

Penetrazione dell'asse autostradale Road 16 in Gerusalemme

Road 16 highway in Jerusalem

Matteo MOJA^b

Davide PACE^a

Dario PAONESSA^a

Enrico Maria PIZZAROTTI^{b,*}

^a Impresa Pizzarotti & C. S.p.A., Parma, Italia

^b Pro Iter Srl, Milano, Italia

* corresponding author: enrico.pizzarotti@proiter.it

Sommario

La Road 16 rappresenta il nuovo asse stradale di penetrazione in Gerusalemme per chi proviene da Tel-Aviv. Il progetto prevede la realizzazione di due gallerie a doppia canna, Har Nof e Yefe Nof, e di due rampe di ingresso in sotterraneo nella galleria Yefe Nof. Dopo una breve descrizione del contesto, del layout dell'infrastruttura e delle scelte progettuali, vengono descritti alcuni aspetti peculiari e le criticità realizzative del progetto. Oltre all'approccio che è stato adottato per affrontare la realizzazione di sezioni con geometria della piattaforma stradale variabile da un minimo di 10 m fino ad un massimo di 22.5 m, vengono descritte le modalità di scavo applicate in presenza di basse coperture, le procedure che sono state implementate per affrontare lo scavo in ammassi caratterizzati da importanti fenomeni carsici e le modalità di esecuzione dello scavo dei cameroni da cui sfioccano le rampe di ingresso e uscita della galleria Yefe Nof.

Abstract

The Road 16 highway represents the new road axis of penetration into Jerusalem for those coming from Tel-Aviv. The project involves the construction of two double-tube tunnels, Har Nof and Yefe Nof, as well as two underground entry ramps in the Yefe Nof tunnel. After a brief description of the context, the layout of the infrastructure and the design choices, some peculiar aspects and critical constructive issues of the project are described. In addition to the approach that has been adopted for the construction of sections with variable road platform geometry, from a minimum of 10 m to a maximum of 22.5 m, the excavation methods applied in the presence of low overburden, the procedures that have been implemented to deal with the excavation in rock characterized by important karst phenomena and the methods of carrying out the excavation of the chambers of Yefe Nof tunnel are described.

Parole chiave: cameroni, carsismo, subsidenza

Keywords: caverns, karst, subsidence

1. Introduzione

La Road 16 rappresenta il nuovo asse stradale di penetrazione in Gerusalemme per chi proviene da Tel-Aviv. Il progetto, con asse disposto in direzione Nord Ovest – Sud Est, prevede la realizzazione di due gallerie a doppia canna, Har Nof (indicate in Fig. 1 con la sigla TU1 e TU2) e Yefe Nof (TU3 e TU4), e, sempre in sotterraneo, di una rampa di ingresso e una in uscita della galleria Yefe Nof (TU11 e TU12).

L'impresa Pizzarotti & C. S.p.A., in qualità di Tunnel Expert, in Joint Venture con l'israeliana Shaphir Civil & Marine Engineering Ltd, si è aggiudicata la progettazione, l'esecuzione e la concessione per 25 anni dell'infrastruttura, completa dei tratti all'aperto. La società Pro Iter S.r.l., in qualità di progettista delle opere in sotterraneo, dopo aver supportato la JV in fase di gara, ha sviluppato

il Preliminary Design e, a seguito dell'approvazione dell'Authority, il Detailed Design e il For Construction Design di tutte le opere in sotterraneo e fornisce l'assistenza in corso d'opera.

Nel presente articolo, dopo una breve descrizione del contesto, del layout dell'infrastruttura e delle scelte progettuali, vengono descritti alcuni aspetti peculiari del progetto. In particolare, oltre all'approccio che è stato adottato per affrontare la realizzazione di sezioni in galleria con geometria della piattaforma stradale variabile da un minimo di 10 m fino ad un massimo di 22.5 m, vengono descritte le modalità di scavo applicate in presenza di basse coperture, le procedure che sono state implementate per affrontare lo scavo in ammassi caratterizzati da importanti fenomeni carsici e le modalità di esecuzione dello scavo dei cameroni dai cui sfioccano le rampe di ingresso e uscita della galleria Yefe Nof.

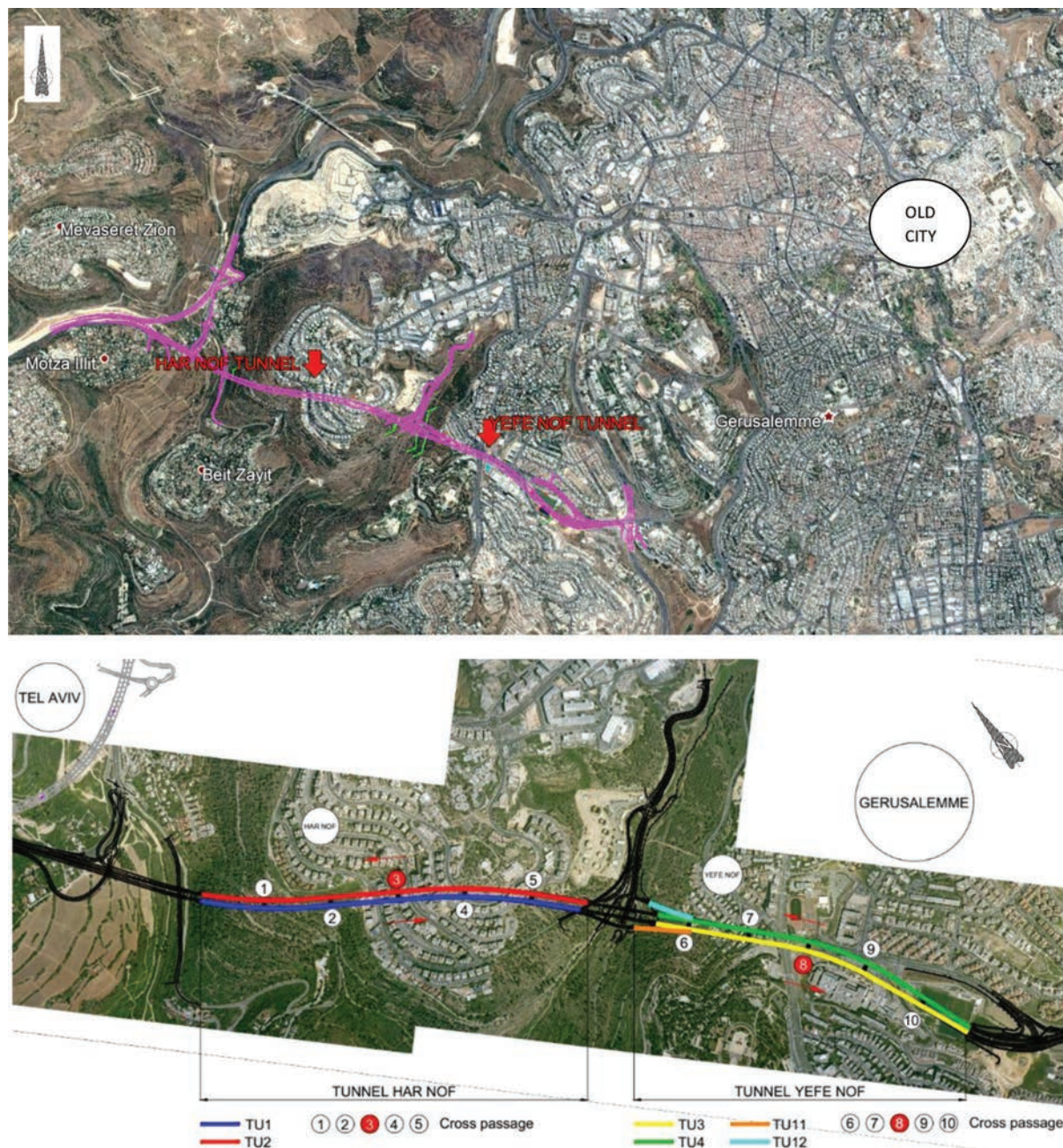


Figura 1. Inquadramento planimetrico del progetto (in rosso i cross-passage carrabili e in bianco quelli pedonali).

2. Inquadramento del progetto delle gallerie

La galleria Har Nof ha uno sviluppo di circa 1400 m e presenta coperture massime dell'ordine dei 140 m. La sezione caratteristica è in grado di ospitare due corsie di marcia (2L) e ha una larghezza della piattaforma stradale di 10 m. In prossimità dell'imbocco lato Revida (Sud Est), la piattaforma di entrambe le canne si allarga, sino a 14.7 m nella canna nord (TU2) e a 19 m nella canna sud (TU1), per contenere le corsie di decelerazione e accelerazione previste all'uscita della galleria stessa.

La galleria Yefe Nof ha uno sviluppo di circa 1250 m e presenta coperture massime dell'ordine degli 80 m. La galleria ospita tre

corsie di marcia (3L) e ha una larghezza della piattaforma stradale di 13.6 m. In prossimità dell'imbocco lato Revida (Nord Ovest), il progetto prevede due rampe, una in entrata e una in uscita, che si collegano agli assi principali all'interno di due cameroni che presentano una larghezza massima della piattaforma stradale di 22.5 m.

La stessa sezione, con piattaforma da 22.5 m, per contenere una corsia di decelerazione, è prevista anche in corrispondenza dell'imbocco lato Bayth (Sud Est) nella canna sud (TU3), mentre nella canna opposta (TU4) la piattaforma si allarga fino a 14.7 m per contenere una corsia di accelerazione. In corrispondenza di quest'imbocco, lo scavo di una sezione già di per sé impegnata

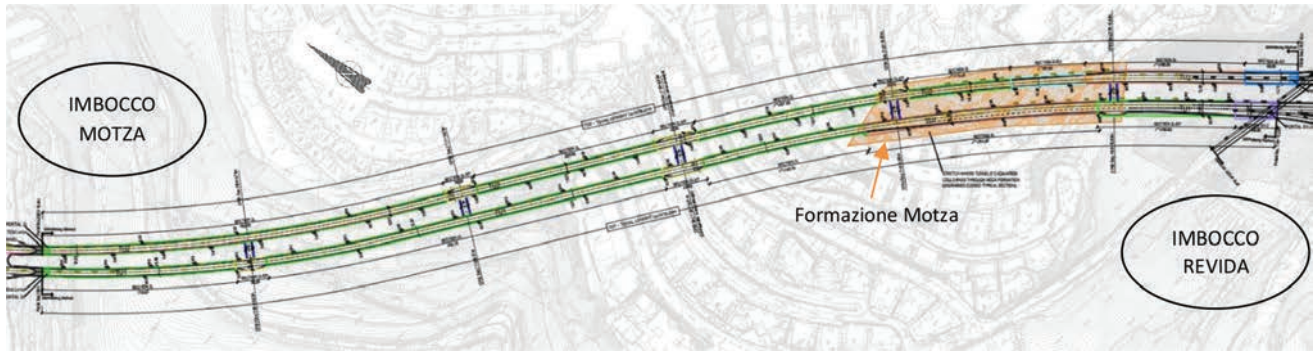


Figura 2. Planimetria della galleria Har Nof.

