si introducono i principali aspetti che riguardano la realizzazione di una galleria naturale in ammasso roccioso. Lo scopo è di offrire un quadro sintetico ma esaustivo di questo tipo di opera e alcuni cenni sulle opere in sotterraneo in generale.

3.1 PREMESSA – OPERE IN SOTTERRANEO

Con il termine opere in sotterraneo si contempla tutta la gamma di realizzazione antropiche che prevedono l'apertura di una cavità nel sottosuolo: tali opere possono essere suddivise in gallerie, caverne e pozzi.

Le gallerie sono infrastrutture civili realizzate nel sottosuolo nel campo dell'ingegneria stradale, ferroviaria, mineraria e idraulica. Alla loro realizzazione si ricorre, generalmente, quando lungo un tracciato si rinvencono rilievi morfologici il cui superamento attraverso opere esterne risulta particolarmente complesso e/o oneroso, oppure quando vi sono preferenze di carattere ambientale e urbanistico allo sviluppo del tracciato in sottosuolo, oppure, ancora, quando il tracciato deve avere un andamento il più possibile rettilineo affinché si possano raggiungere elevate velocità.

E' da sottolineare che, a esclusione delle situazioni in cui la necessità di ricorrere alla realizzazione di opere in sotterraneo risulta particolarmente evidente (per esempio, quando la costruzione di una strada a mezza costa comporta gravose problematiche legate alla stabilità dei versanti), la scelta del transito in sottosuolo avviene solo a seguito di un'attenta analisi dei costi e dei benefici.

Le gallerie vengono suddivise in gallerie naturali e in gallerie artificiali. Nelle prime, le rocce e/o i terreni inglobano completamente la sagoma della galleria appena scavata (scavo a foro cieco)



Figura 3-1 Esempio di galleria naturale, il tunnel si inserisce direttamente nella montagna.

; nelle seconde, invece, la realizzazione della galleria è caratterizzata dal preliminare scavo di una trincea, da una successiva fase di esecuzione delle opere strutturali (scavo a cielo aperto), a cui può far seguito una terza fase di ricopertura completa dell'opera stessa.



Figura 3-2 Esempio di galleria artificiale, si noti l'assenza di copertura

Vi sono inoltre gallerie artificiali che vengono realizzate allo scopo di contrastare l'instabilità di pendii o di proteggere la sede viaria da cadute di detriti o valanghe: in questo caso si sviluppano al piede o sul fianco del versante con andamento trasversale allo stesso e prendono, impropriamente, anche il nome di gallerie parietali. Questo termine, in realtà, andrebbe unicamente riferito a gallerie naturali realizzate all'interno di fianchi vallivi, con coperture estremamente esigue sul paramento di valle e, di conseguenza, con ripartizione dissimmetrica dei carichi.

Le gallerie sia artificiali sia naturali vengono frequentemente scavate anche in area urbana: la loro realizzazione è caratterizzata dalla presenza di problematiche specifiche legate alla natura dei terreni interessati dagli scavi e alle basse coperture in gioco.

Con il termine traforo vengono denominate quelle gallerie che attraversano uno spartiacque generalmente di una certa importanza, mentre con il termine cunicolo (o foro pilota), si intende uno scavo ausiliario, di luce più ridotta rispetto a quella dell'opera principale, avente, in genere, finalità esplorativa o drenante. Questi cunicoli possono inoltre essere utilizzati per eseguire interventi di consolidamento atti a migliorare le caratteristiche geomeccaniche dei materiali interessati dalla galleria principale.

A seconda che la realizzazione della galleria preveda l'apertura di una singola cavità o di due affiancate, la stessa cavità è detta rispettivamente a singola canna o a doppia canna.

Col termine scavo vengono invece contemplate tutte le operazioni connesse con l'asportazione del materiale geologico e la conseguente creazione della cavità. Con rivestimento di prima fase o rivestimento provvisorio sono indicati quegli interventi atti a conferire alla cavità appena aperta condizioni di stabilità a breve termine

Diversamente, con rivestimento di seconda fase o rivestimento definitivo sono indicati quegli interventi atti a conferire alla cavità stabilità a lungo termine.

Prendendo ora in esame le caverne, va precisato che queste sono cavità sotterranee di grandi dimensioni, destinate a ospitare strutture o materiali la cui collocazione esterna può essere all'origine di più o meno rimarchevoli problematiche legate agli aspetti ambientali e/o paesaggistici. Per la loro funzione, le caverne hanno in genere forma più squadrata rispetto alle gallerie: va peraltro precisato che l'approccio geologico e geomeccanico è comunque sostanzialmente analogo per entrambi i tipi di opera.

I pozzi, infine, consistono in scavi circolari o ellittici subverticali di dimensioni assai variabili, ma di norma inferiori a quelle delle gallerie stradali o ferroviarie. I pozzi possono essere realizzati come fondazioni di importanti strutture in presenza di contesti geostrutturali gravosi, oppure possono essere eseguiti per

mettere in comunicazioni con l'esterno gallerie o caverne: è frequente, per esempio, la loro realizzazione nella parte centrale di gallerie particolarmente lunghe per aumentare i fronti di scavo, oppure per favorire lo smaltimento all'esterno dei gas di scarico dei veicoli in transito.

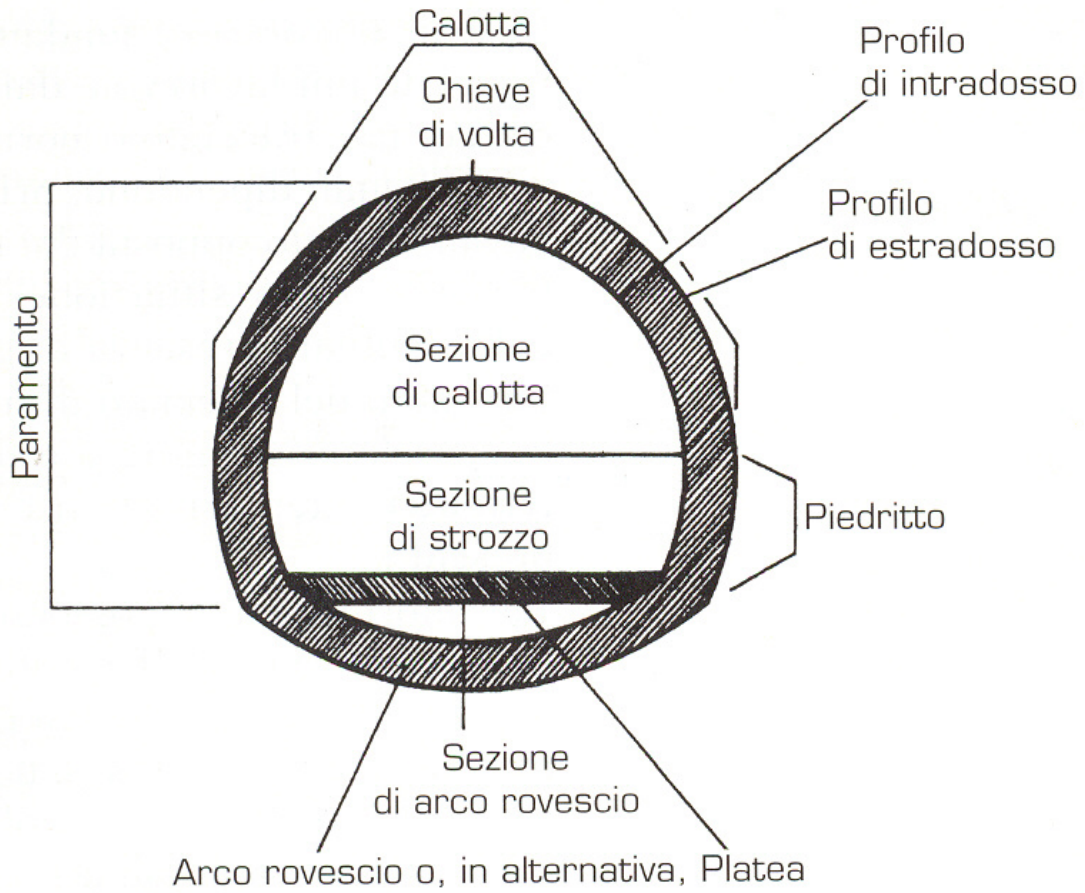


Figura 3-3 Terminologia delle diverse parti di una galleria

3.2 INDAGINI GEOGNOSTICHE PER LA REALIZZAZIONE DI GALLERIE

La caratterizzazione geologica e geomeccanica dei terreni interessati dallo scavo di una galleria riveste un'importanza fondamentale per l'elaborazione di un'adeguata fase progettuale e, conseguentemente, di una costruttiva.

Tale caratterizzazione avviene attraverso particolari indagini geognostiche finalizzate, in primo luogo, a una ottimale scelta del tracciato e, successivamente, a una dettagliata conoscenza del comportamento geologico-tecnico e idrogeologico dei terreni soggetti a escavazione.

L'esito di tali indagini viene sintetizzato in un profilo longitudinale della galleria contenente, in particolare, la suddivisione del tracciato in tratte di scavo a caratteristiche omogenee, suddivisione che viene elaborata secondo criteri che saranno descritti successivamente.

Infine, le previsioni così formulate andranno sottoposte a verifica durante l'esecuzione degli scavi attraverso efficaci controlli in corso d'opera.

3.2.1 Indagini geognostiche finalizzate alla scelta del tracciato

La scelta del tracciato di una galleria, oltre tenere conto delle finalità perseguite attraverso la sua realizzazione, deve necessariamente valutare altri importanti fattori, quali lo sviluppo geometrico del tracciato, gli aspetti ambientali e paesaggistici del territorio e, appunto, le caratteristiche geologiche dello stesso, in molti non si potranno delineare condizioni favorevoli per tutti gli aspetti esaminati: la scelta definitiva del tracciato avverrà, quindi, solo a seguito di un'attenta esamina del rapporto costi su benefici.

L'approfondita conoscenza degli aspetti geologici dell'area in cui è prevista la realizzazione di una galleria è in ogni caso di importanza fondamentale per poter individuare il tracciato più favorevole dal punto di vista tecnico-economico. Per tale tracciato occorre stimare i tempi e i costi realizzativi i quali dipendono, principalmente, dalla resistenza all'avanzamento opposta dai terreni, dalla loro capacità autoportante, della situazione idrogeologica esistente, nonché dall'eventuale presenza di gas o di elevate temperature.

Lo studio di un tracciato di una galleria prevede, quindi, una fase preliminare mirata a definire i rapporti stratigrafici e tettonici intercorrenti tra le varie formazioni geologiche presenti.

Tali informazioni si possono, in prima analisi, ricavare dalla lettura critica degli elementi bibliografici esistenti e dallo studio stereoscopico delle fotografie aeree.

Da questo primo esame si hanno unicamente indicazioni circa le direttrici più favorevoli all'esecuzione della galleria; in corrispondenza di tali direttrici si dovranno quindi effettuare indagini più approfondite, atte a individuare, in modo definitivo, il tracciato geologicamente ottimale.

Tali indagini consistono innanzitutto in un rilevamento geologico alla scala adeguata (1:10.000 – 1:25.000) atto a evidenziare i caratteri litologici, giacitureali e stratigrafici delle varie unità litologiche presenti, unitamente ai principali lineamenti tettonici del territorio. Successivamente, sugli affioramenti rocciosi, devono essere eseguiti dei rilievi geomeccanici di dettaglio finalizzati alla conoscenza dello stato di fratturazione degli ammassi rocciosi e quindi della loro qualità

A tutto ciò fa seguito uno studio geomorfologico dell'area al fine di individuare eventuali dissesti, nonché un dettagliato esame idrogeologico, le cui modalità e finalità vengono descritte nei paragrafi successivi.

Lo studio preliminare si completa valutando gli aspetti sismici e climatici del territorio di interesse. Questa prima fase di studio si sintetizza in una serie di elaborati tecnici, in cui vengono evidenziate le aree critiche in corrispondenza delle quali sono necessari ulteriori indagini geognostiche.

Esse consistono principalmente nell'esecuzione di sondaggi meccanici e di prospezioni geofisiche. Solo dopo aver eseguito tali indagini, si può individuare il tracciato più conveniente, che consiste, in genere, nel miglior compromesso possibile tra lunghezza e caratteristiche dei terreni da attraversare.

Lungo il tracciato prescelto, si costruisce quindi un profilo geoloci-tecnico longitudinale all'asse della galleria che deve riportare informazioni di carattere previsionale riguardanti gli aspetti geostutturali e idrogeologici delle formazioni presumibilmente presenti alla quota della galleria.

Al tempo stesso vanno evidenziate le principali problematiche riscontrabili in fase realizzativa. Una volta terminato lo studio geologico preliminare riguardante la scelta del tracciato, si passa a successive indagini aventi come obiettivo primario quello di conoscere a fondo il comportamento geologico-tecnico del terreno soggetto a escavazione.

3.2.2 Indagini geognostiche per la realizzazione dello scavo di una galleria

La fase conoscitiva oreoedeutica all'esecuzione di una galleria prevede l'impiego di vari mezzi di indagine, il cui tipo e numero funzione dei seguenti fattori:

- Complessità del contesto geologico e geologico strutturale in cui l'opera si sviluppa;
- Lunghezza della galleria;
- Coperture in gioco.

E' evidente, infatti, che la quantità di dati necessari per formulare previsioni geologiche e geomeccaniche sufficientemente attendibili è differente a seconda che si debba realizzare uno scavo di poche centinaia di metri entro un'unica formazione geologica con basse coperture oppure uno scavo di alcuni chilometri all'interno di un rilievo fortemente tettonizzato con coperture dell'ordine del migliaio di metri.

In ogni caso è opportuno sempre differenziare nell'ambito della formulazione di un'adeguata campagna geognostica, le tratte di imbocco della galleria dalla sua tratta centrale

3.2.2.1 Caratterizzazione delle tratte di imbocco

Fatta eccezione per alcuni casi vanno considerare tratte di imbocco quelle tratte di galleria in cui la ridotta copertura in gioco influenza in maniera decisiva l'equilibrio delle pareti di scavo.

La lunghezza di tratti tratte p sestramente variabile, in quando dipende, oltre che dai valori di copertura, anche dalle situazioni geologiche, strutturali, geomorfologiche e idrogeologiche esistenti

Le principali metodologie di indagine da utilizzare per caratterizzare le tratte di imbocco consistono in:

- Rilievo geologico e geomorfologico di superficie
- Esecuzioni di sondaggi meccanici a carotaggio continuo
- Indagine geofisica del tipo sismico a rifrazione

Le indagini sopra esposte sono, in genere, sufficienti per effettuare una previsione attendibile sull'assetto geologico del sottosuolo.

Per caratterizzare, invece, da un punto di vista fisico-meccanico, il materiale interessato dallo scavo, si deve ricorrere a una serie di prove da eseguire sia in sito, generalmente attraverso prove realizzate all'interno dei fori di sondaggio, sia in laboratorio, su campioni prelevati all'interno degli stessi sondaggi.

Le prove geomeccaniche, opportunamente scelte come tipo e numero tenendo conto della natura dei materiali da analizzare e della complessità del contesto geostrutturale esistente, dovranno fornire parametri attendibili riguardo le caratteristiche fisiche, di resistenza, di deformabilità e di permeabilità dei materiali medesimi.

Andranno inoltre eseguite specifiche prove in sito sia per la determinazioni degli stati tensionali esistenti sia per la definizione delle sue caratteristiche idrogeologiche

Non va infine dimenticato che le indagini geognostiche effettuate presso gli imbocchi delle gallerie sono anche finalizzate allo studio inerente la stabilità del versante ospitante l'imbocco stesso.

A tale scopo vanno quindi predisposte apposite strumentazioni per il controllo di eventuali movimenti al fine poi di dimensionare adeguatamente, qualora se ne riscontrasse la necessità, le opere di stabilizzazione del versante.

3.2.2.2 Caratterizzazione delle tratte centrali a bassa copertura

Le problematiche associate a tratte con bassa copertura connesse alla stabilità delle pareti di scavo possono essere trattate similmente a quelle delle tratte di imbocco e di conseguenza investigate con le medesime metodologie.

Vi è comunque una differenza rilevante costituita dal fatto che, nelle tratte a bassa copertura, i pendii sovrastanti non subiscono intagli a seguito degli scavi e pertanto le condizioni di equilibrio del versante non vengono sostanzialmente modificate.

3.2.2.3 Caratterizzazione delle tratte centrali a copertura medio-alta

In queste tratte di galleria, le indagini precedentemente menzionate tendono a perdere gran parte della loro attendibilità o risultano, addirittura, impraticabili.

Con elevate coperture in gioco, infatti, i dati desunti da un rilievo di superficie sono difficilmente estrapolabili alla quota di scavo; per esempio, i sondaggi meccanici, i cui costi e tempi realizzativi crescono notevolmente al crescere della profondità che si vuole raggiungere, forniscono indicazioni puntuali non facilmente correlabili in senso orizzontale. Inoltre anche dati provenienti dalla sismica a rifrazione non sempre sono di immediata interpretazione. Pertanto le indagini conoscitive riferite a queste tratte saranno orientate su altre metodologie, tutte di tipo indiretto: di grande utilità potranno in questo caso rivelarsi la sismica a riflessione e altre tecniche molto specialistiche quali, per esempio, la tomografia sismica e, in presenza di coperture non troppo elevate, la prospezione geoelettrica.

Va inoltre aggiunto che, per queste tratte, rivestono particolare importanza le indagini conoscitive mirate allo studio qualitativo e quantitativo degli stati tensionali esistenti nell'ammasso, in virtù di considerevoli carichi litostatici in gioco.

I parametri gemoccanici indispensabili per delineare lo stato degli equilibri naturali preesistenti nell'ammasso roccioso saranno sostanzialmente gli stessi individuati per le tratte di imbocco.

L'unica differenza consiste nel fatto che tali parametri devono essere per lo più determinati attraverso prove di laboratorio

3.2.3 Indagini idrogeologiche

Nell'ambito delle indagini geognostiche finalizzate alla realizzazione di opere in sotterraneo, l'aspetto idrogeologico merita un discorso a parte, in quanto la presenza d'acqua sotterranea influenza notevolmente la metodologia di scavo e di avanzamento, e il suo reperimento può essere all'origine di varie problematiche, a volte anche gravose.

L'acqua risulta infatti determinante nella redistribuzione degli equilibri della cavità appena aperta: per esempio, in termini sciolti, la sua presenza può provocare una drastica riduzione delle qualità geotecniche, mentre, nelle rocce, le discontinuità beanti costituiscono vie preferenziali per le acque sotterranee, che possono così dar luogo in galleria a venute idriche anche di portata rilevante.

Esistono, inoltre, situazioni geologiche strutturali, non sempre facilmente individuabili dalla superficie, che determinano condizioni idrogeologiche molto pericolose per la costruzione di gallerie: per esempio, ove si ha il brusco passaggio da una formazione impermeabile a una permeabile, si può avere un cospicuo accumulo di acqua, così come in corrispondenza di sinclinali, di alvei sepolti, di faglie, di sovrascorrimenti ecc.

Un'altra situazione estremamente rischiosa, da un punto di vista idrogeologico oltre che tecnico-costruttivo, è la presenza di strutture carsiche alle quali possono essere associate venute idriche anche violente.

Preliminarmente alle operazioni di scavo, andranno allora eseguite specifiche indagini atte a identificare la presenza o meno d'acqua all'interno dell'ammasso roccioso da intercettare. Nel caso si preveda che questa venga reperita durante gli scavi, andrà in primo luogo definita la geometria della falda, che sarà a sua volta funzione della permeabilità dei materiali presenti e del suo grado di alimentazione.

In sostanza prima d'iniziare le lavorazioni di scavo, vanno definiti i seguenti aspetti idrogeologici:

- Caratterizzazione della falda
- Determinazione della permeabilità dei materiali attraversanti e di conseguente stima delle venute d'acqua in galleria
- Interferenza con i punti d'acqua esistenti (sorgenti e/o pozzi)

Per tale approccio conoscitivo devono essere espletate, durante le esecuzioni di sondaggi geognostici, misurazioni del livello di falda integrate da prove di permeabilità in foro. Va quindi allestita una rete piezometrica articolata, sia come numero di punti sia come profondità d'indagine, in base alle caratteristiche geostrutturali e di permeabilità dell'ammasso. Ciò consente un monitoraggio della falda, la cui eventuale escursione sarà influenzata dal regime delle precipitazioni, dall'ampiezza del bacino ecc.

A questo proposito è importante raccogliere dati sulle precipitazioni atmosferiche della zona, in base ai quali, anche a seguito di un accurato studio geomorfologico del territorio, si può stabilire la potenzialità del bacino di alimentazione della falda.

Per quanto riguarda le caratteristiche dell'acquifero, è importante valutare la presenza o meno di falde sospese, così come particolare attenzione va riservata all'eventuale esistenza di falde in pressione o di condotti carsici.

Si rammenta che, oltre alle prospezioni di tipo diretto, per il riconoscimento degli acquiferi nel sottosuolo, risultano particolarmente indicate l'indagine geofisica di tipo elettrico, l'indagine geochimica e quella geologico-strutturale.

Una volta riconosciuta, lungo il tracciato della galleria, la presenza di significativi elementi idrogeologici, vanno formulate previsioni attendibili sul reperimento o meno di acqua durante gli avanzamenti e, eventualmente, va stimata con buona approssimazione l'entità delle venute.

Vanno altresì identificati i punti d'acqua potenzialmente estinguibili o comunque soggetti a una diminuzione della loro portata o del loro livello statico a seguito del naturale effetto drenante indotto dagli scavi.

I pozzi e le sorgenti a rischio devono essere sottoposti a monitoraggio prima, durante e dopo le lavorazioni. Può capitare che, fra gli stessi punti d'acqua, se ne individuino alcuni sottoposti a sfruttamento di carattere potabile, irriguo o commerciale; in tal caso va definita, di volta in volta, nell'ambito di un'analisi costi benefici, la scelta più conveniente fra realizzare, prima dell'inizio degli scavi, un'opera di salvaguardia della risorsa idrica oppure di rischiare la sua estinzione o il suo depauperamento o, ancora, il suo inquinamento a seguito delle lavorazioni di escavazione: in questi ultimi casi vanno preventivamente stimati i costi relativi a eventuali risarcimenti. Si rammenta, infine, l'opportunità di eseguire analisi chimiche e chimico-fisiche delle acque che saranno intercettate, allo scopo di individuare l'eventuale presenza di sostanze aggressive per i calcestruzzi.

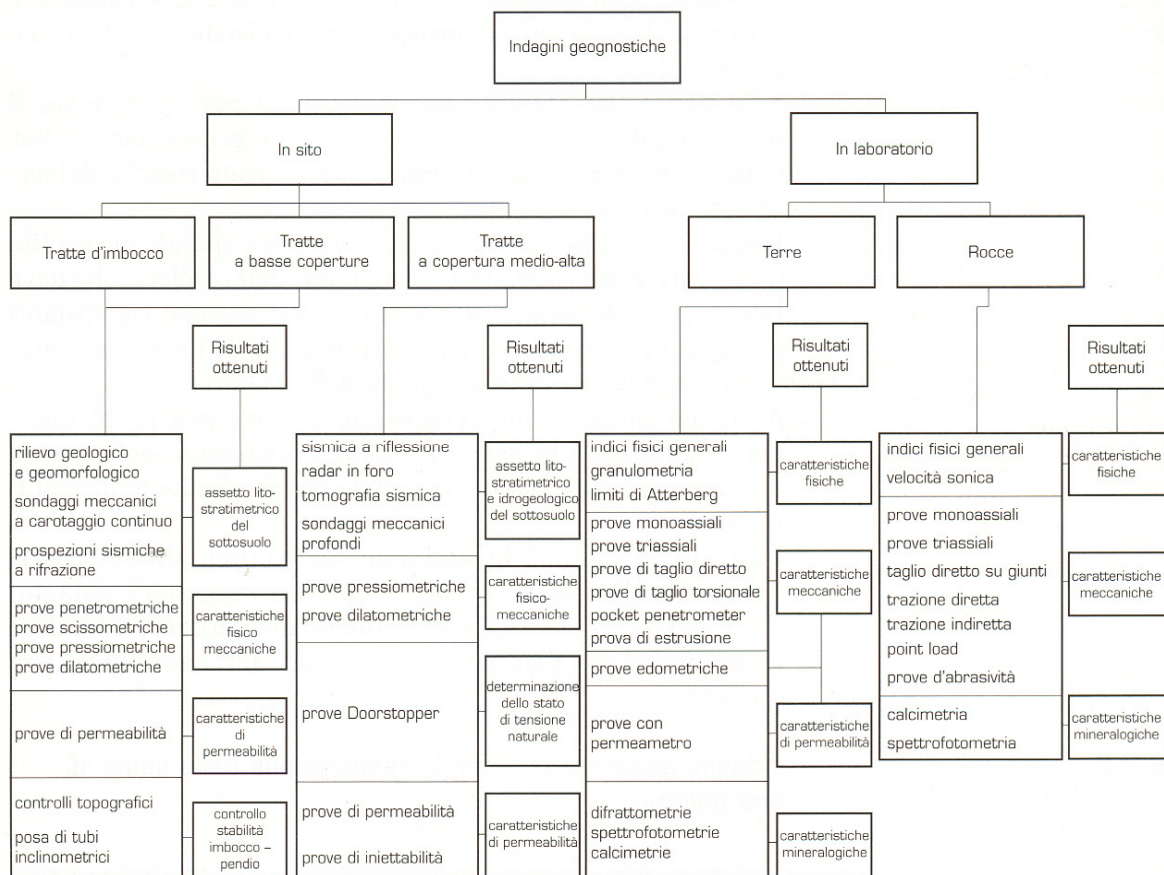


Figura 3-4 Prospetto riassuntivo delle indagini geognostiche per la realizzazione di gallerie

3.3 SOLUZIONI PROGETTUALI

3.3.1 Considerazioni preliminari

Nell'approccio progettuale alla realizzazione di una galleria, occorre innanzitutto operare una sintesi dei risultati emersi dalla campagna geognostica, la quale deve necessariamente produrre informazioni al tempo stesso attendibili e schematiche sulle condizioni geologiche e strutturali prevedibilmente presenti alla quota di scavo. Vi sono, sostanzialmente, due modalità per pervenire a questa sintesi.

La prima consiste in una classificazione geomeccanica tradizionale, la quale pur contemplando, in alcuni casi, anche il comportamento dei materiali a seguito degli scavi, tende soprattutto a catalogare gli ammassi in funzione della loro qualità: quest'ultima viene definita in base a vari elementi geostretturali che sono, per lo più, strettamente legati alle caratteristiche di resistenza dei materiali.

La seconda mira invece a classificare gli ammassi in base al loro presunto comportamento all'apertura della cavità, prevenendo, in particolare, tipologie ed entità degli eventuali fenomeni di instabilità.

In ogni caso, qualunque sia la procedura di classificazione adottata, la previsione formulata consente di suddividere l'intero tracciato della galleria in tratte omogenee. Il risultato finale di questa operazione è l'elaborazione di un profilo geomeccanico di previsione che è di fondamentale importanza per il successivo passo progettuale, e cioè la realizzazione di una sezione di galleria per ciascuna di queste tratte, in cui sono sintetizzati gli interventi da adottare durante lo scavo affinché vengano ripristinate le condizioni di equilibrio della cavità a breve e a lungo termine.

3.3.2 Definizione della qualità degli ammassi

Tutti gli elementi raccolti durante la campagna geognostica vengono utilizzati per valutare la qualità, in termini di caratteristiche geomeccaniche, degli ammassi intercettati dal futuro scavo. A tal fine, nel corso degli anni, sono state messe a punto svariate classificazioni, alcune essenzialmente qualitative e altre basate maggiormente su dati quantitativi. Di seguito si espongono brevemente quelle di:

- Bieniawski o dell'indice RMR
- Barton o dell'indice Q

3.3.2.1 Classificazione di Bieniawski

Tale metodo è applicabile soltanto agli ammassi rocciosi e si sviluppa sullo scheletro di una prima classificazione semiquantitativa prodotta nel 1973. Nel 1976 si giunge a una sua formulazione definitiva e l'autore propone la Classificazione geomeccanica o Rock Mass Rating che si fonda sull'analisi di cinque parametri:

- Resistenza alla compressione, ottenuta tramite prove di compressione monoassiale o Point Load Test;
- RQD, che rappresenta la percentuale di recupero modificato di un sondaggio, ed è dato dal rapporto tra la somma degli spezzoni di carota aventi lunghezza maggiore di 10 cm e la lunghezza totale della carota;
- Spaziatura dei giunti
- Condizione dei giunti, con particolare attenzione alla loro apertura, alla loro rugosità, alla persistenza, al grado di alterazione delle pareti e alla presenza o meno di materiali di riempimento;
- Condizioni idrauliche, espresse come portata degli afflussi idrici in galleria o come rapporto tra la pressione dell'acqua nei giunti e le sollecitazioni naturali in sito, oppure, ancora, in termini di condizioni generali.

Tramite un'apposita tabella viene attribuito a ciascun parametro un valore numerico. La somma dei valori dei cinque parametri fornisce il punteggio di qualità dell'ammasso roccioso.

Parametri	Intervallo di valori							
Resistenza roccia sana	Resistenza al «Point Load test» (MPa)	> 10	4 ÷ 10	2 ÷ 4	1 ÷ 2	Per questi bassi valori è preferibile la prova di compressione monoassiale		
	Resistenza a compressione monoassiale (MPa)	> 250	100 ÷ 250	50 ÷ 100	25 ÷ 50	5 ÷ 25	1 ÷ 5	< 1
Coefficienti numerici		15	12	7	4	2	1	0
Rock Quality Designation RQD (%)		90 ÷ 100	75 ÷ 90	50 ÷ 75	25 ÷ 50	< 25		
Coefficienti numerici		20	17	13	8	3		
Spaziatura delle discontinuità		> 2 m	0,6 ÷ 2 m	200 ÷ 600 mm	60 ÷ 200 mm	< 60 mm		
Coefficienti numerici		20	15	10	8	5		
Condizione dei giunti		Superfici molto rugose. Discontinuità chiuse e non persistenti. Pareti non alterate	Superfici debolmente rugose. Apertura delle discontinuità < 1 mm. Pareti leggermente alterate	Superfici debolmente rugose. Apertura delle discontinuità < 1 mm. Pareti completamente alterate	Superfici lisce o riempimenti argillosi di potenza < 5 mm o discontinuità collegate e con apertura di 1 - 5 mm	Riempimenti di argilla molle di potenza > 5 mm o discontinuità collegate e con apertura > 5 mm, persistenti		
Coefficienti numerici		30	25	20	10	0		
Presenza di acqua	Venute d'acqua in 10 m di galleria (l/min)	Nulla	< 10	10 ÷ 25	25 ÷ 125	> 125		
	Rapporto tra la pressione dell'acqua nelle discontinuità e la massima sollecitazione principale	0	< 0,1	0,1 ÷ 0,2	0,2 ÷ 0,5	> 0,5		
Condizioni generali della roccia		Perfettamente asciutta	Umida	Bagnata	Stillicidi	Venute d'acqua		
Coefficienti numerici		15	10	7	4	0		

Figura 3-5 Parametri della classificazione di Bieniawski e loro coefficienti numerici

Tale numero, variabile da 0 a 100 è tanto più alto quanto migliore è la qualità della roccia. Esso viene poi corretto in base all'orientazione della galleria rispetto a quella dei giunti.

A - Compensazione dei coefficienti numerici in funzione dell'orientamento delle discontinuità						
Direzione e immersione delle discontinuità		Molto favorevole	Favorevole	Indifferente	Sfavorevole	Molto sfavorevole
Coefficienti numerici	Gallerie	0	- 2	- 5	- 10	- 12
	Fondazioni	0	- 2	- 7	- 15	- 25
	Frane	0	- 5	- 25	- 50	- 60

B - Classi di roccia determinate in base alla somma dei coefficienti numerici					
Somma dei coefficienti	100 ÷ 81	80 ÷ 61	60 ÷ 41	40 ÷ 21	< 20
Classe	I	II	III	IV	V
Descrizione della roccia	Ottima	Buona	Mediocre	Scadente	Molto scadente

C - Significato delle classi di roccia					
Classe	I	II	III	IV	V
Tempo medio di autosostentamento	20 anni per aperture di 15 m	1 anno per aperture di 10 m	1 settimana per aperture di 5 m	10 ore per aperture di 2,5 m	30 minuti per aperture di 1 m
Coesione (kPa)	> 400	300 ÷ 400	200 ÷ 300	100 ÷ 200	< 100
Angolo di attrito interno	> 45°	35° ÷ 45°	25° ÷ 35°	15° ÷ 25°	< 15°

Figura 3-6 Compensazione dei coefficienti numerici in funzione dell'orientamento delle discontinuità, classi di roccia e loro significato.

Con il valore così ottenuto è possibile collocare la roccia in una delle 5 classi previste, alle quali viene attribuito anche un campo di valori relativo alla coesione e all'angolo di attrito, oltre a un giudizio sulle difficoltà di scavo e sul tempo di autosostentamento del materiale. Infine per ogni classe, vengono indicate le modalità di avanzamento e il tipo di sostegno provvisorio da adottare: centine, bulloni o spritz beton.

B - Classi di roccia determinate in base alla somma dei coefficienti numerici					
Somma dei coefficienti	100 ÷ 81	80 ÷ 61	60 ÷ 41	40 ÷ 21	< 20
Classe	I	II	III	IV	V
Descrizione della roccia	Ottima	Buona	Mediocre	Scadente	Molto scadente

C - Significato delle classi di roccia					
Classe	I	II	III	IV	V
Tempo medio di autosostentamento	20 anni per aperture di 15 m	1 anno per aperture di 10 m	1 settimana per aperture di 5 m	10 ore per aperture di 2,5 m	30 minuti per aperture di 1 m
Coesione (kPa)	> 400	300 ÷ 400	200 ÷ 300	100 ÷ 200	< 100
Angolo di attrito interno	> 45°	35° ÷ 45°	25° ÷ 35°	15° ÷ 25°	< 15°

Figura 3-7 Classificazione dell'ammasso roccioso secondo Bieniawski

Classe ammasso		V	IV	III	II	I	
RMR		0	20	40	60	80	100
Avanzamento		a sezione parziale			a piena sezione		
		avanzamento con cunicoli e allarghi		avanzamento in calotta			
		0,5 ÷ 1 m dal pririvestimento	a 1 ÷ 1,5 m dal pririvestimento	a 1,5 ÷ 3 m dal pririvestimento	a 1 ÷ 11,5 m dal pririvestimento	a 3 m dal pririvestimento	
sostegni provvisori	Bulloni	Lunghezza 5 ÷ 6 m disposti regolarmente con spaziatura 1 ÷ 1,5 m in calotta e sui pedritti, con rete metallica. Bulloni in arco rovescio	Lunghezza 4 ÷ 5 m disposti regolarmente con spaziatura 1-1,5 m in calotta e sui pedritti, con rete metallica	Lunghezza 4 m disposti regolarmente con spaziatura 1,5 ÷ 2 m in calotta e sui pedritti, con rete metallica in calotta	Localmente in calotta, lunghezza 3 m, spaziatura 2,5 m, collegati eventualmente da rete metallica	Non è richiesto rivestimento a eccezione di qualche bullone isolato	
	Calcestruzzo proiettato	150 ÷ 200 mm in calotta, 150 mm sulle pareti e 50 mm sul fronte di scavo.	100 ÷ 150 mm in calotta, 100 mm sui pedritti	50 ÷ 100 mm in calotta, 30 mm sui pedritti	50 mm di spessore in calotta		
	Centine	Profilati pesanti in acciaio inossidabile a distanza di 0,75 m; traverse in arco rovescio	Profilati leggeri a distanza di 1,5 m se necessari	Non necessarie	Non necessarie		

Figura 3-8 Modalità di avanzamento e armature in funzione delle cinque classi previste dal RMR

3.3.2.2 Classificazione di Barton

Tale metodo è basato sulla definizione dell'indice di qualità Q (Rock Mass Quality), che si ricava dalla seguente relazione:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

Dove:

- RQD è la percentuale di recupero modificata di un sondaggio. Esistono relazioni empiriche che permettono di correlare l'RQD con il numero di discontinuità per unità di volume o con la frequenza delle discontinuità stesse.
- J_n indica il numero di famiglie di giunti
- J_r rappresenta la scabrezza delle superfici dei giunti distinguendo tra pareti a contatto e non. Se sono presenti più famiglie di discontinuità con valori diversi, si considera il valore inferiore, in quanto si fa sempre riferimento alle condizioni dell'ammasso più sfavorevoli alla stabilità.
- J_a si riferisce all'alterazione e al riempimento dei giunti, distinguendo sempre tra pareti a contatto e non. Se sono presenti più famiglie di giunti si considera, anche in questo caso, il valore che rappresenta la condizione peggiore cioè il valore più elevato.
- J_w è un fattore di riduzione legato alla presenza di acqua nei giunti.
- SRF è un fattore di riduzione che tiene conto delle sollecitazioni tensionali presenti all'interno dell'ammasso. Si possono avere quattro principali situazioni.

Definizione	RQD %		Note
1 - Molto basso	0 ÷ 25	a)	Se $RQD \leq 10\%$, per il calcolo di Q si assume valore nominale 10
2 - Basso	25 ÷ 50		
3 - Medio	50 ÷ 75		
4 - Buono	75 ÷ 90	b)	È sufficientemente preciso assumere variazioni di RQD per intervalli di 5 unità
5 - Eccellente	90 ÷ 100		

Definizione	J_n	Note
1 - R. massiccia, nessuna o rade discontinuità	0,5 ÷ 1,0	a) Per le zone di intersezione di due gallerie usare $3 \cdot J_n$.
2 - Un sistema di discontinuità	2	
3 - Un sistema di discontinuità, più altre casuali	3	
4 - Due sistemi di discontinuità	4	
5 - Due sistemi di discontinuità, più altre casuali	6	
6 - Tre sistemi di discontinuità	9	
7 - Tre sistemi di discontinuità, più altre casuali	12	b) Per gli imbocchi usare $2 \cdot J_n$
8 - Quattro o più sistemi di discontinuità	15	
9 - Roccia frantumata, quasi incoerente	20	

Definizione	J_r	Note
1 - Discontinuità brevi	4	a) Aumentare J_r di 1 se la spaziatura fra le disc. del sistema principale è > 3 m
2 - Discontinuità scabre o irregolari, ondulate	3	
3 - Discontinuità lisce e ondulate	2	
4 - Discontinuità levigate e ondulate	1,5	
5 - Discontinuità scabre o irregolari, piane	1,5	
6 - Discontinuità lisce o piane	1,0	
7 - Discontinuità levigate e piane	1,0	
8 - Zone milonitizzate o fratturate contenenti minerali argillosi di riempimento	0,5	

Figura 3-9 Parametri RQD, J_n e J_r

	J_a	ϕ_e [°]
A Pareti discontinuità a contatto		
1 - Discontinuità serrate, impermeabili ev. riempite da materiale non plasticizzabile	0,75	
2 - Discontinuità con bordi non alterati	1,0	25° ÷ 35°
3 - Discontinuità con bordi leggermente alterati. Materiale di riempimento sabbioso, non plastico (senza argilla)	2,0	25° ÷ 30°
4 - Discontinuità con materiale di riempimento sabbioso o silteso, con poca frazione argillosa (non plasticizzabile)	3,0	20° ÷ 25°
5 - Discontinuità con riempimento parziale di materiale a comportamento plastico, con potenza < 1-2 mm (miche, talco, gesso, grafite, argilla etc.)	4,0	8° ÷ 16°
B - Pareti discontinuità a contatto con scorrimento di taglio < 10 cm		
6 - Discontinuità con materiale di riempimento sabbioso (roccia disgregata senza argilla)	4,0	25° ÷ 30°
7 - Discontinuità con riempimento continuo di argille non plastiche, fortemente sovraconsolidate, di pot. < 5mm	6,0	16° ÷ 24°
8 - Discontinuità con riempimento continuo di argille plastiche, mediamente o poco sovraconsolidate, di potenza < 5mm	8,0	12° ÷ 16°
9 - Discontinuità con riempimento continuo di argilla rigonfiante di potenza < 5mm	8,0 ÷ 12,0	6° ÷ 12°
C - Pareti discontinuità non a contatto		
10 - Fasce di roccia frantumata con presenza di argilla (Le tre classi dipendono dal tipo di argilla come in 7, 8, 9)	6,8 o 8 ÷ 12	6° ÷ 24°
11 - Fasce di roccia ridotta a un silt o a una sabbia argillosa (con poca argilla non plastica)	5,0	6° ÷ 24°
12 - Sottili ma continue fasce argillose (le tre classi dipendono dal tipo di argilla come in 7, 8 e 9)		6° ÷ 24°
	10,13 o 13,0 ÷ 20,0	

a) Le definizioni date alla voci A, B C si riferiscono all'entrata in contatto delle due superfici di frattura durante l'esecuzione della prova di resistenza al taglio.

b) I valori di ϕ_e (approssimati) fanno riferimento alle proprietà dei prodotti di alterazione, se presenti.

c) Il valore di J_a indicato al punto 9 dipende dalla % della frazione argillosa rigonfiante e dalla presenza d'acqua.

