

# CONVENTION EXPOTUNNEL 2015

*Il buon uso del suolo e del sottosuolo nella prevenzione dei dissesti geologici*

*Museo Nazionale Scienza e Tecnologia Leonardo da Vinci  
Milano, 8 Ottobre 2015*

## TUNNEL DI BASE DEL BRENNERO: APPROFONDIMENTI SULLA CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DEGLI AMMASSI ROCCIOSI A SEGUITO DELLO SCAVO DEL CUNICOLO ESPLORATIVO



## **SOMMARIO**

**Introduzione e inquadramento dell'area in esame**  
**Informazioni geologiche e geomeccaniche**

### **Definizione dei modelli**

Classificazioni geomeccaniche  
Caratterizzazione degli ammassi  
Parametrizzazione geomeccanica

Bieniawski (1989) – Barton (1974)  
Hoek & Brown – Barton  
Hoek & Brown – Barton

### **Analisi comparative**

Dati utilizzati  
Confronto parametrizzazioni: Hoek & Brown – Barton  
Confronto convergenze: linee caratteristiche (Ribacchi) – metodi semplificati (Hoek e Barton)  
Analisi di sensitività rispetto ai dati di input

**Scelta dei parametri di progetto (EC, NTC08, pratica progettuale)**

**Conclusioni**



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

SEDE OPERATIVA  
Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano  
[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

**Relatore:**  
**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
*Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo*

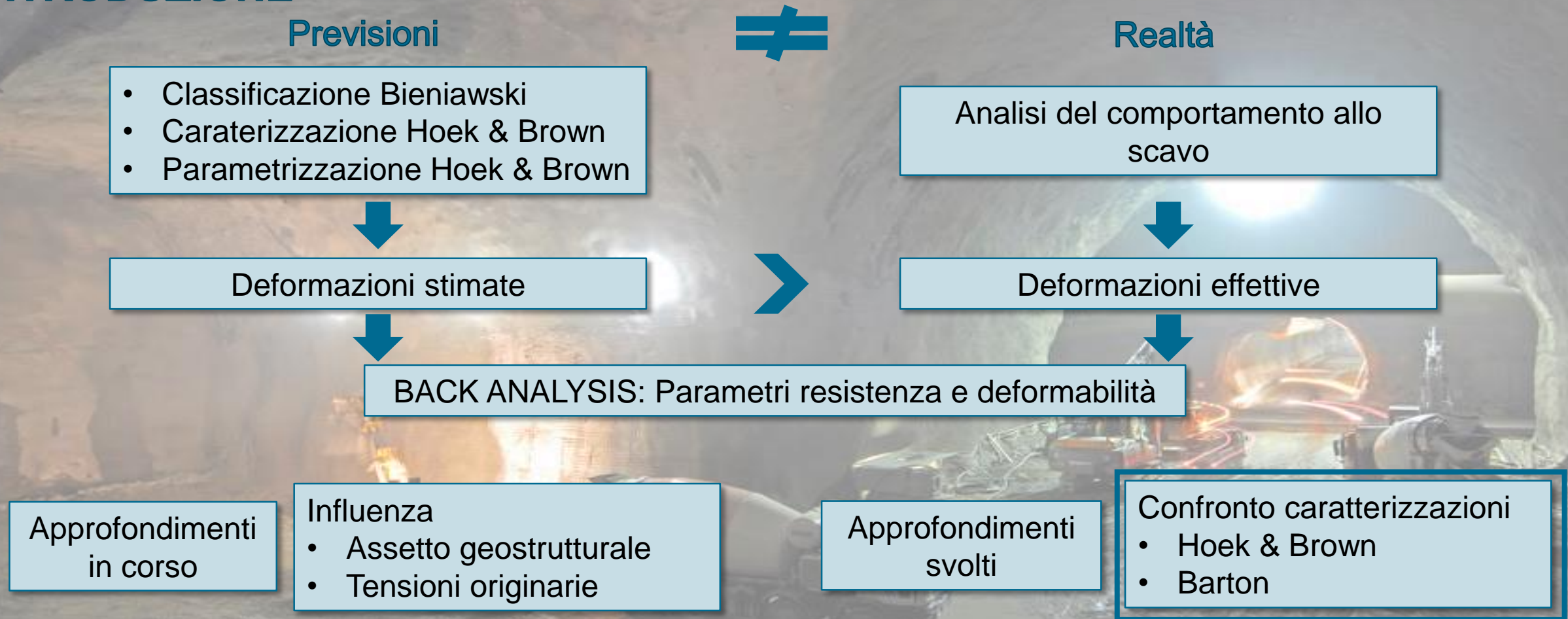
## INTRODUZIONE

### Progettazione di opere in sotterraneo





## INTRODUZIONE



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

SEDE OPERATIVA

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

Relatore:

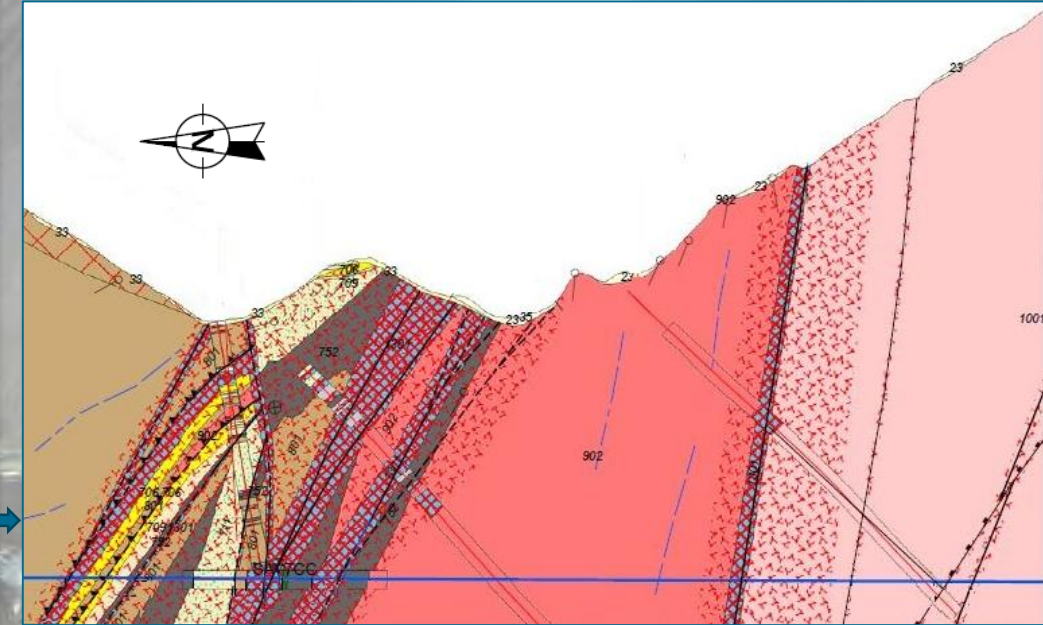
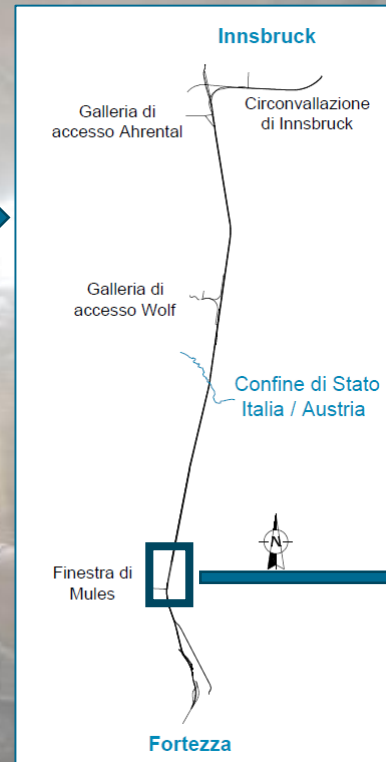
**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)

*Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo*



## INQUADRAMENTO DELL'AREA IN ESAME

### BBT – Brenner Base Tunnel



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

SEDE OPERATIVA

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

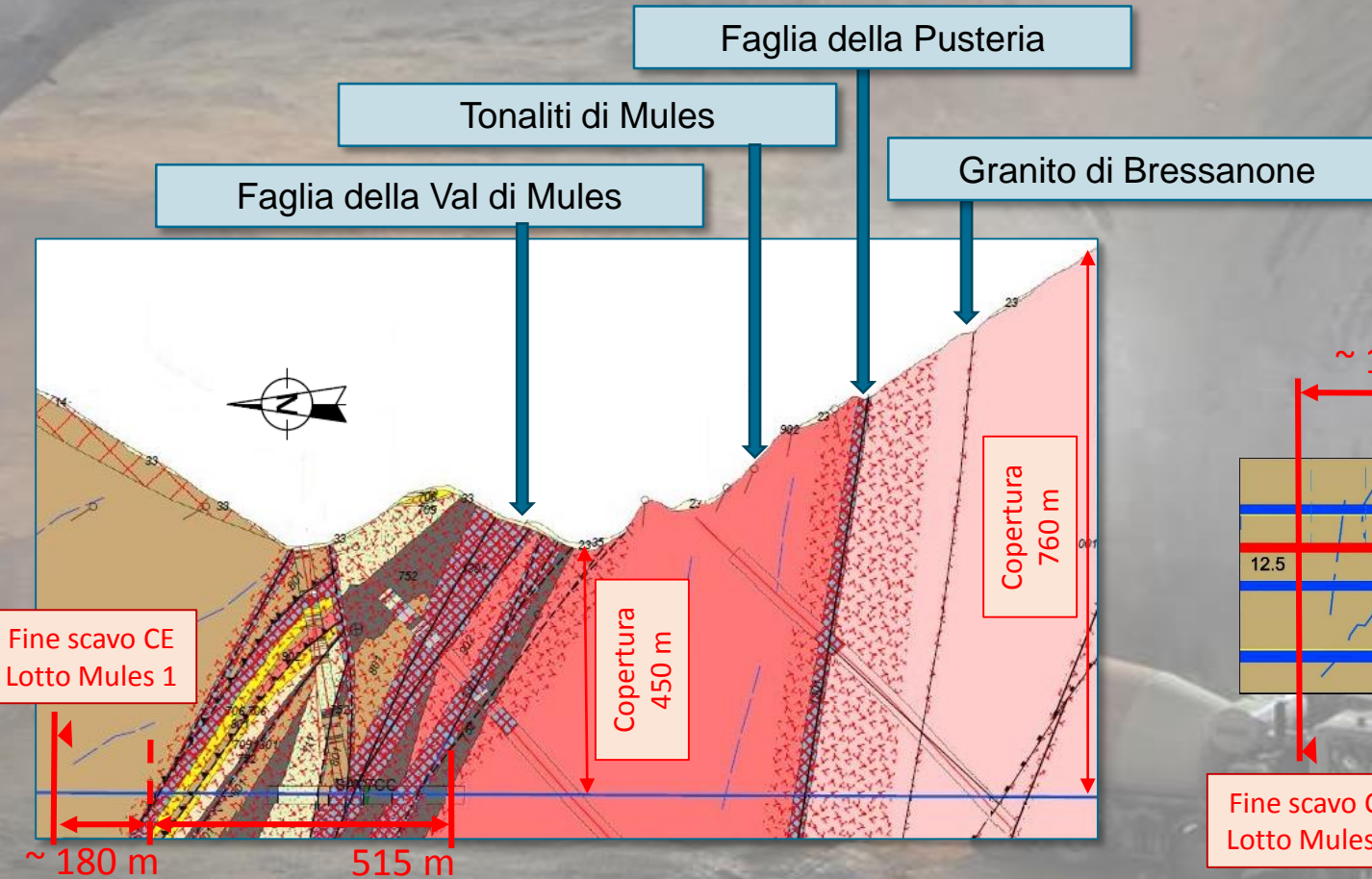
[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

Relatore:

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo



## INQUADRAMENTO DELL'AREA IN ESAME



Fine scavo CE  
Lotto Mules 1



**PROITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

**SEDE OPERATIVA**  
Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano  
[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

