

LINEA FERROVIARIA AD ALTA VELOCITÀ MILANO – GENOVA

ANALISI PARAMETRICA DELLA RISPOSTA TENSO DEFORMATIVA DELLE "ARGILLE A PALOMBINI" DURANTE LO SCAVO DI GALLERIE

GIUSEPPE LUNARDI, Amministratore Delegato, Rocksoil S.p.A., Milano, Italia
 GIOVANNA CASSANI, Direttore Tecnico, Rocksoil S.p.A., Milano, Italia
 ANDREA BELLOCCHIO, Project Manager, Rocksoil S.p.A., Milano, Italia

Il tratto della Linea ferroviaria ad AV/AC tra Genova e Milano - Terzo Valico dei Giovi - è attualmente in costruzione. L'opera prevede lo scavo di tunnel di linea, di servizio e di interconnessione con le linee storiche, per un totale di circa 90 km di lunghezza. Lo scavo delle gallerie, realizzato sia con metodo tradizionale che meccanizzato mediante TBM, dovrà essere completato entro il 2021. Più del 60 % degli scavi saranno realizzati nel complesso litostratigrafico delle Argille a Palombini (aP).

L'articolo descrive l'esperienza progettuale ad oggi maturata nello scavo a piena sezione di 6800 m di gallerie nelle "aP", con coperture variabili da 5 a 450 m e sezioni di scavo che hanno raggiunto anche la superficie di 255 m², ovvero la più grande mai scavata a piena sezione in contesti difficili. Questo è stato possibile grazie all'adozione dell'approccio progettuale e costruttivo ADECO-RS [1]. I dati di scavo, raccolti grazie a un esteso sistema di monitoraggio, sono stati confrontati con le previsioni progettuali e interpretati mediante modelli specifici di back-analysis.

L'esperienza di scavo ha permesso di definire un'analisi parametrica delle tecniche applicate per il controllo dello stato tenso-deformativo, secondo l'approccio ADECO-RS, che diventa funzione del contesto geomeccanico e della variabilità degli interventi di stabilizzazione e conservativi applicati allo scavo.

La linea ferroviaria AV/AC Milano–Genova è inserita tra i 30 progetti prioritari europei approvati dall'Unione Europea il 29 aprile 2004 (n° 24 «Asse ferroviario Lione/Genova–Basilea–Duisburg–Rotterdam/Anversa») come nuovo progetto europeo, il cosiddetto «Ponte tra i due Mari» Genova-Rotterdam (Figura 1a). La linea migliorerà i collegamenti dal porto di Genova con l'entroterra della pianura Padana e il Nord Europa, con un aumento significativo della capacità di trasporto, in particolare merci, per soddisfare la crescente richiesta di traffico (Figura 1b).

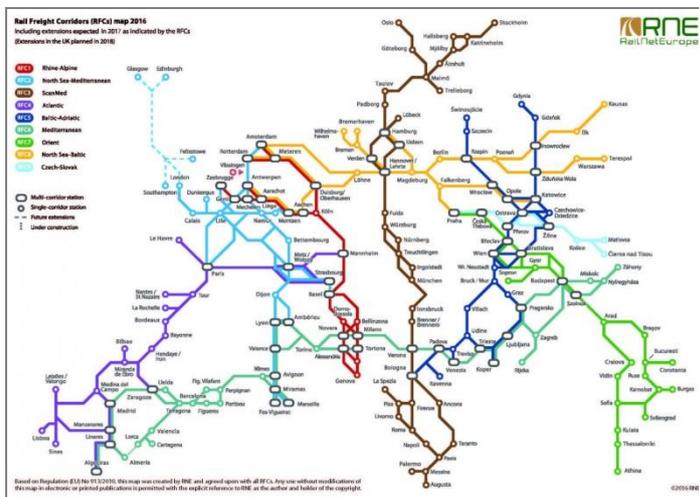


Figura 1: a) Corridoi Ferroviari Europei (RNE – Rail Net Europe); b) Asse ferroviario Lione/Genova–Basilea–Duisburg–Rotterdam/Anversa

Il tracciato si sviluppa lungo la direttrice Genova-Milano, fino a Tortona e lungo la direttrice Genova-Alessandria-Torino, fino a Novi Ligure, attraversando le province di Genova e Alessandria. La nuova linea sarà collegata a Sud, mediante l'interconnessione di Voltri e il Bivio Fegino, con gli impianti ferroviari del Nodo di Genova e con i bacini portuali di Voltri e del Porto Storico, mentre a Nord con le linee ferroviarie esistenti Genova-Torino e Tortona-Piacenza-Milano [2].

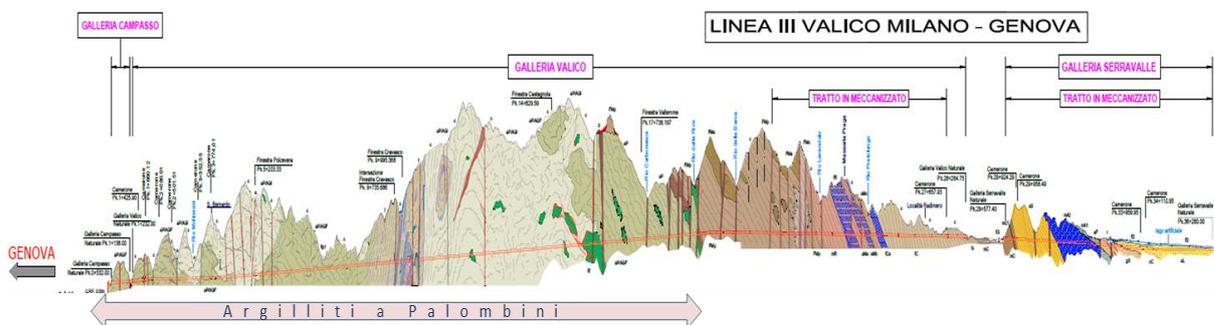


Figura 2: profilo generale delle opere di linea con evidenza della tratta realizzata nelle aP

La linea ha una lunghezza complessiva di 53 km e prevede la realizzazione di 36 km di gallerie, attraverso la catena appenninica situata tra Piemonte e Liguria. Lo sviluppo