Figura 3-10 Parametro J_a

Definizione	J_w	Pressione acqua [MPa]
1 - Acqua assente o scarsa (localm. venute < 5 l/min)	1,0	0,1
2 - Venute d'acqua limitate o a media pressione, con occasionale dilavamento dei materiali di riempimento delle discontinuità	0,66	0,1 - 0,25
3 - Venute d'acqua forti o ad alta pressione in roccia coerente con discontinuità aperte	0,5	0,25 - 1
4 - Venute d'acqua forti o ad alta pressione, con notevole dilavamento del materiale di riempimento delle discontinuità	0,33	0,25 - 1
5 - Venute d'acqua eccezionalmente forti o ad altissima pressione dopo le volate, ma decrescenti nel tempo	0,2 - 0,1	> 1
6 - Venute d'acqua eccezionalmente forti o ad altissima pressione, senza apprezzabile diminuzione nel tempo	0,1 - 0,005	> 1

a) Aumentare J_w ai punti 3, 4, 5, 6 nel caso di esecuzione di opere di drenaggio.

b) Non viene qui tenuto conto dei particolari problemi che potrebbero essere causati dalla formazione di ghiaccio.

Figura 3-11 Parametro J_w

Definizione			SRF
A - Zone di roccia debole, in cui potrebbe verificarsi il distacco di massi in calotta durante lo scavo			
1-	Ripetute alternanze di zone deboli con argilla o roccia disgregata e alterata con roccia circostante molto allentata (a qualunque profondità di scavo)		10,0
2 -	Singole zone deboli con argilla o roccia disgregata o alterata; profondità di scavo ≤ 50 m		5,0
3 -	Come al punto 2 ma con profondità di scavo > 50 m		2,5
4 -	Ripetute alternanze di zone fratturate in roccia coerente (senza argilla), con rilassamento della roccia circostante (a qualunque profondità)		7,5
5 -	Singole zone di frattura in roccia coerente (senza argilla); profondità di scavo ≤ 50 m		5,0
6 -	Come al punto 5, ma con profondità di scavo > 50 m		2,5
7 -	Intersezioni di discontinuità aperte e di notevoli dimensioni. Roccia intensamente fratturata a qualunque profondità		5,0
B - Roccia coerente, con problemi dovuti a tensioni residue			
		σ_c/σ_1	σ_t/σ_1
8 -	Deboli sollecitazioni, vicino alla superficie	> 200 %	> 13 %
9 -	Sollecitazioni medie	200 - 10 %	13 - 0,66 %
10 -	Sollecitazioni elevate, strutture molto serrate	10 - 5 %	0,66 - 0,33 %
11 -	Lievi colpi di tensione (rocce massicce)	5 - 2,5 %	0,33 - 0,16 %
12 -	Forti colpi di tensione (rocce massicce)	$< 2,5$ %	$< 0,16$ %
C - Rocce spingenti; fenomeni di plasticizzazione di rocce non coerenti sotto l'azione di forti pressioni			
13 -	Lievi pressioni della roccia spingente		5 - 10
14 -	Forti pressioni della roccia spingente		10 - 20
D - Rocce spingenti; effetto spingente per rigonfiamento dovuto a presenza d'acqua			
15 -	Lievi pressioni della roccia rigonfiante		5 - 10
16 -	Forti pressioni della roccia rigonfiante		10 - 20

Figura 3-12 Parametro SRF

Relativamente a questa classificazione, si può osservare che il primo prodotto della relazione esprime il volume unitario, il secondo dà indicazioni sulla resistenza allo scorrimento lungo i giunti e l'ultimo è relativo alla pressione attiva a cui è soggetto l'ammasso roccioso.

Ottenuto il valore Q, si determina quindi l'appartenenza a una delle classi di roccia distribuite lungo una scala logaritmica. Mediante tale classificazione è inoltre possibile valutare la necessità o meno di predisporre interventi di sostegno durante le lavorazioni di scavo; a tal scopo, va innanzitutto definita la

dimensione equivalente, data dal rapporto tra il diametro della cavità e un fattore di sicurezza ESR che dipende dal tipo di galleria. In tal modo è infatti possibile entrare in un grafico avente, in ascissa, Q e, in ordinata, la dimensione equivalente, mediante il quale si evidenzia, appunto, la necessità o meno di applicare interventi di sostegno durante le lavorazioni.

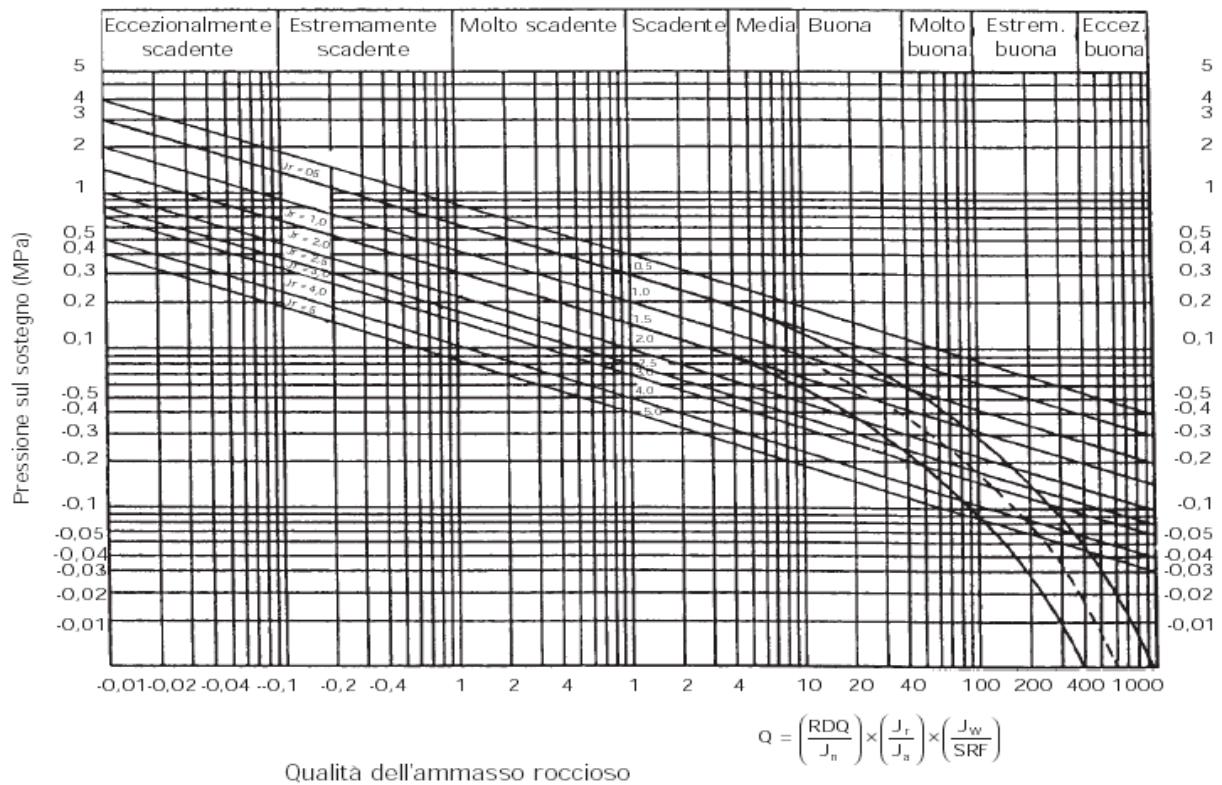


Figura 3-13 Parametro Q e qualità della roccia

Tipo di cavità	ESR
1 - Scavi di miniere (temporanei)	3 - 5
2 - Pozzi verticali: a sezione circolare	2,5
a sezione rettangolare o quadrata	2,0
3 - Gallerie di miniera (permanenti), gallerie idrauliche non in pressione, cunicoli di esplorazione	1,6
4 - Caverne-serbatoio, gallerie stradali e ferroviarie di piccole dimensioni, camere di compensazione (idroel.), finestre	1,3
5 - Centrali in caverna (idroel.); gallerie stradali e ferroviarie di grandi dimensioni, rifugi sotterranei, portali di imbocco, punti di intersezione di più gallerie	1,0
6 - Centrali nucleari in caverna, stazioni ferroviarie (metropolitane), impianti sportivi in sottoterraneo	0,8

Figura 3-14 Valori del coefficiente ESR (Excavation Support Ratio) in funzione del tipo di cavità sotterranea

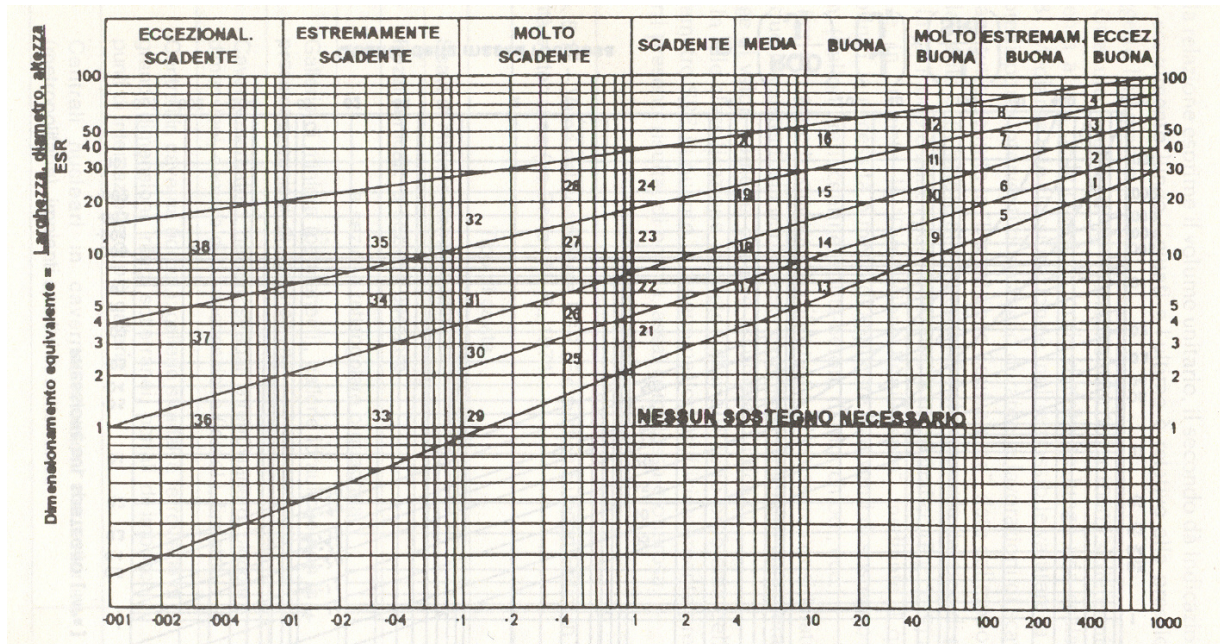


Figura 3-15 Relazione fra Q e dimensione equivalente

Per vari aspetti, questa classificazione può essere considerata la più completa tra quelle esistenti sia per la vasta gamma di parametri considerati, sia per l'esteso range di valori numeri che può assumere l'indice Q.

In tale classificazione sussiste tuttavia il serio problema della valutazione del parametro SRF, in quanto la determinazione sufficientemente precisa del campo di sforzi presenti risulta, di norma, assai complessa e onerosa.

Studi successivi hanno permesso di evidenziare una correlazione tra il RMR e il parametro Q, in questo modo analizzando ciascuno dei due singolarmente è possibile minimizzare gli errori nel loro confronto.

3.3.2.3 Classificazione di Hoek – Brown

Il criterio empirico di Hoek-Brown è basato sostanzialmente sulle tensioni principali a rottura; tale principio prende avvio dal concetto che la rottura in un ammasso roccioso sia controllata dallo spostamento e dalla rotazione di singoli blocchi di roccia, separati da numerose fratture, aventi un assetto caotico e quindi senza orientamento preferenziale di scorrimento, così che l'ammasso possa essere considerato come isotropo. L'equazione sviluppata risulta:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2}$$

dove σ_1 e σ_3 sono le tensioni principali maggiore e minore a rottura e σ_c la resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta. Le costanti m ed s sono costanti empiriche dimensionali della roccia non aventi preciso significato fisico ma legate al suo assetto geologico e strutturale. Per una roccia intatta s assume il valore di **1** mentre m è variabile con l'assetto tessiturale e la natura della roccia.

Così come per il criterio di Mohr-Coulomb, il criterio di Hoek-Brown può essere rappresentato in un grafico in coordinate cartesiane, ponendo σ_1 sull'asse delle ordinate e σ_3 sull'asse delle ascisse (Fig. 3.16). Il criterio può anche essere visualizzato su un cerchio di Mohr (Fig. 3.17).

A partire dagli anni '80 il criterio di Hoek-Brown ha subito una serie di modifiche:

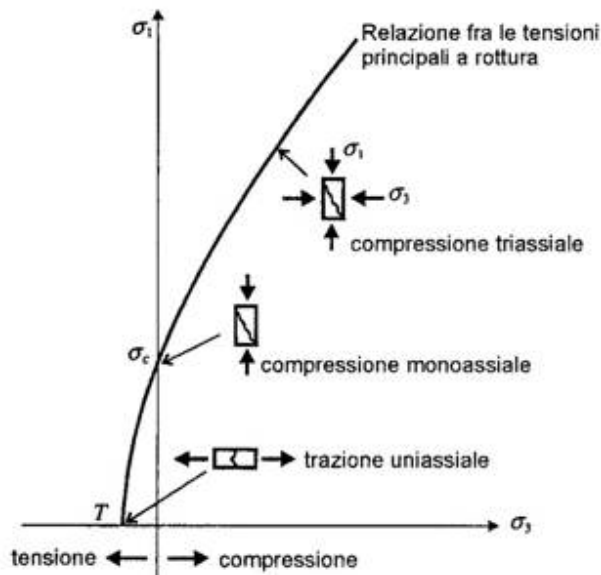


Figura 3-16 Involuppo di rottura secondo Hoek - Brown

- nell'83, per poter derivare i valori di m e di s del criterio di Coulomb, allora utilizzati per la totalità dei codici di calcolo esistenti, veniva stabilita una relazione fra i parametri m e s ed i parametri e e σ_c ;
- nell'88 il criterio aveva preso un notevole piede in ambito ingegneristico e ci si era rapidamente resi conto che lo stesso, sviluppato per opere in sotterraneo, dava risultati ottimistici se applicato a scarpate; veniva allora introdotto il concetto di ammasso indisturbato, applicabile alle opere in sotterraneo, e di ammasso disturbato, applicabile ad ammassi rocciosi prossimi alla superficie;
- nel '92 il criterio veniva ulteriormente modificato data la sua scarsa applicabilità ad ammassi molto fratturati, introducendo un ulteriore parametro a che forniva il mezzo di modificare la curvatura dell'involuppo di rottura, particolarmente nel campo delle basse tensioni normali, imponendo una resistenza a trazione nulla;
- tra il '94 e il '95 ci si rese conto che il criterio modificato era troppo conservativo quando applicato ad ammassi di buona qualità e veniva quindi introdotto un criterio generalizzato che includeva sia il criterio originale che quello modificato con un passaggio dall'uno all'altro funzione di un valore di **RMR** della classificazione di Bieniawski pari a 25; nel contempo veniva introdotto il concetto il *Geological Strength Index (GSI)* da usare in alternativa al sistema **RMR** e basato non come questo su un tabellario di numeri bensì su poche, fondamentali osservazioni di carattere più prettamente geologico, abbandonando la differenziazione fra ammasso indisturbato ed ammasso disturbato e lasciando all'utente la scelta del valore di **GSI** che meglio rappresentante le condizioni della roccia in affioramento;

- nel '97 veniva pubblicato un articolo che rielaborava in forma unica tutte le modifiche apportate precedentemente ed introduceva una metodologia per stimare i parametri di Mohr-Coulomb equivalenti;
- nel '98 il concetto del **GSI** veniva esteso alle rocce di qualità estremamente scadente, quali gli scisti incontrati nello scavo della metropolitana di Atene e le filladi incontrate in una serie di gallerie in Venezuela;
- nel 2000 e 2001 venivano prese in conto per la prima volta in maniera dettagliata le cosiddette formazioni complesse deboli ed eterogenee, quali i flysch.

Nel 2002 è infine stata esposta la revisione del criterio di Hoek-Brown che propone una soluzione esatta per calcolare la resistenza di coesione e l'angolo d'attrito, differenziando fra i campi tensionali propri di gallerie e di scarpate, introducendo il concetto di disturbo per tener conto della diminuzione di resistenza dovuta al rilascio delle tensioni e agli effetti di danno dell'uso di esplosivo nelle gallerie, nella stabilità dei versanti e nelle fondazioni in roccia.

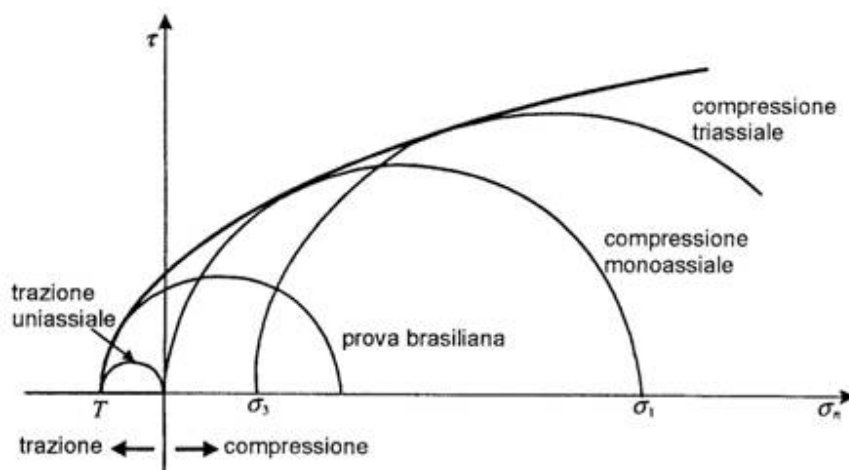


Figura 3-17 Criterio di Hoek - Brown rappresentato su un cerchio di Mohr

3.3.2.3.1 Il criterio di Hoek-Brown nella formulazione ultima

L'attuale edizione del criterio di Hoek-Brown è espressa dalla seguente equazione:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \sigma_c (m_b \sigma_3 / \sigma_c + s)^a$$

dove m_b è il valore ridotto del parametro m_i proprio della roccia intatta, definito dalla relazione:

$$m_b = m_i \exp [(GSI-100)/(28-14D)]$$

σ_c è il valore delle resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta mentre s e a sono costanti dell'ammasso roccioso date dalle espressioni:

$$s = \exp [(GSI-100)/(9-3D)]$$

$$a = \frac{1}{2} + (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})/6$$

D è un fattore numerico che tiene conto del grado di disturbo subito dall'ammasso a seguito di uno scavo, variabile tra **0**, per ammassi non disturbati, a **1** per ammassi fortemente disturbati.

I valori tipici di **D** riscontrati da casi reali sono illustrati in Fig. 3.18:

APPLICAZIONE	CONDIZIONI DELL'AMMASSO	D
Gallerie	Scavo con esplosivo con microritardi o scavo con TBM	0
Gallerie	Scavo meccanizzato in ammassi di scarsa qualità senza uso di esplosivo	0
Gallerie	Idem in presenza di rocce spingenti o rigonfianti	0.5
Gallerie	Utilizzo di esplosivo non controllato in rocce competenti	0.8
Versanti	Taglio di scarpate per opere di ingegneria civile (ad esempio strade, imposte di dighe) con uso di esplosivo con cariche controllate	0.7
Versanti	Taglio di scarpate per opere di ingegneria civile (ad esempio strade, imposte di dighe) con uso di esplosivo con cariche non controllate o con uso di scavo meccanizzato	1.0
Versanti	Cave o lavori minerari a cielo aperto con coltivazione con uso di esplosivo	1.0
Versanti	Cave o lavori minerari a cielo aperto con coltivazione a scavo meccanizzato	0.7 per altezze fino a 50 m 1.0 per altezze superiori
Versanti	Scarpate naturali non disturbate da faglie o zone di taglio	0

Figura 3-18 Valori tipici del fattore D nell'equazione di Hoek-Brown

E' da notare inoltre che, nel caso di coltivazione di cave o miniere a cielo aperto di grande profondità (> 100 m), una serie di analisi a ritroso eseguite su scarpate in cui si sono verificati fenomeni di rottura a grande scala inducono a ritenere più appropriato utilizzare per il valore di **s** l'espressione:

$$s = \exp [(GSI-100)/(4.9 \pm 0.9)]$$

Ponendo $\sigma_3 = 0$ si deriva la resistenza a compressione monoassiale:

$$\sigma_{cm} = \sigma_c s^a$$

e la resistenza a trazione:

$$\sigma_t = \sigma_c s / m_b$$

Applicando un'approssimazione lineare all'involuppo di rottura curvilineo proprio del criterio di Hoek-Brown nel campo della tensione principale minore definito da $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_{3max}$ si possono ricavare i parametri di Mohr-Coulomb bilanciando le aree sopra e sotto la retta di Mohr-Coulomb e applicando le relazioni:

$$\phi = \text{sen}^{-1} \left[\frac{6 a m_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{2 (1 + a)(2 + a) + 6 a m_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}} \right]$$

$$c = \frac{\sigma_c [(1+2 a)s + (1 - a) \sigma_{3n}] (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{(1 + a)(2 + a) \sqrt{1 + (6 a m_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}) / ((1 + a)(2 + a))}}$$

dove:

$$\sigma_{3n} = \sigma_{3max}/\sigma_c$$

Il limite superiore della tensione di confinamento σ_{3max} va determinato caso per caso in funzione del problema da analizzare. Se l'applicazione è relativa alla stabilità di versanti si utilizza la relazione:

$$\sigma_{3max} = \sigma_{cg} \mathbf{0.72} (\sigma_{cg}/\gamma H)^{-0.91}$$

dove γ è la densità della roccia e H l'altezza della scarpata, mentre per le opere in sotterraneo si utilizza la relazione:

$$\sigma_{3max} = \sigma_{cg} \mathbf{0.47} (\sigma_{cg}/\gamma H)^{-0.94}$$

in cui H è la profondità dell'opera dal piano campagna (altezza di copertura).

Se nel campo tensionale al contorno della galleria domina la tensione orizzontale su quella verticale si dovrà usare quest'ultimo valore al posto di γH .

Nelle equazioni sopra riportate, il valore di σ_{cg} si riferisce alla resistenza globale dell'ammasso, calcolabile dalla relazione:

$$\sigma_{cg} = \frac{m_b + 4s - a(m_b - 8s) \left(\frac{m_b}{4} + s \right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \sigma_{ci}$$

Dall'esame delle equazioni riportate risulta evidente che i parametri fondamentali che entrano in gioco nella determinazione dell'involuppo di rottura secondo il criterio di Hoek-Brown sono, oltre allo stato tensionale, la resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta σ_c , sulla cui determinazione si è discusso nel paragrafo precedente, il valore di *Geological Strength Index (GSI)*, che si discuterà più oltre, e la costante m , il cui valore è riferito ugualmente alla roccia intatta.

Tale valore può essere ricavato da prove triassiali eseguite con la cella di Hoek in cui si misura, come in qualsiasi prova triassiale, la resistenza di picco a rottura (σ_1) al variare della pressione di confinamento (σ_3).

Per l'interpretazione della prova si ricorre generalmente al metodo dei minimi quadrati ricavando dalla retta interpolante l'intercetta sull'asse delle ordinate e la pendenza della prova.

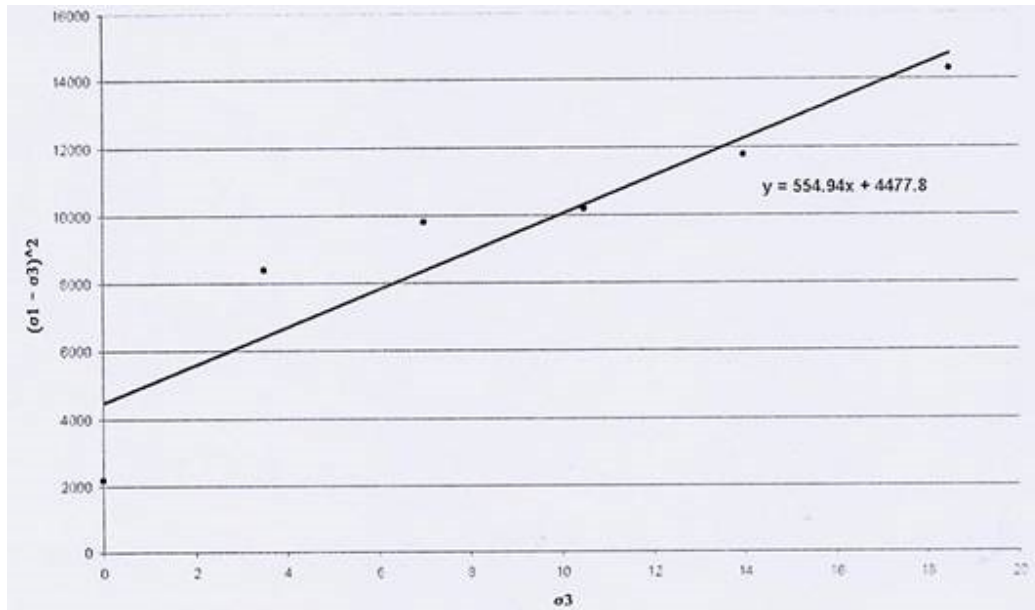


Figura 3-19 Applicazione del metodo dei minimi quadrati ad una prova triassiale in cella di Hoek

Ponendo in grafico la σ_3 (ascissa) con la $(\sigma_1 - \sigma_3)^2$ (ordinata) si ricava la retta interpolante (Fig. 3.19) da cui $\sigma_c = \text{Vintercetta} = 66.9 \text{ MPa}$ e $m_i = \text{pendenza}/\sigma_c = 8.3$

Per una conferma della validità della prova eseguita, si noti che provini triassiali di alta qualità danno generalmente un coefficiente di correlazione della retta interpolante $r^2 > 0.9$.

3.3.2.3.2 Il valore di m

Come suggerito da Hoek non è necessario eseguire un'estesa campagna di prove per definire le proprietà intrinseche della roccia, ma in genere ne sono sufficienti un numero limitato (da 5 a 7).

ROCCE SEDIMENTARIE			ROCCE IGNEE			ROCCE METAMORFICHE		
Roccia	m_i	\pm	Roccia	m_i	\pm	Roccia	m_i	\pm
Conglomerato	21	3	Granito	32	3	Marmo	9	3
Arenaria	17	4	Granodiorite	29	3	Cornubianite	19	4
Siltite	7	2	Diorite	25	5	Metaquarzite	20	3
Argillite	4	2	Gabbro	27	3	Quarzite	20	3
Argilloscisto	6	2	Norite	20	5	Migmatite	29	3
Chalk	7	2	Dolerite	16	5	Anfibolite	26	6
Breccia	20	2	Riolite	25	5	Gneiss	28	5
Calcare cristallino	12	3	Dacite	25	3	Scisti argillosi	7	4
Calcare sparitico	10	5	Peridotite	25	5	Scisti	10	3
Calcare micritico	8	3	Porfirite	20	5	Filladi	7	3
Dolomia	9	3	Andesite	25	5			
Marna	7	2	Basalto	25	5			
Gesso	10	2	Diabase	15	5			
Anidride	12	2	Ossidiana	19	3			

Figura 3-20 Valori di m

In mancanza di prove triassiali, fra l'altro di non facile esecuzione, è possibile e comunemente accettato fare riferimento a valori di m_i , tabulati da Hoek in funzione della litologia della roccia.

I valori indicati nelle Fig. 3.20 e 3.21 sono il valore medio ed il campo di variabilità (deviazione standard) suggeriti da Hoek *et al.*

LITOTIPO	m_i (Hoek)	m_i (MEDIO MISURATO)
Granito	32 ± 3	25,3 ± 9
Calcarea	12 ± 3	11,2 ± 9
Dolomia	9 ± 3	11,4 ± 4
Arenaria	17 ± 4	16,0 ± 9
Marmo	9 ± 3	8,0 ± 3
Quarzite	20 ± 3	18,2 ± 7
Calcarea cristallino	12 ± 3	9,5
Calcarea cristallino	12 ± 3	16,5
Calcarea micritico	8 ± 3	14,0
Calcarea brecciato	20 ± 2	15,8
Arenaria	17 ± 4	10,4
Arenaria	17 ± 4	18,2
Arenaria	17 ± 4	14,7
Arenaria	17 ± 4	8,3
Marmo	9 ± 3	10,8
Marmo	9 ± 3	10,4
Argilloscisto	6 ± 2	7,5
Argilloscisto	6 ± 2	5,5
Scisto	10 ± 3	14,0

Figura 3-21 Valori di m_i

Il grado di attendibilità dei valori indicati è stato discusso da vari autori, che indicano anche campi più ampi, pur essendo sostanzialmente concordi sul valore medio.

Come metodologia di lavoro risulta quindi, in caso di utilizzo del valore di m_i dalle tavole e in mancanza di prove triassiali specifiche, più indicato calcolare la risposta dell'ammasso non solo con il valore medio, ma estendere l'analisi includendo anche (almeno) i valori minimi e massimi ad indicare un campo di valori probabilistico e non deterministico.

3.3.2.4 Classificazione GSI

Il concetto, sviluppato da Hoek, alla base del **GSI** (*Geological Strength Index*) è molto semplice: combinare l'assetto strutturale dell'ammasso con le caratteristiche delle discontinuità che lo separano per giungere ad un valore indice che permetta il suo utilizzo per una valutazione accurata della resistenza e della deformabilità di un ammasso roccioso.

A tale scopo l'indice **GSI** è usato in stretta congiunzione con il criterio di rottura di Hoek-Brown.

Tale parametro, nella forma più recente, vede la sua valutazione affidata all'utilizzo di un semplice grafico (Fig. 3.22) dove le caratteristiche strutturali dell'ammasso in termini di grado di fratturazione e disturbo tettonico sono correlate con le caratteristiche della superficie delle discontinuità in termini di rugosità, alterazione e riempimento della frattura.

Tale correlazione permette di assegnare il valore del **GSI**.

Se, ad es., l'ammasso si presentasse molto fratturato con 4 famiglie di giunto dominanti e gli stessi giunti fossero mediamente rugosi, con **JRC** 8÷12, non o debolmente alterati e sostanzialmente poco aperti senza riempimento, il valore di GSI varierebbe entro 50÷60. mentre scenderebbe a 40÷50 se i giunti fossero lisci (**JRC** 4÷6).

La metodologia per restringere il campo di variabilità è materia soggettiva, sebbene Hoek consigli esplicitamente di non utilizzare mai valori univoci ma d'indicare piuttosto un campo di valori in cui collocare **GSI**.

L'assunzione di base del sistema, estendibile anche ad altri sistemi di classificazione quali **Q**, **RMR** etc. è che l'ammasso si comporti in maniera isotropa.

Tale comportamento, cioè, viene ad essere controllato dai movimenti e dalla rotazione degli elementi di roccia separati fra loro dalle caratteristiche strutturali che riflettono la storia geologica subita dall'ammasso, quali piani di stratificazione e fratture ausiliarie, e quindi non vi è una direzione preferenziale di rottura.

Laddove l'ammasso si presenta poco fratturato con piani di stratificazione persistenti, levigati, aperti e con eventuale riempimento argilloso, tali piani costituiscono dei piani di debolezza e controllano in effetti il comportamento che diventa fortemente anisotropico.

In questi casi, il modo di rottura predominante sarà di scivolamento lungo tali piani o di dislocazione di cunei di roccia o di cadute gravitazionali di blocchi, dovute all'intersezione dei piani con gli altri sistemi fratturativi minori presenti nell'ammasso.

E' altresì opportuno notare come le caratteristiche petrografiche di qualsiasi roccia possano portare all'eliminazione automatica di alcune delle combinazioni esistenti nel grafico di GSI e quindi nella sua determinazione deve essere ben preciso anche l'aspetto puramente geologico.

In un ambiente geologico caratterizzato da piegamenti, di conseguenza, la valutazione legata alla struttura non può mai essere diversa da *piegata*, così come un calcare non può presentare una valutazione legata alle discontinuità peggiore di *mediocri* ed un argilloscisto migliori di *scadenti*.

Per facilitare l'utilizzo della carta generale, Marinos & Hoek propongono delle carte per i vari tipi di rocce più facilmente riscontrabili in natura ed in cui è indicato il più probabile campo di appartenenza del valore di **GSI**. Tali carte (ripresi dalla pubblicazione) sono illustrate di seguito.

Calcari

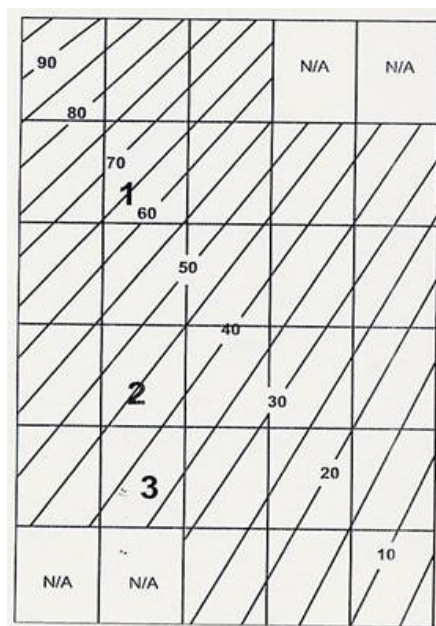


Figura 3-23 Valori tipici di GSI per rocce calcaree

I campi più probabili indicati con il numero sono:

1 Calcari massivi; **2** Calcari fittamente stratificati; **3** Calcari brecciati.

Arenarie

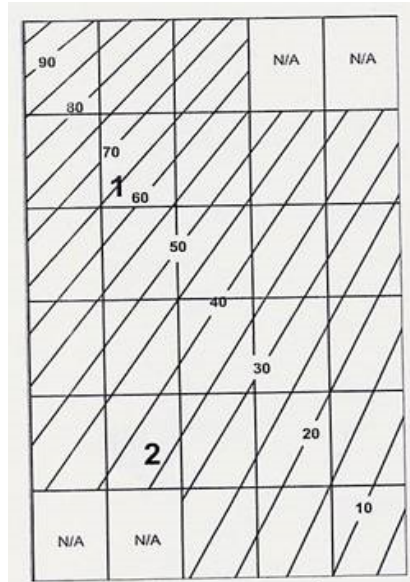


Figura 3-24 Valori tipici di GSI per Arenarie

I campi più probabili indicati con il numero sono:

1 Arenarie massive o stratificate senza cemento argilloso; **2** Arenarie brecciate senza cemento argilloso.

Siltiti, Argilliti, Argillocisti, Marne

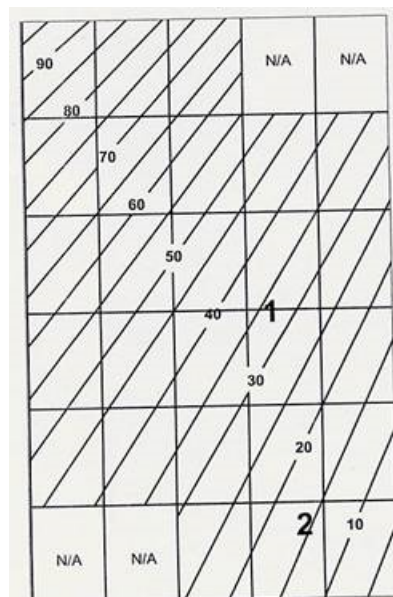


Figura 3-25 Valori tipici di GSI per rocce a componente argillosa

I campi più probabili indicati con il numero sono:

1 Stratificati, laminati, fratturati; **2** Brecciati o frizionati.

Graniti

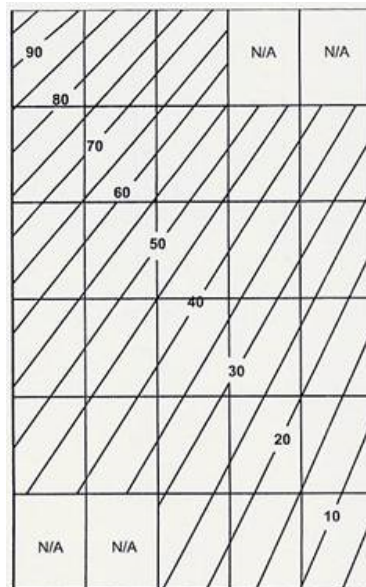


Figura 3-26 Valori tipici di GSI per rocce granitoidi

Ultrabasiti

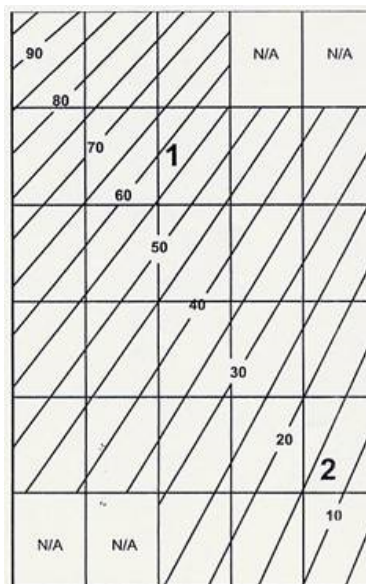


Figura 3-27 Valori tipici di GSI per rocce ultrabasiche

I campi più probabili indicati con il numero sono:

1 Non alterati; **2** Serpentinizzati.

Gneiss

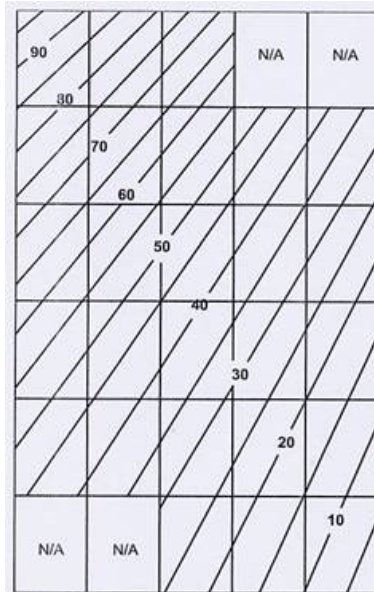


Figura 3-28 Valori tipici di GSI per rocce gneissiche

Scisti metamorfici

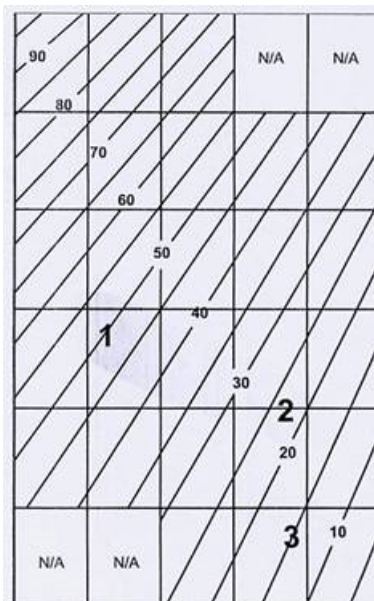


Figura 3-29 Valori tipici di GSI per rocce metamorfiche

I campi più probabili indicati con il numero sono:

1 Compatti (micascisti, scisti cristallini etc.) **2** Deboli (scisti cloritici, talcoscisti, filladi etc)

Nell'applicazione delle carte, ci si ricordi che le stesse sono riferite a rocce che non hanno subito processi di alterazione. Le aree ombreggiate sono indicative e di prima valutazione; a scopi di progettazione, la valutazione dei GSI deve essere logicamente basata sui risultati di accurate indagini geologico-geomeccaniche in campagna.