**Relatore:**  
**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo

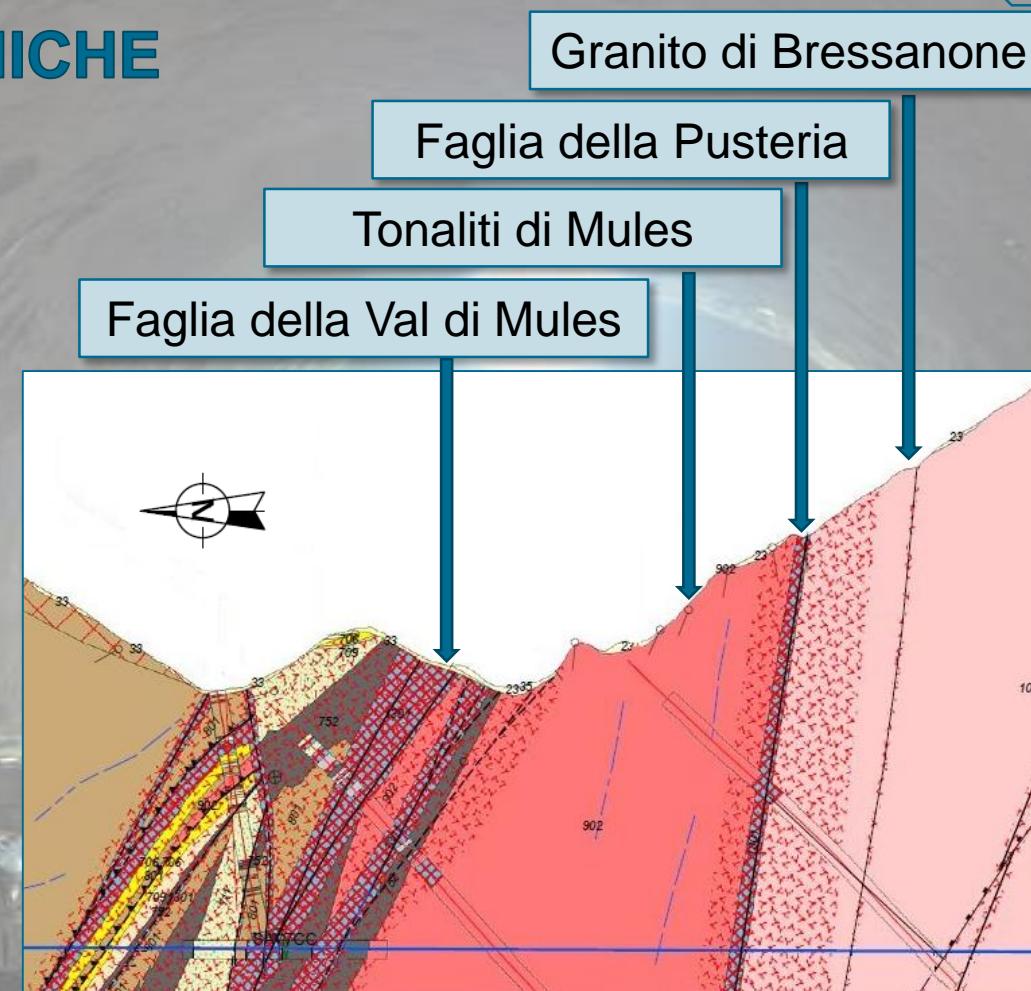


## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

### Indagini

- 3 sondaggi dalla superficie
- 2 sondaggi in avanzamento rispetto allo scavo
- Rilevi del fronte completi per ogni sfondo di avanzamento

- RQD
- Prove in sito (prove di compressione monoassiale e di trazione indiretta, point load test, determinazione delle velocità di propagazione delle onde, petrografie, diffrattometrie, prove di abrasività Cerchar)
- Prove di laboratorio (prove dilatometriche e Lugeon, sismica a riflessione, down-hole)



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

SEDE OPERATIVA

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

Relatore:

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)

*Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo*

## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

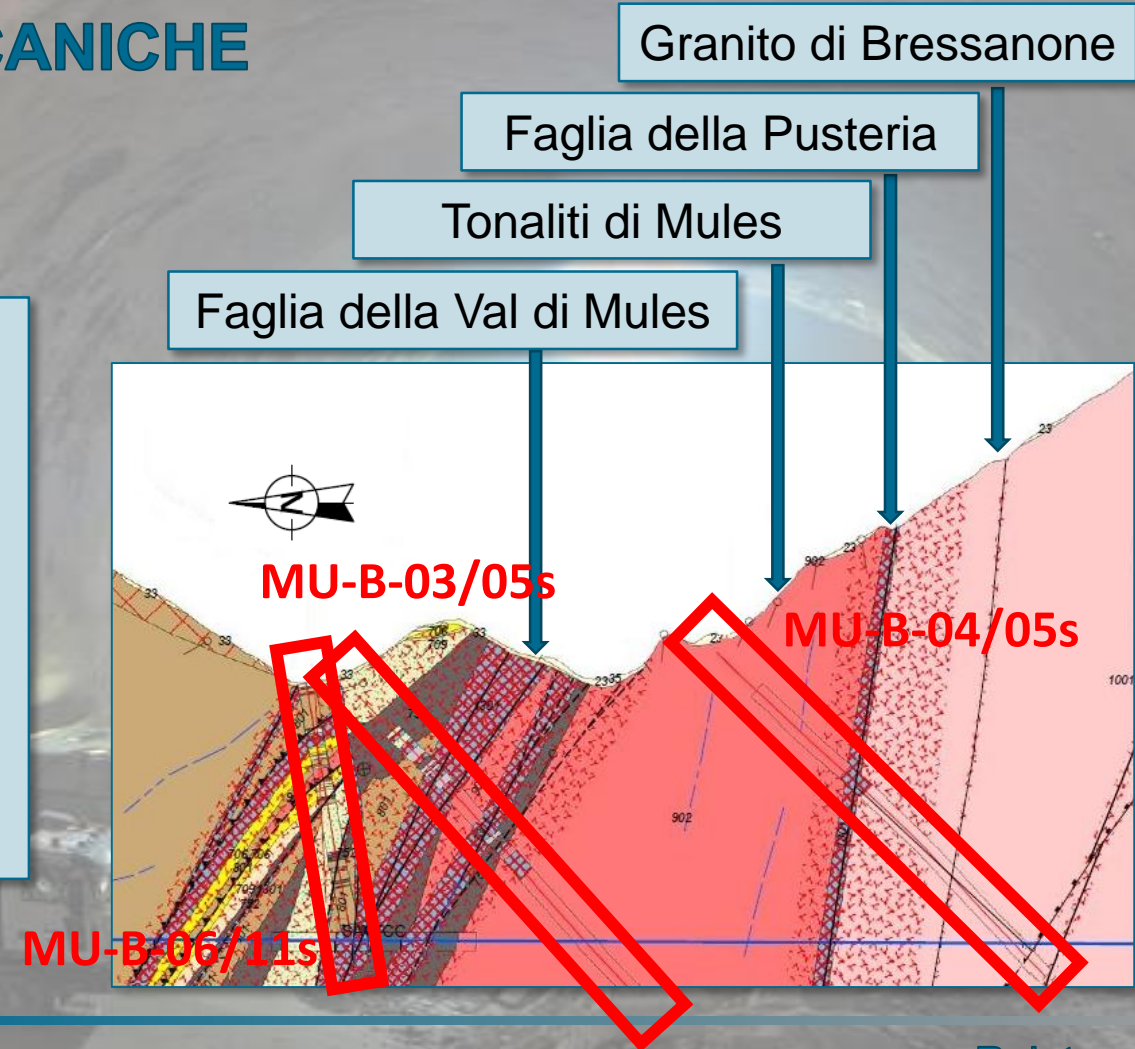
### Indagini

- 3 sondaggi dalla superficie

- 2 sondaggi in avanzamento rispetto allo scavo

- Rilevi del fronte completi per ogni sfondo di avanzamento

- RQD
- Prove in sito (prove di compressione monoassiale e di trazione indiretta, point load test, determinazione delle velocità di propagazione delle onde, petrografie, diffrattometrie, prove di abrasività Cerchar)
- Prove di laboratorio (prove dilatometriche e Lugeon, sismica a riflessione, down-hole)



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

SEDE OPERATIVA

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

Relatore:

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo



## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

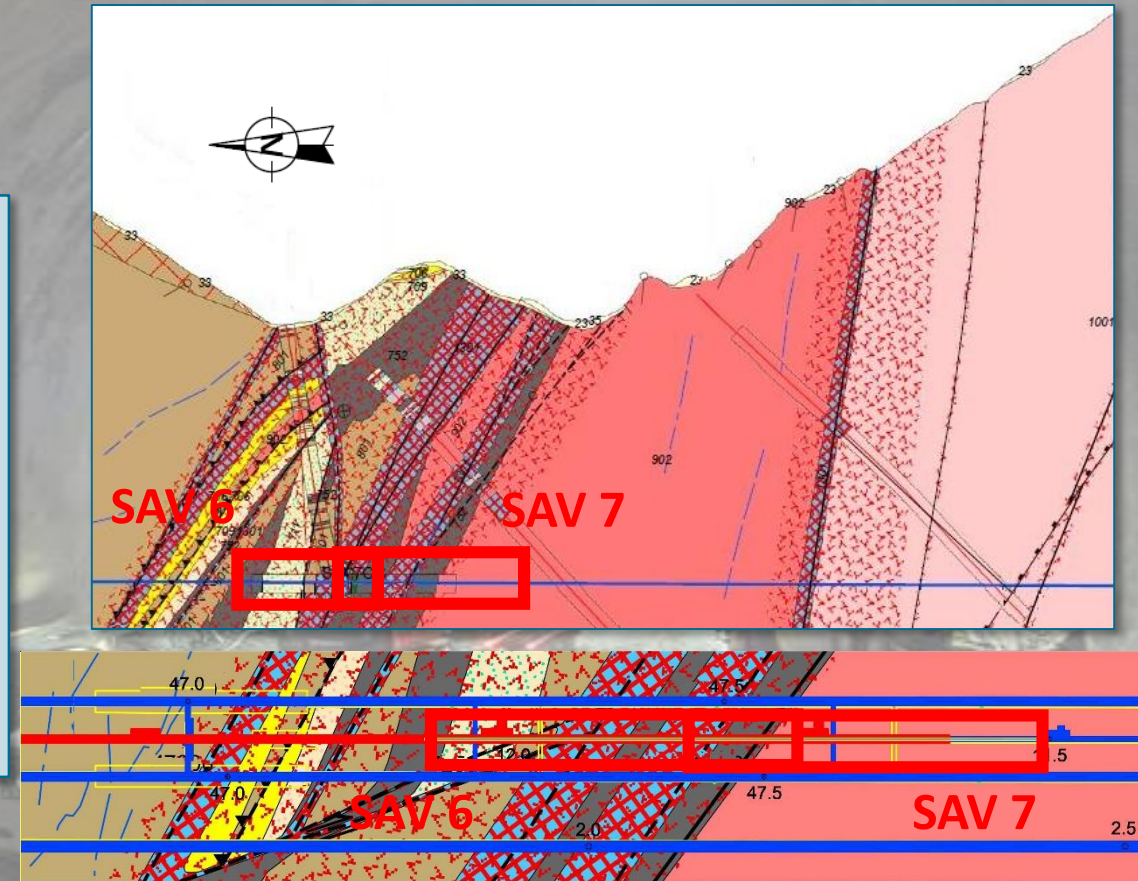
### Indagini

- 3 sondaggi dalla superficie

- 2 sondaggi in avanzamento rispetto allo scavo

- Rilevi del fronte completi per ogni sfondo di avanzamento

- RQD
- Prove in sito (prove di compressione monoassiale e di trazione indiretta, point load test, determinazione delle velocità di propagazione delle onde, petrografie, diffrattometrie, prove di abrasività Cerchar)
- Prove di laboratorio (prove dilatometriche e Lugeon, sismica a riflessione, down-hole)



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

SEDE OPERATIVA

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

Relatore:

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo



## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

26 rilievi del fronte del Cunicolo Esplorativo tra km 10+619 e km 12+071

(integrati con prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi / back analysis)



Granito di Bressanone (GB)  
9 rilievi, RMR = 38 - 74

Faglia della Pusteria (FP)  
3 rilievi, RMR = 29 - 41

Tonaliti di Mules (TM)  
9 rilievi, RMR = 32 - 67

Faglia della Val di Mules (FVM)  
5 rilievi, RMR = 32 - 45



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

SEDE OPERATIVA

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

Relatore:

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)

*Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo*



## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

26 rilievi del fronte del Cunicolo Esplorativo tra km 10+619 e km 12+071

(integrati con prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi / back analysis)



Granito di Bressanone (GB)

Granito a grana media olocristallina; si rilevano fenocristalli di feldspato e quarzo.



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

**SEDE OPERATIVA**

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

**www.proiter.com**

**Relatore:**

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
*Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo*



## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

26 rilievi del fronte del Cunicolo Esplorativo tra km 10+619 e km 12+071

(integrati con prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi / back analysis)



Granito di Bressanone (GB)  
9 rilievi, RMR = 38 - 74

Faglia della Pusteria (FP)  
3 rilievi, RMR = 29 - 41

Tonaliti di Mules (TM)  
9 rilievi, RMR = 32 - 67

Faglia della Val di Mules (FVM)  
5 rilievi, RMR = 32 - 45



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

SEDE OPERATIVA

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

Relatore:

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo



## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

26 rilievi del fronte del Cunicolo Esplorativo tra km 10+619 e km 12+071

(integrati con prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi / back analysis)



Faglia della Pusteria (FP)  
*damage zone*

Contatto di faglia tra tonalite e aplite al fronte di colore verdino e con scarsa coesione. La tonalite è ridotta in breccia. La superficie di suddivisione tra queste due litologie è costituita da un piano di faglia in cataclasite di colore nero. La superficie di contatto tra cataclasite e aplite è caratterizzata da un gauge di faglia di qualche millimetro.



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

**SEDE OPERATIVA**

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

**www.proiter.com**

**Relatore:**

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
*Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo*



## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

26 rilievi del fronte del Cunicolo Esplorativo tra km 10+619 e km 12+071

(integrati con prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi / back analysis)



**Faglia della Pusteria (FP)**  
*Tonaliti tettonizzate*

Breccia di frizione. È riconoscibile a tratti e fuori dalle superfici di discontinuità, una struttura cristallina costituita da miche, quarzo e feldspati. In alcuni punti si nota anche alterazione di colore verde (probabile clorite). Le superfici di frattura presentano patine argillose.



**PRO  
ITER**  
P R O G E T T O  
I N F R A S T R U T T U R E  
T E R R I T O R I O S. R. L.

**SEDE OPERATIVA**

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

**www.proiter.com**

**Relatore:**

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
*Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo*



## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

26 rilievi del fronte del Cunicolo Esplorativo tra km 10+619 e km 12+071

(integrati con prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi / back analysis)



Granito di Bressanone (GB)  
9 rilievi, RMR = 38 - 74

Faglia della Pusteria (FP)  
3 rilievi, RMR = 29 - 41

Tonaliti di Mules (TM)  
9 rilievi, RMR = 32 - 67

Faglia della Val di Mules (FVM)  
5 rilievi, RMR = 32 - 45



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

SEDE OPERATIVA

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

Relatore:

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo



## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

26 rilievi del fronte del Cunicolo Esplorativo tra km 10+619 e km 12+071

(integrati con prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi / back analysis)



### Tonaliti di Mules (TM)

Tonalite con struttura cristallina riconoscibile in tratti, orientamento dei grani di quarzo in 110/80. Rare vene aplitiche di colore biancastro sulla parte inferiore del fronte e rene sinistro.



**PRO  
ITER**  
P R O G E T T O  
I N F R A S T R U T T U R E  
T E R R I T O R I O S. R. L.

SEDE OPERATIVA

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

Relatore:

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo



## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

26 rilievi del fronte del Cunicolo Esplorativo tra km 10+619 e km 12+071

(integrati con prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi / back analysis)



Granito di Bressanone (GB)  
9 rilievi, RMR = 38 - 74

Faglia della Pusteria (FP)  
3 rilievi, RMR = 29 - 41

Tonaliti di Mules (TM)  
9 rilievi, RMR = 32 - 67

Faglia della Val di Mules (FVM)  
5 rilievi, RMR = 32 - 45



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

SEDE OPERATIVA

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

Relatore:

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo



## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

26 rilievi del fronte del Cunicolo Esplorativo tra km 10+619 e km 12+071

(integrati con prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi / back analysis)



Faglia della Val di Mules (FVM)  
*Quarziti (FVM Q)*

Quarziti di colore grigio.



