

# ANALISI E CORRELAZIONE DEI PARAMETRI DI PERFORAZIONE MEDIANTE DAC TEST CON LE CARATTERISTICHE DELL'AMMASSO ROCCIOSO. IL CASO DI STUDIO DELLA GALLERIE DI BASE DEL BRENNERO

Daniele Stafisso ([daniele.stafisso@studio.unibo.it](mailto:daniele.stafisso@studio.unibo.it)), Daniela Boldini ([daniela.boldini@unibo.it](mailto:daniela.boldini@unibo.it)), Roberto Bruno ([roberto.bruno@unibo.it](mailto:roberto.bruno@unibo.it))  
Università di Bologna

Harald Egger ([Harald.Egger@bbt-se.com](mailto:Harald.Egger@bbt-se.com)), Antonio Voza ([Antonio.Voza@bbt-se.com](mailto:Antonio.Voza@bbt-se.com))  
BBT-SE

## ABSTRACT

Nel seguente studio sono stati analizzati i risultati ottenuti da prove di perforazione con monitoraggio dei parametri (*DAC test*, da *Diagrafia Automatica Continua*) lungo la zona di faglia della Val di Mules attraversata dalla Galleria di Base del Brennero. I dati delle velocità di perforazione in zone omogenee dal punto di vista litologico o geomeccanico sono stati analizzati attraverso strumenti statistici e geostatistici con l'obiettivo di identificare le caratteristiche del mezzo attraverso i risultati di queste prove speditive. Gli stessi dati sono stati quindi correlati con i parametri meccanici di laboratorio della roccia intatta e con gli indici di qualità *RMR*, *GSI* e *RQD* dell'ammasso roccioso. Queste ultime correlazioni sono state studiate anche con i correlogrammi. E' risultata una soddisfacente rappresentatività in media dei risultati del *DAC test* con le caratteristiche meccaniche della roccia intatta, ed una buona correlabilità dei risultati delle prove con le valutazioni *RMR / GSI*.

## 1. Introduzione

La realizzazione della Galleria di Base del Brennero, lunga complessivamente 55 km (Fortezza - Innsbruck), prevede l'attraversamento della zona di faglia della Val di Mules (parte della Linea Periadriatica) che, da punto di vista costruttivo, costituisce la zona più impegnativa viste le caratteristiche degli ammassi rocciosi e l'elevato stato tensionale litostatico. L'opera prevede tre gallerie, ovvero un cunicolo esplorativo del diametro di 6 m e due gallerie principali di linea (est ed ovest) del diametro di 9 m. Le gallerie principali sono poste ad una distanza media di 70 m, mentre il cunicolo esplorativo, centrato rispetto alle due canne, si trova ad una quota di 12 m inferiore. Le gallerie principali risultano connesse tra di loro per mezzo di gallerie trasversali poste ogni 333 m per ragioni di sicurezza.

Durante le fasi di prospezione nella tratta in oggetto sono stati eseguiti due sondaggi dalla superficie (di lunghezza fino a 485 m), sulla base dei quali è stato definito il modello geologico e geotecnico dell'area. Durante la fase costruttiva sono stati realizzati al fronte del cunicolo esplorativo anche dei sondaggi in avanzamento a carotaggio continuo. Questa attività è stata corredata dall'esecuzione di prove di perforazione a distruzione di nucleo, denominate *DAC test*, con monitoraggio dei parametri di perforazione, fra cui la velocità di perforazione. Nel cunicolo esplorativo sono stati svolti 14 *DAC test* (con sovrapposizione di coppie di prove di circa 1 m) tramite perforatrice (Figura 1) equipaggiata con martello percussore a fondo foro (diametro 5"), scalpello concavo a bottoni del diametro di 168 mm (Figura 2) e unità di acquisizione dati Foralim, coprendo una lunghezza complessiva di circa 350 m. La stessa prova è stata svolta con minor frequenza anche nelle due gallerie principali (11 in entrambe le canne), utilizzando lo stesso equipaggiamento ma diversa perforatrice. Le prove nelle gallerie principali sono state svolte circa alle stesse distanze progressive, mentre quelle nel cunicolo sono state realizzate in posizione più avanzata.