Tunnel	Length total/excavated (m)	Section Type	Excavation Method	State of art 2016.9.15
Campasso Tunnel	606 606	Excavation Face 130 m ²	Conventional Full Face	✓
Valico Tunnel single tube - dual track	194 194	Excavation Face 130 m ²	Conventional Full Face	✓
Valico Tunnel dual tube - single track	16190 50	Excavation Face 100 m ²	Conventional Full Face	⚠
Valico Tunnel emergency zone	1488 0 Ready to start	Excavation Face 120 m ²	Conventional Full Face	✗
Valico Tunnel chambers	1076 234	Excavation Face up to 400 m ²	Conventional Full Face	⚠
Voltri Interconnecting Tunnel dual tube - single track - even	1997 55	Excavation Face 80 m ²	Conventional Full Face	⚠
Voltri Interconnecting Tunnel dual tube - single track - odd	3 915 486	Excavation Face 80 m ²	Conventional Full Face	⚠
Polcevera Access Tunnel	1763 1763	Excavation Face 75 m ²	Conventional Full Face	✓
Polcevera Junction	117 117	Excavation Face 180*240 m ²	Conventional Full Face	✓
Castagnola Access Tunnel	2530 1226	Excavation Face 100 m ²	Conventional Full Face	⚠
Castagnola Junction	101 0 Ready to start	Excavation Face 180*240 m ²	Conventional Full Face	✗
Val Lemme Access Tunnel	1 738 1 738	Excavation Face 130 m ²	Conventional Full Face	✓
Val Lemme Junction	188 28	Excavation Face 210*250 m ²	Conventional Full Face	⚠
By-pass from Campasso T. to Voltri Interconnecting T.	462 462	Excavation Face 130 m ²	Conventional Full Face	✓

Figura 3: principali caratteristiche delle opere scavate nelle aP

complessivo delle opere in sotterraneo, includendo le gallerie di linea a doppia canna, le finestre di accesso e le interconnessioni, supera i 90 km, di cui circa il 60% attraversano il complesso litostratigrafico delle Argille a Palombini (aP), che assumono quindi particolare rilevanza nei lavori di realizzazione dell'opera (Figura 2). Nel dettaglio, lo scavo attraverso le aP nella parte Sud del tracciato, da Genova a Voltaggio (AL), comprendendo gli scavi della galleria di linea principale, le finestre di accesso e le opere di interconnessione con la linea storica di Voltri, con coperture variabili tra 5 m e 600 m e sezioni di scavo con estensione areale comprese tra 75 e 395 m², realizzate a piena sezione sino a 255 m² (Figura 3). Gli scavi nelle Argille a Palombini sono realizzati prevalentemente in tradizionale, a eccezione della finestra Polcevera, realizzata con TBM di tipo EPB con diametro di scavo pari a circa 10 m.

1. LA FASE CONOSCITIVA

Da un punto di vista geologico, le aP (divise in due sotto-unità, denominate AGF e AGI, incluse nell'unità tettonometamorfica del Monte Figogna – Figura 4) sono definite come un

complesso litostratigrafico costituito da scisti micaceo - carbonatici di colore grigio scuro, con foliazione molto pervasiva ed abbondanti vene intrafoliarie di quarzo e albite; la scistosità presenta spaziatura millimetrico – centimetrica, localmente l'ammasso roccioso è fortemente scistoso. In particolare all'interno della sotto-unità AGI sono diffusi livelli di spessore variabile da centimetrico a decimetrico di calcari microcristallini molto compatti a tessitura massiva, con interstrati filladici, i "Palombini". La distribuzione delle intercalazioni calcaree è eterogenea e discontinua, per cui la posizione delle stesse non è prevedibile. Negli scisti possono esservi inoltre corpi lenticolari di basalti, spesso molto fratturati, cui possono essere associati livelli di diaspri. La permeabilità è sostanzialmente legata al grado di fratturazione dell'ammasso roccioso: al di fuori delle zone di faglia la conducibilità idraulica varia prevalentemente tra 1×10^{-7} e 1×10^{-8} m/s; lungo le zone di danneggiamento delle faglie può aumentare fino a 1×10^{-6} , mentre le zone di nucleo (*gouge* di faglia) non risentono di riduzioni di permeabilità. Per le velocità tipiche del rivestimento dello scavo in galleria, l'ammasso può essere considerato sostanzialmente impermeabile, con venute d'acqua inferiori a 0.16 l/s x 10 m, ad eccezione di zone locali di faglia, in cui possono essere registrate anche portate di qualche litro al secondo, sebbene spesso a carattere temporaneo [4].

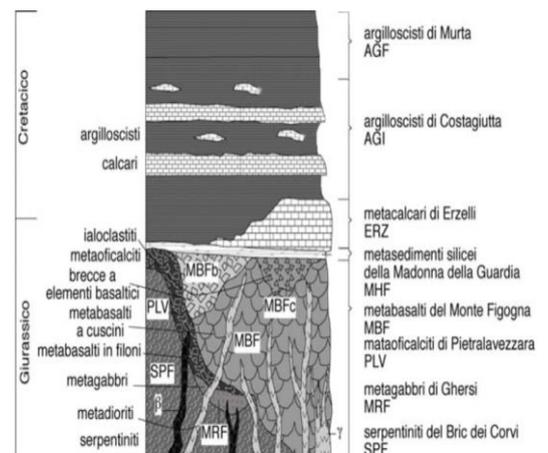


Figura 4: successione litostratigrafica dell'Unità tettonometamorfica Figogna [3]



Figura 5: a) particolare dell'ammasso in affioramento; b) campionamento da foro di sondaggio

La fase conoscitiva delle aP è stata avviata durante la progettazione preliminare e si è ulteriormente dettagliata in base alle evidenze riscontrate e allo sviluppo delle diverse fasi progettuali. Tra il 1996 e il 1998 sono stati eseguiti due cunicoli esplorativi Val Lemme e Castagnola, per complessivi 1200 m di scavo. L'esecuzione di gallerie sperimentali, corredata da numerose prove in situ e stazioni di misura dedicate, è stata considerata come il mezzo d'indagine ottimale per investigare le caratteristiche geomeccaniche delle aP e la risposta dell'ammasso allo scavo. Lo scavo dei cunicoli ha consentito, in particolare, di superare le difficoltà d'indagine, conseguenti alle elevate coperture e alla marcata suscettibilità al disturbo durante il campionamento, dovuto all'intrinseca fissilità del materiale. Le indagini eseguite tramite lo scavo dei cunicoli sono state integrate nel corso dei successivi *step* di progettazione, tramite oltre 5 km di stendimenti geofisici, 400 prove in più di 100 fori di sondaggio e di 1200 prove di laboratorio. È stata inoltre eseguita una campagna d'indagini specificatamente dedicate alla valutazione del comportamento viscoso, della fresabilità e della condizionabilità dell'argillocisto, a supporto della progettazione dello scavo in meccanizzato.

