

# NUOVE OPERE DI REGOLAZIONE PER LA MESSA IN SICUREZZA DEL LAGO D'IDRO



RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROGETTISTI



## PROGETTO ESECUTIVO

### ELABORATI GENERALI

### GEOLOGIA-IDROGEOLOGIA-GEOTECNICA-SISMICA

### Relazione di caratterizzazione geomeccanica

Fase PE	Ambito 000	Opera GEO	Argomento GG	Progressivo 002	Tipo elaborato RB	Revisione A
Redatto G. Nigro		Controllato L. Griffini		Approvato L. Griffini	Scala -	Data 18/10/22

IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO



Ing. M. Vergnani

RESPONSABILE INTEGRAZIONE  
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE  
ALPINA S.p.A.

Ing. Paola Erba

PROGETTAZIONE\_GEOLOGIA  
STUDIO GRIFFINI SRL

Geol. Lamberto Griffini

REV.	DATA	OGGETTO REVISIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO
A	18/10/22	Prima emissione	NG	GL	GL
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-



## SOMMARIO

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>RIFERIMENTI</b> .....	<b>6</b>
2.1	<b>Normative e standards</b> .....	<b>6</b>
2.2	<b>Elaborati del Progetto Esecutivo 2018</b> .....	<b>6</b>
2.3	<b>Elaborati del Progetto Esecutivo 2022</b> .....	<b>6</b>
2.4	<b>Software</b> .....	<b>6</b>
2.5	<b>Bibliografia</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO</b> .....	<b>7</b>
3.1	<b>Campagna d'indagini del Progetto Preliminare (2007)</b> .....	<b>7</b>
3.2	<b>Campagna d'indagini del Progetto Definitivo (2009)</b> .....	<b>7</b>
3.3	<b>Campagna d'indagini del Progetto Esecutivo (2018)</b> .....	<b>8</b>
3.4	<b>Campagna d'indagini del Progetto Esecutivo (2022)</b> .....	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>RISULTATI PROVE DI LABORATORIO GEOTECNICO</b> .....	<b>11</b>
4.1	<b>Campagna d'indagini del Progetto Preliminare (2007)</b> .....	<b>11</b>
4.2	<b>Campagna d'indagini del Progetto Definitivo (2009)</b> .....	<b>12</b>
4.3	<b>Campagna d'indagini del Progetto Esecutivo (2018)</b> .....	<b>14</b>
4.4	<b>Campagna d'indagini del Progetto Esecutivo (2022)</b> .....	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE</b> .....	<b>17</b>
<b>5.1</b>	<b>Galleria Naturale</b> .....	<b>17</b>
5.1.1	San Giovanni Bianco in facies evaporitica ( $SGB_{evap}$ ) .....	<b>20</b>
5.1.2	San Giovanni Bianco in facies terrosa ( $SGB_{ter}$ ) .....	<b>25</b>
5.1.3	Intorno Faglia - San Giovanni Bianco in facies terrosa ( $SGB_{ter}$ ).....	<b>30</b>
5.1.4	Nucleo Faglia .....	<b>32</b>
5.1.5	Intorno Faglia – Formazione di castro Sebino (FCS).....	<b>34</b>
5.1.6	Formazione di castro Sebino (FCS).....	<b>37</b>
5.1.7	San Giovanni Bianco in facies evaporitica ( $SGB_{evap}$ ) .....	<b>41</b>
5.1.8	San Giovanni Bianco in facies terrosa ( $SGB_{ter}$ ) .....	<b>45</b>
5.1.9	San Giovanni Bianco in facies arenacea ( $SGB_{are}$ ) .....	<b>49</b>
5.1.10	Arenarie di Val Sabbia (AVS) .....	<b>54</b>
5.1.11	Intorno Faglia – Arenarie di Val Sabbia (AVS) .....	<b>59</b>
5.1.12	Nucleo Faglia.....	<b>60</b>
5.1.13	Arenarie di Val Sabbia (AVS) .....	<b>61</b>
<b>5.2</b>	<b>Nuova traversa</b> .....	<b>63</b>
5.2.1	Cappellaccio di Alterazione – Arenarie di Val Sabbia ( $AVS_{cap}$ ) .....	<b>64</b>

5.2.2	Ammasso roccioso estremamente fratturato – Arenarie di Val Sabbia (AVS <sub>EXF</sub> )	66
5.2.3	Ammasso roccioso – Arenarie di Val Sabbia (AVS <sub>AR</sub> ) .....	68
<b>6</b>	<b>ALLEGATI .....</b>	<b>72</b>
6.1	Allegato 1: E00609A_E_X00_RI000_0_IS_IG_002_0 – Documentazione indagini geognostiche – Progetto Preliminare .....	73
6.2	Allegato 2: E00609A_E_X00_RI000_0_IS_IG_003_0 – Documentazione indagini geognostiche – Progetto Definitivo .....	74
6.3	Allegato 3: E00609A_E_X00_RI000_0_IS_RT_001_0 – Relazione tecnica indagini geognostiche – Progetto Esecutivo .....	75
6.4	Allegato 4: Indagini geognostiche nell’ambito del progetto delle nuove opere di regolazione per la messa in sicurezza del lago d’Idro nei Comuni di Idro e di Lavenone (BS) – Rapporto di cantiere .....	76

## 1 INTRODUZIONE

Ai fini dell'elaborazione del Progetto Esecutivo del Progetto delle nuove opere di regolazione per la messa in sicurezza del lago di Idro, sono stati definiti i parametri geomeccanici degli ammassi rocciosi che saranno interessati dalle lavorazioni in progetto.

Per quanto concerne i depositi sciolti. Si rimanda all'apposita relazione di caratterizzazione geotecnica (rif. 13) lo stesso per quanto riguarda le caratteristiche sismiche che vengono riportate nell'apposita relazione sismica (rif. 15)

La caratterizzazione geomeccanica è stata elaborata a partire dal Modello Geologico di Riferimento - MGR (rif. 10). Per la redazione del MGR si sono utilizzati i risultati delle diverse campagne d'indagine di seguito riassunte:

- Campagna d'indagini a supporto del Progetto Preliminare (2007);
- Campagna d'indagini a supporto del Progetto Definitivo (2009);
- Campagna d'indagini a supporto del Progetto Esecutivo (2018);
- Campagna d'indagini integrative del Progetto Esecutivo (2022).

Le indagini integrative realizzate nell'ambito del Progetto Esecutivo del 2022, sono state eseguite con lo scopo di minimizzare le incertezze del modello geologico e del modello geotecnico. con particolare riguardo alla zona interessata da una presunta faglia identificata dai risultati delle indagini geofisiche (stendimento L2\_sis) realizzate a supporto del Progetto Esecutivo 2018.

Le indagini sono state mirate all'ottenimento delle informazioni necessarie riguardo alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche delle aree direttamente interessate o limitrofe alle opere in progetto. con particolare attenzione all'individuazione delle potenziali pericolosità geologiche connesse alla realizzazione dell'opera, alla definizione delle proprietà fisiche e meccaniche delle unità attraversate e agli aspetti idrogeologici.

Nel corso delle stesse, ed in particolare a seguito della realizzazione del sondaggio profondo S01-22 è stato possibile l'identificazione e successiva caratterizzazione di una formazione non presente nelle stratigrafie e nella documentazione delle precedenti fasi progettuali: si tratta della Formazione di Castro Sebino, costituita da breccie intraformazionali carbonatiche.

Per quanto riguarda l'ubicazione. le metodologie. le strumentazioni impiegate. i log stratigrafici. le prove di laboratorio geotecnico. i dati geofisici e le relative interpretazioni. si rimanda ai documenti specifici (riff. 5, 6, 7 e 10).

In **Figura 1** si riporta una ripresa satellitare dell'area di interesse, mentre in **Figura 2** la planimetria con le opere in progetto e le perimetrazioni delle aree a rischio idrogeologico (L. 267/98, rif. 1)

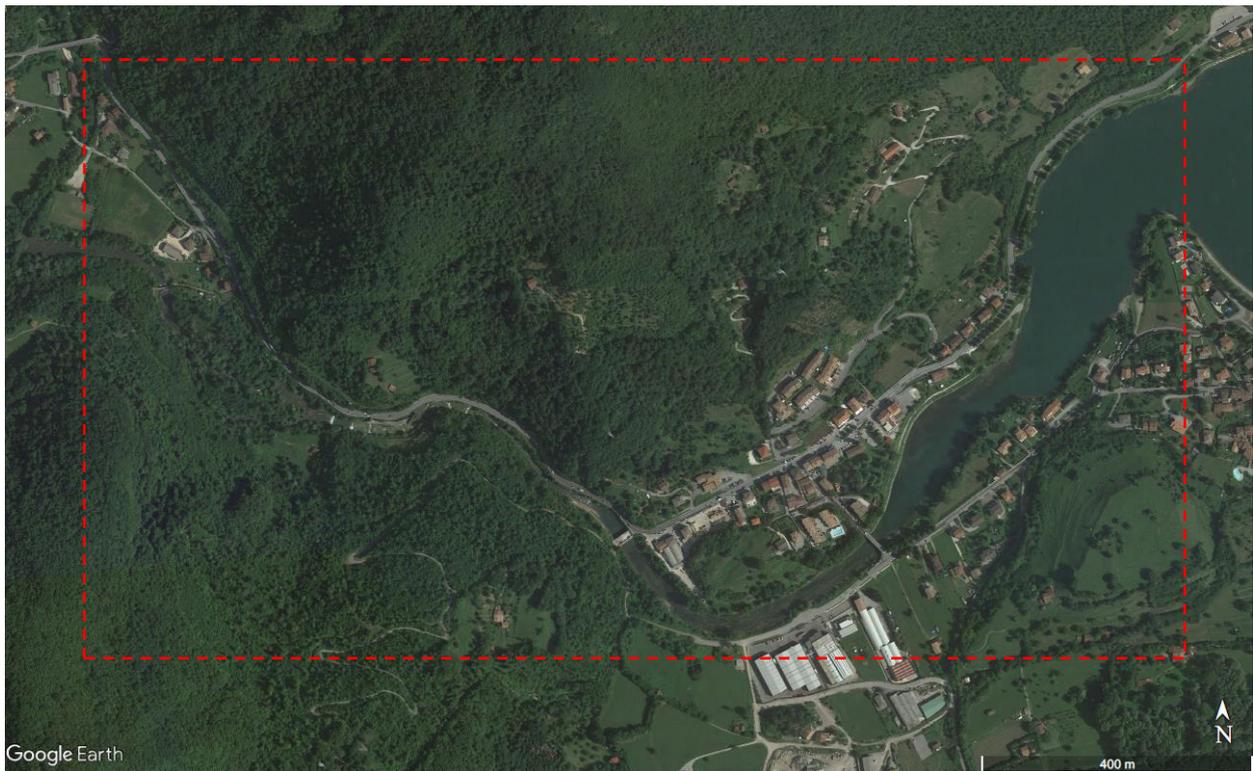


Figura 1 – Area di studio (ripresa satellitare da Google Earth)

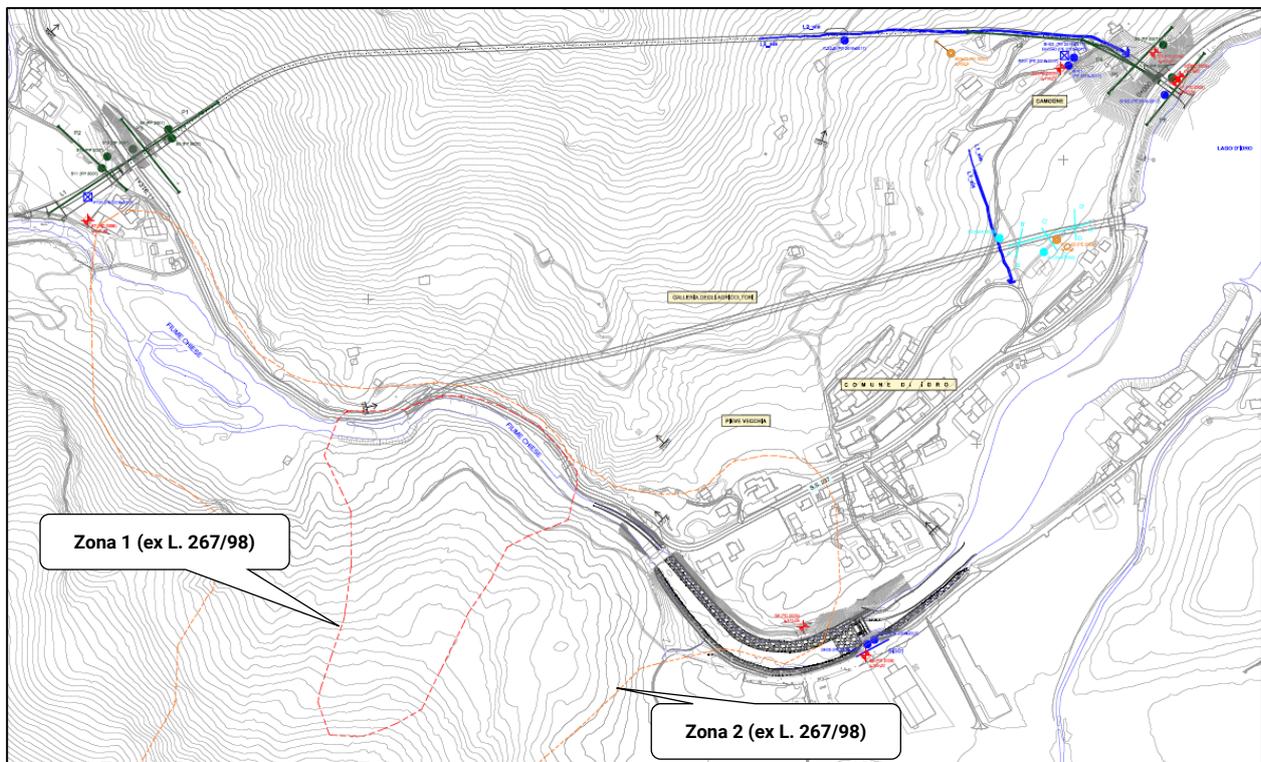


Figura 2 – Area di studio con indicazione delle opere principali e le perimetrazioni delle aree a rischio idrogeologico

## 2 RIFERIMENTI

### 2.1 Normative e standards

1. L. 267/98 – Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 11 giugno 1998, n. 180, recante misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella regione Campania.
2. DM 26.06.2014 – Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)
3. Decreto Ministeriale 17 Gennaio 2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni
4. Circolare 21 Gennaio 2019 n. 7 del Consiglio Sup. LL. PP. – Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al DM 17 Gennaio 2018

### 2.2 Elaborati del Progetto Esecutivo 2018

5. E00609A\_E\_X00\_RI000\_0\_IS\_IG\_002\_0 – Documentazione indagini geognostiche – Progetto Preliminare
6. E00609A\_E\_X00\_RI000\_0\_IS\_IG\_003\_0 – Documentazione indagini geognostiche – Progetto Definitivo
7. E00609A\_E\_X00\_RI000\_0\_IS\_RT\_001\_0 – Relazione tecnica indagini geognostiche – Progetto Esecutivo
8. E00609A\_E\_X00\_RI000\_0\_GG\_RB\_002\_1 – Relazione di caratterizzazione geomeccanica
9. E00609A\_E\_G02\_RI000\_0\_GA\_FT\_003\_1 – Profilo geotecnico - geomeccanico e di monitoraggio

### 2.3 Elaborati del Progetto Esecutivo 2022

10. PE-000-GEO-IN-001-RT-A – Relazione tecnica indagini geognostiche
11. PE-000-GEO-IN-002-PL-A – Planimetria ubicazione indagini geognostiche e geofisiche
12. PE-000-GEO-GG-002-RB-A – Relazione di caratterizzazione geomeccanica
13. PE-000-GEO-GG-003-RB-A – Relazione di caratterizzazione geotecnica
14. PE-GAL-000-GE-004-PF-A – Profilo geotecnico - geomeccanico e di monitoraggio
15. PE-000-GEO-SS-001-RH-A – Relazione Sismica

### 2.4 Software

16. RSData – Rocscience

### 2.5 Bibliografia

17. Hoek E and Brown E.T. 1988. The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update. Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. (ed. J.H. Curran), pp. 31-38. Toronto: Civil Engineering Dept., University of Toronto
18. E. Hoek, 1996-2006 – Practical Rock Engineering

## 3 PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO

### 3.1 Campagna d'indagini del Progetto Preliminare (2007)

Nel corso dell'esecuzione dei carotaggi, sono stati prelevati spezzoni di roccia per l'esecuzione di prove di laboratorio di caratterizzazione.

Sono state eseguite le seguenti prove di laboratorio:

- n. 3 prove di compressione monoassiale;
- n. 3 prove di compressione triassiale;
- n. 3 prove di taglio su giunto.

In **Tabella 1** sono riportate le prove di caratterizzazione meccanica eseguite sugli spezzoni di roccia prelevati.

Sondaggio	Campione	Profondità [m da p.c.]	Formazione	Prove Rocce		
				MX	TX*	TG
S9	C8	38.0÷38.2	AVS	X	-	-
		37.6÷38.0		-	X	-
	C9	41.95		-	-	X
S10	C5	8.5÷8.67		X	-	-
		8.66÷9.0		-	X	-
	C6	13.2		-	-	X
		13.4	-	-	X	
	C7	15.0÷15.2	X	-	-	
		15.2÷15.6	-	X	-	

**Note:**  
 AVS: Arenarie di Val Sabbia;  
 MX: Prova di compressione monoassiale;  
 TX: Prova di compressione triassiale;  
 TG: Taglio su giunto;  
 \*La prova di compressione triassiale viene realizzata su tre provini

Tabella 1 – Sintesi delle prove eseguite

### 3.2 Campagna d'indagini del Progetto Definitivo (2009)

Nel corso dell'esecuzione dei carotaggi, sono stati prelevati spezzoni di roccia per l'esecuzione di prove di laboratorio di caratterizzazione.

Sono state eseguite le seguenti prove di laboratorio:

- n. 3 prove di compressione monoassiale;
- n. 3 prove di compressione triassiale;
- n. 3 prove di taglio su giunto.

In **Tabella 2** sono riportate le prove di caratterizzazione meccanica eseguite sugli spezzoni di roccia prelevati.

Sondaggio	Campione	Profondità [m da p.c.]	Formazione	Prove Rocce						
				MX	TX*	TG	TI	$\gamma_N$	Petrografica	Chimica
S3	-	71.41÷71.57	SGB	X	-	-	-	X	-	-
		71.61÷71.65		-	-	-	X	-	-	
CR1	76.33÷76.38	-		-	-	-	-	-	X	
-	76.38÷76.43	-		-	-	-	X	-	-	
S4	-	79.90÷80.06		X	-	-	-	X	-	-
		80.13÷80.17		-	-	-	X	-	-	
	-	81.08÷81.24		X	-	-	-	X	-	-
	-	81.24÷81.27		-	-	-	X	-	-	-
	-	99.00÷99.17		X	-	-	-	X	-	-
	-	99.25÷99.29		-	-	-	X	-	-	-
	C1_T1	78.38÷78.49		-	-	X	-	-	-	-
	C1_T2	89.35÷89.46		-	-	X	-	-	-	-
C1_T3	91.23÷91.33	-		-	X	-	-	-	-	
S6	-	9.55÷9.71		AVS	X	-	-	-	X	-
	-	9.71÷9.75	-		-	-	X	-	-	-
	C1_T1	9.38÷9.48	-		-	X	-	-	-	-
	C1_T2	10.25÷10.32	-		-	X	-	-	-	-
	C1_T3	10.05÷10.12	-		-	X	-	-	-	-
	C2_T1	11.05÷11.15	-		-	X	-	-	-	-
	C2_T2	11.40÷11.50	-		-	X	-	-	-	-
	C3_T3	11.50÷11.60	-		-	X	-	-	-	-
	-	12.55÷12.71	X		-	-	-	X	-	-
	-	12.71÷12.74	-		-	-	X	-	-	-

**Note:**

AVS: Arenarie di Val Sabbia;

SGB: San Giovanni Bianco;

MX: Prova di compressione monoassiale;

TX: Prova di compressione triassiale;

TG: Taglio su giunto;

TI: Resistenza indiretta a trazione (Prova Brasiliana);

$\gamma_N$ : Determinazione peso dell'unità di volume allo stato naturale

\*La prova di compressione triassiale viene realizzata su tre provini

Tabella 2 – Sintesi delle prove eseguite

### 3.3 Campagna d'indagini del Progetto Esecutivo (2018)

Nel corso dell'esecuzione dei carotaggi, sono stati prelevati spezzoni di roccia per l'esecuzione di prove di laboratorio di caratterizzazione.

Sono state eseguite le seguenti prove di laboratorio:

- n. 7 prove di compressione monoassiale;
- n. 10 prove di compressione triassiale;
- n. 3 prove di resistenza a trazione indiretta;
- n. 3 prove di determinazione del peso di volume;
- n. 2 prove di creep.

In **Tabella 3** sono riportate le prove di caratterizzazione meccanica eseguite sugli spezzoni di roccia prelevati.

Sondaggio	Campione	Profondità	Formazione	Prove Rocce				
		[m da p.c.]		MX	TX	TI	$\gamma_N$	CR
BH 03	CRG 18	81.0÷81.3	SGB	-	X	-	-	-
		81.3÷81.5		-	X	-	-	-
		81.5÷81.7		-	X	-	-	-
	CRG 18	81.7÷81.9		-	-	-	-	-
	CRG 18	85.2÷85.6		-	-	-	-	X
	CRG 18a	86.1÷86.4		X	-	-	-	-
	CRG	86.6÷87.0		-	-	-	-	X
	CRG 18b	87.0÷87.4		X	-	-	-	-
	CRG 21	90.0÷90.2		-	-	X	X	-
	CRG 21	90.6÷90.8		X	-	-	-	-
	CRG 21	91.2÷91.4		-	X	-	-	-
		91.4÷91.6		-	X	-	-	-
		91.6÷91.8		-	X	-	-	-
	CRG 21a	92.45÷92.6		X	-	-	-	-
	CRG 21a	95.45÷95.7		X	-	-	-	-
	CRG 24	98.35÷98.7		X	-	-	-	-
	CRG 24	105.0÷105.3		-	-	X	X	-
	CRG 24	107.0÷107.3		-	X	-	-	-
		107.3÷107.45		-	X	-	-	-
	CRG 27	110.0÷110.4		-	X	-	-	-
110.55÷110.8		-	X	-	-	-		
CRG 27	111.0÷111.3	-	-	X	X	-		
CRG 27a	113.0÷113.5	X	-	-	-	-		

**Note:**  
SGB: San Giovanni Bianco;  
MX: Prova di compressione monoassiale;  
TX: Prova di compressione triassiale;  
TI: Resistenza indiretta a trazione (Prova Brasiliana);  
 $\gamma_N$ : Determinazione peso dell'unità di volume allo stato naturale  
CR: Prova di creep

Tabella 3 – Sintesi delle prove eseguite

### 3.4 Campagna d'indagini del Progetto Esecutivo (2022)

Nel corso dell'esecuzione dei carotaggi, sono stati prelevati spezzoni di roccia per l'esecuzione di prove di laboratorio di caratterizzazione.

Sono state eseguite le seguenti prove di laboratorio:

- n. 6 prove di compressione monoassiale;
- n. 6 prove di compressione triassiale (ciascuna su tre provini);

In **Tabella 4** sono riportate le prove di caratterizzazione meccanica eseguite sugli spezzoni di roccia prelevati.

Sondaggio	Campione	Profondità	Formazione	Prove Rocce			
		[m da p.c.]		MX	TX*	Chimica	Petrografica e diffrattometrica
S01-22	-	125.10÷125.24	FCS	X	-	-	-
	-	125.30÷125.41		-	X	-	-
	-	125.88÷126.00		-	X	-	-
	-	124.80÷124.91		-	X	-	-
	-	129.79÷130.21		X	-	-	-
	-	130.00÷130.21		-	X	-	-
	-	130.21÷130.33		-	X	-	-
	-	132.20÷132.31		-	X	-	-
	-	140.31÷140.52		X	-	-	-
	-	140.00÷140.11		-	X	-	-
	-	140.51÷140.62		-	X	-	-
	-	140.63÷140.74		-	X	-	-
	-	145.40		-	-	X	X
	-	145.69÷145.83		X	-	-	-
	-	145.20÷145.31		-	X	-	-
	-	145.45÷145.56		-	X	-	-
	-	145.57÷145.63		-	X	-	-
	-	150.79÷151.00		X	-	-	-
	-	151.00÷151.11		-	X	-	-
	-	151.12÷151.23		-	X	-	-
	-	151.23÷151.34		-	X	-	-
	-	155.15÷155.36		X	-	-	-
	-	155.37÷155.48		-	X	-	-
-	155.50÷155.61	-	X	-	-		
-	155.62÷155.73	-	X	-	-		

**Note:**  
FCS: Formazione Castro Sebino;  
MX: Prova di compressione monoassiale;  
TX: Prova di compressione triassiale.

Tabella 4 – Sintesi delle prove eseguite

## 4 RISULTATI PROVE DI LABORATORIO GEOTECNICO

### 4.1 Campagna d'indagini del Progetto Preliminare (2007)

In **Tabella 5** e **Tabella 6** sono riportati i risultati delle prove di caratterizzazione meccanica eseguite sugli spezzoni di roccia prelevati.

Sondaggio	Campione	Profondità	Formazione	Prova	$\sigma_3$	Sforzo a rottura	Modulo di Young tangente	Modulo di Young secante	Coefficiente di Poisson
		[m da p.c.]			[MPa]	[MPa]	[GPa]	[GPa]	[-]
S9	C8	38.0÷38.2	AVS	MX	-	23.22	20.50	17.11	0.34
		37.6÷38.0		TX	2.0	71.08	69.74	45.06	0.35
					4.0	78.05	87.10	47.83	0.33
6.0	92.24				90.14	60.83	0.32		
S10	C5	8.5÷8.67		MX	-	21.19	10.10	10.31	0.31
		8.66÷9.0		TX	2.0	37.87	49.44	31.71	0.31
					4.0	58.11	52.95	34.51	0.33
	6.0				135.63	151.60	95.35	0.39	
	C7	15.0÷15.2		MX	-	24.76	18.47	16.16	0.23
		15.2÷15.6		TX	3.0	46.31	52.88	30.84	0.30
					6.0	60.71	59.39	23.51	0.32
9.0					81.39	76.30	47.01	0.39	

**Note:**

AVS: Arenarie di Val Sabbia;  
MX: Prova di compressione monoassiale;  
TX: Prova di compressione triassiale;  
 $\sigma_3$ : Pressione di confinamento.

Tabella 5 – Risultati delle prove di compressione monoassiale e triassiale

Sondaggio	Campione	Profondità	Formazione	Prova	$\sigma$	$\tau$ di picco	$\tau$ residua
		[m da p.c.]			[kPa]	[kPa]	[kPa]
S9	C9	41.95	AVS	TG	2000	1389	845
S10	C6	13.2		TG	4000	2562	1534
		13.4		TG	6000	3873	2447

**Note:**

AVS: Arenarie di Val Sabbia;  
TG: Taglio su giunto.

Tabella 6 – Risultati delle prove di taglio su giunto

## 4.2 Campagna d'indagini del Progetto Definitivo (2009)

In **Tabella 7**, **Tabella 8** e **Tabella 9** sono riportati i risultati delle prove di caratterizzazione meccanica eseguite sugli spezzoni di roccia prelevati.

In **Tabella 10** i risultati delle analisi chimiche.

Sondaggio	Campione	Profondità	Formazione	Prova	$\sigma_3$	Sforzo a rottura	Modulo di Young tangente	Modulo di Young secante	Coefficiente di Poisson	$\gamma_N$
		[m da p.c.]			[MPa]	[MPa]	[GPa]	[GPa]	[-]	[t/m <sup>3</sup> ]
S3	-	71.41÷71.57	SGB	MX	-	8.99	21.34	11.09	0.10	2.36
S4	-	79.90÷80.06		MX	-	11.01	41.09	11.31	0.43	2.36
	-	81.08÷81.24		MX	-	11.63	24.56	17.74	0.17	2.38
	-	99.00÷99.17		MX	-	15.53	21.85	21.68	0.25	2.41
S6	-	9.55÷9.71	AVS	MX	-	46.05	17.57	6.76	nd	2.64
	-	12.55÷12.71		MX	-	56.05	33.66	31.59	0.33	2.66

**Note:**

AVS: Arenarie di Val Sabbia;

SGB: San Giovanni Bianco;

MX: Prova di compressione monoassiale;

TX: Prova di compressione triassiale;

$\sigma_3$ : Pressione di confinamento.

Tabella 7 – Risultati delle prove di compressione monoassiale

Sondaggio	Campione	Profondità	Formazione	Prova	Carico a rottura	Sforzo a rottura
		[m da p.c.]			[kN]	[MPa]
S3	-	71.61÷71.65	SGB	TI	9.5	2.10
S4	-	80.13÷80.17		TI	9.1	2.12
	-	81.24÷81.27		TI	11.1	2.34
	-	99.25÷99.29		TI	17.0	3.66
S6	-	9.71÷9.75	AVS	TI	45.3	10.77
	-	12.71÷12.74		TI	52.7	17.13

**Note:**

AVS: Arenarie di Val Sabbia;

SGB: San Giovanni Bianco;

TI: Resistenza indiretta a trazione (Prova Brasiliana).

Tabella 8 – Risultati delle prove di resistenza indiretta a trazione (Prova Brasiliana)

Sondaggio	Campione	Profondità	Formazione	Prova	$\sigma$	$\tau$ di picco	$\tau$ residua
		[m da p.c.]			[kPa]	[kPa]	[kPa]
S4	C1_T1	78.38÷78.49	SGB	TG	2.0	1265	810
	C1_T2	89.35÷89.46		TG	4.0	2264	783
	C1_T3	91.23÷91.33		TG	6.0	2697	1474
S6	C1_T1	9.38÷9.48	AVS	TG	2.0	1510.94	701
	C1_T2	10.25÷10.32		TG	4.0	3400.30	944
	C1_T3	10.05÷10.12		TG	6.0	4115.27	1856
	C2_T1	11.05÷11.15		TG	2.0	1584.73	453
	C2_T2	11.40÷11.50		TG	4.0	3518.89	1018
	C3_T3	11.50÷11.60		TG	6.0	3976.03	1365

**Note:**

AVS: Arenarie di Val Sabbia;  
SGB: San Giovanni Bianco;  
TG: Taglio su giunto.

Tabella 9 – Risultati delle prove di taglio su giunto

Sondaggio	Campione	Profondità	Formazione	Prova	p/p
		[m da p.c.]			[%]
S4	CR1	76.33÷76.38	SGB	Cl	n.r.
				SSA	41.0

**Note:**  
SGB: San Giovanni Bianco;  
Cl: Cloruri Idrosolubili;  
SSA: Solfuri solubili in acidi (come SO<sub>3</sub>).

Tabella 10 – Risultati delle prove chimiche

### 4.3 Campagna d'indagini del Progetto Esecutivo (2018)

In **Tabella 11**, **Tabella 12** e **Tabella 13** sono riportati i risultati delle prove di caratterizzazione meccanica eseguite sugli spezzoni di roccia prelevati.