Il presente lavoro intende valutare l'utilizzabilità e la significatività dei valori di velocità di penetrazione misurata durante i *DAC test* per la caratterizzazione dei materiali attraversati dagli scavi e la loro possibile correlazione con le proprietà della roccia intatta e dell'ammasso roccioso, queste ultime identificate anche mediante gli indici di qualità *RMR*, *GSI* e *RQD*.



Figura 1: Perforatrice utilizzata per l'esecuzione del *DAC test*.



Figura 2: Scalpello a bottoni concavo e martello percussore.

## 2. Selezione dei dati utili dei parametri di perforazione

Durante i DAC test sono stati monitorati i parametri di velocità di avanzamento, pressione di spinta e pressione di rotazione ogni centimetro di perforazione (“supporto” 1 cm). Questi parametri sono delle variabili regionalizzate (georeferenziate) nello spazio  $R^1$  dell’asse delle gallerie.

La velocità di perforazione o velocità in avanzamento (VIA) viene riportata su delle diagrafie che mostrano l’andamento del suo valore lungo la tratta investigata. Sono evidenti dei dati anomali, tutti caratterizzati da valori della VIA molto elevati (Figura 3). Si tratta dei dati corrispondenti al primo metro di prova in tutti i DAC test (Figura 3(a)), ai tratti relativi all’aggiunta di aste di perforazione (Figura 3(b)) ed a sbalzi puntuali (Figura 3(c)). Tali valori sono stati eliminati.

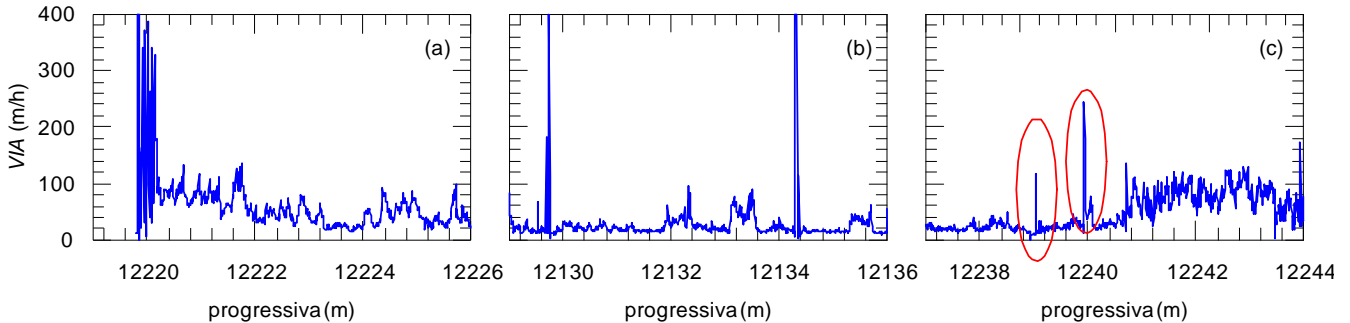


Figura 3: Tre esempi riguardanti l’eliminazione dei dati anomali relativi al primo metro di prova (a), al cambio delle aste (b) e ad uno sbalzo puntuale (c).

Il successivo passo ha riguardato l’analisi dei valori di pressione di spinta sulla batteria di aste di perforazione, che dovrebbe mantenersi il più possibile costante durante la prova. Questa condizione è stata verificata mediante l’analisi degli istogrammi dei valori registrati nel cunicolo esplorativo (Figura 4). E’ emerso come le prove siano caratterizzate da valori anche significativamente dispersi.