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

SEDE OPERATIVA

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

Relatore:

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo



## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

26 rilievi del fronte del Cunicolo Esplorativo tra km 10+619 e km 12+071

(integrati con prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi / back analysis)



Faglia della Val di Mules (FVM)  
*Breccia di faglia (FVM B)*

Breccia di faglia coerente, la cui genesi è da ricondursi alla presenza del piano di faglia F1 con la presenza di paragneiss quarzoso più competente rilevato nella parte destra del fronte.



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

**SEDE OPERATIVA**

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

**www.proiter.com**

**Relatore:**

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)

*Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo*



## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

26 rilievi del fronte del Cunicolo Esplorativo tra km 10+619 e km 12+071

(integrati con prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi / back analysis)



Faglia della Val di Mules (FVM)  
*Paragneiss (FVM P)*

Paragneiss di colore grigio-nero e a grana fine con zone di pronunciata foliazione con riempimenti quarziferi-calcitici biancastri. Sono presenti bande di giunti con riempimenti neri, a grana fine con frattura concoide delimitate da bande di colore grigio-verde, interpretate come paragneiss quarzoso-ricristallizzato.



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

**SEDE OPERATIVA**

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

**www.proiter.com**

**Relatore:**

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
*Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo*



## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

26 rilievi del fronte del Cunicolo Esplorativo tra km 10+619 e km 12+071

(integrati con prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi / back analysis)



Faglia della Val di Mules (FVM)  
*Scisti grafitici (FVM S)*

Scisti grafitici di colore grigio scuro e con alcune superfici di discontinuità costituite da fillade nera ad aspetto carbonioso.



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

**SEDE OPERATIVA**

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

**Relatore:**

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo



## INFORMAZIONI GEOLOGICHE E GEOMECCANICHE

26 rilievi del fronte del Cunicolo Esplorativo tra km 10+619 e km 12+071

(integrati con prove di laboratorio su campioni prelevati dai sondaggi / back analysis)



Faglia della Val di Mules (FVM)  
*Filladi e cataclasiti (FVM C)*

Cataclasite foliata.



**PRO  
ITER**  
P R O G E T T O  
I N F R A S T R U T T U R E  
T E R R I T O R I O S. R. L.

SEDE OPERATIVA

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

Relatore:

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo



## DEFINIZIONE DEI MODELLI

### CLASSIFICAZIONI GEOMECCANICHE

#### Dati in ingresso

- Resistenza a compressione della roccia intatta  $\sigma_{ci}$
- Grado di fratturazione (RQD)
- Caratteristiche delle discontinuità
- Presenza d'acqua
- Orientazione delle discontinuità
- Stato tensionale

#### Bieniawski

- $R_1$
- $R_2, R_3$
- $R_4$
- $R_5$
- $R_6$
- -

#### Barton

- -
- RQD
- $J_n, J_r, J_a$
- $J_w$
- -
- SRF

#### Indici di qualità

- Bieniawski (1989): *Rock Mass Rating*  $RMR = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6$  Classi di qualità I-II-III-IV-V
- Barton (1974): *Rock Mass Quality*  $Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$  Classi di qualità A-B-C-D-E-F-G



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

SEDE OPERATIVA

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

Relatore:

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo



## DEFINIZIONE DEI MODELLI

### CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI

#### Hoek & Brown

##### Parametri della roccia intatta

- Resistenza  $\sigma_{ci}$ 
  - Prove laboratorio
- Costante del materiale  $m_i$ 
  - Letteratura / Correlazioni
- Modulus Reduction factor MR
  - Abachi

##### Classificazioni geomeccaniche

- Global Strength Index (GSI)
  - Abachi Hoek – Marinos
  - Correlazioni  $RMR_{89}$  e  $Q'$

$$\begin{aligned} GSI &= RMR'_{89}(R_5 = 15) - 5 && \text{per } GSI \geq 18 \text{ o } RMR \geq 23 \\ GSI &= 9 \ln Q' + 44 && \text{per } GSI \leq 18 \end{aligned}$$

##### Fattore di disturbo (D)

#### Barton

##### Parametri della roccia intatta

- Resistenza  $\sigma_{ci}$

##### Classificazioni geomeccaniche

- Indice normalizzato  $Q_c = Q \frac{\sigma_{ci} [MPa]}{100}$



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

SEDE OPERATIVA

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

Relatore:  
**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo



## DEFINIZIONE DEI MODELLI

### PARAMETRIZZAZIONE GEOMECCANICA

#### Hoek & Brown

Parametri del criterio di plasticità di Hoek & Brown

$m_b - s - a$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)$$

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

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Parametri del criterio di plasticità Mohr-Coulomb equivalente

$\phi' - c'$

$$\phi' = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} \left[ (1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n} \right] (s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \left( 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1} \right) / ((1+a)(2+a))}}$$