Sondaggio	Campione	Profondità	Formazione	Prova	$\sigma_3$	Sforzo a rottura	Modulo di Young tangente	Modulo di Young secante	Coefficiente di Poisson
		[m da p.c.]			[MPa]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[KN/mm <sup>2</sup> ]	[KN/mm <sup>2</sup> ]	[-]
BH 03	CRG 18	81.0÷81.3	SGB	TX	1.5	41.19	50.51	128.95	-
		81.3÷81.5			3.5	75.87	35.40	39.74	-
		81.5÷81.7			5.5	98.68	48.80	176.04	-
	CRG 18	81.7÷81.9		MX	-	32.56	82.39	82.42	-
	CRG 18a	86.1÷86.4		MX	-	27.58	34.80	43.27	-
	CRG 18b	87.0÷87.4		MX	-	27.82	37.59	56.10	-
	CRG 21	90.6÷90.8		MX	-	14.23	17.56	21.96	-
	CRG 21	91.2÷91.4		TX	2.5	28.6	10.79	11.38	-
		91.4÷91.6			4.5	45.01	14.62	24.50	-
		91.6÷91.8			6.5	70.67	113.17	172.54	-
	CRG 21a	92.45÷92.60		MX	-	21.36	68.79	57.89	-
	CRG 21a	95.45÷95.70		MX	-	20.10	47.97	58.48	-
	CRG 24	98.35÷98.70		MX	-	40.59	24.69	37.77	-
	CRG 24	107.0÷107.3		TX	2.5	31.72	9.06	8.95	-
		107.3÷107.45			4.5	55.33	43.03	37.59	-
	CRG 27	110.0÷110.4		TX	2.5	24.22	4.11	4.73	-
		110.55÷110.80			4.5	44.96	36.33	63.19	-
CRG 27a	113.00÷113.50	MX	-	4.89	10.77	14.42	-		

**Note:**  
SGB: San Giovanni Bianco;  
MX: Prova di compressione monoassiale;  
TX: Prova di compressione triassiale;  
 $\sigma_3$ : Pressione di confinamento.

Tabella 11 – Risultati delle prove di compressione monoassiale e triassiale

Sondaggio	Campione	Profondità	Formazione	Prova	Carico a rottura	Sforzo a rottura	$\gamma_N$
		[m da p.c.]			[N]	[MPa]	[g/cm <sup>3</sup> ]
BH 03	CRG 21	90.0÷90.2	SGB	TI	4930	0.84	2.44
					6380	1.06	2.53
					15730	2.73	2.55
					16230	3.49	2.75
	CRG 24	105.0÷105.3		TI	23540	4.56	2.77
					34680	5.98	2.91
					23340	4.69	2.76
					20680	4.85	2.76
	CRG 27	111.0÷111.3		TI	22080	4.46	2.77
					7420	1.78	2.76
					25970	4.49	2.80
					14500	2.69	2.71
					11970	2.56	2.69
					12870	2.39	2.73
					19530	3.58	2.76

**Note:**  
SGB: San Giovanni Bianco;  
TI: Resistenza indiretta a trazione (Prova Brasiliana).

Tabella 12 – Risultati delle prove di resistenza indiretta a trazione (Prova Brasiliana)

Sondaggio	Campione	Profondità	Formazione	Prova	$\gamma_N$	$\sigma_3$	$\sigma_1$	T	E
		[m da p.c.]			[g/cm <sup>3</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[s]	[-]
BH 03	CRG 18	85.2÷85.6	SGB	CR	2.35	5.0	10.0	57600	294
	CRG	86.6÷87.0			2.71	1.0	5.0	81077	114

**Note:**  
SGB: San Giovanni Bianco;  
CR: Prova di creep  
 $\sigma_3$ : Pressione di confinamento;  
 $\sigma_1$ : Carico assiale;  
T: Durata della prova;  
E: Deformazione finale

Tabella 13 – Risultati delle prove di creep

## 4.4 Campagna d'indagini del Progetto Esecutivo (2022)

In **Tabella 14** sono riportati i risultati delle prove di caratterizzazione meccanica eseguite sugli spezzoni di roccia prelevati.

Sondaggio	Campione	Profondità	Formazione	Prova	$\sigma_3$	Sforzo a rottura	Modulo di Young tangente	Modulo di Young secante	Coefficiente di Poisson
		[m da p.c.]			[MPa]	[MPa]	[GPa]	[GPa]	[-]
S01-22	-	125.10÷125.24	FCS	MX	-	48.4	13.7	8.5	0.07
	-	125.30÷125.41		TX	1.0	28.9	8.2	5.1	0.24
	-	125.88÷126.00			3.0	34.8	8.6	7.2	0.19
	-	124.80÷124.91		5.0	42.0	4.7	3.6	0.14	
	-	129.79÷130.21		MX	-	7.0	2.1	2.4	0.29
	-	130.00÷130.21		TX	3.0	37.0	7.7	4.9	0.12
	-	130.21÷130.33			5.0	56.9	21.4	22.6	0.13
	-	132.20÷132.31		7.0	91.0	59.2	33.6	0.10	
	-	140.31÷140.52		MX	-	40.9	19.2	19.9	0.08
	-	140.00÷140.11		TX	5.0	37.2	40.9	42.8	0.12
	-	140.51÷140.62			7.0	80.0	17.2	9.2	0.17
	-	140.63÷140.74		10.0	132.3	15.0	12.1	0.07	
	-	145.69÷145.83		MX	-	19.8	3.4	2.0	0.10
	-	145.20÷145.31		TX	1.0	20.3	2.0	2.1	0.07
	-	145.45÷145.56			3.0	47.6	19.4	17.0	0.11
	-	145.57÷145.63		5.0	56.8	18.8	18.1	0.14	
	-	150.79÷151.00		MX	-	2.0	0.7	0.8	0.30
	-	151.00÷151.11		TX	3.0	43.4	6.7	4.8	0.05
	-	151.12÷151.23			5.0	51.5	3.6	2.8	0.07
	-	151.23÷151.34		7.0	65.3	3.5	2.3	0.11	
	-	155.15÷155.36		MX	-	17.3	10.1	5.7	0.14
	-	155.37÷155.48		TX	5.0	52.9	22.0	21.0	0.25
-	155.50÷155.61	7.0	74.3		30.2	24.5	0.25		
-	155.62÷155.73	10.0	81.5	37.0	30.9	0.26			

**Note:**

FCS: Formazione Castro Sebino;

MX: Prova di compressione monoassiale;

TX: Prova di compressione triassiale;

$\sigma_3$ : Pressione di confinamento.

Tabella 14 – Risultati delle prove di compressione monoassiale e triassiale

## 5 CARATTERIZZAZIONE

Sulla base dei risultati delle prove geotecniche di laboratorio, sono stati definiti i parametri di resistenza e deformabilità della matrice roccia dei litotipi presenti nell'area di studio.

Successivamente, in base alle caratteristiche geostrutturali dell'ammasso roccioso e alle osservazioni in sito si è definito il valore rappresentativo dell'indice GSI (Geological Strength Index; Hoek, 1997-2000).

Analogamente a quanto eseguito per la matrice roccia, anche per la definizione dei valori di resistenza caratteristici delle diverse unità geomeccaniche si è fatto riferimento al criterio empirico di Hoek e Brown (Rif. 17, 18):

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

dove:

- m è il parametro che esprime l'incremento della resistenza al crescere della pressione di confinamento;
- s, a sono costanti che dipendono dalle caratteristiche dell'ammasso roccioso;
- $\sigma_{ci}$  è la resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta;
- $\sigma'_1$  e  $\sigma'_3$  sono rispettivamente la tensione efficace principale massima e minima.

I parametri m, s ed a, del criterio di H&B, sono stati valutati in funzione dell'indice GSI mediante il codice di calcolo RSDData ("Rocscience", 2001, rel 1.006).

### 5.1 Galleria Naturale

La caratterizzazione di seguito proposta è articolata in funzione delle litologie presenti lungo il tracciato della galleria naturale in progetto, partendo dall'imbocco lato Idro e proseguendo verso lo sbocco lato Lavenone.

La distribuzione delle diverse unità geomeccaniche è sintetizzata nel Profilo Geotecnico -Geomeccanico e di Monitoraggio di Progetto (rif. Tav. 14).

I limiti tra le diverse unità indicati nel profilo geotecnico-geomeccanico derivano dall'interpretazione delle caratteristiche geologico-strutturali rilevate in superficie, dai risultati delle indagini geofisiche e dai log stratigrafici e relative indagini in foro (OB-OTV) eseguite nel corso delle diverse campagne d'indagine e, in particolare, dai risultati della campagna d'indagini 2022; dal punto di vista geologico, inoltre, questi limiti sono di tipo transizionale, non definiti da una superficie netta e pertanto le posizioni dei contatti dovranno essere necessariamente accertate in corso d'opera mediante sondaggi in avanzamento.

Le indagini integrative del 2022 hanno compreso un sondaggio profondo (S01-22) di lunghezza 160 m, con inclinazione 45°; questo sondaggio è stata eseguito a distruzione di nucleo sino a 80 m di profondità (inclinata: verticale circa 40 m da p.c.) e poi a carotaggio continuo con tecnica wire-line sino a 160 m di profondità. Il sondaggio ha attraversato sempre breccie carbonatiche (attribuite alla Formazione di Castro Sebino) non riconosciute nel corso delle campagne precedenti.

Queste breccie presentano uno stato di fratturazione da moderato a basso, con RQD, misurato lungo le carote di sondaggio estratte, compreso in genere tra 80 e 100%.

I risultati del log eseguito con sonda ottica OB-OTV mostrano che nel primo tratto, tra 80 e 100 m circa (rif. **Figura 3**) lo stato di fratturazione è molto più intenso di quanto risulta dai valori di RQD misurati sulle carote, con un valore di intercetta delle discontinuità pari a  $20/177 = 0.113$  m, ossia un valore di RQD di poco superiore al 10%.

Questa particolarità è confermata dall'osservazione diretta delle carote che, appena estratte, mostrano uno stato di fratturazione apparentemente moderato e con fratture serrate. A seguito dell'estrazione però, con la perdita della tensione di confinamento dovuto al carico litostatico, tendono ad aprirsi naturalmente senza alcuna azione meccanica.

Più in profondità, tra 120 e 140 m e poi tra 140 e 160 m, ossia nell'intorno della quota galleria, si hanno rispettivamente valori d'intercetta di 0.180 e 0.200 m che indicano condizioni di minore stato di fratturazione, seppure sempre intensa (RQD = 18÷20%).

Il maggior stato di fratturazione nella porzione superiore del sondaggio, tra 80 e 100 m di profondità, è congruente con la presenza della fascia di rilascio nell'intorno della faglia individuata dalle indagini geofisiche del 2018 che, tuttavia non è stata pienamente intercettata dal sondaggio S1-22 e presenta una fascia di rilascio meno spessa di quella interpretata dalle indagini sismiche del 2018.

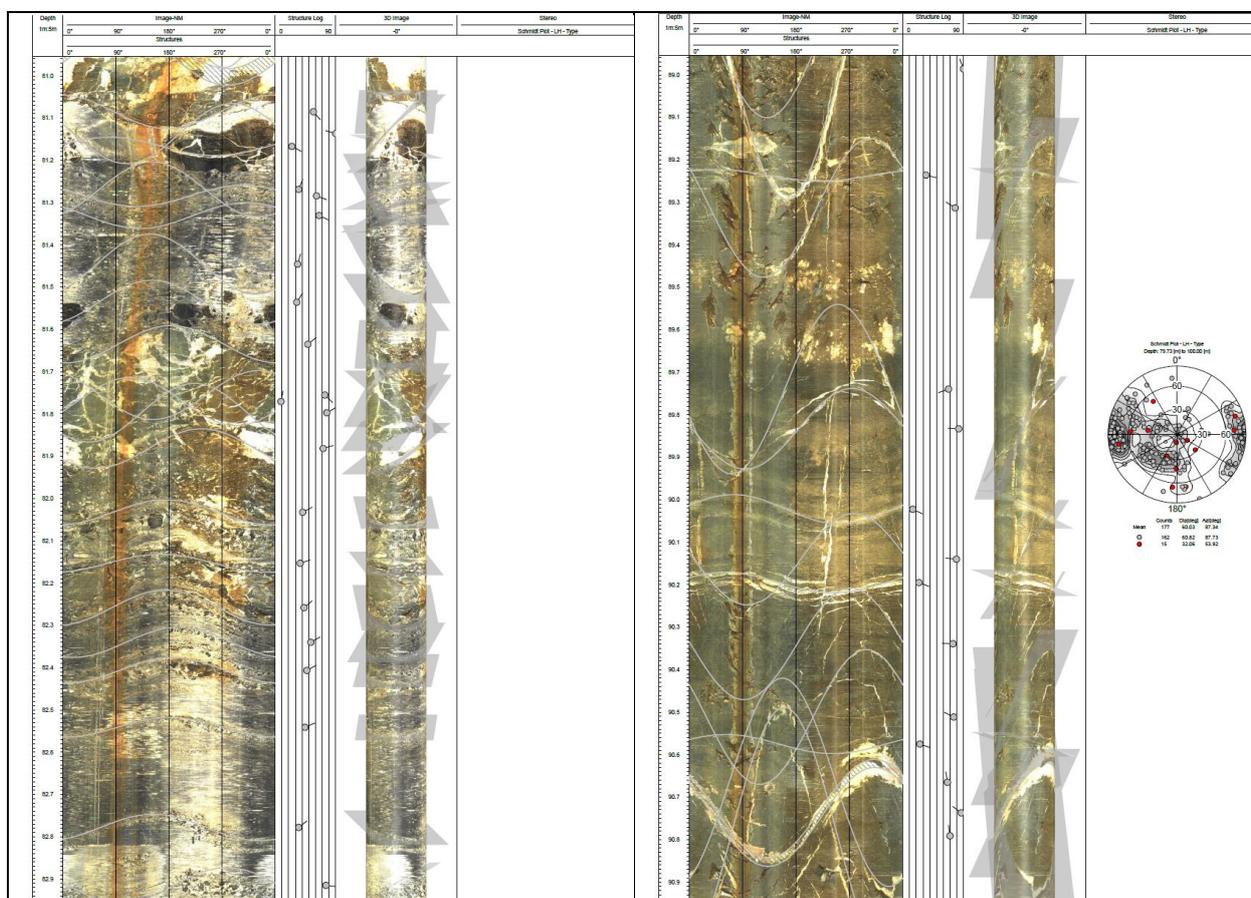


Figura 3 – Riprese OTV tratti 81-82 e 88-91 m con proiezione stereografica delle discontinuità presenti nel tratto 80÷100 m

Le breccie intraformazionali dell'Unità di Castro Sebino sono state incontrate dal sondaggio profondo a valle della zona di faglia individuata dalle indagini geofisiche del 2018 e si estendono sino a circa 15 m al di sotto della quota della galleria di progetto in asse al sondaggio.

A monte del sondaggio S04 (2009), in direzione dell'imbocco lato Idro, è stata accertata la presenza di depositi sciolti che costituiscono il detrito di versante (rif. **Figura 4**). In questo caso, il contatto tra substrato roccioso e depositi sciolti di copertura è netto e accertato tramite tre sondaggi geognostici. Tra il sondaggio S04 e la faglia, ossia tra le progressive metriche 110 e 260 circa, non si dispone di indagini dirette che indichino con certezza quali unità siano presenti al di sotto dei depositi di copertura quaternaria; in questo tratto le indicazioni

stratigrafiche ricavate dalla bibliografia scientifica fanno ipotizzare la presenza della Formazione di S. Giovanni Bianco in facies evaporitica; tuttavia il log stratigrafico del sondaggio S4(2009) alla profondità della galleria (e poi sino a fondo foro) indica la presenza di “ *Formazione di San Giovanni Bianco compatta, costituita da silti grigio-verdastre con livelli di breccie calcaree grigie molto deformate estremamente compatte.....* “. Questa descrizione è ambigua e lascia supporre che in quella zona in realtà sia stato attraversato il contatto tra le Breccie della Formazione di Castro Sebino per poi entrare nella sottostante formazione di San Giovanni Bianco. Considerata questa incertezza si è preferito adottare un'interpretazione cautelativa indicando la presenza dell'unità geomeccanica più debole, ossia l'Unità San Giovanni Bianco in facies evaporitica. Per questo tratto sono previsti, in fase esecutiva, sondaggi in avanzamento a carotaggio continuo in modo da eliminare le incertezze descritte.

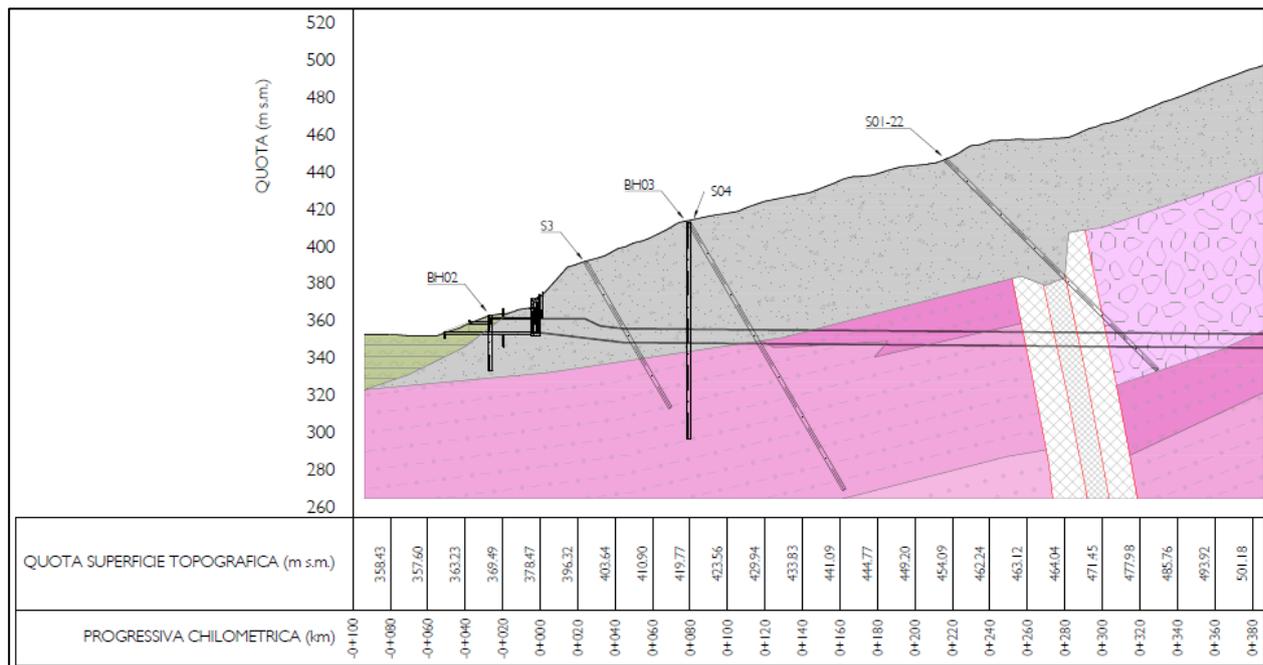


Figura 4 – Stralcio profilo Geotecnico-Geomeccanico nel tratto compreso tra l'imbocco lato Idro a la progressiva 0+380 circa.

Sulla base delle indagini in sito e delle prove di laboratorio condotte, come detto, nel corso delle diverse campagne d'indagine citate sono stati definiti i parametri di resistenza e deformabilità della matrice roccia e degli ammassi rocciosi, riportati alle pagine che seguono. Per facilitare la lettura, i risultati delle indagini e prove citate sono allegati al §6. della presente relazione.

## 5.1.1 San Giovanni Bianco in facies evaporitica (SGB<sub>evap</sub>)

SGB<sub>evap</sub> – Matrice roccia

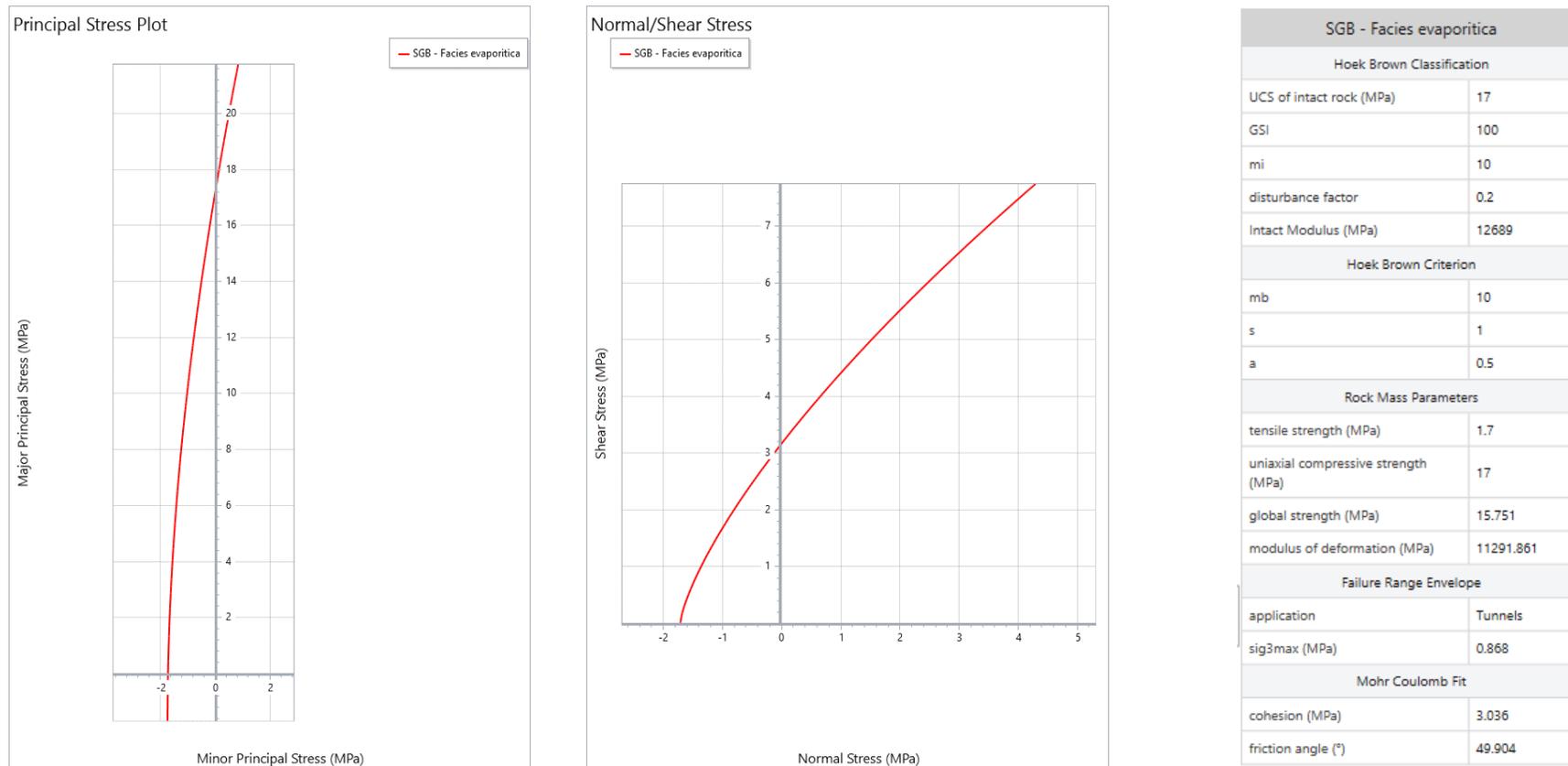
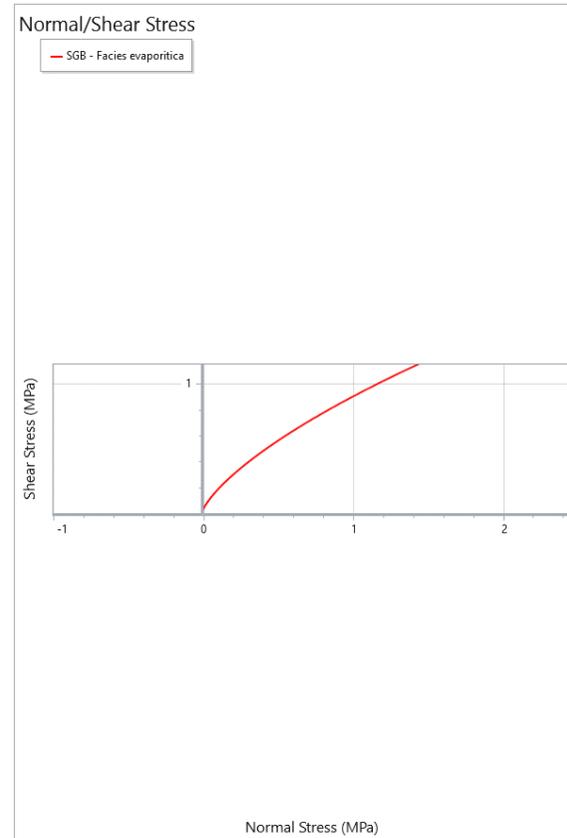
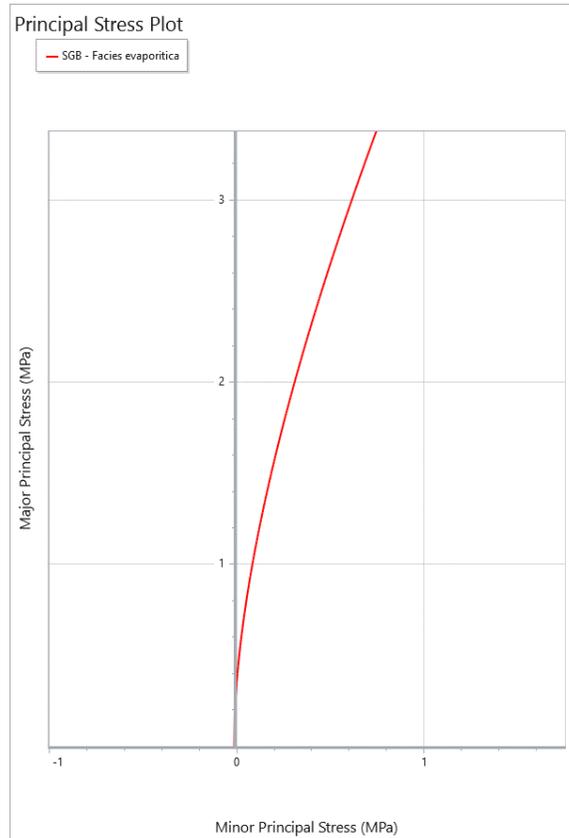


Figura 5 – Caratterizzazione geomeccanica della matrice roccia

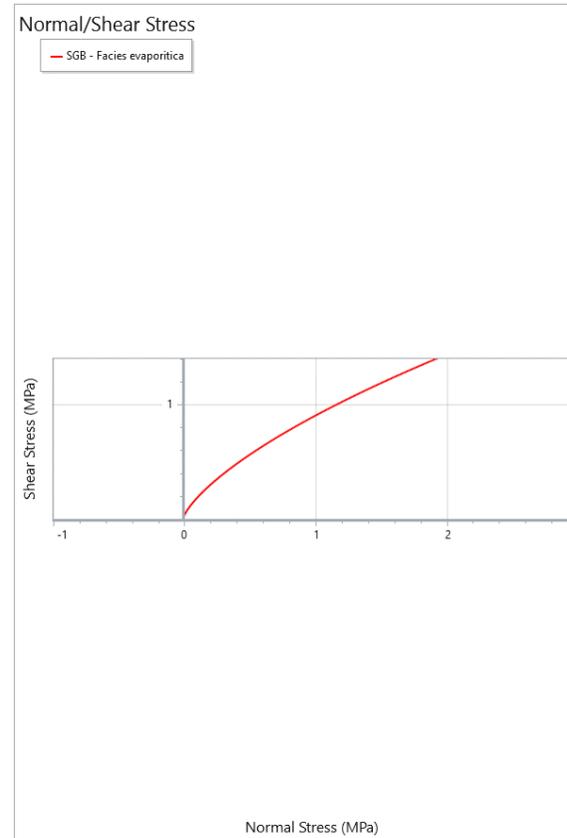
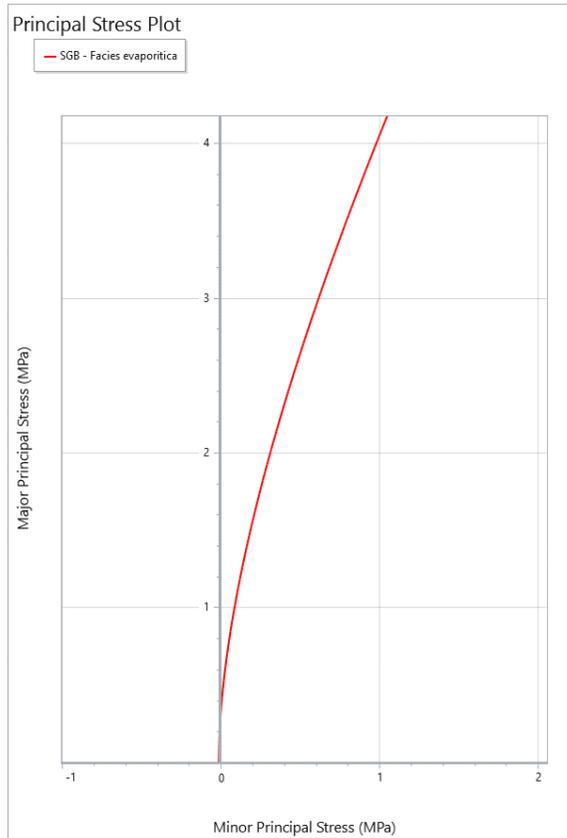
SGB<sub>evap</sub> – GSI = 30 e Tunnel depth pari a 75 m



SGB - Facies evaporitica	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	17
GSI	30
mi	10
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	12689
Hoek Brown Criterion	
mb	0.622
s	0.00024
a	0.522
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.007
uniaxial compressive strength (MPa)	0.219
global strength (MPa)	1.609
modulus of deformation (MPa)	795.388
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	0.757
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.172
friction angle (°)	35.71

Figura 6 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 30 e Tunnel depth pari a 75 m