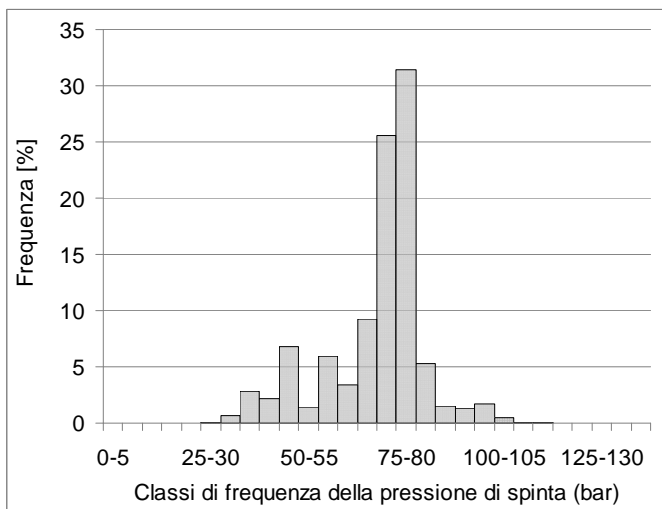


Figura 4: Istogramma delle pressioni di spinta misurate nei 14 DAC test eseguiti nel cunicolo esplorativo.

Per garantire una omogeneità tra le prove sono stati allora considerati solo i valori delle VIA corrispondenti a pressioni di spinta comprese tra 65 e 85 bar, pari a circa il 70% dei dati registrati.

Tale intervallo è stato adottato anche per le prove eseguite nelle due canne al fine di garantirne la rappresentatività e comparabilità con le prove realizzate nel cunicolo.

La verifica e selezione dei dati utili ha poi riguardato i tratti in parziale sovrapposizione ove una parte dei valori riguardano il tratto finale di una prova e una parte quelli iniziali della prova successiva. Dall’analisi delle pressioni di spinta sono risultati significativi i dati delle parti finali delle prove in ragione della loro maggiore omogeneità coi valori complessivi di tutto l’allineamento.

## 3. Analisi statistica e geostatistica della variabile VIA

La tratta di faglia investigata tramite perforazioni monitorate, in seguito allo scavo ed alla realizzazione di sondaggi in avanzamento a carotaggio continuo nel cunicolo esplorativo, è stata suddivisa in zone omogenee sulla base di diversi criteri. Dal punto di vista litologico, la Direzione Lavori ha individuato le seguenti formazioni: 1) metarenite, 2) quarzite, 3) paragneiss, 4) dolomite, 5) cataclasite e 6) scisti e filladi. Considerando anche il detensionamento e la fratturazione degli ammassi rocciosi, la società responsabile del progetto BBT-SE (Egger, comunicazione personale) ha individuato invece altre 6 zone omogenee dal punto di vista geomeccanico, parzialmente diversificate rispetto alle precedenti.

Una prima analisi è stata rivolta allo studio dei parametri locali della variabile VIA originale per settori omogenei dal punto di vista litologico. In particolare ogni prova è stata suddivisa in tratti di 1 m, a ognuno dei quali è stata attribuita una specifica litologia e per la quale sono stati calcolati i parametri media e varianza di dispersione dei 100 valori interni al tratto. Al fine di verificare e quantificare l’esistenza di comportamenti tipici per ogni gruppo omogeneo, sono state esaminate le nuvole di correlazione dei parametri media / varianza (Figura 5) e le distribuzioni di frequenza delle medie di ogni tratto (Figura 6).

Dalle nuvole di correlazione è emerso un plausibile e atteso “effetto proporzionale”, ovvero ai valori medi più bassi delle *VIA*, relativi a litologie di qualità migliore (metarenite, quarzite, paragneiss e dolomia), corrispondono varianze minori, ovvero fluttuazioni contenute dei valori attorno alle medie. Viceversa, al crescere delle *VIA* medie, corrispondenti a tratti con litologie di qualità più scadente (cataclasite, scisti e filladi), aumentano le dispersioni dei valori, con una tipica geometria “a ventaglio”.

Dalle distribuzioni di frequenza delle medie è possibile notare come le litologie di qualità migliore presentino delle distribuzioni di frequenza qualitativamente e quantitativamente diverse da quelle scadenti, con una asimmetria nettamente positiva oltre che con valori più bassi.