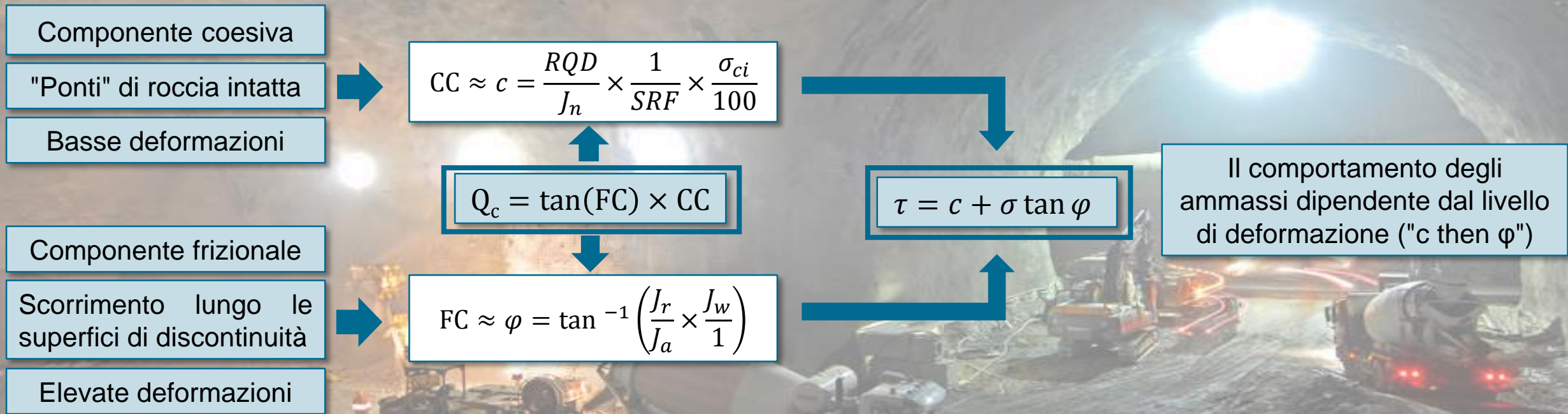
$$\tau = c' + \sigma \tan \phi'$$



## DEFINIZIONE DEI MODELLI

### PARAMETRIZZAZIONE GEOMECCANICA

#### Barton





## DEFINIZIONE DEI MODELLI

### PARAMETRIZZAZIONE GEOMECCANICA

Modulo di deformazione e resistenza globale d'ammasso

#### Hoek & Brown

$$E_{rm} = E_i \left( 0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$$

$$E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$$

$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

Picco

$GSI$

$$c' - \phi' - E_{rm} - \sigma'_{cm}$$

Residuo

$GSI_{res}$

$$c' - \phi' - E_{rm} - \sigma'_{cm}$$

$$GSI_{res} = GSI \cdot e^{(-0.0134 \cdot GSI)}$$

#### Barton

$$E_{rm} [GPa] = 10 \cdot Q_c^{1/3}$$

$$\sigma_{cm} [MPa] = 5 \cdot \gamma \cdot Q_c^{1/3}$$

$$0.1 < Q < 100$$
$$10 < \sigma_{ci} < 200 \text{ MPa}$$

Picco



Residuo

$$c - \phi - E_{rm} - \sigma_{cm}$$



ANALISI COMPARATIVE

Dati utilizzati

Formazione		$\sigma_{ci}$ [MPa]	$m_i$	MR	RMR	GSI	Q
Granito - GB		130	32	230	38 ÷ 74		2.3 ÷ 12.2
Tonalite - TM		45	25	700	32 ÷ 67		0.9 ÷ 55
Faglia Pusteria - FP		5	20	4500	29; 34; 41		0.08 ÷ 0.33
Faglia Mules	Scisti - FVM	5	20	4300	32 ÷ 45		0.05 ÷ 0.42
	Cataclasiti - FVM C	5	20	4300			
	Paragneiss - FVM P	25	20	860			
	Breccia - FVM B	25	23	1000			
	Quarziti - FVM Q	50	20	300			

Coperture H = 650 m  
Raggio di scavo R = 3.1 m





## ANALISI COMPARATIVE

### Metodo delle Linee Caratteristiche

Formulazione di Ribacchi (cavità non sostenuta)

- Criterio di plasticità di M-C
- Strength weakening
- Flusso non associato

Ipotesi di Panet

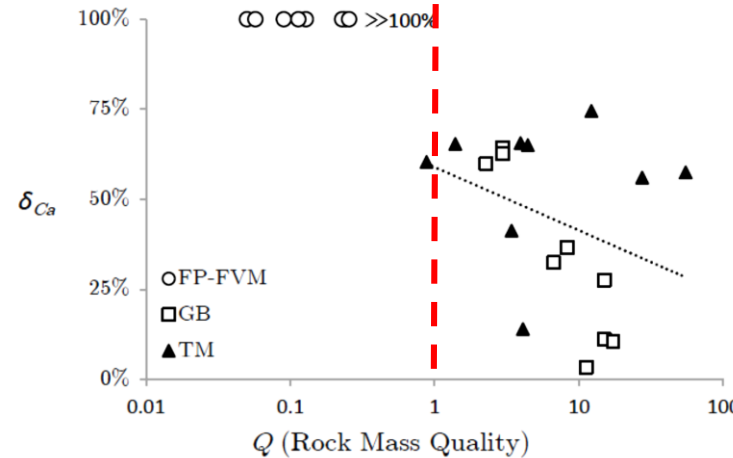
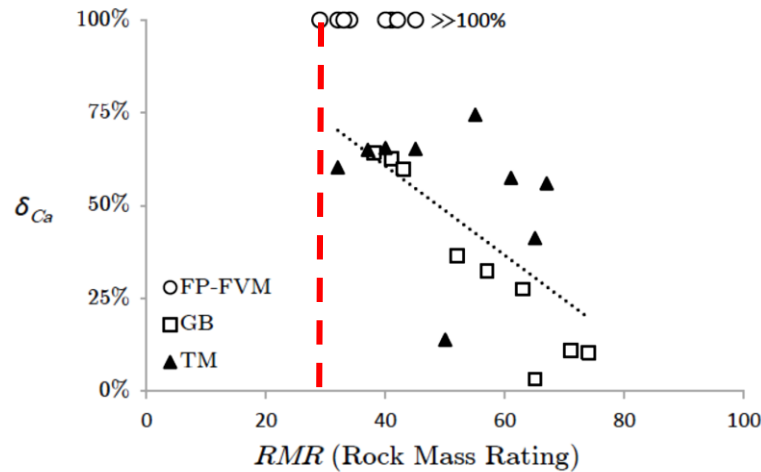
### Confronto parametrizzazioni: Hoek & Brown - Barton

Convergenza assoluta

$$\delta_{c_a} [\%] = \frac{c_a^{HB} - c_a^B}{c_a^{HB}}$$

### Risultati

- Buon accordo per materiali di discreta-buona qualità, nessun accordo per le faglie
- Differenza tende a diminuire all'aumentare di RMR e Q
- Differenze dovute all'effetto dei parametri di input





## ANALISI COMPARATIVE

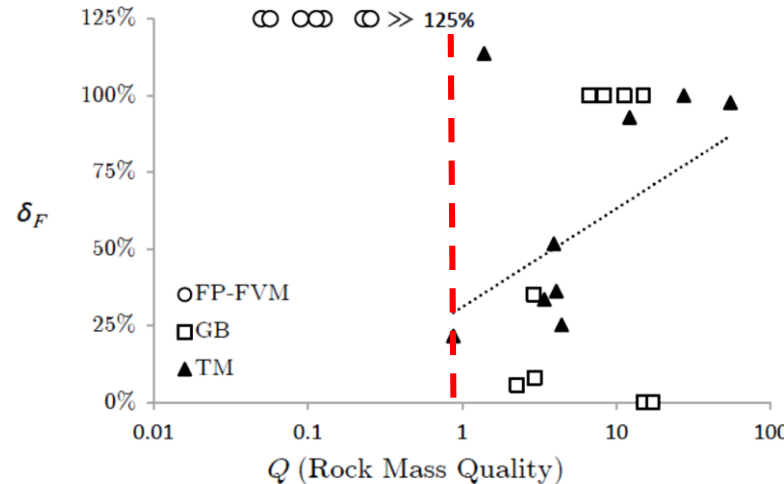
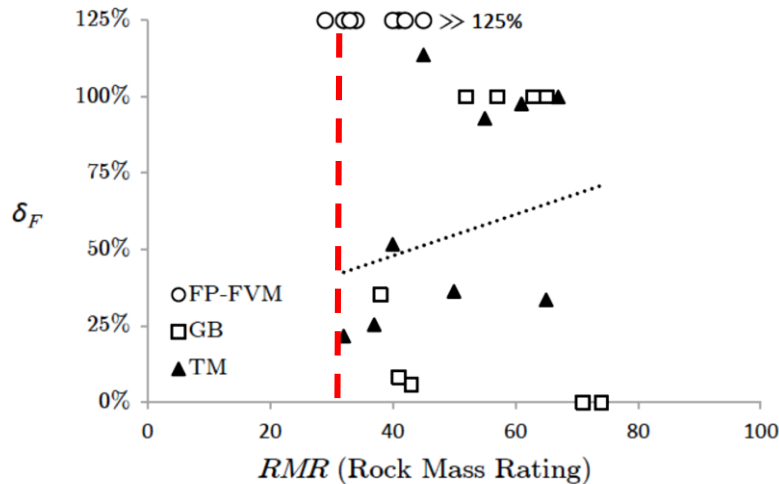
### Confronto parametrizzazioni: Hoek & Brown - Barton

Fascia Plastica

$$\delta_F [\%] = \frac{F^{HB} - F^B}{F^{HB}}$$

Risultati

- Differenze inferiori al 100% per materiali di buona qualità
- E' difficile identificare un trend anche per i materiali migliori
- Differenza tende ad aumentare al crescere di RMR e Q, a causa della ridotta estensione della fascia plastica