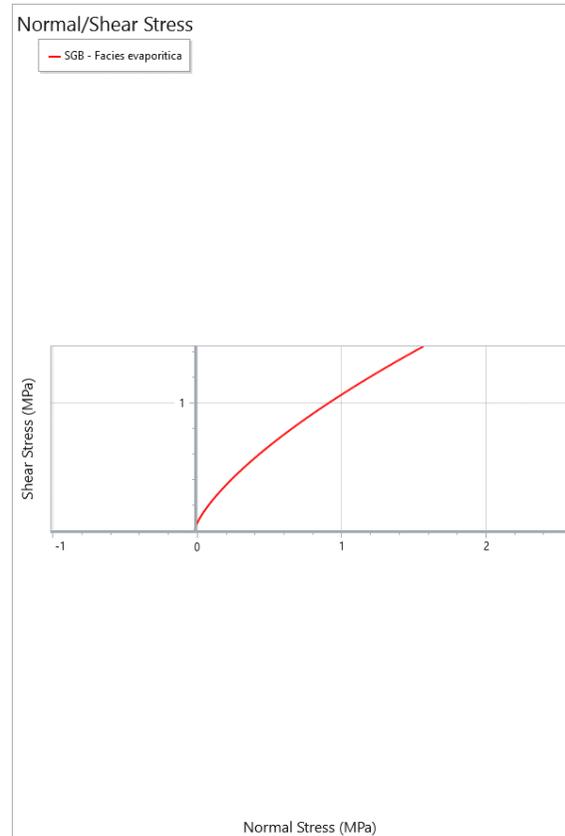
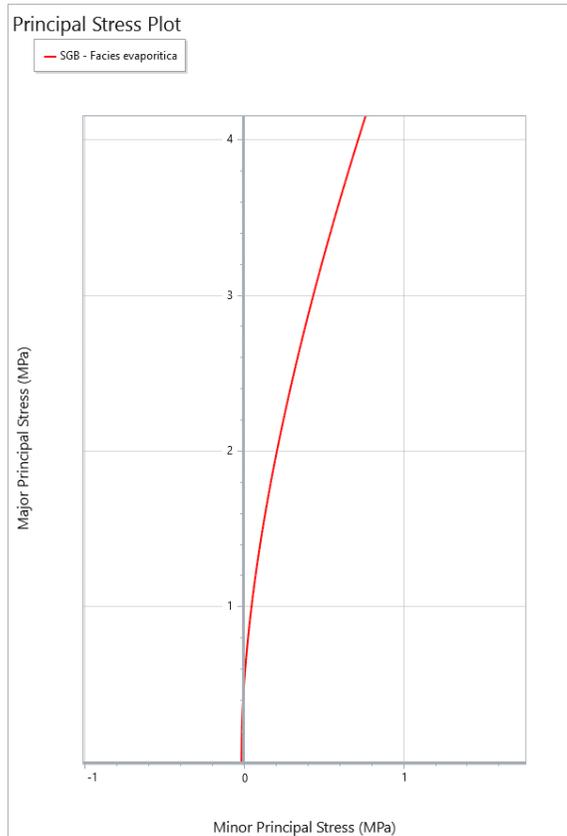
$SGB_{evap} - GSI = 30$  e Tunnel depth pari a 100 m



SGB - Facies evaporitica	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	17
GSI	30
mi	10
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	12689
Hoek Brown Criterion	
mb	0.622
s	0.00024
a	0.522
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.007
uniaxial compressive strength (MPa)	0.219
global strength (MPa)	1.609
modulus of deformation (MPa)	795.388
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	1.058
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.215
friction angle (°)	32.998

Figura 7 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 30 e Tunnel depth pari a 100 m

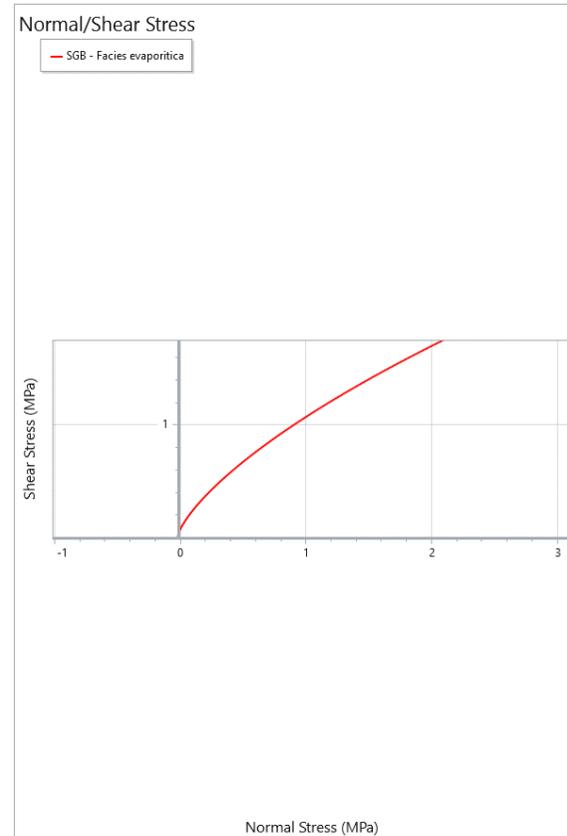
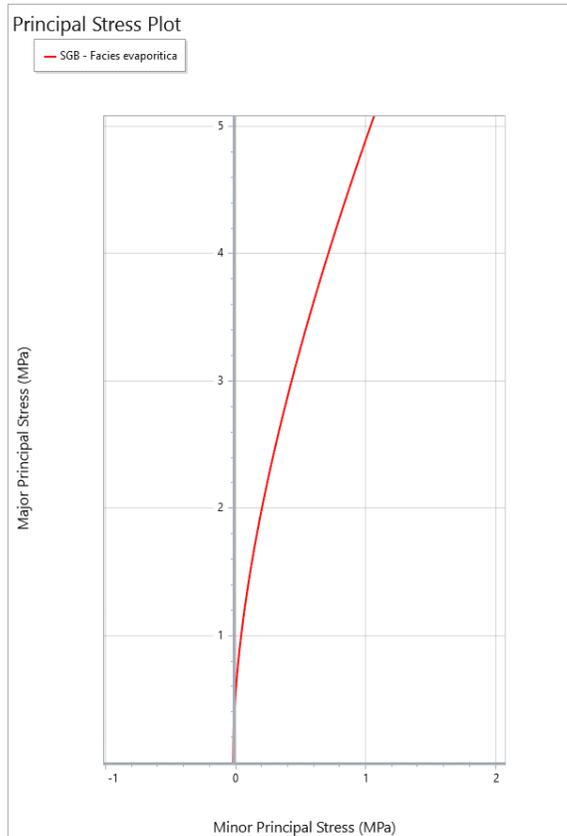
$SGB_{evap} - GSI = 40$  e Tunnel depth pari a 75 m



SGB - Facies evaporitica	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	17
GSI	40
mi	10
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	12689
Hoek Brown Criterion	
mb	0.925
s	0.00079
a	0.511
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.015
uniaxial compressive strength (MPa)	0.441
global strength (MPa)	2.095
modulus of deformation (MPa)	1509.803
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	0.769
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.218
friction angle (°)	39.49

Figura 8 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 40 e Tunnel depth pari a 75 m

$SGB_{evap} - GSI = 40$  e Tunnel depth pari a 100 m



SGB - Facies evaporitica	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	17
GSI	40
mi	10
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	12689
Hoek Brown Criterion	
mb	0.925
s	0.00079
a	0.511
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.015
uniaxial compressive strength (MPa)	0.441
global strength (MPa)	2.095
modulus of deformation (MPa)	1509.803
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	1.075
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.27
friction angle (°)	36.716

Figura 9 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 40 e Tunnel depth pari a 100 m

## 5.1.2 San Giovanni Bianco in facies terrosa (SGB<sub>ter</sub>)

SGB<sub>ter</sub> – Matrice roccia

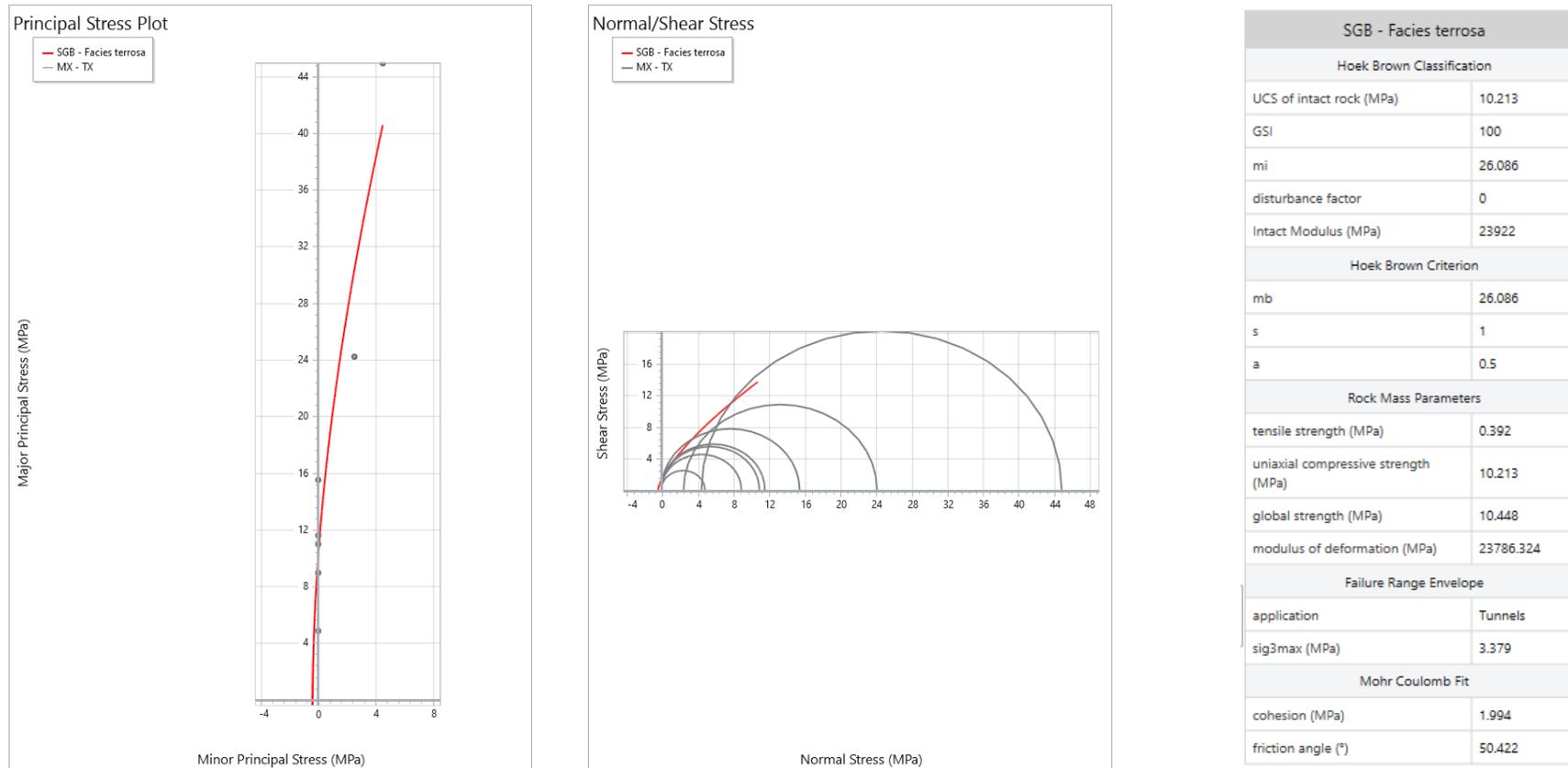


Figura 10 – Caratterizzazione geomeccanica della matrice roccia

$SGB_{ter} - GSI = 50$  e Tunnel depth pari a 100 m

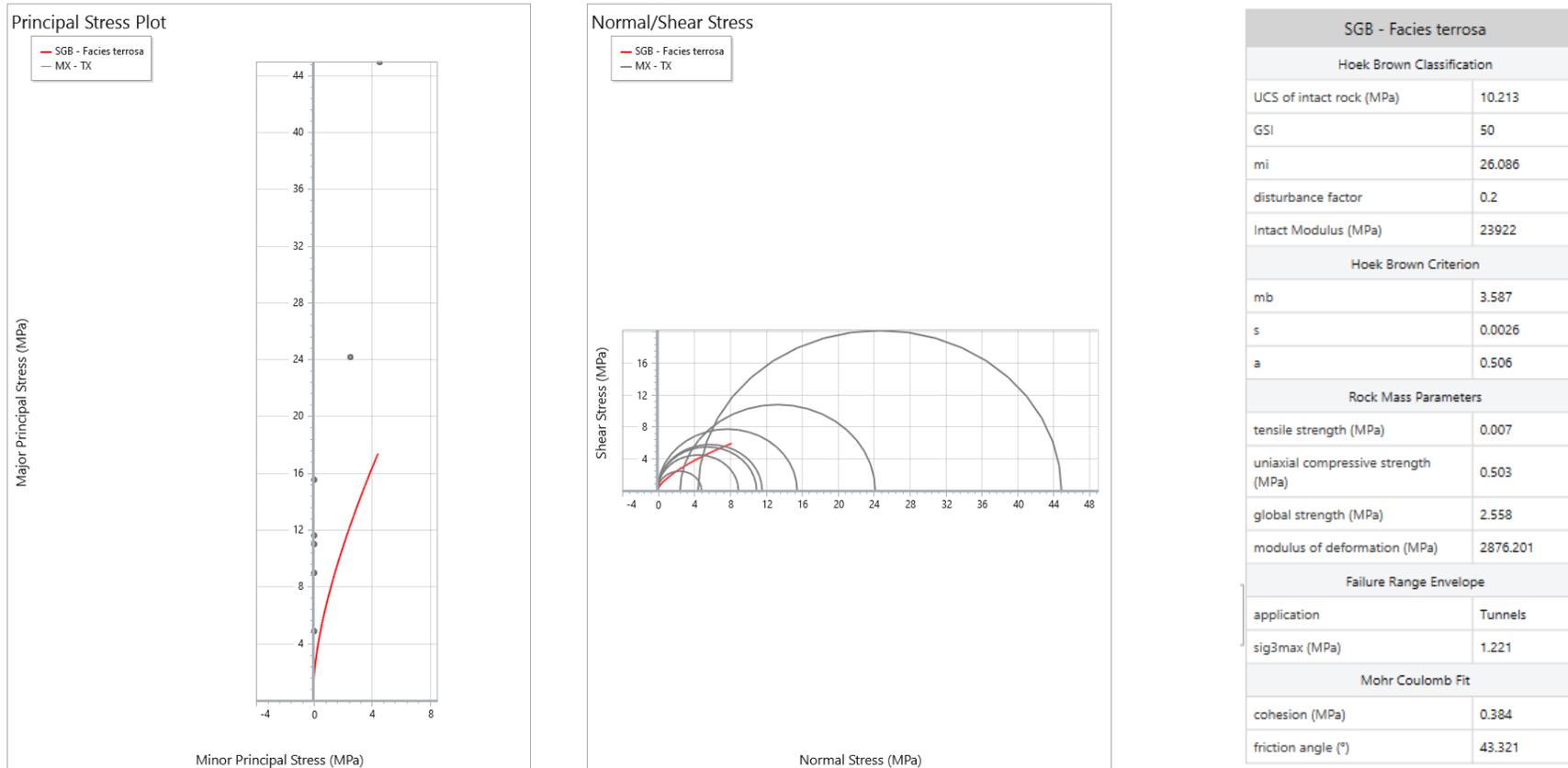


Figura 11 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 50 e Tunnel depth pari a 100 m

$SGB_{ter} - GSI = 50$  e Tunnel depth pari a 110 m

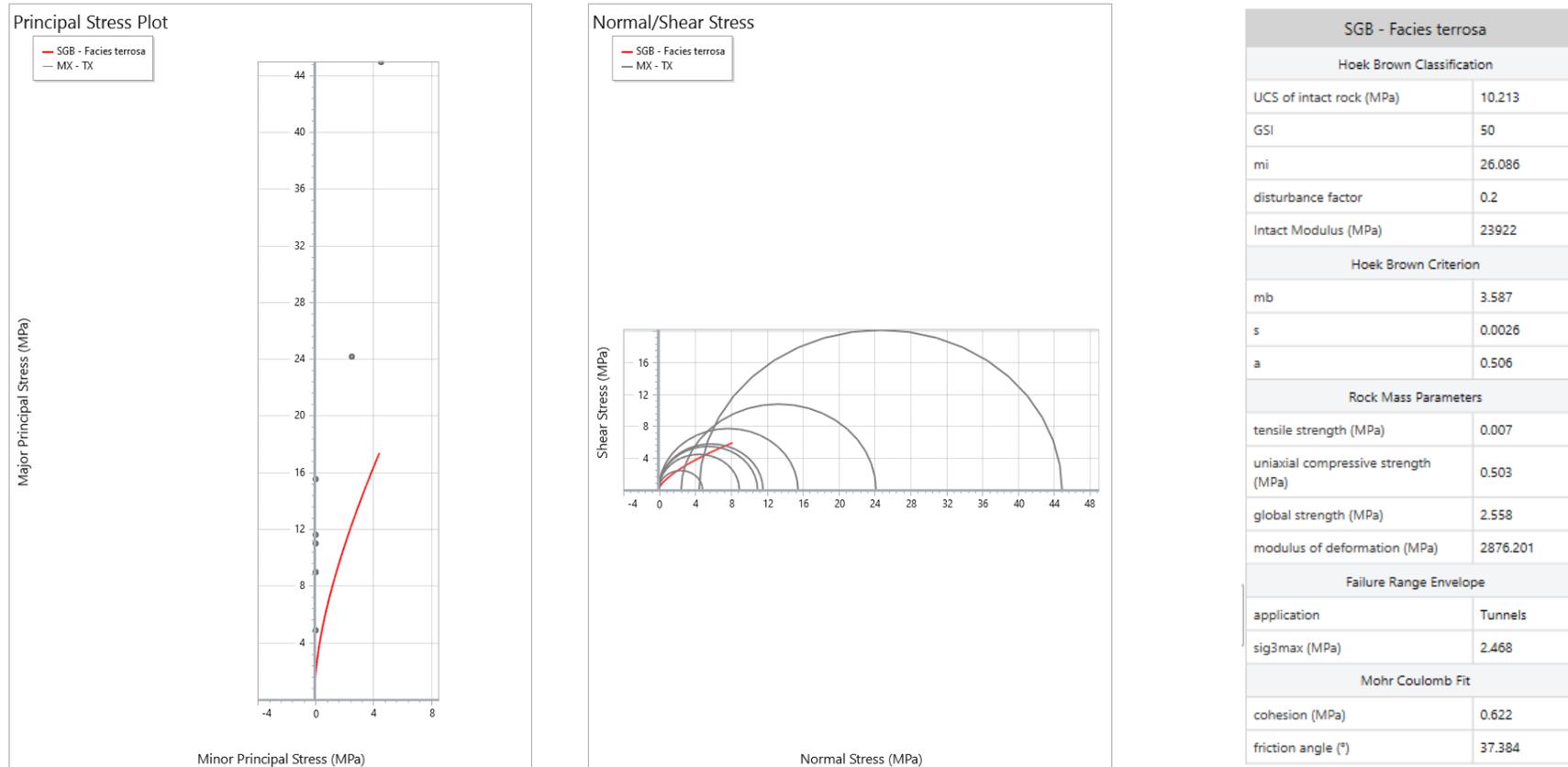


Figura 12 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 50 e Tunnel depth pari a 110 m

$SGB_{ter} - GSI = 55$  e Tunnel depth pari a 100 m

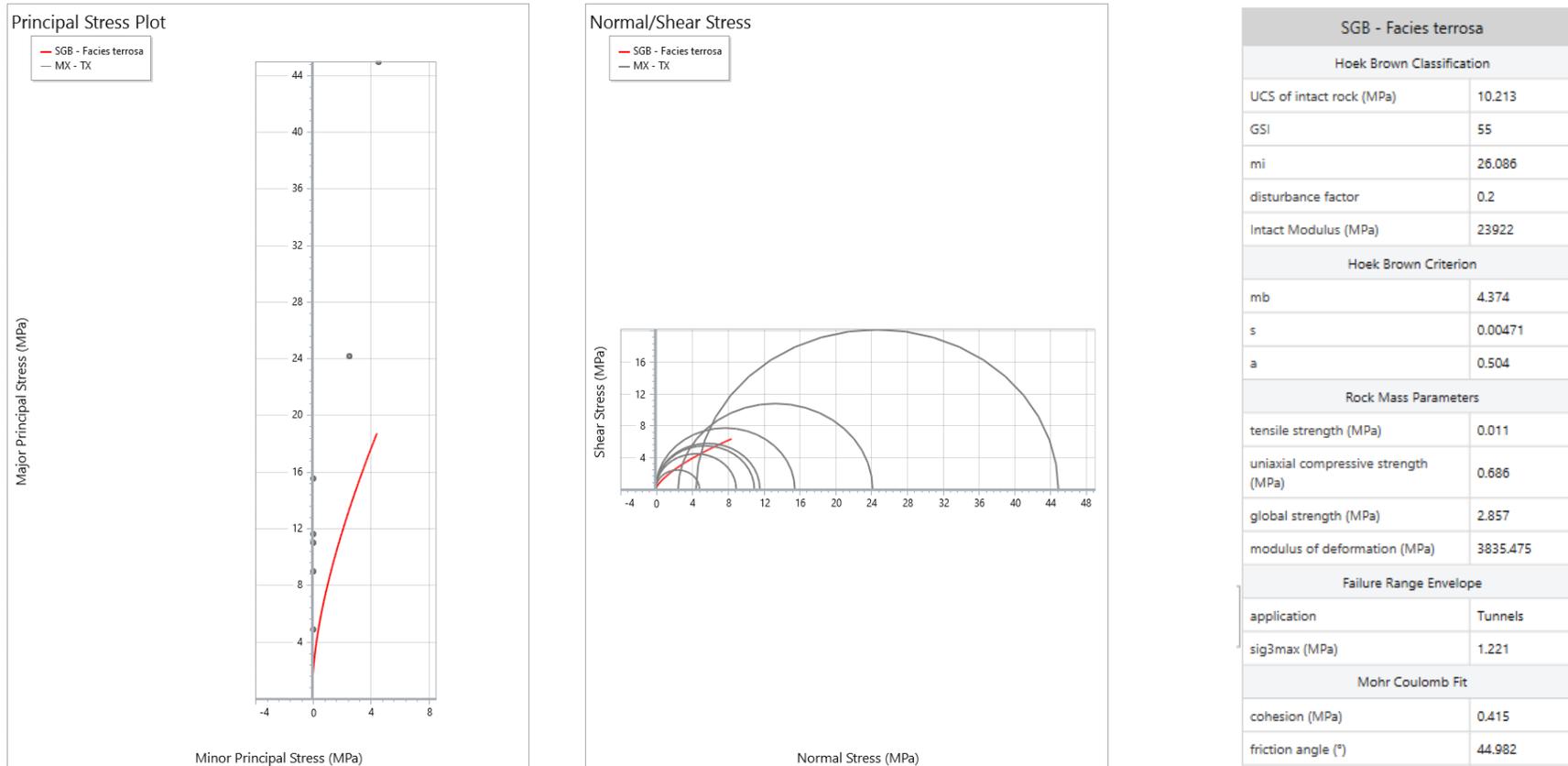


Figura 13 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 55 e Tunnel depth pari a 100 m

$SGB_{ter} - GSI = 55$  e Tunnel depth pari a 110 m

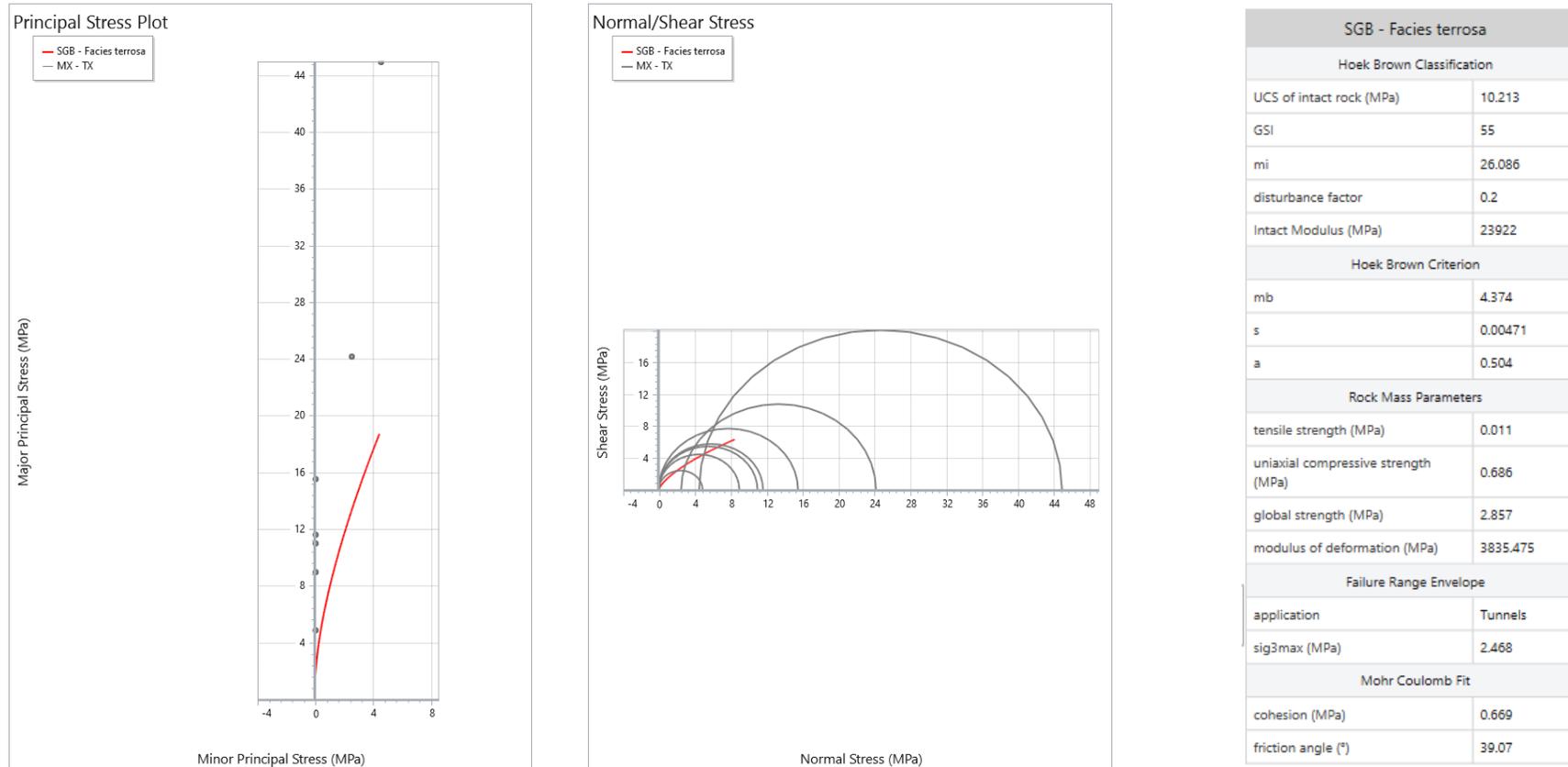


Figura 14 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 55 e Tunnel depth pari a 110 m

### 5.1.3 Intorno Faglia - San Giovanni Bianco in facies terrosa (SGB<sub>ter</sub>)

Intorno faglia (SGB<sub>ter</sub>) – GSI = 30 e Tunnel depth pari a 110 m

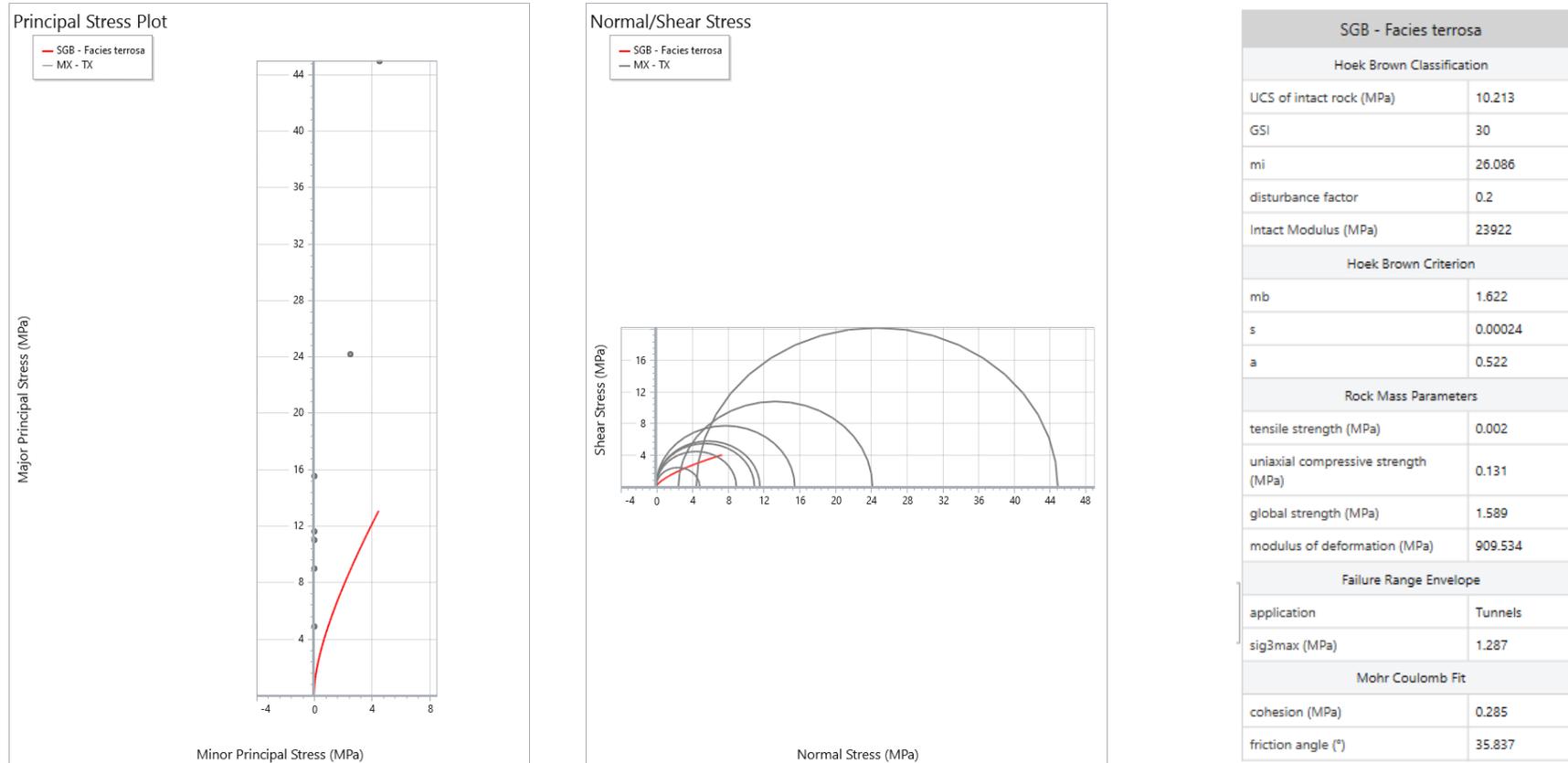


Figura 15 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 30 e Tunnel depth pari a 110 m