1.1 Inquadramento geomeccanico

Da un punto di vista geomeccanico, in relazione alla tipologia di ammasso in esame e alla conseguente variabilità di risposta tenso-deformativa attesa, legata anche a fattori riscontrabili alla sola scala del fronte (giaciture, foliazione, alternazione), particolare rilievo hanno avuto i risultati delle indagini e delle numerose back-analysis parametriche eseguite durante lo scavo dei cunicoli esplorativi. In linea generale è stato possibile compiere una suddivisione dell'ammasso roccioso in tre differenti gruppi geomeccanici (denominati gruppi 1, 2 e 3). I principali fattori considerati per l'individuazione di tali gruppi sono stati:

- criteri litologici (composizione mineralogica e petrografica, percentuale di palombino relativamente alla matrice argillitica, grado di alterazione, eventuale presenza di acqua);
- criteri strutturali (caratteristiche delle strutture di separazione, indice RQD, intensità della foliazione, intensità della tettonizzazione, come ad esempio la presenza di struttura a pieghe fino alla microscala);
- criteri litomeccanici (con riferimento ad una prima valutazione delle proprietà fisiche, di resistenza e deformabilità).

Nel seguito si fornisce una breve descrizione dei gruppi geomeccanici individuati:

Gruppo geomeccanico 1: l'ammasso presenta discrete proprietà geomeccaniche. L'indice RQD è mediamente maggiore del 50÷60%; si individua chiaramente la foliazione regolarmente spaziata anche se la struttura non è intensamente piegata fino alla microscala. Le superfici dei giunti sono prive di alterazione e la circolazione idrica è scarsa o assente. La presenza dei palombini può superare il 50% fino a condizionare completamente il comportamento generale dell'ammasso; gli strati calcarei sono però poco fratturati e poco alterati. Si stimano valori di resistenza della roccia intatta anche prossimi ai 40 MPa e moduli elastici operativi maggiori di 3 GPa. Mediamente nel corso dello scavo dei cunicoli questo gruppo litologico è stato incontrato con una percentuale pari al 28 %.

Gruppo geomeccanico 2: l'ammasso mostra scadenti proprietà geomeccaniche. L'indice RQD è variabile mediamente tra il 20 e il 50%; si individua ancora chiaramente la foliazione regolarmente e fittamente spaziata ma con struttura più intensamente piegata, fino alla microscala. Le superfici dei giunti sono da poco alterate ad alterate e la circolazione idrica è scarsa. I palombini, quando presenti (non oltre il 50 %), risultano da fratturati a molto fratturati e localmente alterati. Si stimano valori di resistenza della roccia intatta prossimi ai 10 MPa e moduli elastici operativi compresi tra 1 e 2 GPa. Mediamente nel corso dello scavo dei cunicoli questo gruppo litologico è stato incontrato con una percentuale pari al 55 %.

Gruppo geomeccanico 3: l'ammasso che ricade in questo gruppo appartiene a zone particolarmente tettonizzate o alterate e mostra proprietà geomeccaniche molto scadenti. L'indice RQD è inferiore mediamente al 20 %; la foliazione è talmente intensa ed irregolarmente e fittamente spaziata che può non essere più riconoscibile (ammasso destrutturato con perdita di cementazione); la struttura, quando riconoscibile, è intensamente piegata fino alla microscala. Le superfici dei giunti sono da alterate a molto alterate e la circolazione idrica può essere significativa. I palombini, quando presenti (non oltre il 30 %), risultano intensamente fratturati ed alterati. Si stimano valori di resistenza della roccia intatta inferiori ai 5 MPa e moduli elastici operativi anche molto inferiori a 1 GPa e in particolari situazioni risulta impossibile la suddivisione tra scala del provino e scala dell'ammasso. Mediamente nel corso dello scavo dei cunicoli questo gruppo litologico è stato incontrato con una percentuale pari al 17 %.

Le evidenze raccolte durante lo scavo dei cunicoli esplorativi sono state integrate dall'interpretazione dei risultati d'indagini in situ e prove di laboratorio. La classificazione del

materiale campionato, in termini di composizione litologica, distribuzione della foliazione e ricorrenza di vene calcitiche, ha confermato, anche alla scala del provino, la presenza di tre gruppi geomeccanici, caratterizzati da diverse risposte all'esecuzione di prove di compressione monoassiale e triassiale in controllo di deformazione (Figura 6). Il legame sforzi deformazioni ha evidenziato un comportamento marcatamente fragile, con picco di resistenza a bassi livelli deformativi ($\epsilon_a=0.2\div0.4\%$) e stabilizzazione su valori di resistenza residua. Per ciascun gruppo geomeccanico è stato possibile definire su base statistica intervalli di confidenza dei parametri geomeccanici, legando a ciascun valore la relativa probabilità di accadimento.

