

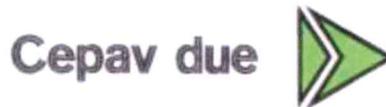
COMMITTENTE:



ALTA SORVEGLIANZA:



GENERAL CONTRACTOR:



### INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N. 443/01

**LINEA A.V. /A.C. TORINO – VENEZIA      Tratta MILANO – VERONA**  
**Lotto funzionale Brescia-Verona**

### PROGETTO ESECUTIVO

### GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04)

**Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24**

**Linee Guida per l'applicazione delle sezioni tipo**

GENERAL CONTRACTOR	DIRETTORE LAVORI
Consorzio <b>Cepav due</b> Consorzio Cepav due Il Direttore del Consorzio <i>(Ing. T. Taranta)</i> Data: _____	Valido per costruzione  Data: _____

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPODOC	OPERA/DISCIPLINA	PROGR	REV
I N O R	1 1	E	E 2	R O	G N 0 4 0 0	0 0 4	A

PROGETTAZIONE						IL PROGETTISTA	
Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Data	
A	Emissione	REGE	15/11/18	MERLINI	15/11/18	15/11/18	 Data: 15/11/2018
B							
C							

CIG. 751447334A

Stampato dal Service File: ANOR11EE2ROGN0400004A.docx



Progetto cofinanziato dalla Unione Europea

di plottaggio ITALFERR S.p.A.  
ALBA s.r.l.

CUP: F81H91000000008

**INDICE**

1.	INTRODUZIONE .....	4
1.1.	PREMESSA.....	4
1.2.	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	4
2.	FASI PROGETTUALI .....	7
3.	SINTESI DEL QUADRO GEOLOGICO – IDROGEOLOGICO - GEOTECNICO .....	9
3.1.	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO.....	9
3.2.	CONDIZIONI GEOTECNICHE .....	10
4.	PREVISIONE DEL COMPORTAMENTO DEFORMATIVO DEL FRONTE E DEL CAVO.....	17
4.1.	ANALISI CON IL METODO DELLE CURVE CARATTERISTICHE .....	17
4.2.	RISULTATI .....	19
4.3.	STABILITÀ DEL FRONTE DI SCAVO.....	23
4.3.1.	<i>Analisi della stabilità del fronte di scavo.....</i>	23
4.3.2.	<i>Modellazione degli interventi di stabilizzazione .....</i>	27
4.3.3.	<i>Valutazione dell'entità delle estrusioni al fronte di scavo.....</i>	29
4.4.	DEFINIZIONE DELLE SEZIONI TIPO .....	32
4.5.	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....	33
5.	LINEE GUIDA PER L'APPLICAZIONE DELLE SEZIONI TIPO E DELLE RELATIVE VARIABILITA' .....	35
5.1.	CRITERI PER L'APPLICAZIONE DELLE LINEE GUIDA .....	35
5.2.	SEZIONE TIPO C1A.....	36
5.2.1.	<i>Campo di applicazione .....</i>	36
5.2.2.	<i>Interventi previsti.....</i>	36
5.2.3.	<i>Fasi esecutive.....</i>	36
5.2.4.	<i>Variabilità.....</i>	37
5.3.	SEZIONE TIPO C1A - RID .....	37
5.3.1.	<i>Campo di applicazione .....</i>	37
5.3.2.	<i>Interventi previsti.....</i>	37
5.3.3.	<i>Fasi esecutive.....</i>	38

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Doc. N.

Progetto  
INOR

Lotto  
11

Codifica Documento  
E E2 RO GN 040 0 004

Rev.  
A

Foglio  
3 di 42

5.3.4. Variabilità.....	38
5.4. SEZIONE TIPO C1B .....	38
5.4.1. Campo di applicazione .....	38
5.4.2. Interventi previsti.....	39
5.4.3. Fasi esecutive.....	39
5.4.4. Variabilità.....	40
5.5. SEZIONE TIPO C1B - RID .....	40
5.5.1. Campo di applicazione .....	40
5.5.2. Interventi previsti.....	40
5.5.3. Fasi esecutive.....	41
5.5.4. Variabilità.....	41
5.6. SEZIONE TIPO C1BBIS .....	41
5.6.1. Campo di applicazione .....	41
5.6.2. Interventi previsti.....	42
5.6.3. Fasi esecutive.....	42
5.6.4. Variabilità.....	42

## 1. INTRODUZIONE

### 1.1. Premessa

La presente relazione è parte integrante del Progetto Esecutivo della galleria naturale San Giorgio in Salici appartenente alla tratta ferroviaria AV Brescia – Verona, fra le progressive chilometriche 140+502.85 e 141+930.24, per una lunghezza totale di 1427.39 m.

Per quanto concerne le condizioni geotecniche delle formazioni geologiche interessate dallo scavo della galleria in oggetto, si rimanda all'apposita relazione geotecnica e al profilo geotecnico di previsione e di monitoraggio che è stato appositamente predisposto per il Progetto Esecutivo della galleria.

Dopo avere richiamato quanto contenuto nella relazione di calcolo di progetto riguardo la situazione geologico-geotecnica presa a riferimento per il caso in esame, ed avere analizzato il comportamento tensio-deformativo del fronte e del cavo scaturito dalle analisi statiche, verranno definiti tutti gli elementi, rilevabili in corso d'opera, che permettono al progettista l'applicazione delle presenti linee guida il cui scopo è:

- confermare la sezione tipo più adeguata, tra quelle già previste in una determinata tratta e riportate sull'elaborato profilo longitudinale geotecnico di previsione e di monitoraggio del Progetto Esecutivo;
- variare gli interventi di consolidamento e preconsolidamento che, senza modificare strutturalmente le caratteristiche finali dell'opera, devono adeguarsi alle reali condizioni geotecniche riscontrate al fronte di avanzamento, nonché al comportamento estrusivo del fronte stesso e deformativo del cavo (questi ultimi come noto sono dipendenti sia dalla natura dell'ammasso in termini geologici, geomeccanici ed idrogeologici, sia dagli stati tensionali preesistenti che da quelli conseguenti alle operazioni di scavo);
- individuare una diversa sezione tipo, tra quelle previste nelle diverse tratte di scavo della galleria o comunque previste in Progetto Esecutivo nella stessa formazione, qualora le condizioni realmente riscontrate risultino difformi da quelle ipotizzate.

### 1.2. Documenti di riferimento

CODICE										DESCRIZIONE	
INOR	11	E	E2	P	5	GN	04	0	0	001	GALLERIA SAN GIORGIO IN SALICI (GA16 - GI08 - GN04 - GI09 - GA17) - Da Pk 140+181.85 a Pk 143+575.33 - Planimetria indagini geognostiche
INOR	11	E	E2	Z	5	GN	04	0	0	002	GALLERIA SAN GIORGIO IN SALICI (GA16 - GI08 - GN04 - GI09 - GA17) - Da Pk 140+181.85 a Pk 143+575.33 - Modello idrogeologico - Sezione longitudinale
INOR	11	E	E2	R	B	GN	04	0	0	001	GALLERIA SAN GIORGIO IN SALICI (GA16 - GI08 - GN04 - GI09 - GA17) - Da Pk 140+181.85 a Pk 143+575.33 - Relazione geotecnica
INOR	11	E	E2	R	I	GN	04	0	0	001	GALLERIA SAN GIORGIO IN SALICI (GA16 - GI08 - GN04 - GI09 - GA17) - Da Pk 140+181.85 a Pk 143+575.33 - Condizioni idrogeologiche e sistema di abbassamento della falda
INOR	11	E	E2	R	I	GN	04	0	0	002	GALLERIA SAN GIORGIO IN SALICI (GA16 - GI08 - GN04 - GI09 - GA17) - Da Pk 140+181.85 a Pk 143+575.33 - Relazione idraulica per lo smaltimento delle acque meteoriche
INOR	11	E	E2	P	6	GN	04	0	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Planimetria di inquadramento con ubicazione nicchie e uscite di sicurezza
INOR	11	E	E2	F	6	GN	04	0	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Profilo longitudinale
INOR	11	E	E2	W	9	GN	04	0	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezioni trasversali tav. 1/2
INOR	11	E	E2	W	9	GN	04	0	0	002	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezioni trasversali tav. 2/2
INOR	11	E	E2	W	Z	GN	04	0	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo galleria corrente e tipologici nicchie
INOR	11	E	E2	B	Z	GN	04	0	4	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Impermeabilizzazione e opere di drenaggio - Particolari costruttivi
INOR	11	E	E2	P	9	GN	04	0	0	001	GALLERIA SAN GIORGIO IN SALICI (GA16 - GI08 - GN04 - GI09 - GA17) - Da Pk 140+181.85 a Pk 143+575.33 - Planimetria opere di drenaggio acque di piattaforma
INOR	11	E	E2	4	T	GN	04	0	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Tabella materiali
INOR	11	E	E2	R	O	GN	04	0	0	002	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Relazione generale
INOR	11	E	E2	C	L	GN	04	0	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Relazione di calcolo dei sostegni e dei rivestimenti
INOR	11	E	E2	C	L	GN	04	0	0	002	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Relazione di calcolo dei sostegni e dei rivestimenti - allegati numerici