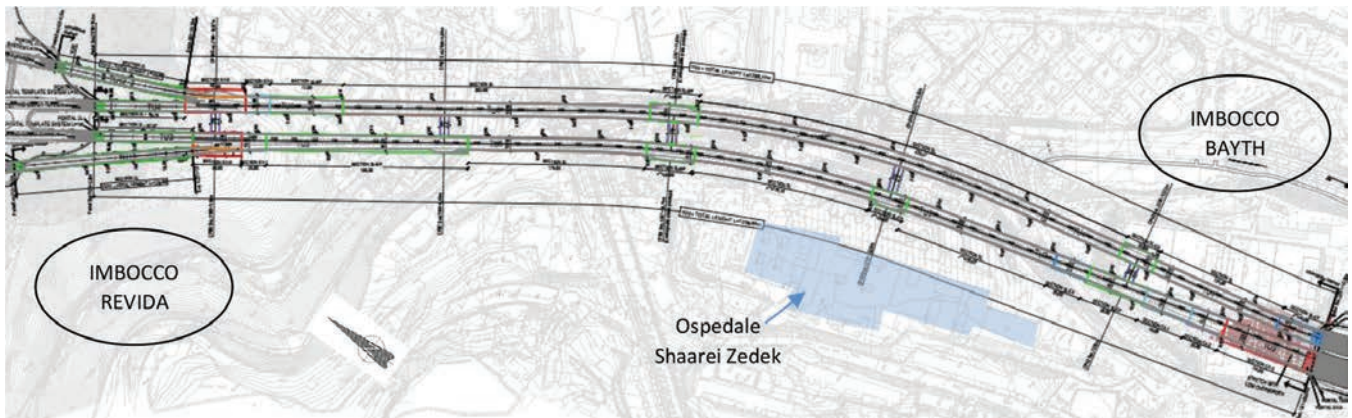


Figura 3. Planimetria della galleria Yefe Nof.

tiva in virtù delle notevoli dimensioni è aggravato dalla riduzione dell'interasse tra le canne e dalla presenza di basse coperture, dell'ordine di 10 m, di cui solo una parte costituita da materiale lapideo. In corrispondenza di questo imbocco, inoltre, entrambe le canne sottopassano in bassa copertura e per un'estesa di oltre 100m, un'area in cui sono presenti tre campi da calcio da mantenere costantemente utilizzabili. Da segnalare inoltre che il tracciato della galleria Yefe Nof, poco dopo l'area dei campi da calcio, corre parallelo all'ospedale Shaarei Zedek con coperture

dell'ordine dei 30-40 m e ne sottopassa il parcheggio pluripiano interrato.

Lungo il tracciato sono presenti piazzole di sosta ad una distanza massima di 500 m e cross-pedonali e carrabili ogni 250 m (10 cross-passage di collegamento trasversale tra le canne principali, 5 per ciascuna galleria, di cui 8 pedonali e 2 carrabili). In corrispondenza dei cross-passage pedonali sono previste piazzole lunghe 32 m mentre in corrispondenza dei cross-passage carrabili le piazzole hanno lunghezza di 44 m.

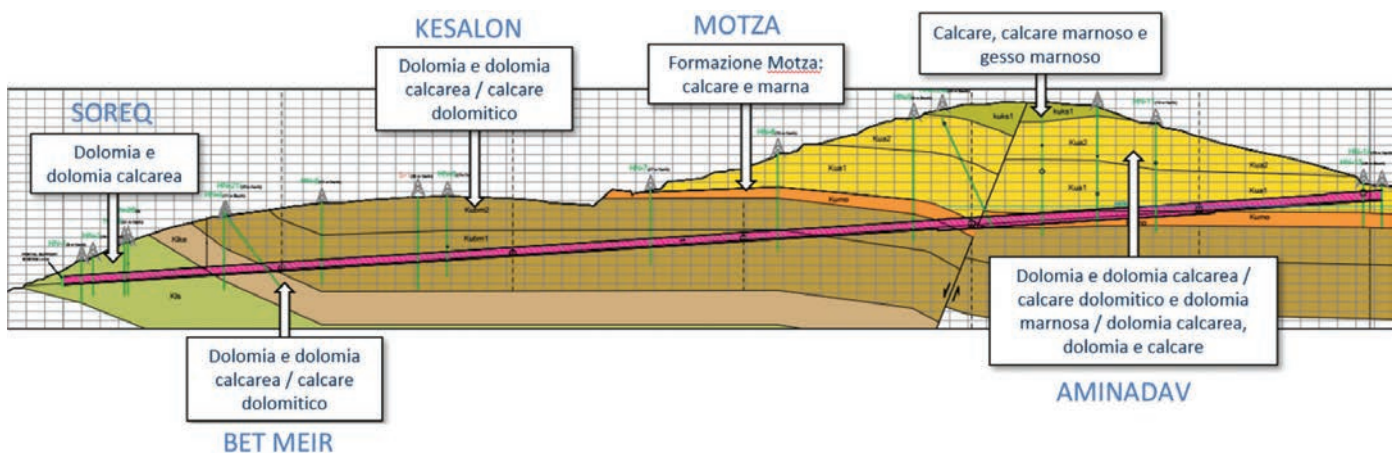


Figura 4. Profilo geologico della galleria Har Nof.



Figura 5. Profilo geologico della galleria Yefe Nof.



Figura 6. Rilievi del fronte di scavo durante l'attraversamento nella Motza.

3. Geologia dell'area

Dal punto di vista geologico la galleria Har Nof attraversa, da nord verso sud, le formazioni Soreq, Bet Meir, Kesalon, Motza e Aminadav mentre la galleria Yefe Nof è interessata dalla formazione Aminadav nella prima tratta e dalla Kefar Shaul nella restante. Trattasi in generale di dolomie e calcari piuttosto competenti con stratificazione sub-orizzontale a eccezione della Motza, prevalentemente marnosa (Albiano-Cenomaniano). Solo in prossimità dell'imboccato lato Bayth (Sud Est) della galleria Yefe Nof, si riscontra la presenza di un materiale riferibile a riporto antropico che interferisce con la calotta della canna nord (TU4).

Dal punto di vista geologico, le tematiche principali che sono state affrontate nell'ambito dello scavo delle due gallerie sono riconducibili a:

- attraversamento della Motza: questa formazione si presenta come un'alternanza di strati calcarei e marnosi. Quest'ultimi, di ordine metrico, presentano caratteristiche geomeccaniche decisamente inferiori ai calcari e sono potenzialmente soggetti a fe-



Figura 7. Intercettazione di cavità carsiche da parte dello scavo.

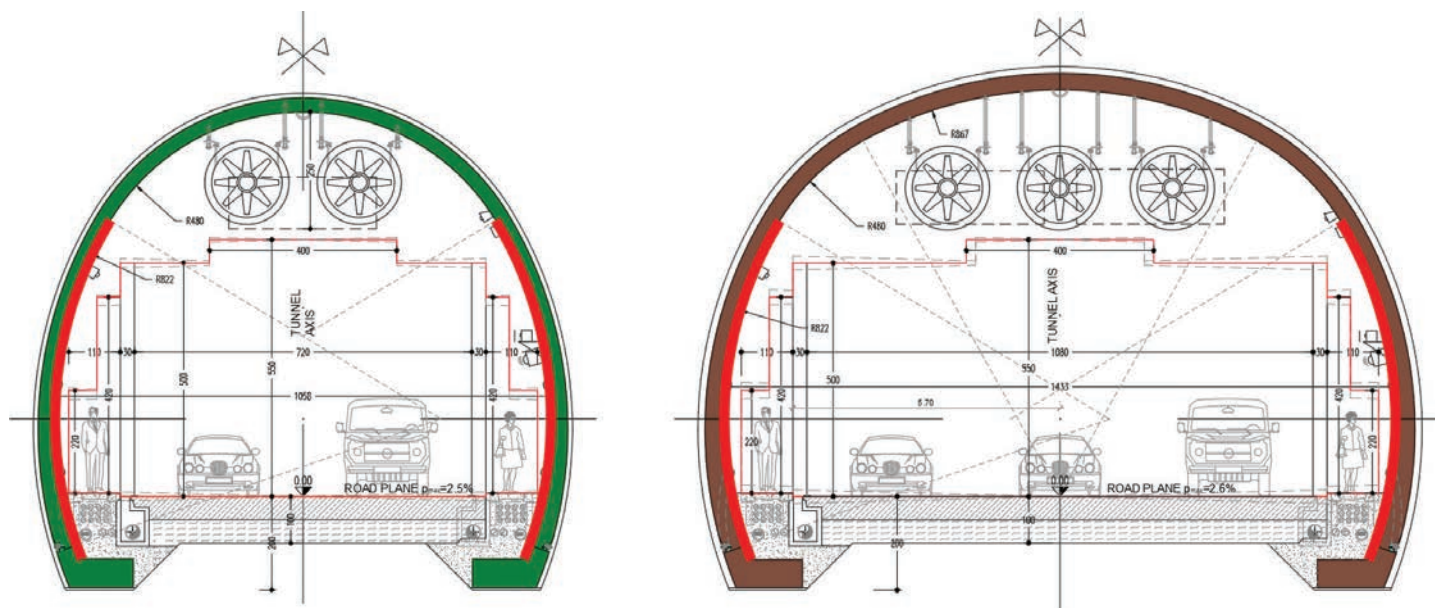


Figura 8. a) Sezione tipo 2L – 10 m; b) Sezione tipo 3L – 13.6 m.

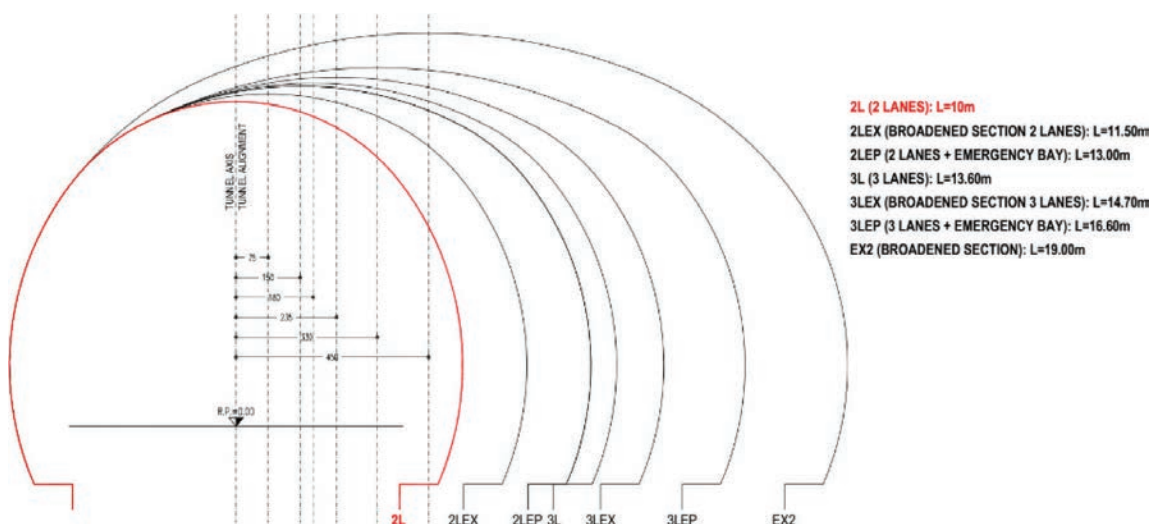


Figura 9. Variabilità geometrica della galleria Har Nof.

nomeni di rigonfiamento. Inoltre, essendo caratterizzati da una bassa permeabilità, rappresentano il substrato della falda presente nella sovrastante formazione calcareo-dolomitica.

- scavo in ammassi soggetti a fenomeni di carsismo: tali fenomeni hanno interessato principalmente la formazione dell'Aminadav, sebbene cavità carsiche di dimensioni minori siano state rinvenute anche in altre formazioni, come nella Kefar Shaul.

4. Progetto delle sezioni tipo e delle sezioni di scavo

4.1. Sezioni tipo - geometrie dei casseri

L'asse stradale è caratterizzato da una forte variabilità della larghezza della piattaforma stradale, variabile da un minimo

di 10 m in corrispondenza della sezione a 2 corsie (2L) fino ad un massimo di 22.5 m in corrispondenza dei cameroni (EX-3).

È risultata pertanto evidente la necessità di studiare una soluzione costruttiva che permettesse di gestire questa variabilità geometrica in modo il più possibile semplice e in grado di contenere i tempi d'esecuzione. Al fine di limitare il numero di modifiche da apportare ai casseri si è pertanto optato per una serie di sezioni di larghezza intermedia, tra la minima e la massima, caratterizzate tutte dalla stessa geometria del piedritto in modo da poter gestire il passaggio da una sezione all'altra modificando solamente il cassero nel tratto di calotta. Inoltre, la casting map è stata sviluppata considerando lunghezze di applicazione di ciascuna sezione multiple della lunghezza del cassero (12 m).