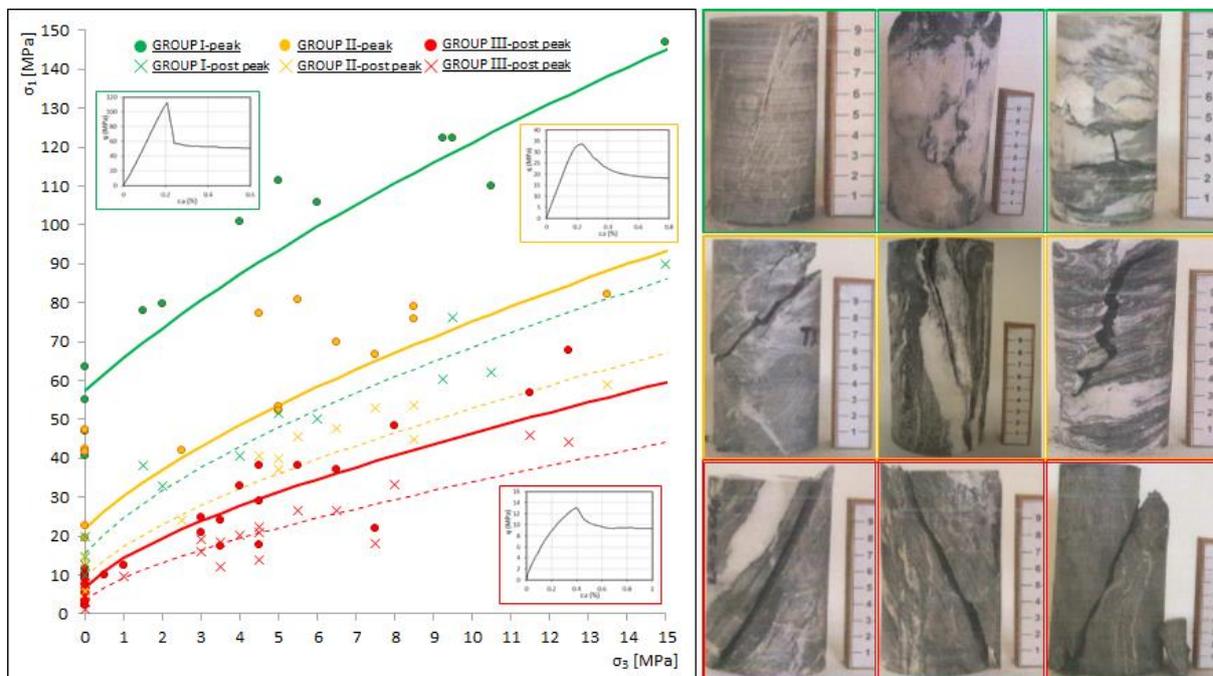


Figura 6: criteri di rottura di picco e post-picco del materiale roccioso [5] rappresentativo dei gruppi geomeccanici alla scala del provino

L'elemento caratteristico delle aP, emerso dalle indagini, è l'intrinseca variabilità di comportamento meccanico, legata sia alla struttura della matrice, che ai molteplici fattori che incidono sensibilmente sulla risposta tenso-deformativa dell'ammasso. A rendere ancora più impegnativo il contesto geomeccanico, devono essere tenuti in conto ulteriori elementi emersi durante le campagne di indagini, sia alla scala del materiale che dell'ammasso, quali:

- rapporti tra tensione media orizzontale e tensione verticale (K_0) prevalentemente maggiori all'unità fino a 200÷250 m di profondità da p.c. (Figura 7);
- probabilità elevata di comportamento spingente (*squeezing*) da coperture maggiori di 250 m in condizioni geomeccaniche relative al Gruppo 3;
- presenza di minerali di argilla potenzialmente rigonfianti.

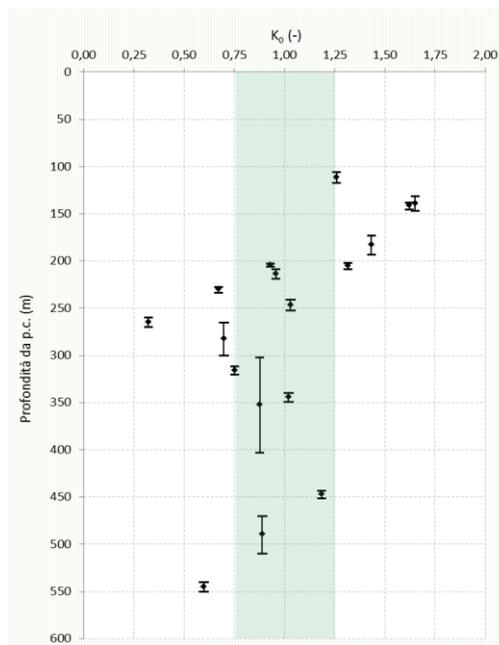


Figura 7: interpretazione dei risultati delle prove di fratturazione idraulica eseguite nelle aP

2. LA FASE PROGETTUALE

L'intrinseca variabilità delle aP ha reso necessaria, in fase conoscitiva, una discretizzazione dell'ammasso in "gruppi geomeccanici". A ciascun gruppo sono associati parametri rappresentativi della resistenza e deformabilità d'ammasso, così da prevedere il relativo comportamento tenso-deformativo atteso allo scavo. Tuttavia lo scavo dei cunicoli esplorativi ha palesato la continua variazione delle condizioni di ammasso e conseguentemente l'impossibilità di prevedere il gruppo geomeccanico rappresentativo, anche di tratte di breve lunghezza. A ciascun gruppo sono stati quindi assegnati campi di variazione dei principali parametri geomeccanici, così da individuare una "fascia intrinseca" di variabilità, che definisse il comportamento tenso-deformativo allo scavo, per tutti i possibili scenari geomeccanici. Le condizioni di ammasso si sono quindi verificate in fase costruttiva, tramite il rilievo diretto delle caratteristiche geostrutturali, geomeccaniche e idrogeologiche del fronte di scavo, così da definire il relativo gruppo geomeccanico di appartenenza.

Sulla base di tali presupposti si è reso necessario individuare, in fase progettuale, un complesso "set" di sezioni tipo di scavo, verificate contemplando tutti i possibili scenari (funzione delle coperture di progetto e della variabilità dei parametri geomeccanici negli intervalli statisticamente definiti) e redigere uno strumento progettuale e contrattuale di gestione di tali sezioni tipo, denominato *Linee Guida*. Per ogni sezione tipo è stato definito un campo di applicazione caratteristico e una variabilità degli interventi di stabilizzazione previsti; ogni sezione tipo, senza modificare strutturalmente le caratteristiche finali dell'opera, può quindi adeguarsi alle reali condizioni geomeccaniche riscontrate, al comportamento estrusivo del fronte e deformativo del cavo (questi ultimi, come noto, dipendenti sia dalla natura dell'ammasso in termini geologici, geomeccanici e idrogeologici, sia dagli stati tensionali preesistenti, così come dalle fasi e dai tempi di scavo).