CODICE										DESCRIZIONE	
INOR	11	E	E2	R	O	GN	04	0	0	003	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Relazione di monitoraggio
INOR	11	E	E2	R	O	GN	04	0	0	004	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Linee guida per l'applicazione delle sezioni tipo
INOR	11	E	E2	S	R	GN	04	0	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Analisi di rischio estesa
INOR	11	E	E2	B	B	GN	04	0	1	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1A - Scavo e consolidamento
INOR	11	E	E2	B	Z	GN	04	0	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1A - Carpenteria centina e dettagli costruttivi
INOR	11	E	E2	B	B	GN	04	0	5	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1A - Carpenteria rivestimento definitivo
INOR	11	E	E2	B	B	GN	04	0	5	002	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1A - Armatura
INOR	11	E	E2	B	B	GN	04	0	1	002	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1B - Scavo e consolidamento
INOR	11	E	E2	B	Z	GN	04	0	0	002	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1B - Carpenteria centina e dettagli costruttivi
INOR	11	E	E2	B	B	GN	04	0	5	003	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1B - Carpenteria rivestimento definitivo
INOR	11	E	E2	B	B	GN	04	0	5	004	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1B - Armatura
INOR	11	E	E2	B	B	GN	04	0	1	003	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1Arid - Scavo e consolidamento
INOR	11	E	E2	B	Z	GN	04	0	0	003	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1Arid - Carpenteria centina e dettagli costruttivi
INOR	11	E	E2	B	B	GN	04	0	5	005	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1Arid - Carpenteria rivestimento definitivo
INOR	11	E	E2	B	B	GN	04	0	5	006	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1Arid - Armatura
INOR	11	E	E2	B	B	GN	04	0	1	004	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1Brid - Scavo e consolidamento
INOR	11	E	E2	B	Z	GN	04	0	0	004	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1Brid - Carpenteria centina e dettagli costruttivi
INOR	11	E	E2	B	B	GN	04	0	5	007	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1Brid - Carpenteria rivestimento definitivo
INOR	11	E	E2	B	B	GN	04	0	5	008	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1Brid - Armatura
INOR	11	E	E2	B	B	GN	04	0	1	005	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Tratta di avanzamento in assenza di traffico - Sezione tipo C1Bbis - Scavo e consolidamento
INOR	11	E	E2	B	Z	GN	04	0	0	005	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1Bbis - Carpenteria centina e dettagli costruttivi
INOR	11	E	E2	B	B	GN	04	0	5	009	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1Bbis - Carpenteria rivestimento definitivo
INOR	11	E	E2	B	B	GN	04	0	5	010	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo C1Bbis - Armatura
INOR	11	E	E2	F	6	GN	04	0	0	002	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Profilo longitudinale geotecnico di previsione e di monitoraggio
INOR	11	E	E2	P	8	GN	04	A	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Piano di monitoraggio
INOR	11	E	E2	W	B	GN	04	A	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezioni tipo di monitoraggio in galleria
INOR	11	E	E2	B	Z	GN	04	A	0	002	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Monitoraggio esterno - Sezioni e particolari tav. 1/2
INOR	11	E	E2	B	Z	GN	04	A	0	003	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Monitoraggio esterno - Sezioni e particolari tav. 2/2
INOR	11	E	E2	P	8	GN	04	A	0	002	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Monitoraggio in corrispondenza del sottoattraversamento autostrada A4
INOR	11	E	E2	L	5	GN	04	A	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Plano-profilo infrastruttura esistente su foto aerea con dati di tracciamento
INOR	11	E	E2	P	5	GN	04	A	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Planimetria di progetto su foto aerea con dati di tracciamento
INOR	11	E	E2	L	7	GN	04	A	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Planimetria e profilo di progetto su cartografia
INOR	11	E	E2	W	9	GN	04	A	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezioni trasversali ampliamento provvisorio - Tav.1
INOR	11	E	E2	W	9	GN	04	A	0	002	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezioni trasversali ampliamento provvisorio - Tav.2
INOR	11	E	E2	W	9	GN	04	A	0	003	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezioni trasversali ampliamento provvisorio - Tav.3
INOR	11	E	E2	W	9	GN	04	A	0	004	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezioni trasversali ampliamento provvisorio - Tav.4
INOR	11	E	E2	W	9	GN	04	A	0	005	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezioni trasversali ampliamento provvisorio - Tav.5
INOR	11	E	E2	W	9	GN	04	A	0	006	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezioni trasversali ampliamento provvisorio - Tav.6
INOR	11	E	E2	P	7	GN	04	A	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Fasi esecutive realizzazione sottoattraversamento A4 - Tav.1
INOR	11	E	E2	P	7	GN	04	A	0	002	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Fasi esecutive realizzazione sottoattraversamento A4 - Tav.2
INOR	11	E	E2	W	A	GN	04	A	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezioni tipologiche ampliamento provvisorio

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Doc. N.

Progetto  
INORLotto  
11Codifica Documento  
E E2 RO GN 040 0 004Rev.  
AFoglio  
6 di 42

CODICE										DESCRIZIONE	
INOR	11	E	E2	B	Z	GN	04	A	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Dettagli costruttivi ampliamento provvisorio
INOR	11	E	E2	P	6	GN	04	A	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Planimetria barriere e segnaletica
INOR	11	E	E2	R	O	GN	04	A	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 -Relazione descrittiva opere stradali
INOR	11	E	E2	L	8	GN	04	A	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Intervento di consolidamento in jet - grouting - planimetria e profilo longitudinale
INOR	11	E	E2	W	Z	GN	04	A	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Intervento di consolidamento in jet - grouting - sezioni trasversali
INOR	11	E	E2	B	X	GN	04	0	8	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI (GN04) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - COLLEGAMENTI EQUIPOTENZIALI MASSE METALLICHE
INOR	11	E	E2	P	6	CM	02	0	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI NICCHIE (CM02) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Planimetria di inquadramento con ubicazione nicchie e uscite di sicurezza
INOR	11	E	E2	W	Z	CM	02	0	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI NICCHIE (CM02) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Sezione tipo galleria corrente e tipologici nicchie
INOR	11	E	E2	B	B	CM	02	0	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI NICCHIE (CM02) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Nicchie NLF + HP + FG - Scavo e consolidamento
INOR	11	E	E2	B	Z	CM	02	0	0	001	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI NICCHIE (CM02) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Nicchie NLF + HP + FG - Carpenteria centina e dettagli costruttivi
INOR	11	E	E2	B	B	CM	02	0	0	002	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI NICCHIE (CM02) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Nicchie NLF + HP + FG - Carpenteria rivestimento definitivo
INOR	11	E	E2	B	B	CM	02	0	0	003	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI NICCHIE (CM02) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Nicchie NLF + HP + FG - Armatura
INOR	11	E	E2	B	B	CM	02	0	0	004	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI NICCHIE (CM02) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Nicchie TT - Scavo e consolidamento
INOR	11	E	E2	B	Z	CM	02	0	0	002	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI NICCHIE (CM02) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Nicchie TT - Carpenteria centina e dettagli costruttivi
INOR	11	E	E2	B	B	CM	02	0	0	005	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI NICCHIE (CM02) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Nicchie TT - Carpenteria rivestimento definitivo
INOR	11	E	E2	B	B	CM	02	0	0	006	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI NICCHIE (CM02) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Nicchie TT - Armatura
INOR	11	E	E2	B	B	CM	02	0	0	007	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI NICCHIE (CM02) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Nicchie ST - Scavo e consolidamento
INOR	11	E	E2	B	Z	CM	02	0	0	003	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI NICCHIE (CM02) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Nicchie ST - Carpenteria centina e dettagli costruttivi
INOR	11	E	E2	B	B	CM	02	0	0	008	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI NICCHIE (CM02) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Nicchie ST - Carpenteria rivestimento definitivo
INOR	11	E	E2	B	B	CM	02	0	0	009	GALLERIA NATURALE SAN GIORGIO IN SALICI NICCHIE (CM02) - Da Pk 140+502.85 a Pk 141+930.24 - Nicchie ST - Armatura

## 2. FASI PROGETTUALI

Per la progettazione della galleria è stato adottato l'approccio A.DE.CO.-R.S. (Lunardi, 2000). L'approccio A.DE.CO.-R.S. (Analisi delle **DE**formazioni **CO**ntrollate nelle **RO**cce e nei **SU**oli) è basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli, ed è valido in qualsiasi tipo di terreno e di situazione tensio - deformativa.

Tale approccio, per gli eccellenti risultati raggiunti in termini di attendibilità e pianificazione anche nei terreni più difficili, si è ormai definitivamente imposto in Italia e si sta affermando anche in altri paesi.

Esso prevede che il progetto e la costruzione di un'opera in sotterraneo si sviluppino attraverso le seguenti fasi:

- una fase conoscitiva comprendente gli studi geologici, le indagini geotecniche, la loro interpretazione e la definizione dei parametri geotecnici e geomeccanici per la progettazione delle opere;
- una fase di diagnosi nella quale, sulla base delle conoscenze geologiche, idrogeologiche, geotecniche e geomeccaniche raccolte nella fase conoscitiva, il progettista è chiamato a fare una previsione attendibile riguardo al comportamento tensio – deformativo dello scavo in sotterraneo, in assenza di stabilizzazione. Da questa previsione dipende la scelta degli interventi di stabilizzazione, quindi la riuscita del progetto. La previsione è effettuata, utilizzando metodi analitici e/o numerici, in termini di genesi, localizzazione, evoluzione ed entità dei probabili fenomeni deformativi che s'innescano nella fascia di terreno attorno allo scavo, considerando con particolare attenzione il comportamento del fronte d'avanzamento. Tale comportamento può ricadere in una delle seguenti categorie: fronte stabile (categoria di comportamento A), fronte stabile a breve termine (categoria di comportamento B), fronte instabile (categoria di comportamento C).
- una fase di terapia, nella quale dopo avere formulato previsioni attendibili riguardo al comportamento tensio – deformativo dell'ammasso in seguito allo scavo, sono scelti gli interventi di stabilizzazione più idonei a controllare, contenere o addirittura anticipare ed annullare le deformazioni. Nel caso della realizzazione di grandi cavità sono, inoltre, definiti il profilo e le diverse fasi di scavo, al fine di minimizzare le zone da consolidare al contorno.
- una fase operativa e di verifica in corso d'opera che prevede sistematici rilievi geostrukturali dei fronti di scavo e l'adozione di un adeguato sistema di monitoraggio che permetta mediante misure d'estrusione del fronte, misure di convergenza, misure estensimetriche ecc., di verificare la correttezza delle ipotesi progettuali.

La valutazione su come evolve lo stato tensionale a seguito dello scavo di una galleria è possibile solo attraverso l'attenta analisi dei fenomeni deformativi in quanto essi possono dare indicazioni sul comportamento della cavità nei riguardi della stabilità a breve termine.

In particolare, l'elemento centrale per l'analisi dell'evoluzione dei fenomeni deformativi al contorno del cavo, attraverso la quale è possibile valutare la stabilità della galleria, è il comportamento del fronte di scavo.

Tale comportamento è condizionato da:

- le caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'ammasso;
- i carichi litostatici corrispondenti alle coperture presenti lungo la galleria;
- la forma e le dimensioni della sezione di scavo;
- le modalità di avanzamento.

Il comportamento del fronte di scavo, al quale è legato quello della cavità, può essere sostanzialmente di tre tipi: stabile, stabile a breve termine e instabile.

**Categoria A: galleria a fronte stabile.**

Se il fronte di scavo è stabile, lo stato tensionale al contorno della cavità in prossimità del fronte si mantiene in campo prevalentemente elastico, ed i fenomeni deformativi osservabili sono di piccola entità e tendono ad esaurirsi rapidamente. In questo caso anche il comportamento del cavo sarà stabile, mantenendosi prevalentemente in campo elastico, e quindi non si rendono necessari interventi preventivi di consolidamento, se non localizzati e in misura molto ridotta. Il rivestimento definitivo costituirà allora il margine di sicurezza per la stabilità a lungo termine.

**Categoria B: galleria a fronte stabile a breve termine.**

Questa condizione si verifica quando lo stato tensionale indotto dall'apertura della cavità supera la resistenza meccanica del materiale al fronte, che non ha più un comportamento di tipo elastico, ma rientra nell'ambito di un comportamento di tipo elasto-plastico. I fenomeni deformativi connessi con la conseguente redistribuzione delle tensioni risultano più accentuati che nel caso precedente, e producono nell'ammasso al fronte una decompressione che porta al superamento della resistenza di picco del materiale. Questa decompressione può essere opportunamente controllata e regimata con adeguati interventi di preconsolidamento del fronte e/o di consolidamento al contorno del cavo. In tale modo si fornisce l'opportuno contenimento all'ammasso, che manterrà un comportamento stabile. Nel caso non si prevedano opportuni interventi, lo stato tensio - deformativo potrà evolvere verso situazioni di instabilità del cavo durante le fasi realizzative. Anche in questo caso, il rivestimento definitivo costituirà il margine di sicurezza per il comportamento a lungo termine.

**Categoria C: galleria a fronte instabile.**

L'instabilità progressiva del fronte di scavo è attribuibile ad un accentuarsi dei fenomeni deformativi in campo plastico, che risultano immediati e più rilevanti, manifestandosi prima ancora che avvenga lo scavo, oltre il fronte stesso. Tali deformazioni producono una decompressione significativa dell'ammasso al fronte, e portano ad un progressivo e rapido decadimento delle caratteristiche geomeccaniche del materiale. Questo tipo di decompressione più accentuata deve essere contenuta prima dell'arrivo del fronte di scavo, e richiede pertanto interventi di preconsolidamento sistematici in avanzamento, che consentano di creare artificialmente l'effetto arco capace di far evolvere la situazione verso configurazioni di equilibrio stabile.