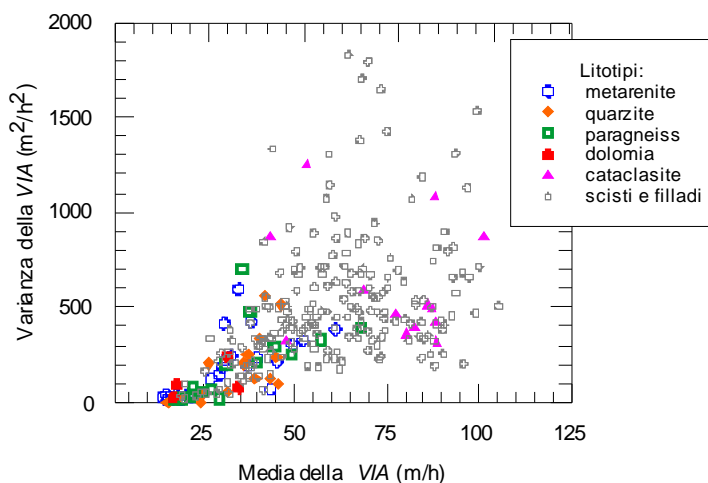


Figura 5: Grafico di dispersione media-varianza della *VIA* per le diverse litologie (supporto di 1 m).

Infine, le *VIA* a supporto 1 cm per le diverse litologie omogenee sono state studiate in termini di variabilità spaziale tramite l'impiego di variogrammi (Figura 7). Le varie litologie sono tutte caratterizzate dalla presenza di 3 strutture elementari (effetto pepita, esponenziale con portata di circa 50 cm ed esponenziale con portata di circa 120 cm); sono invece diverse per ogni litologia, oltre alle varianze sperimentali, l'importanza relativa (i valori di soglia) di ciascuna struttura elementare.

Dall'analisi statistica e geostatistica si può concludere quindi che le diverse litologie sono bene caratterizzate e distinguibili sulla base dei DAC test.

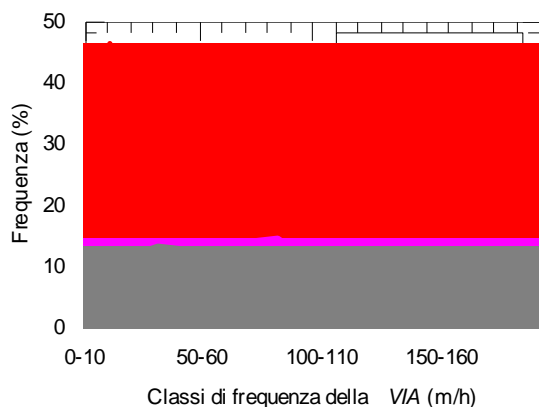


Figura 6: Istogrammi di frequenza della *VIA* per le diverse litologie (supporto di 1 m).

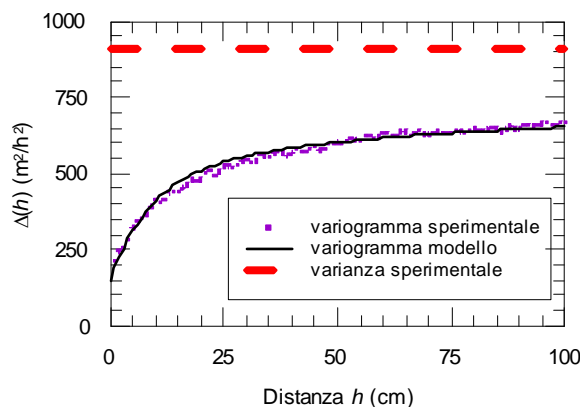


Figura 7: Esempio di variogramma sperimentale e variogramma modello per il litotipo delle scisti e filladi.