Ulusay & Sonmez, nell'applicazione del GSI alle scarpate, ritengono il grafico proposto da Hoek troppo approssimativo sia nella descrizione della struttura che nella descrizione delle condizioni delle discontinuità. Di conseguenza propongono d'introdurre 2 parametri aggiuntivi, uno relativo alla struttura SR, da determinare in funzione del valore nel n° di giunti per m³ e J_v, in accordo con il grafico (Fig. 3.30), e l'altro relativo alle condizioni delle discontinuità **SCR** ottenuto dalla somma di 3 coefficienti parziali:

$$SCR = R_r + R_w + R_f$$

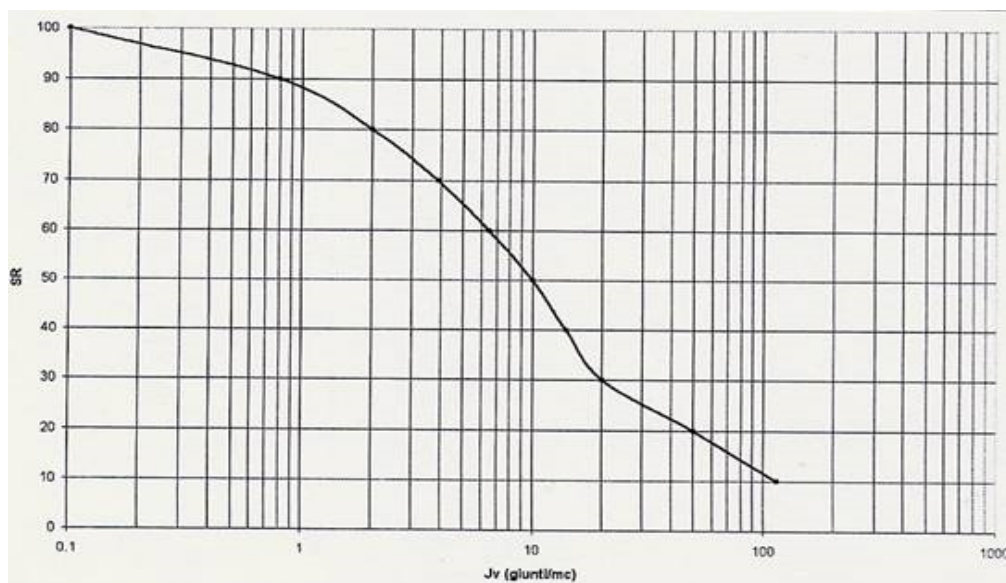


Figura 3-30 Parametro SCR dal valore di J_v

secondo le attribuzioni della Fig 3.31:

Parametro R_r: rugosità dei giunti:

MOLTO RUGOSI	RUGOSI	PIANO	LISCI	LEVIGATI
6	5	3	1	0

Parametro R_w: alterazione dei giunti:

ASSENTE	LEGGERMENTE ALTERATI	MEDIAMENTE ALTERATI	MOLTO ALTERATI	DECOMPOSTI
6	5	3	1	0

Parametro R_f: Riempimento dei giunti:

ASSENTE	COMPATTO < 5 mm	COMPATTO > 5 mm	TENERO < 5 mm	TENERO > 5 mm
6	4	2	2	0

Figura 3-31 Tavole parametriche SCR (Ulusay & Sonmez)

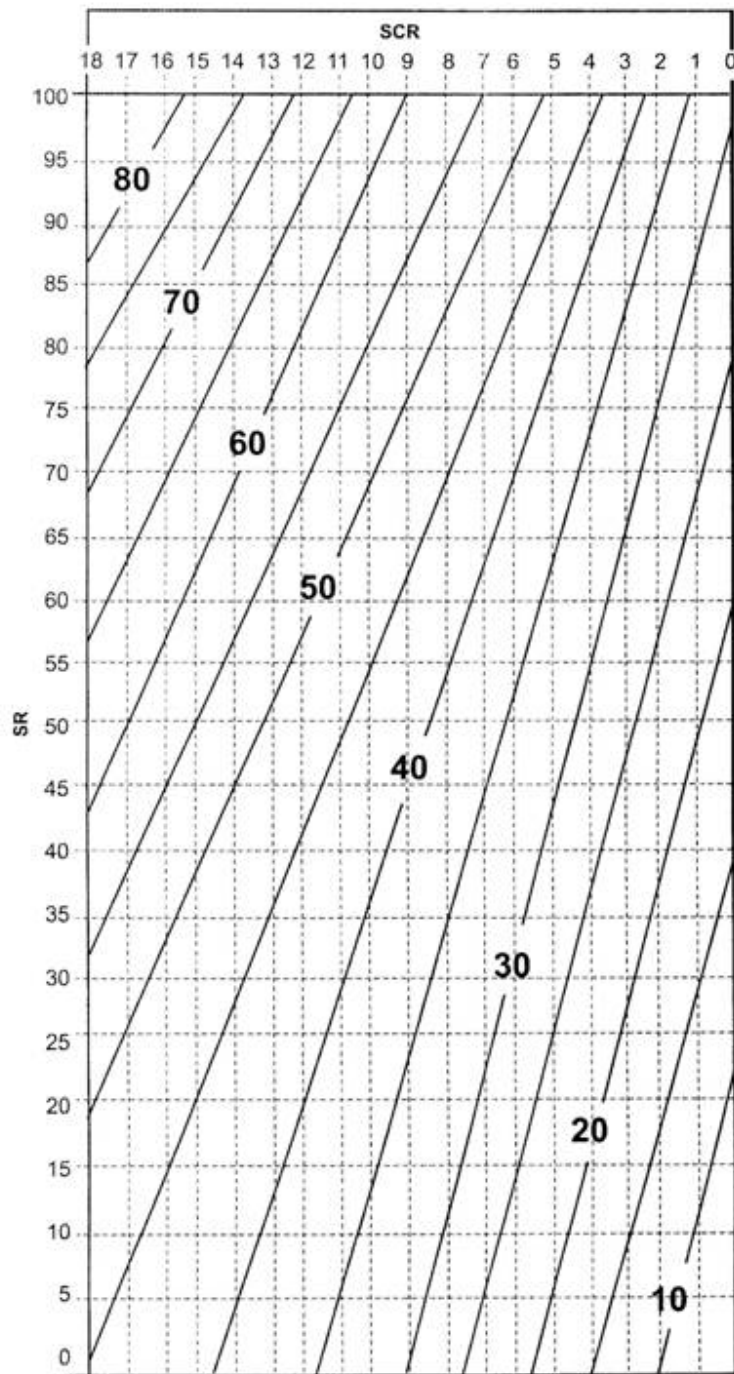


Figura 3-32 Determinazione del GSI secondo Ulusay & Sonmez

L'approccio sembra interessante anche se ci si può interrogare sulla precisione del parametro J_v , sempre discutibile.

Un importante contributo di **GSI** è nella caratterizzazione delle rocce flyschoidi, tipicamente costituite da alternanze di serie calcaree o arenacee fragili e di rocce pelitiche duttili (scisti argillosi, argilloscisti, marne)

dovute al trasporto di materiale clastico in ambienti deposizionali di mare profondo, spesso sottoposte successivamente a stress tettonici.

Per tale litologia è stata sviluppata da Marinós & Hoek una carta (Fig. 3.33) che caratterizza il **GSI** tipico dei flysch in funzione della sua struttura, da integra ad intensamente deformata.

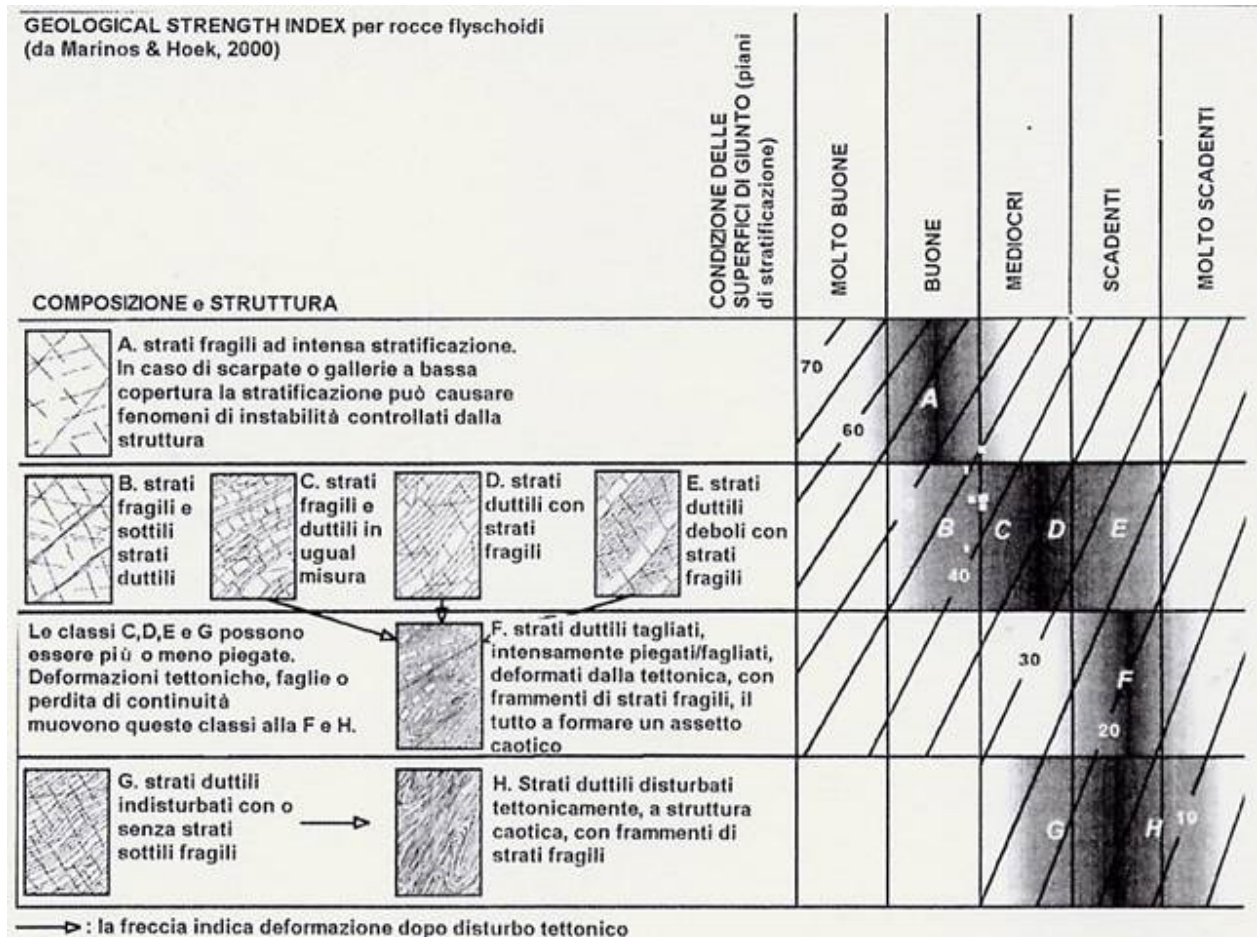


Figura 3-33 Determinazione del GSI per rocce flyschoidi

Per le varie classi identificate, gli autori propongono di derivare i valori di σ_c e di m_i da usare successivamente nella derivazione delle caratteristiche geomeccaniche dal criterio di Hoek-Brown, utilizzando dei valori medi proporzionali, secondo la Fig. 3.34:

CLASSE DI FLYSCH	VALORI DI σ_c E m_i
A e B	Usare i valori per la roccia rigida
C	Ridurre i valori della roccia rigida del 20% e usare i valori interi per gli intestrati pelitici
D	Ridurre i valori della roccia rigida del 40% e usare i valori interi per gli intestrati pelitici
E	Ridurre i valori della roccia rigida del 40% e usare i valori interi per gli intestrati pelitici
F	Ridurre i valori della roccia rigida del 60% e usare i valori interi per gli intestrati pelitici
G	Usare i valori per gli intestrati pelitici
H	Usare i valori per gli intestrati pelitici

Figura 3-34 Valori degli sforzi e del parametro m_i correlati alle classi di Flysch

3.3.3 Definizione del comportamento degli ammassi rocciosi soggetti a escavazione

I risultati emersi dalle indagini geognostiche vengono, in questo secondo tipo di approccio, utilizzati per formulare una previsione sul comportamento tenso-deformativo dell'ammasso all'apertura della cavità. In tal senso, per i materiali intercettati, si potrà prevedere, a seguito dell'escavazione, o una situazione di sostanziale equilibrio o una situazione di potenziale instabilità: per questa seconda evenienza andranno preventivate, col maggior grado di precisione possibile, le tipologie e le entità dei dissesti.

A tale proposito, occorre precisare che, fino a oggi, pur non esistendo classificazioni specifiche in merito, lo studio previsionale dei fenomeni di instabilità in galleria ha tradizionalmente riguardato la zona di calotta, per quanto concerne i riasciti gravitativi, e la zona dei piedritti per le convergenze; secondo tali schematizzazioni, vengono pertanto individuate le classi di comportamento dei materiali, passando da condizioni favorevoli a condizioni via via più gravose in funzione dell'entità dei crolli e dell'intensità delle spinte e tenendo, al tempo stesso, ben presenti le condizioni idrogeologiche.

Diversamente in questi tempi si stanno affermando nuove filosofie progettuali che prevedono di formulare previsioni sul comportamento tenso-deformativo del materiale in corrispondenza del fronte di scavo e, di conseguenza, sul contorno dell'intero perimetro della cavità.

Fra queste la più conosciuta è rappresentata dal Sistema ADECORS (Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli) che prevede, in funzione del comportamento dei materiali soggetti a escavazione, l'individuazione di tre sole categorie:

- Comportamento di tipo lapideo a fronte stabile
- Comportamento di tipo coesivo a fronte stabile a breve termine
- Comportamento di tipo sciolto a fronte instabile

Tale tipo di previsione viene formulata sulla base dei parametri geomeccanici raccolti durante la campagna geognostica, utilizzando adeguate procedure di calcolo idonee a modellare, in maniera attendibile, la tridimensionalità del problema. Più in dettaglio, il sistema adecors distingue in modo molto marcato il momento progettuale da quello costruttivo, attraverso definizione di ben identificate fasi di intervento, ciascuna delle quali caratterizzata da specifiche ed evidenti finalità.

3.3.3.1 *Momento della progettazione*

E' suddiviso in tre fasi

- Fase conoscitiva. Consiste in un approfondito approccio geognostico mirato alla definizione degli equilibri naturali preesistenti nel sito di interesse preliminarmente all'esecuzione dell'opera.
- Fase di diagnosi. Consiste nella previsione dei fenomeni deformativi che si sviluppano a seguito dello scavo della futura galleria sulla base di quanto emerso dalla fase conoscitiva. In questo modo vengono differenziate le tratte di scavo a seconda del prevedibile comportamento tenso-deformativo dell'ammasso al fronte di scavo, che sono i tre tipi esposti sopra.

Il primo caso (Lapideo) si verifica quando le sollecitazioni indotte dagli scavi sono compatibili con le caratteristiche di resistenza del materiale attraversato. I fenomeni deformativi si evolvono in campo elastico, sono immediati e di entità trascurabile.

Il secondo caso (Coesivo) si verifica quando i fenomeni deformativi sono ancora in campo elastico e di entità trascurabile in corrispondenza del fronte di scavo, mentre, con l'allontanarsi di questo, entrano in campo plastico, in quanto si attenua l'effetto di contenimento dovuto al fronte stesso. La presenza dell'acqua, in questo caso, riduce invece la resistenza al taglio dei terreni favorendo l'estendersi della plasticizzazione.

Il terzo caso (Sciolto) si verifica quando la resistenza del terreno viene ovunque superata dalle sollecitazioni indotte dallo scavo, pertanto i fenomeni deformativi sono subito di tipo plastico e coinvolgono pesantemente anche il fronte di scavo, dove si sviluppano rotture diffuse e sistematiche, e alle volte, anche estesi frammenti: le convergenze sono inaccettabili in quanto di rilevante entità.

- Fase di terapia. In questa fase vengono effettuate le scelte tipologiche e dimensionali dei sistemi di stabilizzazione atti a contrastare i fenomeni deformativi individuati nella precedente fase di diagnosi.

Nel primo caso (Lapideo) si avranno interventi di stabilizzazione unicamente mirati al sostegno di porzioni d'ammasso potenzialmente instabili e saranno, per lo più, localizzati. In questo caso, il rivestimento definitivo potrà essere eseguito a qualsiasi distanza dal fronte di scavo e l'eventuale arco rovescio non dovrà assolvere funzioni strutturali.

Nel secondo caso (Coesivo) gli interventi di stabilizzazione, eseguiti sistematicamente e immediatamente a ridosso del fronte di scavo, dovranno essere in grado di contrastare l'insorgere dei fenomeni di plasticizzazione al contorno del cavo; il rivestimento definitivo, comprensivo di arco rovescio, dovrà seguire il fronte a una distanza non superiore ai cinque diametri della galleria. Infine, per il caso Sciolto gli interventi di stabilizzazione vanno necessariamente realizzati prima delle operazioni di scavo: saranno quindi eseguiti in avanzamento e dovranno essere in grado di conferire al materiale quelle caratteristiche di resistenza necessarie per aprire la cavità impedendo, di fatto, lo sviluppo di convergenze, che sarebbero, in questa categoria di scavo, inaccettabili.

3.3.3.2 Momento della costruzione

- Fase operativa. Consiste nelle operazioni di scavo della galleria e nell'applicazione degli strumenti di stabilizzazione per la regimazione dei fenomeni deformativi.
- Fase di verifica in corso d'opera. E' la fase in cui si provvede al controllo dei fenomeni deformativi quale risposta dell'ammasso alle operazioni di scavo: vengono, in particolare, rilevate le convergenze superficiali e profonde. Durante questa fase si ha la conferma, o meno, circa la validità delle scelte progettuali
- Fase di messa a punto del progetto. In base all'interpretazione dei dati scaturiti attraverso la precedente fase di verifica, si dovrà eventualmente ricorrere a una taratura del progetto e a un suo eventuale adeguamento alla situazione reale.

3.4 MEZZI DI SCAVO, METODOLOGIE DI AVANZAMENTO E TECNICHE COSTRUTTIVE

Lo scavo di una galleria impone l'esecuzione di tre differenti fasi di lavoro: abbattimento, rimozione dei detriti e sostegno del vuoto.

Per abbattimento si intende la serie di interventi che consentono la frantumazione del materiale sino alla sua totale rimozione. Tale abbattimento può avvenire utilizzando mezzi di vario tipo, i quali hanno subito negli ultimi anni una notevole evoluzione. Sono state infatti costruite macchine molto sofisticate e dotate di sistemi operativi per la messa in opera di interventi di preconsolidamento del fronte di scavo sempre più efficienti, ma che, al contempo, si sono rivelate spesso rigide e poco versatili nell'adattarsi alle continue e brusche variazioni geomeccaniche che generalmente caratterizzano il sottosuolo.

3.4.1 Mezzi di scavo

Nell'ambito dei mezzi attualmente impiegati per la realizzazione di una galleria, è utile fare una suddivisione fra scavo meccanico e scavo mediante esplosivo: per entrambe le metodologie vengono fornite informazioni circa le principali modalità operative, senza peraltro entrare nel dettaglio delle caratteristiche e proprietà tecniche dei mezzi impiegati

3.4.1.1 Scavo meccanico

Esistono mezzi meccanici per l'abbattimento dei fronti di scavo particolarmente semplici e utilizzati ormai da parecchi anni nelle lavorazioni in sotterraneo, ai quali, tuttavia, si ricorre di frequente anche attualmente.

Si tratta delle pale meccaniche, dei rippers e dei martelli demolitori: questi ultimi che possono essere utilizzati anche per correggere la profilatura di scavo dopo l'abbattimento con esplosivo, vengono di norma impiegati in rocce tenere, in assenza di acqua.



Figura 3-35 Pale meccaniche



Figura 3-37 Martello demolitore



Figura 3-36 Ripper

Per quanto concerne, invece, i mezzi di scavo meccanici non tradizionali, è usuale la seguente distinzione in funzione del tipo di attrezzatura utilizzata:

- Frese : in due tipologie:
 - Ad attacco puntuale
 - Ad attacco integrale



Figura 3-39 Fresa ad attacco puntuale



Figura 3-38 Fresa ad attacco integrale

- Scudi aperti:
 - Semi-meccanizzati
 - Ad attacco integrale



Figura 3-40 Scudo Aperto ad attacco integrale

- Scudi chiusi o a pressione:
 - A pressione meccanica
 - A pressione d'aria
 - A pressione di terra
 - A pressione di fanghi

Le frese vengono per lo più impiegate in presenza di materiale roccioso con caratteristiche meccaniche da medie a elevate, mentre gli scudi in terreni sciolti o in rocce così fratturate da avere un comportamento ad essi assimilabili. Per quanto concerne le frese, queste si distinguono in macchine di scavo integrale, dette anche frese a piena sezione o frese TBM, e macchine di scavo ad attacco puntuale o frese a braccio brandeggiabile.

La metodologia di scavo con fresa ad attacco puntuale costituisce il metodo di scavo più semplice, meno ingombrante e più versatile in quanto permette di operare in qualsiasi ammasso, purché stabile. È costituita da un telaio montato su gomma o cingoli e da un braccio mobile alla cui estremità sono montati gli utensili di scavo. Essi sono di vario genere e vengono intercambiati in funzione della resistenza della roccia da abbattere. Le frese ad attacco puntuale utilizzano generalmente due tipi di teste rotanti: coniche e a tamburo. Nelle prime, l'asse di rotazione è disposto ortogonalmente all'asse del braccio. Le frese

puntuali rappresentano l'evoluzione dello scavo manuale e di esso conserva tutti i pregi e soltanto qualche difetto.

Ei infatti un metodo di scavo abbastanza lento e legato alla sensibilità dell'operatore che manovra la fresa, ma che consente lo scavo di sezioni di qualunque forma e dimensione purché non superiore a 30 m². Inoltre, in caso di necessità, tali frese possono facilmente essere allontanate dal fronte qualora le caratteristiche del materiale da scavare richiedano l'uso di consolidamento o addirittura il proseguimento dello scavo con esplosivi.

La fresa ad attacco integrale, al contrario, è molto rigida e poco versatile. Essa è costituita da una testa rotante, avente diametro pari a quello della galleria, messa in azione da un motore elettrico, su cui sono montati i denti o i dischi per la fresatura delle rocce.

La spinta necessaria per l'azione della fresa è ottenuta contrastando la macchina alle pareti di scavo mediante cuscinetti azionati da dispositivi idraulici. E' quindi evidente che l'ammasso interessato dallo scavo deve avere un sufficiente grado di stabilità per evitare che i cuscinetti idraulici affondino nelle pareti e che la fresa si blocchi non trovando più la contropinta necessaria per avanzare. Alla fresa è collegato un nastro trasportatore avente la funzione di convogliare i detriti dal fronte al retro della macchina e quindi ai mezzi di sgombero.

Le principali fasi operative sono:

- Messa in azione dei cuscinetti idraulici;
- Fresatura del fronte di scavo con asportazione dello smarino tramite nastri trasportatori
- Ritiro dei cuscinetti idraulici
- Avanzamento della fresa su apposite guide

A una certa distanza dal fronte, si realizza infine il rivestimento definitivo mediante conci prefabbricati o calcestruzzo gettato in opera.

E' chiaro che nel caso in cui si dedica che la galleria debba essere realizzata con fresa occorre preliminarmente eseguire delle indagini atte a stabilire la fattibilità delle lavorazioni di scavo. In particolare si dovranno mettere in luce i seguenti aspetti:

- Eventuale presenza di situazioni che possono portare all'arresto della macchina fresatrice
- Grado di omogeneità delle caratteristiche fisico-meccaniche degli ammassi rocciosi da attraversare;
- Resistenza alla disgregazione del materiale roccioso e sua composizione mineralogica, allo scopo di scegliere un adeguato tipo di fresa, i relativi utensili, nonché il regime di funzionamento ottimale della macchina stessa.

Va peraltro aggiunto che, una volta stabilita la fattibilità dell'utilizzo della fresa, il continuo rilievo, durante le lavorazioni, dei dati relativi al suo funzionamento è di grande ausilio per la previsione del comportamento che avrà il materiale subito dopo il passaggio della fresa stessa.

L'interpretazione di questi dati è però tutt'altro che semplice e viene effettuata attraverso la definizione di parametri che caratterizzano l'interazione ammasso roccioso fresa; questi parametri, il cui più significativo è l'energia specifica dipendono sia dal tipo di macchina utilizzata sia dal materiale

attraversato. Ecco quindi la necessità di compiere uno sforzo interpretativo per giungere a dati perfettamente epurati, e quindi attendibili, circa le caratteristiche di resistenza del masso attraversato.

Lo scudo, utilizzato in terreni sciolti, è una macchina che si compone di una camicia esterna, aspesore variabile, normalmente cilindrica sulla cui parte anteriore è collocato il sistema di scavo che varia a seconda del tipo di scudo. Nella parte centrale trovano posti i martinetti idraulici in numero variabile in funzione della spinta richiesta.

Nella coda è posizionato il macchinario per la posa in opera del rivestimento prefabbricato; agganciato allo scudo vi è poi un complesso rimorchiato su cui è installato il nastro trasportatore che carica il materiale di scavo su opportuni vagoni.

LE fasi operative che contraddistinguono l'avanzamento mediante scudo sono le seguenti:

- Scavo del terreno e contemporanea messa in opera del rivestimento definitivo;
- Avanzamento dello scudo e contemporaneo allontanamento dello smarino prodotto nella fase precedente.

Mentre le operazioni di scavo del terreno dipendono strettamente dal tipo di scudo in funzione, tutte le altre operazioni si svolgono in maniera identica per tutti i tipi di scudo.

Il rivestimento definitivo, contemporaneo alle operazioni di scavo, è realizzato con la messa in opera di conci prefabbricati oppure mediante calcestruzzo estruso.

L'avanzamento dello scudo, immediatamente successivo alla fase di scavo di una tratta di lunghezza opportuna, consiste nell'azionamento dei martinetti idraulici che hanno come contrasto l'ultimo anello del rivestimento definitivo. Ognuno di questi martinetti può funzionare indipendentemente o in combinazione con gli altri in modo da avanzare per una tratta pari alla lunghezza di un anello completo di rivestimento e in modo da dirigere lo scudo correggendone eventuali errori di direzione.

Durante la fase di smarino il materiale di risulta – accumulato, durante lo scavo, in un treno di carrelli mediante il nastro trasportatore – viene allontanato all'esterno della galleria.

Come già detto precedentemente le operazioni di scavo sono legate al particolare tipo di scudo adottato. La prima divisione si crea tra scudi aperti e chiusi.

Gli scudi aperti sono simili a delle frese collocate all'interno di un grosso cilindro la cui funzione è essenzialmente quella di proteggere lo scavo da possibili distacchi localizzati. Si dividono in:

- Scudi semi-meccanizzati, costituiti da uno scudo esterno, aperto anteriormente, all'interno del quale è posizionata una fresa puntuale per lo scavo del terreno al fronte.
- Scudi meccanizzati, che si distinguono dai precedenti soltanto per essere dorati, all'interno dello scudo, di una fresa ad attacco integrale per lo scavo della galleria a piena sezione. Questi scudi hanno cioè una testa di taglio costituita da un tamburo circolante recante una doppia e tripla croce sulla quale sono posti gli utensili costituiti da lame e dischi

Gli scudi chiusi o a pressione effettuano lo scavo del terreno mediante una testa di taglio a fronte chiuso, ovvero in cui non esiste alcuna comunicazione tra il fronte di scavo e l'interno della galleria. La stabilità del fronte, in tal caso, è garantita mediante la pressione esercitata dallo scudo chiuso sul fronte stesso.

Tale categoria di scudi ha subito negli ultimi anni il maggiore sviluppo tecnologico e ancora oggi è in continua evoluzione. Si dividono in:

- Scudi a pressione meccanica, i quali esercitano una pressione di contenimento sul fronte direttamente mediante la testa della fresa; quest'ultima è basata sul principio di perforazione rotante ed è costituita da una testa rotante azionata da motori elettrici e su cui sono montati gli utensili di scavo, un sistema di propulsione e di guida e un apparato di sgombero dello smarino;
- Scudi a pressione d'aria, la cui prima applicazione risale al 1874: dato l'elevato rischio per le maestranze si tende sempre più a ridurre l'utilizzo;
- Scudi a pressione di fanghi, le cui prime applicazioni risalgono all'inizio degli anni '60 del secolo scorso, in conseguenza della necessità di trovare una valida alternativa allo scudo a pressione d'aria. Tale tipo di scudo consente la stabilità del fronte di scavo per mezzo dell'azione combinata della testa rotante e del fango mantenuto in pressione. Quest'ultimo viene anche utilizzato in qualità di fluido trasportatore al quale è demandato il compito, grazie a un sistema idraulico di tubi e pompe, di allontanare lo smarino prodotto durante lo scavo; all'esterno viene poi effettuata la separazione del materiale di scavo dal fango e la rigenerazione di quest'ultimo prima di essere immesso nuovamente nel circuito. I fanghi utilizzati in questo tipo di scudo sono a base di bentonite. Per la stabilizzazione del fronte viene sfruttata la proprietà tixotropica della bentonite: tale proprietà consente di mantenere il fango allo stato fluido quando questo è in movimento, ovvero quando viene iniettato nel terreno a monte del fronte di scavo, permette di aumentare la viscosità e, quindi, la solidificazione quando il fango, penetrando nei pori del terreno, rallenta la propria velocità di filtrazione.
- Scudi a pressione di terra o EPB, la cui tecnologia è stata sviluppata principalmente in Giappone nell'ultimo decennio. Gli scudi EPB iniettano al fronte, mediante ugelli posizionati sulla testa all'interno della camera di scavo, un agente avente la funzione di fluidificare il terreno da scavare. In tal modo, mentre la testa ruota, si ha il mescolamento del fluido all'interno del terreno, cosicché, davanti alla testa, si forma uno strato di terreno parzialmente fluidificato che presenta una consistenza simile a un calcestruzzo fresco. Il cake così prodotto viene fatto passare, attraverso le aperture della testa, in un vano chiuso posteriormente da un diaframma metallico. La camera di scavo è particolarmente nello sviluppo del sistema di avanzamento. Infatti, la spinta dei martinetti principali di avanzamento si scarica, attraverso il diaframma posteriore della camera, sul materiale fluidificato all'interno della camera stessa. Questo materiale, reagendo in modo idrostatico, trasferisce quindi la pressione sul terreno costituente il fronte di scavo garantendone la stabilità. La presenza di pressostati controllerà che la pressione della camera rimanga entro i limiti predeterminati e calcolati sulla base del terreno al fronte. In tale sistema particolare importanza assume anche lo smarino, la cui regolazione permette di mantenere equivalente il materiale estratto dalla camera e quello che entra attraverso la testa e costante la pressione della camera di scavo. In definitiva, quindi, le variabili sulle quali è possibile agire al fine di mantenere costante la pressione sulla camera di scavo sono:
 - Velocità di rotazione della testa;
 - Velocità di rotazione della coclea;
 - Portata e caratteristiche fisiche del fluidificante;
 - Momento torcente applicato all'albero della testa fresante;
 - Spinta dei martinetti principali

Analogamente a quanto detto per le frese, anche per gli scudi occorre verificare che esistano le condizioni geologiche idonee all'impiego di questi mezzi di scavo. In particolare, dovrà essere valutata la presenza di materiali fluenti, spingenti e/o rigonfianti che ne rendono difficile o impossibile l'utilizzo. Un interessante sviluppo dello scudo, utilizzabile per la messa in opera di condutture sotterranee, è lo spingitubo, mediante il quale è possibile sottopassare strutture di qualsiasi tipo senza intralciare il traffico di superficie. Questo metodo sfrutta un impianto oleodinamico per spingere tubi in sottosuolo. Il loro diametro minimo è di circa 800 mm. Per quanto riguarda la lunghezza dei condotti non si hanno praticamente limiti. Le tubazioni possono essere in acciaio, cemento armato, cemento o ghisa e si spingono in terreni coerenti o incoerenti. Il terreno viene scavato, caricato e trasportato all'interno della condotta.

Quando la prima sezione di tubo è stata completamente infilata nel terreno, i pistoni idraulici della stazione di spinta vengono ritratti e si cala nel pozzo d'acciaio una seconda sezione di tubo: in questo modo la tubazione viene spinta di sezione in sezione.

3.4.1.2 Scavo mediante esplosivo

Lo scavo mediante esplosivo prevede, in primo luogo, la realizzazione di un certo numero di fori da mina all'interno del fronte di scavo da abbattere.

Tali fori vengono, di norma, realizzati utilizzando speciali mezzi denominati "Jumbo", che, localizzati centralmente rispetto al fronte, ospitano una serie di perforatrici provviste di aste metalliche attrezzate all'estremità con idonei taglienti. Le perforatrici, alloggiato su apposite slitte, sono in grado di raggiungere tutti i punti del fronte interessati dall'esecuzione dei fori.

Nei fori così realizzati vengono inserite le mine, il cui insieme costituisce la cosiddetta volata.

Le stesse mine vengono fatte brillare contemporaneamente o in fasi successive distanziate fra loro di pochi millisecondi. In particolare, negli ultimi anni, è stata messa a punto una tecnica, denominata presplitting, che prevede di abbattere il fronte in tre fasi successive separate fra loro di pochi millesimi di secondo.



Figura 3-41 Jumbo

Il primo scoppio interessa la parte centrale della sezione di scavo e ha la finalità di creare un allentamento tensionale nella porzione centrale del fronte; la seconda esplosione, invece, interessa una serie di mine leggere distribuite lungo la sagoma della galleria a opportuna distanza l'una dall'altra: questa fase si prefigge di creare una discontinuità in corrispondenza del perimetro di scavo, con funzione di schermo nei confronti dell'onda d'urto determinata dal grosso della volta, costituito, a sua volta, dalla terza e ultima detonazione che interessa le rimanenti parti della sezione di avanzamento.

Attraverso questa tecnica e soprattutto grazie agli effetti indotti dalla fase presplitting si tende a ottenere profili netti, regolari, con fuori-sagoma praticamente assenti o assai contenuti, con roccia al contorno dello scavo poco disturbata e quindi provvista di buone condizioni di equilibrio: tutto ciò, ovviamente, compatibilmente alle intrinseche proprietà geomeccaniche del materiale attraversato.

Indipendentemente dalle modalità di scoppio impiegate, la lunghezza dei da mina e quindi la quantità di esplosivo utilizzata sono direttamente proporzionali alla qualità geomeccanica del mezzo: si passerà pertanto da sfondi lunghi fino a 4-5 metri in rocce particolarmente integre a sfondi assai più ridotti in presenza di ammassi fortemente fratturati e poco resistenti, fino ad arrivare a condizioni talmente gravose da rendere necessario l'abbandono dell'esplosivo per ricorrere all'utilizzo di meno redditizi mezzi meccanici.

In definitiva, si può affermare che, per ogni contesto geostrutturale, esiste una lunghezza degli sfondi ottimale, che rappresenta il giusto compromesso fra equilibrio delle pareti di scavo e velocità di avanzamento.

Va infine riferito che in presenza di particolari situazioni in cui non si può ricorrere all'uso di esplosivo, si fa frequentemente ricorso, al suo posto, all'utilizzo di demolitori chimici, peraltro particolarmente costosi: questi vengono introdotti in appositi fori entro il fronte di scavo, provocandone un completo disfacimento e rendendo così il materiale facilmente asportabile con mezzi meccanici.

3.4.2 Metodologie di avanzamento: NATM

Nello scavo a foro cieco, cioè in cui la sagoma della galleria appena scavata è completamente inglobata dal terreno e dalle rocce circostanti, negli ultimi anni ha preso piede un nuovo metodo di avanzamento, che prende il nome di NATM (New Austrian Tunneling Method).

In questo metodo lo scavo viene eseguito – controllando per ogni settore il comportamento del terreno e calcolando il rivestimento di conseguenza. Dopo aver scavato un certo tratto si procede al consolidamento del cavo e al successivo rivestimento di prima fase, procedendo, allo stesso tempo, a una minuziosa misurazione delle eventuali convergenze. Nel momento in cui non si registrano più significative deformazioni, ovvero si è raggiunto l'equilibrio, viene messo in opera il rivestimento definitivo costituito da un anello di calcestruzzo eventualmente armato.

Negli ultimi tempi, diversamente, le fasi di lavorazioni in galleria per uno scavo eseguito con metodo tradizionale si sono decisamente standardizzate, mantenendo, di fatto, come unica sostanziale differenza, il fatto di avanzare per mezzo di scavi a piena sezione o a sezione parializzata. Di entrambe le metodologie, viene fornita una schematica descrizione

- Avanzamento a piena sezione. Tradizionalmente adottato in presenza di situazioni geologiche particolarmente favorevoli, negli ultimi tempi, grazie ai notevoli progressi compiuti nel campo dei consolidamenti, viene spesso utilizzato anche in presenza di materiali geomeccanicamente scadenti. Esso prevede, dopo gli eventuali preconsolidamenti in calotta e/o al fronte, una fase di abbattimento del materiale con piano di scavo coincidente con la base dei piedritti, a cui segue, a breve distanza dal fronte, lo scavo e il getto delle murette e dell'arco rovescio. Più le condizioni geomeccaniche saranno gravose, più lo stesso arco rovescio andrà realizzato vicino al fronte di scavo e in tempi brevi. Da ultimo andrà eseguito il getto di rivestimento della calotta.
- Avanzamento a sezione parzializzata. Permane, in ogni caso, la metodologia di avanzamento più frequentemente adottata. Essa prevede, dopo gli eventuali pre-consolidamenti, l'abbattimento del fronte con piano di scavo di poco più elevato rispetto al piano dei centri, in modo da garantire uno scarico delle tensioni il più verticale possibile. Dopo l'applicazione del rivestimento di prima fase si passa, di norma, all'esecuzione della delicata fase di ribasso, questa inizialmente prevede, oltre al simultaneo scavo di strozzo, lo scavo e il getto delle murette per campioni longitudinali di limitata lunghezza, ancor meglio se alternati lungo i due lati della galleria: in presenza di centine durante lo scavo delle murette, si dovrà avere particolare attenzione cura delle condizioni di equilibrio presenti in corrispondenza del loro piede d'appoggio, tenendo presente che anche questo specifico scavo potrà essere preceduto da trattamenti di consolidamento. Piuttosto distanziato dal fronte di avanzamento viene infine eseguito lo scavo e il getto dell'arco rovescio, lasciando, da ultimo, la realizzazione del getto di rivestimento di calotta. Solo in alcuni casi, quest'ultima operazione può precedere la fase di ribasso, che viene realizzata per sottomurazione.

3.4.3 Tecniche costruttive

Riepilogando quando visto fino ad'ora la realizzazione di una galleria può sostanzialmente suddividersi nelle seguenti differenti fasi costruttive:

- Pre-consolidamenti o precontenimento
- Scavo
- Consolidamenti radiali o contenimento del cavo
- Rivestimento di prima fase
- Impermeabilizzazione
- Rivestimento di seconda fase

Gli interventi di preconsolidamento, quando necessari, sono finalizzati a migliorare le qualità meccaniche dei materiali da attraversare, consentendo loro di manifestare condizioni di equilibrio all'apertura della cavità. Tali interventi, dovendo interessare l'ammasso oltre il fronte di scavo, vengono realizzati in avanzamento, anche se, alcune volte, quando le condizioni morfologiche lo consentono, vengono eseguiti direttamente dalla superficie topografica. In considerazione delle problematiche esistenti, i trattamenti possono interessare la sola zona di calotta oppure anche lo stesso fronte di scavo. Le tecniche di preconsolidamento maggiormente utilizzate sono le iniezioni di miscele cementizie e/o chimiche, il "jet grouting", la chiodatura del fronte mediante tubi in vetroresina eventualmente valvolati ecc.

Inoltre i drenaggi e la realizzazione dell'opera sia preceduta dallo scavo di un foro pilota, si ricorre frequentemente a interventi di consolidamento radiale da cunicolo, generalmente mediante tubi in vetroresina eventualmente valvolati e iniettati, le cui parti contenute entro la sagoma della futura galleria sono facilmente removibili in sede di allargo. Passando ora alla successiva fase di scavo, va detto che questa prevede, innanzitutto, la scelta del più idoneo mezzo di abbattimento del fronte fra quelli descritti precedentemente tenendo presente che il fronte di avanzamento occuperà o meno l'intera sagoma della galleria a seconda che si proceda a piena sezione o sezione parzializzata.

Una volta demolito il nucleo e allontanato dal fronte il materiale di risulta, detto anche smarino, si passa, qualora necessario, all'esecuzione di consolidamenti radiali al contorno della cavità. Questi, nel caso di consolidamenti diffusi, consistono nella messa in opera di bulloni ad aderenza continua eventualmente valvolati e iniettati di lunghezza generalmente compresa tra 1,5 e 6 m, mentre, nel caso di stabilizzazioni localizzate, consistono in bulloni ad ancoraggio puntuale di analoga lunghezza.

Esaurita la fase legata alla realizzazione degli interventi di consolidamento, si passa quindi alla messa in opera, sulle pareti di scavo, del rivestimento provvisorio o di prima fase, finalizzato al conseguimento di condizioni di equilibrio a breve termine della cavità. Il rivestimento provvisorio è generalmente realizzato mediante calcestruzzo proiettato eventualmente armato con rete elettrosaldata o rinforzato con fibre in acciaio e, in presenza di condizioni particolarmente gravose, ulteriormente armato con centine. Queste ultime sono costituite da profilati in acciaio aventi la stessa sagoma della galleria e vengono messe in opera in modo tale da esercitare il massimo contatto possibile con le pareti di scavo.

Successivamente al rivestimento di prima fase, viene quasi sempre realizzata l'impermeabilizzazione della galleria, consistente, di norma, nell'applicazione sulle pareti di scavo di un manto in PVC. Fino a qualche tempo, l'impermeabilizzazione non veniva realizzata in presenza di rocce compatte poco fessurate; al contrario, attualmente, si tende a estendere questo tipo di operazione a qualsivoglia situazione geologica, onde evitare forme di ammaloramento dei calcestruzzi nel tempo.

Dopo l'impermeabilizzazione viene infine realizzato il rivestimento definitivo o di seconda fase, consistente in un getto di calcestruzzo eventualmente armato lungo le pareti della cavità, di spessore variabile in funzione delle condizioni geomeccaniche esistenti e generalmente compreso tra 30 cm e 120 cm.

4 OPERA IN ESAME: GALLERIA FERROVIARIA BRENNERO

4.1 INTRODUZIONE ALL'OPERA

Nella complessa gestione dell'organizzazione che porterà alla realizzazione della Galleria di base del Brennero, uno dei fattori più importanti è legato alla logistica di costruzione.

Quest'ultima, infatti, condiziona in modo sostanziale l'impatto sui tempi di realizzazione, sui costi della struttura e l'impatto ambientale diretto ed indiretto sul territorio.

Le tratte di galleria, di cunicolo e le caverne logistiche oggetto dell'attuale fase di progettazione, di cui la presente relazione fornisce la descrizione generale, fanno parte di quel complesso di opere che, se opportunamente utilizzate, possono fornire un contributo determinante nella gestione sia del processo di progettazione esecutiva delle gallerie di linea, che di quello della loro costruzione.

Infatti, attraverso il prosieguo del cunicolo esplorativo all'interno della zona geologicamente complessa denominata "Linea Periadriatica" e la costruzione delle opere di supporto logistico, sarà possibile da un lato acquisire le informazioni necessarie alla progettazione delle tratte di galleria di linea all'interno della suddetta linea geologicamente complessa, e dall'altro organizzare la logistica di gestione dei materiali di smarino e di approvvigionamento in modo tale da ridurre ai minimi termini l'impatto sul territorio e ottimizzare i tempi di costruzione delle opere principali.