### 3. SINTESI DEL QUADRO GEOLOGICO – IDROGEOLOGICO - GEOTECNICO

#### 3.1. Inquadramento geologico e idrogeologico

La zona occidentale della galleria San Giorgio in Salici è situata sul terrazzo fluviale in sponda sinistra del Fiume Tione: esso delimita i depositi che costituiscono l'alveo attuale di questo corso d'acqua, caratterizzati dalla presenza di ghiaie a supporto di abbondante matrice sabbiosa o limosa, se dovuta al rimaneggiamento di sedimenti antichi molto alterati. L'opera attraversa quindi i rilievi collinari di origine glaciale del Pleistocene medio (corrispondenti ai cordoni morenici del Riss descritti da Venzo nel 1965), costituiti da diamicton massivo a supporto di matrice sabbioso-limosa, talora debolmente cementato, con clasti eterometrici aventi dimensioni massime sino a 2 m (massi erratici), da angolosi a subarrotondati, poligenici.

La galleria San Giorgio attraversa inoltre i depositi fluvioglaciali dell'Allogruppo di Lonato e San Giorgio, rinvenibili nelle piane intermoreniche e costituiti da ghiaie da grossolane a molto grossolane a supporto di clasti con matrice sabbioso-limosa. L'unità è caratterizzata da un profilo di alterazione medio con la presenza di un suolo di colore bruno rossastro e spesso al massimo 1 m in cui si possono distinguere in essa le seguenti facies deposizionali:

- Depositi glaciali (mR)

Sono costituiti da diamicton massivi a supporto di matrice sabbioso limosa, talora debolmente cementati. I clasti sono eterometrici con dimensioni massime sino a 2 m (massi erratici), da angolosi a subarrotondati, poligenici. L'alterazione colpisce circa il 50% dei clasti con litologie carbonatiche da decarbonatate ad argillificate e litologie cristalline da fragili ad arenizzate..

- Depositi fluvioglaciali (fgR3, fgR2, fgR1)

Sono costituiti da ghiaie da grossolane a molto grossolane a supporto di clasti con matrice sabbioso-limosa. I clasti sono arrotondati e poligenici. L'alterazione colpisce circa il 50% dei clasti con litologie carbonatiche da decarbonatate ad argillificate e litologie cristalline da fragili ad arenizzate.

La tratta occidentale della galleria San Giorgio è situata in prossimità del Fiume Tione. Nell'area occupata dai depositi alluvionali (Olocene) di questo corso d'acqua non sono stati eseguiti sondaggi, tuttavia, nei pressi del Fiume Tionello che scorre più ad Est, si evince che le piane fluviali sono costituite da sabbia fine da limosa ad argillosa con resti vegetali negli strati più superficiali e da ghiaia eterometrica.

La galleria attraversa quindi una collina (da pk 140+130 a pk 140+708), caratterizzata da depositi glaciali s.s., costituiti prevalentemente da ciottoli e ghiaia eterometrica subangolare in matrice sabbioso-limosa, sabbia medio-fine localmente limosa con ghiaia eterometrica e subordinati livelli di limo sabbioso.

Procedendo verso Est, intercalati ai depositi sopra descritti, sono presenti sedimenti di origine fluvioglaciale, costituiti da ghiaia e sabbia con ghiaia.

Fino alla fine del tratto in naturale, la galleria San Giorgio attraversa altri rilievi di origine glaciale nei quali prevalgono limi argilloso-sabbiosi con ghiaia eterometrica epoligenica e ciottoli in abbondante matrice limoso-sabbiosa.

In particolare alla pk 141+314 sono presenti lenti di argilla sabbiosa con ghiaia e dalla pk 141+530 circa aumenta la percentuale di depositi sabbiosi e limosi interessati dallo scavo della galleria.

Le piane fluvioglaciali, che intersecano le suddette colline sono caratterizzate dalla presenza di terreni costituiti prevalentemente da sabbia con ghiaia eterometrica localmente limosa.

Dalla progressiva chilometrica 142+308 la galleria artificiale attraversa un'area (per circa 600 m) con sedimenti fluvioglaciali costituiti da sabbia ghiaiosa talora debolmente limosa, con clasti eterometrici e poligenici, da angolosi ad arrotondati, e ghiaia sabbiosa.

Tra le pk 142+920 e 143+600 la galleria attraversa un corpo morenico caratterizzato da depositi glaciali, costituiti da ghiaia con sabbia limosa e ciottoli, con clasti eterometrici, poligenici, da subangolosi a subarrotondati, e sabbia talora limosa con ghiaia eterometrica subangolosa.

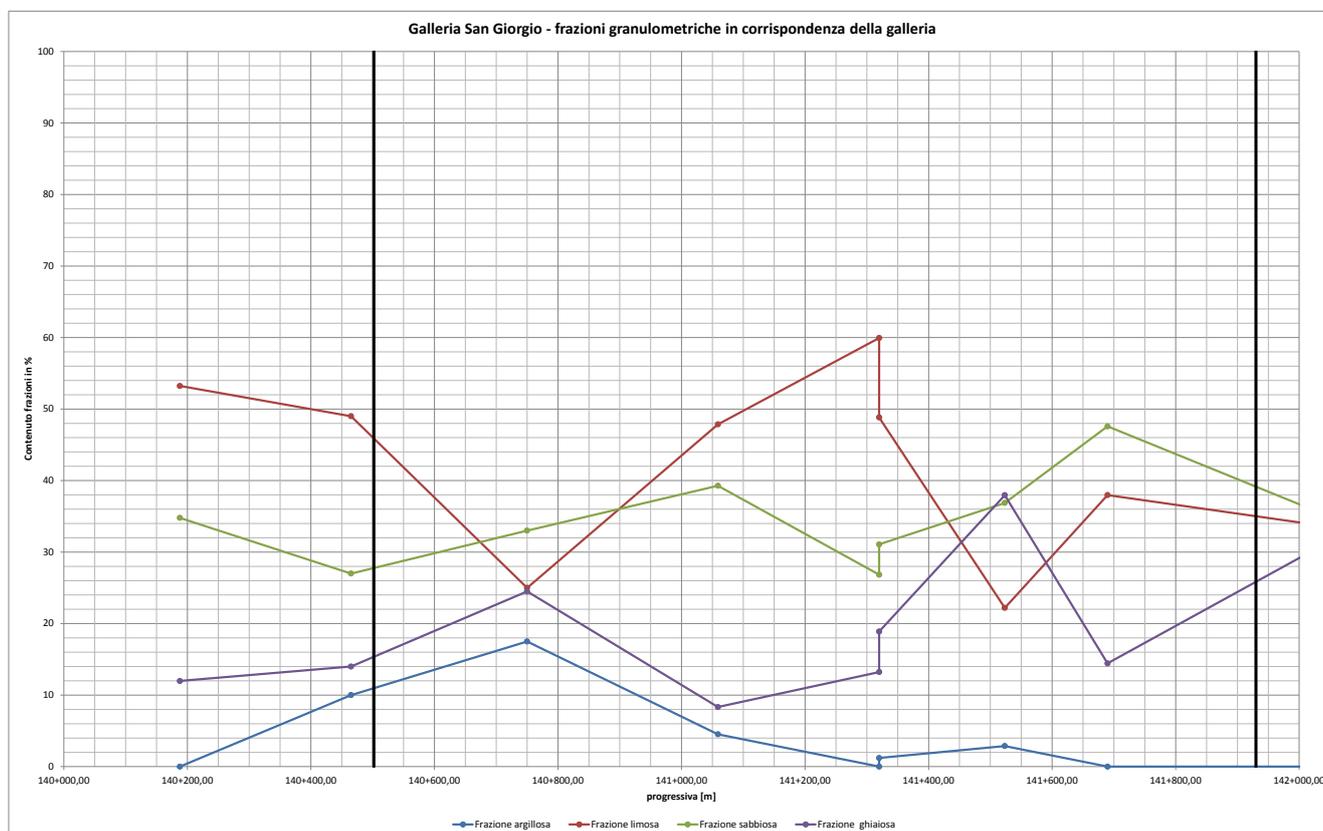
Nell'area della galleria San Giorgio sono frequenti i massi erratici, rilevati in superficie, con dimensioni anche superiori a 2 m, spesso rimossi dalla loro posizione originaria. I sondaggi geognostici eseguiti durante le campagne d'indagine (1992-1994, 2001-2002, 2004 e 2005), in realtà, a differenza di quanto riscontrato in contesti geologici simili, non indicano la presenza significativa di trovanti.

Dall'analisi dei piezometri si riscontra la presenza della falda lungo tutto lo sviluppo della galleria a pochi metri dal piano campagna, e conseguentemente la galleria è situata interamente sotto falda. Nelle analisi si è quindi tenuto conto dell'effetto di drenaggio durante le fasi di scavo e della massima altezza possibile della falda per il dimensionamento del rivestimento definitivo.

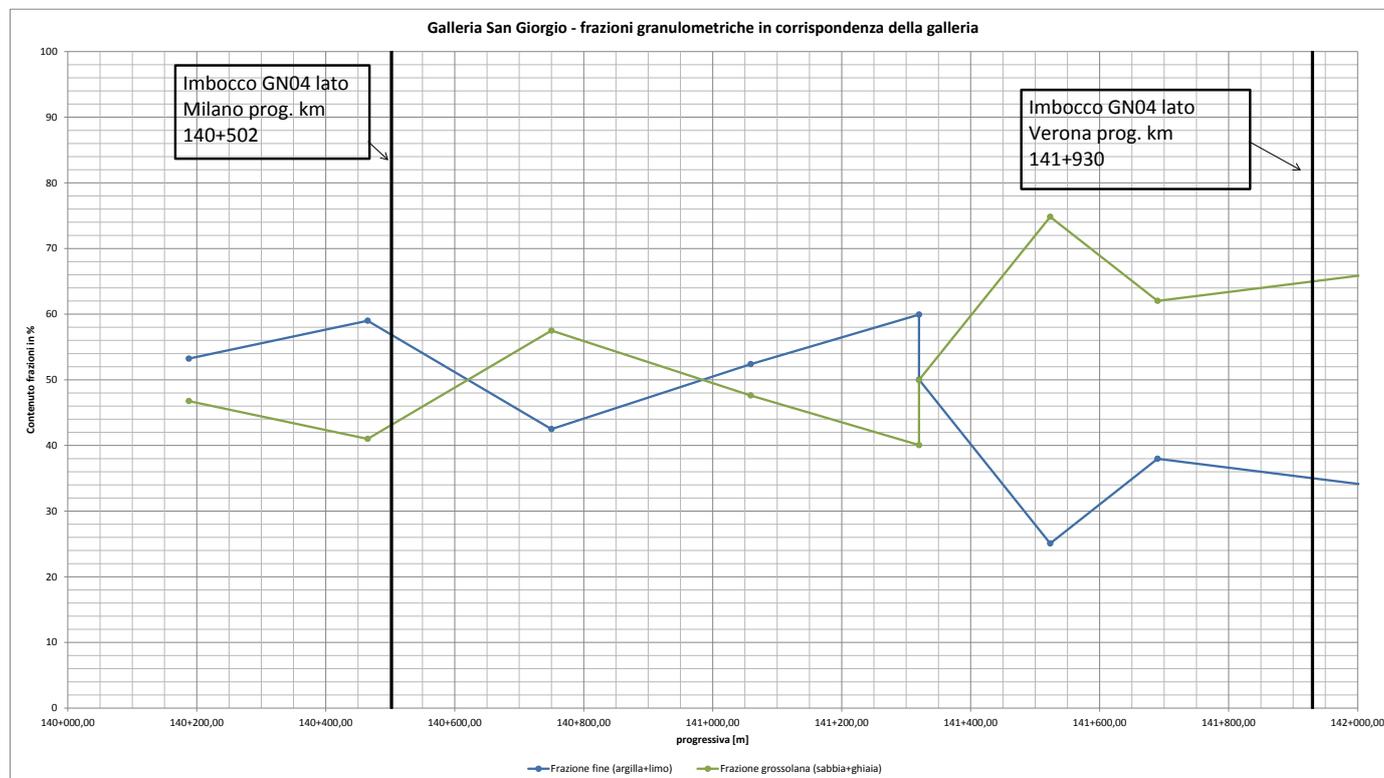
### 3.2. Condizioni geotecniche

Per le condizioni geotecniche si rimanda alla relazione geotecnica del Progetto Esecutivo; di seguito si riportano i dati principali.