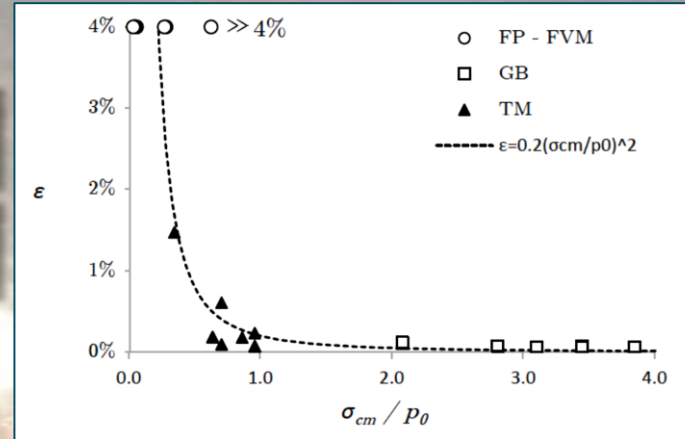
## ANALISI COMPARATIVE

### Confronto convergenze: linee caratteristiche (Ribacchi) – metodi semplificati (Hoek e Barton)

#### Hoek

$$1) \quad \varepsilon[\%] = 0.2 \left( \frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{-2}$$

$\sigma_{cm}$  resistenza a compr. amm.  
 $p_0$  tensione litostatica



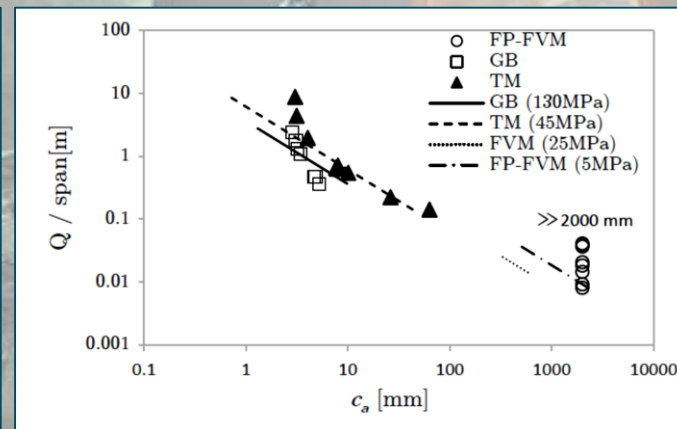
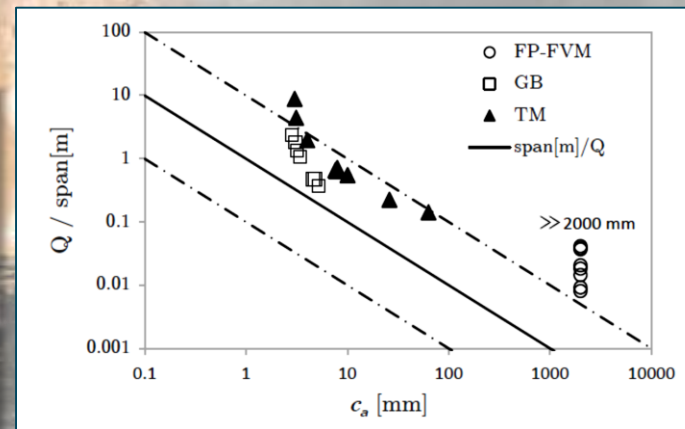
Risultati comparabili solo per ammassi di buone caratteristiche geomeccaniche

#### Barton

$$1) \quad c_a[mm] = \frac{span[m]}{Q}$$

$$2) \quad c_a = \frac{span}{100 \cdot Q} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_v}{\sigma_{ci}}}$$