Le opere oggetto di progettazione consistono essenzialmente nella realizzazione del cunicolo esplorativo della tratta di attraversamento del lineamento tettonico "Periadriatica", dall'estesa di circa 1400m in direzione Nord a partire dal punto di innesto della Finestra di Mules al tracciato principale della Galleria di Base del Brennero, e delle cosiddette "Opere Propedeutiche ambito Mules, consistenti in una serie di gallerie, caverne e cunicoli, sempre localizzate in corrispondenza del punto d'innesto della Finestra di Mules con il tracciato della galleria principale, che si estendono per circa 200m in direzione Sud e circa 1200m in direzione Nord del suddetto punto di innesto, oltre che in prossimità dell'imbocco della finestra di Mules.

4.1.1 Sistema di Gallerie come supporto logistico

Con "Sistema di gallerie come supporto logistico" si intende un insieme di cavità, facenti parte del complesso sistema della galleria di base, la cui costruzione permette una gestione organizzata dei materiali di smarino provenienti dai fronti di scavo e di quelli di approvvigionamento necessari alla realizzazione in sicurezza degli scavi. In questo modo una parte delle funzioni che ordinariamente sono collocate all'esterno con il conseguente problema di gestione del rumore e delle polveri, potranno essere confinate all'interno di cavità sotterranee evitando alla radice i problemi di cui sopra.

L'insieme delle opere che costituiranno il sistema di supporto logistico è il seguente:

- 1- Ramo B della discenderia di Mules di collegamento alla galleria d'innesto
- 2- Galleria d'innesto
- 3- Galleria di linea Binario Pari e Binario Dispari verso Nord della galleria di innesto, per una lunghezza di circa 1200m
- 4- Galleria di collegamento Cunicolo-Canna Ovest
- 5- Cunicolo trasversale di collegamento Canna Ovest- Canna Est alla progressiva 48 +290
- 6- Cunicolo trasversale di collegamento Canna Ovest- Canna Est alla progressiva 48 +570
- 7- Camerone di montaggio TBM verso Sud, Ovest ed Est
- 8- Camerone logistico, trasversale ai camerone di montaggio TBM e relativa galleria di collegamento con la finestra di Mules
- 9- Caverna per la futura centrale di ventilazione di estrazione e relativa galleria di collegamento alla finestra di Mules, ubicata in corrispondenza dell'imbocco della finestra
- 10- Pozzo di ventilazione al servizio della caverna di ventilazione di estrazione

Fa parte delle infrastrutture logistiche, del gruppo di opere connesse a questo lotto dei lavori anche la realizzazione di una zona di carico\scarico in corrispondenza della cosiddetta "area di cantiere n.3", destinata ad assolvere una funzione logistica di costruzione durante l'esecuzione dei lavori principali.

Per ragioni legate all'importanza delle funzioni attribuite alle singole cavità, ed anche nel rispetto delle previsioni di spesa, le opere evidenziate con i punti 1,2,4,7 ed 8 sono state identificate come "opere propedeutiche prioritarie", mentre il resto delle rimanenti lavorazioni fa parte delle cosiddette "opere propedeutiche opzionali".

Tutte le opere sopra-menzionate serviranno da supporto logistico alla realizzazione delle gallerie di linea. Al termine delle lavorazioni esse perderanno la funzione logistica assunta durante la realizzazione e verranno completamente integrate all'interno del sistema della galleria di base, per assumere definitivamente la funzione assegnata progettualmente.

4.1.2 Il Cunicolo Esplorativo

Il cunicolo esplorativo nella tratta del Lineamento Periadriatico si inserisce nel più ampio contesto del progetto della Galleria di base del Brennero.

Più in dettaglio, il tratto del cunicolo del lineamento Periadriatico oggetto della progettazione si sviluppa parallelo alla galleria del Brennero passando sotto la val di Mules. Esso, unitamente al settore di cunicolo già in fase di realizzazione (Cunicolo esplorativo Aica Mules) ed al futuro completamente del cunicolo stesso fino al confine, si sviluppa, in gran parte, parallelamente alla Galleria di Base del Brennero ad una quota di circa 12m inferiore, per poi diramarsi collegandosi alla zona di Aica, area ove saranno drenate le acque di galleria e dove sarà allocata la maggior parte dei materiali di scavo estratti nella parte Italiana dell'opera (deposito Hinterrigger).

In considerazione della lunghezza (circa 1.5 km-la sola tratta all'interno della linea geologicamente complessa) e dei materiali attraversati dallo scavo (essenzialmente Granito di Bressanone, Tonalite di Mules, e Basamento cristallino di Paragneiss), la galleria sarà realizzata con tecniche di scavo tradizionali.

4.1.3 Ubicazione delle opere oggetto della progettazione

La corografia della illustrazione 1 riporta la collocazione di tutte le opere in appalto con riferimento alla localizzazione rispetto al cantiere ed alla finestra di Mules.

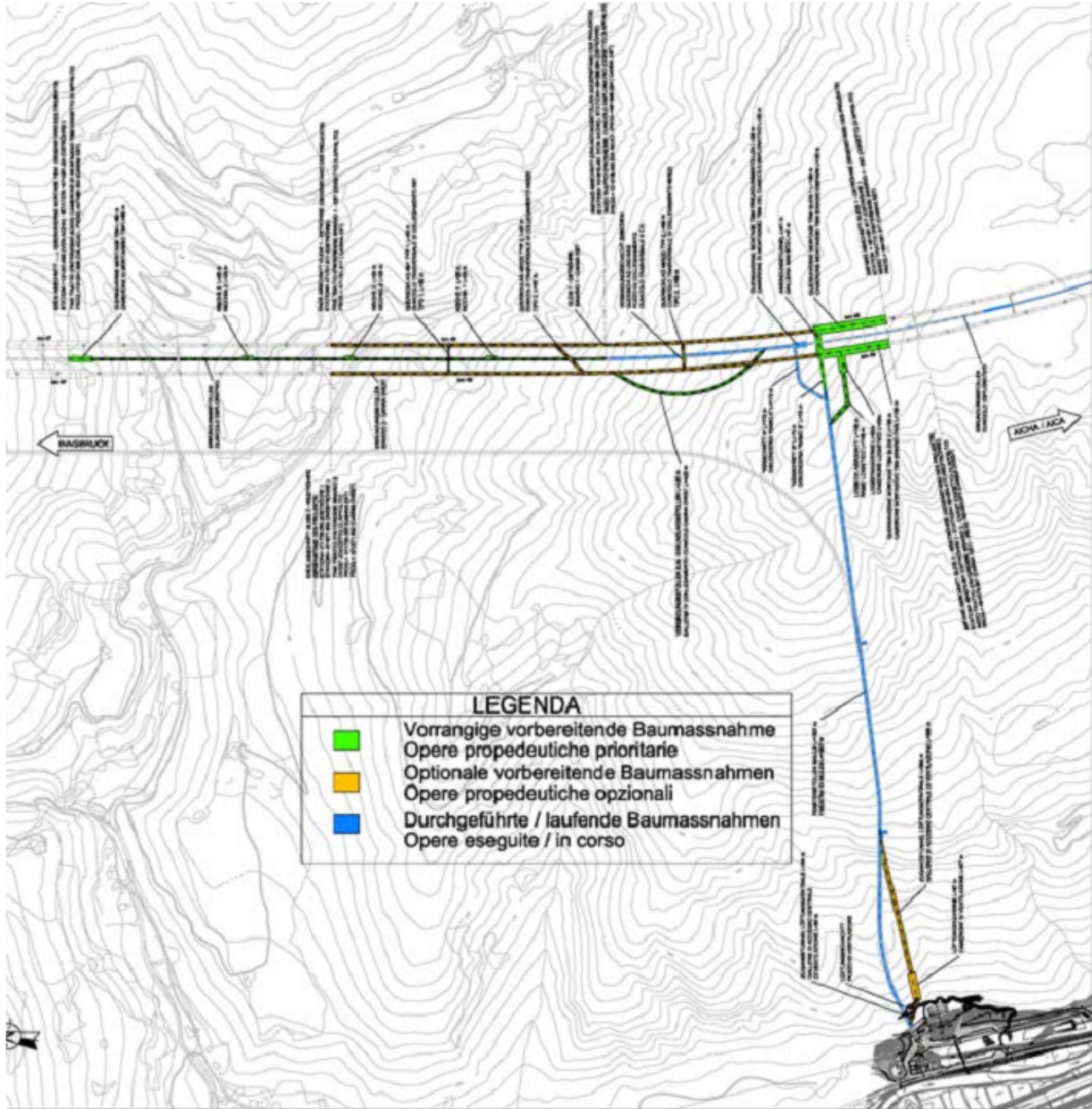


Figura 4-1 Corografia d'insieme

4.1.4 Aspetti logistici

Nella progettazione generale della Galleria di Base di Brennero la logistica di costruzione costituisce una parte essenziale ed integrante dell'intera progettazione. La logistica costituisce l'elemento di sintesi delle esigenze tecniche, costruttive ed economiche con quelle di carattere ambientale derivanti dalle prescrizioni di natura ambientale, emerse nel corso delle procedure autorizzative e divenute elementi vincolanti della progettazione.

L'organizzazione della cantierizzazione, la movimentazione ed il trattamento delle grandi quantità che sono attese dagli scavi delle opere principali in generale anche negli anni futuri, rappresenta uno degli argomenti verso i quali l'attenzione delle autorità competenti è molto presente per le ripercussioni di carattere ambientale che tale attività può determinare.

In tutte le fasi progettuali della progettazione definitiva del tunnel di base del Brennero questo argomento è sempre stato sviluppato in modo dettagliato sia con riferimento alle previsioni sui quantitativi di materiali provenienti dagli scavi, sia con riferimento ai materiali da riutilizzare ed alle conseguenti organizzazioni delle aree di cantiere e di deposito.

Le opere oggetto di appalto attengono, da un lato, all'esecuzione dell'importante tratto di cunicolo di attraversamento della linea Periadriatica, dall'altra, all'esecuzione di opere che assumeranno funzioni rilevanti per la logistica di costruzione del cantiere di Mules, nell'ambito della realizzazione delle opere principali.

Come è noto, il cantiere di Mules rappresenta il cantiere principale dal quale saranno eseguiti la maggior parte degli scavi nel tratto italiano della Galleria di Base del Brennero. Pertanto, le opere e/o le dotazioni impiantistiche da realizzare con il presente lotto di costruzione, rappresentano un fattore determinante per riuscire a coniugare le esigenze di carattere tecnico-costruttivo con quelle di carattere ambientale, quest'ultime risultanti dai vincoli imposti nell'ambito degli iter autorizzativi svolti.

Prescindendo dalle opere relative all'esecuzione del tratto di cunicolo "Periadriatica", che hanno finalità esclusivamente geognostiche, la selezione delle opere propedeutiche è stata effettuata per realizzare, e quindi poterne disporre già nelle primissime fasi di realizzazione del progetto complessivo della Galleria di Base del Brennero, di tutte le infrastrutture necessarie, atte ad ospitare le dotazioni impiantistiche maggiormente rilevanti per la logistica di costruzione delle opere principali, con particolare attenzione a quelle dotazioni che risultano essenziali per l'osservanza delle prescrizioni emerse dalle procedure VIA relative al trasporto ed allocazione dei materiali di scavo che dovrà avvenire utilizzando sistemi di trasporto a basso impatto ambientale (nastri trasportatori, treni di servizio, ecc.) e senza utilizzare la viabilità ordinaria.

La disponibilità delle opere propedeutiche oggetto di appalto costituisce inoltre il presupposto minimo indispensabile per il trasferimento di una parte rilevante delle funzioni inerenti la gestione dei materiali di scavo e l'approvvigionamento dei materiali di costruzione in sotterraneo.

Occorre precisare che le opere oggetto di appalto sono complementari alla parte di opere già realizzate nell'ambito dei precedenti lotti di costruzione e ne completano o implementano la configurazione allo scopo di renderle idonea alle funzioni logistiche previste.

4.2 SITUAZIONE GEOLOGICA E GEOTECNICA COINVOLTA DAL LOTTO DEL TUNNEL DI BASE DEL BRENNERO

4.2.1 Quadro generale degli ammassi rocciosi rispetto alla faglia periadriatica

4.2.1.1 Geologia a Sud della Periadriatica

Se si fa eccezione del cunicolo esplorativo, al quale si accennerà nel prossimo punto, ed ad una piccola porzione terminale delle gallerie principali che interesseranno il contatto tra Tonalite e Granito, che costituisce l'inizio del lineamento tettonico che fa capo alla linea Periadriatica, tutte le opere in appalto, si collocano a Sud della Periadriatica.

Esse si svilupperanno pertanto interamente nel basamento cristallino del Granito di Bressanone, costituito prevalentemente da graniti e granodioriti e localmente da rocce di origine ipoabissale (apliti e pegmatiti).

I graniti di cui sopra sono stati ampiamente analizzati in quanto lo scavo del cunicolo e del ramo di innesto della finestra di Mules al cunicolo è avvenuto all'interno di questo ammasso roccioso.

Si è potuto così constatare la struttura reale dell'ammasso ed i fenomeni di comportamento allo scavo dello stesso. Di questi fenomeni, il più interessante dal punto di vista del controllo in fase di scavo è risultato il "rock burst", ovvero il rigetto violento di piccole porzioni di roccia, a testimonianza del comportamento fragile dell'ammasso stesso, assoggettato ai carichi derivanti dalle forti coperture che in zona raggiungono i 1200 m.

Fa parte delle opere poste a Sud della Periadriatica, anche la futura centrale di ventilazione la quale è stata posizionata in prossimità dell'imbocco della discenderia di Mules. La realizzazione della caverna di ventilazione e delle relative gallerie di accesso avviene in una zona già attraversata dalla finestra di Mules.

Caverna e gallerie si sviluppano interamente nel basamento cristallino del Granito di Bressanone, costituito prevalentemente da graniti e granodioriti e localmente da rocce di origine ipoabissale (apliti e pegmatiti).

Le caratteristiche meccaniche dell'ammasso risultano decisamente buone garantendo per il cavo condizioni di stabilità. Non si evidenziano particolari problemi legati alla stabilità.

In considerazione delle modeste coperture presenti (variabili da ca. 50 m a ca. 400 m) non sono attesi neppure fenomeni di rilascio violento delle tensioni di ammasso, di tipo "Rockburst, Spalling, Slabbing".

Grazie alle informazioni acquisite durante lo scavo della finestra di Mules che ha confermato le buone qualità dell'ammasso roccioso non si rendono necessarie indagini dirette in avanzamento. Le quantità di venute d'acqua previste sono modeste sia per le opere poste in corrispondenza del cunicolo esplorativo che della zona di imbocco della discenderia.

4.2.1.2 La Linea Periadriatica

Per il presente lotto dei lavori, la linea Periadriatica verrà attraversata dal prolungamento verso Nord del cunicolo esplorativo già realizzato.

Il cunicolo nella tratta "lineamento Periadriatico" si sviluppa interamente in corrispondenza della valle di Mules e attraversa principalmente da S a N il basamento cristallino del Granito di Bressanone costituito prevalentemente da graniti e granodioriti, dalla lamella tonalitica di Mules e dal basamento cristallino austroalpino di Paragneiss composto da anfiboliti, micascisti, e intercalazioni locali di ortogneiss.

Lo stato attuale delle conoscenze, scaturite dagli studi e rilievi condotti nonché dall'analisi dei sondaggi eseguiti in zona evidenziano che le numerose faglie danno origine ad una zona di disturbo molto complessa sul piano tecnico-costruttivo, ulteriormente aggravata dalle previste venute d'acqua. L'estensione della tratta dove sono previste condizioni tecnico-costruttive molto complesse è da ritenersi non superiore a 200 m. Nel tratto restante non sono da attendersi particolari problematiche di carattere geologico.

Si evidenzia che l'ammasso roccioso, al di fuori delle zone di faglia, non presenta particolari criticità dal punto di vista del comportamento allo scavo, fatta eccezione per il fenomeno noto come "rockburst" (colpo di montagna), associabile alle ottime caratteristiche meccaniche della roccia e alle elevate coperture.

Le coperture massime sopra la calotta del cunicolo si aggirano intorno ai 1040 m. Le coperture "fittizie o efficaci", rilevate mediante le prove di fratturazione idraulica eseguite, raggiungono i valori intorno ai 1150m.

Come anticipato brevemente, l'attraversamento della linea Periadriatica sarà presumibilmente caratterizzato da importanti pressioni idrostatiche. I piezometri installati in zona hanno misurato pressioni superiori ai 70 bar anche se non è identificabile la zona dove agiscono tali pressioni.

In queste condizioni sono di fondamentale importanza le informazioni acquisite tramite le indagini dirette in avanzamento che devono essere eseguite con l'ausilio di preventer in grado di gestire le pressioni attese che possono essere superiori anche ai 100 bar.

4.2.1.3 Geologia a Nord della Periadriatica

Dal punto di vista geologico lo scavo del cunicolo nel tratto di interesse ha di fatto confermato quanto previsto in fase di progettazione definitiva. Ovviamente la possibilità di avere accesso diretto all'ammasso roccioso permette di introdurre alcune precisazioni, che però non modificano in sostanza la previsione originaria.

L'ammasso roccioso attraversato era costituito da graniti a grana media riferibili al Granito di Bressanone, sporadicamente attraversati da filoncelli aplitici e/o da filoni basici di colore grigio scuro fino a nero e di spessore da decimetrico fino a metrico.

Non sono state incontrate faglie significative e lo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso era sempre caratterizzato da una densità di fratture non particolarmente elevata e da assenza di importanti livelli di rocce di faglia.

Riguardo l'assetto idrogeologico riscontrato, si denota quanto segue. Nel tratto di cunicolo che va dal camerone di smontaggio della TBM al fronte della progressiva 10+913 (fronte attuale), si distinguono due zone:

- dalla finestra di Mules fino all'incirca alla progress. 10+750 sono presenti stillicidi localizzati dovuti ad una permeabilità di ammasso bassa (le pressioni misurate sui preventori arrivano anche a 70 bar)
- dalla progress. 10+750 alla 10+913 circa sono invece state registrate venute d'acqua concentrate drenate da sistemi a permeabilità elevata connessi a fratture aperte.

Quanto sopra è congruente alla previsione idrogeologica che riporta l'avvicinarsi alla linea Periadriatica come una zona a potenziali consistenti venute d'acqua.

A canale di drenaggio non attivato, che sarà costituito dal cunicolo Aica Mules in fase di costruzione, (ad oggi: Luglio 2010) si pompano a regime fino all'imbocco della finestra di Mules circa 15 l/sec. E' stata registrata una reazione dei piezometri installati nei fori eseguiti dalla superficie e perciò si può realisticamente supporre che tra le venute d'acqua in galleria e le misure piezometriche ci sia una diretta connessione.

Nel tratto di cunicolo scavato con TBM sono presenti solo venute d'acqua localizzate. L'attuale portata in uscita su quasi 9 km scavati si aggira attorno ai (50 l/sec).

In sintesi quindi: le informazioni ricavate dallo scavo del cunicolo hanno confermato anche in questa zona le buone-ottime proprietà meccaniche dell'ammasso granitico.

In sintesi quindi: le informazioni ricavate dallo scavo del cunicolo hanno confermato anche in questa zona le buone-ottime proprietà meccaniche dell'ammasso granitico.

4.2.1.4 La finestra di Mules

Le informazioni riportate in estrema sintesi nel seguito sono state ricavate dalla documentazione geologica acquisita dalla BBT nel corso dello scavo della Finestra di Mules tramite la Direzione Lavori.

I dati riguardano quindi circa 1800 m di scavo (tanto è lunga all'incirca la Finestra di Mules) e sono quindi da ritenersi statisticamente più che rappresentativi per quanto riguarda lo stato dell'ammasso roccioso del Granito di Bressanone.

La litologia riscontrata, come per il cunicolo esplorativo, è monotona e rappresentata da graniti a grana media. Non sono state osservate faglie cartografabili e rappresentabili sulla sezione geologica; tuttavia i fronti indicano la presenza di piccole faglie, con spaziatura di ordine decametrico, costituite da una zona di nucleo con rocce di faglia (brecce tettoniche) di spessore fino a decimetrico e da una zona di danneggiamento potente fino a un paio di metri per ogni lato della faglia.

Le faglie hanno direzione NNE-SSW ed immergono ad alto angolo verso ESE. Tali giaciture vanno confrontate con quella dell'asse della Finestra di Mules che di fatto va da E ad W immergendosi per un angolo corrispondente alla pendenza del 10% circa.

La presenza delle faglie sembra condizionare in maniera marcata lo stato di fratturazione, nel complesso comunque molto modesto, poiché in questo tratto dominano i giunti con direzione simile alle faglie.

Riguardo l'assetto idrogeologico, durante lo scavo sono stati registrati pochi stillicidi localizzati dovuti alla bassa permeabilità generale dell'ammasso a fronte di pressioni misurate anche dell'ordine dei 50 bar nella zona bassa della discenderia (oltre 1 Km dall'imbocco).

In sintesi quindi: le informazioni ricavate dallo scavo della finestra di Mules hanno confermato le buone-ottime caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso.

Le faglie previste nel progetto esecutivo si sono rivelate meno problematiche di quanto atteso, per cui la sezione tipo di scavo ivi applicata é identica a quella applicata al di fuori delle zone di faglia e consiste nell'applicazione di un rivestimento di prima fase in spritz-beton e bullonature in calotta.

Le venute d'acqua sono state modeste e perlopiù derivanti da stillicidi sparsi, anche a fronte di forti pressioni idrostatiche misurate sui preventer verso la parte bassa della galleria.

4.2.2 Relazione geotecnica

4.2.2.1 Introduzione

Il presente rapporto descrive la situazione geologica di un lotto del Tunnel di Base del Brennero inerente le opere Propedeutiche ambito Mules e relativo cunicolo esplorativo nel tratto di attraversamento della linea Periadriatica.

Si tratta in particolare di un lotto che, a partire dal piede della Galleria di Accesso di Mules, sul versante italiano, prevede l'attraversamento della così detta Linea Periadriatica, una importante discontinuità geologica, e di alcuni sistemi di faglia ad essa associati.

Il lotto prevede la realizzazione di circa 1300 metri di cunicolo esplorativo e delle cosiddette "Opere Propedeutiche ambito Mules, consistenti in una serie di gallerie, caverne e cunicoli, sempre localizzate in corrispondenza del punto d'innesto della Finestra di Mules con il tracciato della galleria principale, che si estendono per circa 200m in direzione Sud e circa 1200m in direzione Nord del suddetto punto di innesto, oltre che in prossimità dell'imbocco della finestra di Mules.

La progressivazione delle Opere Propedeutiche ambito Mules ("sistema di galleria come supporto logistico"), è quella generale dell'Opera ed è riferita alla stazione di Innsbruck. Esse vengono rappresentate con carattere "normale".

La progressivazione delle Opere del cunicolo esplorativo, è invece riferita all'imbocco di Aica, da dove sono stati avviati i lavori di scavo del cunicolo esplorativo nella tratta italiana dell'Opera. Dette progressive vengono rappresentate con carattere "corsivo" e "sottolineato".

Le infrastrutture verranno realizzate a partire dal piede della Galleria d'accesso di Mules (già scavata) verso nord. Tuttavia, mentre parte del cunicolo esplorativo (circa 480m) a partire dal piede della galleria d'accesso è già stata realizzata nel medesimo lotto costruttivo di quest'ultima, i due tronconi delle canne sono interamente da realizzare.

Pertanto, lo scavo del cunicolo inizierà a partire dalla progressiva 10+916(48+386 sulla canna est del tunnel principale) coincidente con la posizione del fronte raggiunto dai lavori del lotto precedente e si spingerà fino alla progressiva 12+242(47+061 sulla canna est del tunnel principale).

Lo scavo delle due canne inizierà invece a partire dal piede della galleria d'accesso, rispettivamente alle progressive 48+909 per la canna est e 48+873 per la canna ovest. Gli scavi raggiungeranno le progressive 47+700 per la canna est (binario dispari) e 47+628 per la canna ovest (binario pari).

Il lotto comprende inoltre la realizzazione di numerosi tunnel di servizio, tra cui: i) un cunicolo di collegamento tra canna ovest e cunicolo esplorativo; ii) una galleria d'innesto dal piede della Galleria di Mules alla canna est; iii) due cameroni di montaggio TBM scavati in asse alle due canne principali a partire dal piede della Galleria di Mules verso sud; iv) un camerone logistico al piede della Galleria d'accesso di Mules; v) un camerone di ventilazione prossimo all'imbocco della Galleria d'accesso di Mules.

4.2.2.2 Modello Geologico

Il lotto in progettazione si sviluppa a cavallo tra due domini paleogeografici della catena alpina: i) il dominio Sudalpino (verso sud), costituito, nel settore in esame, da graniti (Granito di Bressanone); ii) il dominio Austroalpino (verso nord), costituito, nel settore in esame, da paragneiss e filladi.

Il limite tra i due domini è sottolineato da una delle discontinuità tettoniche più importanti della catena, rappresentata dalla così detta Linea Periadriatica, che in questo settore si compone di diversi elementi, tra cui la faglia della Pusteria (direzione circa E-W) e la Linea Sprechenstein – Mules (direzione circa NWSE).

Tra le due discontinuità citate è presente una zona a scaglie tettoniche dei due domini, che include anche delle magmatiti oligoceni che note come Lamella tonalitica di Mules.

4.2.2.3 Previsione Geologica

- Km 49+101 – 48+205. Granito di Bressanone con prevalenza di condizioni di bassa densità di fratturazione ed assenza di faglie rilevanti; tuttavia a partire da 50-70m a sud della pK 48+205 si entrerà verosimilmente nella zona d'influenza della faglia della Pusteria con roccia molto fratturata o brecciata.

- Km 48+205 – 47+425. Prevalenza di tonaliti della Lamella di Mules nel settore più meridionale per passare poi a paragneiss del dominio Austroalpino nel settore più settentrionale. L'intera tratta si sviluppa però tra le faglie della Pusteria e di Sprechenstein-Mules, saranno quindi frequenti i tratti con forte deformazione fragile e la presenza di scaglie tettoniche (es. scaglie di filladi carboniose).

- Km 47+425 – 47+061. Prevalenza di paragneiss e micascisti a due miche del dominio Austroalpino con scarsi fenomeni di deformazione fragile e assenza di faglie importanti.

4.2.3 Modello Geologico dell'area di progetto

4.2.3.1 Contesto geologico regionale

La Galleria di Base del Brennero attraversa geograficamente la parte centrale delle Alpi Orientali. Dal punto di vista geologico (Illustrazione 1:) interseca invece il nucleo della zona di collisione tra la placca europea e quella adriatica (africana). In questo settore, la così detta Finestra dei Tauri, attraversata dal tracciato del tunnel di base, costituisce un settore di crosta derivante dalla placca europea con metamorfismo alpino tipico di profondità maggiori rispetto a quello dei settori adiacenti (metamorfismo alta temperatura e bassa pressione), ove si osserva la sovrapposizione di più falde tettoniche delle Alpi Orientali. Il bordo della Finestra dei Tauri, sia verso nord in Austria), sia verso sud (in Italia) risulta costituito da litotipi del margine del continente adriatico (Austroalpino auct.) con metamorfismo di più bassa temperatura rispetto a quello della finestra. Verso sud il complesso Finestra dei Tauri Austroalpino è delimitato dalla Linea Periadriatica, un'importante zona di faglia da sin- a post - metamorfismo alpino. L'attraversamento in galleria di questo importante limite tettonico è appunto l'oggetto del lotto costruttivo cui si riferisce il presente rapporto. A sud del Lineamento Periadriatico si rinvencono le Alpi Meridionali (dominio Sudalpino), perlopiù prive di metamorfismo di età alpina. Complessivamente in questo settore domina, soprattutto verso sud, una tettonica di pieghe e di faglie inverse, immergenti in direzione sud.

4.2.3.2 Assetto litostratigrafico

Da nord a sud il lotto oggetto di questo rapporto attraverserà le tre seguenti unità tettonostratigrafiche:

- Austroalpino a sud della Finestra dei Tauri;
- Magmatiti calcocaline oligoceniche (Lamella tonalitica di Mules auct.)
- Sudalpino.

Nella illustrazione 2 sono descritte brevemente le unità litologiche previste per il cunicolo esplorativo ed è indicata la loro presenza nei sondaggi realizzati dalla superficie durante le fasi di studio e progettazione definitiva.

Ostalpin südlich des Tauernfensters			Austroalpino a sud della Finestra dei Tauri		
750	Phyllonite unsicherer stratigraphischer Stellung	Phyllonitische Graphitschiefer, Kalkphyllite und Quarzite	<i>Filoniti di posizione stratigrafica incerta</i>	Scisti grafici, filadi carbonatiche e quarziti filonitici	Mu-B-03/05s: 131,16-212,45m & 330,75-354,60m.
801	Polymetamorphes ostalpines Kristallin	Feinkörnige Paragneise (Zweiglimmergneise mit Granat), Tektonite in niedriggradiger Grünschieferfazies, Einschaltungen von Orthogneisen, Amphiboliten, Quarziten, Marmoren und Pegmatiten	<i>Basamento cristallino polimetamorfico</i>	Paragneiss a grana fine (gneiss a due miche e granato), tettoniti in facies scisti verdi di basso grado, intercalazioni di orthogneiss, amphiboliti, quarziti, marmi e pegmatiti	Mu-B-02/00s: 18,5-271,00m. Se-B-01/05: 342,65-664,00m.
Oligozäne kalkalkaline Magmatite			Magmatiti calcalkalini oligocenici		
902	Oligozäne kalkalkaline Magmatite	Geschieferte Tonalite und Granodiorite (Rensen Pluton), Hornblendetonalite mit kleinen lokalen Vorkommen von Diorit und Gabbro (Maulser Tonalitlamelle) und sehr untergeordnet Andesite und Dazit (Gänge, selten)	<i>Magmatiti calcalkalini oligocenici</i>	Tonaliti e granodioriti foliati (plutone di Rensen), tonaliti a omblendita con piccoli affioramenti locali di diorite e gabbro (lamella tonalitica di Mules) e molto subordinatamente andesiti e daciti (filoni, rari)	Mu-B- 03/05s: 237,85-296,10 & 367,75-901,50 Mu-B-04/05s: 89,60-314,40m.
Südalpin			Alpi meridionali		
1001	Brixner Granit	Biotit-Granite, Biotit-Amphibol-Granodiorite, manchmal Zweiglimmergranite, Gabbro von Scheibenberg-Spiluk, Ganggesteine (untergeordnet): Pegmatite, Aplite, Quarz im Granit, Porphyrit im Gabbro	<i>Granito di Bressanone</i>	Graniti a biotite, granodioriti amphibolitici a biotite, talvolta graniti a due miche, gabbro di Spelunca-Monte del Bersaglio, rocce filoniane (subordinatamente): pegmatiti, apfite, quarzo nei graniti, porfiriti nei gabbri	Mu-B-04/05s: 327,80-750,00m. Rb-B-01/05, Rb-B-02/05.

Figura 4-2 Descrizione breve delle unità litologiche previste per il cunicolo esplorativo e loro presenza nei sondaggi esplorativi BBT

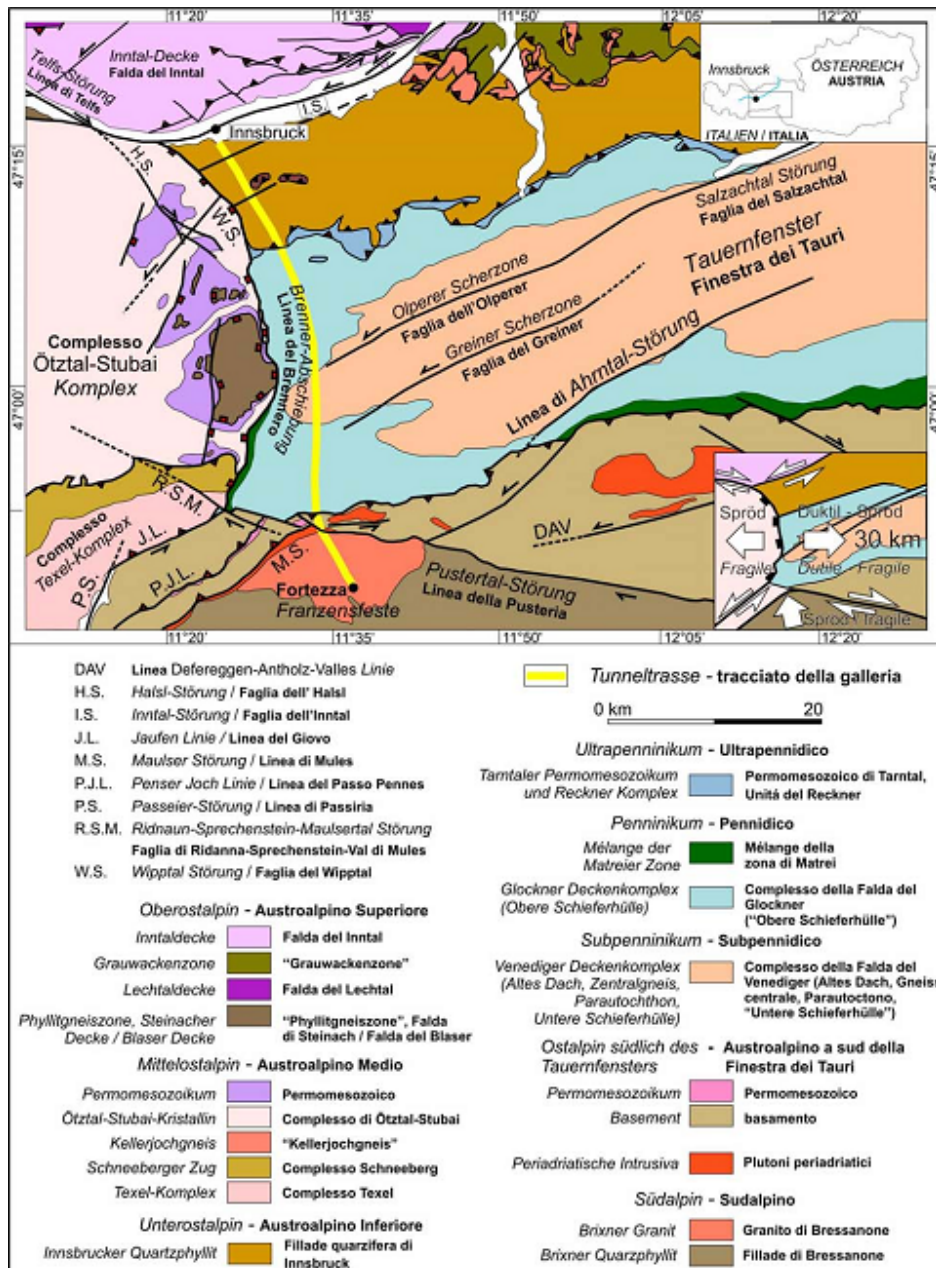


Figura 4-3 Carta Tettonica generale della Finestra dei Tauri occidentale. Modificato Brandner, 1980, integrato secondo Mancktlelow et al. 2001.

4.2.3.3 Assetto geologico-strutturale

L'Austroalpino a sud della Finestra dei Tauri consiste di un basamento varisco-metamorfico con una copertura di sedimenti permotriassici (coperture di Mules). Il basamento presenta in parte una struttura prealpina. È stato sovrappreso assieme alla sua copertura da una metamorfosi in facies scisti verdi ed è stato deformato fortemente in alcune parti.

La Lamella tonalitica di Mules appartiene al magmatismo calcocalino intruso nell'Austroalpino durante l'Oligocene nella zona presso il Lineamento Periadriatico. La lamella tonalitica è delimitata tettonicamente su tutte le parti (Faglia della Pusteria a N e S) e presenta anche all'interno fenomeni di deformazione duttili e fragili intensi. La deformazione duttile si manifesta con una scistosità notevole che si presenta su zone sottili con una forte scistosità milonitica.

A sud del Lineamento Periadriatico (nella zona del tracciato faglia di Pusteria S) si estende il Sudalpino. Nel corridoio esso consiste del Granito di Bressanone intruso nel Permiano, che è privo di una metamorfosi regionale alpina e di una deformazione duttile.

4.2.3.3.1 Le opere nel corridoio

Le opere in progetto attraversano la Faglia Periadriatica nella zona di transizione di due segmenti ad orientamento diverso (Illustrazione 4):

- La faglia della Pusteria, orientata E-W
- Il sistema di faglia di Sprechenstein - Mules, orientato NW-SE

I rilevamenti in questa zona di transizione hanno dimostrato che la faglia della Pusteria viene dislocata dal sistema di faglia Sprechenstein - Mules. Questo sistema di faglia consiste di faglie trascorrenti destre a direzione NW-SE, che stanno in correlazione cinematica con faglie inverse ad immersione ad alto angolo verso nord con top verso sud. Queste faglie inverse formano il limite tettonico settentrionale delle coperture permomesozoiche di Mules.

Nel settore di progetto sudalpino è presente un sistema di faglie complesso – che rimanda ad un'alterazione profonda. Le più marcate sono faglie subverticali con andamento NE-SW e la faglia del Rio Bianco con andamento ca. N-S.

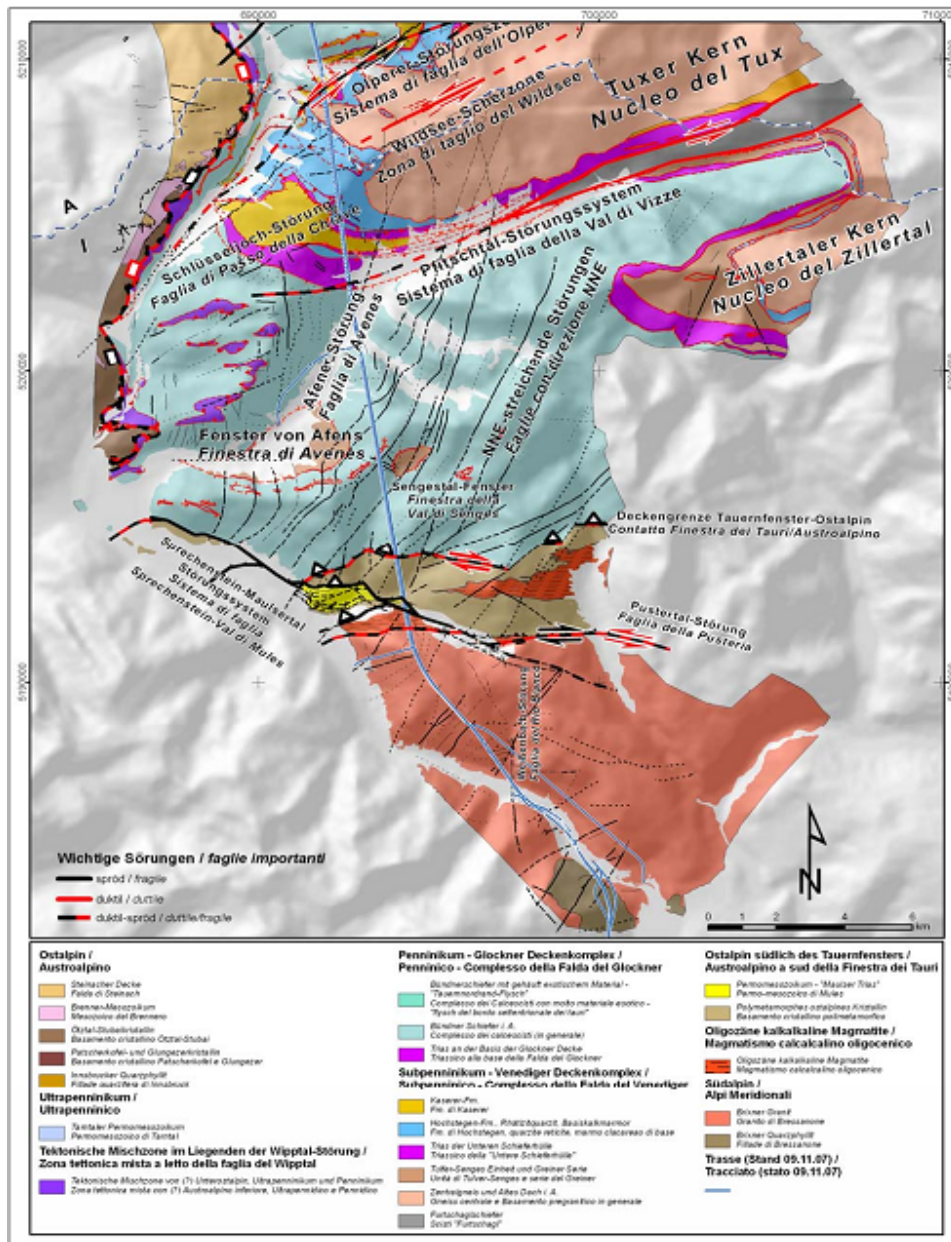


Figura 4-4 Carta Tettonica generale per il settore meridionale dell'area di progetto della galleria di base del Brennero

Sprechenstein-Maulserthal Störungssystem	NW-SE	70-80° SW	dec.	sprödd	SW07 SW04 SW03 SW10	47285 47435 47540 47655	Mu-B-03/05s	Transferrungen zu südgerichteten Aufschiebungen des catalanen Kristallins auf die Maulser Trias bzw. der Glockner Decke auf Ostalpin	
								folgie di transfer di foglia inverse top S (basamento cristallino austroalpino sopra frisa di Mules risp. la folla del Glockner)	parte del linamento Pireneoalco
Sprechenstein- Val di Mules	NW-SE	70-80° SW	dec.	fragile	PS11	48205	Mu-B-04/05s	Teil der Periadriatischen Linie	
Pustertal-Störung (Maulser Störung)	WE	80-90° N	dec.	sprödd				parte del linamento Pireneoalco	
Faglia oblique Pustertal (Faglia del Mules)									
NE-streichende Störungen Bruner Granit	SW-NE	65-80° SE	?	sprödd	SG30 SG36 411 SG07 SG06 SG09 3C 201 SG11 SG19 SG12 SG12	48375 48605 50604 51230 51640 51960 52285 52646 53045 53125 53400	Mu-B-04/05s		
Faglia con direzione NE, grünit di Bressanone			?	fragile					
N-S-streichende Störungen, Wellenbach-Störung	N-S	subvertical	?	sprödd	SG103 SG102	53100 54000	Re-B-02/05		
Faglia con dir. N-S, Faglia del Rio Bianco		subverticale	?	fragile					

Figura 4-5 Tabella riassuntiva dei sistemi di faglia più importanti nell'area del lotto in progettazione e nelle sue vicinanze

4.2.3.3.2 Neotettonica

Riguardo alla neotettonica i risultati più importanti per il settore del lotto in progetto e più in generale per il settore italiano del tunnel di base si possono riassumere nel modo seguente:

- Nel settore italiano dell' area di progetto è prevista la presenza di faglie potenzialmente attive il cui spostamento, tuttavia, rimane molto probabilmente al di sotto di 1 mm all'anno.
- Sono classificate come potenzialmente attive la faglia di Sprechenstein - Mules e le faglie associate tra la Val di Vize e Mules

• Le relative faglie sono riportate nell'elenco della Illustrazione 7 e classificate a grandi linee sulla base dei dati neotettonici disponibili e dei previsti tassi di movimento. I criteri di classificazione sono riportati nella successiva Illustrazione 6:

<ul style="list-style-type: none"> • (VG) faglie con chiare evidenze di attività tettonica recente per ripetuti episodi di movimento nel corso del tardo Quaternario e per le informazioni sull'entità dei movimenti derivate da analisi paleosismologiche o morfotettoniche.
<ul style="list-style-type: none"> • (G) come (VG), tuttavia non esistono informazioni quantitative sui movimenti bensì, talvolta, informazioni qualitative.
<ul style="list-style-type: none"> • (F) faglie che diversi autori definiscono attive o inattive, talvolta con l'indicazione dell'entità del movimento.
<ul style="list-style-type: none"> • (P) faglie con geometria ed estensione longitudinale mal definite e con importanza sismotettonica incerta.