Attraverso le *Linee Guida* per applicazione delle sezioni tipo sono definiti i criteri che il progettista può adottare in corso d'opera per:

- confermare la sezione tipo più adeguata, tra quelle già previste in una determinata tratta;
- definire all'interno della variabilità prevista la sezione tipo più idonea nel contesto geomeccanico incontrato;
- individuare una diversa sezione tipo, tra quelle previste in quella tratta o comunque previste in progetto nella stessa formazione, qualora le condizioni realmente riscontrate risultino difformi da quelle ipotizzate.

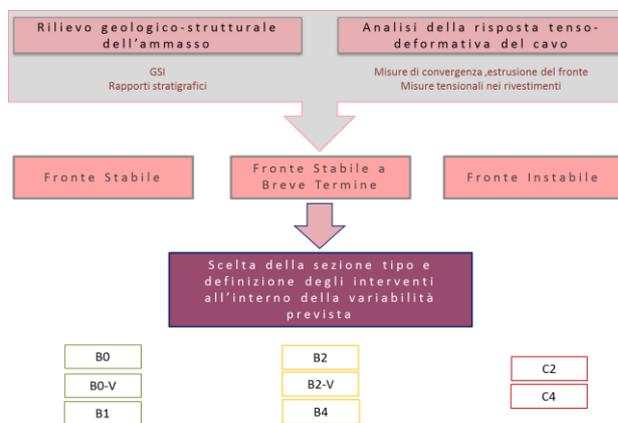


Figura 8: schema logico del funzionamento delle Linee Guida

In sintesi, nella fase progettuale sono state definite nel complesso:

- 12 sezioni tipo di scavo, composte da interventi specifici per il controllo deformativo delle aP, nei diversi contesti geomeccanici evidenziati nel corso della fase conoscitiva;
- tratte omogenee, in termini di risposta dell'ammasso allo scavo, a cui assegnare set di sezioni tipo di scavo, ciascuna riferita ad una percentuale di applicazione derivante da specifiche analisi parametriche;

- soglie di attenzione e allarme sui valori deformativi dell'ammasso e dei rivestimenti, da sottoporre a misura in corso d'opera con la strumentazione prevista nel piano di monitoraggio;
- tre livelli di variabilità degli interventi previsti (minimo, medio e massimo) in ciascuna sezione tipo e introduzione dello strumento delle Linee Guida per la gestione di complessive 36 diverse sezioni di scavo.

Tabella 1: caratteristiche degli interventi previsti per lo scavo nelle aP della Galleria di Valico a singolo binario

Condizioni geomec.	Copertura (m)		Sezione tipo di progetto				Risposta deformativa prevista		Variabilità		
			Interventi						interventi		
	da	a	Tipo	1° Fase	Definitivo				1° Fase	Definitivo	
					a.r. sp./D	calotta sp./D				a.r. D	calotta D
Pre-contenimento e pre-sostegno						(cm)	(cm)	Pre-contenimento e pre-sostegno			
GR1 GSI=45÷55	0	300	B0L	2IPN160/1.4 sp.spritz 20	80/12Φ	60/15Φ	<5	-	2IPN160/1.2÷1.5 sp.spritz 20	9÷15Φ	12÷18Φ
GR1 GSI=45÷55 fronte misto	300	500	B0V	HEB200/1.2 sp.spritz 30	100/12Φ	60/15Φ	<6÷8	-	HEB200/1.0÷1.5 sp.spritz 25÷35	9÷15Φ	12÷18Φ
				25 infilaggi contorno sovrapp. 3m			25 infilaggi contorno sovrapp. 3m				
GR1 GSI=45÷55	300	500	B0/1	HEB180/1.2 sp.spritz 30	90/12Φ	70/15Φ	<6÷8	-	HEB180/1.0÷1.4 sp.spritz 25÷35	9÷15Φ	12÷18Φ
GR1 GSI=45÷55	500	600	B0/2	HEB200/1.2 sp.spritz 30	100/12Φ	80/15Φ	<6÷8	-	HEB200/1.0÷1.4 sp.spritz 25÷35	9÷15Φ	12÷18Φ
GR1 GSI=40÷45 anisotropia	0	600	B1	2IPN220/1.2 sp.spritz 30	100/12Φ	80/15Φ	<6÷8	<5	2IPN220/1.0÷1.4 sp.spritz 25÷35	9÷15Φ	12÷18Φ
				25 Bulloni Φ24/1.2x2 L=5.5÷6.5			25 Bulloni Φ24/1.2x2m L=5.5÷6.5m				
GR2 GSI=40÷45 fronte misto	0	600	B2V	HEB240/1.0 sp.spritz 30	100/5Φ	80/9Φ	<6÷8	<5	HEB240/0.8÷1.2 sp.spritz 25÷35	3÷6Φ	7÷11Φ
				25 infilaggi contorno sovrapp. 3m			25 infilaggi contorno sovrapp. 3m				
GR2 GSI=40÷45	0	500	B2/1	HEB200/1.0 sp.spritz 30	100/5Φ	80/9Φ	<6÷8	<5	HEB200/0.8÷1.2 sp.spritz 25÷35	3÷6Φ	7÷11Φ
				60 VTRcem. fronte sovrapp. 9			40÷80 VTRcem. fronte sovrapp. 6÷12				
GR2 GSI=40÷45	500	600	B2/2	HEB240/1.0 sp.spritz 30	100/5Φ	90/9Φ	6÷8	<5	HEB240/0.8÷1.2 sp.spritz 25÷35	3÷6Φ	7÷11Φ
				60 VTR cem. fronte sovrapp. 9			40÷80 VTRcem. fronte sovrapp. 6÷12				
GR2 GSI=35÷40 anisotropia	0	500	B4/1	2IPN240/1.2 sp.spritz 30	100/5Φ	80/9Φ	<8÷9	<7	HEB240/0.8÷1.2 sp.spritz 25÷35	3÷6Φ	7÷10Φ
				60 VTRcem. fronte sovrapp. 9 25 Bulloni Φ24/1x1.2 L=5.5÷6.5			40÷80 VTRcem. fronte sovrapp. 6÷12 25 Bulloni Φ24/1x2 L=5.5÷6.5				
GR2 GSI=35÷40 anisotropia	500	600	B4/2	2IPN240/1.2 sp.spritz 30	100/5Φ	90/9Φ	<8÷9	<7	2IPN220/1.0÷1.4 sp.spritz 25÷35	3÷6Φ	7÷10Φ
				70 VTRcem. fronte sovrapp. 9m 25 Bulloni Φ24/1x1.2m L=5.5÷6.5m			55÷90 VTRcem. fronte sovrapp. 6÷12 25 Bulloni Φ24/1x2m L=8m				
GR3 GSI=25÷30 / interferenze	0	600	C2	HEB240/1.0 sp.spritz 30	100/3Φ	90/9Φ	<12	<10	HEB240/0.8÷1.2 sp.spritz 25÷35	1.5÷3Φ	5÷9Φ
				55 VTRcem. fronte sovrapp. 9 55 VTRvalv. contorno sovrapp. 9			40÷80 VTRcem. fronte sovrapp. 6÷12 40÷70 VTRvalv. contorno sovrapp. 6÷12				
GR3 GSI=30÷35 / interferenze	0	600	C4	HEB240/1.0 sp.spritz 30	100/3Φ	90/9Φ	<10÷12	<10	HEB240/0.8÷1.2 sp.spritz 25÷35	1.5÷3Φ	5÷9Φ
				70 VTRcem. fronte sovrapp. 9 71 VTRcem. contorno sovrapp. 9			55÷90 VTRcem. fronte sovrapp. 6÷12 55÷85 VTRcem. contorno sovrapp. 6÷12				