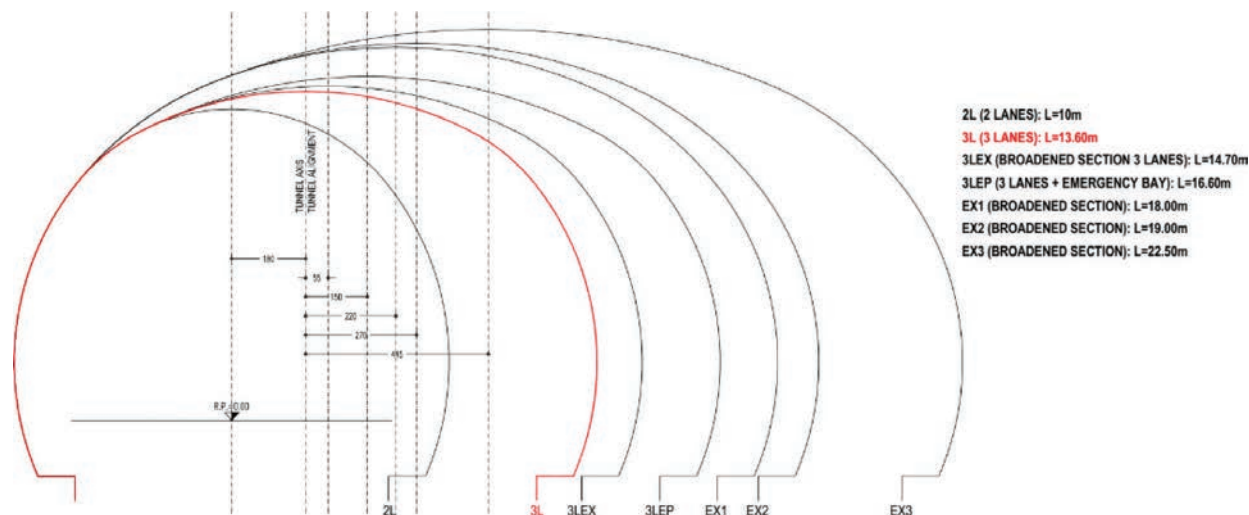


Figura 10. Variabilità geometrica della galleria Yefe Nof.

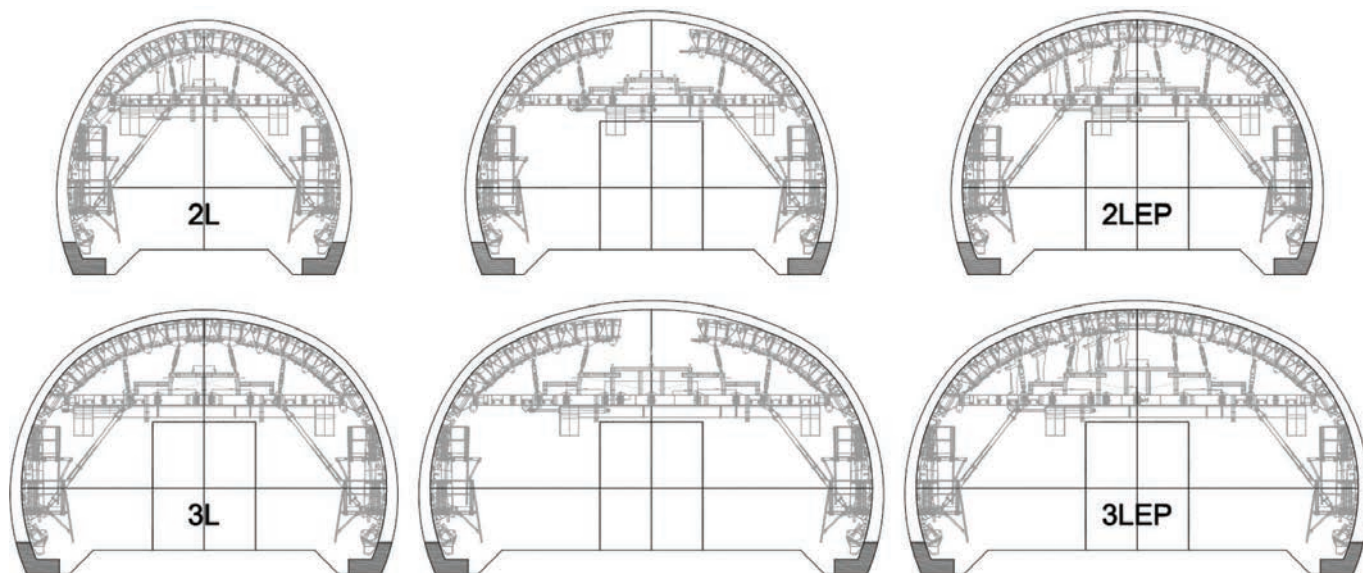


Figura 11. Esempi di adattamento del cassero alle diverse sezioni tipo (da 2L a 2L-EP e da 3L a 3L-EP).

4.2. Classificazione e caratterizzazione geomeccanica

La caratterizzazione geomeccanica degli ammassi, basata sul principio di linearizzazione del criterio di rottura di Hoek & Brown [1], è stata effettuata sulla base delle prove in sito e di laboratorio messe a disposizione dal Cliente, più alcune indagini integrative che la JV ha ritenuto necessarie per approfondire alcuni aspetti specifici, quali lo spessore del materiale sciolto in corrispondenza dell'area dei campi da calcio con basse coperture, i passaggi stratigrafici e la presenza di disturbi tettonici.

Nello specifico, sono stati analizzati più di 165 sondaggi per un totale di più di 4500 ml di perforazione e più di 400 prove di laboratorio. In Tab. 1. è riportato un riassunto del numero di prove effettuate per ciascuna formazione.

Sulla base delle prove di compressione mono-assiale e triassiale e delle prove “brasiliane” sono stati ricavati, seguendo un approccio

statistico, i valori caratteristici del modulo di deformazione della matrice rocciosa E_r e della resistenza a compressione mono-assiale σ_{ci} .

$$x_{characteristic} = \bar{x} \pm \bar{s}_x / 2 \quad (1)$$

Tabella 1. Riassunto del numero di prove di laboratorio effettuate per ciascuna formazione.

Formazione	Soreq	Motza*	Kesalon and Bet Meir	Aminadav	Kefar Shaul
N. di compressioni mono-assiali	100	5	22	58	93
N. di brasiliane	39	7	22	43	30
N. di triassiali	4	-	-	6	3
n. totale di prove	143	12	44	107	126

* Le prove sulla Motza si riferiscono alla sola facies calcarea.

Tabella 2. Riassunto dei parametri caratteristici delle varie formazioni.

Formazione	γ (kN/m ³)	σ_{ci} [MPa]	m_i	E_i [GPa]
Soreq	22	39	12	15
Motza (media pesata)	24	18	5	21
Bet meir & Kesalon	23	29	5	23
Aminadav	24	38	8	27
Kefar Shaul	23	30	7	11

Tabella 3. Classificazione secondo Barton.

Classe	Q
Good (G)	$Q \geq 10$
Fair (F)	$10 > Q \geq 4$
Poor (P)	$4 > Q \geq 1$
Very poor (VP)	$1 > Q \geq 0.1$
Extremely poor (EP)	$Q < 0.1$

dove:

\bar{x} = valore medio dei campioni

\bar{s}_x = deviazione standard dei campioni

Per il peso di volume è stato assunto un valore medio delle prove di laboratorio mentre il valore del parametro m_i [1] di ciascuna formazione è stato valutato considerando 3 approcci:

- Il valore ottenuto dal criterio di plasticità di Hoek & Brown, interpolando i risultati di tutte le prove di laboratorio;
- Il valore proposto in letteratura da Hoek & Brown per le diverse litologie;
- Il rispetto della seguente relazione [2]:

$$\frac{\sigma_{c,i}}{\sigma_{t,i}} - 1 < m_i < \frac{\sigma_{c,i}}{\sigma_{t,i}} \quad (2)$$

Va osservato che per la formazione Motza, data l'alternanza di strati marnosi e strati calcarei, i suddetti parametri sono stati ottenuti con una media pesata di due set di parametri, in funzione della percentuale delle due litologie riscontrata nei sondaggi (41 % calcare, 59% marne).

$$\begin{aligned} x_{Motza} &= x_{limestone} \cdot \frac{50.8}{122.6} + x_{Marl} \cdot \frac{71.8}{122.6} \\ &= x_{limestone} \cdot 0.41 + x_{Marl} \cdot 0.59 \end{aligned} \quad (3)$$

In Tab. 2 sono riportati i parametri caratteristici delle varie unità. Sulla base di questi parametri, delle coperture in gioco e del GSI, di picco e residuo, è stato pertanto possibile definire i parametri

Tabella 4. Correlazione tra il Q di Barton e l'indice GSI.

Class	Q _{range}	Q _{min}	J _w	SRF	Q'	GSI	GSI _{assunto}
Good (G)	≥ 10	10	1	2.5	25	73.0	70
Fair (F)	4 - 10	4	1	2.5	10	64.7	60
Poor (P)	1 - 4	1	1	2.5	2.5	52.2	50
Very poor (VP)	0.1 - 1	0.1	1	2.5	0.25	31.5	30
Extremely poor (EP)	< 0.1	0.01	1	2.5	0.025	10.8	10

di resistenza e deformazione degli ammassi (ϕ , c , E) secondo il criterio di linearizzazione di Hoek & Brown [1].

Va osservato che il capitolato della stazione appaltante (Volume 5 "Tunnelling") prevedeva la classificazione dei fronti di scavo sulla base del rating Q di Barton [3]:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (4)$$

Viceversa, la progettazione degli interventi in fase di scavo e dei rivestimenti doveva essere condotta secondo la caratterizzazione di Hoek & Brown, basata sull'indice GSI. Si è reso pertanto necessario scegliere una correlazione, tra le tante disponibili in letteratura (Hoek 1997; Rutledge 1978; Bieniawski 1979; Kaiser and Gale 1985; Barton 1995), per mettere in relazione l'indice Q al valore di GSI. È stata utilizzata quella di Hoek [4] in quanto, da un lato, ha permesso di correlare direttamente i due indici senza passare dal valore di RMR e, dall'altro, tra tutte quelle analizzate, è risultata la più ragionevolmente cautelativa:

$$Q' = Q_{min} \cdot \frac{SRF}{J_w} \quad (5)$$

$$GSI = 44 + 9 \ln Q' \quad (6)$$

La seguente tabella riporta la correlazione tra il valore minimo di Q per ciascuna classe e il valore di GSI assunto nei calcoli.

I parametri residui sono stati definiti considerando il valore di $GSI_{post-peak}$ in accordo con quanto proposto in [5] mentre i valori di dilatanza sono stati definiti in accordo alle indicazioni di [4].

$$GSI_{post-peak} = GSI^{-0.0134 \cdot GSI} \quad (7)$$

Infine, sono state effettuate 17 prove di rigonfiamento nelle marne della Motza che hanno fornito un valore caratteristico della pressione a rigonfiamento impedito pari a 180 kPa.

4.3. Sezioni di scavo

Nella progettazione delle sezioni di scavo sono stati sempre applicati avanzamenti a piena sezione tranne che per le sezioni più grandi, dove oggettivi limiti tecnologici impedivano questo approccio, dove lo scavo è stato effettuato in più fasi. In tutti i casi, comunque, il rivestimento di prima fase è stato realizzato fino alla quota di fondazione finale anche mediante la realizzazione di uno scavo parziale in corrispondenza del suo piede.