Considerando i risultati delle analisi granulometriche relative ai campioni prelevati dai sondaggi, a profondità corrispondenti al fronte di scavo della galleria, sono stati prodotti due grafici, mostrati nella Figura 3.1 e Figura 3.2, che riportano in funzione della progressiva, rispettivamente, l'entità delle quattro frazioni granulometriche (ghiaia, sabbia, limo, argilla) e delle frazioni dei terreni a grana grossa (ghiaia e sabbia) e a grana fine (limo e argilla), in corrispondenza del fronte di scavo.



**Figura 3.1 – Risultati delle analisi granulometriche su campioni prelevati alla profondità corrispondente al fronte di scavo della galleria in funzione delle progressive, relativamente alle diverse frazioni di terreno (ghiaia, sabbia, limo, argilla).**

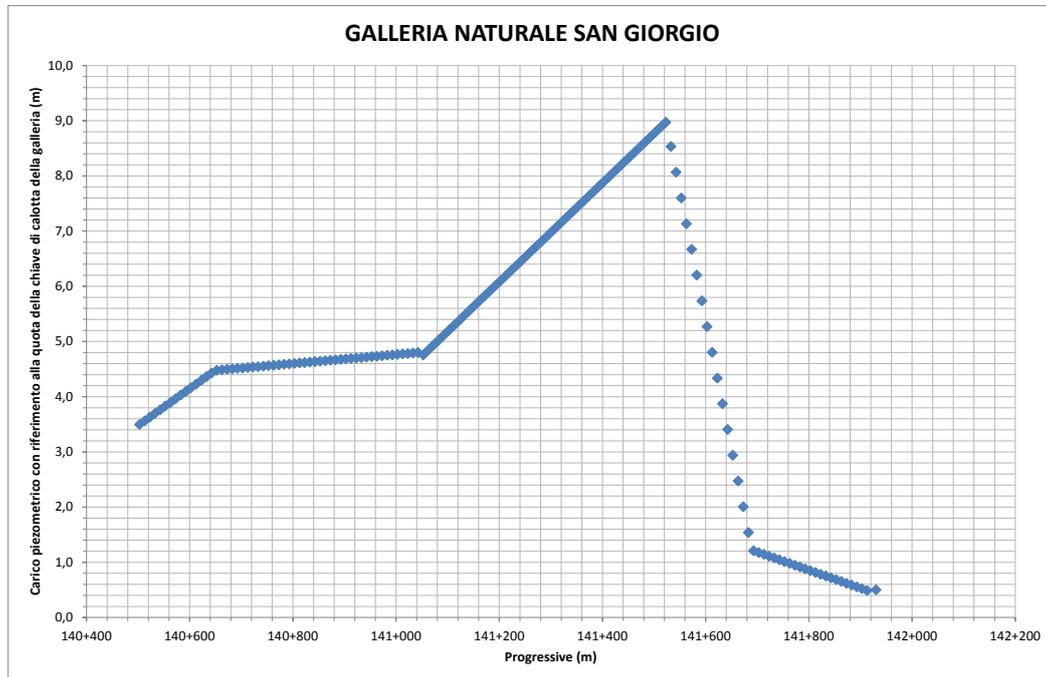


**Figura 3.2 – Risultati delle analisi granulometriche su campioni prelevati alla profondità corrispondente al fronte di scavo della galleria in funzione delle progressive, relativamente alle frazioni di terreno a grana grossa (ghiaia, sabbia) e a grana fine (limo, argilla).**

Come si può notare dalla Figura 3.1 e Figura 3.2, lungo l'intero sviluppo della galleria si possono individuare le seguenti due condizioni geotecniche, relativamente alle frazioni granulometriche dei terreni:

- La prima tratta, dalla progressiva km 140+502.94 di inizio della galleria naturale (imbocco lato Milano) alla progressiva km 141+320 circa, caratterizzata dalla presenza, adottando la convenzione suggerita dall'AGI, di limi con sabbia/sabbioso debolmente ghiaioso e limo sabbioso ghiaioso, ghiaie con sabbia debolmente limosa e ghiaie sabbiose debolmente limose. Con riferimento alla Figura 3.2, in tale tratta, la presenza di terreno a grana fine è mediamente intorno al 55%.
- La seconda tratta, dalla progressiva km 141+320 circa fino all'imbocco lato Verona (progressiva km 141+930.33), è caratterizzata dalla presenza di ghiaie con sabbia limose debolmente argillose, limi sabbiosi con ghiaia debolmente argillose. Con riferimento alla Figura 3.2 in tale tratta la presenza di terreni a grana fine risulta inferiore al 40% con valori minimi intorno al 25%.

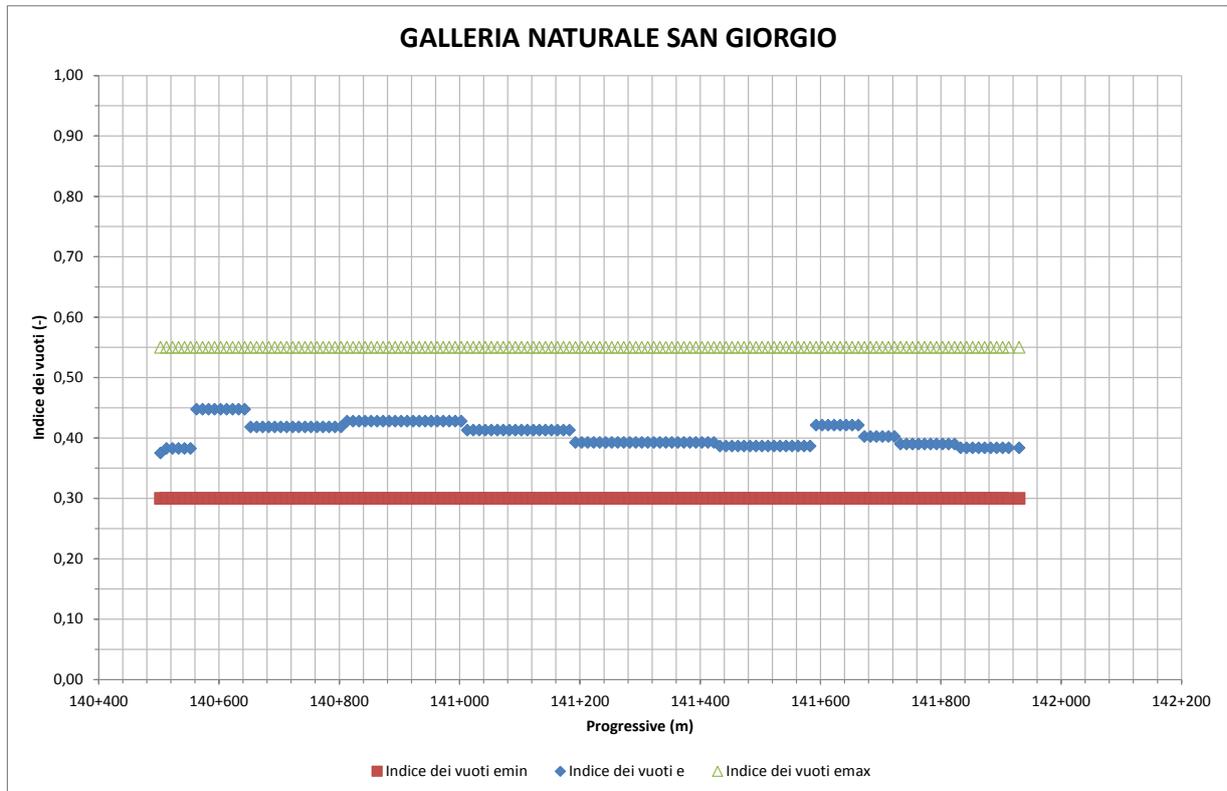
Nella Figura 3.3, è riportato il carico piezometrico massimo con riferimento alla chiave di calotta che è stato adottato per la progettazione esecutiva della galleria.



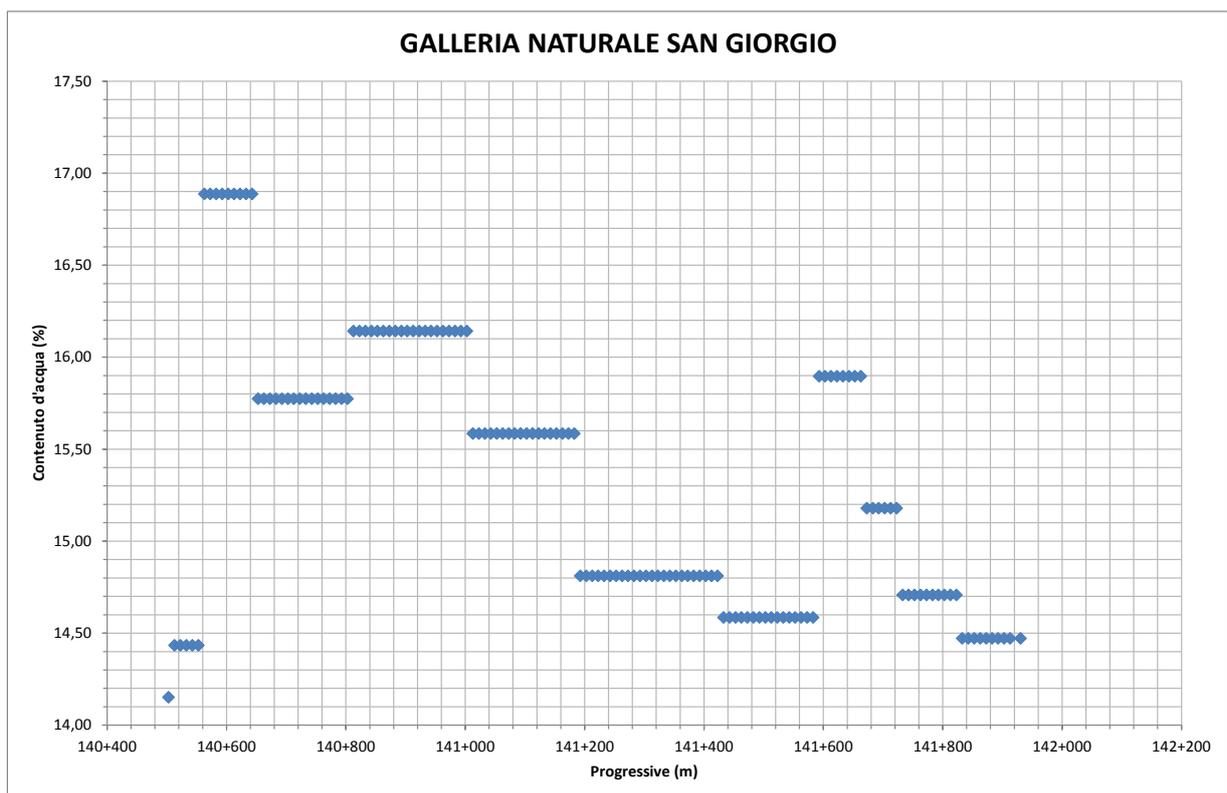
**Figura 3.3 –Carico piezometrico di progetto, con riferimento alla quota della chiave di calotta della galleria.**

Nelle seguenti Figure è riportato l'andamento, lungo il tracciato della galleria alla profondità del fronte di scavo, delle seguenti proprietà indice:

- valori dell'indice dei vuoti minimo e massimo e dell'indice dei vuoti del terreno presente in sito alla quota della galleria;
- contenuto d'acqua del terreno presente in sito alla quota della galleria;
- peso dell'unità di volume del terreno secco del terreno presente in sito alla quota della galleria;
- peso dell'unità di volume del terreno naturale del terreno presente in sito alla quota della galleria.