Intorno faglia (SGB<sub>ter</sub>) – GSI = 35 e Tunnel depth pari a 110 m

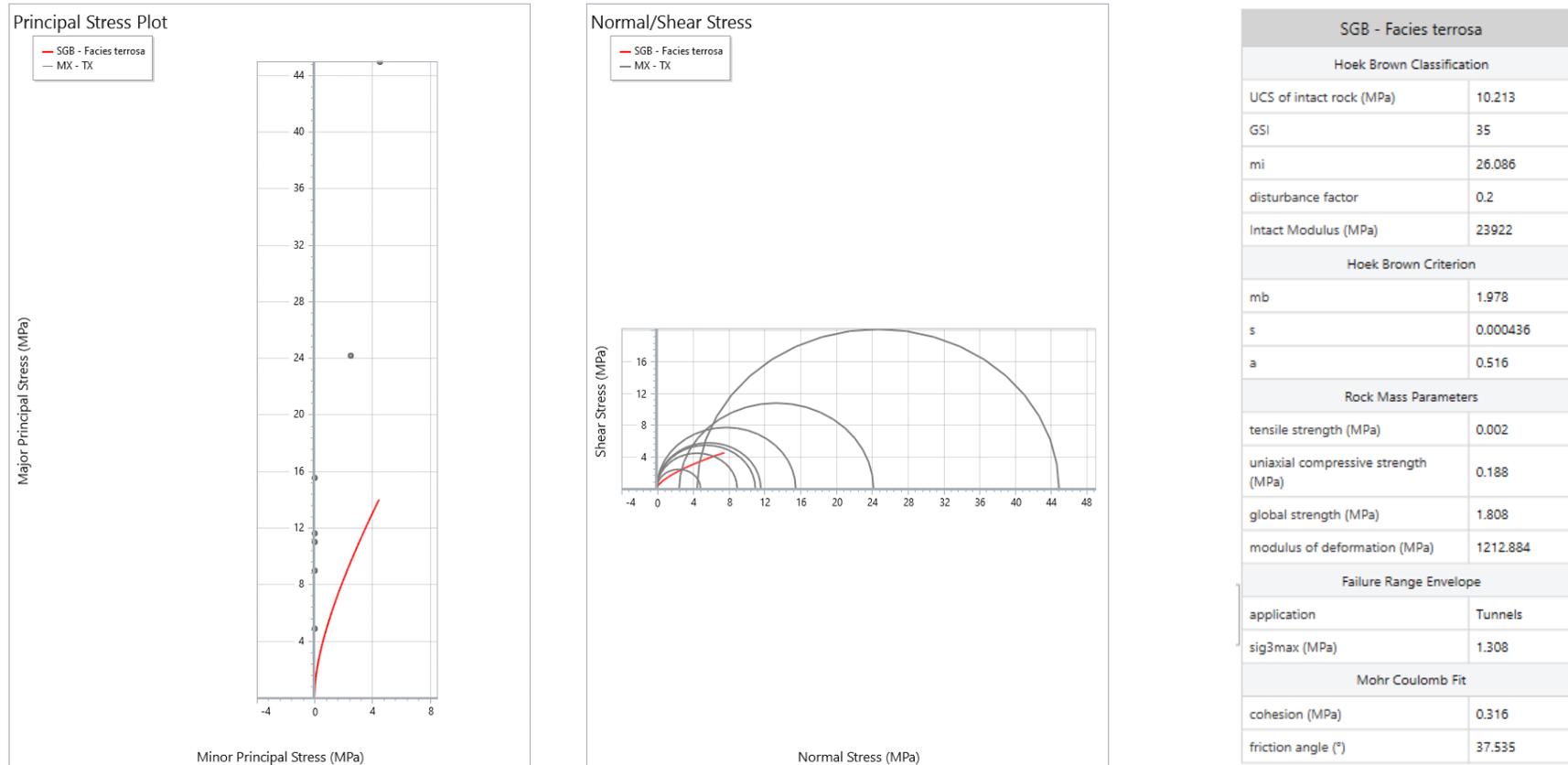


Figura 16 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 35 e Tunnel depth pari a 110 m

## 5.1.4 Nucleo Faglia

Nucleo faglia – GSI = 20 e Tunnel depth pari a 100 m

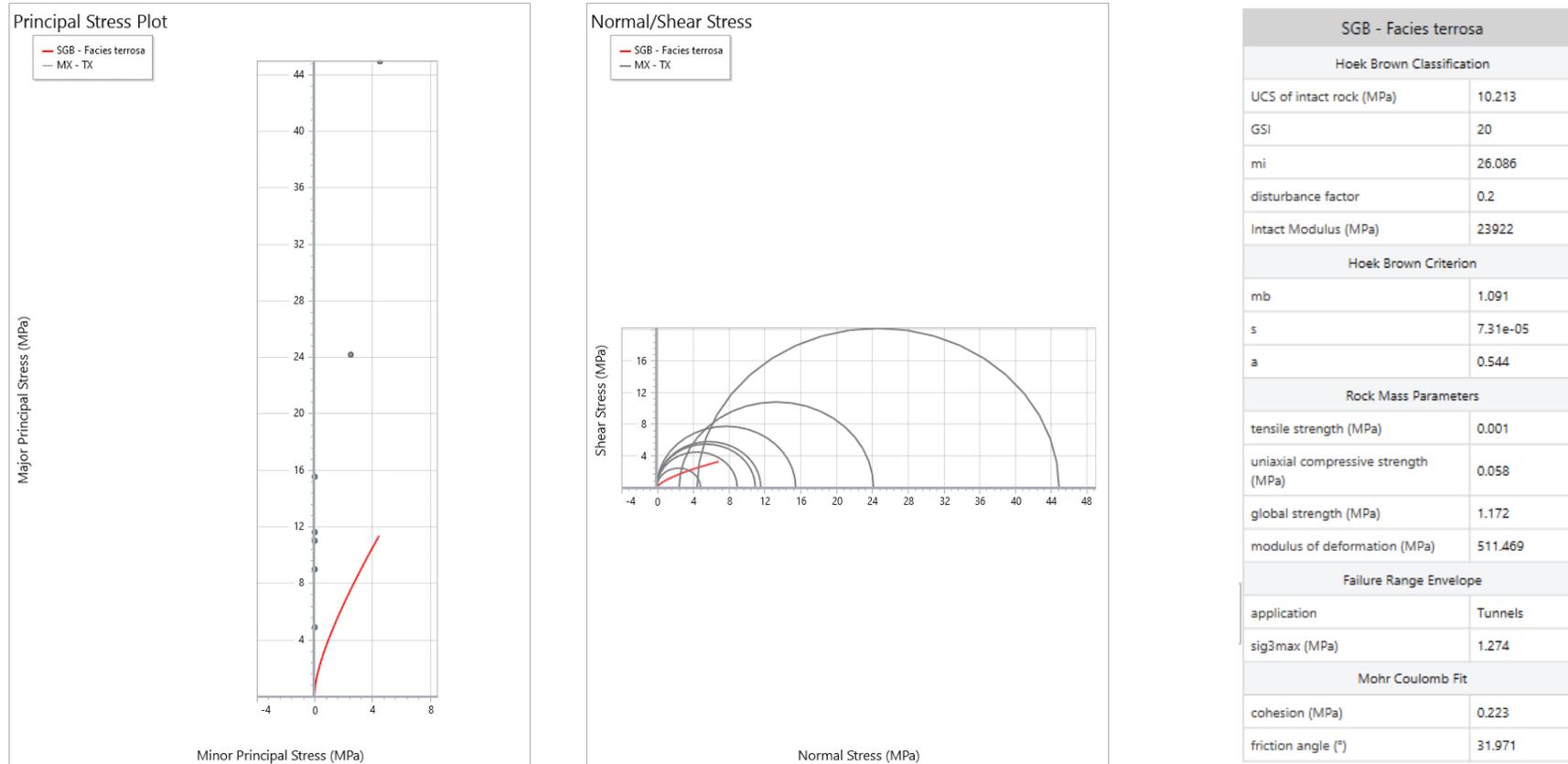
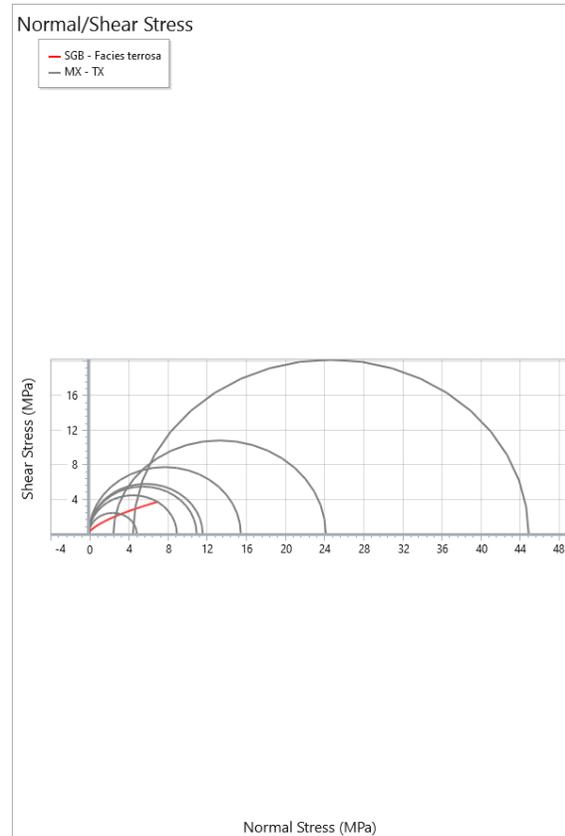
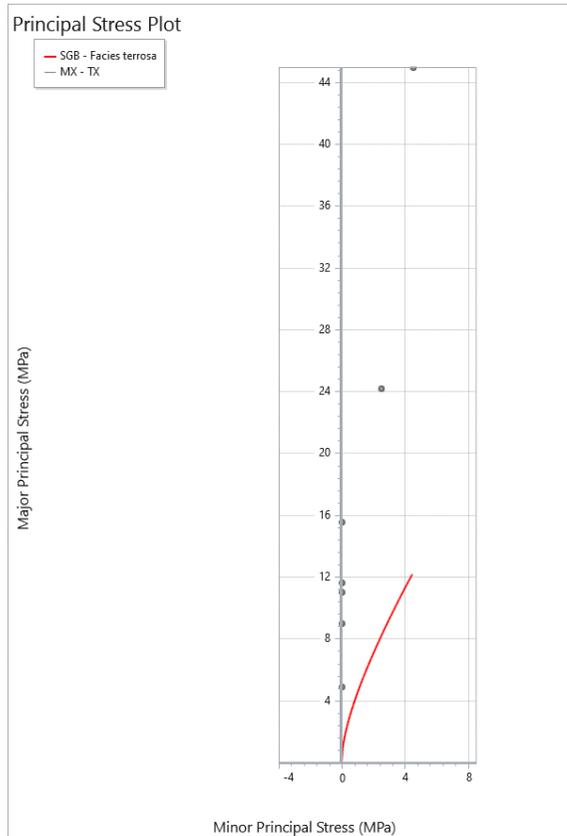


Figura 17 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 20 e Tunnel depth pari a 100 m

Nucleo faglia – GSI = 25 e Tunnel depth pari a 100 m

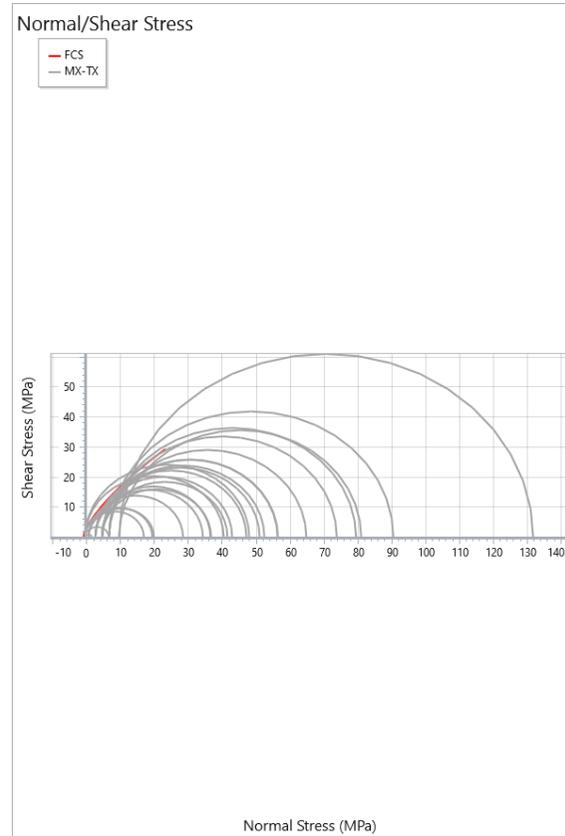
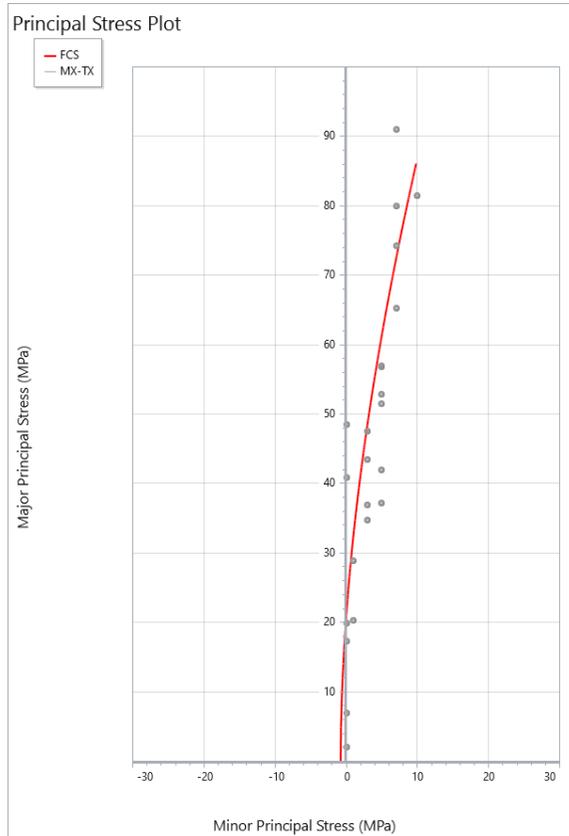


SGB - Facies terrosa	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	10.213
GSI	25
mi	26.086
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	23922
Hoek Brown Criterion	
mb	1.33
s	0.000133
a	0.531
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.001
uniaxial compressive strength (MPa)	0.089
global strength (MPa)	1.378
modulus of deformation (MPa)	682.055
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	1.287
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.255
friction angle (°)	33.925

Figura 18 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 25 e Tunnel depth pari a 100 m

### 5.1.5 Intorno Faglia – Formazione di castro Sebino (FCS)

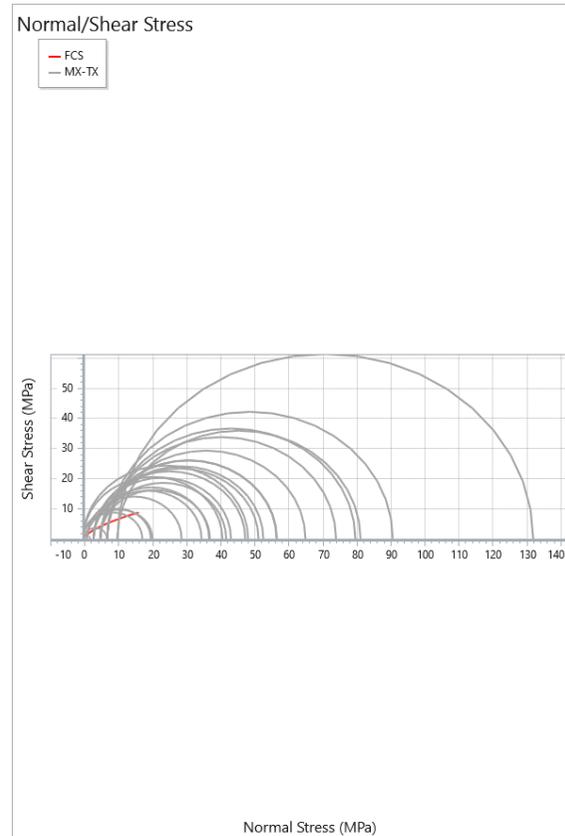
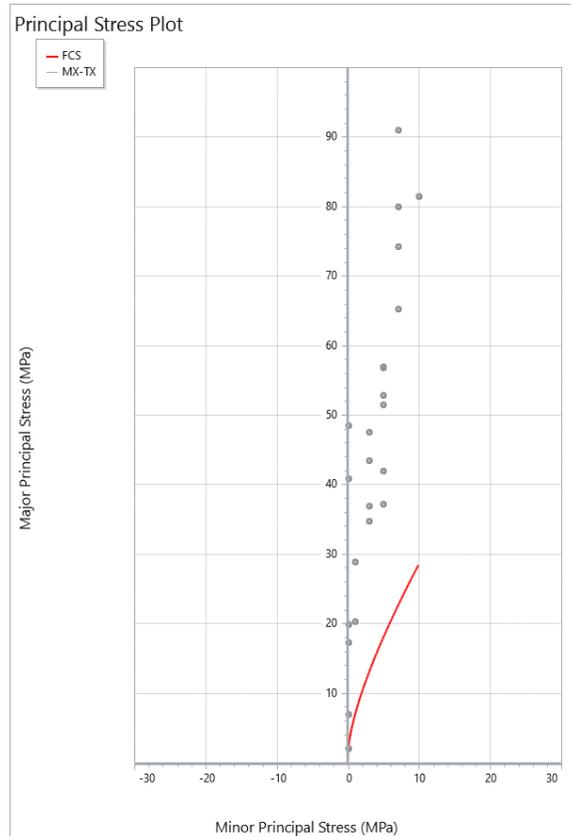
FCS – Matrice rocciosa



FCS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	18.613
GSI	100
mi	29.256
disturbance factor	0
Intact Modulus (MPa)	8196
Hoek Brown Criterion	
mb	29.256
s	1
a	0.5
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.636
uniaxial compressive strength (MPa)	18.613
global strength (MPa)	19.476
modulus of deformation (MPa)	8149.516
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	1.577
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	2.342
friction angle (°)	59.601

Figura 19 – Caratterizzazione geomeccanica della matrice roccia

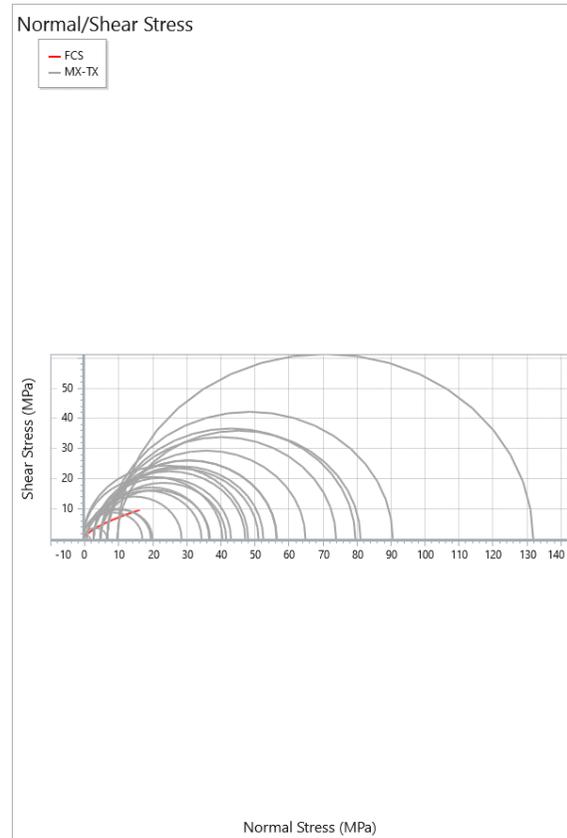
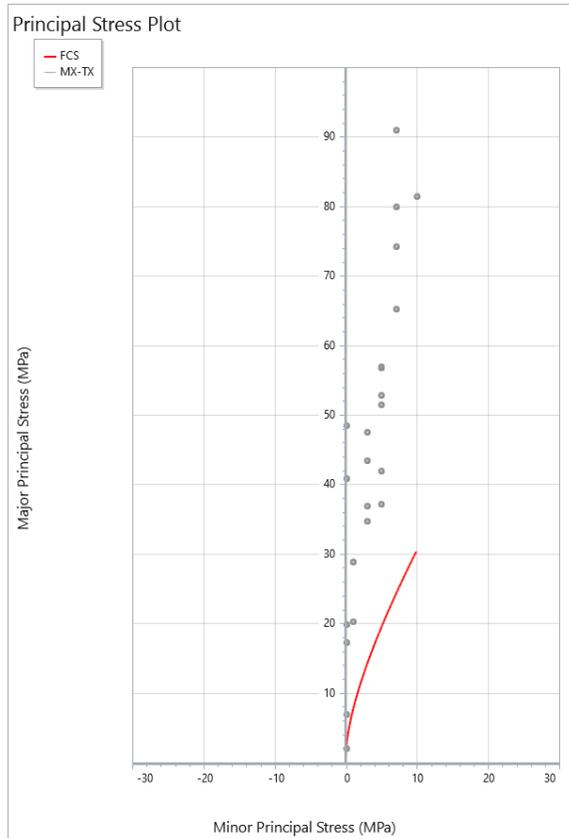
Intorno faglia (FCS) – GSI = 30 e Tunnel depth pari a 110 m



FCS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	18.613
GSI	30
mi	29.256
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	8196
Hoek Brown Criterion	
mb	1.819
s	0.00024
a	0.522
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.002
uniaxial compressive strength (MPa)	0.24
global strength (MPa)	3.074
modulus of deformation (MPa)	513.752
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	1.412
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.377
friction angle (°)	41.025

Figura 20 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 30 e Tunnel depth pari a 110 m

Intorno faglia (FCS) – GSI = 35 e Tunnel depth pari a 110 m



FCS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	18.613
GSI	35
mi	29.256
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	8196
Hoek Brown Criterion	
mb	2.218
s	0.000436
a	0.516
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.004
uniaxial compressive strength (MPa)	0.343
global strength (MPa)	3.496
modulus of deformation (MPa)	700.424
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	1.412
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.415
friction angle (°)	42.886

Figura 21 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 35 e Tunnel depth pari a 110 m

## 5.1.6 Formazione di castro Sebino (FCS)

FCS – GSI = 45 e Tunnel depth pari a 120 m

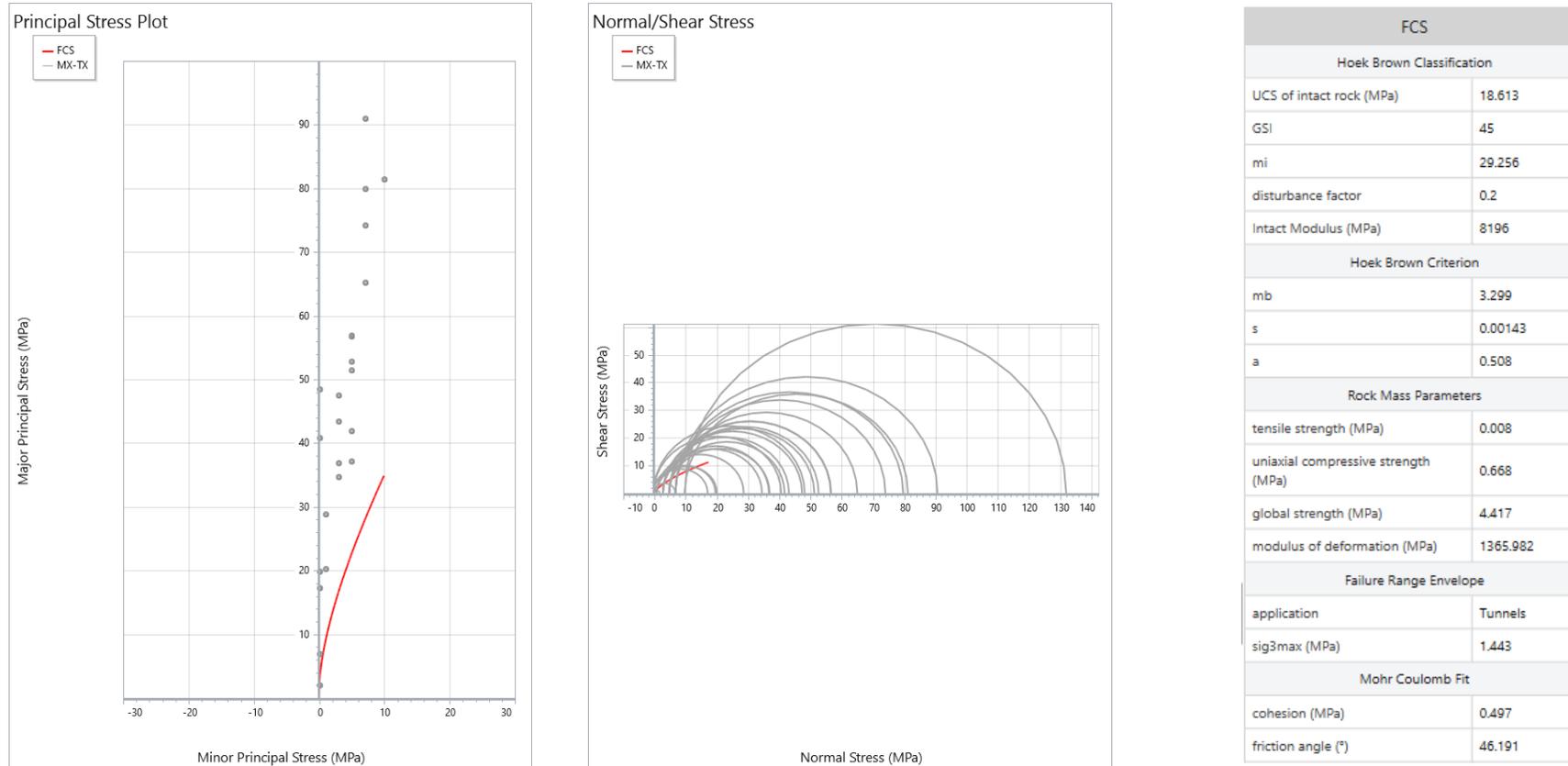
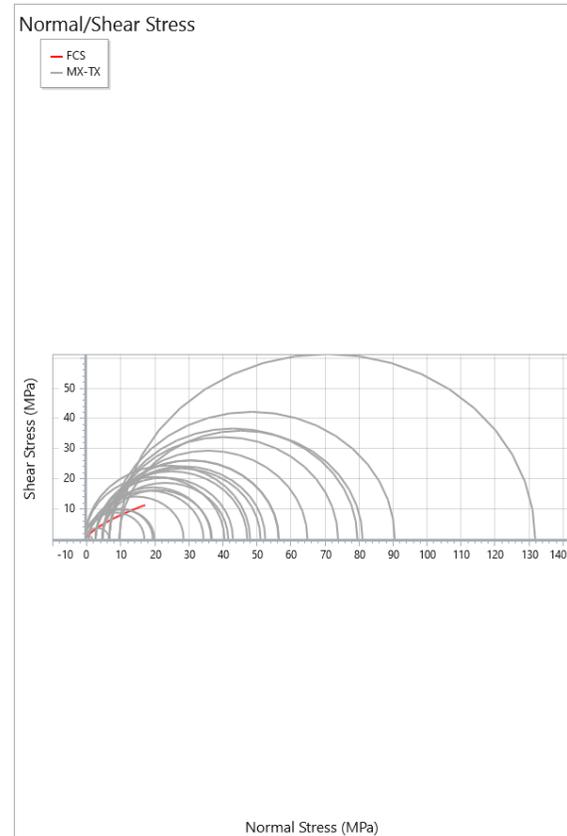
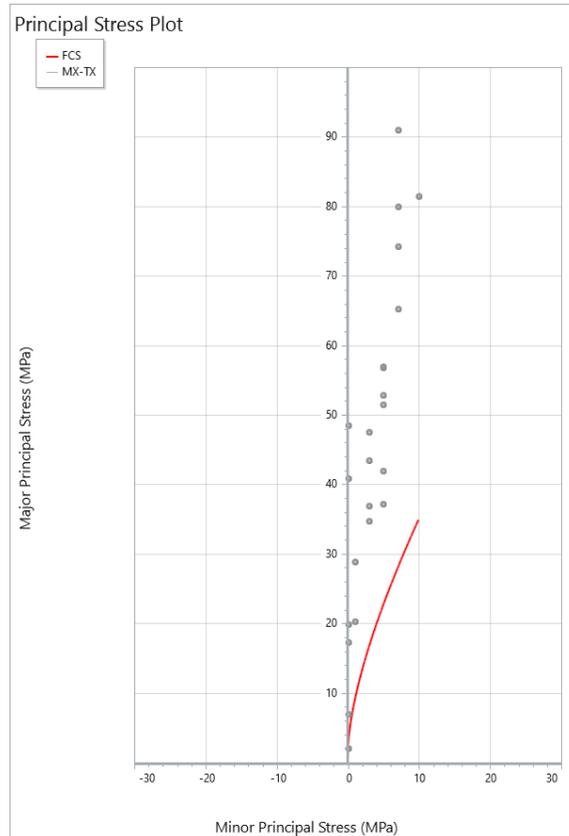


Figura 22 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 45 e Tunnel depth pari a 120 m

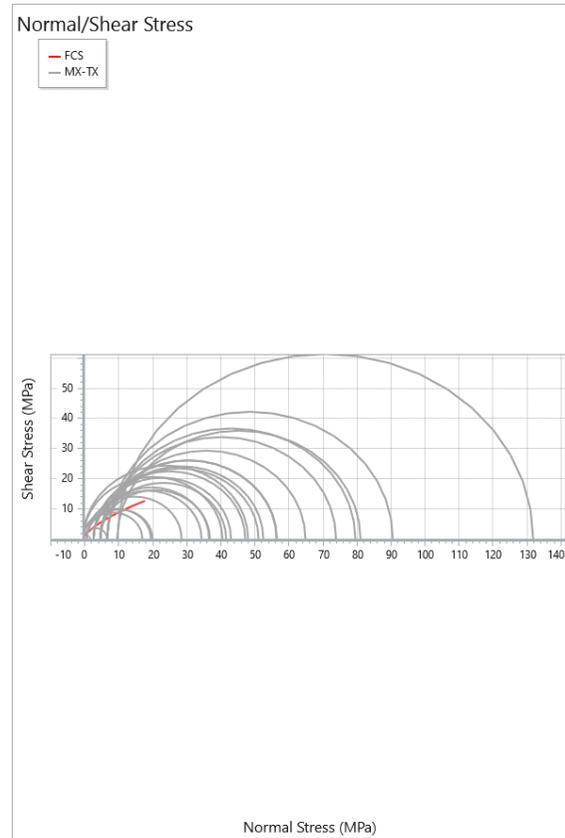
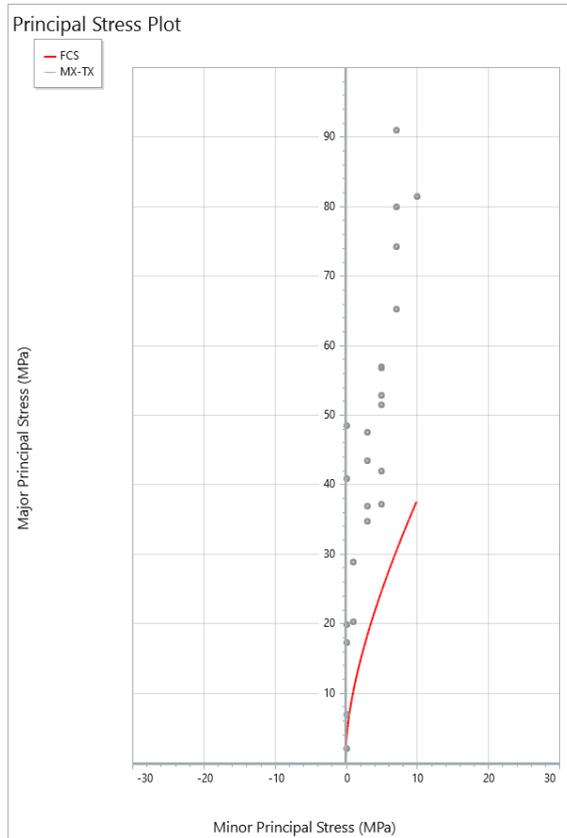
FCS – GSI = 45 e Tunnel depth pari a 150 m