- Lo scavo a piena sezione è stato previsto per tutte le sezioni

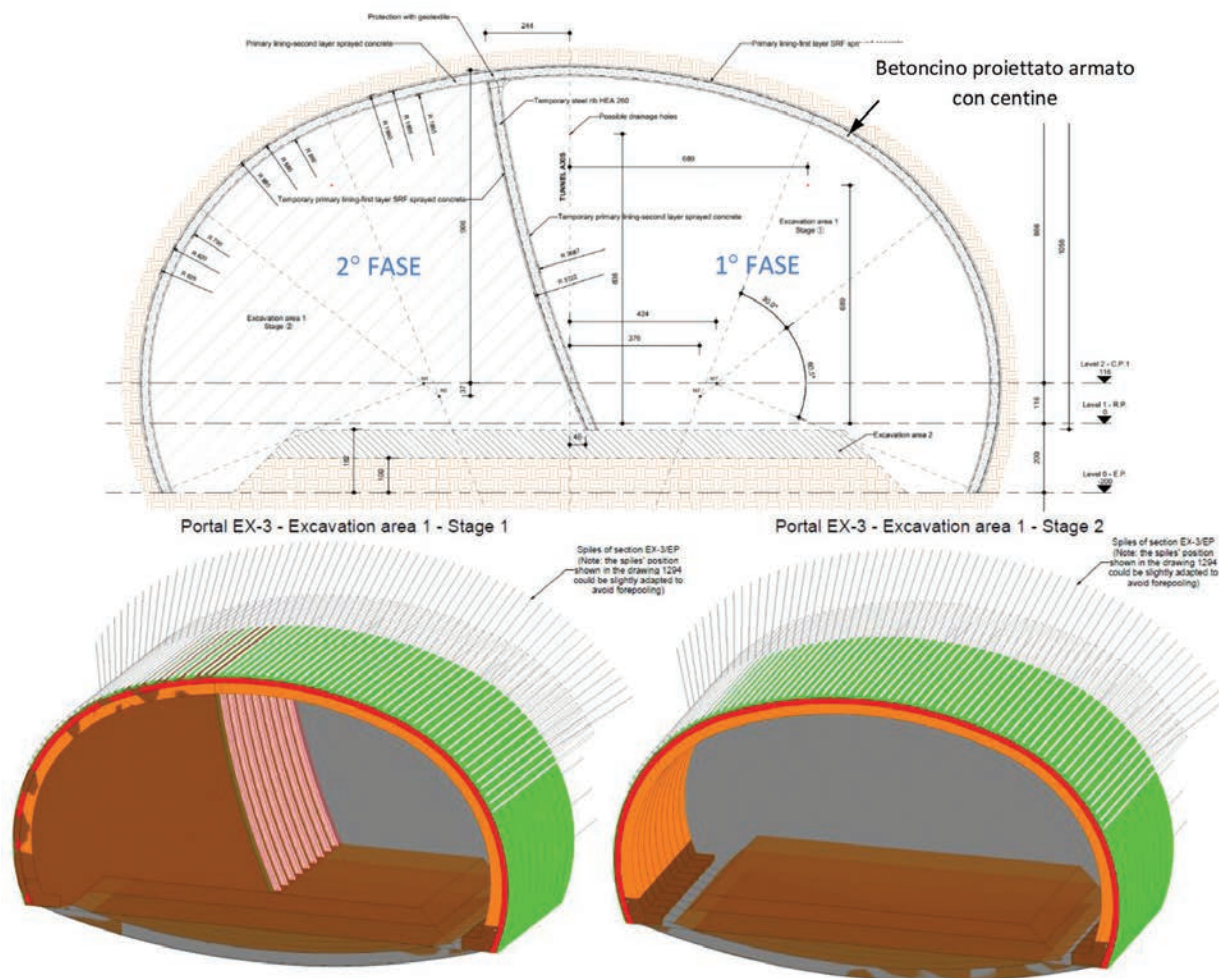


Figura 12. Sezione EX-3.

- con una larghezza di scavo minore di 19 m e un'altezza inferiore a 10.5 - 11 m;
- Per sezioni di scavo con altezza maggiore di 10.5 - 11 m si è previsto uno scavo a piena sezione della calotta e un successivo ribasso della sola zona centrale;
- Per le sezioni con larghezza di scavo maggiore di 19 m (Sezioni EX-1 e EX-2), si è previsto l'abbattimento del fronte di scavo in due fasi consecutive (prima la porzione di destra e poi quella di sinistra) e la successiva messa in opera del rivestimento di prima fase in un unico step;

- Per la sezione più grande (Sezione EX-3), che presenta una larghezza degli scavi di circa 25 m, si è previsto invece lo scavo della sezione in due fasi, prima la porzione di destra, con la messa in opera dei suoi interventi di confinamento di prima fase, e successivamente quella di sinistra con i relativi interventi di prima fase.
- In particolare, quest'ultima soluzione, nonché la geometria della parzializzazione del fronte di scavo, è stata studiata anche al fine di:
- Consentire l'approccio dello scavo dei cameroni (Sezione EX-3) dalla sezione delle rampe (Sezione 2L) della galleria Yefe Nof;

Tabella 5. Tipologia di interventi di prima fase in funzione della classe geomeccanica (spessori riferiti alla sezione Sezione 3L).

	Good	Fair	Poor	Very Poor	Extremely Poor	MOTZA Very Poor	MOTZA Extremely Poor
Betoncino proiettato fibro-rinforzato	5	5	5	5	5	5	5
Betoncino proiettato	5	5	5	20	20	20	20
Ancoraggi radiali	X	X	-	-	-	-	-
Centine	-	-	X	X	X	X	X
Auto-perforanti in avanzamento	-	-	-	-	X	-	X
VTR al fronte	-	-	-	-	X	-	X

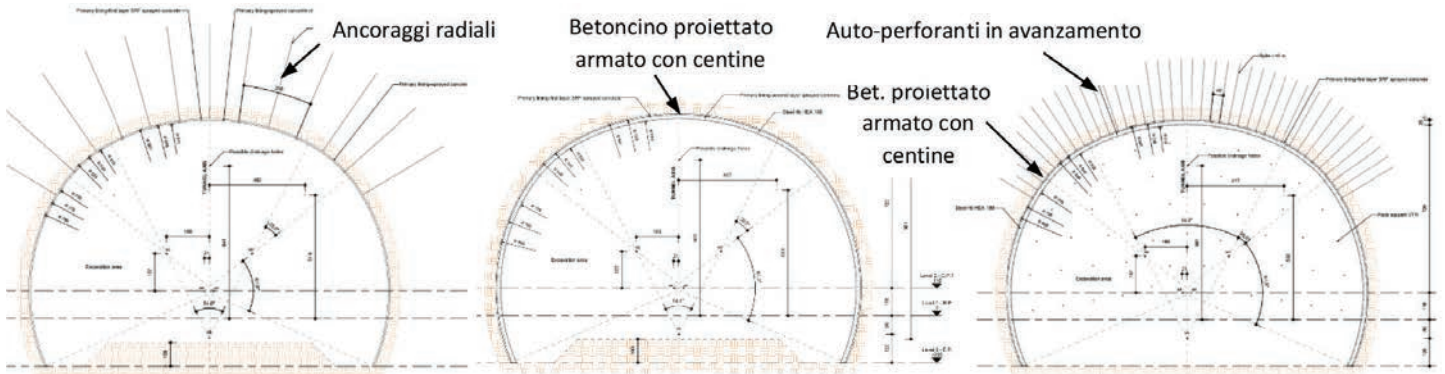


Figura 13. (a) Sezione di scavo Good/Fair/Poor; (b) sezione di scavo Very Poor; (c) sezione di scavo Extremely Poor.

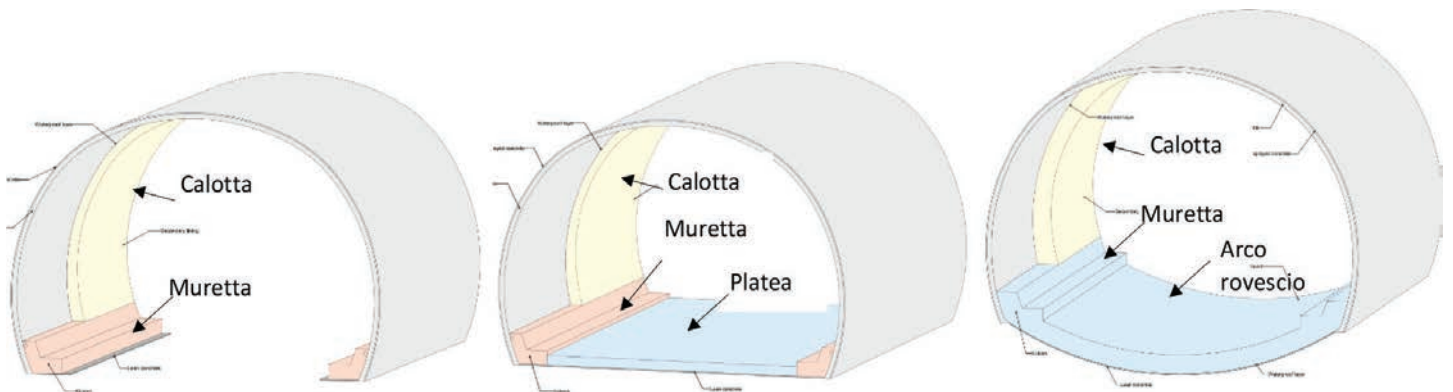


Figura 14. (a) Sezione aperta; (b) sezione chiusa drenata; (c) sezione chiusa impermeabilizzata (nella Motza).

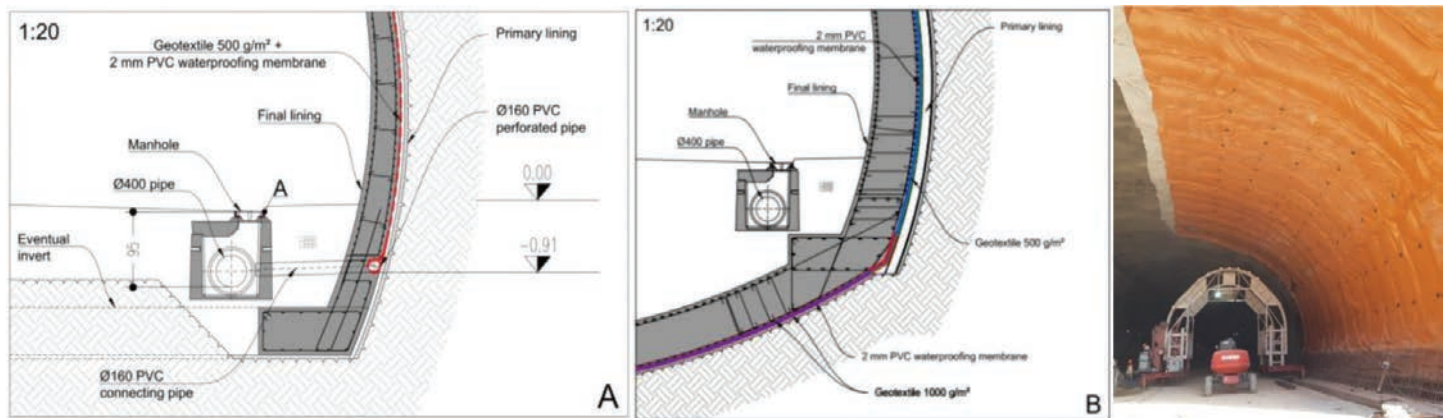


Figura 15. Particolare del sistema di impermeabilizzazione (a) Sezione drenata; (b) Sezione impermeabilizzata (nella Motza).

– Ottimizzare il cronoprogramma di lavoro in quanto, svincolando lo scavo della seconda porzione della galleria dall'avanzamento del fronte della prima porzione, la galleria principale poteva procedere indipendentemente dal completamento della sezione EX-3, che poteva essere effettuato in ombra alle altre attività di cantiere.

A seguito di una prima valutazione delle criticità e degli interventi di confinamento necessari per la stabilizzazione [6] le condizioni più critiche per ciascuna sezione sono state successivamente analizzate mediante modelli step-by-step alle differenze finite con

l'ausilio del software FLAC 2D [7]. Modelli 3D sono stati sviluppati per l'analisi strutturale in corrispondenza degli innesti con i cross-passage trasversali.

L'abbattimento nelle classi Good, Fair e Poor della classificazione di Barton è stato realizzato mediante l'utilizzo di esplosivo, con un rivestimento di prima fase costituito da 5 cm di betoncino proiettato fibro-rinforzato, chiodature radiali e uno strato di betoncino proiettato di regolarizzazione. All'aumentare delle dimensioni delle sezioni, oltre a incrementare la lunghezza delle chiodature è stato accresciuto lo spessore del betoncino proiettato.

Tabella 6. Spessore dei rivestimenti definitivi.

Classe geomeccanica	2L	2L-EX	2L-EP	3L	3L-EX	3L-EP	EX-1	EX-2	EX-3	Motza
Good (G)	30 cm						35 cm	40 cm	45 cm	-
Fair (F)										
Poor (P)										
Very poor (VP)	35 cm						40 cm	45 cm	50 cm	□ 60 cm
Extremely poor (EP)										

In classe Very Poor, con abbattimento mediante mezzi meccanici, sono state applicate centine a passo 1.5 m e betoncino proiettato. Infine, in classe Extremely Poor, il passo delle centine è stato ridotto ad 1 m e sono stati previsti interventi di rinforzo in avanzamento in calotta, costituiti da barre auto-perforanti e un consolidamento del fronte mediante tubi in VTR.