**Figura 3.4 – Andamento lungo il tracciato della galleria dell’indice dei vuoti minimo e massimo e dell’indice dei vuoti del terreno alla profondità della galleria.**



**Figura 3.5 – Andamento lungo il tracciato della galleria del contenuto d’acqua alla profondità della galleria.**

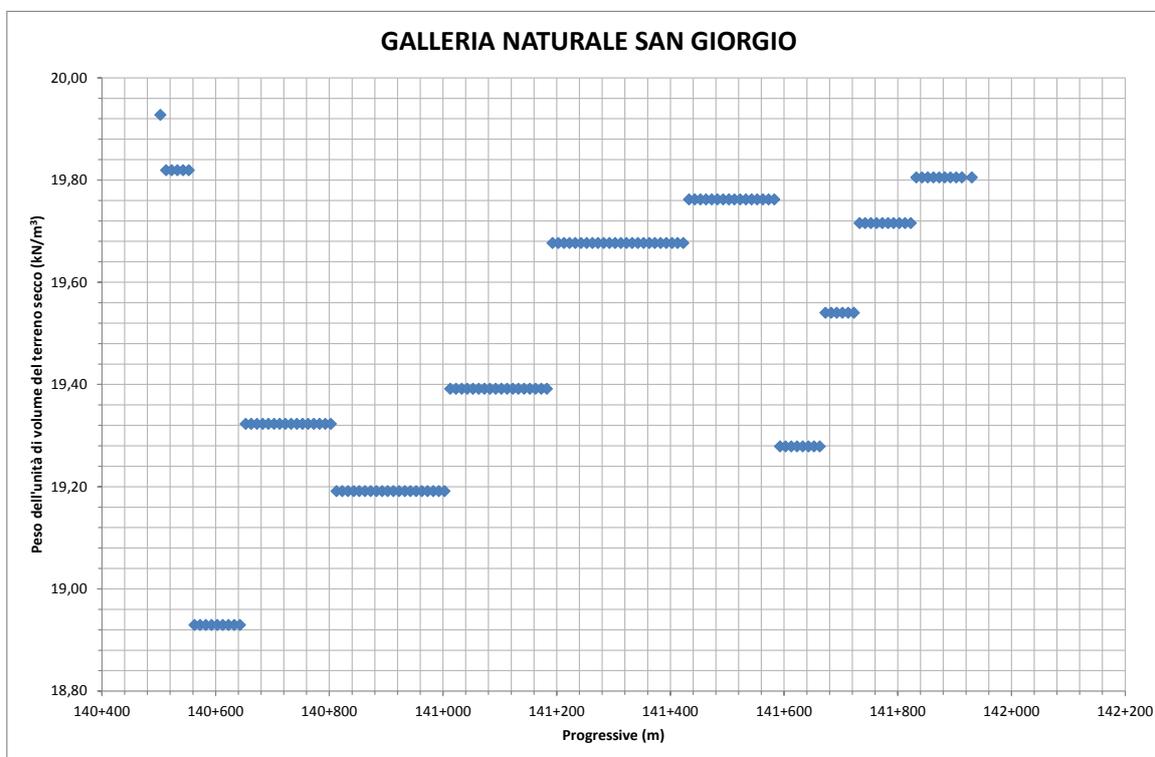


Figura 3.6 – Andamento lungo il tracciato della galleria del peso dell'unità di volume del terreno secco alla profondità della galleria.

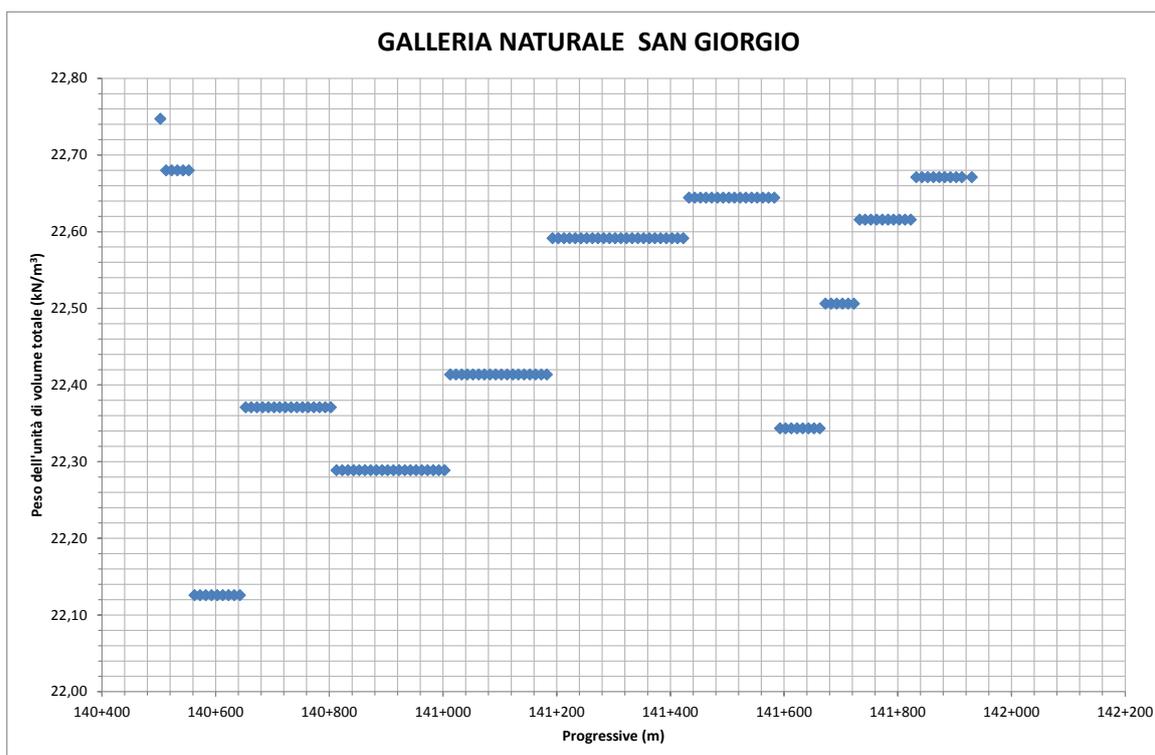
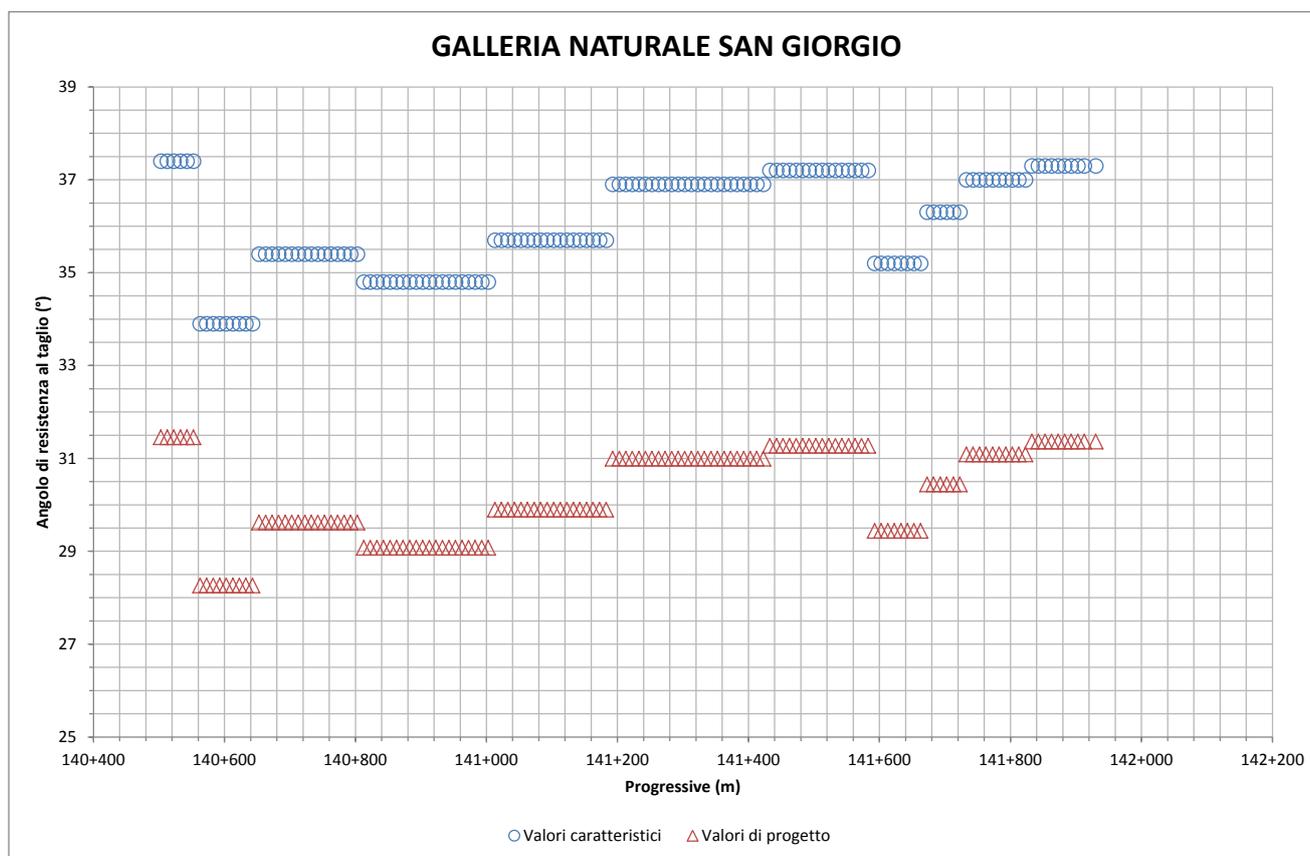


Figura 3.7 – Andamento lungo il tracciato della galleria del peso dell'unità di volume del terreno naturale alla profondità della galleria.