Figura 4-6 Classificazione delle faglie attive/potenzialmente attive sulla base dei dati (Boncio et al. 2004, modificato secondo Galadini et al., 2000).

Klasse / classe	v_{10} [mm/a]	R.I. ($\bar{u}=1m$) [a]	R.I. ($\bar{u}=10m$) [a]
AA	>10	<100	<1000
A	1-10	100-1000	1000-10000
B	0.1-1.0	1000-10000	10000-100000
C	0.01-0.1	10000-100000	100000-1000000

Figura 4-7 Classificazione delle faglie attive secondo la percentuale media di movimento v (Matsuda, 1976). E' indicato anche il tempo di ritorno dei terremoti (R.I.) a seconda del valore caratteristico di movimento u , secondo la relazione di Wallace, 1970.

Störungsname nome della faglia	Nr. D0104	Bezeichnq. Geotechnik denom. geotechnico	Daten- grundlage dati base	Bewegungs- rate tasso di movimento	Regionales Stör- ungssystem sistema di faglia regionale
NNE-streichende Störungen südl. Pfitschtal Faglie con direzione NNE a sud della Val di Vizze	-		F	B-C	Judikarien Giudicarie
Sprechenstein-Maulsertal Stör- ungssystem Sistema di faglia Spre- chenstein - Mules	-		F	B-C	Pustertal Val Pusteria

Figura 4-8 Classificazione delle faglie nell'area del lotto in progettazione rispetto all'attività tettonica. Per i dati e i tassi di spostamento si veda l'illustrazione 6/ Figura 4-9

4.2.4 Dati acquisiti con lo scavo del cunicolo esplorativo e della finestra di accesso di Mules

4.2.4.1 Cunicolo esplorativo

Come ricordato nel capitolo introduttivo, nel lotto in progettazione parte del cunicolo esplorativo (circa 430m) è già stata scavata durante i lavori relativi ad un precedente lotto. I dati raccolti in fase di scavo sono di interesse per il futuro scavo delle canne principali nella tratta che affiancherà questa parte di cunicolo già scavata, ovvero tra la progressiva 48+200 e 48+909 per la canna est (binario dispari) e 48+200 e 48+873 per la canna ovest (binario pari).

I dati as-built sono raccolti nella documentazione prodotta dalla Direzione Lavori del lotto precedente (DLB – Direzione Lavori Brennero). Ciò che segue è invece una sintesi ragionata di quanto desumibile dai rilievi di cui sopra.

Dal punto di vista geologico lo scavo del cunicolo nel tratto di interesse ha sostanzialmente confermato quanto previsto in fase di progettazione definitiva. Ovviamente la possibilità di avere accesso diretto all'ammasso roccioso permette di introdurre alcune precisazioni, che però non modificano sostanzialmente la previsione originaria.

L'ammasso roccioso attraversato era costituito da graniti a grana media riferibili al Granito di Bressanone, sporadicamente attraversati da filoncelli aplitici e/o da filoni basici di colore grigio scuro fino a nero e di spessore da decimetrico fino a metrico.

Non sono state incontrate faglie significative e lo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso era sempre caratterizzato da una densità di fratture non particolarmente elevata e da assenza di importanti livelli di rocce di faglia.

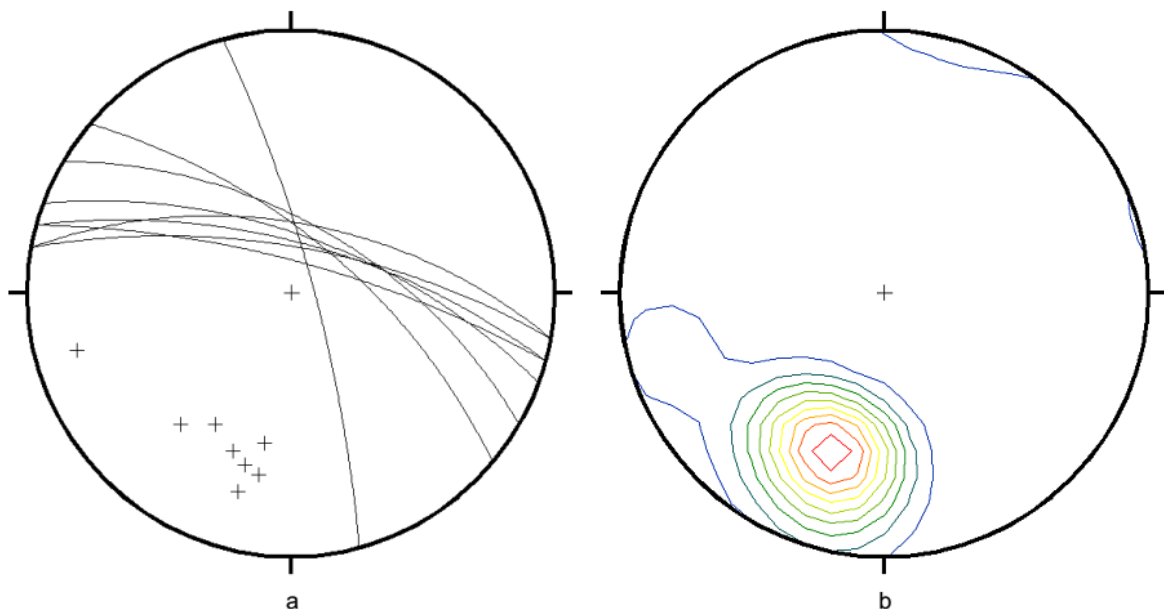


Figura 4-10 Proiezione equiareale di Schmidt per le faglie intersecate dal cunicolo esplorativo tra le progressive 10 + 710 e 10 + 800; a = cerchi massimi; b = diagrammi di densità

Una successione di piccole faglie con direzione media WNW-ESE immergenti ad alto angolo verso NNE (Illustrazione 3-10) è stata incontrata tra le pK 10+710e 10+800ca. Si tratta tuttavia di discontinuità di limitata importanza, generalmente caratterizzate da spessori di rocce di faglia assai modesti, dell'ordine di pochi centimetri, che inducono un incremento della fratturazione nel loro intorno soltanto per uno o due metri. Tali discontinuità sono in sostanza poco più che dei giunti con una debole entità di movimento.

Per quanto attiene allo stato di fratturazione si possono distinguere due settori, che si caratterizzano non tanto per differenze consistenti nell'orientazione dei sistemi di giunti, che sono simili, quanto per la densità della fratturazione.

Il primo settore è compreso all'incirca tra il fondo della Galleria di accesso di Mules e la pK 10+800. Esso presenta una densità di fratturazione relativamente bassa e i sistemi di giunti principali sono quattro, con le seguenti immersioni medie: K1 244/58; K2 45/63; K3 358/80; K4 131/54 (cfr. Illustrazione 3-11:).

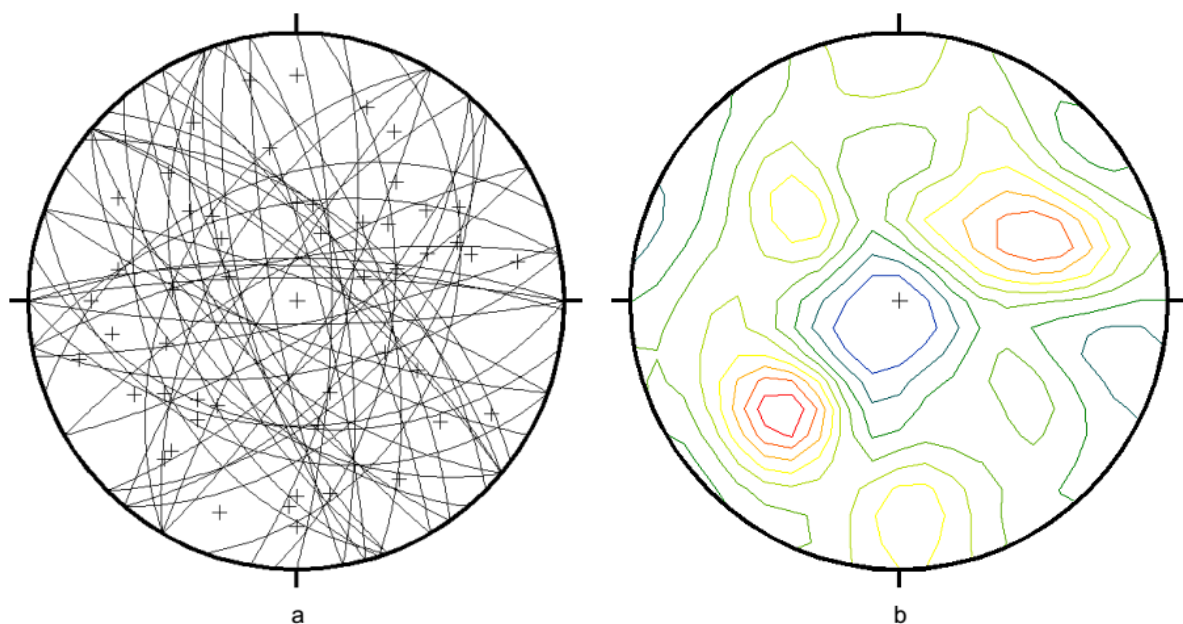


Figura 4-11 Proiezione equiareale di Schmidt per i sistemi di giunti nel cunicolo esplorativo tra il piede della galleria d'accesso di Mules e la progressiva 10 + 800; a = cerchi massimi; b = diagramma di densità

Il secondo settore è compreso tra la pK 10+800circa e l'attuale fronte di scavo alla pK 10+916. Esso presenta una densità di fratturazione maggiore rispetto al precedente. I sistemi di giunti hanno le seguenti immersioni medie: K1 74/76; K2 35/62; K3 238/57; K4 326/40.

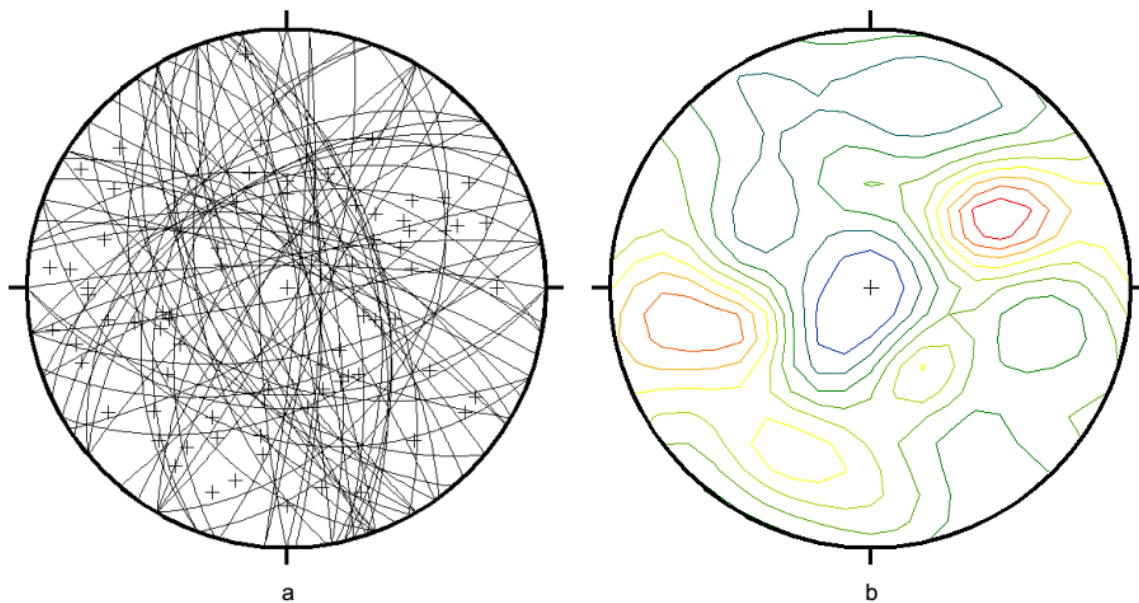


Figura 4-12 Proiezione equiareale di Schmidt per il sistema di giunti del cunicolo esplorativo tra la progressiva 10 + 800 e la progressiva 10 + 916; a = cerchi massimi; b = diagramma di densità

4.2.4.2 Galleria di accesso di Mules

Anche le informazioni raccolte in corso d'opera durante lo scavo della tratta finale della discenderia di Mules, indicativamente tra la pK 1+550 e 1+700 sono significative ai fini della previsione geologica per il lotto in progettazione. In particolare queste informazioni potrebbero risultare utili per caratterizzare l'ammasso roccioso nell'area dei cameroni di montaggio della TBM, del cunicolo d'innesto della discenderia sulla canna est e del camerone logistico.

Anche in questo caso le informazioni sono state rilevate dalla documentazioni di DLB, società che ha redatto la documentazione geologica in fase di esecuzione del lotto precedente, e di seguito viene fornita una sintesi ragionata dei dati.

La litologia, come per il cunicolo esplorativo, è monotona e rappresentata da graniti a grana media.

Non sono state osservate faglie cartografabili e rappresentabili sulla sezione geologica; tuttavia i fronti indicano la presenza di piccole faglie, con spaziatura di ordine decametrico, costituite da una zona di nucleo con rocce di faglia (brecce tettoniche) di spessore fino a decimetrico e da una zona di danneggiamento potente fino a un paio di metri per ogni lato della faglia.

Le faglie hanno direzione NNE-SSW ed immergono ad alto angolo verso ESE.

La presenza delle faglie sembra condizionare in maniera marcata lo stato di fratturazione poiché in questo tratto dominano i giunti con direzione simile alle faglie. Gli stereogrammi che seguono (Illustrazione 3-13:) mostrano che i principali sistemi di giunti per questo tratto di discenderia sono: K1 110/7; K2 35/55; K3 235/60 e K4 325/55.

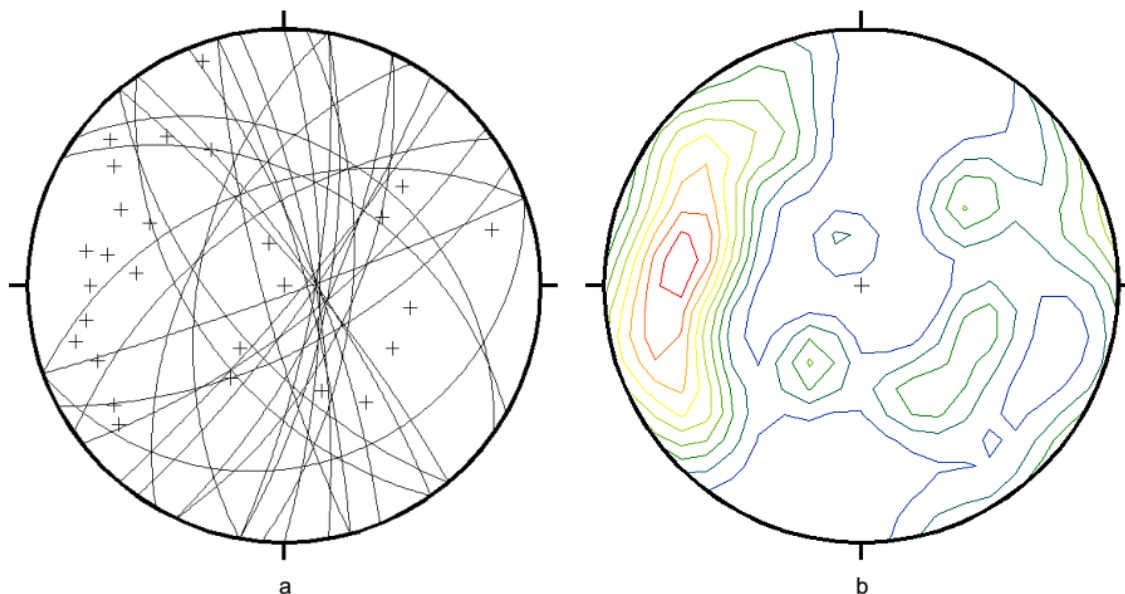


Figura 4-13 Proiezione equiareale di Schmidt per i sistemi di giunti nella Galleria di accesso di Mules tra la progressiva 1 + 550 e la progressiva 1 + 700; a = cerchi massimi; b = diagramma di intensità

4.3 DESCRIZIONE DELLE OPERE

4.3.1 Premessa

Nel seguito vengono brevemente descritte le opere oggetto dell'appalto.

Per semplicità, la descrizione generale è stata sviluppata distinguendo le opere in considerazione della loro funzione principale, cioè:

- Sistema di gallerie come supporto logistico. La funzione principale di questo insieme di opere è quella di predisporre la base per il trasferimento in sotterraneo di buona parte della della logistica di costruzione.
- Opere connesse al cunicolo esplorativo. La funzione principale del tratto di cunicolo esplorativo è legata all'acquisizione dei dati sullo stato degli ammassi rocciosi della linea Periadriatica.

4.3.2 Il sistema di Gallerie come supporto logistico

Come anticipato, si tratta di una serie di opere propedeutiche alla costruzione delle gallerie principali che permetteranno, nel loro insieme, il trasferimento in sotterraneo di buona parte delle principali funzioni legate alla gestione del materiale di smarino e di approvvigionamento del calcestruzzo.

Di seguito si elencano tali opere, che possono essere considerate a tutti gli effetti propedeutiche alla realizzazione dei lavori principali, con indicazione delle funzioni alle quali sono deputate.

Nell'elencare le opere si è attribuito un settore di competenza che rispecchia in sostanza la loro collocazione in relazione al punto di innesto della finestra di Mules con l'asse del tracciato delle gallerie principali (Settore a Nord ed a Sud del punto di innesto)

4.3.2.1 Opere attribuibili al Settore Nord

All'interno di questo settore sono state incluse le opere poste a Nord dell'innesto della discenderia di Mules con l'asse delle gallerie principali. Tali opere sono:

- Galleria di collegamento delle gallerie principali al cunicolo esplorativo;
- Ramo B della finestra di Mules e camerone d'innesto alle gallerie principali;
- Cunicoli trasversali logistici di collegamento delle gallerie principali;
- Tratti di galleria, Est ed Ovest, colleganti del sistema sopra identificato di gallerie di supporto;

Il gruppo di opere sopramenzionate, insieme alle necessarie tratte di gallerie interessate, consentirà essenzialmente la gestione del trasporto dei materiali di scavo durante la realizzazione delle gallerie principali, sino ai depositi autorizzati di Genauen 2 e Hinterrigger prevalentemente mediante nastri trasportatori e comunque senza prevedere l'utilizzo della viabilità ordinaria.

La galleria di collegamento tra il cunicolo esplorativo e le gallerie principali costituisce l'opera più interessante dal punto di vista della logistica permettendo il trasferimento dei materiali in uscita (smarino) ed in ingresso (approvvigionamento), dalla zona di cantiere di Mules a quella del cantiere di Aica in corrispondenza del quale, come detto, si trova il deposito principale dei materiali scavati.

Si tratta di una galleria avente una sezione trasversale di circa 40 m² derivante da una larghezza di oltre 8 m e da una altezza di circa 6 m. Il suo sviluppo complessivo è previsto in poco più di 400 m. La pendenza massima del 4%, necessaria per assorbire il dislivello derivante dalla differente quota tra cunicolo esplorativo e gallerie principali, permetterà il transito dei treni di approvvigionamento. La curvatura dello sviluppo agevola invece il posizionamento di un nastro unico di collegamento diretto con quello del cunicolo.

Il ramo "B" della finestra di Mules ed il camerone di innesto costituiscono di fatto il completamento della discenderia verso le future gallerie di linea.

Il camerone di innesto avrà la funzione di creare gli spazi necessari alla gestione dell'importante nodo tra gallerie principali e discenderia. Esso avrà uno sviluppo di circa 80 m ed una sezione trasversale di circa 150 m². La larghezza prevista è di circa 14 m per un'altezza in chiave di calotta di oltre 11 m.

Il cosiddetto "Ramo B" della discenderia altro non è che il completamento della discenderia verso il camerone di innesto. Lo sviluppo sarà di circa 100 m con una sagoma di sezione uguale a quella della discenderia.

I cunicoli trasversali di collegamento completeranno la funzione di collegamento tra cunicolo esplorativo e le gallerie principali.

In questo modo la movimentazione dei materiali potrà essere gestita da entrambe le gallerie principali.

In sostanza si tratta di tre cunicoli trasversali dei quali i due più a Sud rivestono una maggiore importanza relativa: Il primo di questi ultimi due sarà collocato tra le progressive 48+263 e 48+292. Esso sarà inclinato ed avrà un sviluppo di circa 110 m. Il secondo, dei due citati sarà ortogonale agli assi principali ed avrà uno sviluppo di circa 60 m; la sua collocazione è stata prevista intorno alla progressiva 48+576.

La geometria dei questi due cunicoli è la stessa della già citata galleria di collegamento.

Completano il quadro delle opere propedeutiche della zona a Nord dell'innesto, i tratti di galleria principale verso Nord.

La lunghezza complessiva prevista per i due tratti di galleria principale è di circa 1200 m. La geometria della sezione trasversale è quella prevista per le gallerie principali e cioè di circa 70 m² ottenuti garantendo una larghezza massima di circa 8.5 m ed una altezza di circa 8.0 m.

La realizzazione di tali opere è coerente con il progetto definitivo approvato ma ne è stata anticipata l'esecuzione per uno svolgimento ottimale delle attività connesse alla logistica di costruzione delle opere principali.

Di seguito si riporta uno schema con l'indicazione delle varie opere progettate.

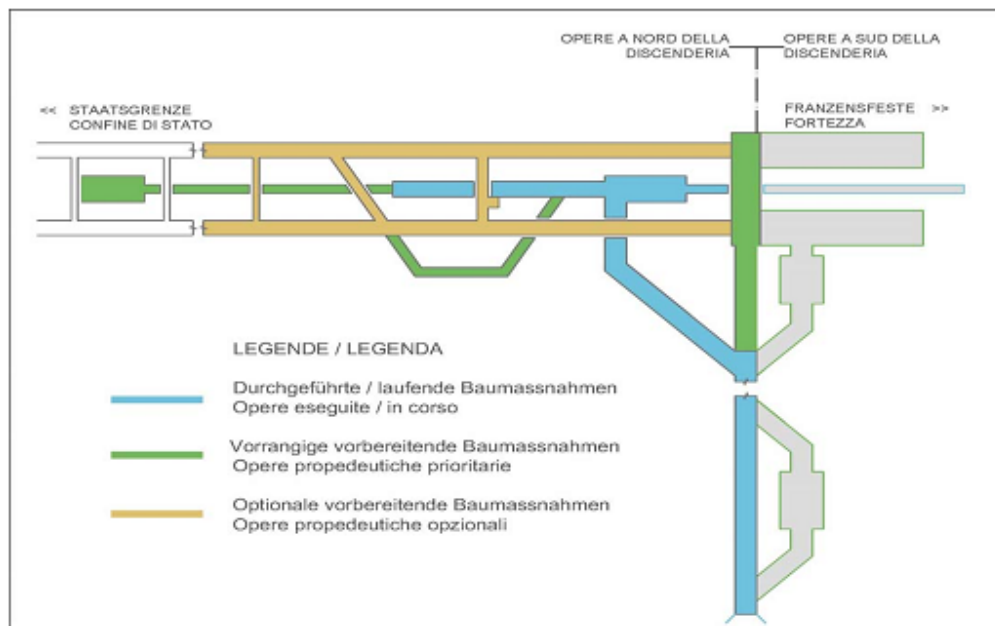


Figura 4-14 Corografia d'insieme delle opere a nord dell'innesto all'asse delle gallerie principali.

4.3.2.1.1 Metodo di costruzione

Il settore di scavo a Nord, pur essendo collocato all'interno di ammassi rocciosi aventi buone caratteristiche meccaniche, tende ad avvicinarsi al lineamento Periadriatico dove è possibile la presenza di forti gradienti idraulici. Le opere di questo settore attraverseranno inoltre il contatto tra il Granito di Bressanone e la Tonalite di Mules.

Questi due aspetti, rendono necessaria l'adozione di cautele nelle procedure di avanzamento, anche se il problema sarà comunque limitato dato che verrà prioritariamente realizzato il cunicolo esplorativo dal quale si trarranno le informazioni necessarie a controllare i fenomeni conseguenti gli aspetti menzionati.

Ad ogni modo, lo scavo sarà preceduto dall'esecuzione di prospezioni e sistemi di drenaggio in avanzamento, i primi volti ad acquisire dati sull'ammasso in corrispondenza dell'asse proprio delle gallerie principali, ed i secondi volti alla riduzione delle sovrappressioni idrostatiche e delle portate idriche in galleria.

Per queste motivazioni, l'avanzamento dello scavo in questa tratta avverrà, con metodologia tradizionale.

L'avanzamento in tradizionale tramite brillamento di esplosivo e/o scavo con escavatore, verrà condotto in conformità ai principi del "Nuovo metodo austriaco di costruzione di gallerie" (NATM). Questo metodo consta essenzialmente di tre fasi:

- il brillamento dell'esplosivo e/o lo scavo con escavatore;
- lo smarino ed il disgaggio;
- la messa in sicurezza delle pareti di scavo (tramite rivestimento di prima fase).

Questo sistema di avanzamento rappresenta un metodo di scavo di tipo ciclico, in quanto i singoli processi di lavoro di scavo, smarino e posa del rivestimento di prima fase hanno luogo, in tal caso, per lo più in sequenza temporale e con l'ausilio di dispositivi autonomi.

La messa in sicurezza dello scavo viene operata direttamente in avanzamento. Tipici metodi di sostegno impiegati sono lo spritz-beton, le centine in acciaio, reti elettrosaldate e sistemi di ancoraggio non rigidi (bullonature radiali). In corrispondenza delle zone di faglia o in ammassi scadenti a comportamento spingente, occorre predisporre un preconsolidamento in avanzamento del nucleo (mediante barre in vetroresina) ed un sistema di sostegno deformabile, costituito da centine collassabili tipo TH ed elementi compressibili HDC (High Deformable Concrete). Quest'ultimi, posizionati in intagli del calcestruzzoproiettato, permettono di controllare le convergenze dell'ammasso roccioso, scongiurando la rottura del rivestimento stesso.

4.3.2.1.2 Svolgimento lavori, condizioni dei lavori

Lo scavo delle opere del settore Nord avverrà, a regime, su tre fronti in contemporanea (Cunicolo e due Gallerie principali).

I fronti di scavo saranno comunque indipendenti e quello relativo al cunicolo esplorativo anticiperà di diverse centinaia di metri i fronti di scavo delle gallerie principali.

I fronti di queste gallerie saranno aperti solo a conclusion dei lavori di scavo della galleria di innesto.

L'approvvigionamento del material da costruzione per l'avanzamento, l'evacuazione del marino risultante avverrà attraverso la finestra di Mules sino alle aree di cantiere / deposito di Mules e di Genauen 2, o attraverso il cunicolo di Aica sino al deposito di Hinterriger. Il drenaggio delle acque avverrà attraverso il cunicolo di Aicaper gravità attraverso la realizzazione di opportune condotte di adduzione.

4.3.2.2 Opere attribuibili al Settore Sud

All'interno di questo settore sono state incluse le opere poste a Sud dell'innesto della discenderia di Mules con l'asse delle gallerie principali, includendo in queste opere anche quelle non direttamente collocate in corrispondenza dell'innesto come la caverna della futura centrale di ventilazione localizzata in prossimità dell'imbocco della discenderia. Tali opere sono:

- Cameroni di montaggio delle frese lato Sud binario pari (canna est) e binario dispari (canna ovest);
- Camerone logistico e relative gallerie di connessione
- Camerone per la centrale di ventilazione e relative gallerie di connessione e pozzo di estrazione;

Il gruppo di opere menzionate, insieme alla finestra di Mules già realizzata con il lotto di costruzione precedente, consentirà di trasferire in sotterraneo una parte delle funzioni inerenti il trattamento dei materiali di scavo e l'approvvigionamento dei materiali di costruzione.

I cameroni di montaggio delle TBMSi sviluppano dalla galleria di innesto derivante dal prolungamento della discenderia di Mules verso Sud per una lunghezza di 180 m fino cioè alla progressiva di riferimento (canna Est) 49+080 circa.

Le dimensioni si aggirano intorno ai 21 m in larghezza e poco meno di 18 m in altezza formando una sezione trasversale di scavo che supera ampiamente i 350 m².

Intorno alla progressiva di riferimento 48+930 in direzione parallela alla discenderia di Mules, in corrispondenza della canna Ovest, si innesta il cosiddetto "Camerone Logistico".

Si tratta di fatto di un allargò di una galleria di collegamento addizionale tra la discenderia ed i cameroni di montaggio delle TBM. Lo sviluppo previsto per il camerone logistico è di 40 m e la sezione è di circa 320 m².

Completa il quadro delle opere connesse ai cameroni di montaggio delle TBM la galleria di collegamento tra la discenderia ed il camerone logistico.

Questa galleria che si svilupperà per circa 200 m, avrà la stessa geometria della finestra di Mules già realizzata e costituirà di fatto una deviazione della stessa mantenendone le caratteristiche altimetriche in termini di pendenza longitudinale.

L'insieme delle opere propedeutiche poste a Sud del collegamento discenderia – asse principale, è completato dal camerone che in futuro ospiterà la centrale di ventilazione del Tunnel di base, dalla sua galleria di collegamento alla discenderia e dal pozzo di estrazione fumi.

La caverna della centrale di ventilazione avrà uno sviluppo di circa 67 m ed una sezione trasversale simile a quella dei cameroni di montaggio TBM prima citati (circa 320m²).

La destinazione funzionale finale della caverna è quella di accogliere i ventilatori della centrale di ventilazione di estrazione a servizio del punto multifunzionale di Trens.

In coerenza con le previsioni della "variante migliorativa 01", la centrale di ventilazione di immissione a servizio del punto multifunzionale di Trens sarà collocata, invece, in un tratto di galleria artificiale antistante l'imbocco della finestra di Mules, la cui costruzione non costituisce però oggetto del presente appalto.

La caverna di ventilazione si collocherà in prossimità dell'imbocco della discenderia e sarà connessa a quest'ultima tramite due gallerie di collegamento ad andamento pressoché rettilineo che avranno uno sviluppo in lunghezza di circa 50 m e 320 m, rispettivamente per il collegamento Ovest (cioè verso l'imbocco della discenderia) ed Est (ovvero verso il fondo della discenderia).

La pendenza longitudinale della caverna di ventilazione è di ca. 2,50%, quella delle gallerie di accesso non supera il 12%.

La geometria della sezione trasversale rispecchia quella della discenderia.

È stata infine prevista la realizzazione del pozzo di estrazione fumi, che in fase di costruzione delle gallerie di linea può essere vantaggiosamente utilizzato a scopi di ventilazione degli impianti allocati nella caverna, minimizzando l'impatto sull'ambiente esterno.

Il pozzo sarà circolare con diametro di scavo di circa 6 m. La sua profondità rispetto al p.c. locale sarà di poco meno di 60 m.

Anche in questo caso si può esprimere il concetto che la realizzazione di tali opere è coerente con il progetto definitivo approvato ma ne è stata anticipata l'esecuzione per uno svolgimento ottimale delle attività connesse alla logistica di costruzione delle opere principali.

Di seguito si riporta uno schema con l'indicazione delle varie opere progettate

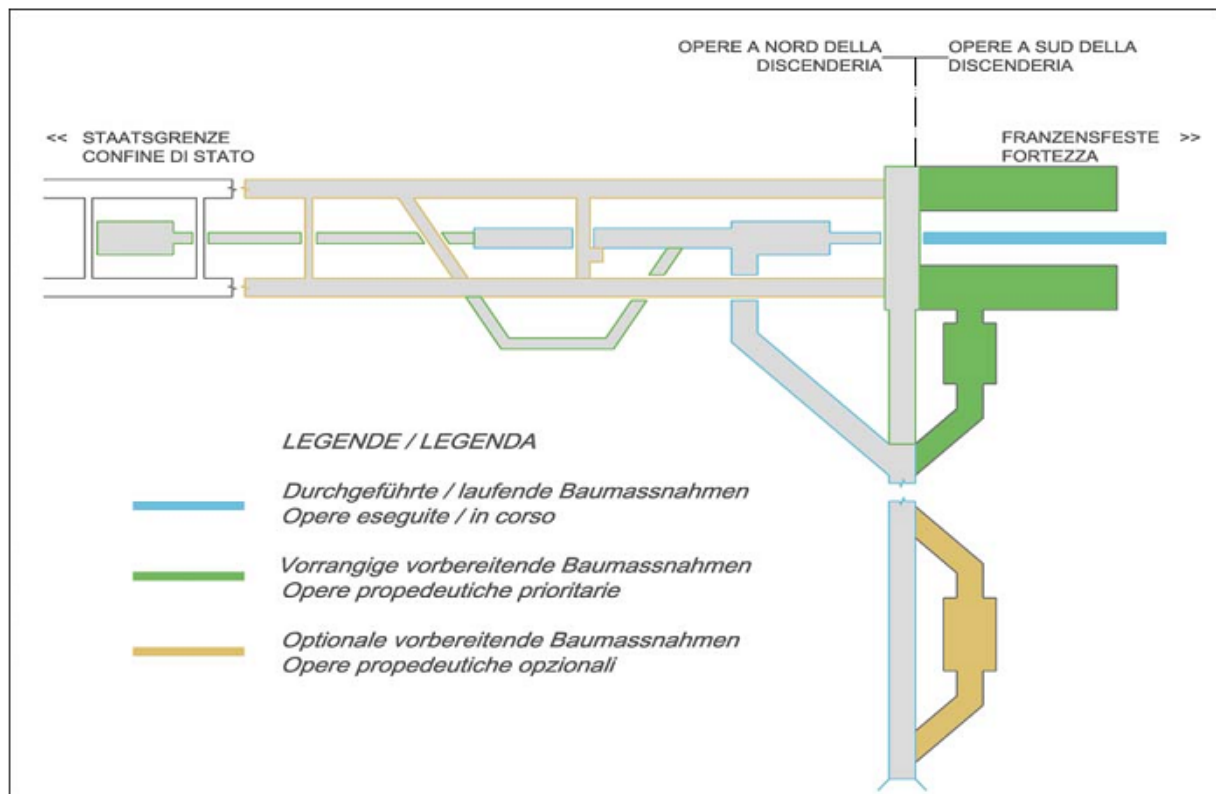


Figura 4-15 Corografia d'insieme delle Opere a Sud dell'innesto all'asse delle gallerie principali – Schema

4.3.2.2.1 Metodo di Costruzione

La differenza sostanziale che c'è tra il settore Sud e quello Nord è legata al fatto che le caratteristiche degli ammassi del settore Sud sono oggi ben note in quanto già interessati dallo scavo delle opere del cunicolo e della discenderia di Mules.

Lo scavo avverrà quindi in tradizionale con metodo "Drill and Blast", in analogia a quanto oggi già eseguito.

Gli interventi di consolidamento dell'ammasso roccioso ordinariamente si limiteranno a delle bullonature, più o meno sistematiche, e dello spritz beton. Solo in casi particolari, quali gli incroci di più gallerie, prevedono l'adozione di centine pesanti in acciaio.

Lo scavo del pozzo di ventilazione avviene invece con tecnologia "Raise Boring" a partire dalla superficie del piano campagna.

4.3.2.2.2 Svolgimento lavori, condizioni dei lavori

Lo scavo delle opere del settore Sud avverrà, a regime, su due fronti in contemporanea costituiti dai cameroni di montaggio TBM.

Al termine dello scavo dei cameroni si procederà alla realizzazione del camerone logistico.

A questi fronti di attacco si aggiunge il fronte di scavo della caverna per la central di ventilazione.

Essendo localizzato in corrispondenza dell'imbocco della discenderia, questo può essere considerato come attività indipendente non interferente con i fronti posti in fondo alla discenderia.

Allo stesso modo sono da considerare fonti indipendenti, la cui aperture è regolata dalla sola programmazione dei lavori, quelli relative alla galleria di collegamento tra cunicolo e gallerie principali ed ai cunicoli trasversali tra queste ultima.

L'approvvigionamento del materiale da costruzione per l'avanzamento avverrà attraverso la finestra di Mules, mentre l'evacuazione del materiale di scavo risultante avverrà sia attraverso il cunicolo di Aica sia attraverso la finestra di Mules.

Il drenaggio delle acque avverrà attraverso il cunicolo di Aica per gravità attraverso la realizzazione di opportune condotte di adduzione.

Il drenaggio delle modeste quantità di acque previste durante lo scavo del camerone di ventilazione e delle relative gallerie di accesso potrà avvenire invece dal portale di Mules attraverso un sistema di pompaggio. Tale sistema non è necessario nel caso di attacco dello scavo da valle, cioè con esecuzione dall'interno verso l'esterno, con evacuazione delle acque attraverso la discenderia di Mules ed il cunicolo di Aica.

4.3.2.3 Opere connesse al cunicolo esplorativo

4.3.2.3.1 Introduzione

Le opere interessate dal presente tratto di progetto riguardano il proseguo dello scavo del cunicolo esplorativo dal punto d'innesto della finestra di Mules con il tracciato principale delle future gallerie di linea, lungo la tratta interessata dal lineamento Periadriatico.

Esse comprendono:

Lo scavo del cunicolo esplorativo nella tratta di attraversamento Periadriatico: si tratta della realizzazione del prolungamento del cunicolo esplorativo di Aica, a partire dal camerone di allargamento per lo smontaggio della fresa (già scavato ed escluso dal presente lotto), opera che termina alla progressiva chilometrica 10+484.049, e la fine del camerone di montaggio fresa, fissata alla progressiva chilometrica 12+242.000.

Il tratto del cunicolo esplorativo tratta Periadriatica si estende per 1757,95 m dalla progressiva

- Inizio lotto al km 10+484.049'' fino
- Fine lotto al km 12+242.00

La progressiva del cunicolo km 10+484.049, riferita all'imbocco di Aica, corrisponde alla progressiva km 48+815.210 della canna est della Galleria di Base del Brennero, riferita alla stazione di Innsbruck.

All'interno di questa tratta, è prevista la realizzazione di 3 tratti con sezione allargata per scopi logistici, aventi ciascuna una lunghezza utile di 25 metri.