3. LA FASE COSTRUTTIVA

Ad oggi sono stati scavati 6800 m di gallerie nelle aP, con coperture variabili tra 5 m e 450 m.

I rilevamenti del fronte di scavo hanno evidenziato una distribuzione dell'indice GSI fortemente dispersa, specie alle basse coperture (Figura 9a),

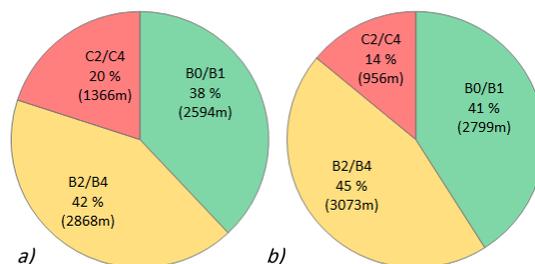


Figura 9: confronto tra la % di sezioni tipo previste e applicate

che ha globalmente confermato le previsioni progettuali: 10 % di fronti rappresentativi del gruppo geomeccanico 3, 50 % del Gruppo geomeccanico 2 e i restanti 40 % nel gruppo geomeccanico 1 (Figura 9b). Tale elemento ha consentito una sostanziale rispondenza tra le percentuali di applicazione previste in fase progettuale per ciascuna sezione tipo (Figura 10a) e quelle effettivamente applicate in fase costruttiva (Figura 10b).

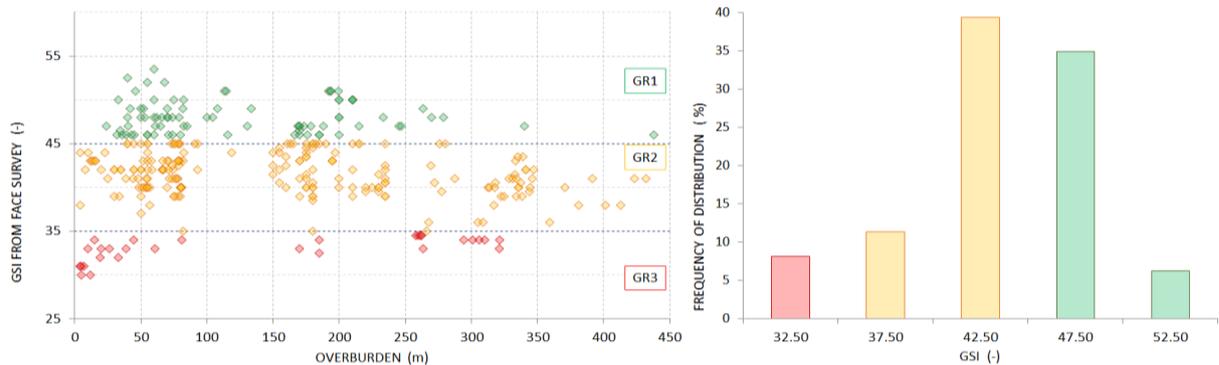


Figura 10: GSI rilevati al fronte di scavo a) distribuzione in funzione della profondità; b) istogramma di frequenza

La marcata variabilità delle condizioni di ammasso è evidenziata anche dai tempi di scavo (T_s) per metro di avanzamento (Figura 11), che sono variati da poche decine di minuti a ore, anche su brevi distanze di scavo della stessa galleria.



Figura 11: tempi di scavo per 1m di avanzamento con martello demolitore in Finestra Castagnola (area di scavo 100 m² ca.)