span dim. trasversale caratt.  
 $\sigma_v$  sforzo vert. in sito

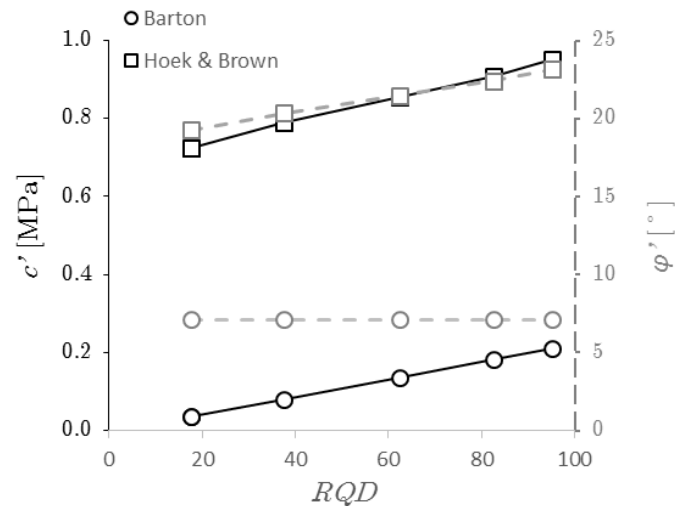




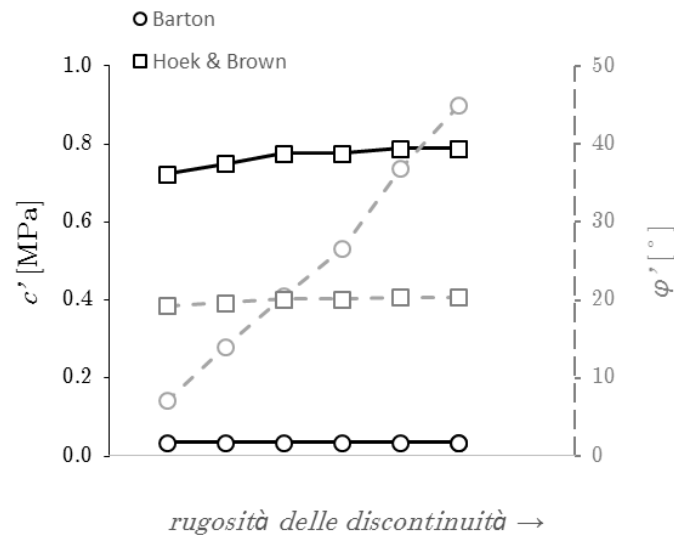
## ANALISI COMPARATIVE

### Analisi di sensitività rispetto ai dati di input

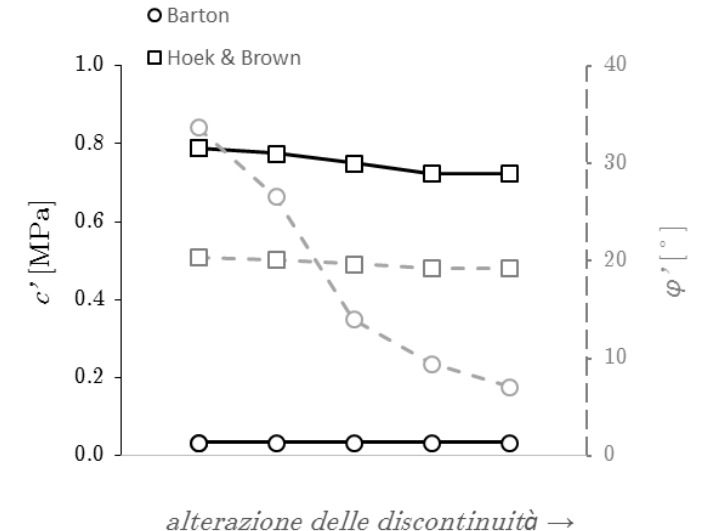
#### RQD



#### Rugosità discontinuità



#### Alterazione discontinuità





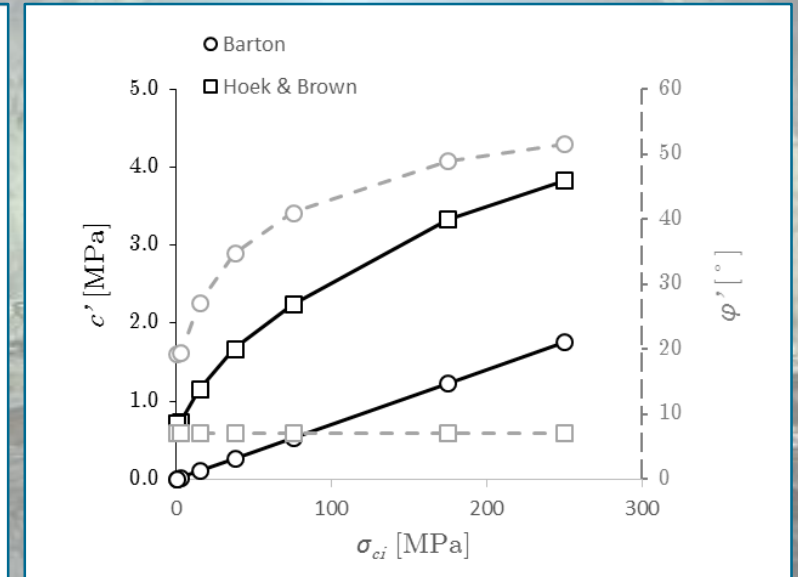
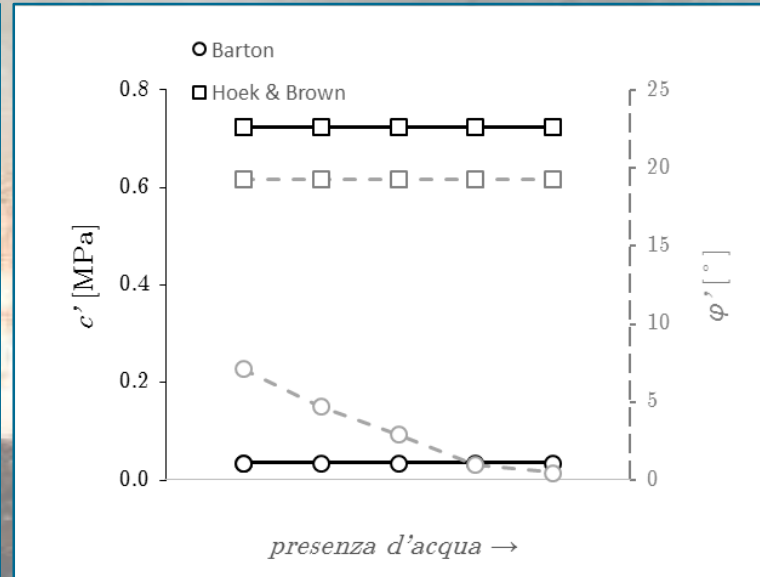
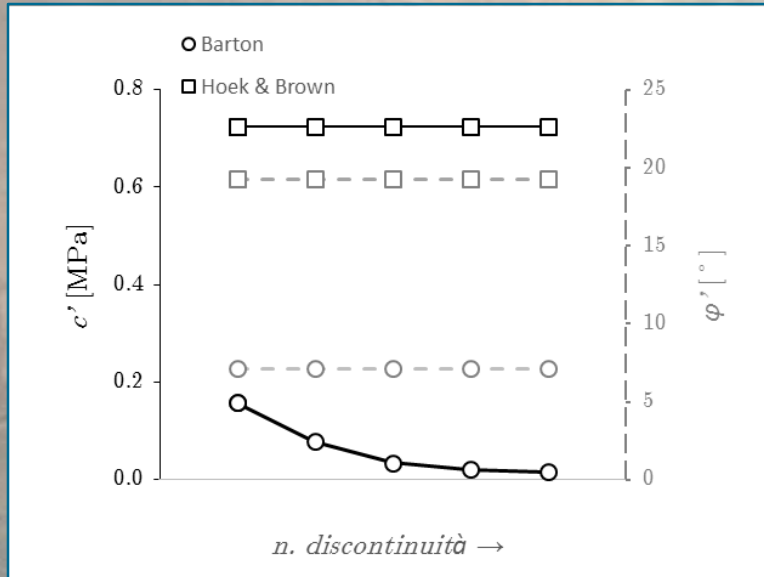
## ANALISI COMPARATIVE

### Analisi di sensitività rispetto ai dati di input

N. famiglie di discontinuità

Presenza d'acqua

$\sigma_{ci}$



## SCELTA DEI PARAMETRI DI PROGETTO (EC, NTC08, pratica progettuale)

- In accordo con la normativa italiana e EC7, nella progettazione geotecnica si usano i *valori caratteristici* dei parametri di resistenza e di deformabilità.
- «Per valore caratteristico è da intendersi una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro nello stato limite considerato» [NTC 2008, par. 6.2.2]

*Ma operativamente cosa si intende?*

- Un'interpretazione efficace per il caso in oggetto consiste in:

$$p_k = p_m (1 - V_p/2)$$

Dove:

- $p_k$  valore caratteristico del parametro  $p$
- $p_m$  valore medio del parametro  $p$
- $V_p$  coefficiente di variazione (rapporto tra deviazione standard e media del campione)



**PRO  
ITER**  
PROGETTO  
INFRASTRUTTURE  
TERRITORIO S.R.L.

SEDE OPERATIVA

Via G.B. Sammartini, 5  
20125 Milano

[www.proiter.com](http://www.proiter.com)

Relatore:

**Ing. Enrico Maria Pizzarotti** - [enrico.pizzarotti@proiter.it](mailto:enrico.pizzarotti@proiter.it)  
Settore Fondazioni Speciali e Opere in Sottterraneo



## CONCLUSIONI

- Nella tratta considerata le parametrizzazioni di Hoek & Brown e Barton sono eccessivamente cautelativi nonostante una valutazione non conservativa dei parametri di input.
- Per materiali di buona qualità le parametrizzazioni di Hoek & Brown e Barton presentano buon accordo tra di loro e con i monitoraggi per materiali di buona qualità.
- Per materiali di qualità scadente ( $Q < 1$  o  $RMR < 30$ ) sia la parametrizzazione di Hoek & Brown che quella di Barton porta a risultati poco realistici. Le ragioni sono probabilmente un'eccessiva sensibilità alla variazione dei parametri di input (Barton) e l'effetto delle meso-discontinuità sui parametri di input (Hoek & Brown).
- Le due parametrizzazioni hanno diverse sensibilità ai parametri di input; in particolare, nel caso di utilizzo dell'approccio di Barton occorre prestare attenzione all'assegnazione delle caratteristiche delle discontinuità (rugosità, alterazione).





**GRAZIE PER L'ATTENZIONE!**