Il rivestimento definitivo è stato progettato per farsi carico dell'intero confinamento a lungo termine, del carico idraulico (5 m sopra la calotta nelle sezioni drenate e 15 m nelle sezioni non drenate nella Motza – si veda capoverso successivo), dell'azione sismica e per resistere al carico di incendio determinato dalla curva RWS. Nel tratto in Motza è stato considerato anche un carico di rigonfiamento pari a 180 kPa.

In generale sono state progettate sezioni aperte (senza soletta di base) drenate. Solo in classe Extremely Poor il rivestimento finale, drenato, ha una soletta di base mentre nella tratta in Motza, co-

me prescritto da capitolato, sono state previste sezioni con arco rovescio e completamente impermeabilizzate.

I rivestimenti sono stati dimensionati a partire da uno spessore minimo di 30 cm nelle sezioni correnti e 60 cm nelle sezioni in Motza. Lo spessore minimo è stato incrementato di 5 cm nelle classi geomeccaniche peggiori e di 5 cm, 10 cm e 15 cm rispettivamente nelle sezioni più grandi. Le incidenze di armatura variano da 60 a 110 kg/m³.

4.4. Monitoraggio

Durante l'avanzamento è stato effettuato un continuo monitoraggio sia dei tunnel che in superficie.

Il monitoraggio delle gallerie è stato realizzato mediante:

- Rilievi del fronte di scavo dopo ogni sfondo;
- Stazioni di convergenza del cavo mediante 5 mire ottiche;

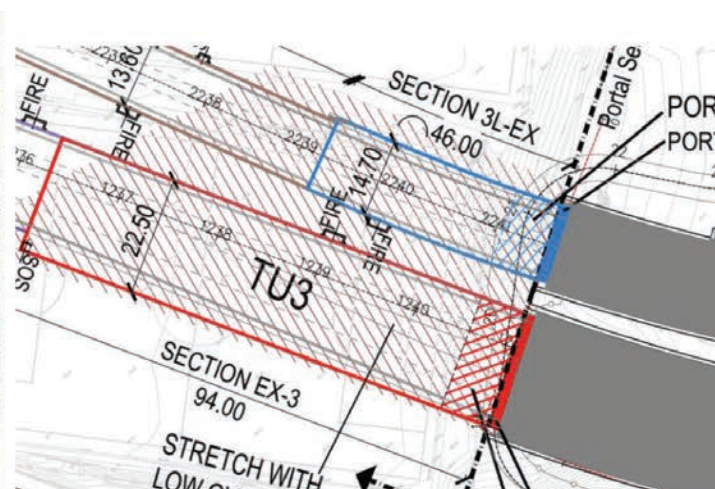


Figura 16. Planimetria dell'imbocco lato Bayth.

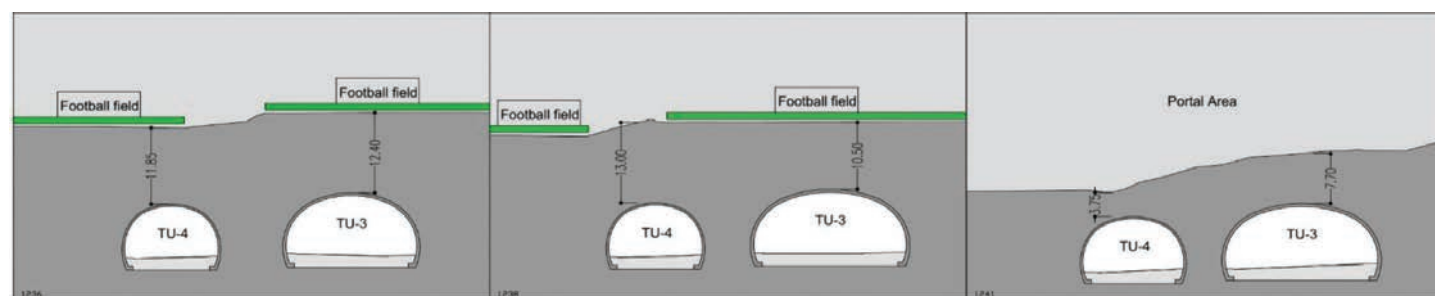


Figura 17. Sezioni trasversali in corrispondenza dell'imbocco lato Bayth.

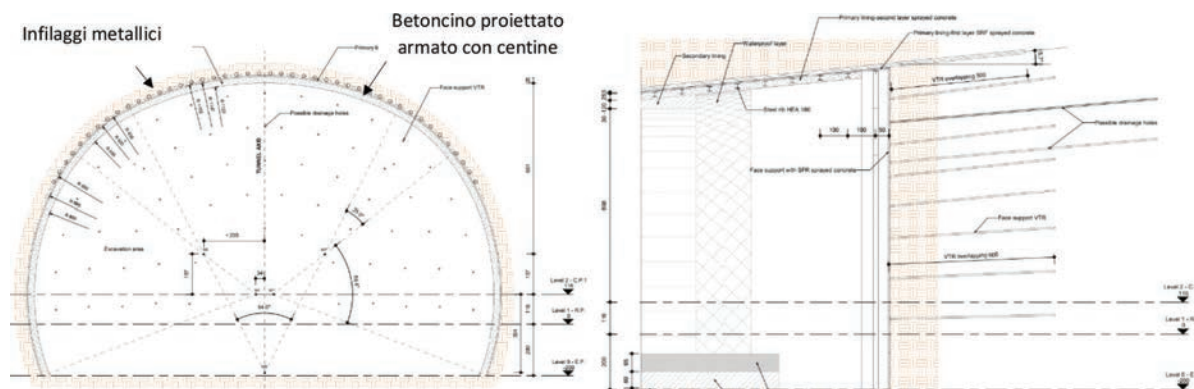


Figura 18. Sezione di scavo canna TU4 (Sezione 3L-EX troncoconica).

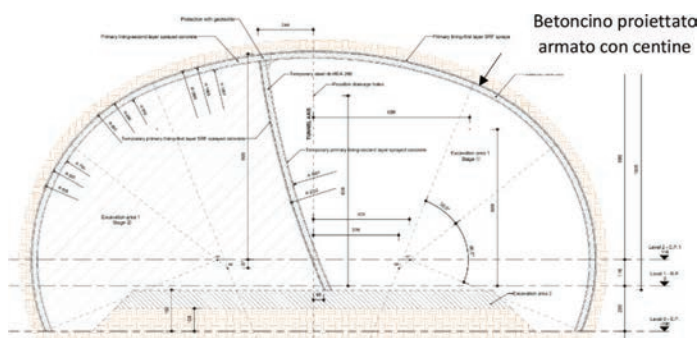


Figura 19. Sezione di scavo canna TU3 (Sezione EX-3).

- Rilievo dello stato tensionale nei rivestimenti di prima fase mediante strain gauges;
- Mire ottiche sul fronte di scavo nel caso di soste prolungate;
- Estensimetri multibase radiali.

Il monitoraggio in superficie si è concentrato nelle zone ritenute più critiche:

- Tratte a bassa copertura in corrispondenza dell'imbocco lato Bayth;
- L'area dell'ospedale;
- Gli edifici sovrastanti la Motza;
- Gli edifici in prossimità delle biforcazioni;

ed è stato realizzato mediante:

- Capisaldi topografici sugli edifici;
- Fessurimetri sugli edifici;
- Misurazioni di subsidenza mediante capisaldi topografici sul piano campagna;
- Vibrometri.

5. Principali criticità e problematiche affrontate durante gli scavi

5.1. Basse coperture

In corrispondenza dell'imbocco lato Bayth della galleria Yefe Nof, le due canne presentano sezioni più gradi di quella corrente al fine di ospitare le corsie di accelerazione e decelerazione dei rami di svincolo presenti sia in entrata che in uscita. In particolare, la canna TU3 imbocca con la sezione EX-3 (piattaforma da 22.5 m, larghezza scavo 25 m) mentre la canna TU4 con la sezione 3L-EX (piattaforma da 14.7 m, larghezza scavo 16.7 m). Oltre alle dimensioni delle sezioni, i due assi stradali si avvicinano molto, riducendo lo spessore del setto di roccia tra le due canne a circa 6 m. Inoltre, in tutta questa tratta, sotto i campi da calcio da mantenere costantemente utilizzabili, le coperture in gioco



Figura 20. Sezione EX-3. (a) Scavo della prima porzione; (b) sezione completa.



Figura 21. Vista da drone dell'imbocco lato Bayth durante la costruzione.

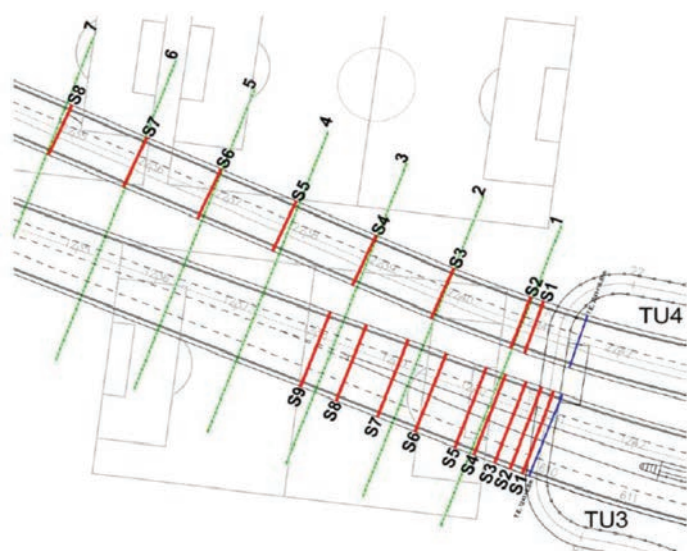


Figura 22. Sezioni di monitoraggio topografico in superficie (in verde) e di convergenza (in rosso).

sono molto contenute, dell'ordine massimo di 10 m, di cui solo una quota parte in roccia. In particolare, lo scavo della TU3 è avvenuto in roccia mentre quello della TU4 parzialmente in materiale di riporto antropico.

Lo scavo della sezione EX-3 è stato affrontato con gli interventi previsti per la classe Extremely Poor finché lo strato roccioso al di sopra della calotta non ha raggiunto uno spessore di 6 m, sufficiente a garantire una corretta redistribuzione delle tensioni. Lo scavo della sezione 3L-EX è stato invece affrontato con una sezione troncoconica con infilaggi finché la presenza di materiale sciolto non consentiva una copertura rocciosa di almeno 2 m sul contorno, poi con gli interventi previsti per la classe Extremely Poor finché lo spessore roccioso al di sopra della calotta era inferiore a 4 m e successivamente con le sezioni previste in accordo alla classificazione del fronte di scavo.

Nel corso dell'avanzamento è stato effettuato un costante monitoraggio dei cedimenti superficiali nell'area dei campi da calcio mediante stendimenti di capisaldi topografici ad interasse di 5 m ogni 20 m lungo l'asse delle canne. In galleria sono invece state installate delle sezioni di convergenze con 5 target topografici.

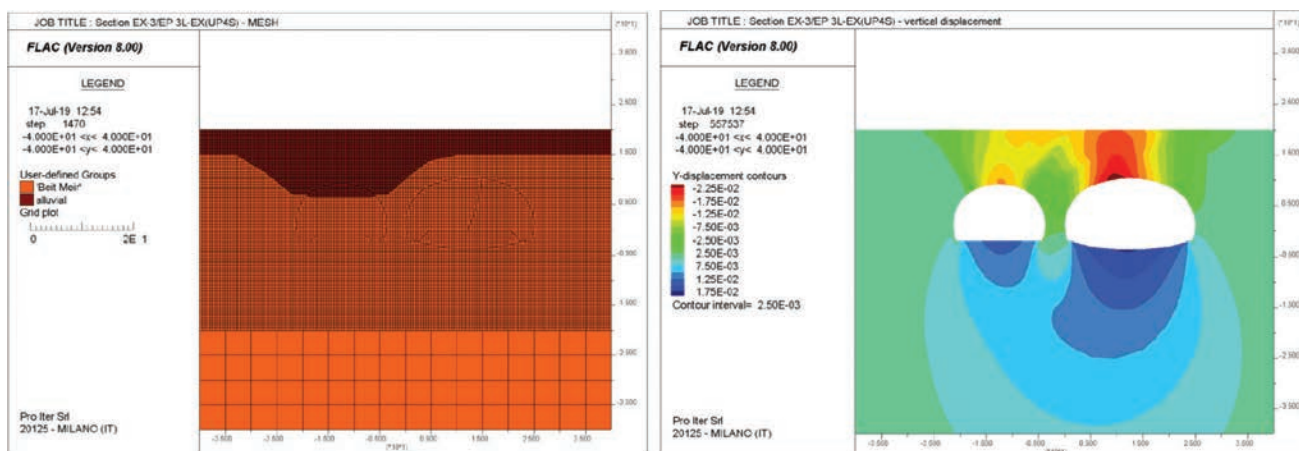


Figura 23. Modello di calcolo FDM. (a) Mesh; (b) spostamenti verticali a scavi ultimati.