Tramite lo strumento progettuale e contrattuale delle *Linee Guida*, il repentino succedersi di mutevoli condizioni geomeccaniche, è stato gestito facendo corrispondere l'applicazione di diverse sezioni tipo o la variazione dell'intensità degli interventi della stessa sezione tipo. La flessibilità delle modalità operative applicate ha richiesto l'accordo e la sinergia di tutti gli operatori coinvolti e la capacità del cantiere di realizzare tipologie d'intervento diverse in tempi rapidi. Questi fattori hanno permesso di ottenere produzioni medie tendenzialmente maggiori di 40 m/mese e comunque con andamento costante nel tempo (Figura 12a). Produzioni comprese tra 30 e 40 m/mese sono state raggiunte nello scavo delle sezioni a doppio binario e dei cameroni (area di scavo fino a 255 m²), in condizioni geomeccaniche difficili e interferenza con opere di superficie. Produzioni maggiori di 30 m/mese sono state ottenute nel 80 % dei casi (Figura 12b). La possibilità di cambiare, in modo rapido e tempestivo, sezione tipo e intensità degli interventi, all'interno delle variabilità previste, consente inoltre il raggiungimento dell'obiettivo intrinseco nello scavo di un'opera in sotterraneo: il controllo deformativo. Ad una marcata variabilità di copertura e di condizioni di ammasso, sono corrisposte convergenze al piano dei centri inferiori al 1.3 % del diametro, per più del 90 % della lunghezza scavata nelle aP (Figura 13). Il rapporto tra spostamento orizzontale massimo e abbassamento (Figura 14) suggerisce una marcata anisotropia dello stato di sforzo specie a basse coperture, già evidenziata in fase conoscitiva (cfr. Figura 7).

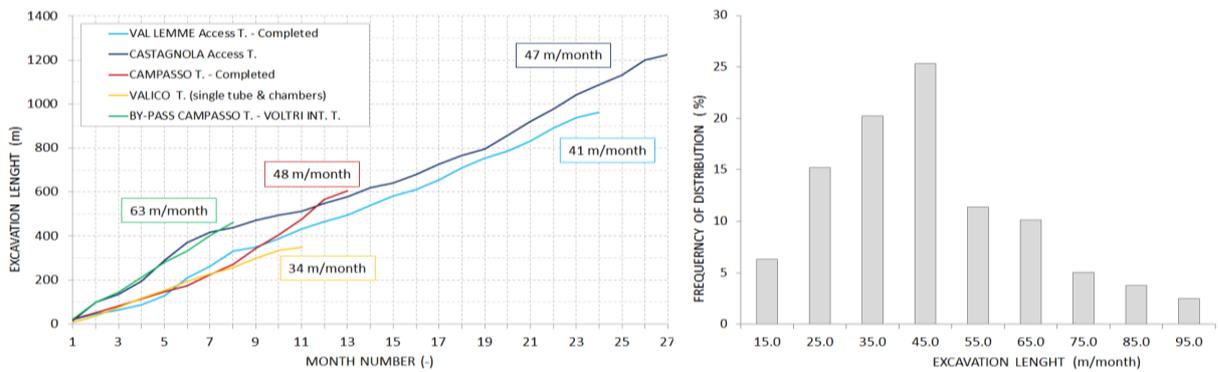


Figura 12: produzioni delle gallerie scavate nelle aP - a) andamento cumulato nel tempo; b) istogramma di frequenza

Valori di convergenza massima maggiori di 1.5 % sono sostanzialmente riferiti ad un contesto di alte coperture (tra i 200 m e i 250 m), con improvviso e marcato peggioramento delle condizioni geomeccaniche: in tali condizioni, l'assenza di sufficienti sistemi di precontenimento del fronte ha prodotto, da subito, elevati livelli deformativi, tali da innescare un comportamento softening dell'ammasso, già evidenziato in fase conoscitiva (cfr. Figura 6), con spostamenti differiti nel tempo; l'introduzione di una nuova sezione tipo e la modulazione dell'intensità degli interventi ha consentito l'avanzamento degli scavi al persistere di pessime condizioni geomeccaniche.

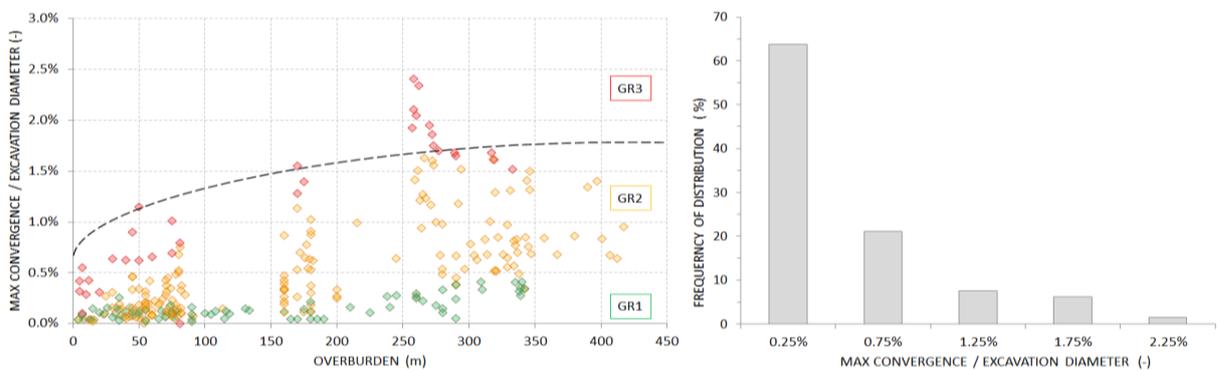


Figura 13: rapporto tra convergenza massima e diametro di scavo - a) distribuzione con la profondità; b) istogramma di frequenza

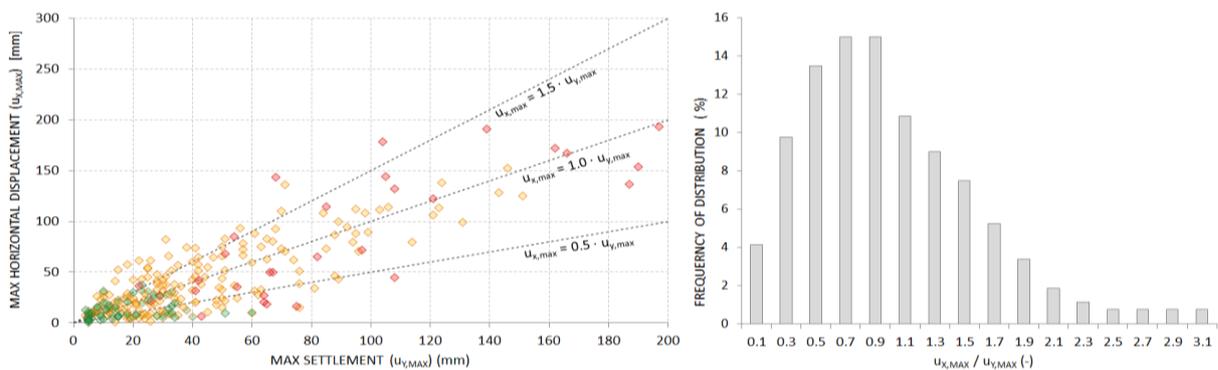


Figura 14: spostamento orizzontale e verticale massimi a) legame tra gli spostamenti; b) istogramma di frequenza del rapporto