FCS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	18.613
GSI	45
mi	29.256
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	8196
Hoek Brown Criterion	
mb	3.299
s	0.00143
a	0.508
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.008
uniaxial compressive strength (MPa)	0.668
global strength (MPa)	4.417
modulus of deformation (MPa)	1365.982
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	1.78
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.574
friction angle (°)	44.473

Figura 23 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 45 e Tunnel depth pari a 120 m

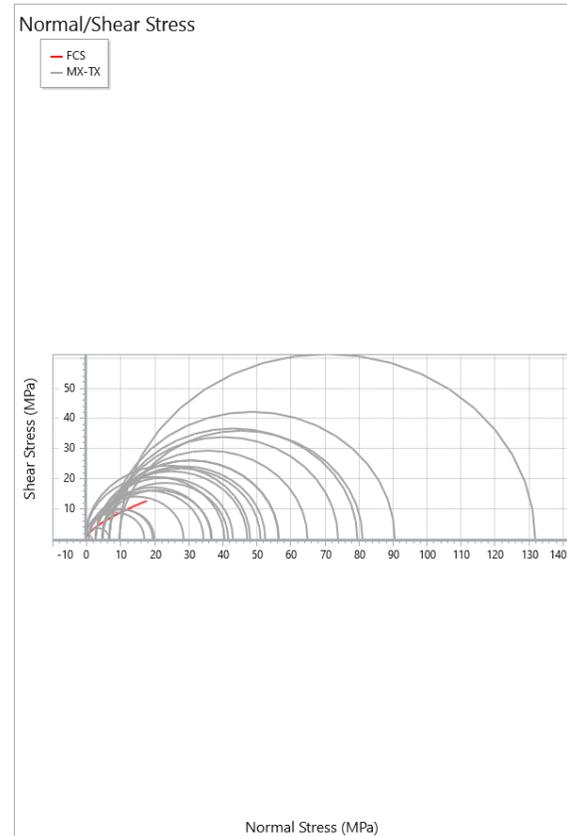
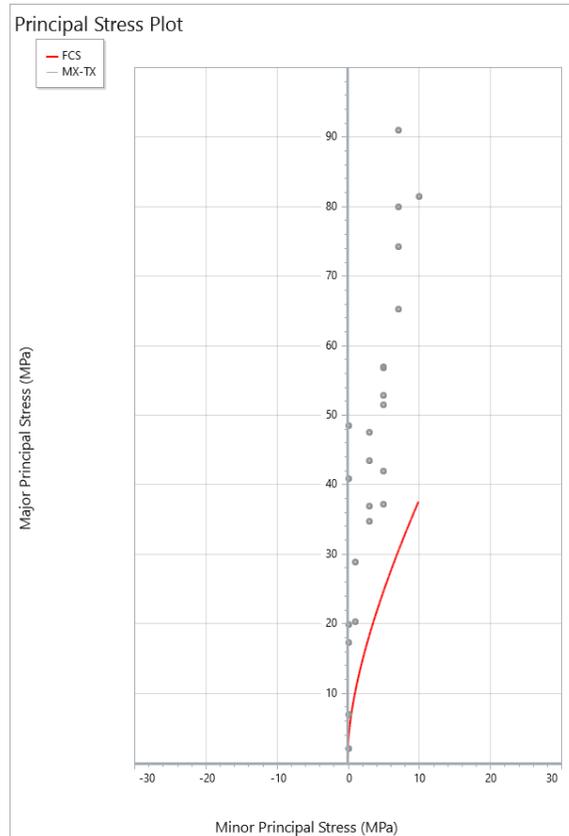
FCS – GSI = 50 e Tunnel depth pari a 120 m



FCS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	18.613
GSI	50
mi	29.256
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	8196
Hoek Brown Criterion	
mb	4.023
s	0.0026
a	0.506
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.012
uniaxial compressive strength (MPa)	0.917
global strength (MPa)	4.936
modulus of deformation (MPa)	1895.349
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	1.453
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.539
friction angle (°)	47.789

Figura 24 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 50 e Tunnel depth pari a 120 m

FCS – GSI = 50 e Tunnel depth pari a 150 m



FCS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	18.613
GSI	50
mi	29.256
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	8196
Hoek Brown Criterion	
mb	4.023
s	0.0026
a	0.506
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.012
uniaxial compressive strength (MPa)	0.917
global strength (MPa)	4.936
modulus of deformation (MPa)	1895.349
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	1.792
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.623
friction angle (°)	46.09

Figura 25 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 50 e Tunnel depth pari a 150 m

### 5.1.7 San Giovanni Bianco in facies evaporitica (SGB<sub>evap</sub>)

SGB<sub>evap</sub> – GSI = 30 e Tunnel depth pari a 150 m

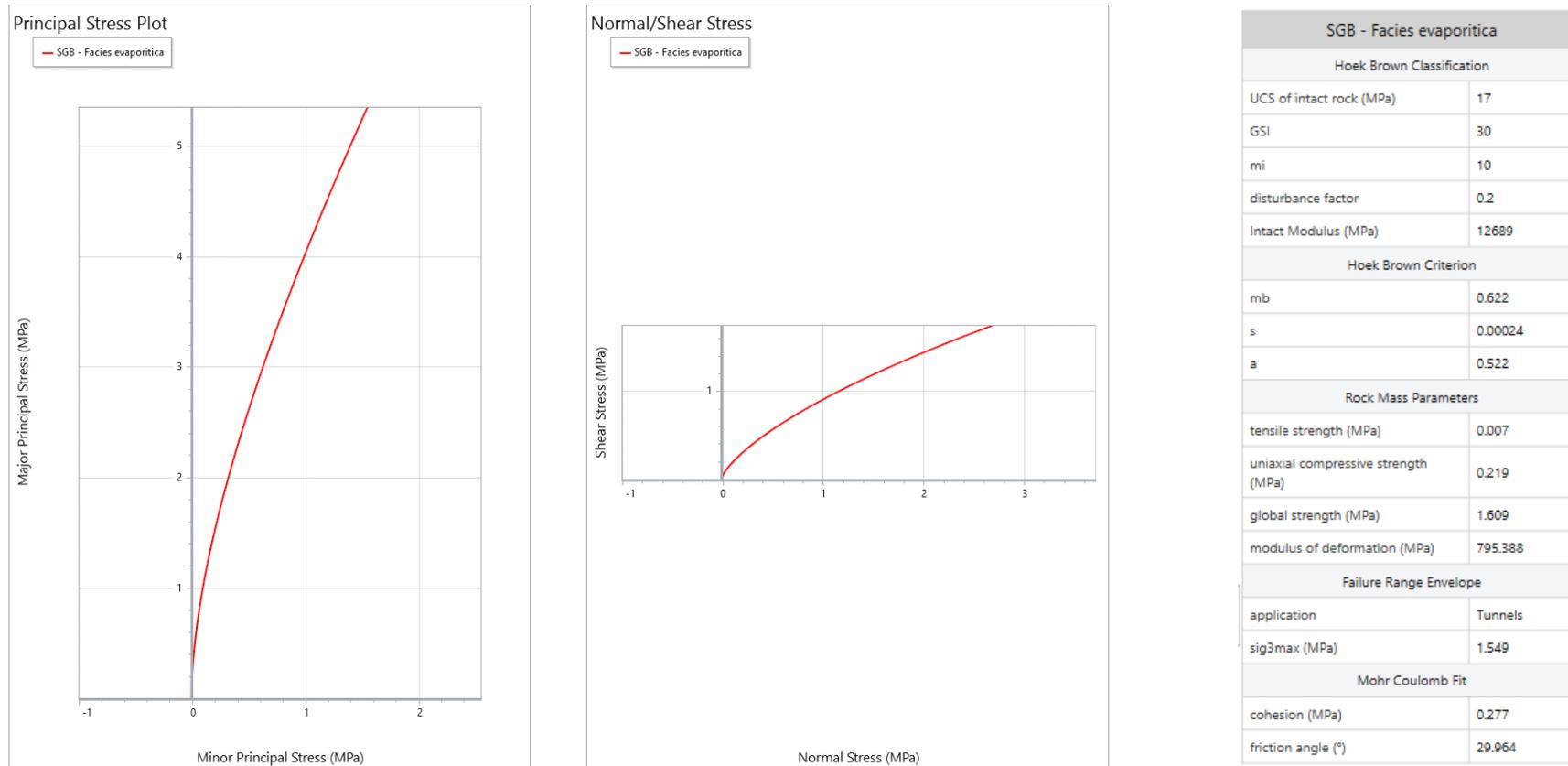
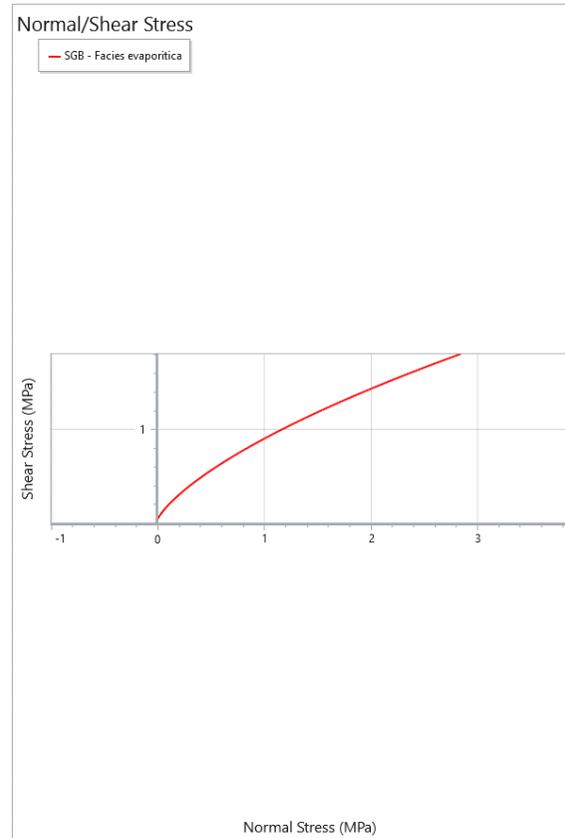
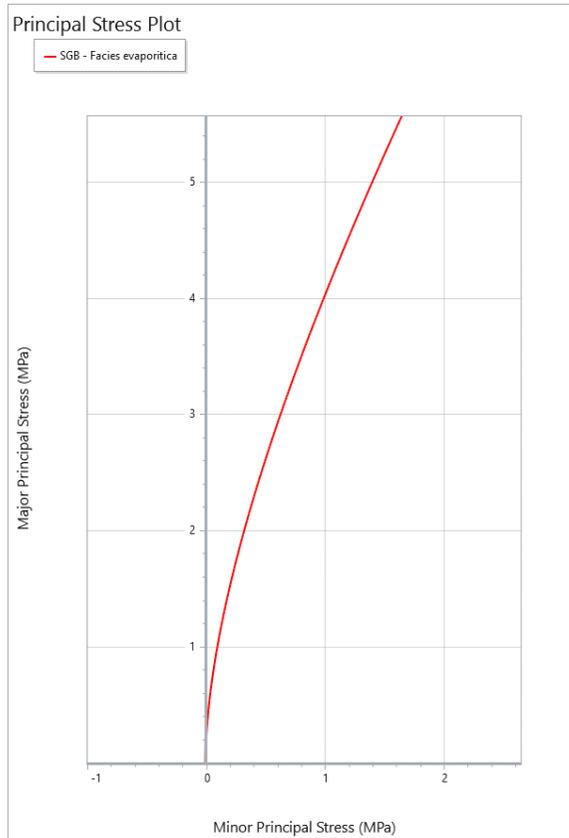


Figura 26 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 30 e Tunnel depth pari a 150 m

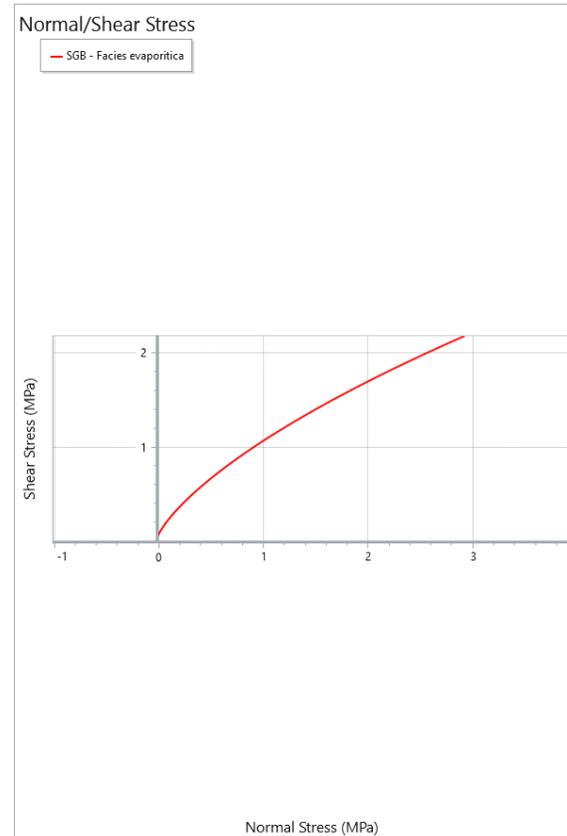
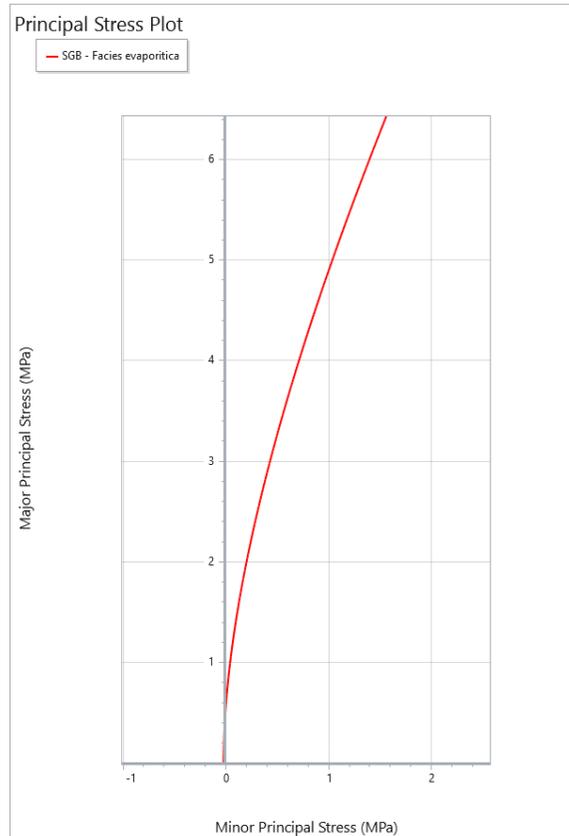
$SGB_{evap} - GSI = 30$  e Tunnel depth pari a 160 m



SGB - Facies evaporitica	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	17
GSI	30
mi	10
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	12689
Hoek Brown Criterion	
mb	0.622
s	0.00024
a	0.522
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.007
uniaxial compressive strength (MPa)	0.219
global strength (MPa)	1.609
modulus of deformation (MPa)	795.388
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	1.646
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.289
friction angle (°)	29.488

Figura 27 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 30 e Tunnel depth pari a 160 m

$SGB_{evap} - GSI = 40$  e Tunnel depth pari a 150 m



SGB - Facies evaporitica	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	17
GSI	40
mi	10
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	12689
Hoek Brown Criterion	
mb	0.925
s	0.00079
a	0.511
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.015
uniaxial compressive strength (MPa)	0.441
global strength (MPa)	2.095
modulus of deformation (MPa)	1509.803
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	1.574
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.345
friction angle (°)	33.566

Figura 28 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 40 e Tunnel depth pari a 150 m

$SGB_{evap} - GSI = 40$  e Tunnel depth pari a 160 m

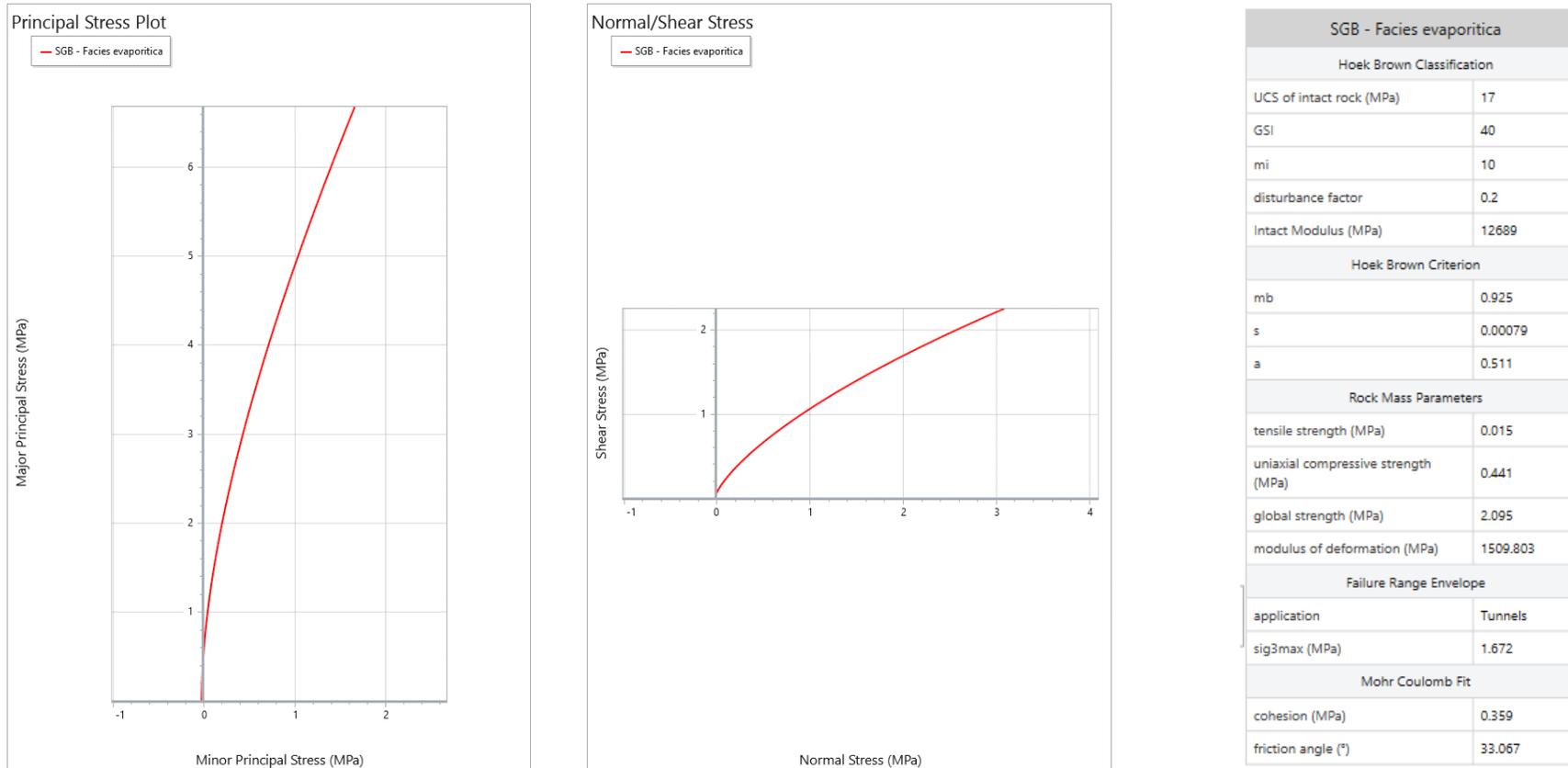


Figura 29 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 40 e Tunnel depth pari a 160 m

## 5.1.8 San Giovanni Bianco in facies terrosa ( $SGB_{ter}$ )

$SGB_{ter}$  – GSI = 50 e Tunnel depth pari a 160 m

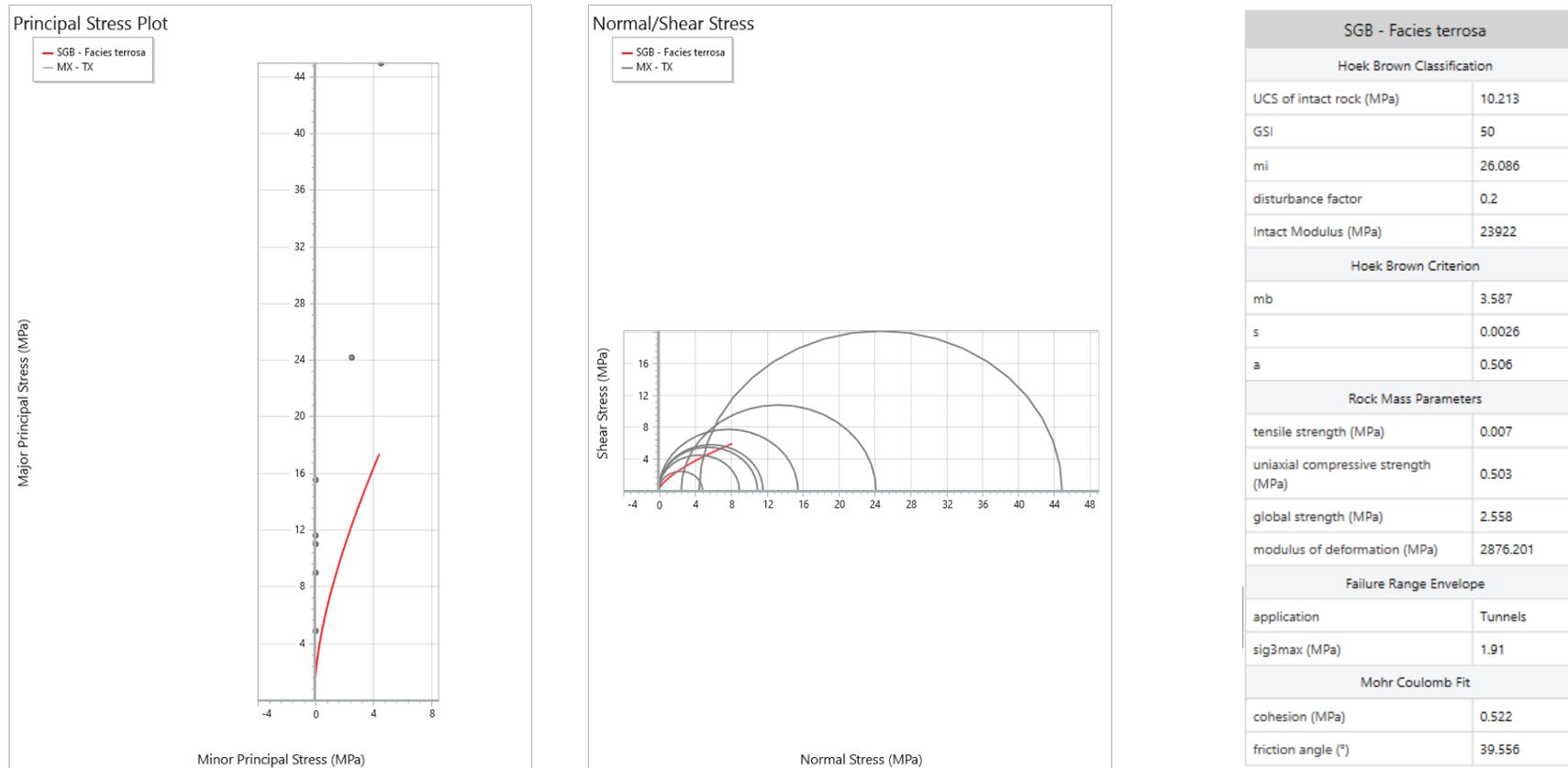


Figura 30 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 50 e Tunnel depth pari a 160 m

$SGB_{ter} - GSI = 50$  e Tunnel depth pari a 260 m

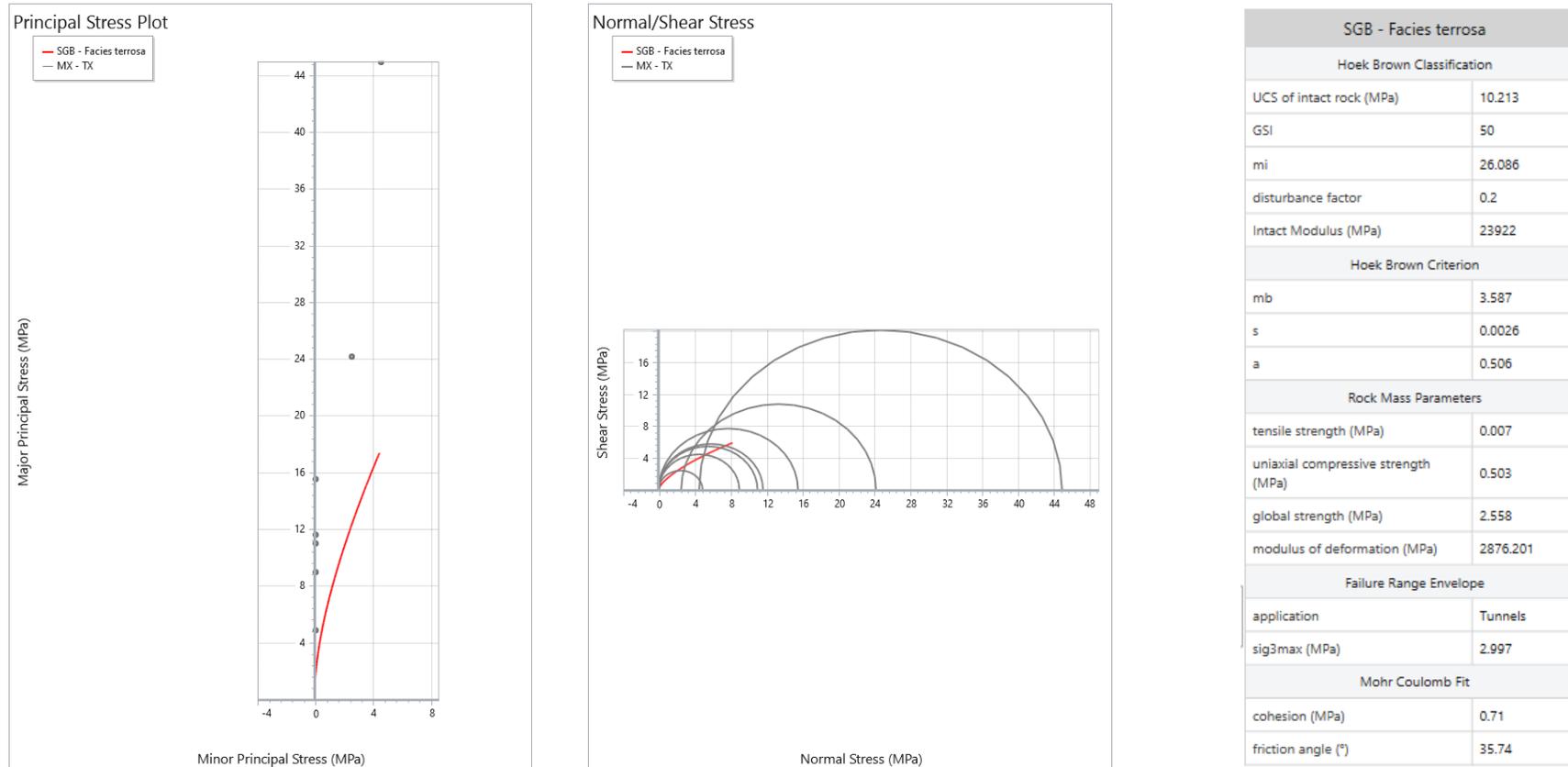


Figura 31 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 50 e Tunnel depth pari a 260 m

$SGB_{ter} - GSI = 55$  e Tunnel depth pari a 160 m

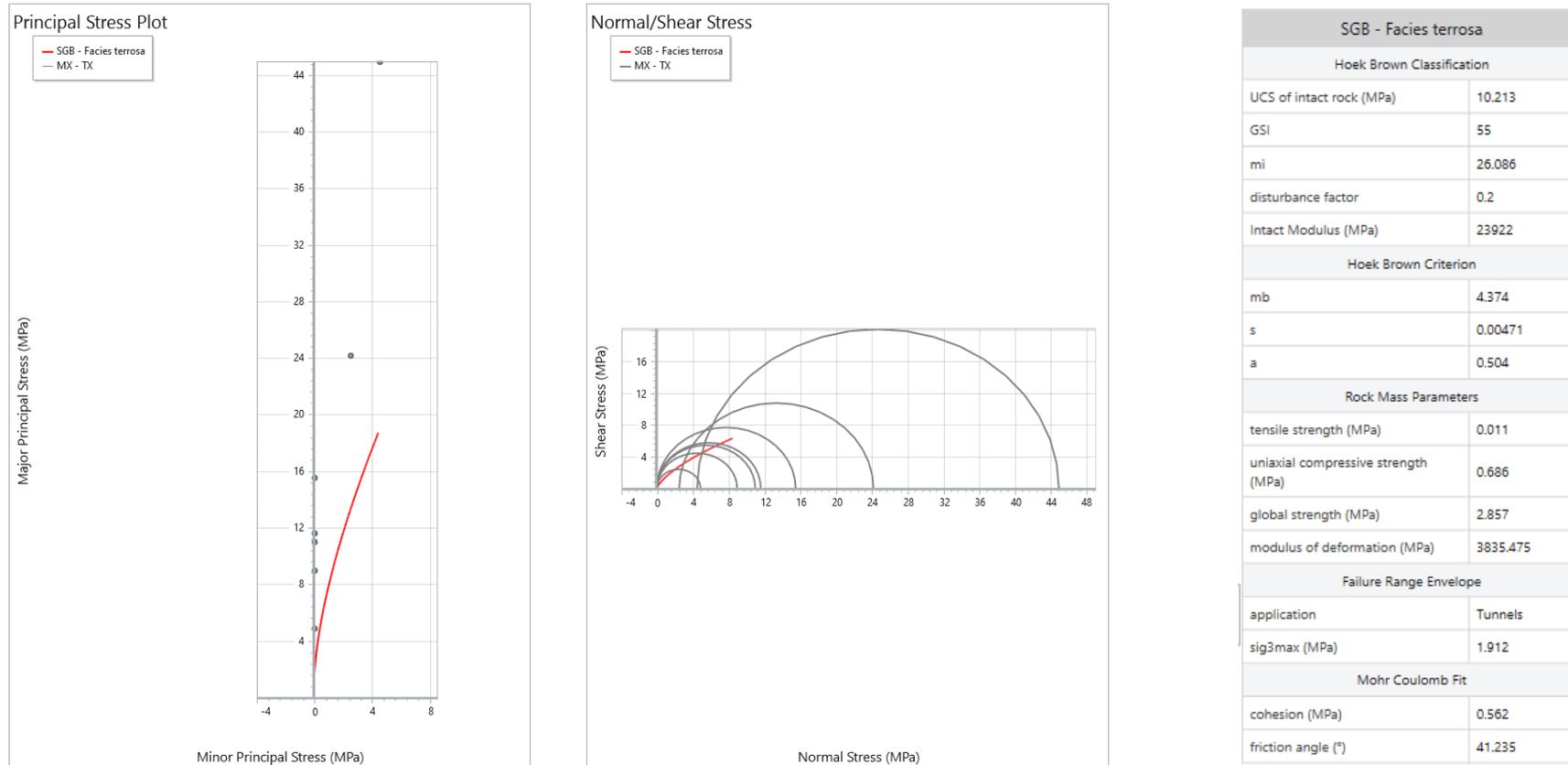


Figura 32 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 55 e Tunnel depth pari a 160 m