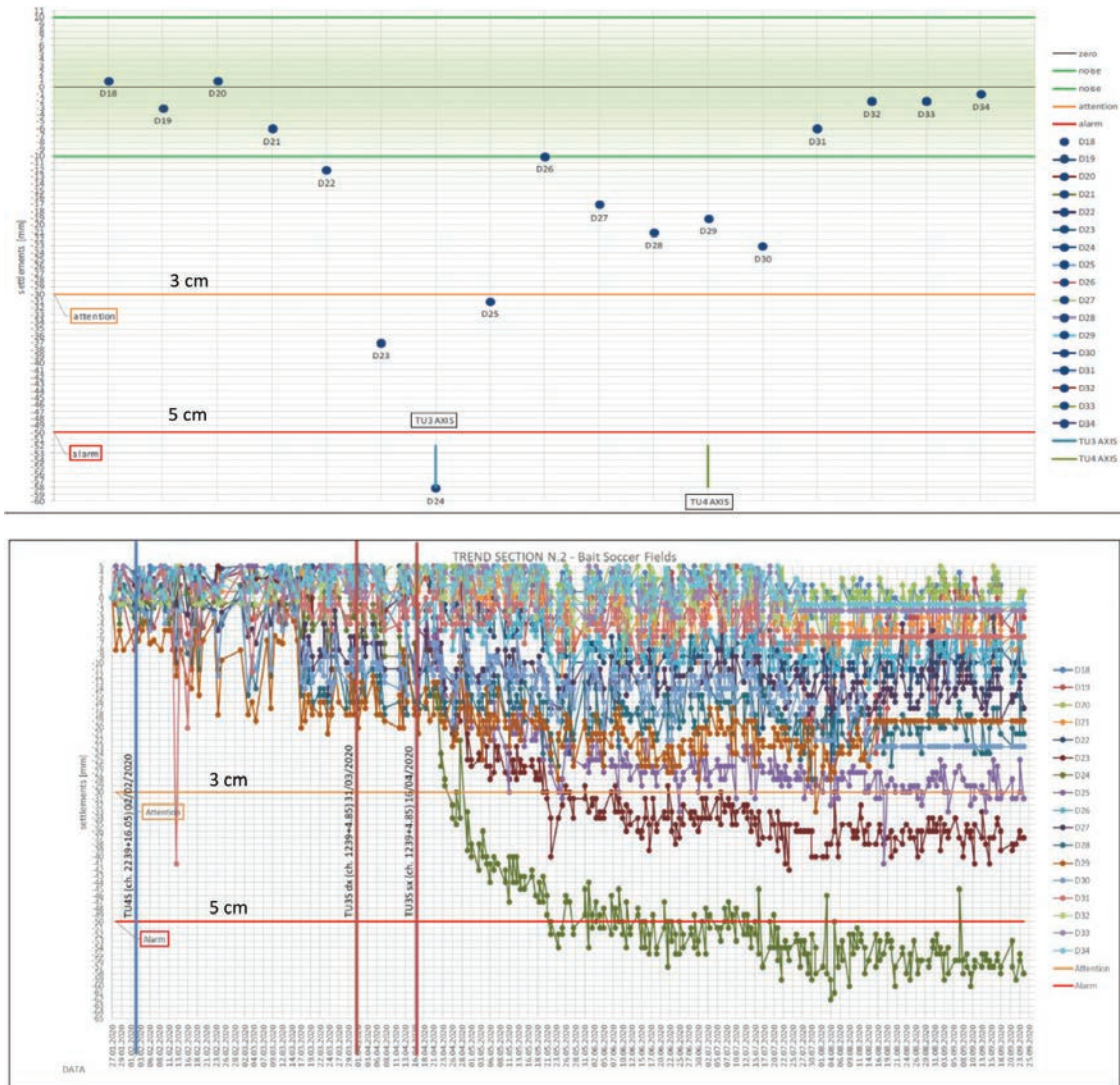


Figura 24. Risultati delle sezioni di monitoraggio topografico nell'area dei campi da calcio (Sezione 2).

Il monitoraggio dei cedimenti in superficie ha fornito valori maggiori di quelli attesi. Come illustrato nelle seguenti figure, a fronte dei 3 cm attesi in fase di progettazione, i cedimenti hanno superato, nelle 3 sezioni più corticali e per l'asse della canna TU3

(sezione con larghezza di scavo massima 25 m) la soglia di allarme, fissata a 5 cm.

Si è pertanto provveduto a:

- Infiltrare le sezioni di monitoraggio delle convergenze in galleria;

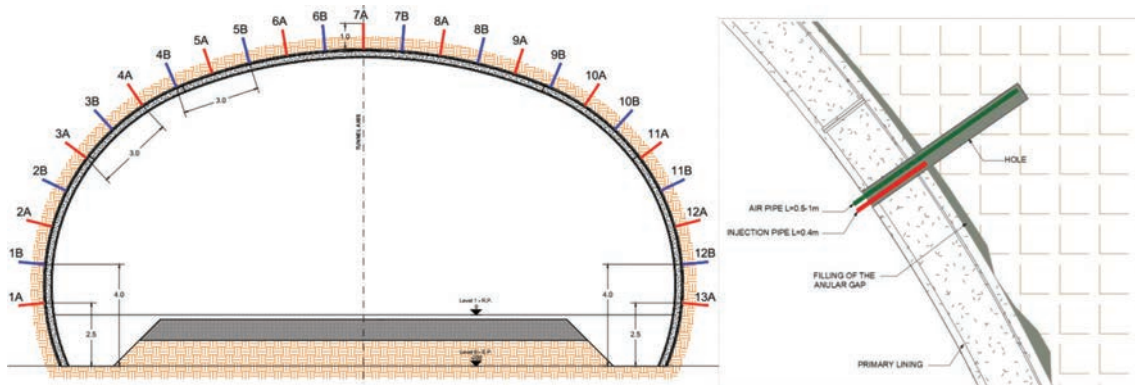


Figura 25. Schema dell'intervento di iniezioni sul contorno.



Figura 26. Foto-inserimento dell'imbocco lato Bayth in fase di esercizio.

- Effettuare un rilievo laserscan dei rivestimenti di prima fase (dopo la messa in opera del betoncino proiettato);
- Effettuare una accurata analisi visiva dei rivestimenti di prima fase.

Dall'analisi dei rilievi laserscan è emersa la presenza di sotto-profili in calotta, di entità massima pari a 17 cm, che non trovavano alcun riscontro con le misure di convergenza, inferiori al cm, e con la totale assenza di fessurazioni nei rivestimenti di prima fase. Viceversa, da una back analysis dello scavo, si è potuto appurare che tali sotto-profili potevano essere interpretati come una mancanza di un perfetto contatto tra l'ammasso e il rivestimento di prima fase; la possibilità lasciata all'ammasso di deformarsi per chiudere questo gap giustificava i cedimenti in superficie, che risultavano dell'ordine di 1/3 dei valori dei sotto-profili. Si è pertanto provveduto a eseguire delle perforazioni radiali, a interasse 2 m, per indagare la presenza di vuoti a tergo del rivestimento di prima fase

e a eseguire una campagna di iniezioni cementizie di intasamento ($a/c = 0.4$; pressione massima = 0.5 bar). L'intervento ha ottenuto il risultato auspicato in quanto il trend delle subsidenze in superficie si è immediatamente stabilizzato.

5.2. Carsismo

Il rinvenimento di cavità carsiche, in molti casi riempite di materiale incoerente, di dimensioni non prevedibili in base alle risultanze della campagna geognostica di base, ha inizialmente comportato franamenti al fronte e la necessità di mettere a punto una procedura che consentisse di identificarle in anticipo rispetto all'avanzamento. Tali fenomeni si sono verificati principalmente nella formazione dell'Aminadav, interessando lo scavo di entrambe le gallerie in corrispondenza degli imbocchi lato Revida, come rappresentato schematicamente in Fig. 27.

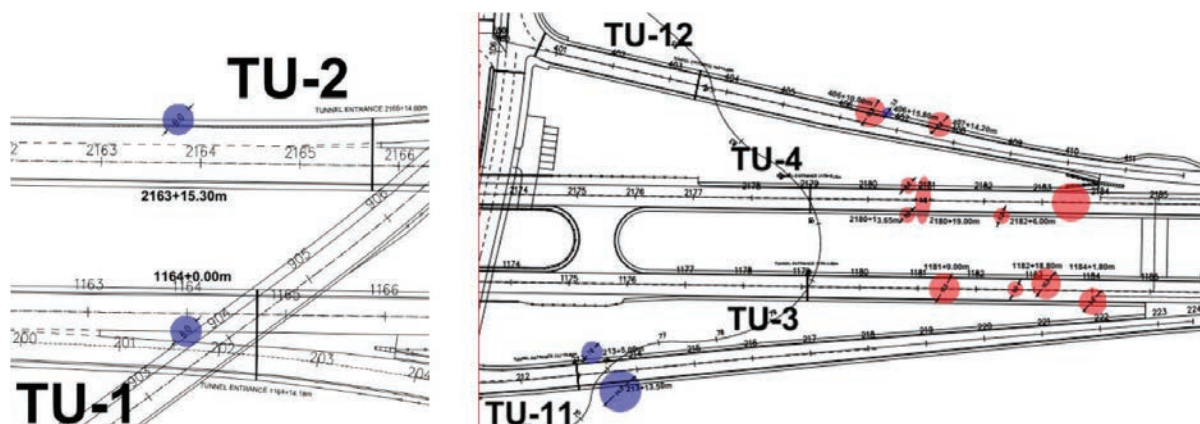


Figura 27. Mappatura delle principali cavità carsiche riscontrate durante gli scavi nell'area di Revida (in blu le cavità vuote e in rosso quelle con riempimento di materiale incoerente. Le dimensioni dei cerchi sono proporzionali a quelle delle cavità, che raggiungono valori dell'ordine di diversi metri).



Figura 28. Esempi di fenomeni carsici riscontrati durante l'avanzamento degli scavi.

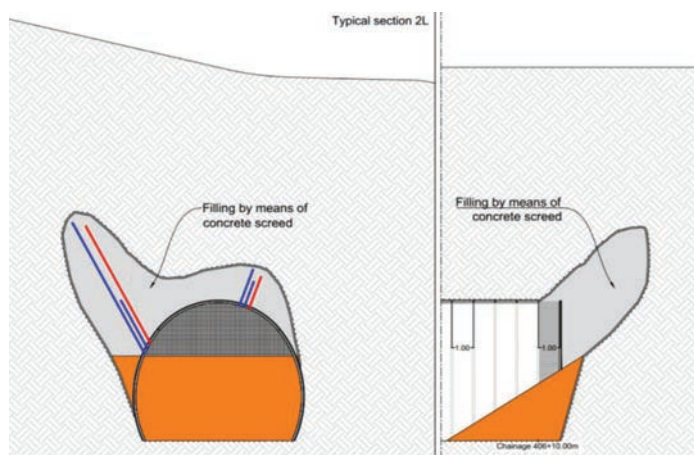


Figura 29. Schemi adottati per il riempimento delle cavità.