Il generalizzato controllo delle convergenze entro i limiti definiti in fase progettuale, è stato ottenuto tramite interventi di precontenimento del fronte e del contorno, con intensità variabile in funzione della copertura e del gruppo geomeccanico. La Figura 15a mostra infatti lo stretto legame tra i valori massimi di estrusione e convergenza misurati in stazioni di monitoraggio accoppiate, con il rapporto (Parametro K) che tende a 1 all'aumentare della copertura; al variare del contesto geomeccanico le misure si mantengono sostanzialmente costanti, proprio per effetto della modulazione della intensità degli interventi di

stabilizzazione applicati. L'interpretazione dei dati di monitoraggio ha permesso di tracciare le curve di estrusione all'interno del nucleo fronte, rappresentative di basse e medie coperture al variare dei gruppi geomeccanici individueati. (Figura 15b).

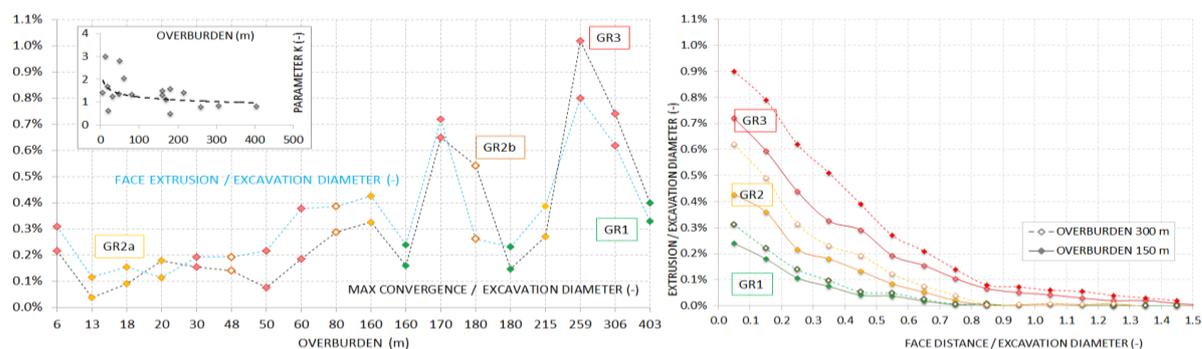


Figura 15: risposta deformativa - a) rapporto estrusione-convergenza; b) andamento dell'estrusione del nucleo fronte

5. CONCLUSIONI

La realizzazione del *tratto della Linea ferroviaria ad AV/AC tra Genova e Milano - Terzo Valico dei Giovi* ha visto fino ad oggi lo scavo a piena sezione di 6800 m di gallerie nel complesso litostratigrafico delle Argilliti a Palombini, con coperture comprese tra 5 e 450 m e condizioni di ammasso marcatamente diversi, anche con improvvise riduzioni della qualità dell'ammasso tra sfondi successivi, in un contesto geomeccanico caratterizzato quindi da marcata variabilità. L'articolo ha descritto l'esperienza progettuale maturata durante l'assistenza tecnica allo scavo, evidenziando le tipologie di indagine utilizzate durante la fase conoscitiva e gli strumenti progettuali e contrattuali definiti fin dalla fase progettuale, che hanno consentito in fase costruttiva la gestione della intrinseca variabilità dell'ammasso attraversato. L'interpretazione dei dati di monitoraggio, acquisiti tramite l'installazione di un ampio sistema di monitoraggio e integrati con modelli specifici di back analysis, ha consentito di analizzare la dipendenza tra i parametri che regolano la risposta deformativa dell'ammasso, valutando l'efficacia degli interventi di stabilizzazione applicati durante lo scavo. La prosecuzione degli scavi nelle aP, fino agli oltre 50 km previsti entro il 2021, consentirà di aumentare la base dati disponibile, verificando e integrando i risultati proposti.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il team Rocksoil coinvolto nella progettazione e assistenza tecnica on-site ed in particolar modo gli Ingg. Mauro Frandino, Gabriele Passarella e Marco Chiarini per la collaborazione alla stesura dell'articolo e l'Ing. Lapo Baccolini per le sintesi, le elaborazioni, gli studi e le ricerche finalizzate alla stesura dello stesso.

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. LUNARDI 2006. Progetto e Costruzione di Gallerie – Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli. Hoepli 2008, ISBN 88-203-3427-5.
- [2] E. PAGANI, G. CASSANI, 2016. Terzo Valico dei Giovi: Milan-Genoa High Speed/High Capacity Line. Proceeding of Swiss Tunnel Congress, 15-16 June 2016, Luzern, Switzerland, pp. 48-57. ISBN 978-3-033-05486-8.
- [3] G. CAPPONI, L. CRISPINI, L. CORTESOGNO, L. GAGGERO, M. FIRPO, M. PICCAZZO, R. CABELLA, S. NOSENGO, M.C. BONCI, G. VANNUCCI, M. PIAZZA, A. RAMELLA, N. PERILLI, 2008. Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 213-230 "Genova".
- [4] G. LUNARDI, G. CASSANI, A. BELLOCCHIO, F. PENNINO, P. PERELLO, 2016. Studi Idrogeologici per la progettazione delle gallerie AV/AC Milano-Genova. Verifica e mitigazione degli impatti dello scavo sugli acquiferi esistenti. Gallerie e Grandi Opere Sotterranee n° 117, pp. 17-24. ISSN-0393-1641.
- [5] E. HOEK, E.T. BROWN, 1980. Underground excavations in rock. Inst. Min. Metall., London.