#### 4. Correlazioni tra *VIA* e parametri di resistenza della roccia intatta e dell'ammasso roccioso

Per le tratte omogenee dal punto di vista geomeccanico è stata effettuata una caratterizzazione geotecnica usando il criterio di Hoek-Brown, utilizzando i valori medi ottenuti dai risultati delle prove di laboratorio effettuate su provini estratti anche da carotaggi al fronte e gli indici *GS* valutati durante lo scavo. La caratterizzazione ha portato per due zone omogenee molto scadenti e di notevole estensione a parametri dell'ammasso poco plausibili dovuti ai valori di *GS* modesti (valori intorno 25-30) ed alle resistenze a compressione uniassiale del materiale roccioso molto basse (1 MPa per la cataclasite detensionata). Visti i risultati poco realistici per tali tratti ottenuti dalla caratterizzazione geomeccanica si è deciso di non procedere con la correlazione dei parametri meccanici in situ con i valori della *VIA*.

Si è invece verificata l'esistenza di correlazioni fra i valori medi della velocità di perforazione registrati nelle diverse zone omogenee dal punto di vista geomeccanico ed i valori medi dei risultati delle prove di laboratorio svolte sui provini estratti da tali zone (compressione uniassiale, point load test, prova brasiliana e prove dinamiche) (Figura 8). Si può osservare come le nuvole di correlazione tra i valori medi per litologia della *VIA* e delle proprietà della roccia intatta risultino particolarmente significative con valori del coefficiente di correlazione  $\rho$  variabile da -0.73 nel caso della resistenza a compressione uniassiale e a -0.86 per la resistenza a trazione. Anche il modulo di Young dinamico risulta ben correlato con un valore del coefficiente di correlazione intorno a -0.84. Tali risultati, da un lato confermano l'interesse e la significatività del DAC test rispetto alle caratteristiche meccaniche della

roccia intatta, dall'altro però non riescono a fornire una caratterizzazione che tenga conto di tutti i fattori effettivamente di interesse nella progressione dello scavo, alla base delle decisioni.

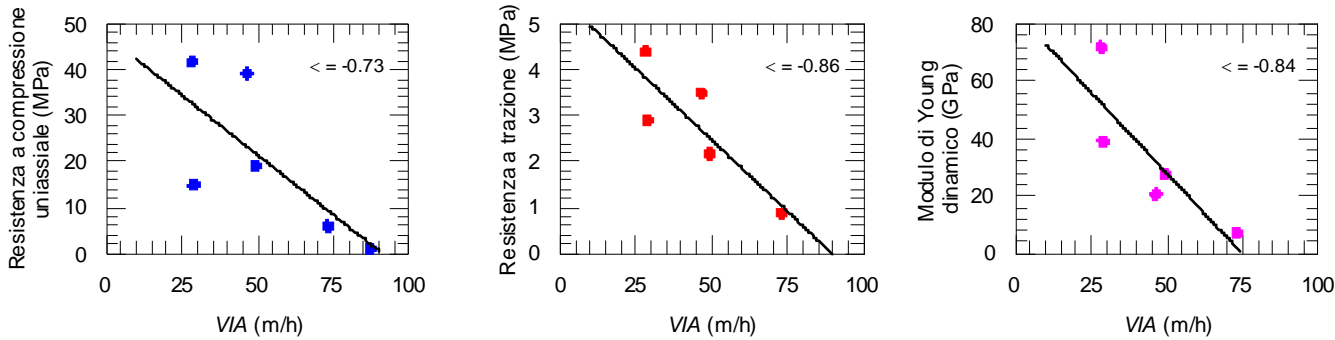


Figura 8: Correlazione tra i valori medi della VIA e dei parametri meccanici della roccia intatta calcolati su tratte omogenee dal punto di vista geomeccanico.