Al termine del lotto verrà costruito il camerone di montaggio fresa, avente una lunghezza di 60 metri. Inoltre, il tratto iniziale del cunicolo, per una lunghezza di ca. 430m, ha una sezione di scavo pari a 75m² circa. A tale tratto saranno attribuite importanti funzioni logistiche connesse con il trattamento e la selezione dei materiali di scavo provenienti dalle gallerie principali. La scelta si è rilevata necessaria per garantire le funzioni logistiche attribuite al "nodo" della finestra di Mules

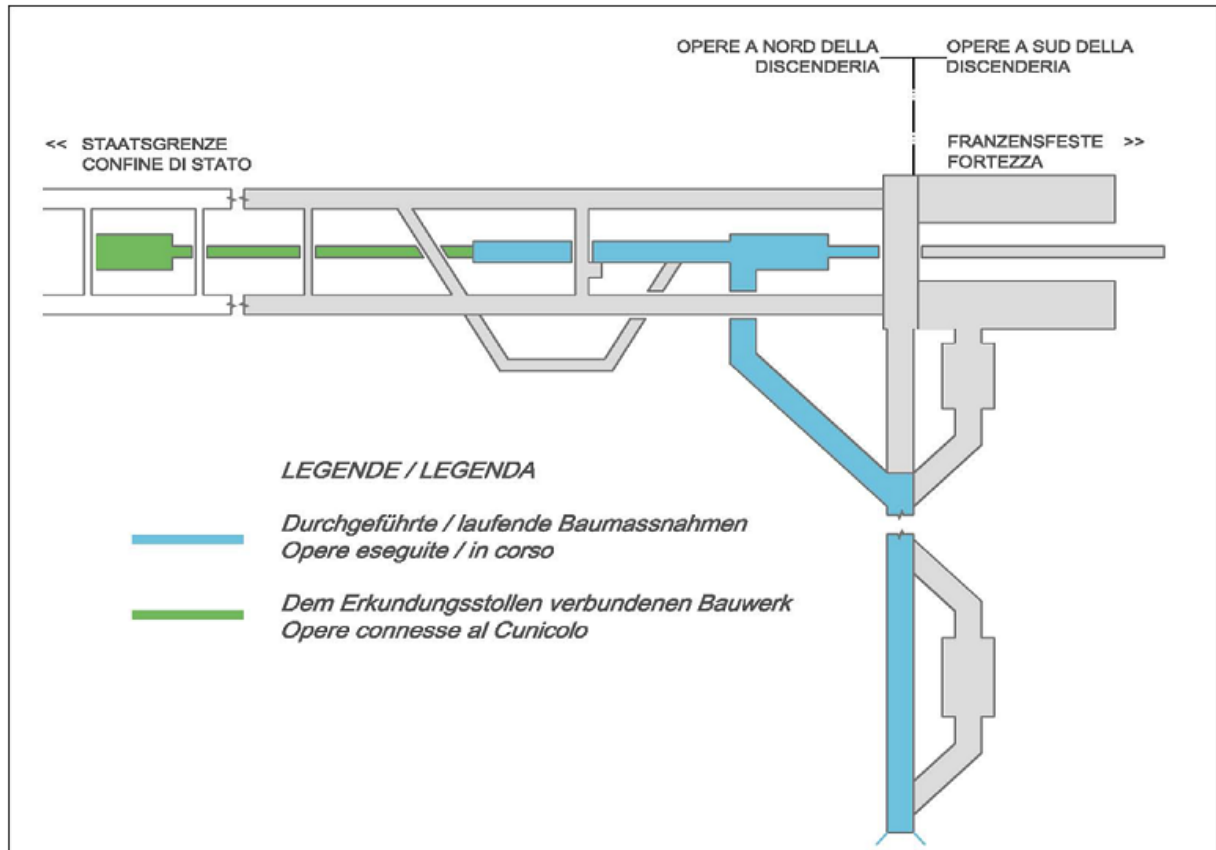


Figura 4-16 Corografia d'insieme delle opere connesse al cunicolo-Schema

4.3.2.3.2 Note sul cunicolo esplorativo

Il principale scopo dell'opera risulta essere quello di indagare e caratterizzare dal punto di vista geologico-geomeccanico i materiali incontrati durante lo scavo.

Il cunicolo esplorativo assolve a molteplici funzioni sia nella fase di costruzione sia in quella di esercizio. Durante la costruzione il cunicolo esplorativo serve sia al drenaggio delle acque ipogee sia al trasporto del materiale di scavo.

Il dimensionamento del cunicolo, pertanto, è determinato dal soddisfacimento di queste molteplici funzioni.

Di seguito verrà dato un breve accenno sul cunicolo di Aica e poi, proseguendo, si descriverà in dettaglio l'opera oggetto del presente lotto di progettazione.

4.3.2.3.3 Cunicolo esplorativo di Aica

Allo stato attuale, il Cunicolo esplorativo di Aica, dal portale di Aica sino al camerone di smontaggio fresa in corrispondenza della finestra di di Mules, è in corso d'opera.

Il tracciato si sviluppa, per un primo tratto dall'imbocco di Aica sino alla progressiva km 7,5 circa, al di fuori del tracciato delle gallerie principali, mentre nel secondo tratto sino alla fine del primo lotto di costruzione, si sviluppa in posizione parallela al tracciato delle gallerie principali. La collocazione prescelta del cunicolo è tra le due gallerie principali, a una quota di circa 12 m inferiore rispetto alle gallerie di linea.

Una volta allineatosi con le canne principali, esso prosegue per altri 2735 m circa sino al camerone di smontaggio fresa, il cui inizio è ubicato alla progressiva 10+420.

Questo cunicolo ha una lunghezza di 10420 m e viene scavato prevalentemente tramite fresa.

4.3.2.4 Cunicolo Esplorativo Tratta lineamento Periadriatico

4.3.2.4.1 Generalità e panoramica

La sezione dell'opera "Cunicolo Esplorativo – tratta lineamento Periadriatico" comprende il tratto di cunicolo compreso tra il km 10+484.049 (prog. km 48+815.210 riferito alla canna est della galleria di linea) ed il km 12+242.00.

4.3.2.4.2 Metodo di costruzione

Il settore in oggetto comprende una delle tratte più problematiche dell'intero tracciato del Tunnel di Base del Brennero. L'attraversamento della lamella tonalitica di Mules necessita di importanti interventi di preconsolidamento e sostegno volti alla stabilizzazione del cavo, alla riduzione della zona plasticizzata ed al contenimento delle deformazioni. Associati agli interventi suddetti si rende necessaria l'adozione di sistemi di drenaggio in avanzamento dell'ammasso volti alla riduzione delle sovrappressioni idrostatiche e delle portate idriche in galleria. All'esterno dalla tratta più critica non si riscontrano particolari problematiche.

Per queste molteplici motivazioni, l'avanzamento dello scavo in questa tratta avverrà, come già più volte menzionato, con metodologia tradizionale.

L'avanzamento in tradizionale tramite brillamento di esplosivo e/o scavo con escavatore, verrà condotto in conformità ai principi del "Nuovo metodo austriaco di costruzione di gallerie" (NATM). Questo metodo consta essenzialmente di tre fasi:

- il brillamento dell'esplosivo e/o lo scavo con escavatore;
- lo smarino ed il disgaggio;
- la messa in sicurezza delle pareti di scavo (tramite rivestimento di prima fase).

Questo sistema di avanzamento rappresenta un metodo di scavo di tipo ciclico, in quanto i singoli processi di lavoro di scavo, smarino e posa del rivestimento di prima fase hanno luogo, in tal caso, per lo più in sequenza temporale e con l'ausilio di dispositivi autonomi.

L'avanzamento tradizionale potrà realizzarsi anche con l'impiego di frese puntuali e martelloni.

La messa in sicurezza dello scavo viene operata direttamente in avanzamento. Tipici metodi di sostegno impiegati sono lo spritz-beton, le centine in acciaio, reti elettrosaldate e sistemi di ancoraggio non rigidi (bullonature radiali). In corrispondenza delle zone di faglia o in ammassi scadenti a comportamento spingente, occorre predisporre un preconsolidamento in avanzamento del nucleo (mediante barre in vetroresina) ed un sistema di sostegno deformabile, costituito da centine collassabili tipo TH ed elementi compressibili HDC (High Deformable Concrete). Quest'ultimi, posizionati in intagli del calcestruzzo proiettato, permettono di controllare le convergenze dell'ammasso roccioso, scongiurando la rottura del rivestimento stesso.

4.3.2.4.3 Svolgimento lavori, condizioni del lavori

Relativamente a questa sezione, lo scavo del Cunicolo avviene su un unico fronte di scavo verso nord.

L'approvvigionamento del materiale da costruzione per l'avanzamento del Cunicolo esplorativo, l'evacuazione del marino risultante dall'avanzamento del cunicolo avviene attraverso la finestra di Mules. Il drenaggio delle acque avverrà attraverso il cunicolo di Aica per gravità.

5 MODELLIZZAZIONE DEL SISTEMA DI GALLERIE CON MIDAS GTS

5.1 IL SOFTWARE DI CALCOLO MIDAS GTS

Il MIDAS GTS è un potente software agli elementi finiti 2D e 3D adatto a tutti gli ambiti dell'ingegneria geotecnica. Permette, infatti, una serie di importanti analisi, tra le quali:

- L'analisi meccanica dei terreni;
- 3D stress analysis nelle fasi di costruzione;
- L'analisi dell'interazione tra terreno e struttura;
- L'analisi degli scavi;
- L'analisi della stabilità dei pendii;
- Analisi dinamiche e sismiche;
- L'analisi dei moti di filtrazione transienti e stazionari;
- L'analisi dei consolidamenti e cedimenti.

Il suo campo di applicazione comprende dunque dighe e opere fluviali, strutture di fondazione e di sostegno del terreno, tunnel e metropolitane.

Il software è stato sviluppato in collaborazione con TNO – DIANA, legata per la validazione dei modelli e dei solutori all'università TU di Delft.

Per il presente lavoro di tesi, il MIDAS GTS viene impiegato per la modellazione 3D delle gallerie e del volume di terreno considerato significativo per lo studio.

5.1.1 Metodo di lavoro per lo studio di un ammasso roccioso attraversato da tunnel in MIDAS GTS

Una normale sequenza di operazione nell'utilizzo di MIDAS GTS è la seguente:

- Modellazione Geometrica
- Generazione delle Mesh
- Condizioni di Analisi
- Analisi
- Post-Processing e valutazione dei risultati

5.1.1.1 Modellazione Geometrica

La generazione del modello geometrico è la base per la realizzazione di un'analisi agli elementi finiti in MIDAS. Basandosi sui dati geometrici, la generazione delle mesh e agli altri step del processo di modellazione potranno aver luogo. Il modello geometrico può essere direttamente creato in MIDAS usando le sue funzioni di modellazione. Oltre a questa modalità vi è anche la possibilità di scambiare file con altri programmi CAD (Computer Aided Design).

Dal momento che MIDAS GTS fornisce avanzate caratteristiche per la modellazione geometrica, modelli geotecnici complessi possono essere realizzati più efficientemente rispetto ad altri software di analisi geotecnica.

5.1.1.2 Generazione delle Mesh

La mesh è generata sul modello geometrico creato precedentemente. Di solito, è raccomandato l'utilizzo di elementi esaedrici o quadrilaterali per aver analisi e risultati più accurati. Comunque, per un modello complesso, è ragionevole usare elementi tetraedrici o triangolari prodotti dalla funzione di Auto-mesh fornita da GTS. Per massimizzare la sua utilizzabilità, GTS fornisce diversi controlli per la modifica della mesh e tre diversi metodi per la generazione delle stesse che sono Auto-Mesh, Mapped-Mesh e Protrude-Mesh.

5.1.1.3 Condizioni di Analisi

GTS fornisce diversi materiali, proprietà fisiche, tipi di carico e condizioni al contorno. I carichi e le condizioni al contorno possono essere applicate non soltanto ai nodi e agli elementi ma anche direttamente alle forme geometriche, così che le condizioni siano realmente utilizzate quando il modello ha una sagoma veramente complessa. Avvantaggiandosi sull'interfaccia basta sull'ambiente Windows, GTS massimizza la capacità simulativa di visualizzare carichi e condizioni al contorno in una maniera pratica. Come risultato, la funzione di simulazione riduce tremendamente la possibilità che l'utente inserisca dei dati errati.

5.1.1.4 Post-Processing e valutazione dei Risultati.

Dopo che l'analisi è stata completata regolarmente, GTS organizza e fornisce i dati per una corretta progettazione. GTS offre numerosi possibilità di visualizzare graficamente su schermo i risultati e diverse caratteristiche per animare i risultati, che sono ottimizzate per mostrare modelli in larga scala e complessi risultati di analisi fatte per stage costruttivi. Oltre a questo, tutte le tabelle fornite in GTS permettono all'utente di visualizzare i risultati immediatamente e sono anche compatibili con Microsoft Excel, che rappresenta lo standard come programma per la trattazione dei dati. LA funzione Result Summary di GTS genera automaticamente un report che contiene una vasta gamma di informazioni dai dati geometrici all'analisi dei risultati.

5.2 CREAZIONE DEL MODELLO GEOMETRICO

5.2.1 Realizzazione del sistema di gallerie

Dai dati di progetto legati al tracciamento si è creato un sistema di coordinate filtrando il quelle utilizzate dai progettisti impostando come origine l'estremità della canna ovest rivolta a Innsbruck. Da qui, tutti i punti relativi alla geometria degli assi delle gallerie verranno inseriti in un codice di calcolo (Microsoft Office Excel 2013) per una più facile interpretazione. Per la realizzazione si è dapprima tracciato l'asse planimetrico e poi per interpolazione di punti significativi e note le pendenze dei tratti è stato possibile ricreare l'assetto plano-altimetrico dell'intera sistema di gallerie.

Tracciati gli assi si sono estratti dal progetto le sezioni delle diverse gallerie in modo da ricreare la sagoma. La sagoma è stata disegnata attraverso il software AutoCad progettato da Autodesk e successivamente importata in MIDAS GTS.

Grazie a una serie di comandi legati alla modellazione è stato possibile dare corpo all'intero sistema di gallerie che verrà presentato nel seguito della trattazione.

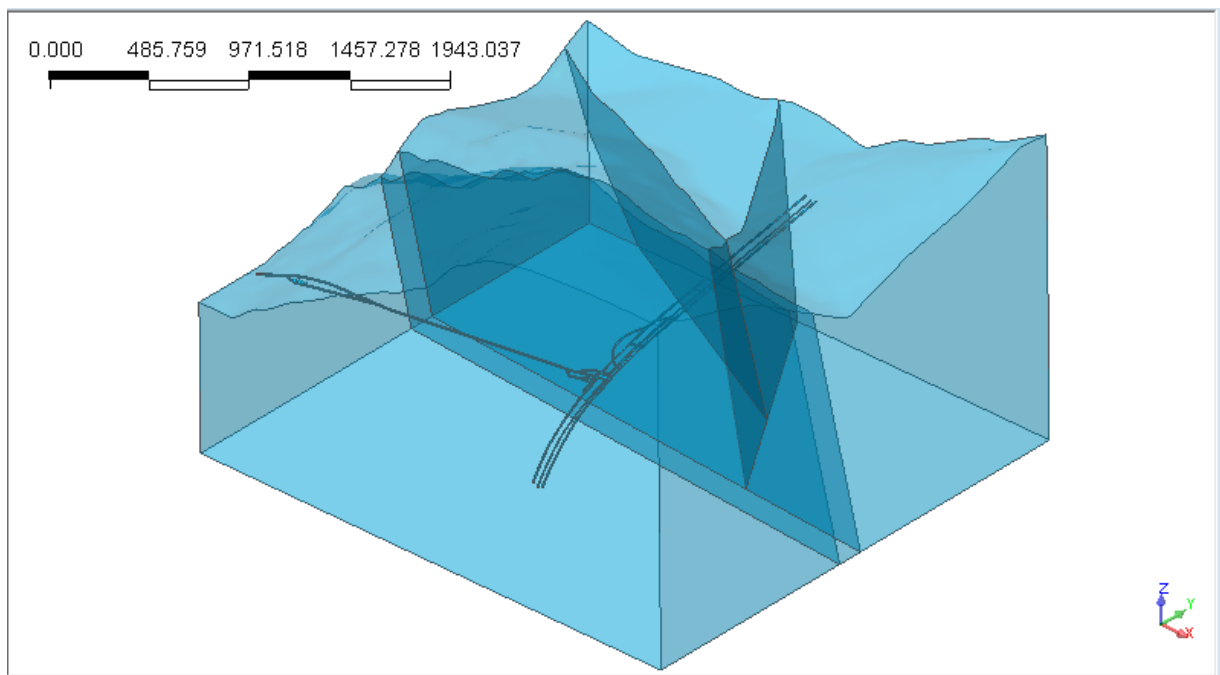


Figura 5-1 Prodotto finale della modellazione geometrica e geologica del Blocco di Studio utilizzato per le analisi strutturali

5.2.1.1 Canna Est

In Tabella 5.1 è presentata l'andamento plano-altimetrico estrapolato dai dati di progetto e in tabella 5.2 l'insieme di punti utilizzato per il tracciamento della galleria. In figura 5.1 è mostrato il risultato della modellazione nell'interfaccia di MIDAS GTS.

Tabella 5-1 Riassunto dei dati plano altimetrici ricavati dal progetto.

Binario Est (Dispari)									
Planimetria						Altimetria			
Km	Progressiva	L tratto	Rettilineo	Clotoide	Curva	Progressiva	L tratto	Rettilineo	Curva
30	457,417	6895,638	[Yellow bar]			457,417	1497,533	6,7‰	
31						954,95	265,16		[Grey bar]
32						220,106	17273,57		
33									
34									
35									
36									
37									
37	353,055	112,276			[Red bar]				
37	465,331	303,991				[Orange bar]			
37	769,322	112,276		[Red bar]					
37	881,598	10343,31	[Yellow bar]						
37									
38									
39									
40									
41									
42									
43									
44									
45									
46									
47									
48	224,905	234		[Red bar]					
48	458,905	2033,784			[Orange bar]				
49						493,672	262,82		[Black bar]
49									
49						756,492	4399,712		[Green bar]

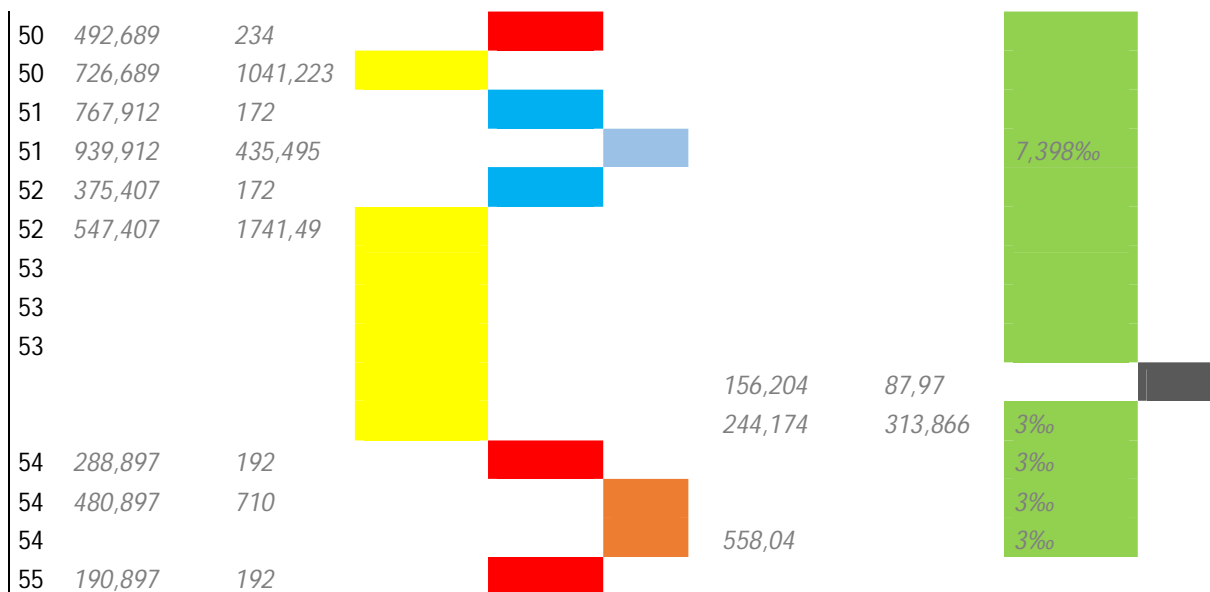


Tabella 5-2 Punti utilizzati per il tracciamento degli assi della galleria

Binario Est		
Quota Z [m]	Quota (X) [m]	Quota (Y) [m]
783,03	69,60655	7,45303
774,7637	880,8552	-6840,8
774,7637	894,2717	-6952,27
774,7637	936,23	-7252,84
774,7637	953,8534	-7363,72
731,7977	2596,506	-17575,8
731,7977	2635,746	-17806,4
728,2535	3459,937	-19645,3
728,2535	3606,016	-19828,1
735,6515	4263,338	-20635,6
735,6515	4371,282	-20769,5
743,0495	4628,709	-21120,7
743,0495	4723,938	-21263,9
759,0011	5681,194	-22718,7

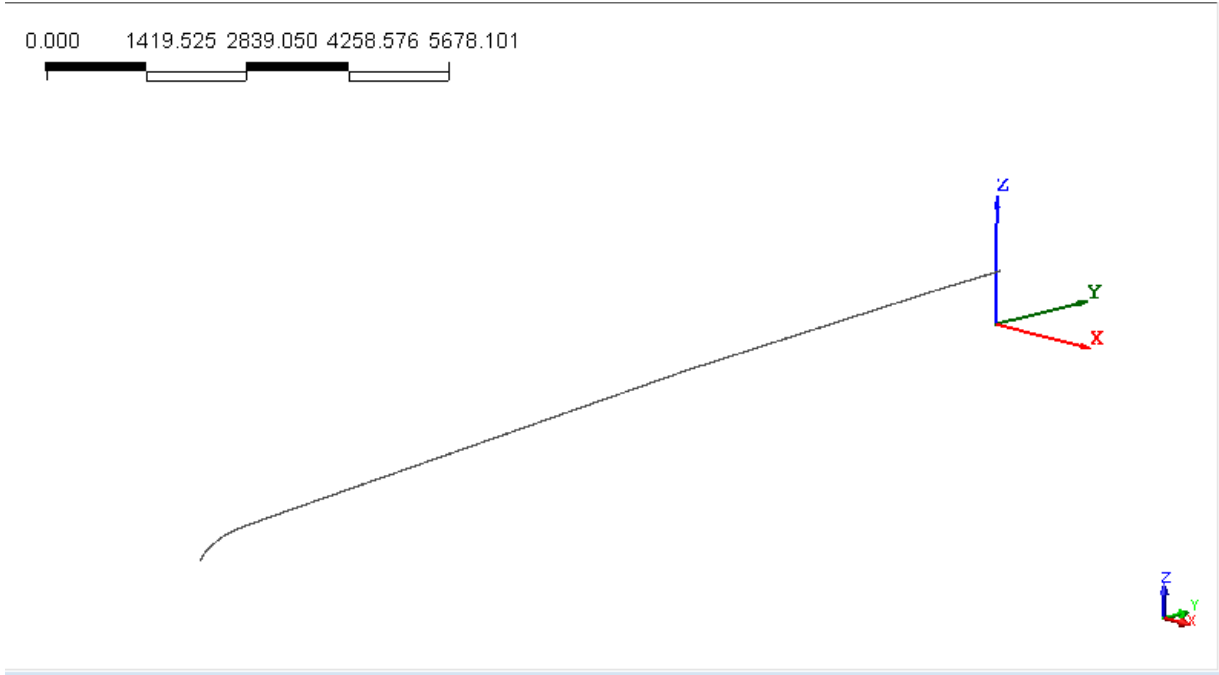


Figura 5-2 Canna Est

5.2.1.2 Canna Ovest

In Tabella 5.3 è presentata l'andamento plano-altimetrico estrapolato dai dati di progetto e in tabella 5.4 l'insieme di punti utilizzato per il tracciamento della galleria. In figura 5.2 è mostrato il risultato della modellazione nell'interfaccia di MIDAS GTS.

Tabella 5-3 Riassunto dei dati plano altimetrici ricavati dal progetto.

Binario Ovest (Pari)									
	Planimetria					Altimetria			
K m	Progressiva	L tratto	Rettilineo	Clotoide	Curva	Progressiva	L tratto	Rettilineo	Curva
30	416,539	6.896,727				416,539	1498,321	6,7‰	
31						914,86	265,16		
32						180,016	5079,894	-3,906‰	
33								-3,906‰	
34								-3,906‰	
35								-3,906‰	
36								-3,906‰	
37						259,91	602,909	-3,888‰	
37	313,266	112,668						-3,888‰	
37	425,934	306,014						-3,888‰	
37	731,948	112,668						-3,888‰	
37	844,616	10283,13						-3,888‰	
37						862,819	9978,681	-3,906‰	
38								-3,906‰	
39								-3,906‰	
40								-3,906‰	
41								-3,906‰	
42								-3,906‰	
43								-3,906‰	
44								-3,906‰	
45							1381,241	-3,906‰	
46								-3,906‰	
47						841,5	1623,106	-3,898‰	732,268
48	127,741	234							
48	361,741	2070,445							
49						19334,24	464,606		
49							286,17		
49									
49						750,776	4399,712	7,549‰	
50	432,187	234						7,549‰	
50	666,187	1093,171						7,549‰	
51	759,358	172						7,549‰	

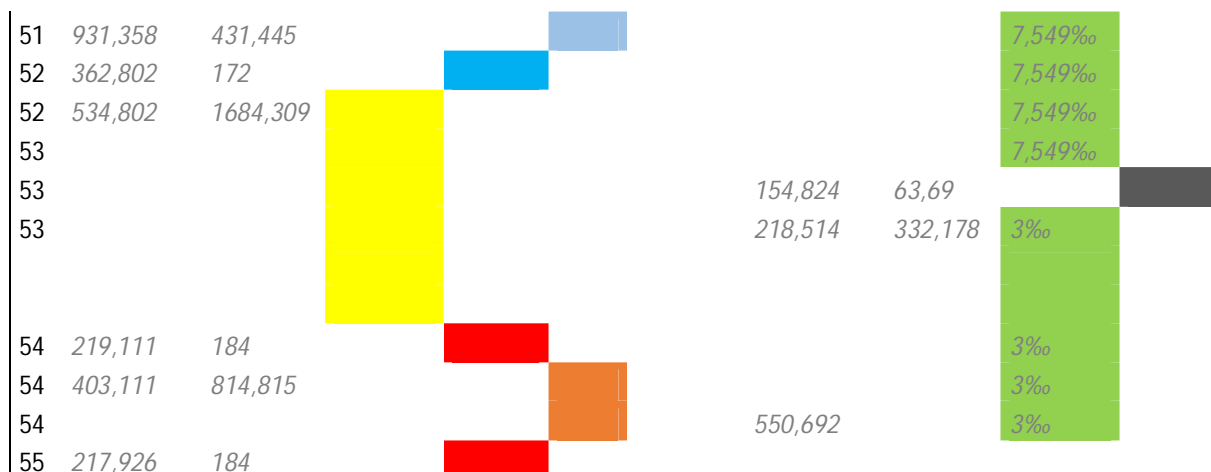


Tabella 5-4 Punti utilizzati per il tracciamento degli assi della galleria

Binario Ovest

Quota Z [m]	Quota (X) [m]	Quota (Y) [m]
783,025	691840,6	5209371
783,025	0	0
773,3836	811,3183	-6848,84
772,9455	824,781	-6923,43
771,7557	867,0875	-7263,76
771,3177	884,7732	-7375,03
731,1551	2517,868	-17527,7
730,2453	2557,075	-17758,3
731,608	3396,095	-19630,3
733,3744	3542,2	-19813,1
734,0778	4232,317	-20660,9
735,3762	4340,256	-20794,8
738,6332	4595,29	-21142,7
739,9316	4690,523	-21285,9
760,0488	5616,348	-22692,9
760,6008	5719,222	-22845,5

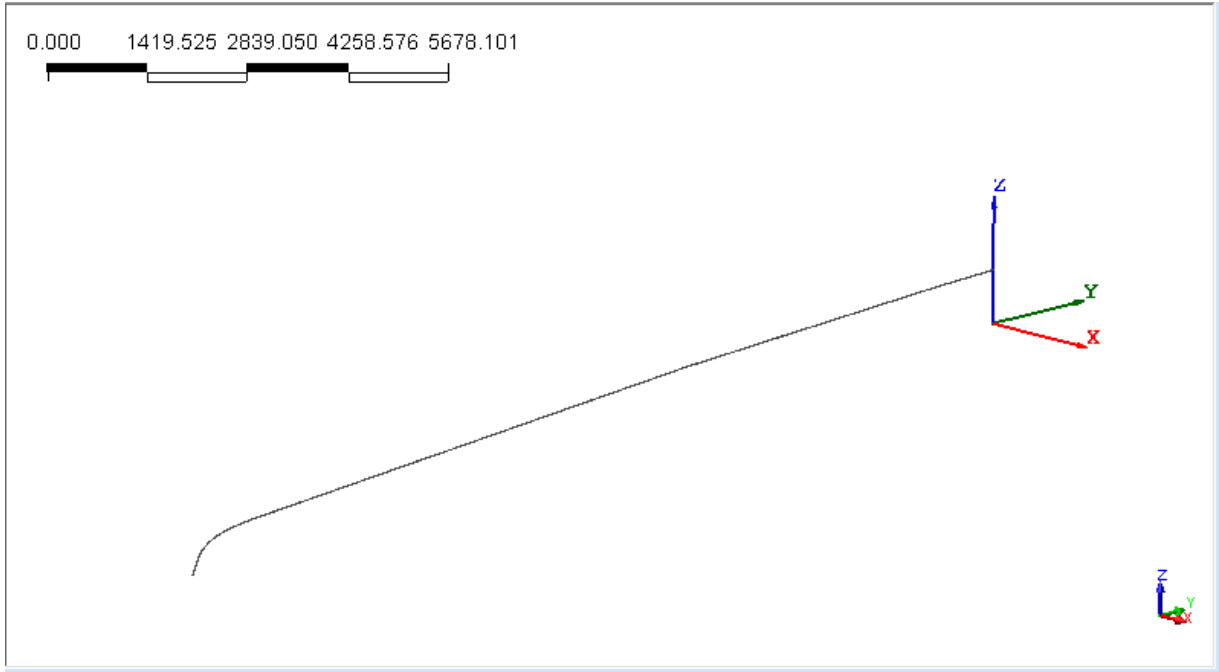


Figura 5-3 Canna Ovest

5.2.1.3 Cunicolo Esplorativo

In Tabella 5.5 è presentata l'andamento plano-altimetrico estrapolato dai dati di progetto e in tabella 5.6 l'insieme di punti utilizzato per il tracciamento della galleria. In figura 5.3 è mostrato il risultato della modellazione nell'interfaccia di MIDAS GTS.

Tabella 5-5 Riassunto dei dati plano altimetrici ricavati dal progetto.

Cunicolo esplorativo									
km	Planimetria					Altimetria			
	Progressiva	L tratto	Rettilineo	Clotoide	Curva			Rettilineo	Curva
0	0,000	5,414				0	6904,895	4,876	
0	5,414	145,261							
0	150,675	5,725							
0	156,4	110,502							
0	266,902	46,054							
0	312,956	625,49							
0	938,446	5679,66							
1									
2									
3									
4									
5									
6	618,106	405,296				904,895	20312,04		
7	23,402	123,96							
7	147,362	579,251							
7	726,613	861,368						4,044	
8	587,981	234							
8	821,981	2052,979							
9									
10	874,96	234							
11	108,96	10313,22							
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

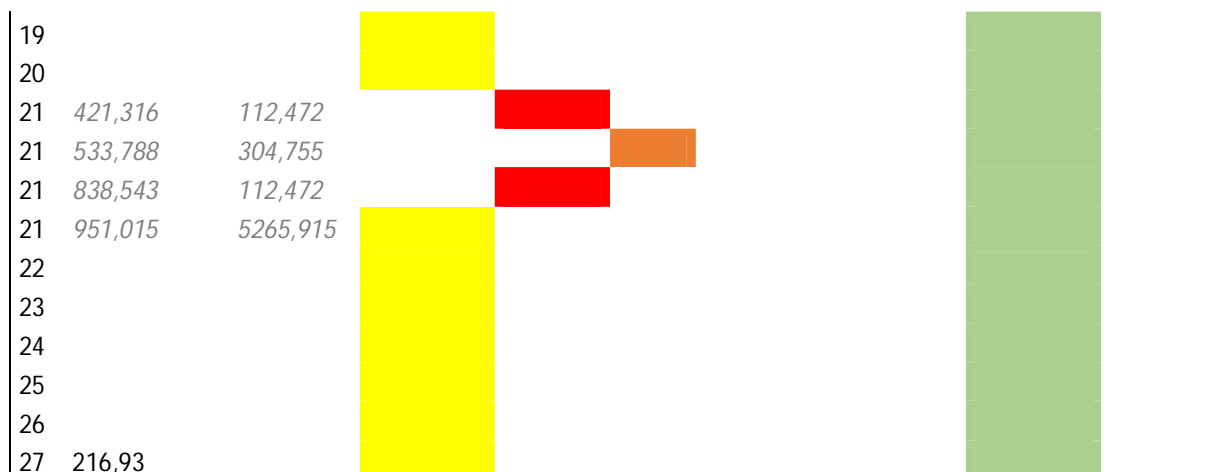


Tabella 5-6 Riassunto dei dati piano altimetrici ricavati dal progetto.

Cunicolo Esplorativo			
Quota Z [m]	Quota (X) [m]	Quota (Y) [m]	
668	9478,331	-25805	
668	9476,132	-25805	
668	9437,028	-25665,9	
668	9436,499	-25660,2	
668	9434,999	-25549,8	
668	9438,005	-25501,9	
668	9212,838	-24942,5	
701,6683	5028,59	-21101,8	
702,0529	4689,806	-20882,9	
702,0529	4575,867	-20834	
702,0529	4117,888	-20488,6	
706,0969	3574,108	-19820,6	
706,0969	3428,016	-19637,8	
714,1849	2596,41	-17782,4	
718,2289	2557,187	-17551,7	
758,6689	919,3121	-7258,37	
758,6689	901,6576	-7258,29	
758,6689	859,5251	-6956,47	

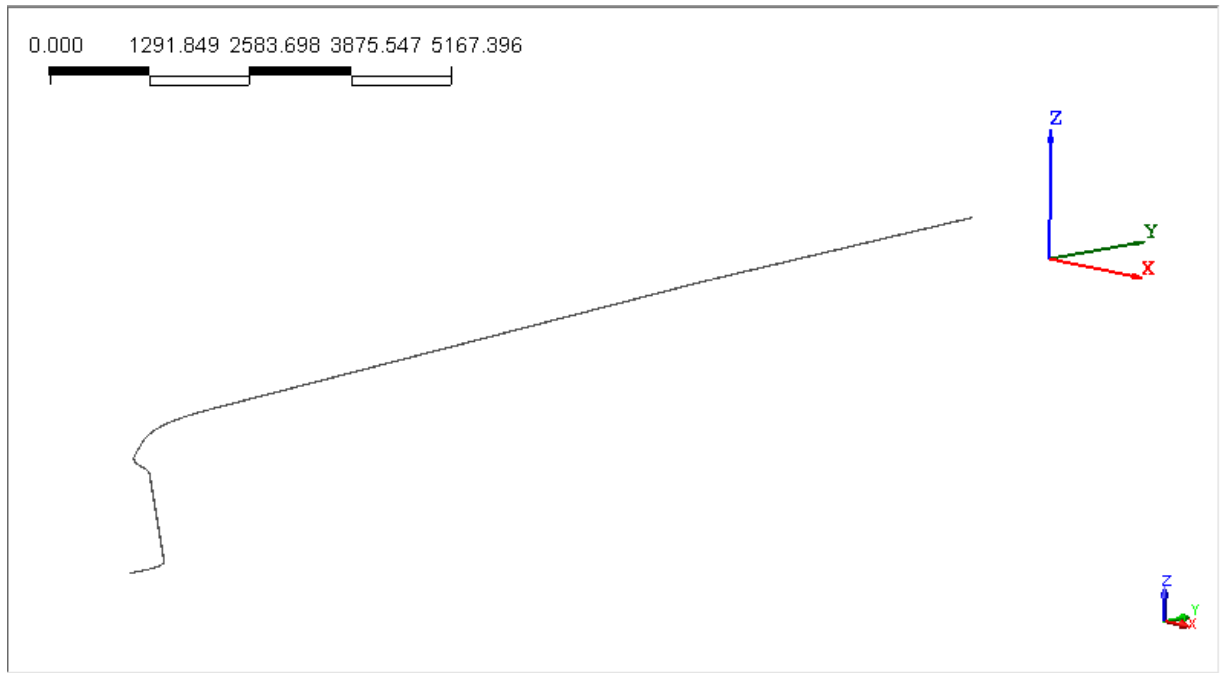


Figura 5-4 Cunicolo Esplorativo

5.2.1.4 Opere ausiliare

In Tabella 5.7 è presentata la tabella riassuntiva in cui vengono mostrati i punti utilizzati per il tracciamento della galleria, mentre in figura 5.4 è mostrato il risultato della modellazione nell'interfaccia di MIDAS GTS

Tabella 5-7 Di seguito le tabelle riassuntive dei punti utilizzati per il tracciamento delle opere di supporto per la logistica

Cunicolo di collegamento 1		O-E	Quota X	Quota Y	Quota Z	
0			2491,669	-17364,8	731,795	
70			2560,78	-17353,7	731,794	

Cunicolo di collegamento 2						
0			2545,315	-17693,5	730,497	
97,945			2602,677	-17614,1	730,763	

Cunicolo di collegamento 3						
0			2594,37	-17939,2	729,532	
66,354			2659,012	-17921,2	729,544	

Galleria collegamento cunicolo esplorativo - Canna Ovest						
0	34,39		2674,91	-18123,2	716,302	Cunicolo
34,39	345,511		2645,697	-18105,1	716,302	
378,78	39,673		2544,276	-17803	729,26	
419,573			2558,515	-17765,9	729,26	Canna O

Pezzo dritto che collega le canne						
0	5,814		2573,124	-18294,4	725,526	
5,814	91,456				725,505	
97,27	79,111				728,06	
176,381			2742,048	-18243,7	728,213	

Pezzo che serve per i cameroni						
0	15,273		2516,843	-18311,3	729,612	Fin Mules
15,273	51,526				728,698	
66,799	118,282	Angolo Secco	2572,685	-18348	728,491	
185,081	13,076				728,018	
198,157			2698,492	-18310,2	728,018	Canna O

Tunnel di collegamento al cunicolo esplorativo					
-100,03	36,988		966,6519	-18824,7	868,52
-63,042	26,775				868,52
-36,267	5,096				869,25
-31,171	10,426				869,263
-20,745	68,932				869,34
48,187	31,925				870,027
80,112	237,864		1209,66	-18646,4	Vertice
317,976	255,151				
573,127	67,318		1614,697	-18582,2	Vertice
640,445	967,006		2573,124	-18294,4	
1591,725					725,584
1607,451					725,526
Bivio					
1607,451	64,33				725,526
1671,781	26,18		2604,082	-18222,5	Vertice
1697,961	81,161				
1721,776					716,937
1779,122			2695,212	-18195,1	716,82

Caverna Ventilazione					
0	64		1078,505	-18742,3	869,545
64	376,79	Angolo secco	1141,814	-18752,3	864,044
440,79	58,4		1490,209	-18608,8	829,644
499,19			1546,304	-18593,1	824,229

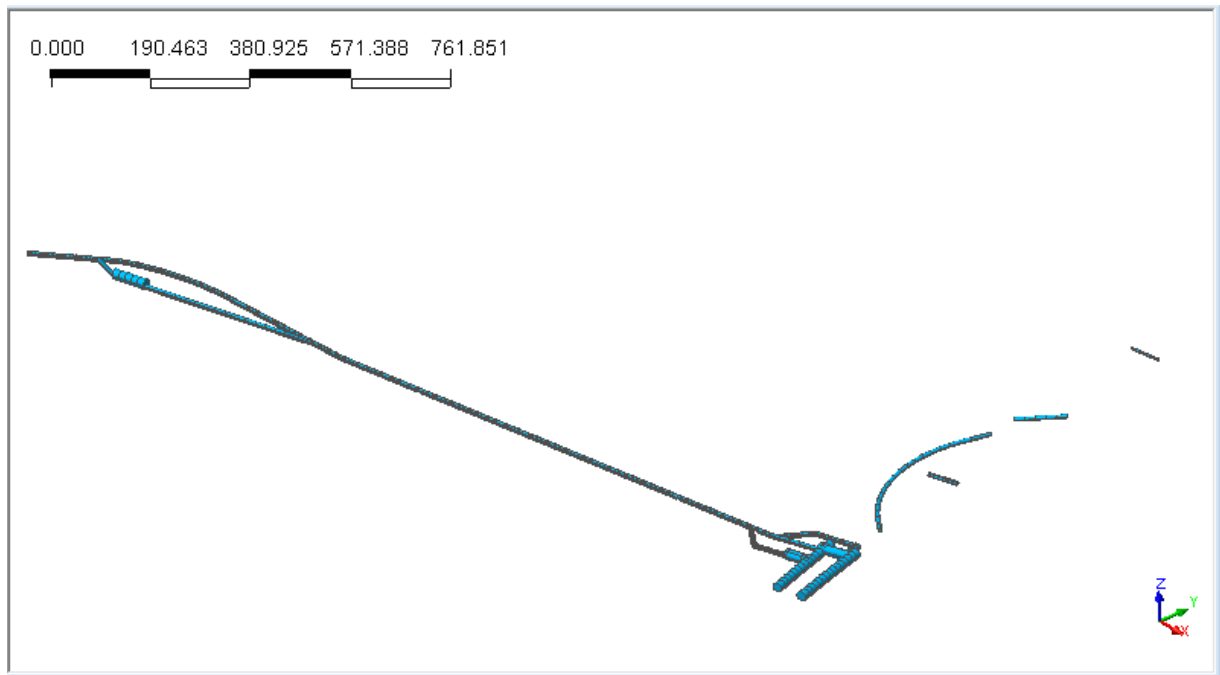


Figura 5-5 Opere Ausiliarie legate al sistema logistico

5.2.1.5 Superficie topografica

Per ottenere una superficie topografica che fosse il più fedele possibile alle condizioni reali si sono sfruttate le isoipse ricavate da un file di progetto. Grazie all'ausilio del software Revit di Autodesk è stato possibile ricavare la superficie topografica della zona interessata dalla finestra di Mules e dal sistema logistico delle gallerie studiate in questo lavoro.

In figura si può vedere nell'interfaccia di Revit una vista isometrica in 3D della superficie topografica, in nero le isoipse e si può apprezzare il rettangolo che rappresenta l'impronta del blocco in oggetto d'esame.

Nella figura seguente si può osservare il blocco di studio modellato sulla superficie topografica appena presentata.