$SGB_{ter} - GSI = 55$  e Tunnel depth pari a 260 m

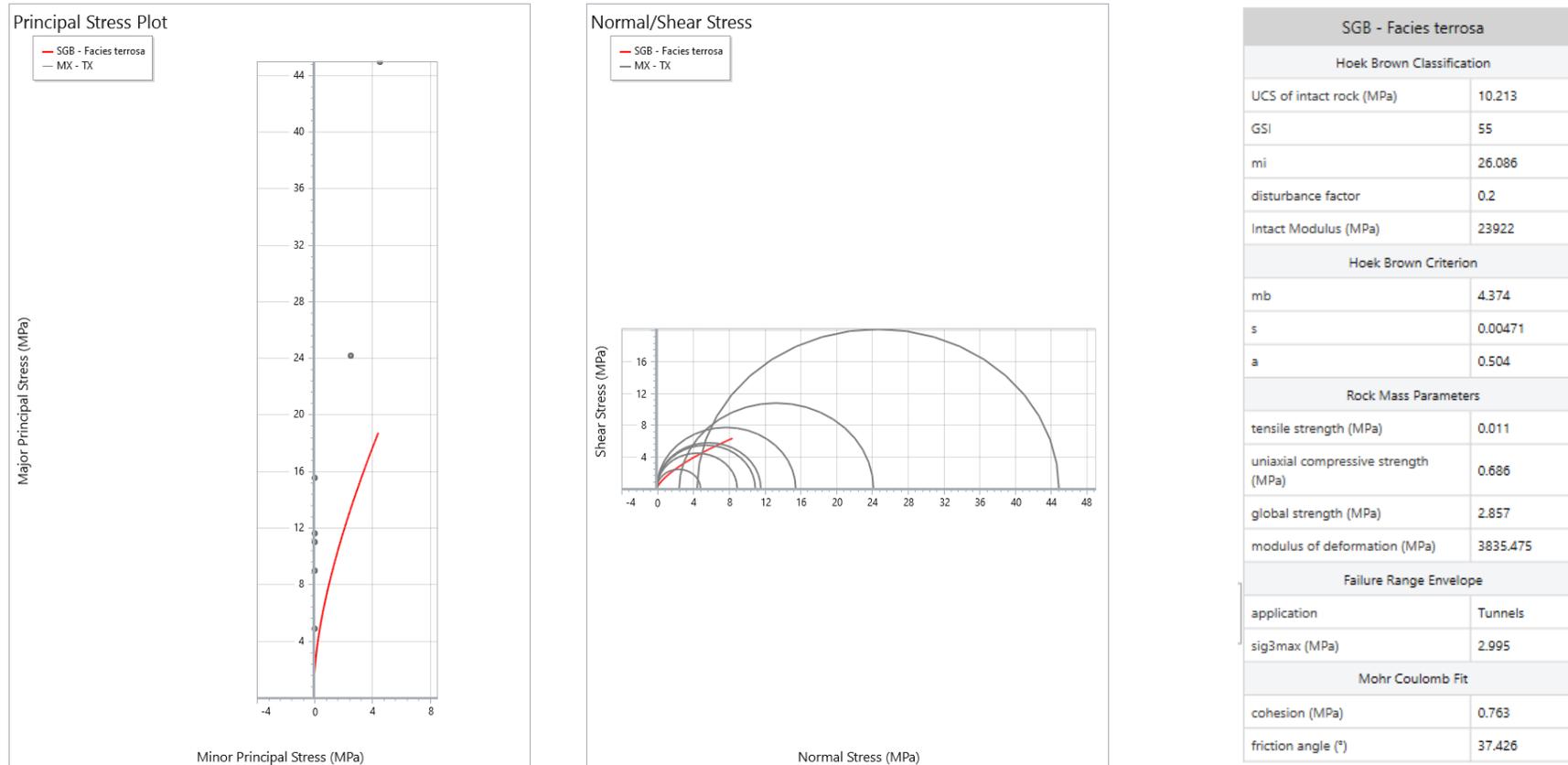


Figura 33 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 55 e Tunnel depth pari a 260 m

### 5.1.9 San Giovanni Bianco in facies arenacea (SGB<sub>are</sub>)

SGB<sub>are</sub> – Matrice rocciosa

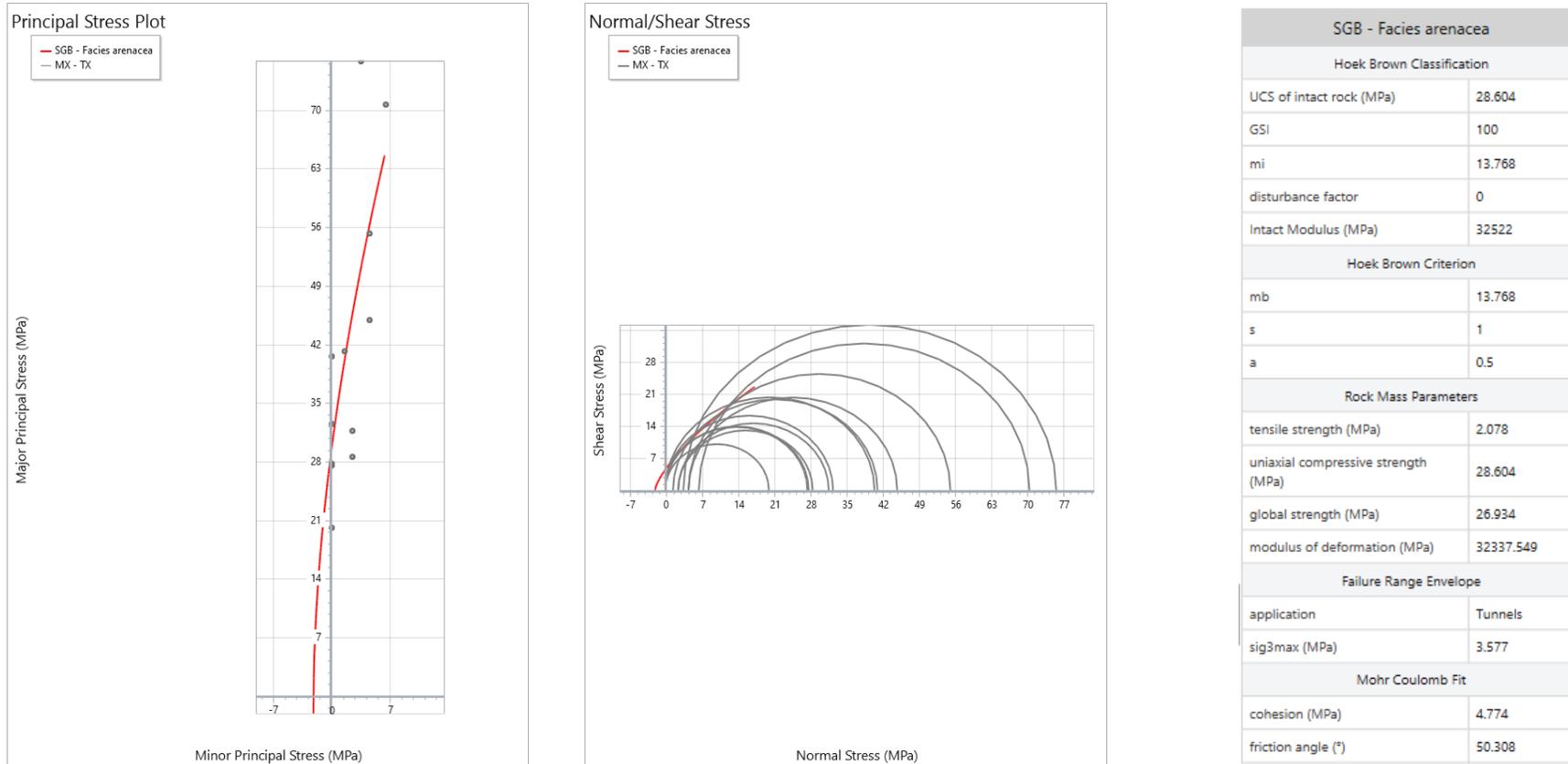


Figura 34 – Caratterizzazione geomeccanica della matrice roccia

$SGB_{are} - GSI = 60$  e Tunnel depth pari a 260 m

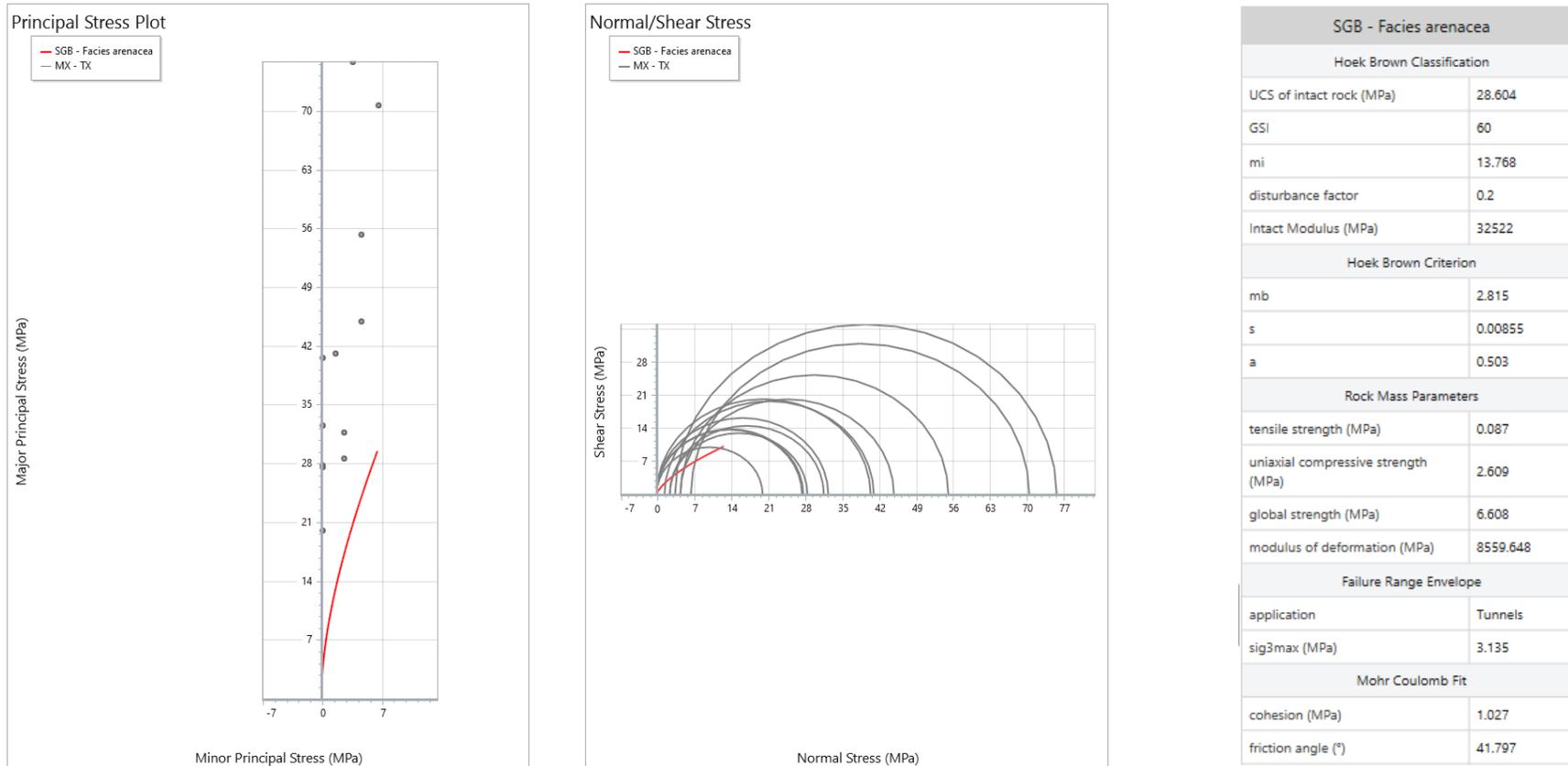


Figura 35 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 60 e Tunnel depth pari a 260 m

$SGB_{are} - GSI = 60$  e Tunnel depth pari a 280 m

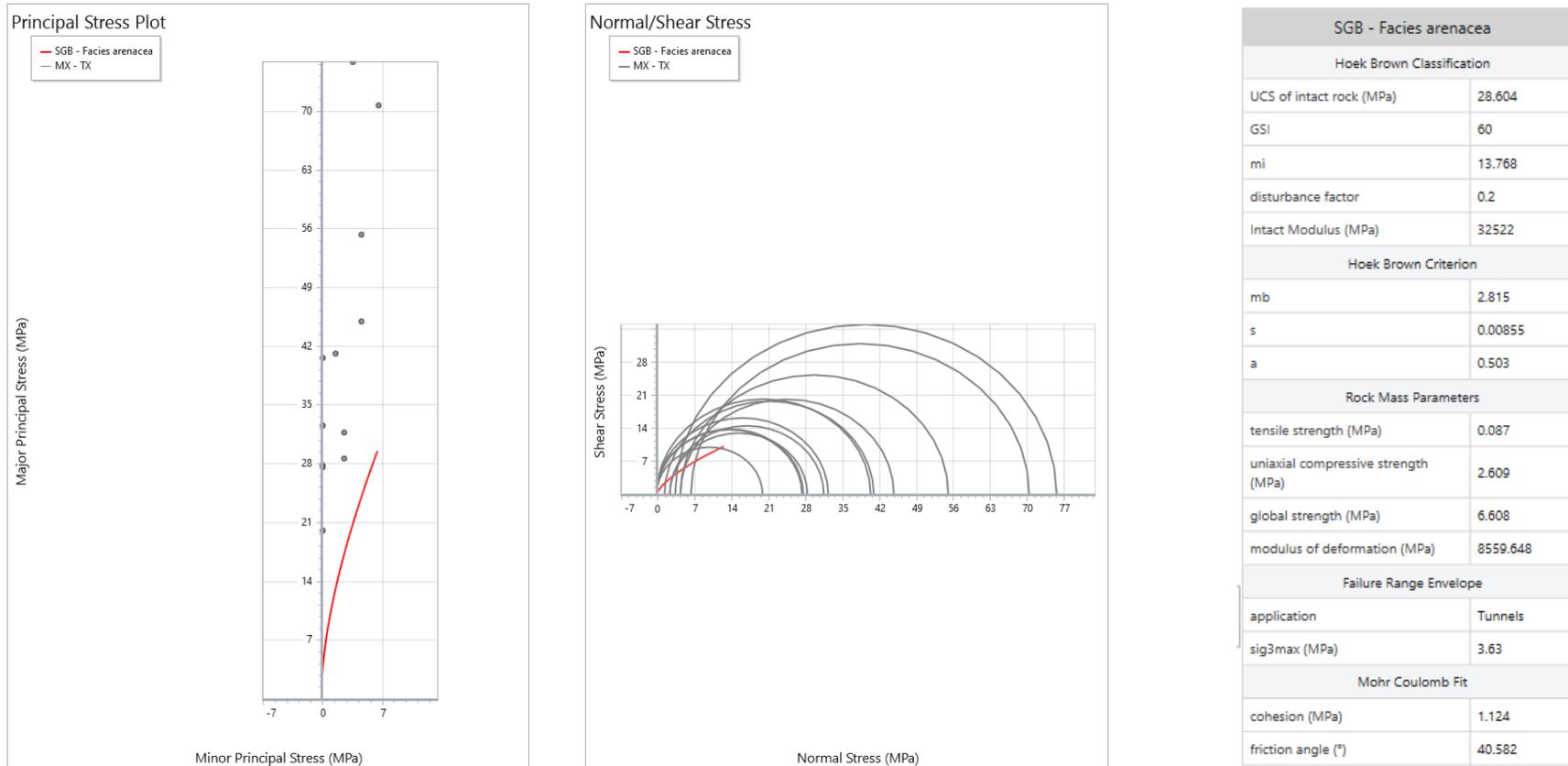


Figura 36 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 60 e Tunnel depth pari a 280 m

$SGB_{are} - GSI = 65$  e Tunnel depth pari a 260 m

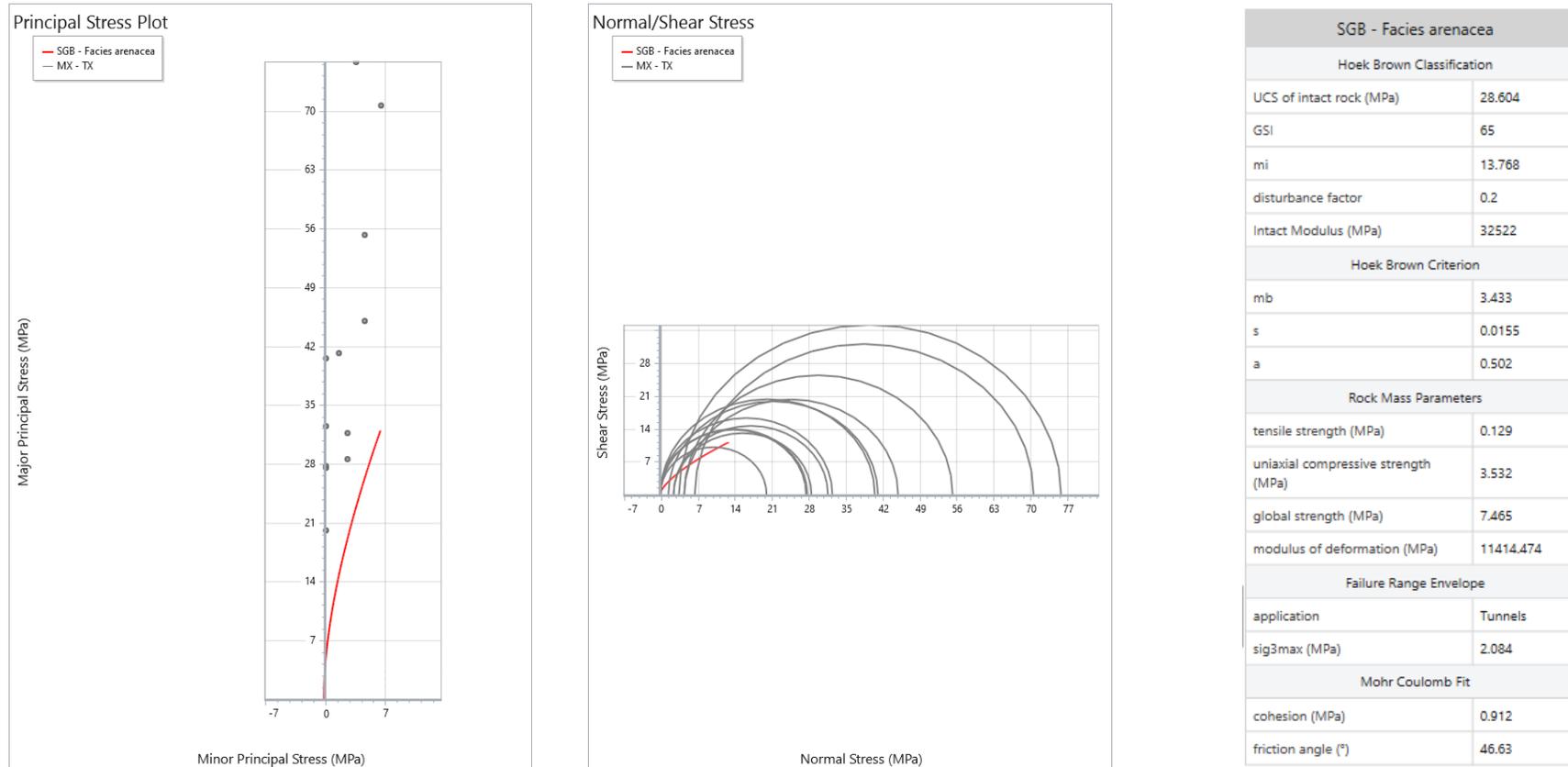
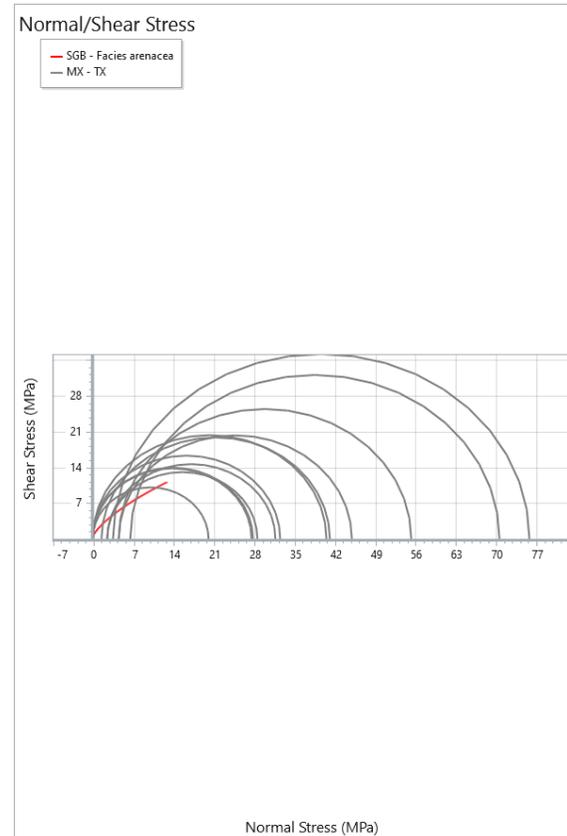
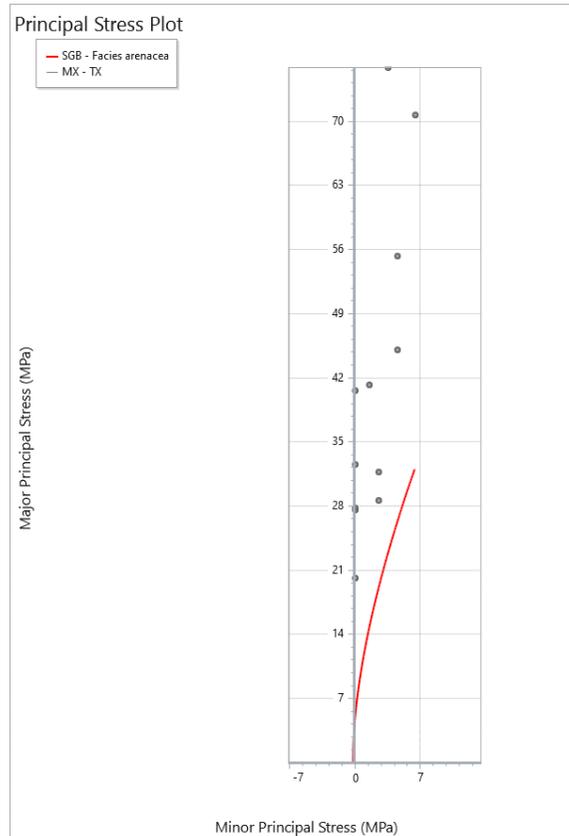


Figura 37 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 65 e Tunnel depth pari a 260 m

$SGB_{are} - GSI = 65$  e Tunnel depth pari a 280 m



SGB - Facies arenacea	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	28.604
GSI	65
mi	13.768
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	32522
Hoek Brown Criterion	
mb	3.433
s	0.0155
a	0.502
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.129
uniaxial compressive strength (MPa)	3.532
global strength (MPa)	7.465
modulus of deformation (MPa)	11414.474
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	2.732
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	1.057
friction angle (°)	44.495

Figura 38 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 65 e Tunnel depth pari a 280 m

### 5.1.10 Arenarie di Val Sabbia (AVS)

#### AVS – Matrice rocciosa

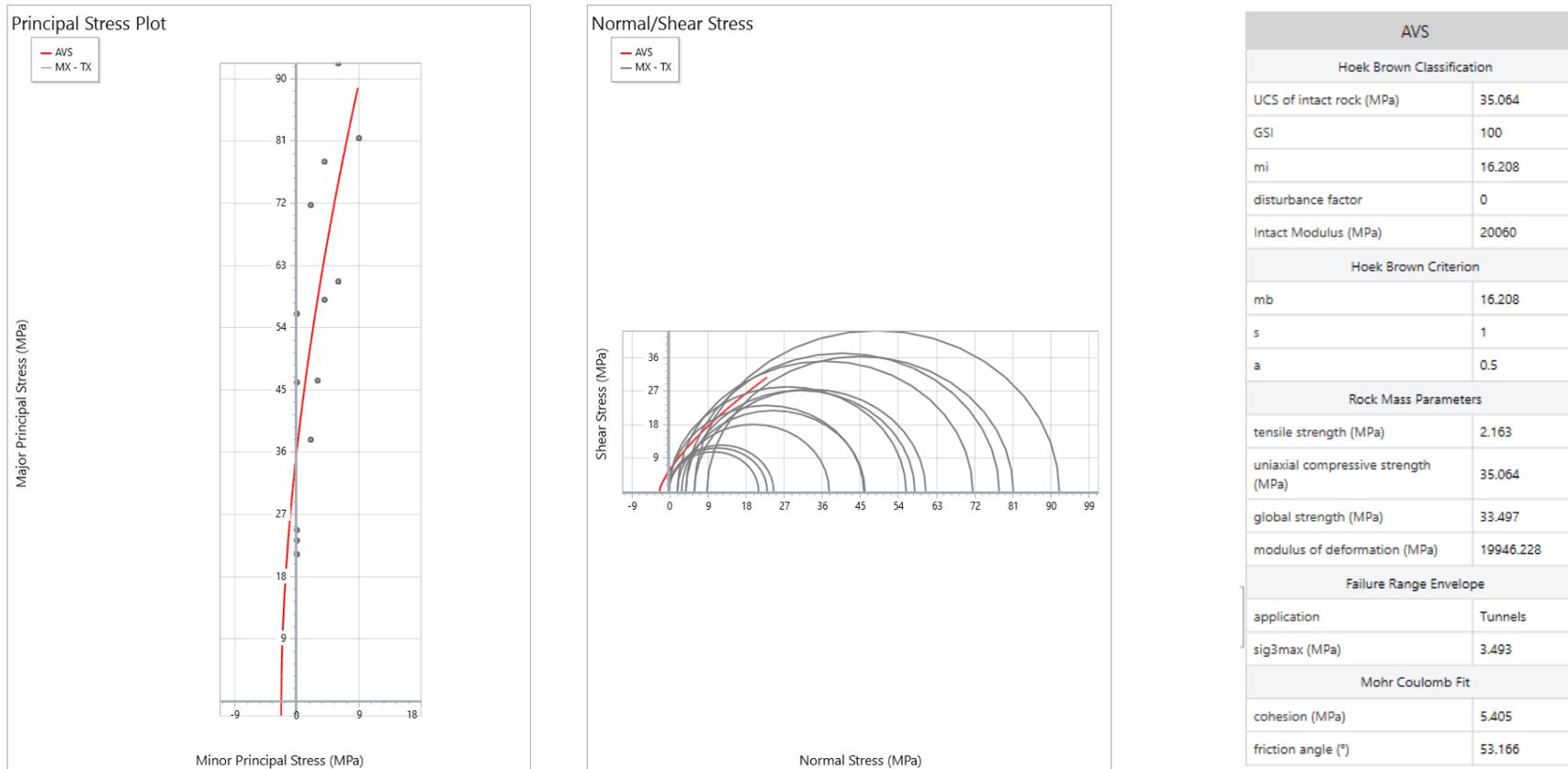
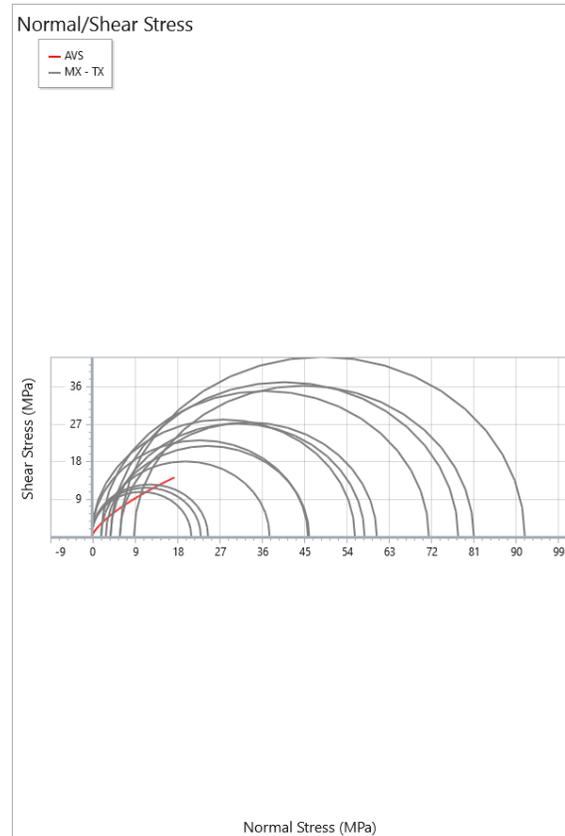
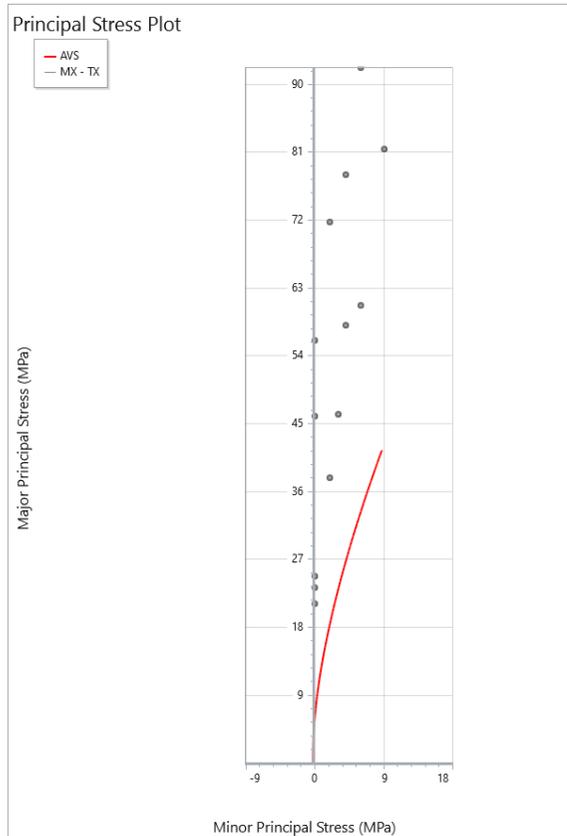