Nella Figura 3.8 e nella Figura 3.9 sono riportati, relativamente alla profondità della galleria, i valori caratteristici e i valori di progetto dell'angolo di resistenza al taglio e della coesione, quest'ultimi ottenuti da quelli caratteristici adottando i coefficienti parziale indicati dalle NTC 2008.

Come si può notare dalla Figura 3.8, gli angoli di resistenza al taglio caratteristici sono compresi fra  $34^\circ$  e  $37^\circ$  mentre i valori di progetto risultano compresi fra  $28^\circ$  e  $31^\circ$ .

I valori caratteristici della coesione lungo la galleria variano da 10 kPa a 25 kPa e di conseguenza quelli di progetto sono compresi fra 8 kPa a 20 kPa.



**Figura 3.8 – Andamento lungo il tracciato della galleria dei valori caratteristici e di progetto dell'angolo di resistenza al taglio.**

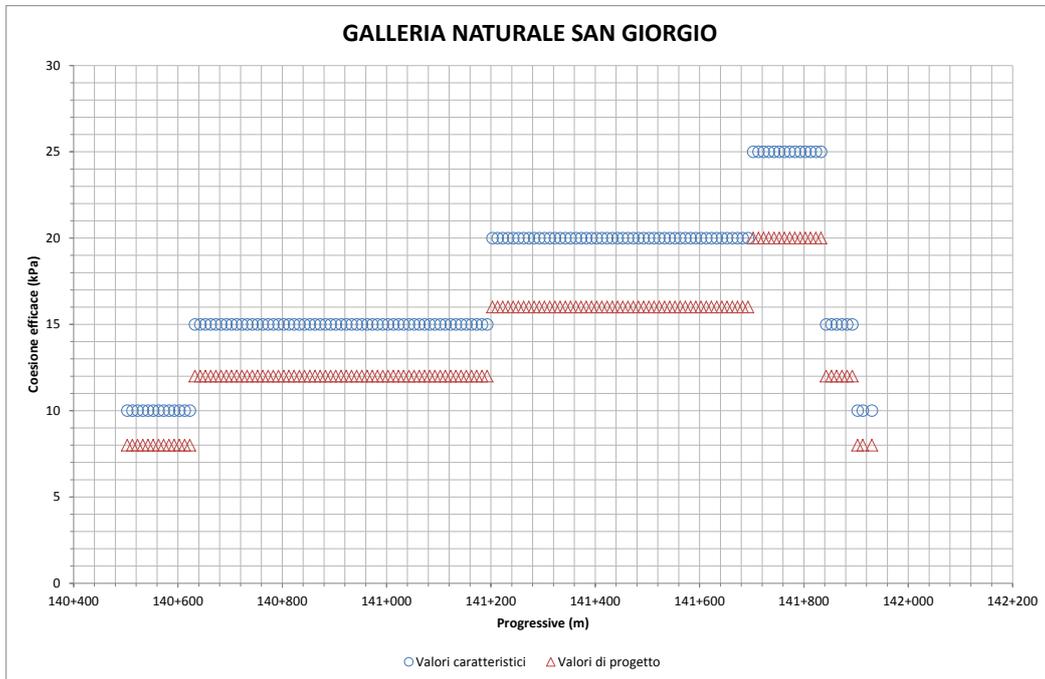


Figura 3.9 – Andamento lungo il tracciato della galleria dei valori caratteristici e di progetto di coesione.

Per i moduli di Young operativi, nella Figura 3.10 sono riportati sia i valori ottenuti dall'interpretazione delle prove SPT sia da quelli ottenuti dall'interpretazione delle prove cross hole. Come si può notare i valori ottenuti dalle prove STP per coperture elevate tendono a sottostimare i reali valori dei moduli di Young operativi, anche a causa del fatto che la maggior parte delle prove sono andate a rifiuto. Per la progettazione esecutiva della galleria sono stati adottati i valori ottenuti dalle prove cross - hole.

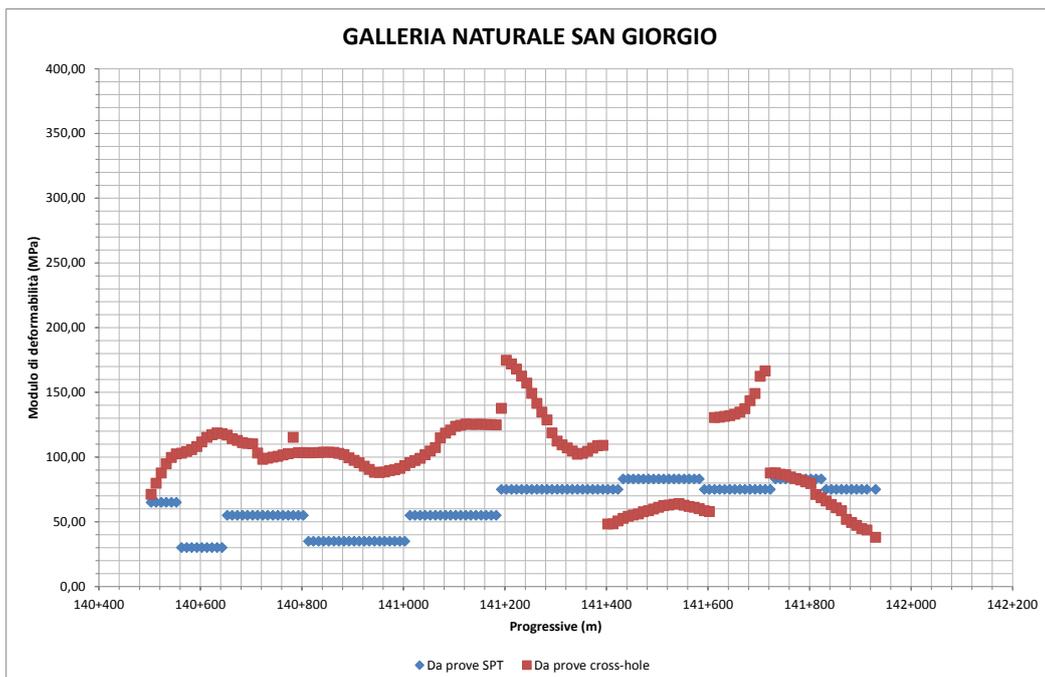


Figura 3.10 – Andamento lungo il tracciato della galleria dei valori del modulo di Young operativo,  $E_{op}$ .

#### 4. PREVISIONE DEL COMPORTAMENTO DEFORMATIVO DEL FRONTE E DEL CAVO

##### 4.1. Analisi con il metodo delle curve caratteristiche

Il metodo delle linee caratteristiche (o metodo convergenza-confinamento) è un metodo di calcolo che consente l'analisi tridimensionale semplificata dello scavo di gallerie in relazione alle proprietà meccaniche dell'ammasso attraversato, alle caratteristiche geometriche dell'opera, agli interventi previsti di precontenimento e contenimento, e all'installazione dei rivestimenti provvisori e definitivi.

Il comportamento delle strutture di rivestimento e dell'ammasso vengono studiati separatamente: la curva caratteristica del cavo (o curva di convergenza) rappresenta l'evoluzione della convergenza radiale del cavo al diminuire della tensione radiale agente sul contorno del profilo di scavo, espressa in funzione del tasso di deconfinamento  $\lambda$  con cui viene simulato l'effetto dello scavo in avanzamento.

Le ipotesi alla base del metodo sono le seguenti:

- simmetria cilindrica e stato piano di deformazione;
- ammasso omogeneo ed isotropo;
- stato tensionale iniziale isotropo.

L'ideale campo di applicazione è pertanto costituito da gallerie profonde a sezione circolare.

Le analisi contenute in questo documento sono state svolte con un apposito foglio di calcolo messo a punto per determinare la curva caratteristica di una galleria secondo il metodo proposto dal Prof. Ribacchi.

Il metodo ipotizza un comportamento elastoplastico fragile del terreno ed utilizza il criterio di rottura di Mohr-Coulomb. Si suppone quindi che fino ad un certo livello di sollecitazione (definito tramite parametri di resistenza "di picco") il terreno si comporti in modo elastico, dopodiché le sue caratteristiche di resistenza decadono istantaneamente ai cosiddetti "valori residui" mantenendosi poi costanti man mano che il terreno si deforma plasticamente. I parametri di resistenza richiesti sono l'angolo di attrito e la coesione rispettivamente di picco e residui ( $\phi_p, c_p, \phi_r$  e  $c_r$ ).

Per quanto riguarda i parametri di deformabilità, è richiesto il coefficiente di Poisson  $\nu$  ed è possibile ipotizzare due diversi moduli elastici nella zona elastica e plastica per simulare in modo approssimato il decadimento di rigidezza che ha luogo per effetto della plasticizzazione.

Nelle analisi di seguito riportate, relative alla galleria San Giorgio in Salici, si è adottato il criterio di rottura di Mohr-Coulomb assumendo un comportamento elastoplastico ideale del terreno con coesione di picco uguale a quella residua e angolo di attrito di picco pari a quello residuo o l'ipotesi di comportamento fragile della roccia con valori di picco differenti da quelli residui.

In queste condizioni, il metodo fornisce la possibilità di valutare l'estensione della fascia di materiale elasticizzato nell'intorno del cavo nonché la convergenza delle pareti dello scavo.

La soluzione del problema, con il metodo delle curve caratteristiche, schematizza la galleria con una sezione circolare e profonda (forze di volume trascurabili rispetto alla sollecitazione naturale alla quota dello scavo), scavata in un mezzo omogeneo ed isotropo.

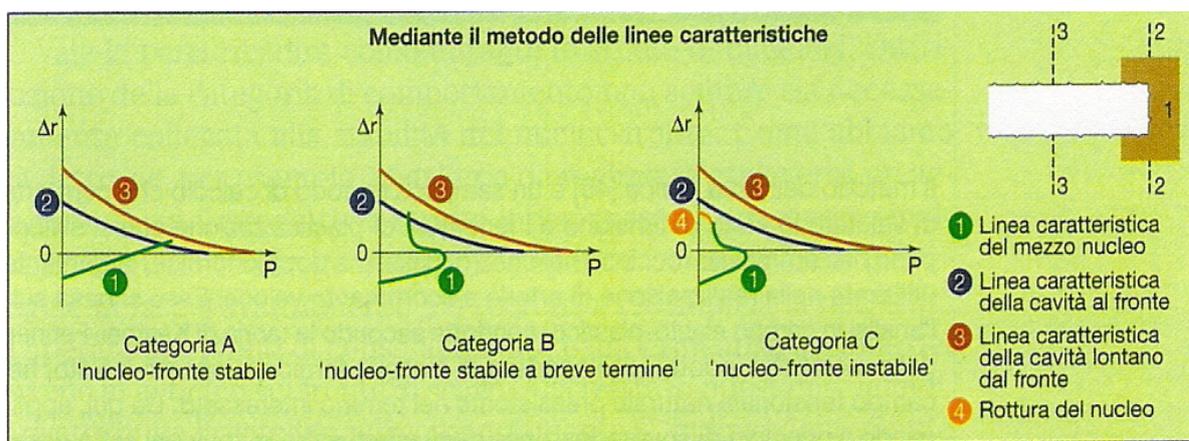
Lo scavo della galleria causa una variazione delle condizioni d'equilibrio preesistenti. All'avanzare del fronte si ha una progressiva chiusura, o convergenza, immediatamente dietro al fronte.