A seguito dei primi franamenti si è provveduto alla messa in sicurezza della galleria mediante il riempimento delle cavità con miscela cementizia. In funzione della posizione delle cavità rispetto al fronte della galleria sono stati previsti differenti modalità di cassatura per l'esecuzione dei riempimenti. In particolare, nel caso di cavità carsiche sui piedritti, il cassero è stato realizzato sfruttando il rivestimento di prima fase. Per riempire le cavità davanti al fronte di scavo, la cassatura è stata invece realizzata mediante una parete in betoncino proiettato armata con due strati di rete elettrosaldata. Il riempimento è stato eseguito per step mediante la messa in opera di tubi di pompaggio e di sfiato, a opportune quote rispetto al cielo delle cavità da riempire.

Caso per caso, è stata valutata poi la necessità di installare degli interventi in avanzamento sul contorno della calotta costituiti da barre auto-perforanti con geometria troncoconica.

Al fine di prevenire il verificarsi di questi fenomeni è stato messo a

Spezzoni di centina utilizzati per adattare la sezione circolare alla troncoconica

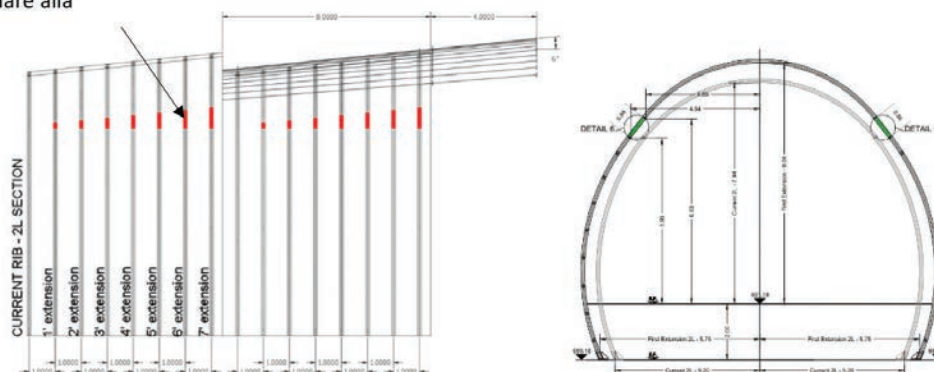


Figura 30. Sezione troncoconica per la ripresa degli scavi.

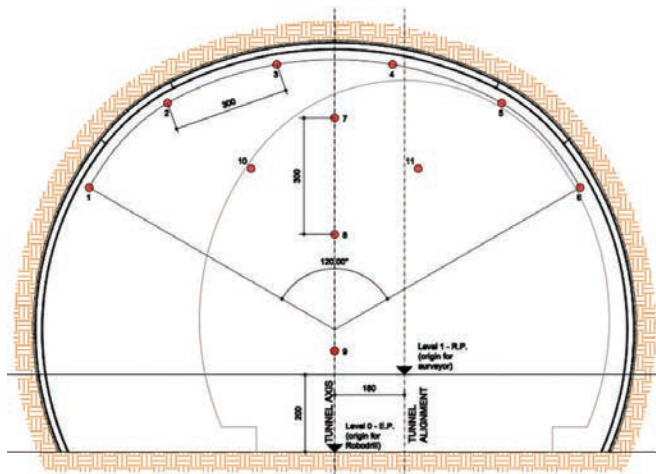


Figura 31. Schema perforazioni in avanzamento.

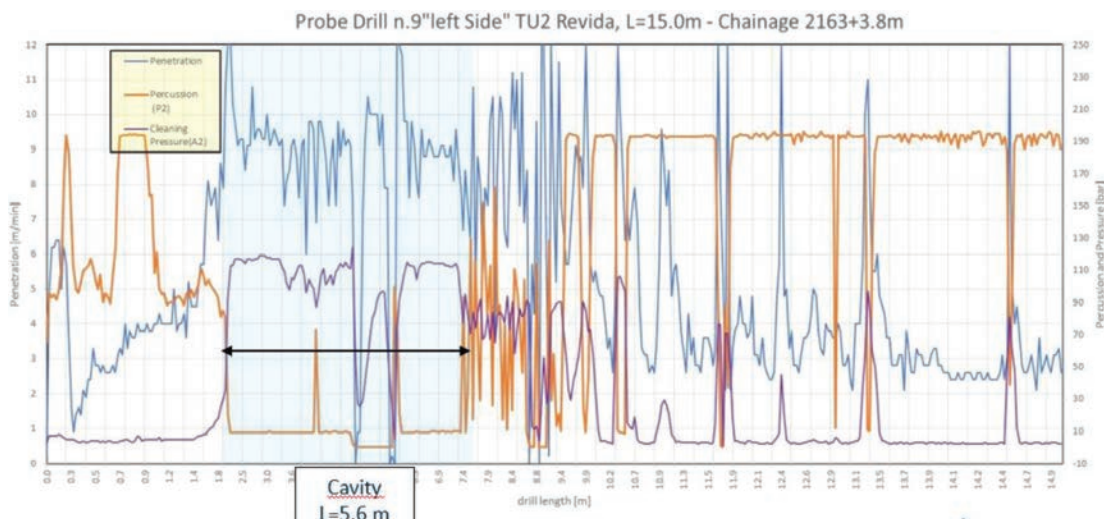


Figura 32. Esempio di interpretazione dei dati di perforazione.

Tabella 7. Interpretazione delle perforazioni di prospezione in avanzamento.

	Velocità media (m/min)	Pressione di pulizia (bar)	Comportamento atteso dell'ammasso
	$S \leq 2$	$0 < CP \leq 12$	Stabile
	$2 < S \leq 3$	$0 < CP \leq 12$	Probabilmente stabile
	$3 < S \leq 4$	$0 < CP \leq 12$	Possibilmente stabile
	$S > 4$	$CP > 4.5$	Instabile
	$S \leq 4$	$CP > 12$	Instabile

punto un sistema di prospezione in avanzamento mediante l'esecuzione sistematica di perforazioni sub-orizzontali in calotta con registrazione dei parametri di perforazione.

L'interpretazione dei dati si è basata, principalmente, sull'analisi dei seguenti parametri:

- la velocità media [m/min] della punta di perforazione, che descrive la resistenza del materiale all'avanzamento. Valori alti sono indicatori di una roccia poco resistente o fratturata o, al limite, di vere e proprie cavità più o meno riempite;

- la pressione di pulizia [bar], che descrive la stabilità del materiale. Valori alti sono indicatori di una roccia poco resistente o fratturata o di materiale di riempimento che determina la chiusura del foro;
- la pressione di percussione del martello [bar]: valori bassi sono indicatori di una roccia poco resistente, fratturata o caratterizzata dalla presenza di cavità con riempimento di materiale sciolto.

Dall'esperienza maturata durante l'avanzamento degli scavi si è giunti alla definizione dei valori soglia riportati in Tab. 7. In particolare, si osserva che problemi di instabilità, oltre che nel caso di velocità di avanzamento elevate, rappresentative della presenza di vuoti, si sono verificate anche con velocità di avanzamento contenute, nel caso in cui quest'ultime fossero associate a pressioni di pulizia elevate, sintomo di cavità riempite di materiale incoerente che determinavano, quindi, situazioni di rischio potenziale maggiori rispetto alle cavità vuote.

Mediante queste prospezioni, nel caso di rinvenimento di cavità, il proseguimento degli scavi è avvenuto a seguito del loro riempimento.

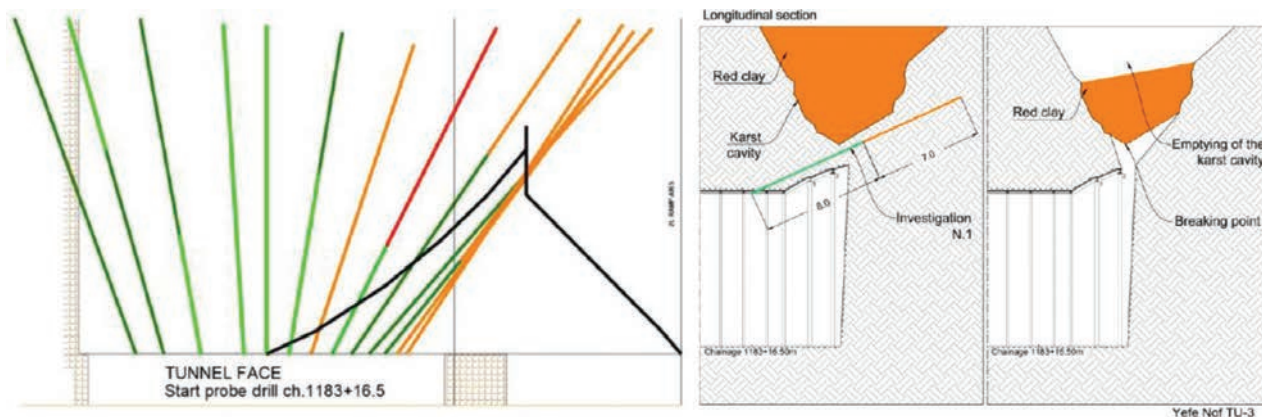


Figura 33. Meccanismo di collasso di una cavità carsica non rilevata con le prospezioni in avanzamento (progr. 1183+16 del TU3).

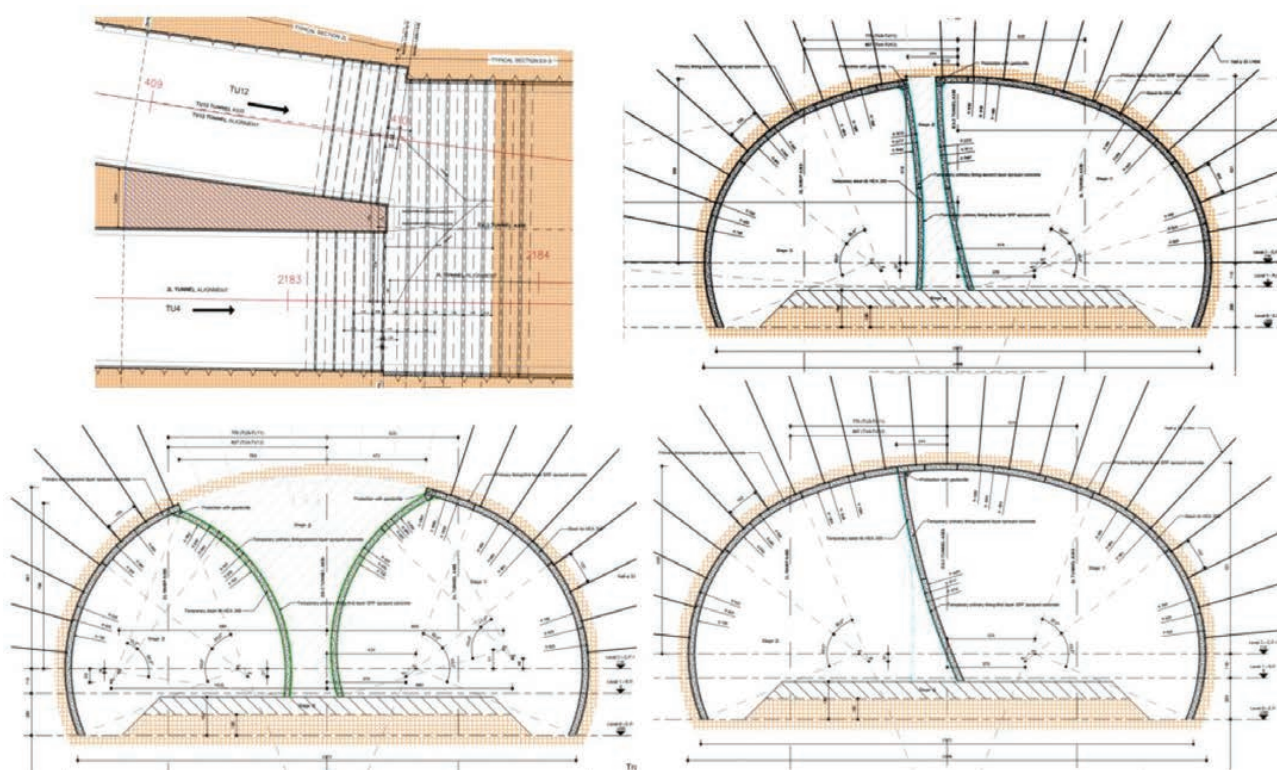


Figura 34. Planimetria della galleria Yefe nof lato Revida (in rosso i cameroni).

mento mediante iniezioni cementizie, eseguite sia dalle perforazioni di prospezione che da perforazioni integrative, e con l'eventuale messa in opera di sezioni con interventi in avanzamento. Questo approccio si è rivelato molto efficace e ha consentito di proseguire gli scavi evitando fermi all'avanzamento tranne che in pochissimi casi singolari, come quello rappresentato in Fig. 33, a causa della sfavorevole posizione delle cavità carsiche rispetto alle perforazioni di prospezione.