### 5. Correlazione della VIA con gli indici di qualità RMR, GSI e RQD

I valori sperimentali delle due variabili *RMR / GSI* e *VIA* non sono confrontabili perché sono riferiti a "supporti" diversi, gli uni a volumi di ammasso proporzionali alla dimensione dello scavo, gli altri a tratti lineari di 1 cm. Così, ad un valore *RMR* corrispondono più valori della *VIA*. E' stato quindi necessario "regolarizzare" i dati del DAC test su un supporto confrontabile con lo spessore del volume interessato dalle valutazioni *RMR*. Le correlazioni della *VIA* con i valori di *RMR / GSI* (Figura 9) hanno fornito buoni risultati considerando globalmente tutti i dati con un coefficiente di correlazione negativo di oltre -0,7. Al fine di verificare l'effettiva stabilità e significatività del risultato e la correttezza dell'ubicazione del tratto regolarizzato di *VIA* da correlare con l'*RMR*, sono stati calcolati i correlogrammi (Figura 10) che consentono di valutare l'andamento del coefficiente di correlazione fra le due variabili al variare della distanza spaziale tra i due relativi campioni. L'uso del correlogramma consente infatti di utilizzare tutta la popolazione delle *VIA* e non solo i pochi tratti corrispondenti alle stazioni ove si hanno le valutazioni *RMR / GSI*. Dall'esame del correlogramma si può concludere che i) è confermata la significatività del DAC test in termini sostitutivi dell'indice *RMR* stante la convincente correlazione negativa (0.6 – 0.7); ii) le massime correlazioni si hanno nell'intorno ( $\pm 5$  m) del punto di valutazione dell'indice *RMR*. Al contrario, la correlazione locale tra *VIA* ed indice *RQD* ha fornito valori del coefficiente di correlazione pressoché nulli.

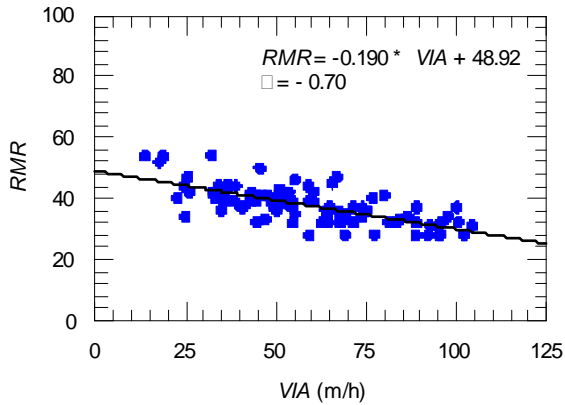


Figura 9: Correlazione globale tra VIA ed RMR per il cunicolo esplorativo.

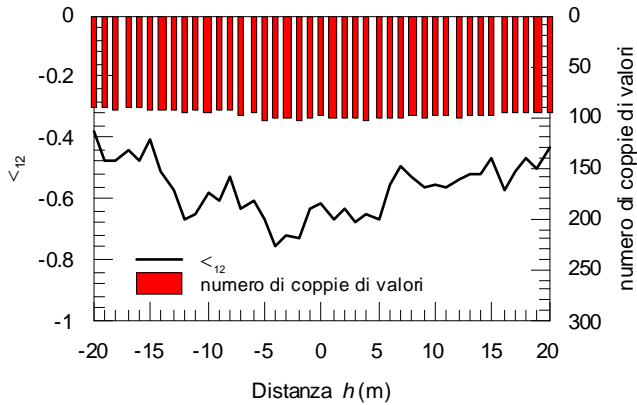


Figura 10: Correlogramma VIA-RMR per il cunicolo esplorativo.

### 6. Conclusioni

Le elaborazioni ed analisi eseguite mettono in evidenza la potenzialità del DAC test come mezzo di indagine integrativo, previa una calibratura delle correlazioni caso per caso. La metodologia si presta molto bene all'impiego in situazioni, quali quella esaminata, di limitato tempo a disposizione e spazi ridotti ed è caratterizzata da costi operativi relativamente contenuti. Dai dati finora analizzati risulta comunque indispensabile l'assistenza geologica di cantiere durante i lavori di perforazione, non soltanto per l'esame dei *cuttings* ma anche per verificare la qualità della perforazione e quindi dei dati registrati. Valutazioni più consistenti potranno essere ottenute verosimilmente nelle porzioni successive di galleria, in seguito all'ampliamento del numero e tipologia dei dati a disposizione.