Il metodo di calcolo permette di valutare l'andamento delle deformazioni radiali delle diverse zone della galleria (fronte, cavità, nucleo di terreno al fronte) al variare delle pressioni di contenimento. Queste pressioni partendo dal valore di tensione naturale all'interno dell'ammasso diminuiscono fino ad annullarsi per cavità a distanza maggiore dal

raggio d'azione del fronte di scavo. Mediante la sovrapposizione degli effetti delle curve "caratteristiche" (curve che legano le deformazioni radiali alle pressioni di contenimento) è possibile rappresentare il problema tridimensionale in prossimità del fronte di scavo ed il problema bidimensionale lungo la cavità al di fuori del raggio d'azione del fronte.

Dall'andamento delle curve caratteristiche, e in particolare dall'andamento della curva caratteristica del nucleo – fronte in relazione a quello della linea caratteristica della cavità in corrispondenza del fronte di scavo, è agevole prevedere la categoria di comportamento della futura galleria nella tratta considerata (Figura 4.1):

- se la linea caratteristica del nucleo – fronte incontra quella della cavità in corrispondenza del fronte conservando condizioni di elasticità, la futura galleria avrà un comportamento a nucleo – fronte stabile (categoria A);
- se la linea caratteristica del nucleo – fronte incontra quella della cavità in corrispondenza del fronte in condizioni di elastoplasticità, avremo condizioni di nucleo – fronte stabile a breve termine (categoria B);
- se, infine, la linea caratteristica del nucleo – fronte non incontra quella della cavità in corrispondenza del fronte perché deformandosi in elastoplasticità giunge al collasso, avremo condizioni di nucleo – fronte instabile (categoria C).



**Figura 4.1 - Metodo delle curve caratteristiche, previsione della categoria di comportamento.**

Più precisamente nella seguente tabella è riportato il criterio che sarà adottato per la valutazione della categoria di comportamento.

**Tabella 4.1 – Criterio adottato per la valutazione della categoria di comportamento (approccio progettuale ADECO-RS) sulla base dei risultati preliminari con il metodo delle curve caratteristiche.**

Parametro	Categoria A: galleria a fronte stabile	Categoria B: galleria a fronte stabile a breve termine	Categoria C: galleria a fronte instabile.
Convergenza al fronte	$u_F / R \leq 0.5 \%$	$0.5 \% < u_F / R \leq 1.0 \%$	$u_F / R > 1.0 \%$
Estensione zona plastica al contorno del cavo	$R_p / R = 1.0$	$1 < R_p / R < 2.0$	$R_p / R \geq 2.0$

$u_F$  = convergenza al fronte  
 $R$  = raggio galleria  
 $R_p$  = raggio plastico

## 4.2. Risultati

Mediante il metodo delle curve caratteristiche sono state esaminate 5 sezioni, che saranno poi analizzate successivamente, più realisticamente, con analisi numeriche 2D, scelte come rappresentative delle condizioni geologiche, idrogeologiche e geotecniche presenti lungo l'intero sviluppo longitudinale della galleria.

La seguente Tabella 4.2 ne riassume le caratteristiche con riferimento alle coperture e ai parametri geotecnici caratteristici assunti per le verifiche.

Per le verifiche con il metodo delle curve caratteristiche è stato adottato il metodo di Ribacchi, descritto nei precedenti paragrafi, che permette di determinare le curve caratteristiche a distanza infinita dal fronte di scavo in base ad un'analisi piana, e quelle in prossimità del fronte in base alla teoria dei vuoti sferici. Il materiale viene considerato elasto-plastico con criterio di rottura di Mohr-Coulomb; mentre i parametri di resistenza assumono valori diversi nelle due zone a comportamento elastico e plastico. Più precisamente la soluzione di Ribacchi è basata sui seguenti parametri:

- Modulo di elasticità,  $E$ , nella zona a comportamento elastico (lo stesso valore viene assegnato alla zona a comportamento plastico);
- Angolo d'attrito,  $\phi'_r$ , nella zona a comportamento plastico;
- Angolo d'attrito,  $\phi'_p$ , nella zona a comportamento elastico;
- Coesione,  $c_r$ , nella zona a comportamento plastico;
- Coesione,  $c_p$ , nella zona a comportamento elastico;
- Angolo di dilatanza,  $\psi$ , oppure incremento di volume per dilatanza,  $V$ , nella zona plasticizzata;
- Coefficiente di Poisson,  $\nu$ .

Come precedentemente discusso, si è adottata una legge elasto-plastica ideale assumendo un unico valore sia per la coesione sia per l'angolo di resistenza al taglio

**Tabella 4.2 – Riepilogo dei dati principali per le analisi effettuate con il metodo delle curve caratteristiche.**

Analisi	Copertura (m)	$\sigma'_{vo}$ (kPa)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$\psi$ (°)	$E$ (MPa)	$\nu$ (-)
1	9	352	10	33	6	70	0.30
2	8	300	15	36	6	40	0.30
3	19.7	587	15	36	6	70	0.30
4	23	660	30	37	6	80	0.30
5	6	286	30	35	6	50	0.30

Le seguenti figure riportano per ciascuna sezione analizzata le curve caratteristiche calcolate con il programma PCCR.XLS, adottando il metodo di Ribacchi.

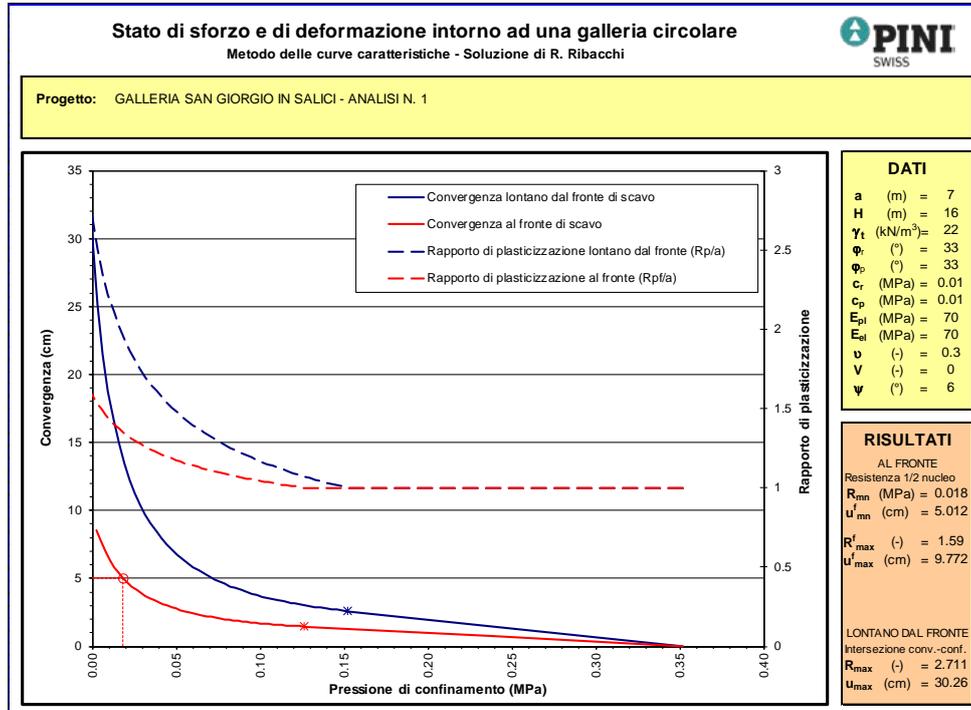


Figura 4.2 - Risultati analisi con il metodo delle curve caratteristiche, per l'analisi 1.

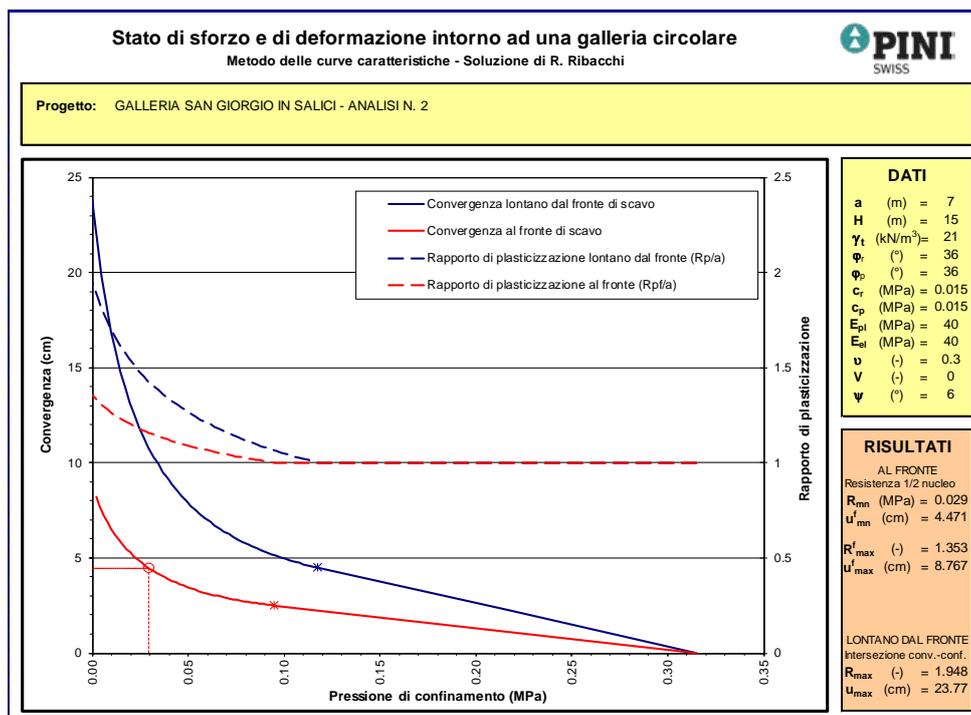


Figura 4.3 - Risultati analisi con il metodo delle curve caratteristiche, per l'analisi 2.

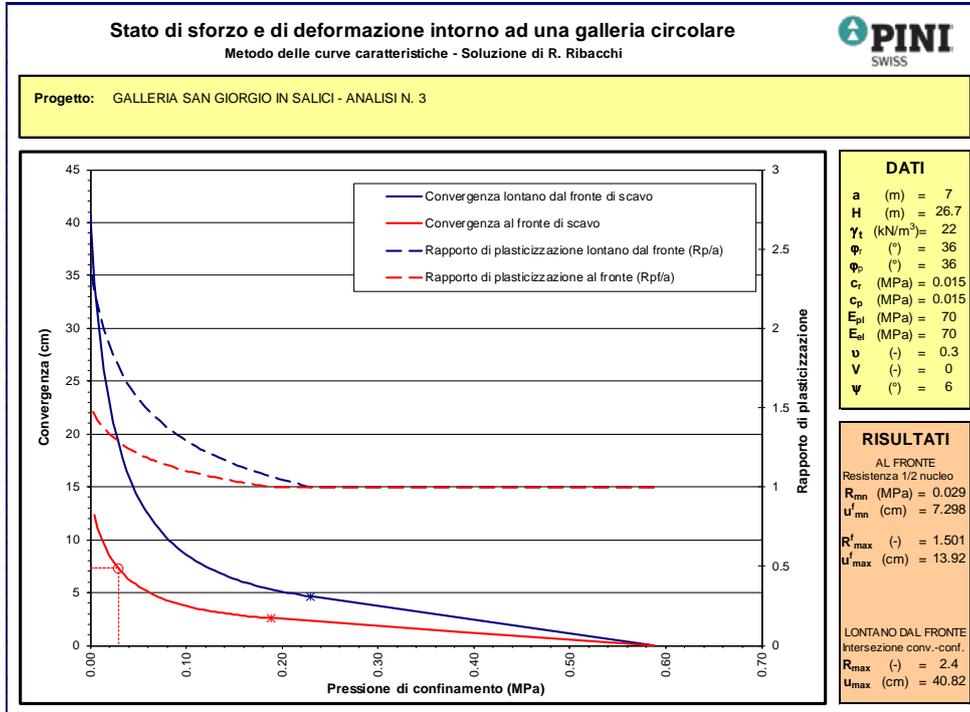


Figura 4.4 - Risultati analisi con il metodo delle curve caratteristiche, per l'analisi 3.