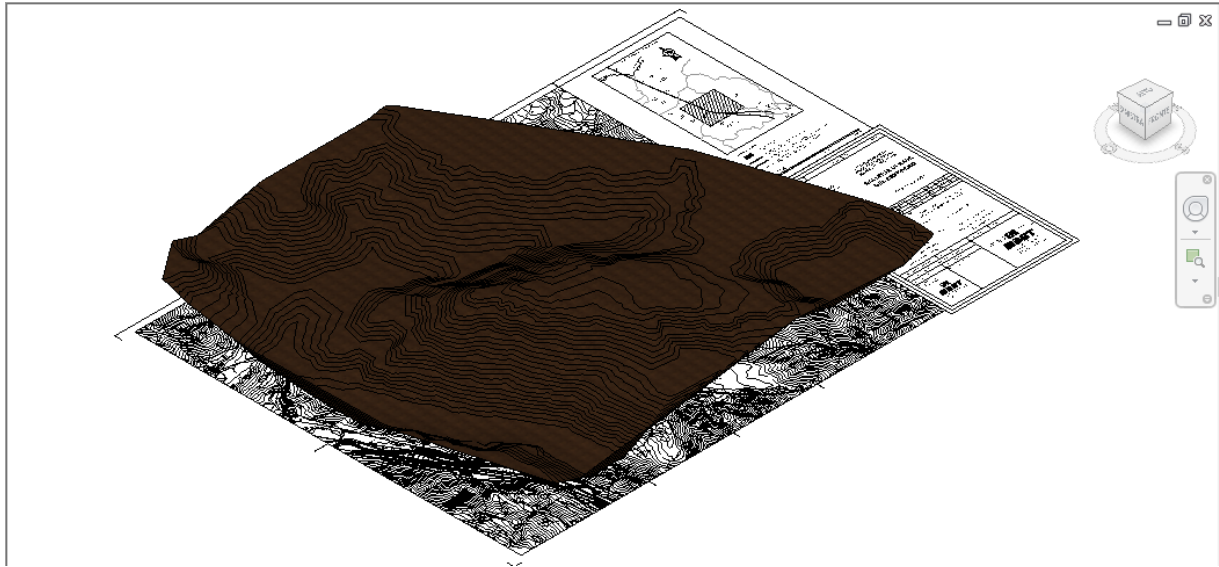


Figura 5-6 Superficie Topografica nell'interfaccia di Revit

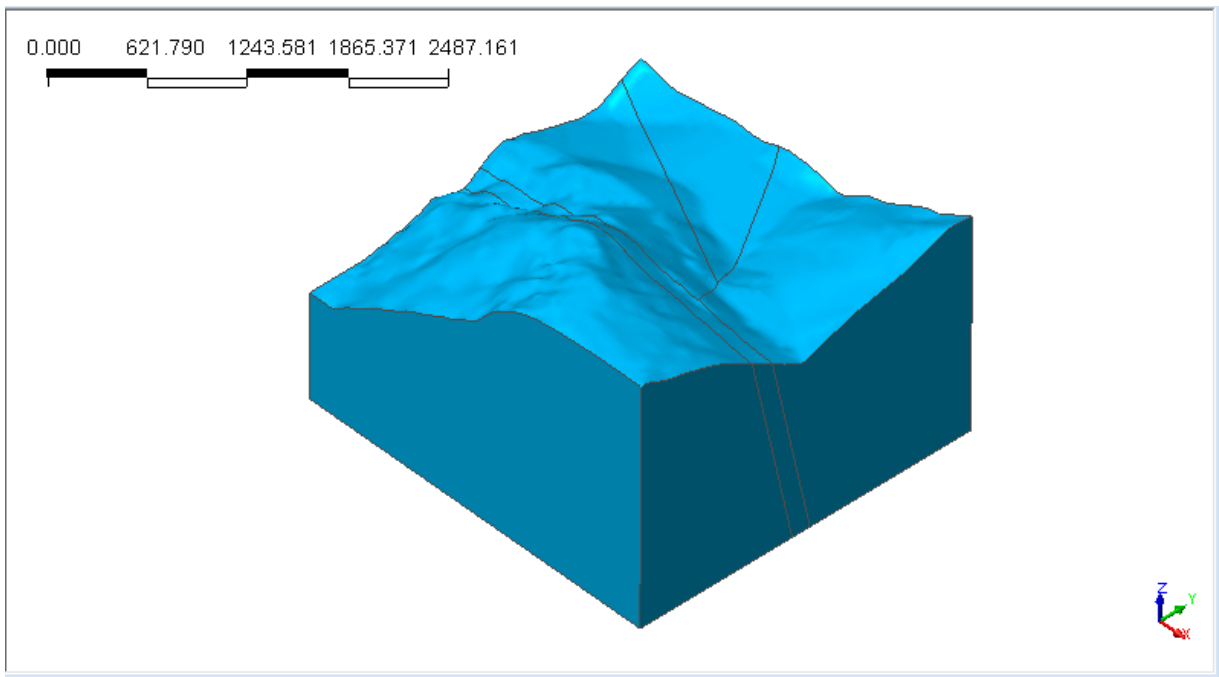


Figura 5-7 Blocco di Studio con superficie topografica

5.2.1.6 Caratterizzazione geologica in 3D delle zone interessanti il sistema di gallerie

Il blocco di studio è stato poi suddiviso in 5 unità litologiche omogenee

- Granito di Bressanone (Rosso)
- Tonaliti (Arancione)
- Paragneiss (Giallo)
- Faglia della Pusteria (Azzurro)
- Faglia Periadriatica (Blu)

Questo è stato fatto utilizzando i dati sull'assetto stratigrafico dei vari tipi di roccia. Alcune semplificazioni sono state condotte nella definizione dei litotipi omogenei, delle quali si terrà conto durante l'assegnazione dei parametri geomeccanici di ciascuno di essi.

In figura si possono meglio apprezzare le 5 unità in cui è stato suddiviso il blocco.

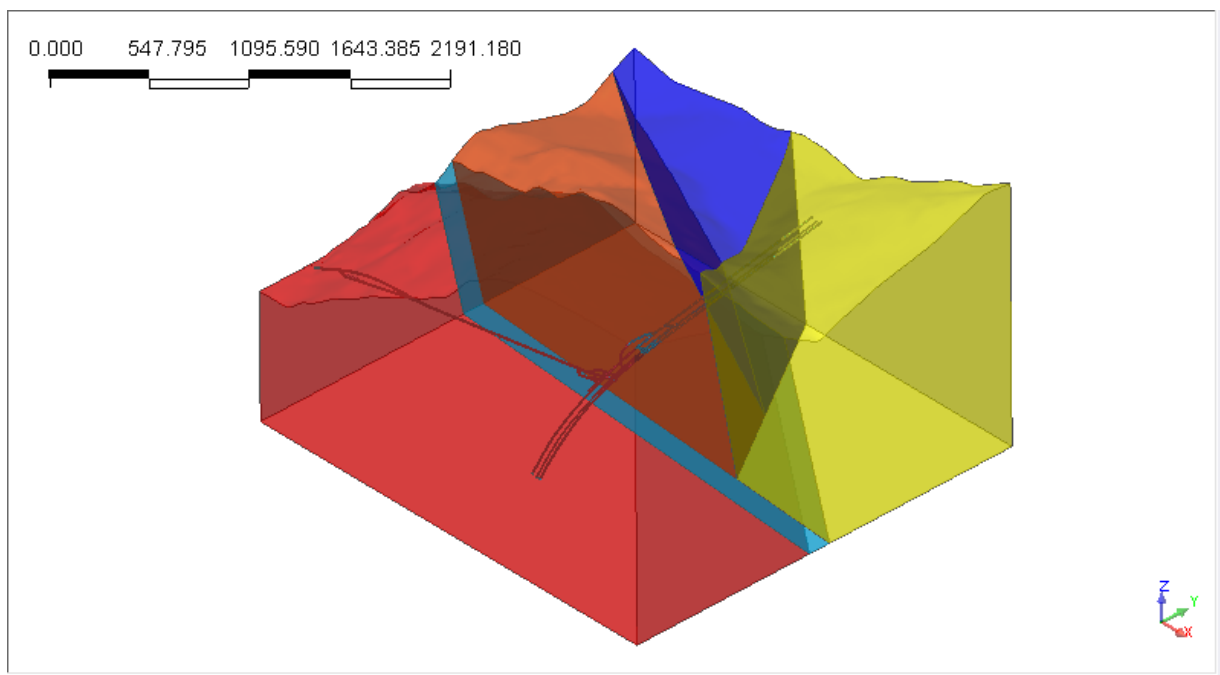


Figura 5-8 5 Unità litologiche che costituiscono il blocco di studio

5.3 CREAZIONE DELLA MESH

5.3.1 Definizione dei parametri geologici e geotecnici dei litotipi presenti

Primo passo da fare per la realizzazione delle mesh nel blocco di studio è l'inserimento dei parametri geotecnici associati ai litotipi precedentemente individuati. Questa parte è stata decisamente delicata in quanto i parametri geo-tecnici degli ammassi rocciosi oltre a essere di difficile reperibilità non è detto che siano estremamente pertinenti con quelli riscontrabili sul campo. Per le tonaliti e i Graniti di Bressanone sono stati trovati dei dati nel progetto e attraverso le formule proposte da Hoek-Brown presentate precedentemente è stato possibile ricavare i parametri m,s e UCS necessari per la definizione del modello costitutivo di Hoek-Brown.

In figura un esempio dell'interfaccia attraverso la quale è stato possibile definire i vari tipi di materiale

General

ID Name Color

Material Parameters

Modulus of Elasticity (E) kN/m²

Poisson's Ratio (Nu)

Alternative Stiffness Parameters

Shear Modulus(G) kN/m²

Oedometer Modulus (Eoed) kN/m²

Unit Weight (Gamma) kN/m³

Unit Weight (Saturated) kN/m³

Cohesion (C) kN/m²

Frictional Angle (Phi) [deg]

Damping Ratio(For Dynamic)

Damping Ratio

Initial Stress Parameters

Ko Anisotropy

Thermal Parameter

Thermal Coefficient 1/[T]

Seepage Parameters

Permeability Coefficients

kx	ky	kz
<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>

m/sec

Vol. Water Content (W)

Unsaturated Property

Specific Storativity(Ss) 1/m

Drainage Parameters

Drained Undrained

Skempton's B Coefficient

Constitutive Model

Model Type

Parameters

Initial m

Initial s

Residual m

Residual s

Uniaxial Comp. Strength (Sigmac) kN/m²

Figura 5-9 Interfaccia per la definizione dei parametri geo-meccanici degli ammassi rocciosi

Il modulo elastico dell'ammasso roccioso è stato ricavato grazie alle formule di Hoek-Brown. Il peso specifico è stato ricavato dalla letteratura ed è stato ipotizzato che le rocce non avessero acqua al loro interno per semplificare il lavoro del calcolatore.

5.3.1.1 Granito di Bressanone




General		
ID	5	
Name	Granito di Bressanone	
Color		
Material Parameters		
Modulus of Elasticity (E)	32789124.9 kN/m ²	
Poisson's Ratio (Nu)	0.2	
Alternative Stiffness Parameters		
Shear Modulus(G)	13662135.4 kN/m ²	
Oedometer Modulus (Eoed)	36432361 kN/m ²	
Unit Weight (Gamma)	26 kN/m ³	
Unit Weight (Saturated)	26 kN/m ³	
Cohesion (C)	2941.995 kN/m ²	
Frictional Angle (Phi)	36 [deg]	
Damping Ratio(For Dynamic)		
Damping Ratio	0.05	
Initial Stress Parameters		
Ko	<input type="checkbox"/> Anisotropy  1	
Thermal Parameter		
Thermal Coefficient	1e-006 1/[T]	
Seepage Parameters		
Permeability Coefficients		
kx	ky	kz
1	1	1
m/sec		
Vol. Water Content (W)	0	
<input type="checkbox"/> Unsaturated Property	... 	
Specific Storativity(Ss)	0 1/m	
Drainage Parameters		
<input checked="" type="radio"/> Drained	<input type="radio"/> Undrained	
Skempton's B Coefficient	1	
Constitutive Model		
Model Type	Hoek-Brown	
Parameters		
Initial m	6.17748341	
Initial s	0.01466601	
Residual m	6.17748341	
Residual s	0.01466601	
Uniaxial Comp. Strength (Sigmac)	67118.136 kN/m ²	

Figura 5-10 Granito di Bressanone, parametri Geotecnici

5.3.1.2 Tonalite



General		
ID	5	
Name	Tonaliti	
Color		
Material Parameters		
Modulus of Elasticity (E)	16331220 kN/m ²	
Poisson's Ratio (Nu)	0.3	
Alternative Stiffness Parameters		
Shear Modulus(G)	6281238.46 kN/m ²	
Oedometer Modulus (Eoed)	21984334.6 kN/m ²	
Unit Weight (Gamma)	24.516625 kN/m ³	
Unit Weight (Saturated)	24.516625 kN/m ³	
Cohesion (C)	2941.995 kN/m ²	
Frictional Angle (Phi)	36 [deg]	
Damping Ratio(For Dynamic)		
Damping Ratio	0.05	
Initial Stress Parameters		
Ko	<input type="checkbox"/> Anisotropy  1	
Thermal Parameter		
Thermal Coefficient	1e-006 1/[T]	
Seepage Parameters		
Permeability Coefficients		
kx	ky	kz
1	1	1
m/sec		
Vol. Water Content (W)	0	
<input type="checkbox"/> Unsaturated Property	...	
Specific Storativity(Ss)	0 1/m	
Drainage Parameters		
<input checked="" type="radio"/> Drained	<input type="radio"/> Undrained	
Skempton's B Coefficient	1	
Constitutive Model		
Model Type	Hoek-Brown	
Parameters		
Initial m	4.41010984	
Initial s	0.00673794	
Residual m	4.41010984	
Residual s	0.00673794	
Uniaxial Comp. Strength (Sigmac)	15920.67 kN/m ²	

Figura 5-11 Tonalite, parametri geomeccanici

5.3.1.3 Paragneiss




General		
ID	4	
Name	Paragneiss	
Color		
Material Parameters		
Modulus of Elasticity (E)	18493420 kN/m ²	
Poisson's Ratio (Nu)	0.3	
Alternative Stiffness Parameters		
Shear Modulus(G)	7112853.85 kN/m ²	
Oedometer Modulus (Eoed)	24894988.5 kN/m ²	
Unit Weight (Gamma)	24.516625 kN/m ³	
Unit Weight (Saturated)	24.516625 kN/m ³	
Cohesion (C)	2941.995 kN/m ²	
Frictional Angle (Phi)	36 [deg]	
Damping Ratio(For Dynamic)		
Damping Ratio	0.05	
Initial Stress Parameters		
Ko	<input type="checkbox"/> Anisotropy  1	
Thermal Parameter		
Thermal Coefficient	1e-006 1/[T]	
Seepage Parameters		
Permeability Coefficients		
kx	ky	kz
1	1	1
m/sec		
Vol. Water Content (W)	0	
<input type="checkbox"/> Unsaturated Property	... 	
Specific Storativity(Ss)	0 1/m	
Drainage Parameters		
<input checked="" type="radio"/> Drained	<input type="radio"/> Undrained	
Skempton's B Coefficient	1	
Constitutive Model		
Model Type	Hoek-Brown	
Parameters		
Initial m	6.23244561	
Initial s	0.00752978	
Residual m	6.23244561	
Residual s	0.00752978	
Uniaxial Comp. Strength (Sigmac)	70153.03 kN/m ²	

Figura 5-12 Paragneiss, parametri Geomeccanici

5.3.1.4 Faglia della Pusteria

General		
ID	<input type="text" value="5"/>	Name <input type="text" value="Faglia"/>
		Color <input type="text" value=""/>
Material Parameters		
Modulus of Elasticity (E)	<input type="text" value="4013300"/>	kN/m ²
Poisson's Ratio (Nu)	<input type="text" value="0.3"/>	
Alternative Stiffness Parameters		
Shear Modulus(G)	<input type="text" value="1543576.92"/>	kN/m ²
Oedometer Modulus (Eoed)	<input type="text" value="5402519.23"/>	kN/m ²
Unit Weight (Gamma)	<input type="text" value="22"/>	kN/m ³
Unit Weight (Saturated)	<input type="text" value="22"/>	kN/m ³
Cohesion (C)	<input type="text" value="500"/>	kN/m ²
Frictional Angle (Phi)	<input type="text" value="32"/>	[deg]
Damping Ratio(For Dynamic)		
Damping Ratio	<input type="text" value="0.05"/>	
Initial Stress Parameters		
Ko	<input type="checkbox"/> Anisotropy <input type="text" value="0.7"/>	
Thermal Parameter		
Thermal Coefficient	<input type="text" value="1e-006"/>	1/[T]
Seepage Parameters		
Permeability Coefficients		
<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>
m/sec		
Vol. Water Content (W)	<input type="text" value="0"/>	
<input type="checkbox"/> Unsaturated Property	<input type="text" value=""/>	...
Specific Storativity(Ss)	<input type="text" value="0"/>	1/m
Drainage Parameters		
<input checked="" type="radio"/> Drained	<input type="radio"/> Undrained	
Skempton's B Coefficient	<input type="text" value="1"/>	
Constitutive Model		
Model Type	<input type="text" value="Mohr Coulomb"/>	
Parameters		
Inc. of Elastic Modulus	<input type="text" value="0"/>	kN/m ³
Inc. of Cohesion	<input type="text" value="0"/>	kN/m ³
Reference Height	<input type="text" value="0"/>	m
<input type="checkbox"/> Dilatancy Angle	<input type="text" value="32"/>	[deg]
<input type="checkbox"/> Tensile Strength	<input type="text" value="0"/>	kN/m ²

Figura 5-13 Faglia della Pusteria, parametri Geomeccanici

5.3.1.5 Faglia periadriatica

General

ID Name Color

Material Parameters

Modulus of Elasticity (E) kN/m²

Poisson's Ratio (Nu)

Alternative Stiffness Parameters

Shear Modulus(G) kN/m²

Oedometer Modulus (Eoed) kN/m²

Unit Weight (Gamma) kN/m³

Unit Weight (Saturated) kN/m³

Cohesion (C) kN/m²

Frictional Angle (Phi) [deg]

Damping Ratio(For Dynamic)

Damping Ratio

Initial Stress Parameters

Ko Anisotropy

Thermal Parameter

Thermal Coefficient 1/[T]

Seepage Parameters

Permeability Coefficients

kx	ky	kz
<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>

m/sec

Vol. Water Content (W)

Unsaturated Property

Specific Storativity(Ss) 1/m

Drainage Parameters

Drained Undrained

Skempton's B Coefficient

Constitutive Model

Model Type

Parameters

Inc. of Elastic Modulus kN/m³

Inc. of Cohesion kN/m³

Reference Height m

Dilatancy Angle [deg]

Tensile Strength kN/m²

Figura 5-14 Faglia Periadriatica, parametri Geomeccanici

5.3.2 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno si applicano alle estremità del blocco di studio e sono riassunte in figura.

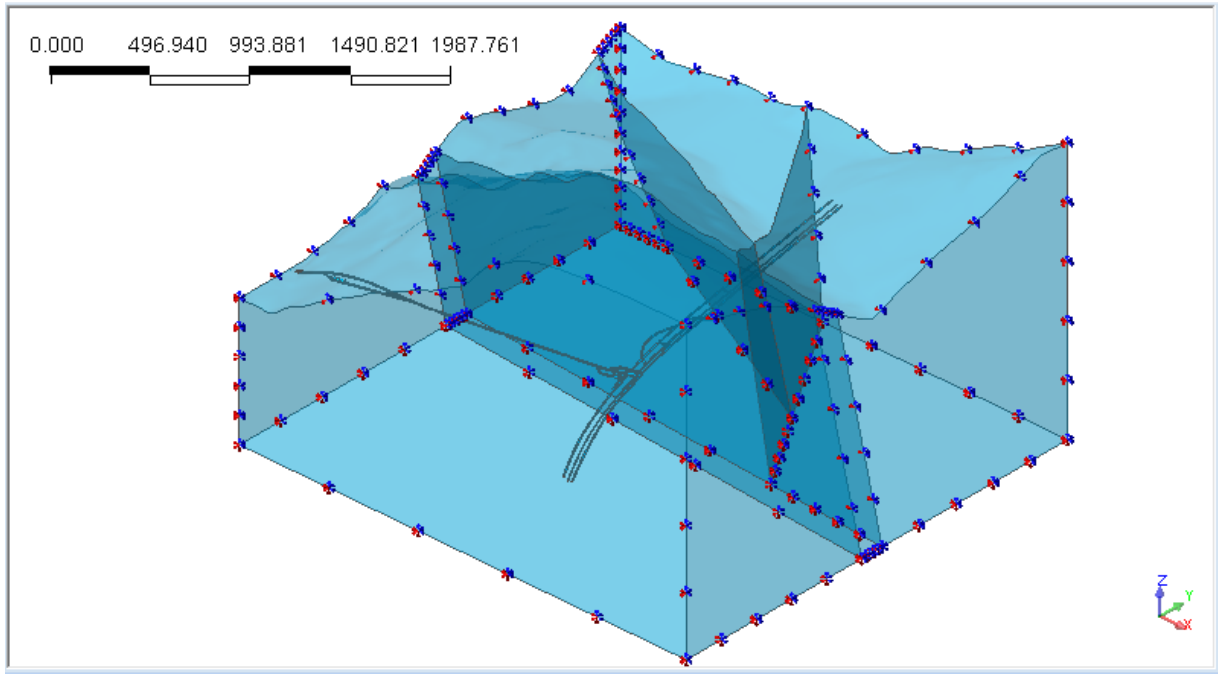


Figura 5-15 In figura sono evidenziate le condizioni al contorno imposte al blocco di studio

Per meglio specificarle si possono riassumere in:

- Rotazioni impedito rispetto a ogni asse per ciascuna faccia del blocco di studio a eccezione della superficie topografica, cioè il "coperchio"
- Traslazioni impedito lungo ognuno dei 3 assi per la faccia di base del blocco di studio
- Traslazioni impedito lungo l'asse x per le facce del blocco di studio appartenenti al piano YZ
- Traslazioni impedito lungo l'asse y per le facce del blocco di studio appartenenti al piano XZ

Per quanto riguarda i carichi è presente esclusivamente il peso proprio e non si è ipotizzata la presenza di acqua all'interno degli ammassi rocciosi per non appesantire eccessivamente il carico di lavoro del software di modellazione

5.4 CONSIDERAZIONI SUL SOFTWARE MIDAS GTS

MIDAS GTS si rivela senza dubbio uno strumento molto potente per la modellazione di complessi sistemi geologici e/o di strutture. Detto questo va sottolineato come spesso il programma si è dimostrato inadeguato e carente in alcune funzioni base ed è stato quindi affiancato da software esterni per la realizzazione o la trattazione di alcune parti del modello.

Da un punto di vista geometrico GTS è stato particolarmente performante per quanto riguarda la realizzazione del sistema di gallerie e molto debole nella caratterizzazione geologica del blocco di studio costringendo spesso a trovare qualche maniera per aggirare dei problemi del programma, quale spostare di pochi metri un elemento e così via.

Essendo il blocco di studio di quasi 4 chilometri per lato l'analisi si è eseguita utilizzando un'escamotage, cioè analizzando piccole porzioni di ammasso rocciosi ritenute particolarmente interessanti. Queste verranno presentate e approfondite nel prossimo capitolo. E' stato necessario per via dei limiti hardware e probabilmente per una non ottimale ottimizzazione del software che rendeva troppo gravose le tempistiche per la modellazione delle mesh.

6 RISULTATI DELLE ANALISI SUL MODELLO

6.1 SCENARI IPOTIZZATI

6.1.1 Studio del blocco in analisi nelle condizioni iniziali

In questa prima fase si analizzerà il comportamento del blocco in assenza della galleria, questo servirà a definire le condizioni iniziali in cui si trovano gli ammassi che per la realizzazione del sistema di gallerie si andrà a scavare.

E' interessante notare come la semplice esecuzione di un'analisi sul blocco permette di verificare immediatamente la bontà del modello realizzato, sia da un punto di vista geometrico che da un punto di vista della caratterizzazione geomeccanica.

6.1.1.1 Condizioni

Le condizioni sono quelle presentate nel capitolo precedente, cioè sono impediti le rotazioni e alcune traslazioni a seconda della faccia.

6.1.1.2 Risultati

6.1.1.2.1 Deformazioni Reali

Nella figura seguente si può notare come il blocco subisca un leggero assestamento, dell'ordine di circa un metro nel punto più gravoso. Ciò è da attribuire al fatto che Midas deve portare gli elementi tetraedrici in una posizione di equilibrio, nell'atto pratico effettuando una compattazione del materiale.

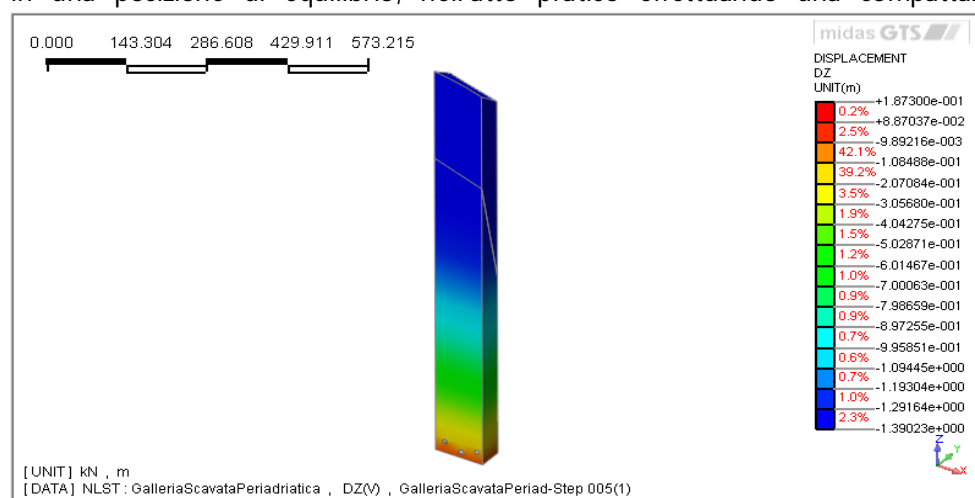


Figura 6-1 Dislocamenti dovuti al processo di compattazione

6.1.1.2.1.1 Sforzi

Nella figura si vede chiaramente che gli sforzi sono compatibili con quanto ci si aspetta dalla geotecnica. Gli stresses in fatti rispondono con ottima approssimazione alla nota legge:

$$\sigma = \gamma * z$$

Questo fornisce la ragionevole certezza che il modello sia stato impostato nella maniera corretta e non ci siano stati gravi errori nella progettazione dello stesso.

6.1.2 Studio del blocco dopo l'assettamento e con le gallerie scavate

L'idea dietro a questo elaborato di tesi era di analizzare nel suo complesso un blocco di grandi dimensioni scavato da un sistema di gallerie particolarmente complesso in un contesto geologico non omogeneo. Durante la creazione delle mesh è apparso subito evidente che non vi era possibilità di proseguire lungo questa strada in quanto limiti hardware e software rendevano impossibile anche solo la modellazione di una struttura tanto complessa.

Nel progetto fornito come documentazione i progettisti si sono affidati a un'analisi in 2D di alcune delle sezioni più delicate e sull'onda di questo aspetto si è scelto di analizzare tre condizioni particolarmente delicate rappresentate dalle due faglie e dal punto in cui il sistema logistico causa una perturbazione più gravosa nell'ammasso roccioso, cioè nei cameroni.

6.1.2.1 Faglia della Pusteria

In questo caso si è scelto di utilizzare un blocco di moderate dimensioni in modo da superare i problemi prima specificati. All'interno del blocco sono scavate le due canne principali, il cunicolo esplorativo che in questa progressiva ha una sezione allargata rispetto alla standard e un tunnel di collegamento tra le due canne principali.

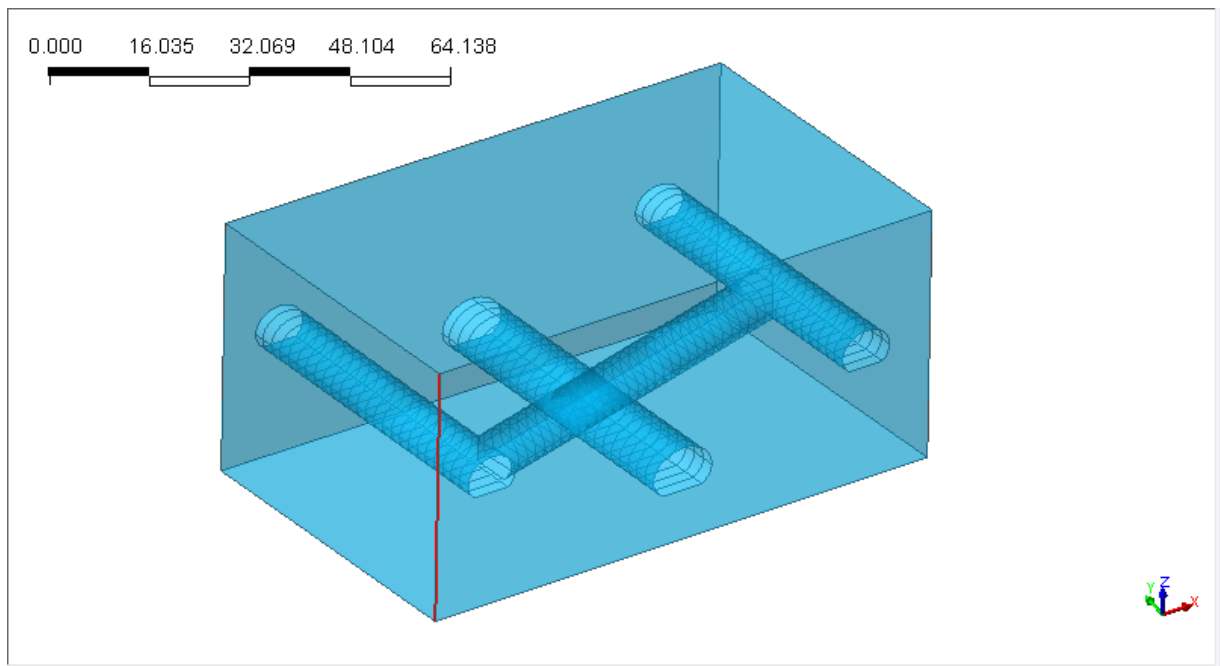


Figura 6-2 Dettaglio Blocco di studio per il tratto nella faglia della pusteria

Per dare un'idea di quanto sia stato necessario ridurre la dimensione di indagine viene presentata la figura seguente in cui si vede il blocco inserito nella porzione di spazio caratterizzata dalla Faglia della Pusteria.

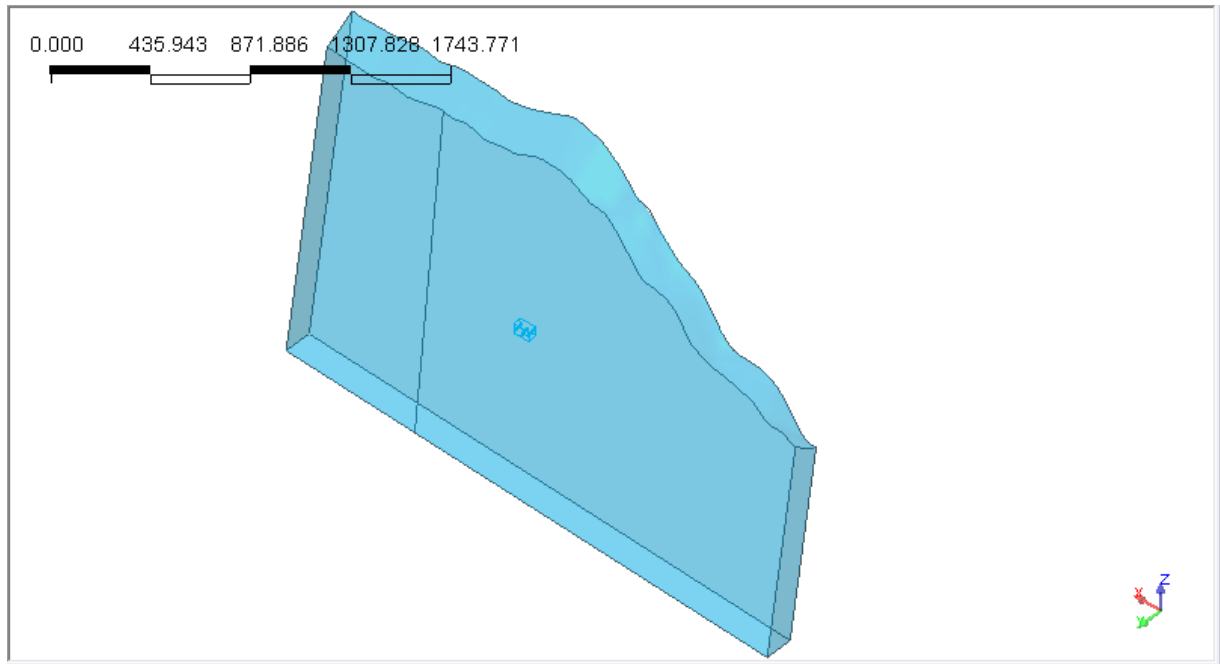


Figura 6-3 In figura si nota quanto sia piccolo il blocco di studio rispetto alla faglia della Pusteria

In seguito a difficoltà riscontrate nell'assegnare a una superficie un carico distribuito, che sarebbe dovuto corrispondere al peso della colonna di ammasso roccioso soprastante il blocco si è optato per proiettare in elevazione fino a raggiungere la superficie topografica.

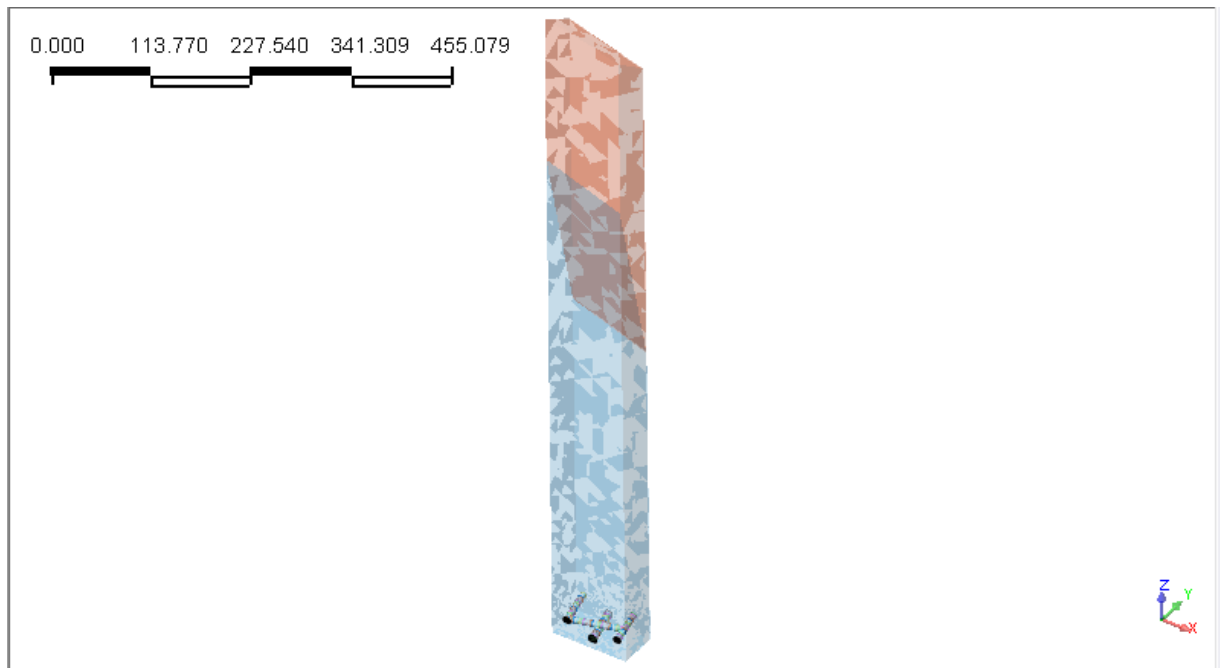


Figura 6-4 In figura si può notare già la suddivisione in elementi tetraetredici, gli elementi finit.

6.1.2.1.1 Risultati

Si riportano in sequenza gli spostamenti lungo l'asse verticale, lungo l'asse orizzontale e il gradiente degli sforzi rispetto all'asse verticale.

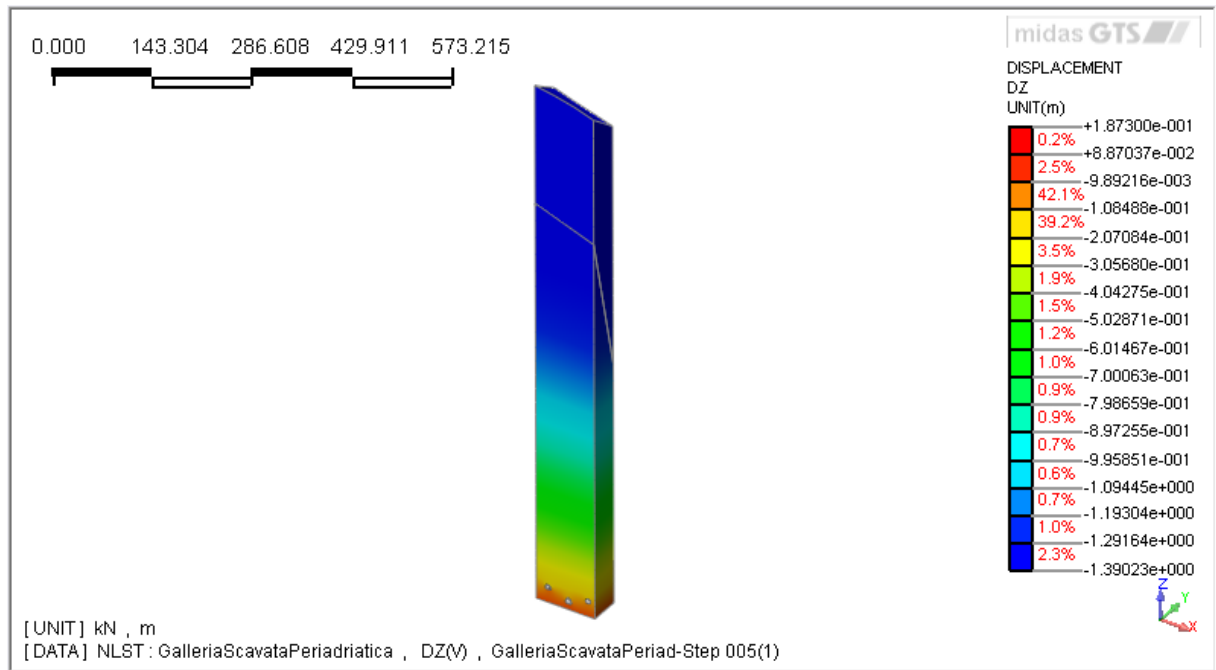


Figura 6-5 Dislocamento degli elementi finiti rispetto all'asse Z, sulla destra della figura la legenda.

Come si vede nella figura il modello restituisce dei valori plausibili, gli spostamenti sono maggiori in superficie e si annullano procedendo in profondità. I valori positivi sugli spostamenti si verificano solo per il 2% dei nodi il che potrebbe far pensare a rotazioni di qualche elemento finito durante la modellazione.

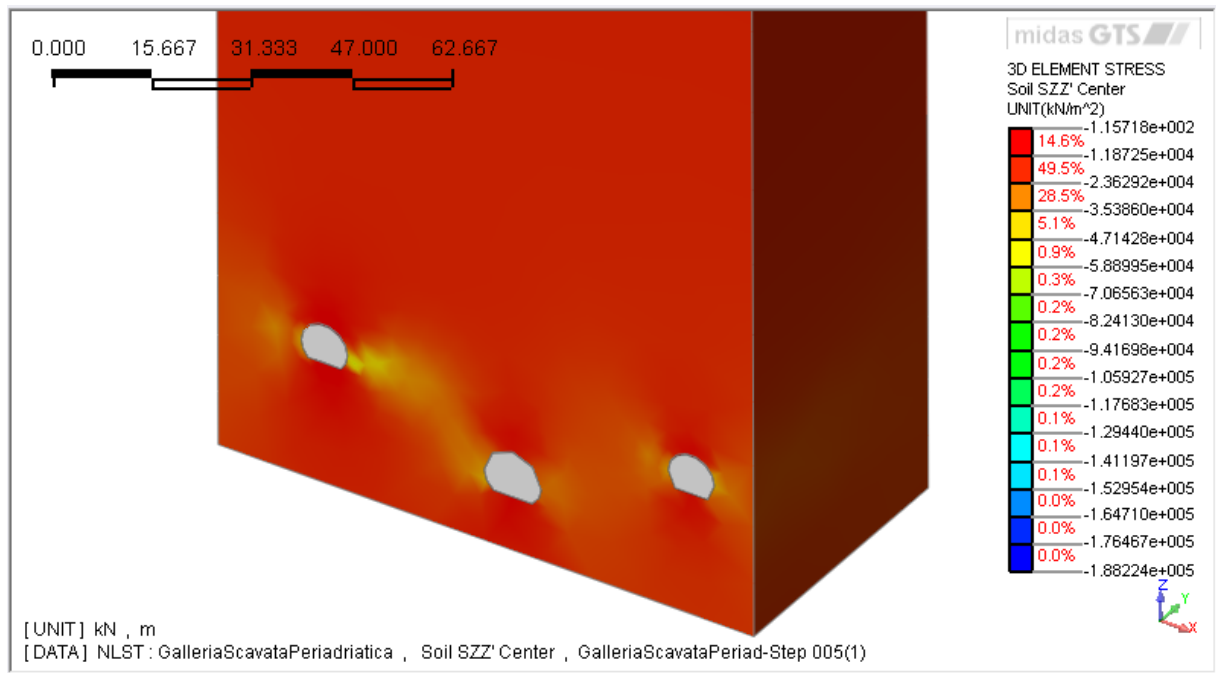


Figura 6-6 Sforzi lungo la verticale,

Si noti come in prossimità dei piedritti delle gallerie si accumulino degli sforzi, in particolare in quella ovest che è in prossimità del tunnel di collegamento e quindi di una situazione strutturalmente sfavorevole.