Figura 39 – Caratterizzazione geomeccanica della matrice roccia

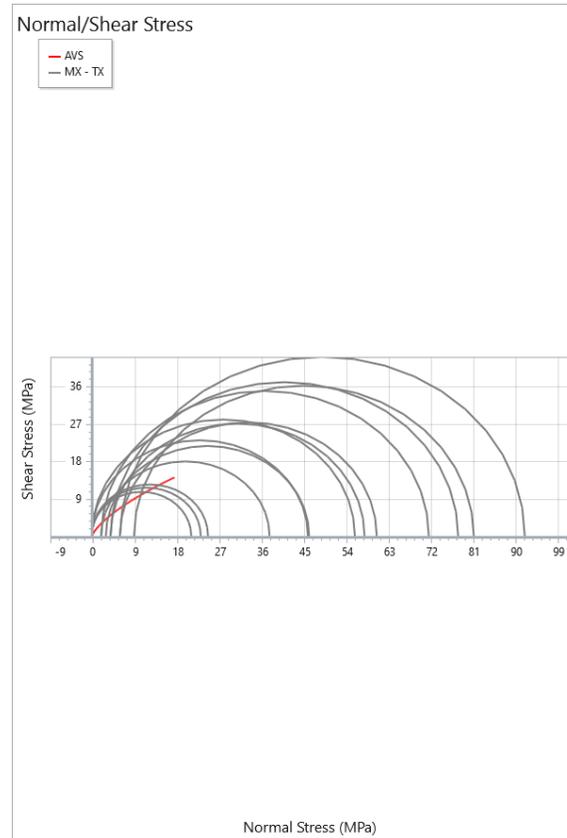
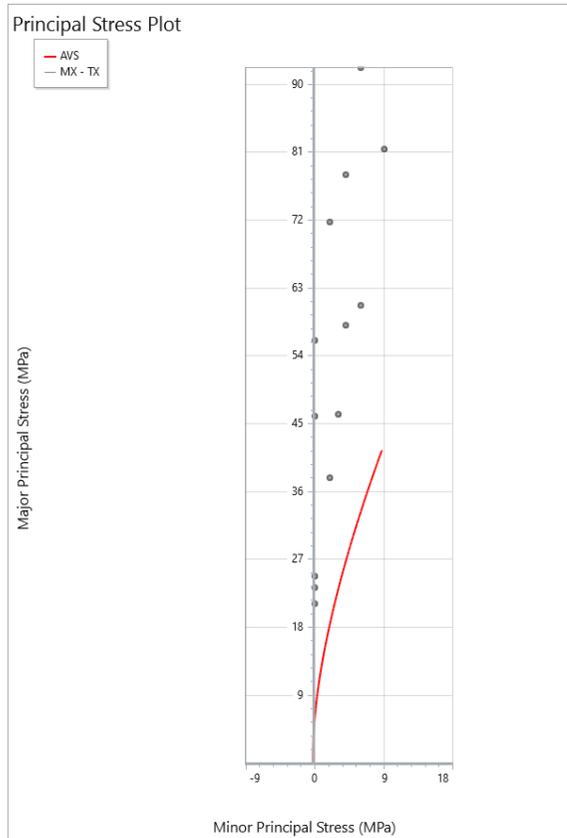
AVS – GSI = 60 e Tunnel depth pari a 265 m



AVS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	35.064
GSI	60
mi	16.208
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	20060
Hoek Brown Criterion	
mb	3.314
s	0.00855
a	0.503
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.09
uniaxial compressive strength (MPa)	3.199
global strength (MPa)	8.739
modulus of deformation (MPa)	9477.051
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	3.474
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	1.224
friction angle (°)	44.058

Figura 40 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 60 e Tunnel depth pari a 265 m

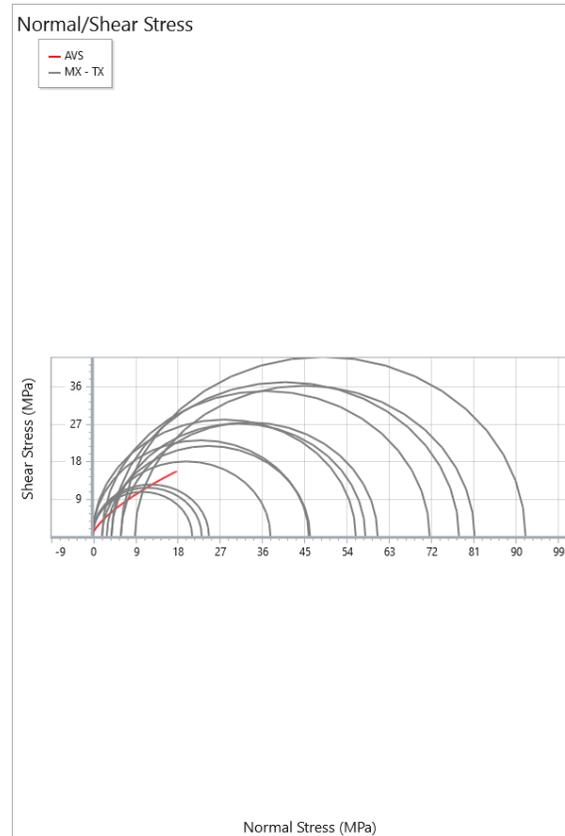
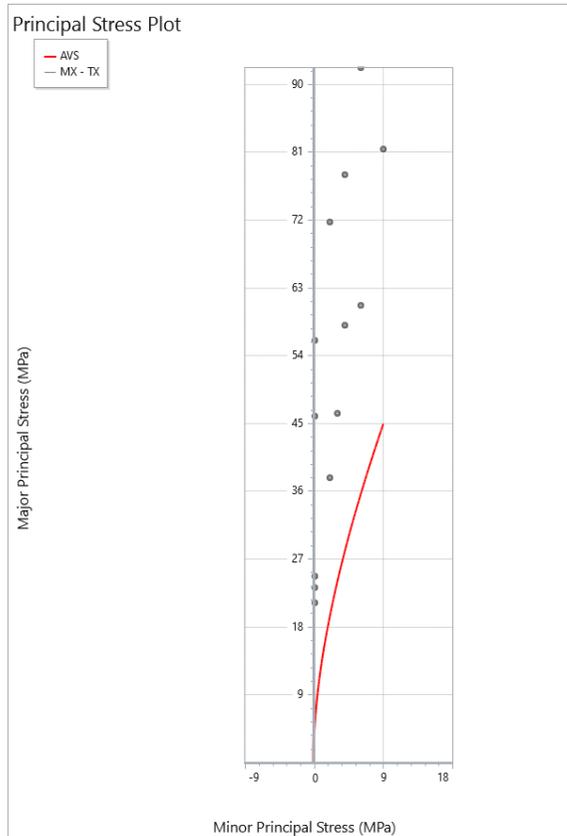
AVS – GSI = 60 e Tunnel depth pari a 25 m



AVS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	35.064
GSI	60
mi	16.208
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	20060
Hoek Brown Criterion	
mb	3.314
s	0.00855
a	0.503
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.09
uniaxial compressive strength (MPa)	3.199
global strength (MPa)	8.739
modulus of deformation (MPa)	9477.051
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	3.557
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	1.242
friction angle (°)	43.864

Figura 41 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 60 e Tunnel depth pari a 25 m

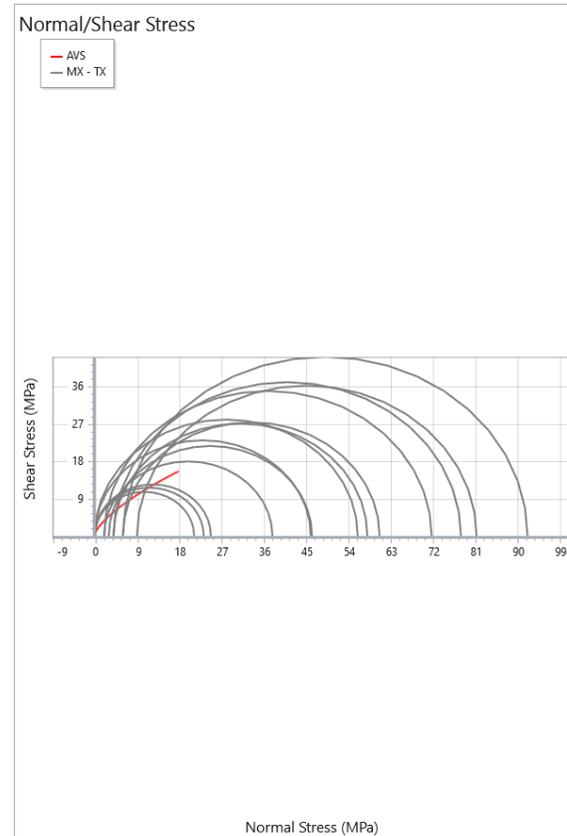
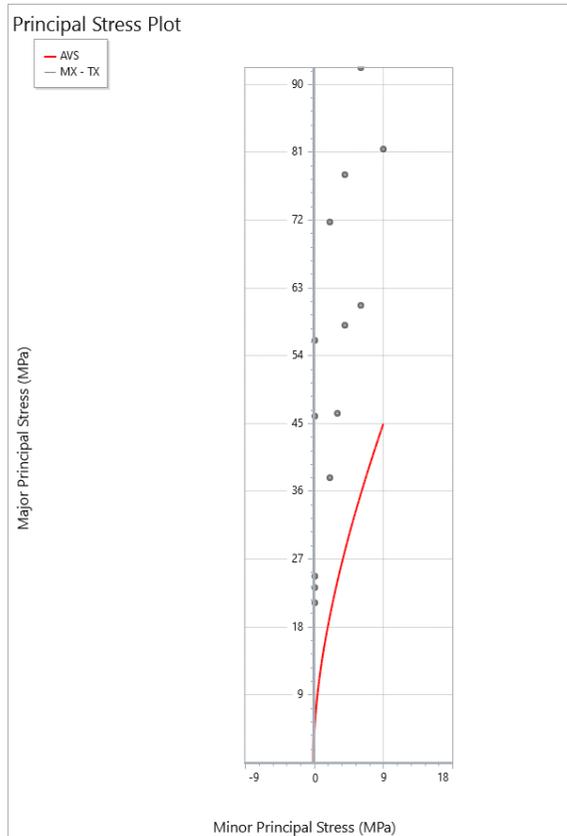
AVS – GSI = 65 e Tunnel depth pari a 265 m



AVS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	35.064
GSI	65
mi	16.208
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	20060
Hoek Brown Criterion	
mb	4.041
s	0.0155
a	0.502
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.135
uniaxial compressive strength (MPa)	4.33
global strength (MPa)	9.844
modulus of deformation (MPa)	12637.851
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	3.019
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	1.251
friction angle (°)	46.747

Figura 42 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 65 e Tunnel depth pari a 265 m

AVS – GSI = 65 e Tunnel depth pari a 25 m



AVS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	35.064
GSI	65
mi	16.208
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	20060
Hoek Brown Criterion	
mb	4.041
s	0.0155
a	0.502
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.135
uniaxial compressive strength (MPa)	4.33
global strength (MPa)	9.844
modulus of deformation (MPa)	12637.851
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	1.809
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.948
friction angle (°)	50.654

Figura 43 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 65 e Tunnel depth pari a 25 m

## 5.1.11 Intorno Faglia – Arenarie di Val Sabbia (AVS)

Intorno Faglia (AVS) – GSI = 30 e Tunnel depth pari a 20 m

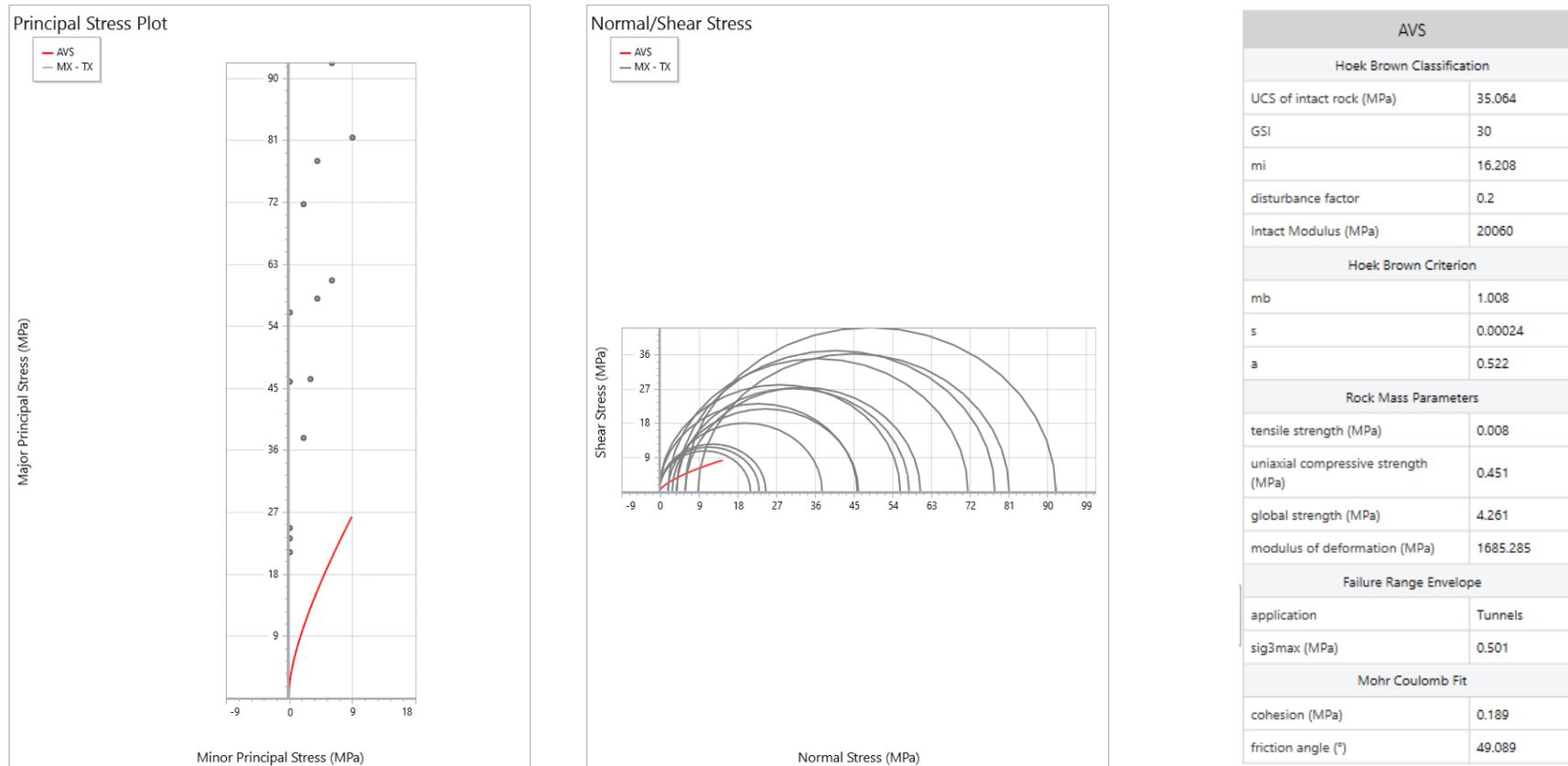


Figura 44 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 30 e Tunnel depth pari a 20 m

## 5.1.12 Nucleo Faglia

Nucleo faglia – GSI = 20 e Tunnel depth pari a 20 m

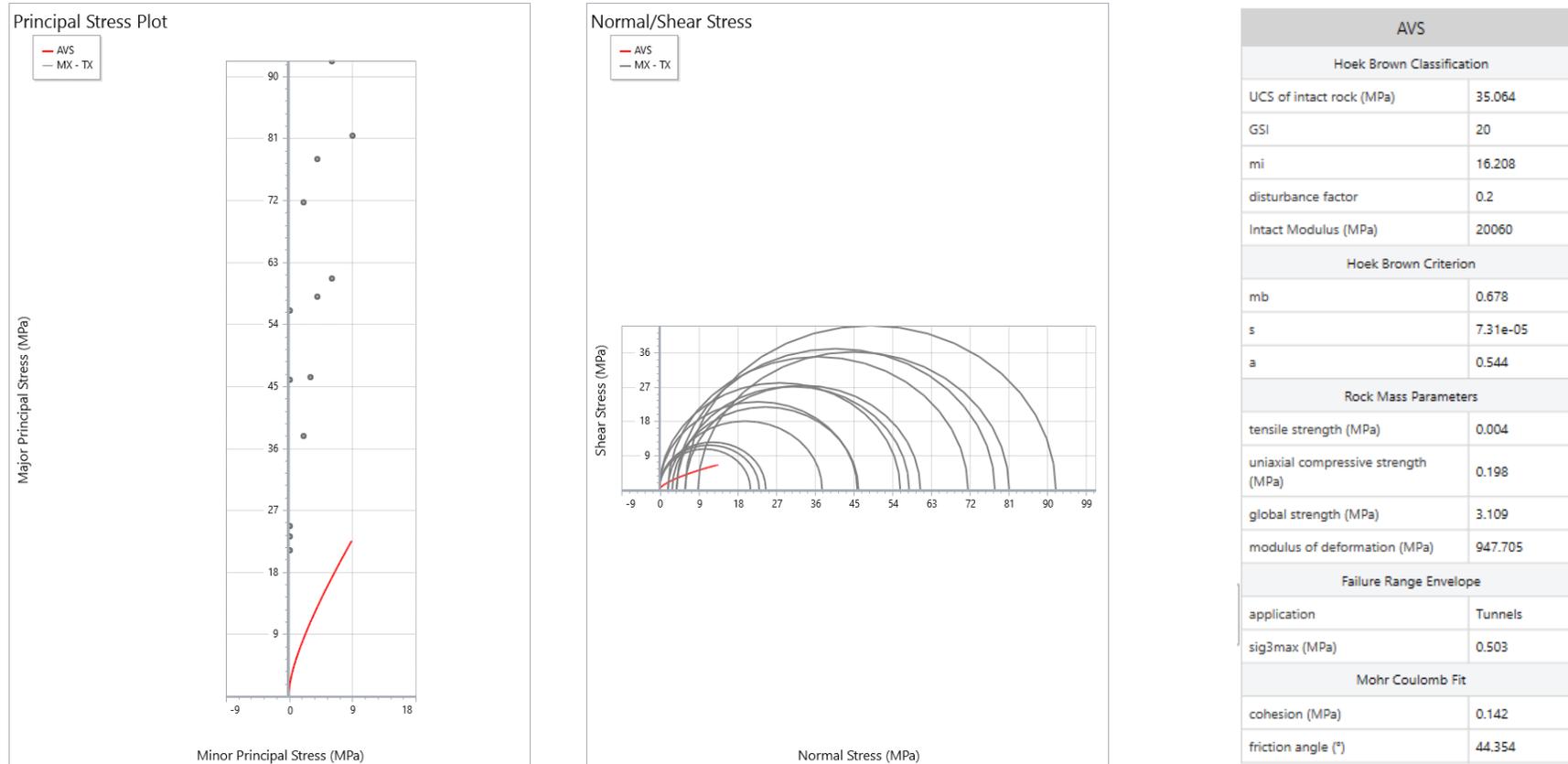


Figura 45 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 20 e Tunnel depth pari a 20 m

### 5.1.13 Arenarie di Val Sabbia (AVS)

GSI = 60 e Tunnel depth pari a 20 m

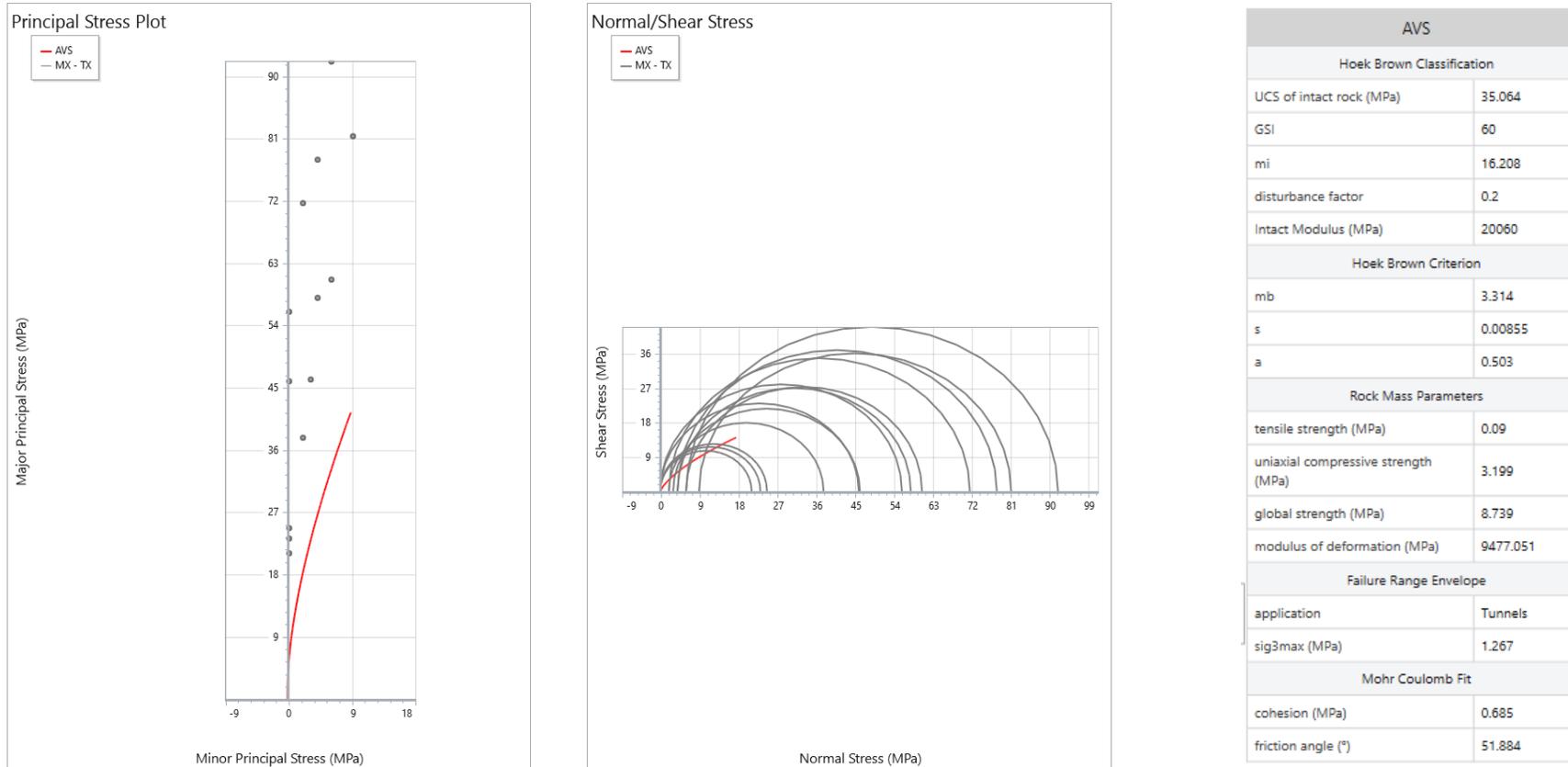
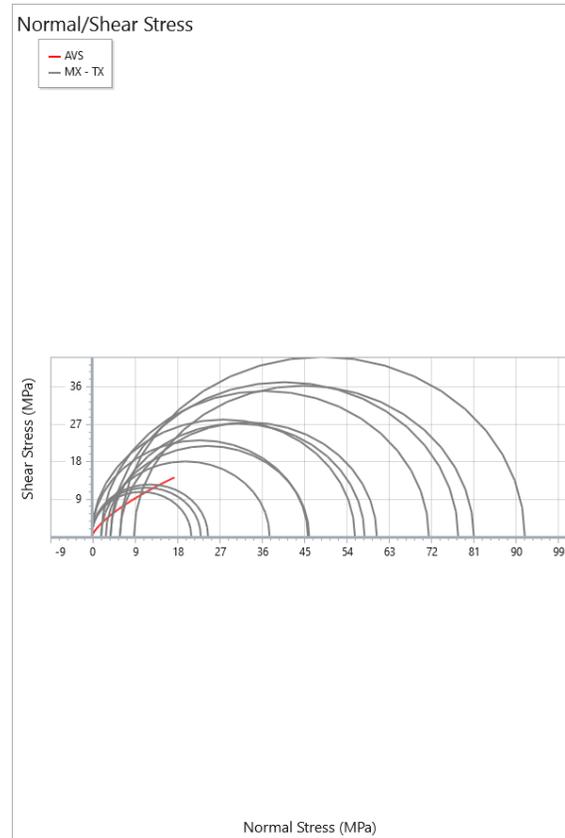
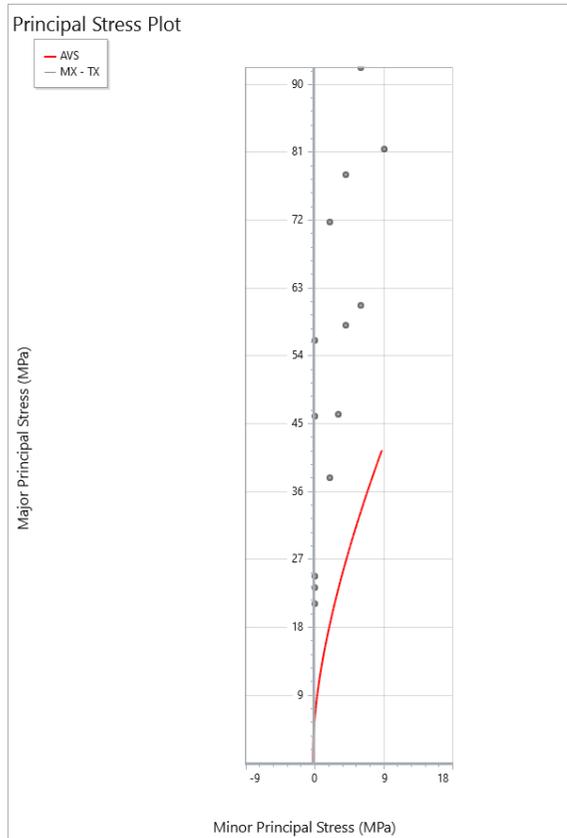


Figura 46 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 60 e Tunnel depth pari a 20 m

GSI = 60 e Tunnel depth pari a 10 m



AVS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	35.064
GSI	60
mi	16.208
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	20060
Hoek Brown Criterion	
mb	3.314
s	0.00855
a	0.503
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.09
uniaxial compressive strength (MPa)	3.199
global strength (MPa)	8.739
modulus of deformation (MPa)	9477.051
Failure Range Envelope	
application	Tunnels
sig3max (MPa)	3.557
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	1.242
friction angle (°)	43.864

Figura 47 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 65 e Tunnel depth pari a 20 m

## 5.2 Nuova traversa

Come per la galleria naturale, allo stesso modo è stato caratterizzato l'ammasso roccioso presente al di sotto dei depositi alluvionali nell'area in cui è prevista la realizzazione della nuova traversa.

Attraverso una rielaborazione dei dati dei tre sondaggi disponibili nell'area e dalle osservazioni dirette in sito è stata ricostruita la sezione geologica rappresentativa in asse alla traversa.

Come si può osservare dalla figura riportata di seguito l'assetto stratigrafico della zona è fortemente asimmetrico con presenza di depositi alluvionali di spessore via via crescente verso sud-est (sinistra idraulica) e il substrato roccioso sub-affiorante in sponda destra.

Il substrato roccioso, costituito dalle Arenarie di Val Sabbia, è stato suddiviso ai fini della caratterizzazione geomeccanica in "cappellaccio d'alterazione ( $AVS_{CAPP}$ )", "ammasso roccioso estremamente fratturato ( $AVS_{EXF}$ )" e "substrato roccioso ( $AVS_{AR}$ )" propriamente detto.

La caratterizzazione geomeccanica è stata condotta tenendo conto delle variazioni connesse al diverso valore di GSI alle varie profondità.