5.3. Scavo dei cameroni in prossimità delle biforcazioni

Nella galleria Yefe Nof lato Revida, due rampe, con una sezione della piattaforma stradale di larghezza massima pari a 10 m (Sezio-

ne 2L), si innestano sulle canne principali, anch'esse caratterizzate da una sezione tipo 2L, attraverso due cameroni di sficcio di larghezza di scavo iniziale di circa 25 m (Sezione EX-3).

In fase di progettazione sono state vagliate diverse soluzioni per lo scavo dei cameroni, con l'obiettivo di conciliare le esigenze statiche con quelle esecutive e logistiche del cantiere, nonché con la sicurezza degli edifici soprastanti a distanza minima di circa 30 m. La soluzione che è stata scelta ha previsto l'attacco degli scavi dei cameroni dagli assi principali (essendo i primi fronti ad arrivare alla progressiva della biforcazione) passando progressivamente dalla geometria della sezione 2L fino alla sezione EX-3, parzializzata in senso trasversale. Dopo questo tratto di transizione, lo scavo dei cameroni è potuto procedere

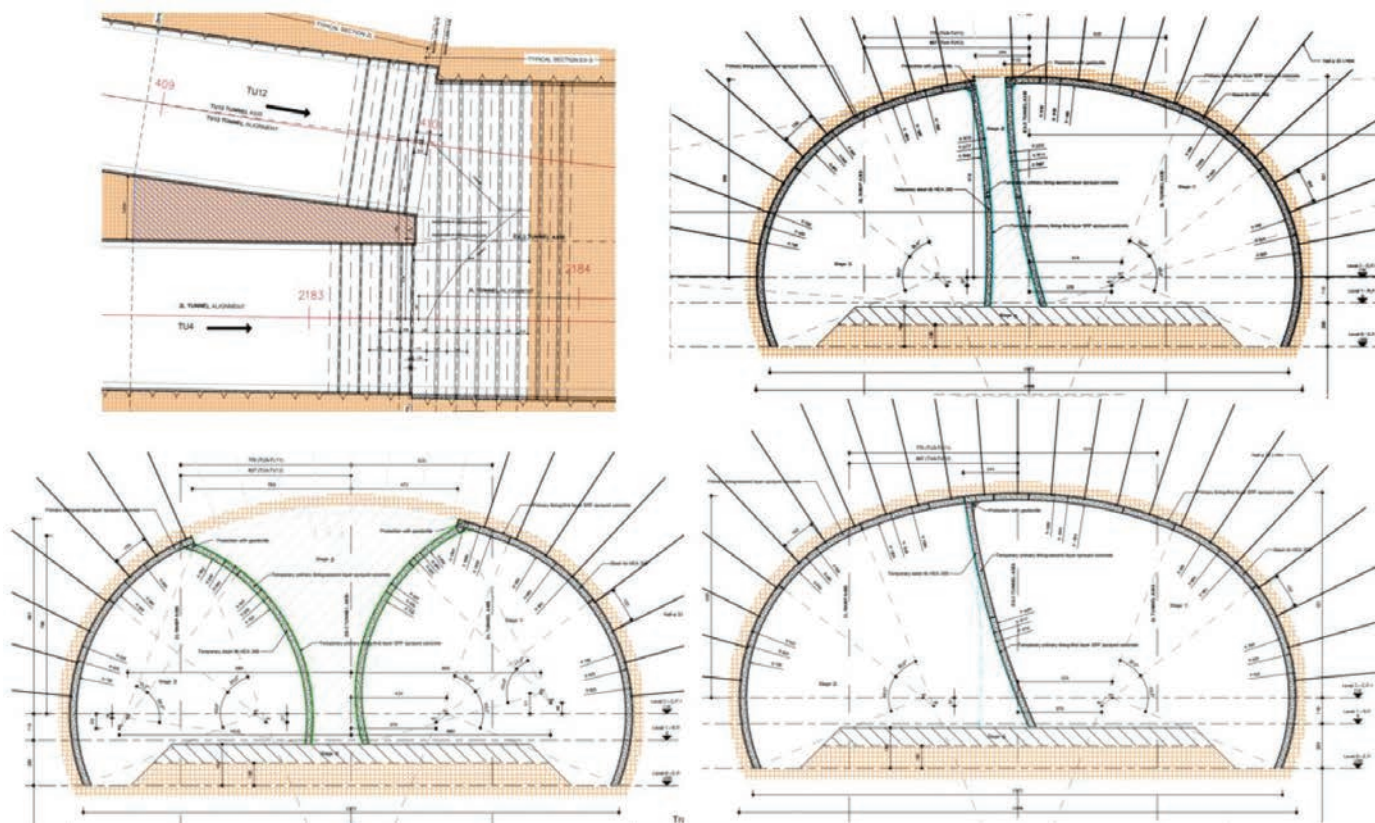


Figura 35. Sezioni di scavo per la transizione dalla sezione 2L alla sezione EX-3.



Figura 36. Immagini della biforcazione in fase di scavo.

con la sezione parzializzata EX-3 fino all'attacco delle successive sezioni EX-1, consentendo così il proseguimento dell'avanzamento delle canne principali indipendentemente dal completamento dello scavo dei cameroni. Lo scavo di allargamento dei cameroni è potuto avvenire, in funzione delle esigenze di cantiere, sia attaccando gli scavi dalle rampe (come nel caso del TU4-TU12) sia procedendo a ritroso dalla sezione EX-1 (come nel caso del TU3-TU11).

In Fig. 35 sono riportati alcuni schemi delle sezioni di scavo in

corrispondenza delle transizioni. Si può notare come lo scavo della porzione di destra del camerone, eseguito dall'asse principale, e il successivo scavo dalle rampe, hanno comportato la necessità di un dettagliato studio delle centine e la necessità di ribattere a ritroso il setto centrale per il completamento dei rivestimenti di prima fase in calotta.

Alla complicata geometria delle sezioni, nelle zone di transizione si è associata anche la presenza di cavità carsiche riempite di materiale incoerente. Quest'ultime hanno richiesto l'esecuzione di iniezioni cementizie, prima e durante lo scavo della transizione,

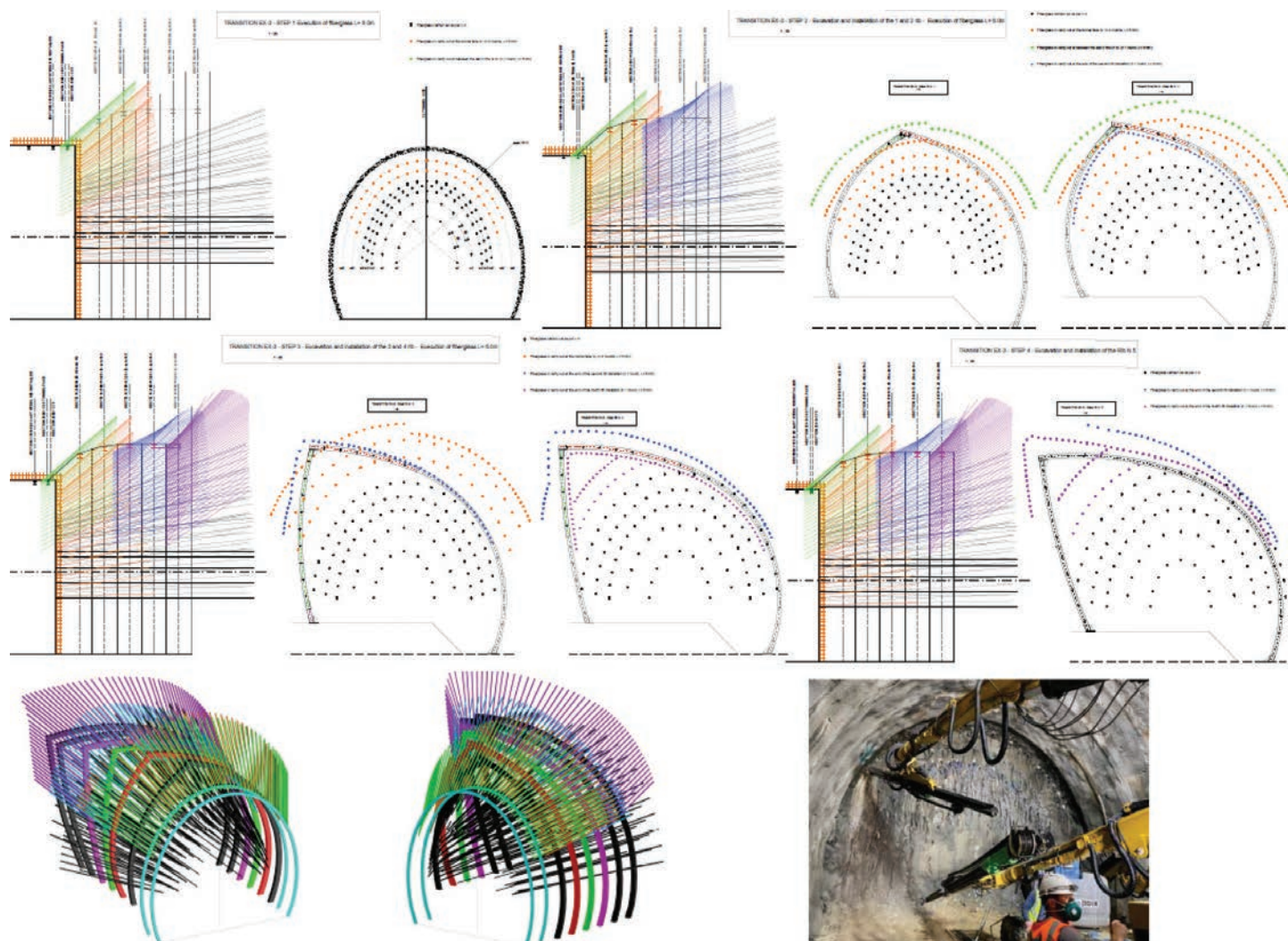


Figura 37. Schema delle iniezioni della zona di transizione a partire dal fronte dalla 2L e dei successivi sfondi.

che sono state eseguite, come rappresentato in Fig. 37, secondo un preciso schema geometrico che consentisse di consolidare un intorno del cavo di circa 2 - 3 m, in particolare sul setto tra le due canne, di spessore ridotto a 3 m. Durante le iniezioni, prima a bassa pressione e successivamente a pressione più elevata, il monitoraggio delle pressioni e dei volumi iniettati ha consentito di garantire l'efficacia dell'intervento.

6. Stato di avanzamento e conclusioni

Lunedì 25 gennaio 2021 sono stati abbattuti gli ultimi diaframmi di entrambe le canne TU1 e TU2 della galleria Har Nof, avente lunghezza di circa 1400 m, i cui scavi sono iniziati nel gennaio del 2020. Il completamento degli scavi delle gallerie Yefe Nof e delle relative rampe è previsto per il mese di marzo 2021. Il completamento dei getti dei rivestimenti definitivi è previsto per settembre 2021 per la galleria Har Nof e per novembre 2021 per la Yefe Nof.

Bibliografia

- [1] Hoek E., Carranza Torres C., Corkum B. (2002). Hoek-Brown failure criterion.
- [2] Mostyn G., Douglas K. (2000). Strength of intact rock and rock masses (Melburne) Proc. Geo Engg, 1389-1421.
- [3] Burton N., Lien R., Lunde J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech 6(4): 189-236.
- [4] Hoek E., Brown E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 34, 1165-1186.
- [5] Cai M., Kaiser P.K. (2007). Tasaka Y., Minami M. – Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 44, 247-256.
- [6] Gattinoni P., Pizzarotti E.M., Scesi L. (2014). Engineering Geology for Underground Works, Springer.
- [7] Itasca Consulting Group, Inc. (2016) FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 8.0. Minneapolis: Itasca.