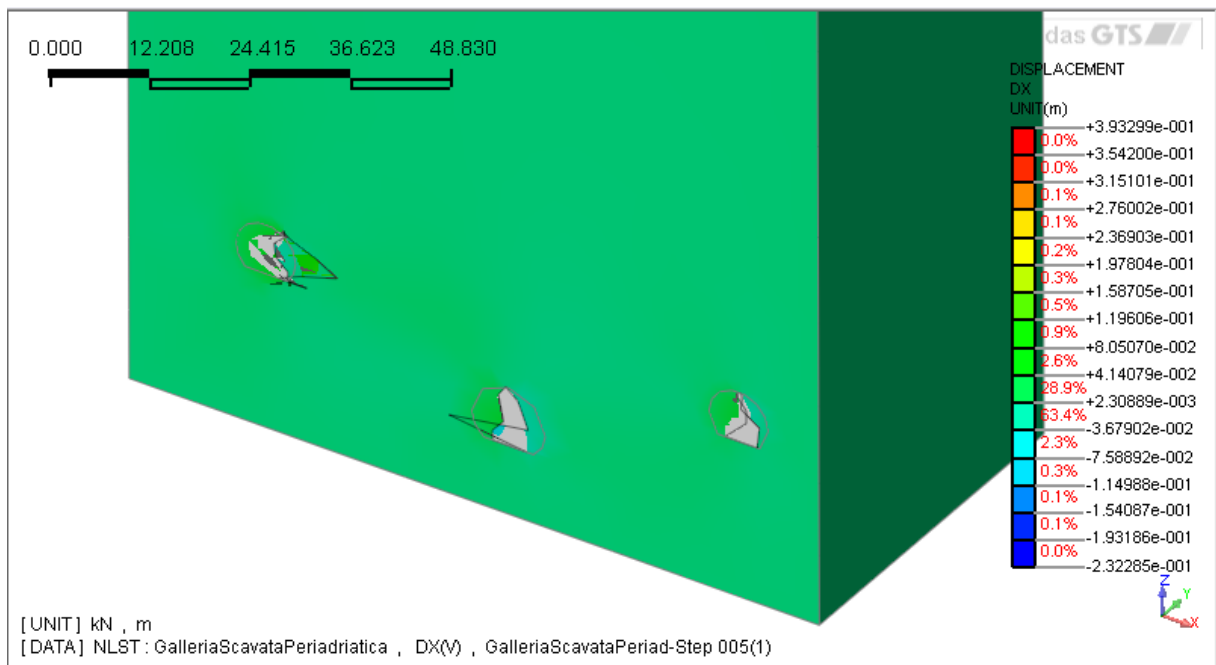


Figura 6-7 Dislocamenti rispetto all'asse trasversale a quello delle gallerie

Si è volutamente scelto di adottare un parametro di scala per meglio mostrare gli effetti dei carichi e dello scavo delle gallerie, in particolare nella galleria di sinistra si può osservare come il materiale collassi verso destra, cioè dove si trova il tunnel di collegamento tra asse ovest ed est.

6.1.2.2 Zona dei cameroni logistici

Similmente a quanto fatto per la faglia della Pusteria si procede con la zona interessata dai cameroni logistici, qui avremo una situazione di scavi decisamente più articolata rispetto al caso precedente ma un materiale decisamente buono in quanto a parametri geotecnici

Le figure successive esprimono visivamente quanto espresso.

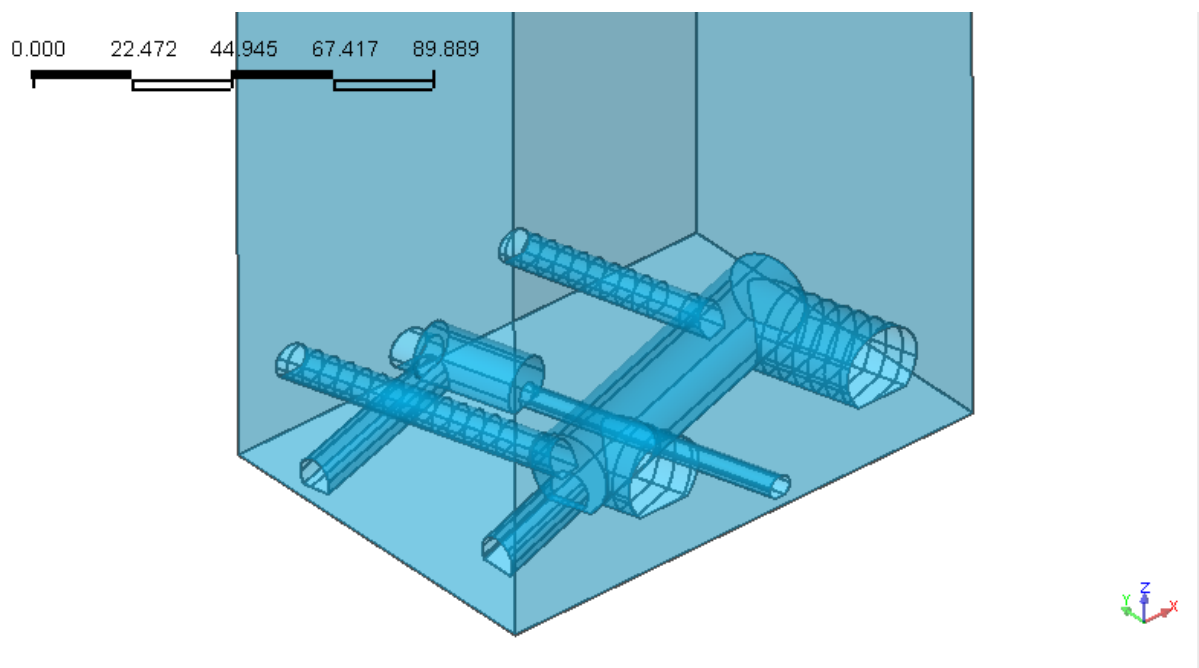


Figura 6-8 Il sistema delle gallerie nella zona dei cameroni logistici

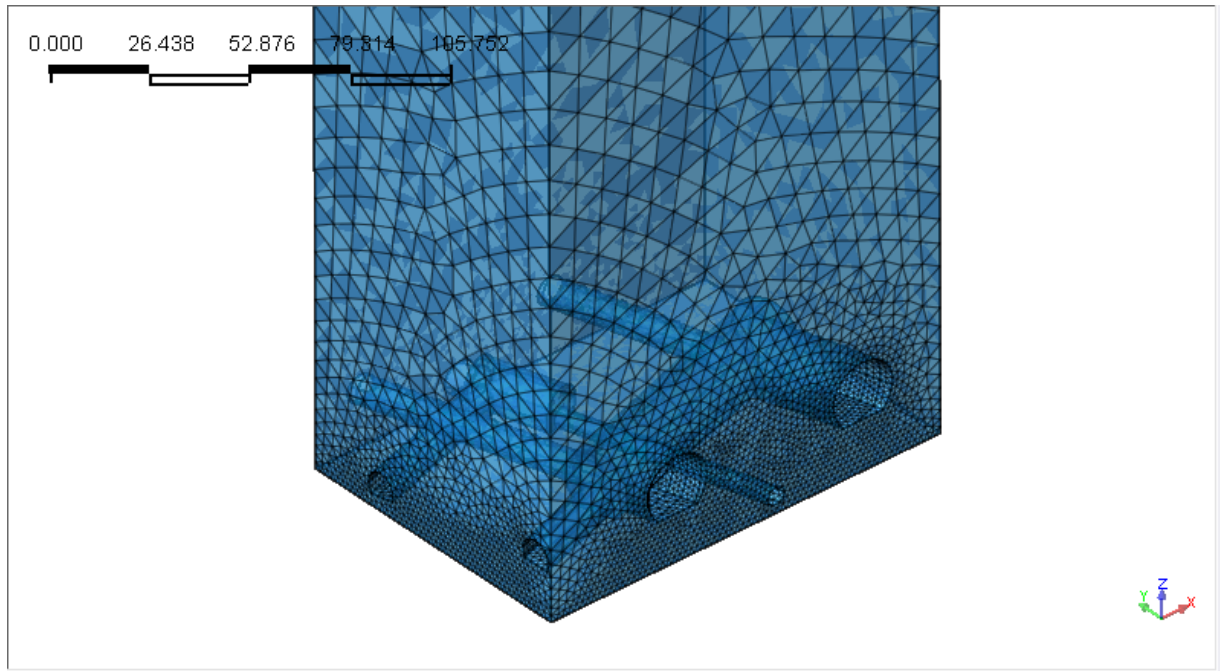


Figura 6-9 Blocco di studio con Mesh ben visibile

Si è scelta questa immagine per dare una buona idea del grado di dettaglio raggiunto nella modellazioni agli elementi finiti, si noti come per ottimizzare i tempi di calcolo vi sia una maglia più fitta in prossimità delle gallerie e che la stessa si allenti man mano che ci si allontana da esse.

6.1.2.2.1 Risultati

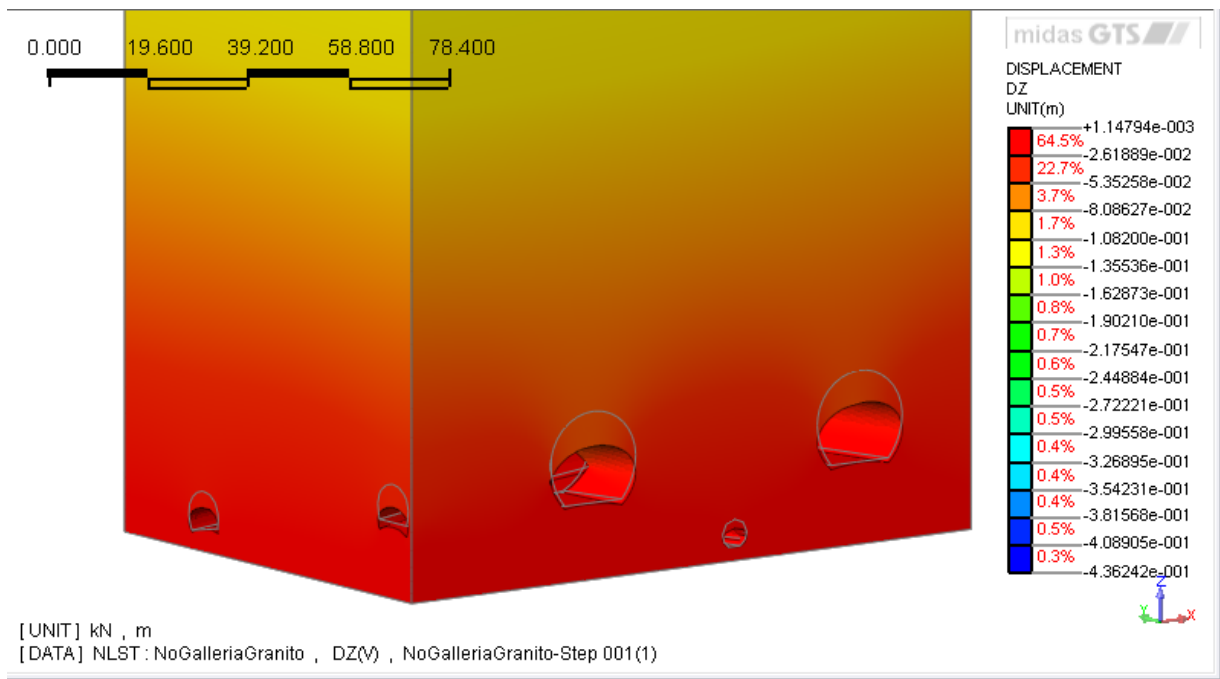


Figura 6-10 Dislocamenti lungo l'asse Z per le zone del camerone logistico

Nuovamente si sceglie di ricorrere a un fattore di scala per meglio sottolineare gli effetti del peso dell'ammasso roccioso. Lo spostamento è contenuto rispetto al diametro della galleria e si attesta intorno ai 5 centimetri, nei punti più gravosi intorno ai 10 centimetri. Considerata la "generosità" nel definire i parametri geotecnici del Granito di Bressanone appare ragionevole come dato.

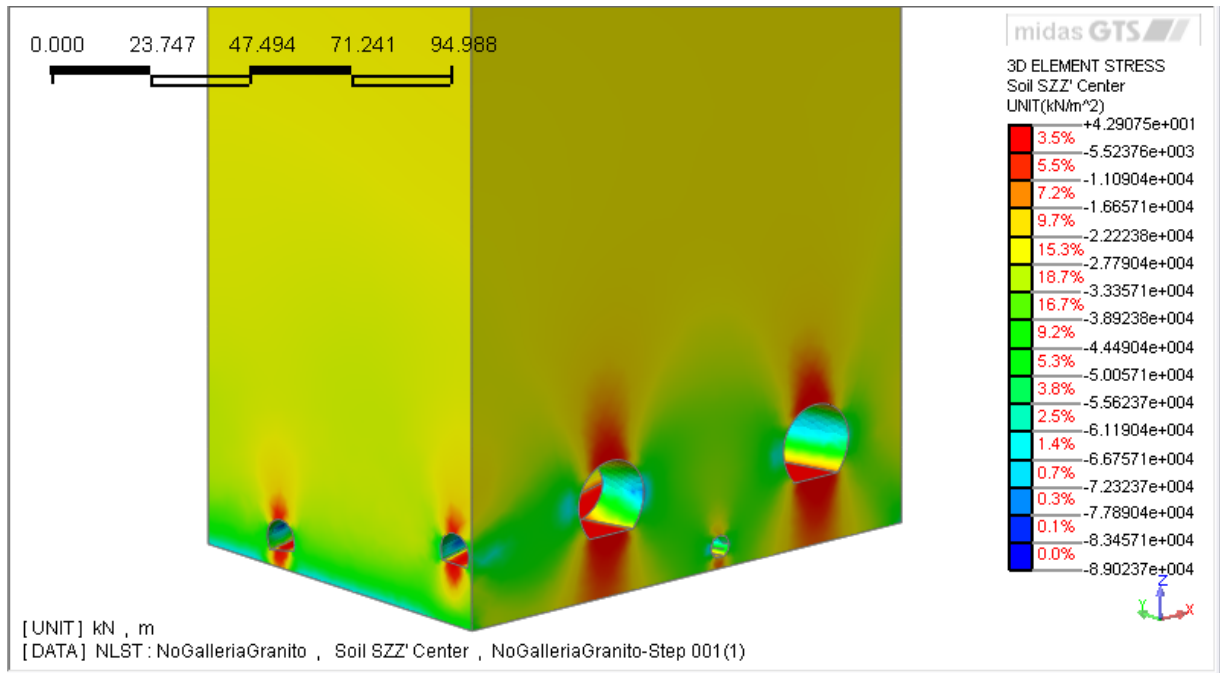


Figura 6-11 Sforzi lungo l'asse Z

Si noti immediatamente come la situazione degli sforzi risulti più interessante rispetto alla faglia della Pusteria, il Granito di Bressanone gode infatti di parametri geotecnici decisamente migliori di quelli della faglia e il sistema di gallerie oltre a essere molto esteso è anche a profondità maggiori. L'innescarsi di sforzi di trazione rispetto alla volta e alla contro volta è chiara testimonianza di questa situazione.

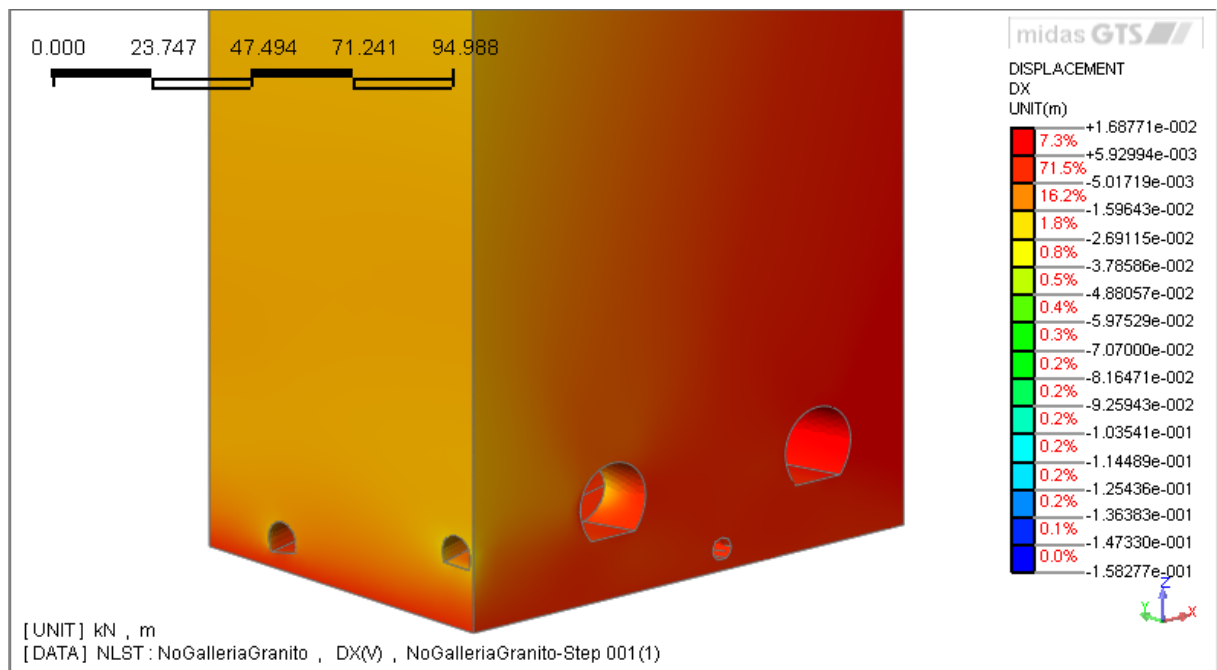


Figura 6-12 Dislocamenti rispetto all'asse X

In questa figura non si è utilizzato il fattore di scala, il Granito di Bressanone è stato trattato quasi come fosse una Roccia per quanto riguarda le proprietà geotecniche e quindi si nota come lo spostamento lungo l'asse X sia nel 90% dei nodi nell'ordine del millimetro.

6.1.2.3 Faglia Periadriatica

Similmente a quanto fatto per la faglia della Pusteria si procede con la zona interessata dalla faglia periadriatica, qui avremo esclusivamente la presenza delle due canne principali e del cunicolo esplorativo, questa volta con la sezione standard.

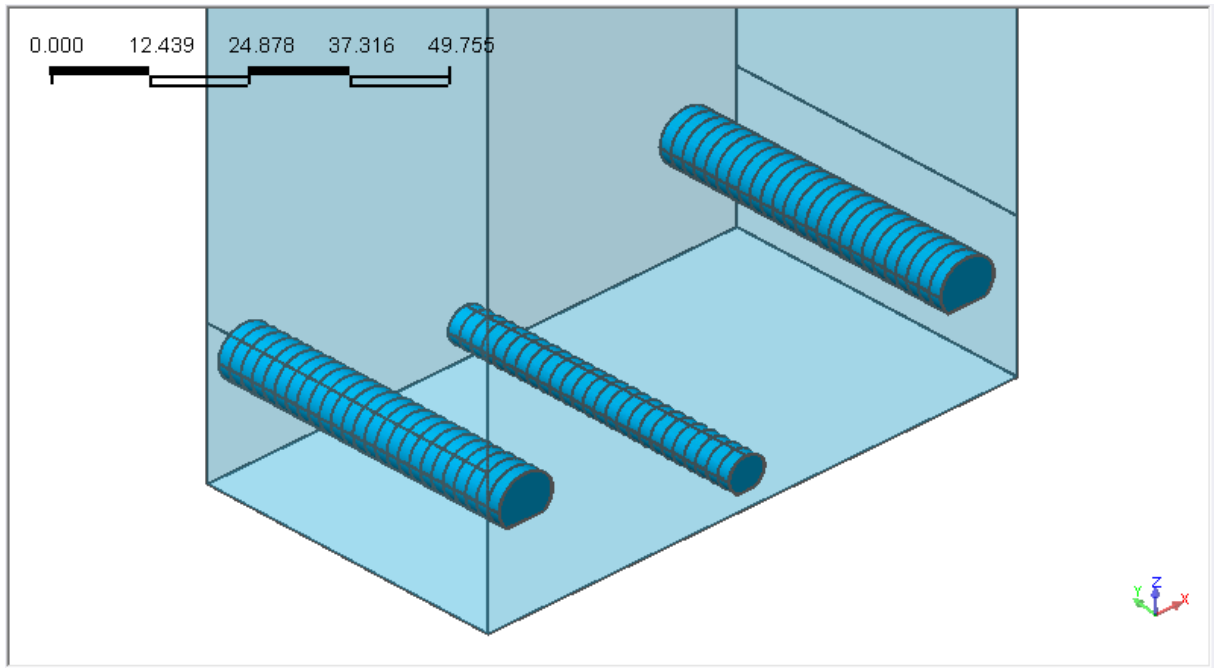


Figura 6-13 Blocco di studio per la faglia periadriatica

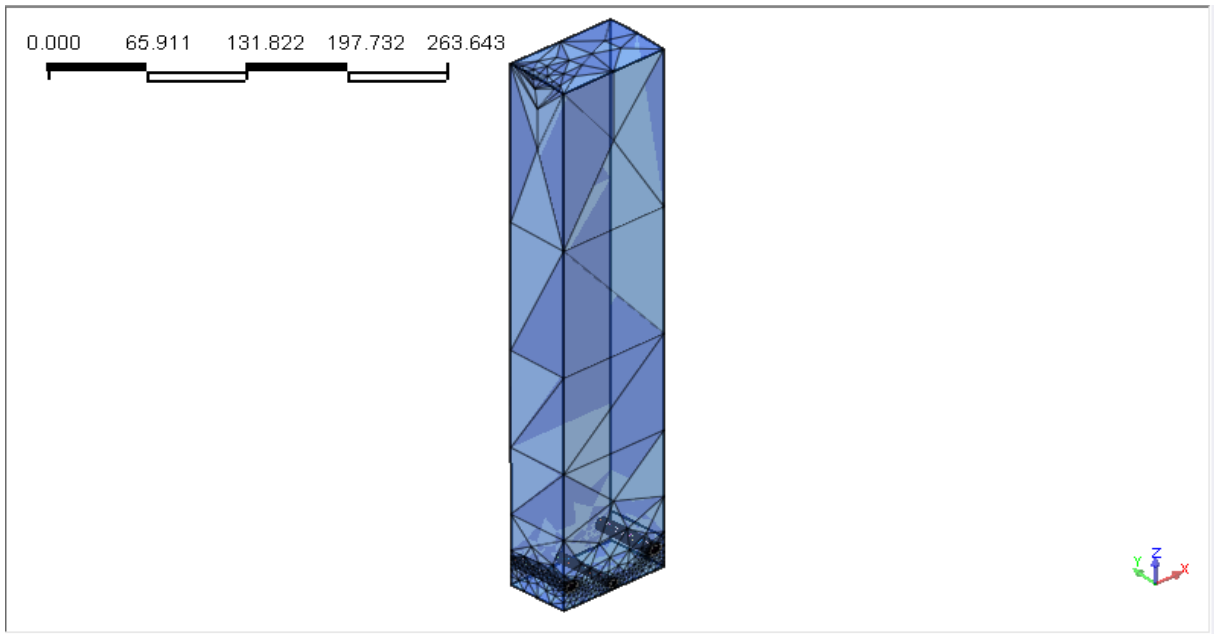


Figura 6-14 Blocco di studio suddiviso in elementi finiti

Al fine di fare delle prove sull'usabilità di MIDAS GTS con questo blocco si è scelto di operare in maniera leggermente diversa, sia nella dimensione delle mesh sia in un dettaglio tecnico sulle condizioni al contorno, cioè il blocco non è allineato con l'asse X e Y ma corre lungo l'asse del cunicolo esplorativo, l'idea sarebbe quella di mantenere le due canne all'interno del blocco riducendo al minimo il lavoro a cui è sottoposto il calcolatore.

6.1.2.3.1 Risultati

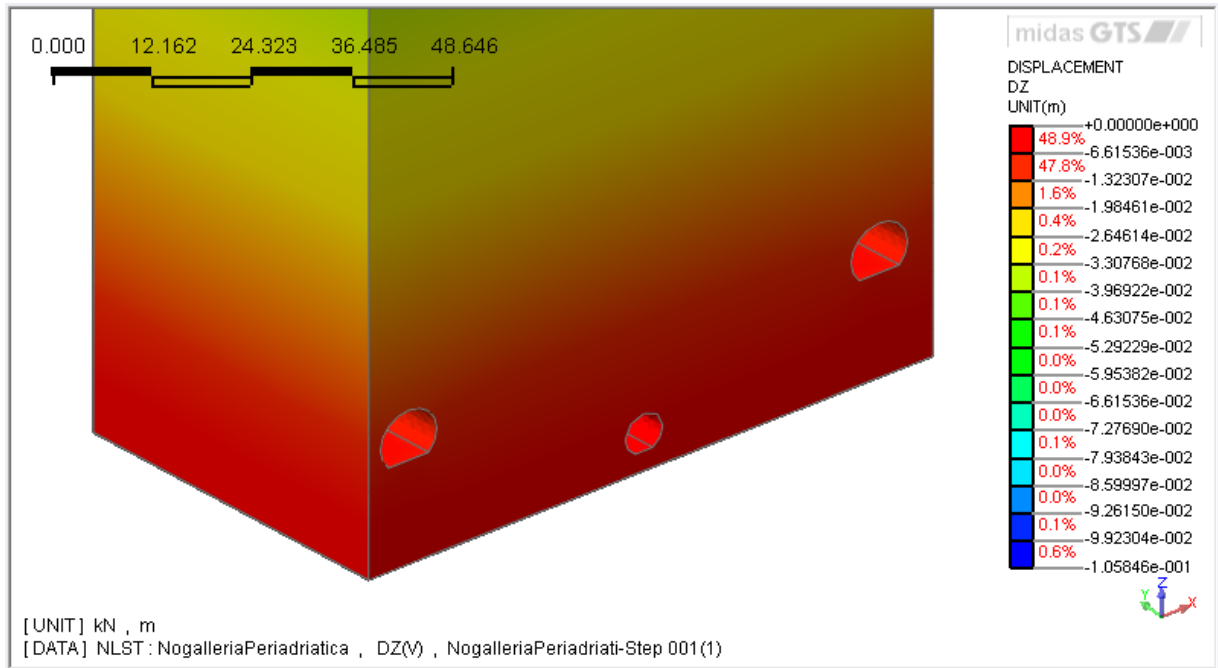


Figura 6-15 Dislocamenti lungo l'asse Z

Si nota da subito che gli spostamenti sono nell'ordine dei pochi millimetri nonostante parametri geotecnici molto bassi, questo prima simulazione mostra come le condizioni al contorno sul blocco probabilmente siano più vincolanti per gli elementi finiti di quanto non sia il modello costitutivo, infatti quasi tutti i blocchi sono a contatto con una faccia e quindi con un vincolo che ne limita la capacità di movimento.

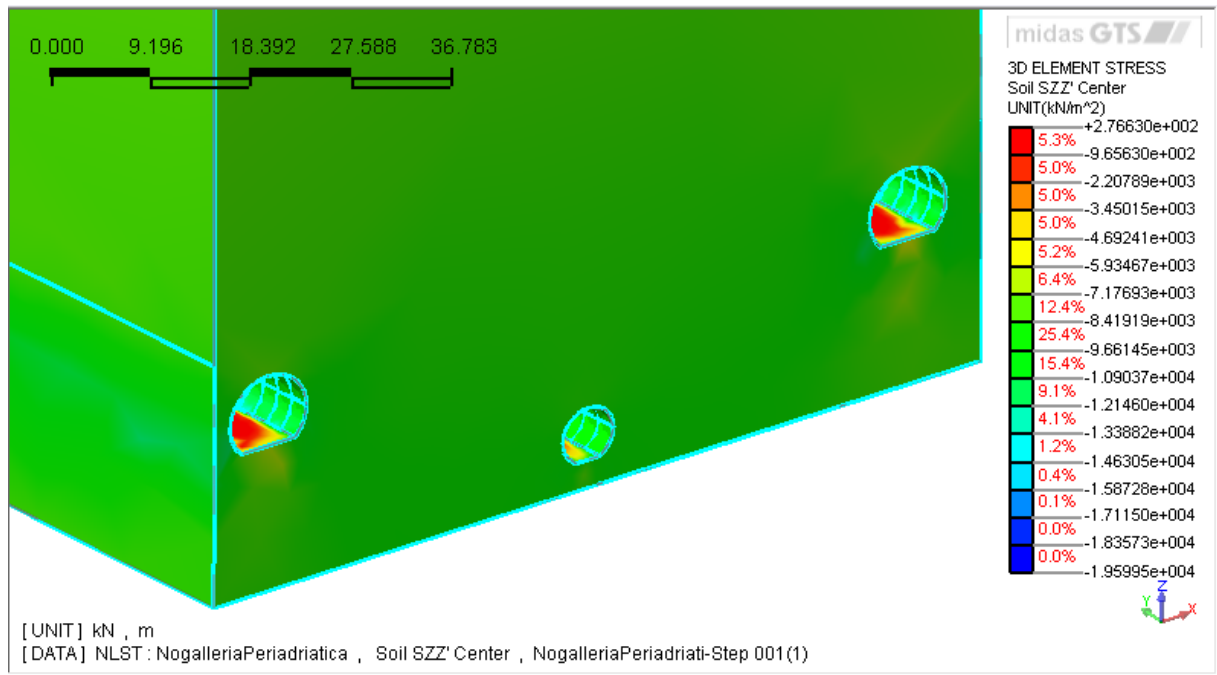


Figura 6-16 Sforzi lungo l'asse Z

In questo caso la simulazione appare più ragionevole per cui la semplificazione sembra aver pagato, era lecito pensarlo in quando i vincoli sono cinematici e non inficiano sul trasmettersi dei carichi litostatici.

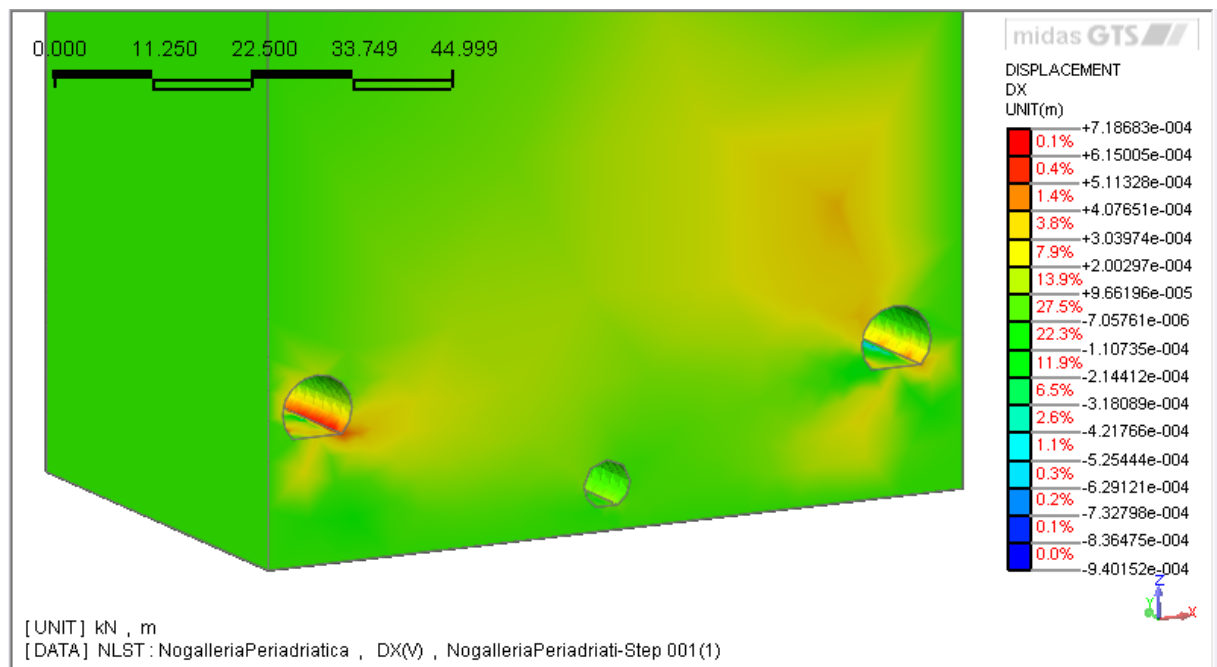


Figura 6-17 Dislocamenti lungo l'asse X

Questa simulazione mette in luce come l'approccio utilizzato in questo tipo di litotipo sia stato fallimentare, nel materiale più debole i dislocamenti si attestano nell'ordine dei dieci Micron il che risulta chiaramente errato.

7 CONCLUSIONI: CONFRONTO TRA MODELLO E DATI DEL MONITORAGGIO

8 BIBLIOGRAFIA

- Axen, G.J., Bartley, J.M. & Selverstone, J., 1995. Structural expression of a rolling hinge in the footwall of the Brenner Line normal fault, eastern Alps. *Tectonics*, 14(5): 1380-1392.
- Behrmann, J.H., 1988. Crustal-scale extension in a convergent orogen: the Sterzing-Steinach mylonite zone in the Eastern Alps. *Geodinamica Acta (Paris)*, 2: 63-73.
- Boncio, P., Lavecchia, G. & Pace, B., 2004. Defining a model of 3D seismogenic sources for Seismic Hazard Assessment applications: The case of central Apennines (Italy). *Journal of Seismology*, 8(3): 407.
- Castellarin A., Cantelli L., Fesce A.M., Mercier J.L., Picotti V., Pini G.A., Prosser G., Selli L., 1992. Alpine compressional tectonics in the Southern Alps. Relationships with the N-Apennines. *Annales Tectonicæ*, VI, n.1, 62-94.
- Castellarin A., Fesce A. M., Picotti V., Pini G. A., Sartori R., Selli L., Cantelli R. & Ricci L., 1986. Structural and Kinematic analysis of the Giudicarie deformation belt. Implications for compressional tectonics of Southern Alps. *Miner. Petrogr. Acta*, 30, 286-310.
- Castellarin, A., Cantelli, L., 2000. Neo-Alpine evolution of the Southern Eastern Alps. *J. of Geodynamics*, 30, 251-274.
- Decker, K. & Peresson, H., 1996. Tertiary kinematics in the Alpine-Carpathian-Pannonian system: links between thrusting, transform faulting and crustal extension. In: G. Wessely and W. Liebl (Editors), *Oil and Gas in Alpidic Thrustbelts and Basins of Central and Eastern Europe*. EAGE Special Publication, pp. 69-77.
- Frisch, W., 1976. Ein Modell zur alpidischen Evolution und Orogenese des Tauernfensters. *Geologische Rundschau*, 65: 375-392.
- Frisch, W., 1979. Tectonic progradation and plate tectonic evolution of the Alps. *Tectonophysics*, 60: 121-139.
- Frisch, W., 1984. Sedimentological response to late Mesozoic subduction in the Penninic windows of the Eastern Alps. *Geologische Rundschau*, 73: 33-45.
- Froitzheim, N. & Manatschal, G., 1996. Kinematics of Jurassic rifting, mantle exhumation, and passive-margin formation in the Austroalpine and Penninic nappes (eastern Switzerland). *Geological Society of America Bulletin*, 108(9): 1120-1133.
- Fügenschuh, B., Seward, D. & Mancktelow, N.S., 1997. Exhumation in a convergent orogen: the western Tauern window. *Terra Nova*, 9(5-6): 213-217.
- Galadini, F., Meletti, C. & Vittori, E., 2000. Stato delle conoscenze sulle faglie attive in Italia: elementi geologici di superficie. In: F. Galadini, C. Meletti & A. Rebez (Editors), *Le Ricerche del GNDT Nel Campo della Pericolosità Sismica (1996-1999)*. CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma, pp. 107-136.

- Grundmann, G. & Morteani, G., 1985. The young uplift and thermal history of the Central Eastern Alps (Austria, Italy), evidence from apatite fission track ages. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 128: 197-216.
- Lammerer, B., 1986. Das Autochthon im westlichen Tauernfenster. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 129: 51-67.
- Lammerer, B. & Weger, M., 1998. Footwall Uplift in an Orogenic Wedge - The Tauern Window in the Eastern Alps of Europe. *Tectonophysics*, 285(3-4): 213-230.
- Linzer, H.-G., Decker, K., Peresson, H., Dell'Mour, R. & Frisch, W., 2002. Balancing lateral orogenic float of the Eastern Alps. *Tectonophysics*, 354(3-4): 211-237.
- Mancktelow, N.S., Stöckli, D.F., Grollmund, B., Müller, W., Fügenschuh, B., Viola, G., Seward, D. & Villa, I.M., 2001. The DAV and Periadriatic fault systems in the Eastern Alps south of the Tauern window. *International Journal of Earth Sciences*, 90: 593-622.
- Matsuda, T., 1976. Magnitude and recurrence intervals of earthquakes from a fault. *Zisin. J. Seism. Soc. Jpn.*, 28: 283-293.
- Oberhauser, R., 1998. Erläuterungen zur geologisch-tektonischen Übersichtskarte von Vorarlberg 1:200.000. Geologische Bundesanstalt, Wien, 42 pp.
- Oehlke, M., Weger, M. & Lammerer, B., 1993. The "Hochfeiler Duplex" - Imbrication Tectonics in the SW Tauern Window. *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, 49: 107-124.
- Ratschbacher, L., Frisch, W., Neubauer, F., Schmid, S.M. & Neugebauer, J., 1989. Extension in compressional orogenic belts: the Eastern Alps. *Geology*, 17: 404-407.
- Ratschbacher, L., Frisch, W., Linzer, H.-G. & Merle, O., 1991. Lateral extrusion in the Eastern Alps, Part 2: Structural Analysis. *Tectonics*, 10(2): 257-271.
- Sander, B., 1911. Geologische Studien am Westende der Hohen Tauern (I. Bericht). *Denkschr. K. Akad. Wiss.: math.-naturwiss. Kl.*, 82: 1-63.
- Schmid, S.M., Fügenschuh, B., Kissling, E. & Schuster, R., 2004. Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 97(1): 93.
- Schmid, S.M., Pfiffner, O.A., Schönborn, G., Froitzheim, N. & Kissling, E., 1997. Integrated cross section and tectonic evolution of the Alps along the Eastern Traverse. In: O.A. Pfiffner, P. Lehner, P. Heitzmann, S. Mueller & A. Steck (Editors), *Deep Structure of the Swiss Alps*. Birkhäuser Verlag, Basel, pp. 289-304.
- Schön, C. & Lammerer, B., 1989. Die postvariszischen Metakonglomerate des westlichen Tauernfensters, Österreich. *Mitteilungen der österreichischen Geologischen Gesellschaft*, 81: 219-232.
- Selverstone, J., 1988. Evidence for east-west crustal extension in the eastern Alps: implications for the unroofing history of the Tauern Window. *Tectonics*, 7(1): 87-105.

- Selverstone J., Axen G.J. & Bartley J.M., 1995. Fluid inclusion constraints on the kinematics of footwall uplift beneath the Brenner Line normal fault, eastern Alps. *Tectonics*, 14, 264-278.
- Stöckhert, B., Brix, M.R., Kleinschrodt, R., Hurford, A.J. & Wirh, R., 1999. Thermochronometry and microstructures of quartz- a comparison with experimental flow laws and predictions on the temperature of the brittleplastic transition. *Journal of Structural Geology*, 21(3): 351-369.
- Wallace, R.E., 1970. Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault. *Geological Society of America Bulletin*, 81: 2875-2890.
- A.A.V.V. 2002 - Richtlinie für die Geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik. Herausgegeben anlässlich des 50. Geomechanik Kolloquiums Oktober 2001
- Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M., (1998). Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bull. Engg. Geol. Env.* 57(2), 151-160.
- Hoek, E. (1983). Strength of jointed rock masses, 23rd Rankine Lecture. *Géotechnique* 33(3), 187-223.
- Hoek, E. (1994). Strength of rock and rockmasses, *ISRM News Journal*, 2(2), 4-16.
- Hoek, E. and Brown, E.T. (1980), a). Underground excavations in rock. London, Inst. Min. Metall.
- Hoek, E. & Brown, E.T. (1980), b). Empirical strength criterion for rock masses. *J. GeotechEngng. Div., ASCE*, 106 (GT 9), 1013-1035.
- Hoek, E. & Brown, E.T. (1988). The Hoek-Brown failure criterion – a 1988 update. In *Rock Engineering for Underground excavations*, Proc. 15th Canadian Rock Mech. Sump. (edited bei Curran J.C.), 31-38. Toronto, Dept. Civil Engineering, University of Toronto.
- Hoek, E. & Brown, E.T. (1997). Practical estimates or rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts*, 34(8), 1165-1186.
- Hoek, E. & Diederichs, M., (2005) Estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. (Accepted April 2005).
- Marinos, P. and Hoek, E., (2000). Estimating the mechanical properties of heterogeneous rock masses such as flysh.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B., (2002) *Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition*. 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference: NARMS-TAC, 2002, pp. 267-271.