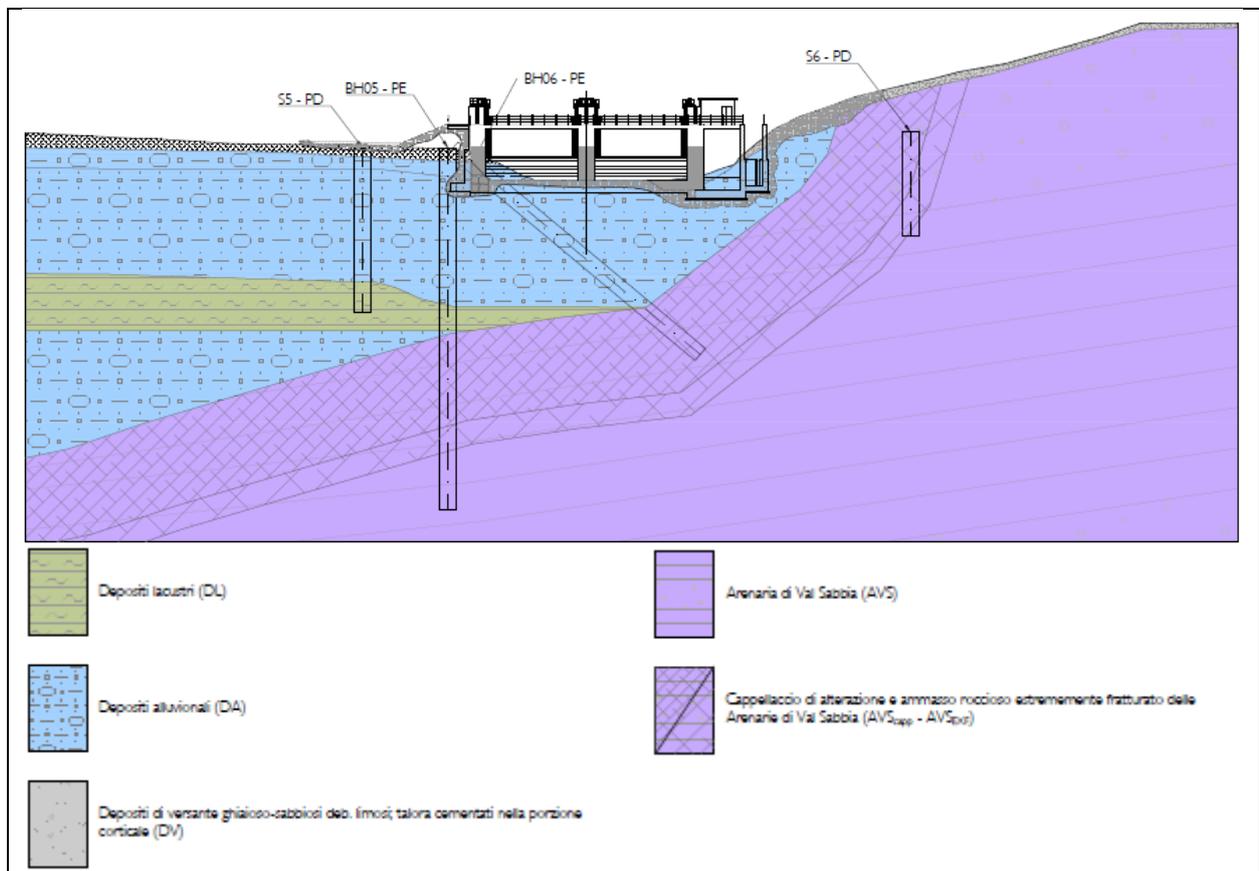


Figura 48 – Sezione geologica in asse alla nuova traversa di progetto

## 5.2.1 Cappellaccio di Alterazione – Arenarie di Val Sabbia (AVS<sub>cap</sub>)

AVS<sub>cap</sub> – GSI = 5 e profondità pari a 23 m

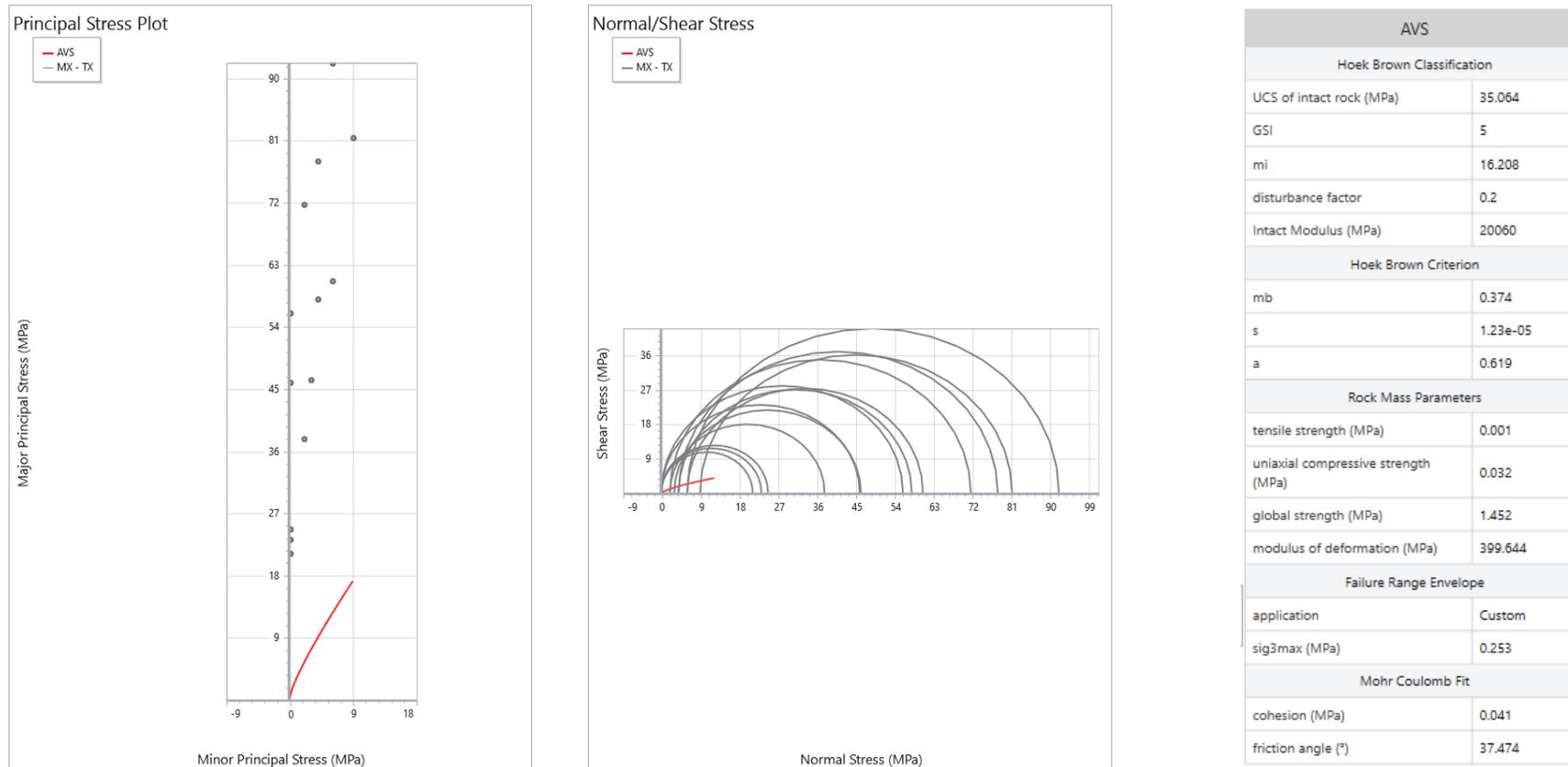
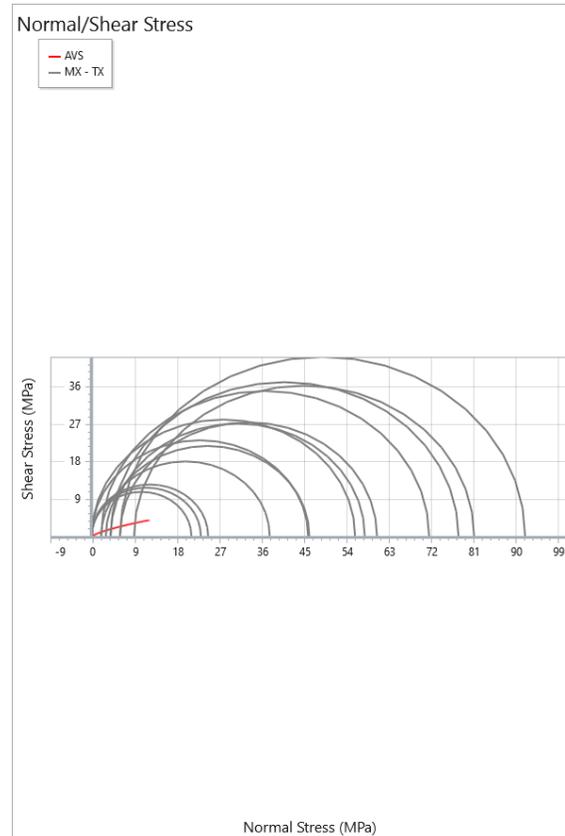
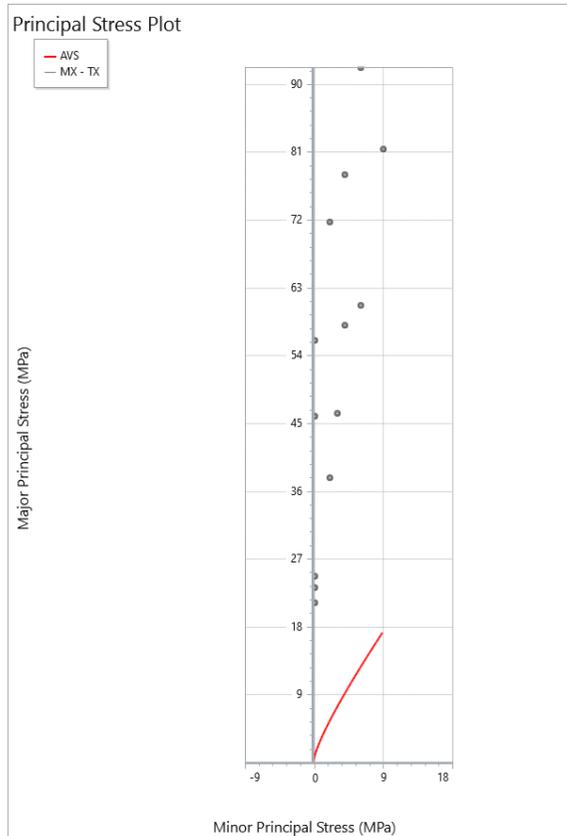


Figura 49 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 5 e profondità pari a 23 m

AVS<sub>cap</sub> – GSI = 5 e profondità pari a 34 m



AVS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	35.064
GSI	5
mi	16.208
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	20060
Hoek Brown Criterion	
mb	0.374
s	1.23e-05
a	0.619
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.001
uniaxial compressive strength (MPa)	0.032
global strength (MPa)	1.452
modulus of deformation (MPa)	399.644
Failure Range Envelope	
application	Custom
sig3max (MPa)	0.366
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.054
friction angle (°)	35.081

Figura 50 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 5 e profondità pari a 34 m

## 5.2.2 Ammasso roccioso estremamente fratturato – Arenarie di Val Sabbia (AVS<sub>EXF</sub>)

AVS<sub>EXF</sub> – GSI = 15 e profondità pari a 34 m

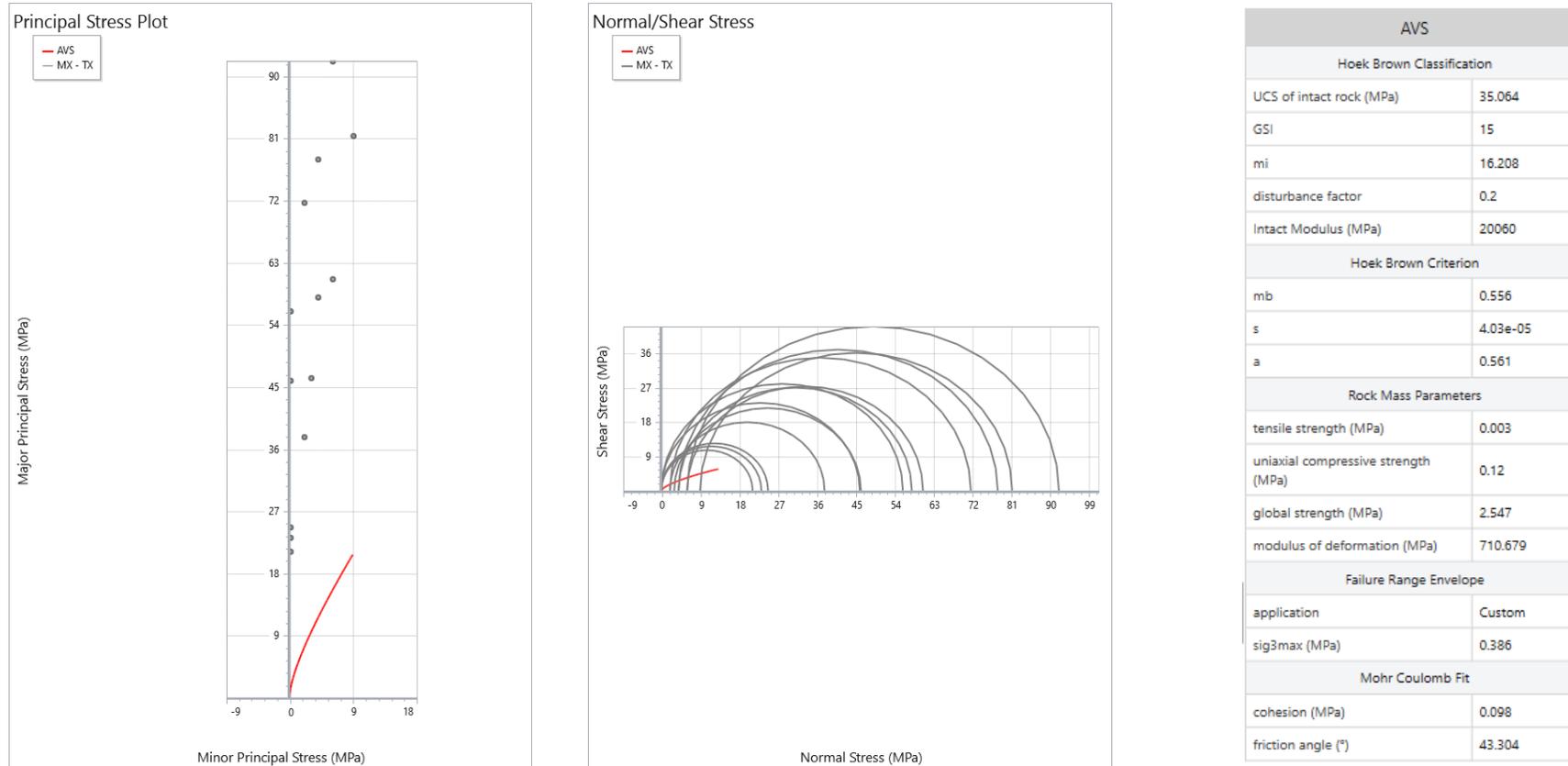
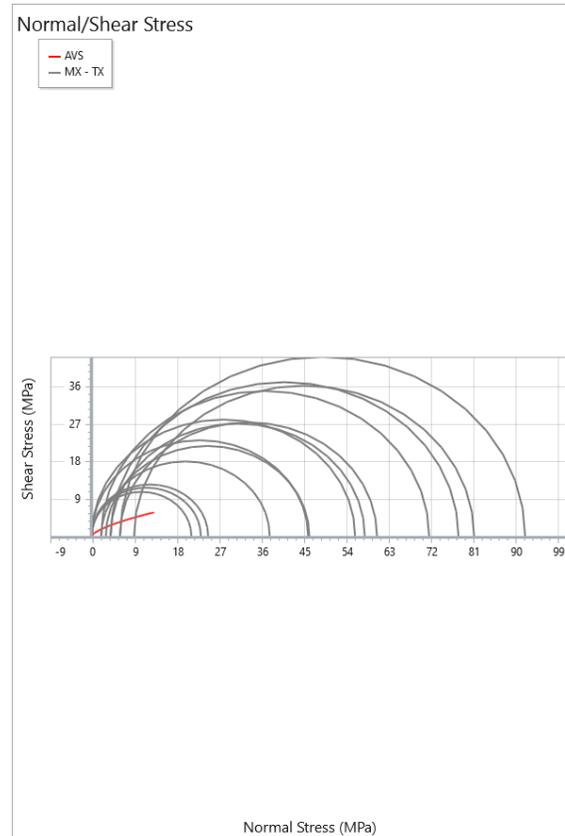
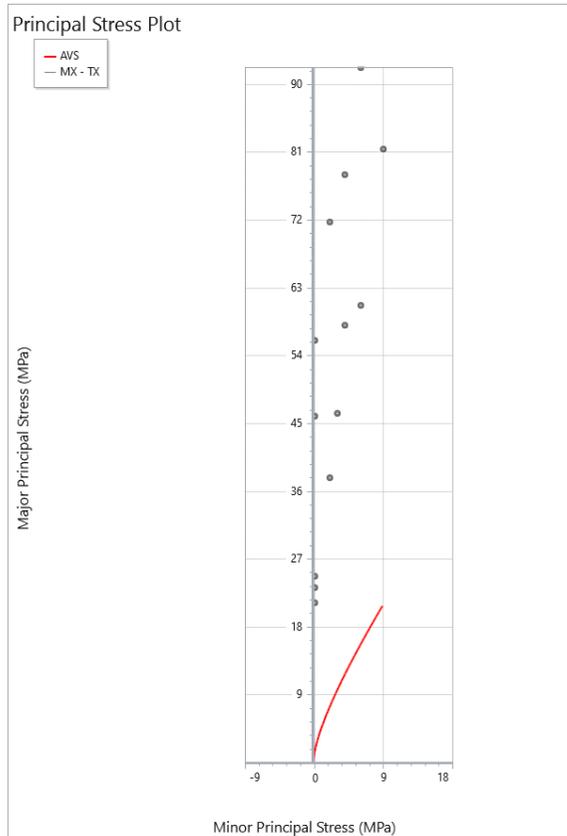


Figura 51 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 15 e profondità pari a 34 m

AVS<sub>EXF</sub> – GSI = 15 e profondità pari a 37 m



AVS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	35.064
GSI	15
mi	16.208
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	20060
Hoek Brown Criterion	
mb	0.556
s	4.03e-05
a	0.561
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.003
uniaxial compressive strength (MPa)	0.12
global strength (MPa)	2.547
modulus of deformation (MPa)	710.679
Failure Range Envelope	
application	Custom
sig3max (MPa)	0.418
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.104
friction angle (°)	42.715

Figura 52 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 15 e profondità pari a 37 m

### 5.2.3 Ammasso roccioso – Arenarie di Val Sabbia (AVS<sub>AR</sub>)

AVS<sub>AR</sub> – GSI = 45 e profondità pari a 37 m

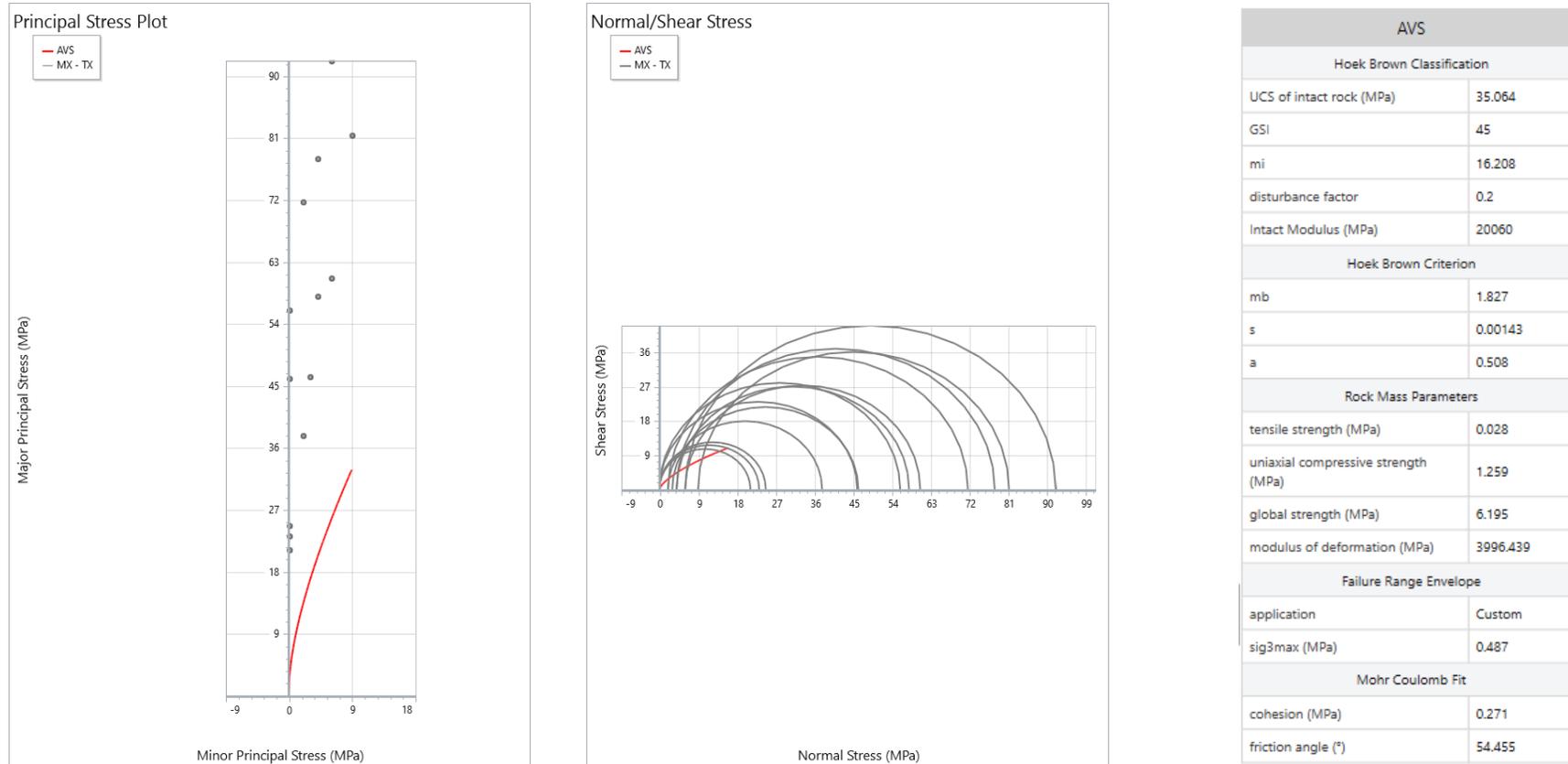
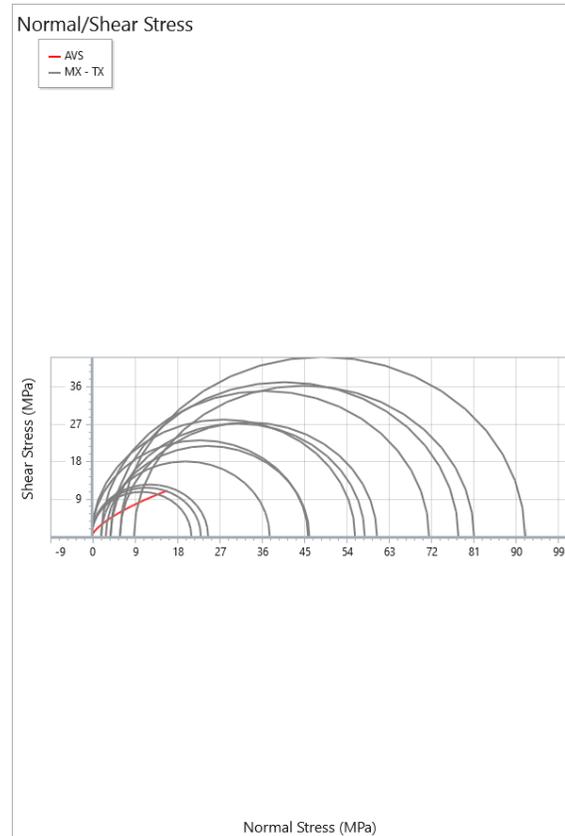
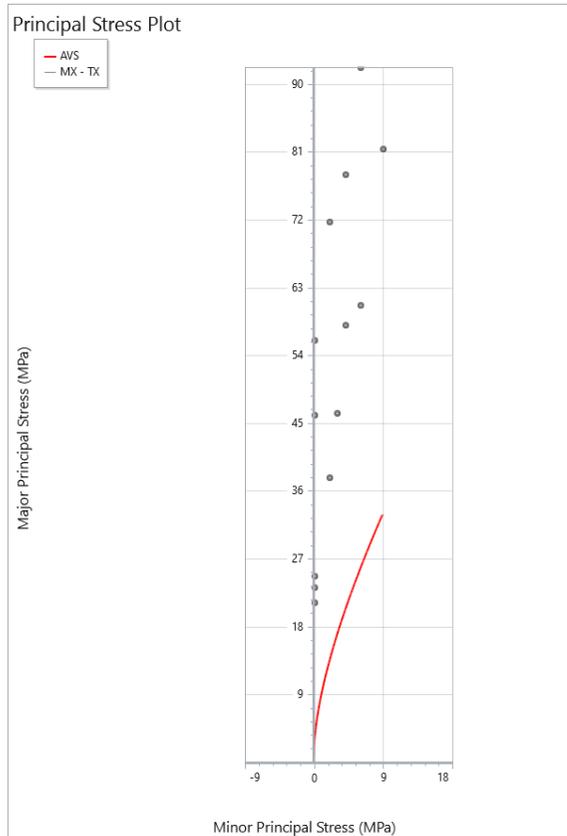


Figura 53 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 45 e profondità pari a 37 m

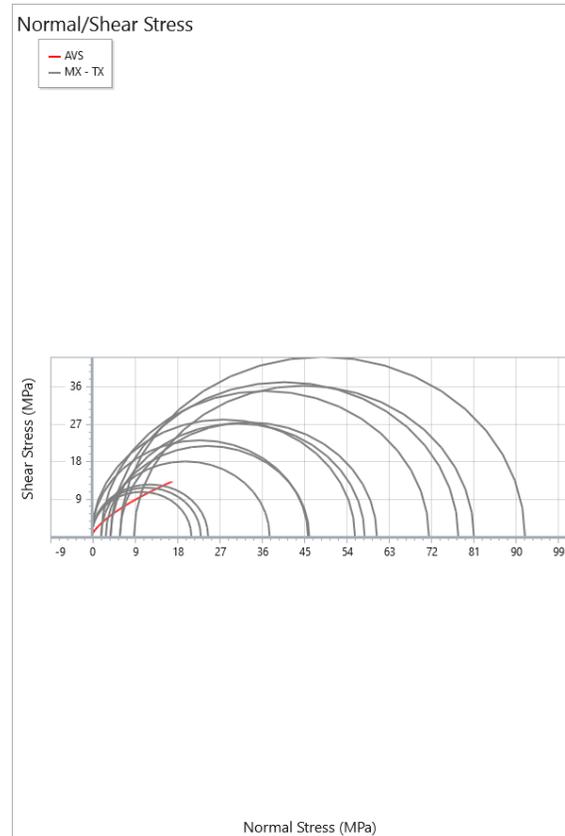
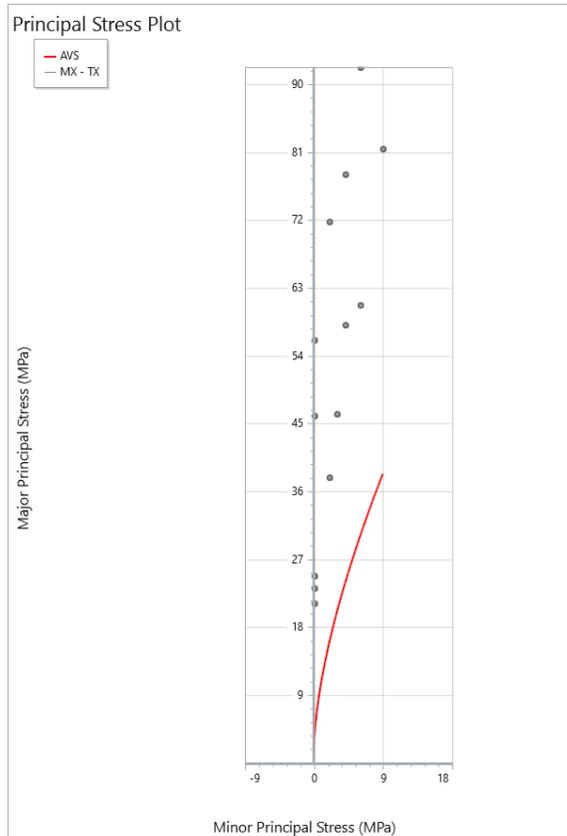
AVS<sub>AR</sub> – GSI = 45 e profondità pari a 40 m



AVS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	35.064
GSI	45
mi	16.208
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	20060
Hoek Brown Criterion	
mb	1.827
s	0.00143
a	0.508
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.028
uniaxial compressive strength (MPa)	1.259
global strength (MPa)	6.195
modulus of deformation (MPa)	3996.439
Failure Range Envelope	
application	Custom
sig3max (MPa)	0.524
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.282
friction angle (°)	53.941

Figura 54 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 45 e profondità pari a 40 m

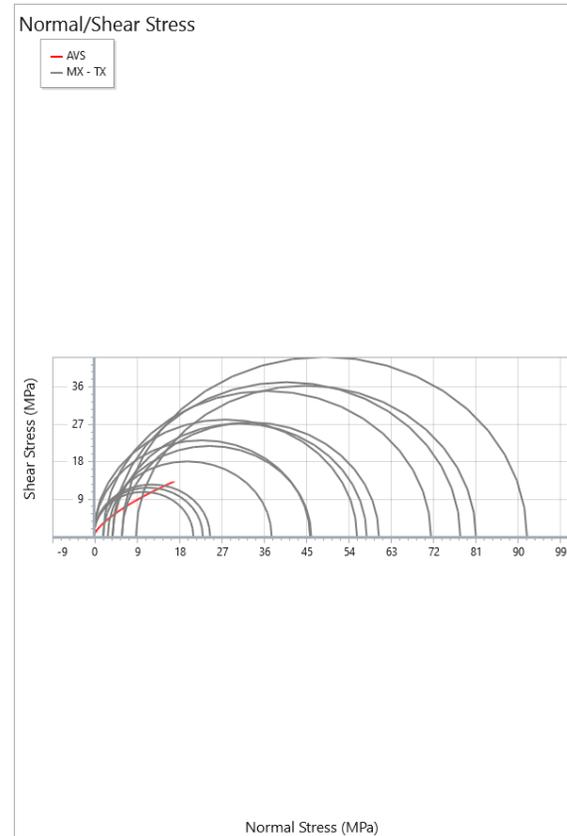
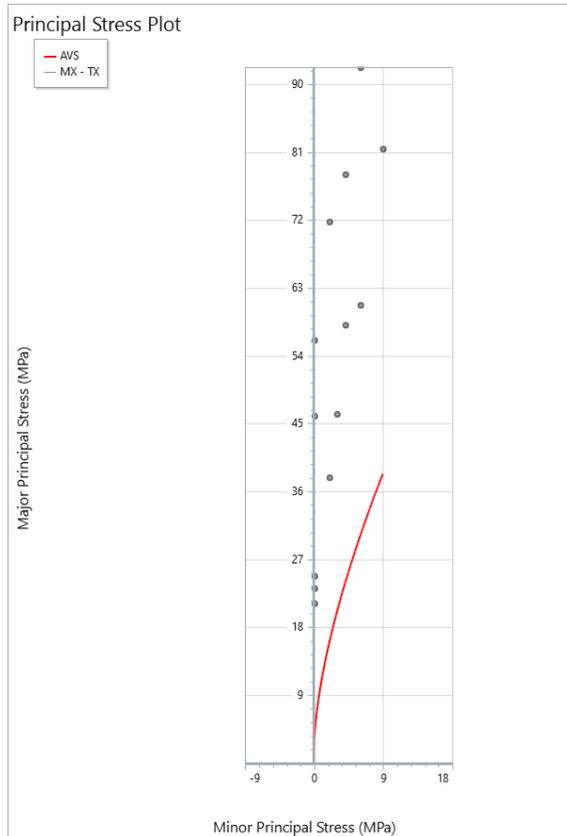
AVS<sub>AR</sub> – GSI = 55 e profondità pari a 37 m



AVS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	35.064
GSI	55
mi	16.208
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	20060
Hoek Brown Criterion	
mb	2.718
s	0.00471
a	0.504
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.061
uniaxial compressive strength (MPa)	2.356
global strength (MPa)	7.787
modulus of deformation (MPa)	7106.786
Failure Range Envelope	
application	Custom
sig3max (MPa)	0.494
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.374
friction angle (°)	56.991

Figura 55 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 55 e profondità pari a 37 m

AVS<sub>AR</sub> – GSI = 55 e profondità pari a 40 m



AVS	
Hoek Brown Classification	
UCS of intact rock (MPa)	35.064
GSI	55
mi	16.208
disturbance factor	0.2
Intact Modulus (MPa)	20060
Hoek Brown Criterion	
mb	2.718
s	0.00471
a	0.504
Rock Mass Parameters	
tensile strength (MPa)	0.061
uniaxial compressive strength (MPa)	2.356
global strength (MPa)	7.787
modulus of deformation (MPa)	7106.786
Failure Range Envelope	
application	Custom
sig3max (MPa)	0.532
Mohr Coulomb Fit	
cohesion (MPa)	0.386
friction angle (°)	56.526

Figura 56 – Caratterizzazione geomeccanica per un valore di GSI pari a 55 e profondità pari a 40 m

## 6 ALLEGATI