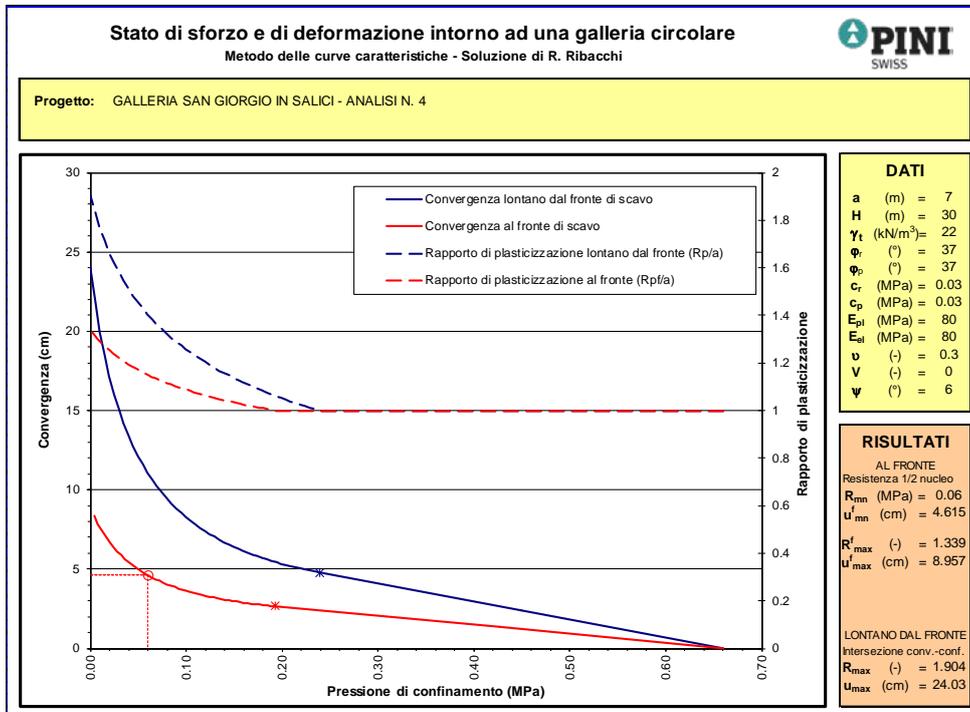


Figura 4.5 - Risultati analisi con il metodo delle curve caratteristiche, per l'analisi 4.

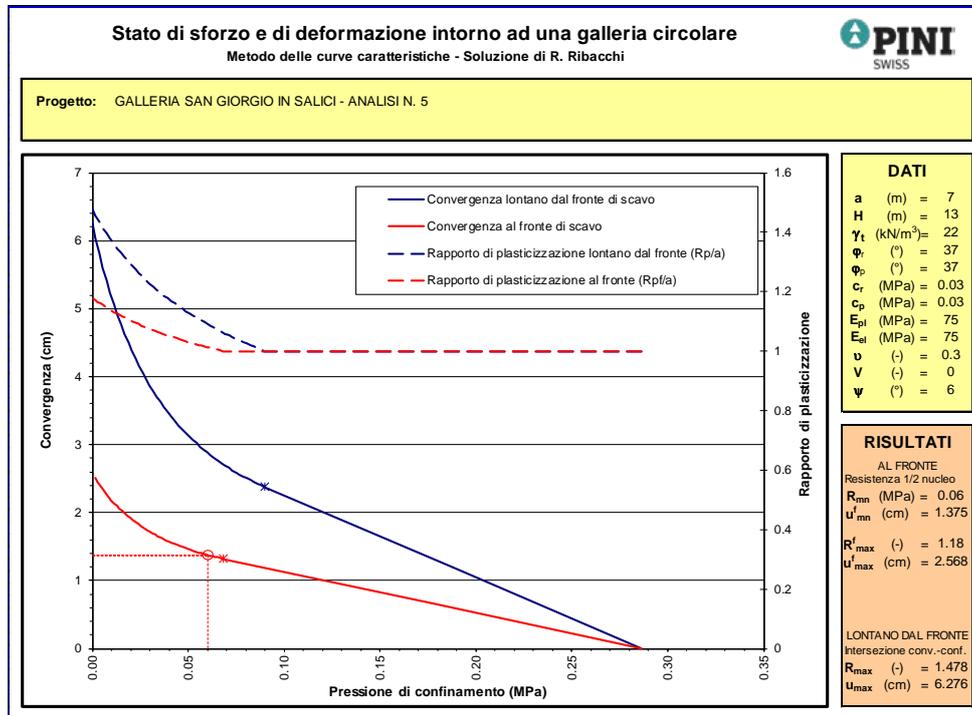


Figura 4.6 - Risultati analisi con il metodo delle curve caratteristiche, per l'analisi 5.

Sulla base delle curve caratteristiche riportate nelle precedenti figure, la seguente Tabella 4.3 riassume i dati salienti ottenuti dalle 5 analisi effettuate.

Tabella 4.3 – Riepilogo risultati analisi del comportamento del cavo libero (non sostenuto).

N. analisi	RISULTATI AL FRONTE DI SCAVO					RISULTATI LONTANO DAL FRONTE DI SCAVO				Categoria di comportamento approccio A.DE.CO.-R.S.
	$R_{mn}$ (MPa)	$u_{max}^f$ (cm)	$\epsilon_{mn}^f$ (%)	$R_{max}^f$ (-)	$\Delta F_{max}^f$ (m)	$u_{max}$ (cm)	$\epsilon_{max}$ (%)	$R_{max}$ (-)	$\Delta F_p$ (m)	
1	0.018	9.8	1.40	1.59	4.13	30.3	4.32	2.71	11.98	C
2	0.029	8.8	1.25	1.35	2.47	23.8	3.40	1.95	6.64	C
3	0.029	13.9	1.99	1.50	3.51	40.8	5.83	2.40	9.80	C
4	0.060	9.0	1.28	1.34	2.37	24.0	3.43	1.90	6.33	C
5	0.058	4.1	0.59	1.21	1.45	10.2	1.46	1.55	3.88	B

R = raggio equivalente sezione di scavo = 7 m

Nella Tabella 4.3, i simboli hanno i seguenti significati:

$R_{mn}$  = resistenza mezzo nucleo

$u_{mn}^f$  = spostamento radiale (convergenza radiale) in corrispondenza della resistenza di mezzo nucleo

$\epsilon_{mn}^f$  = deformazione radiale =  $u_{mn}^f / R$

$u_{max}^f$  = spostamento radiale (convergenza radiale) massimo in corrispondenza del fronte

$\epsilon_{max}^f$  = deformazione radiale massima in corrispondenza del fronte =  $u_{max}^f / R$

$R_{max}^f$  = rapporto di plasticizzazione (rapporto fra il raggio plastico al fronte ed il raggio equivalente del cavo)

$\Delta F_p^f$  = estensione zona plastica al contorno del cavo in prossimità del fronte

$u_{max}$  = convergenza massima del cavo

$\varepsilon_{max}$  = deformazione radiale massima del cavo =  $u_{max}/R$

$R_{max}$  = rapporto di plasticizzazione (rapporto fra il raggio plastico del cavo ed il raggio equivalente del cavo)

$\Delta F_p$  = estensione zona plastica al contorno del cavo

Come si può notare, ad esclusione dell'analisi n. 5, caratterizzata da una copertura molto ridotta, le convergenze e i fenomeni deformativi sono tipici di un comportamento a fronte instabile (categoria di comportamento C).

### 4.3. Stabilità del fronte di scavo

#### 4.3.1. Analisi della stabilità del fronte di scavo

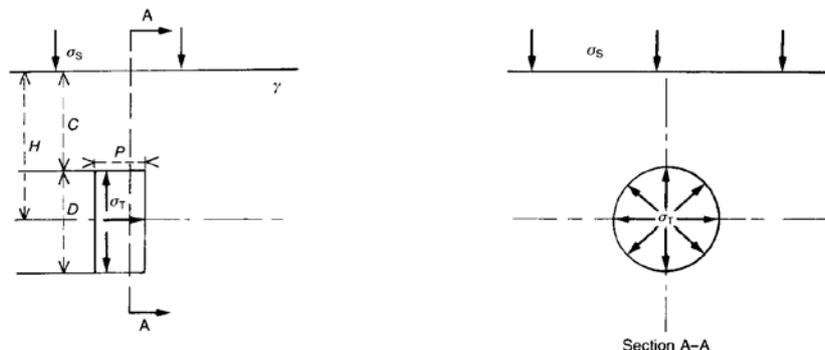
In questo paragrafo vengono riportati i risultati delle verifiche volte a definire i valori della pressione di stabilizzazione da applicare al fronte di scavo, per garantirne la sua stabilità durante gli scavi di avanzamento.

Tra le differenti soluzioni analitiche in forma chiusa presenti in letteratura per il calcolo della pressione da esercitare sul fronte di scavo, in questa sede si è scelto di utilizzare il metodo di Leca & Dormieux (1990) ritenuto, letteratura, per i terreni attritivi, uno dei più attendibili per tale valutazione (Ribacchi, 1978).

Il metodo si basa sull'analisi limite e sulle seguenti assunzioni:

- terreno nel quale viene effettuato lo scavo caratterizzato da un criterio di resistenza alla Mohr-Coulomb;
- mezzo omogeneo ed isotropo;
- galleria superficiale;
- assenza di falda.

Nella Figura 4.7 viene mostrata la geometria semplificata del problema.



**Figura 4.7– Geometria semplificata per il problema della stabilità del fronte di un tunnel superficiale (Leca & Dormieux, 1990).**

La pressione da applicare al fronte di scavo,  $\sigma_T$ , calcolata in asse alla galleria è fornita dalla seguente relazione:

$$\sigma_T = -c' \operatorname{ctg} \phi' + Q_\gamma \cdot \gamma \cdot \frac{D}{2} + Q_s \cdot (\sigma_s + c' \cdot \operatorname{ctg} \phi')$$

dove:

$\sigma_s$  = eventuale sovraccarico applicato sulla superficie del terreno

$\gamma$  = peso dell'unità di volume del terreno;

$D$  = diametro della galleria;

$Q_\gamma$  e  $Q_s$  = fattori adimensionali che dipendono dall'angolo di attrito del materiale, dalla copertura e dal diametro dello scavo.

Ribacchi (1993) suggerisce per i fattori adimensionali i seguenti valori:

$$Q_\gamma^* = \frac{1}{2 \cdot K_p - 3}$$

$$Q_s^* = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{K_p} (R/(C+R))^{K_p-1} \\ (R/(C+R))^{2(K_p-1)} \end{array} \right\}$$

essendo:

$C$  = copertura della galleria

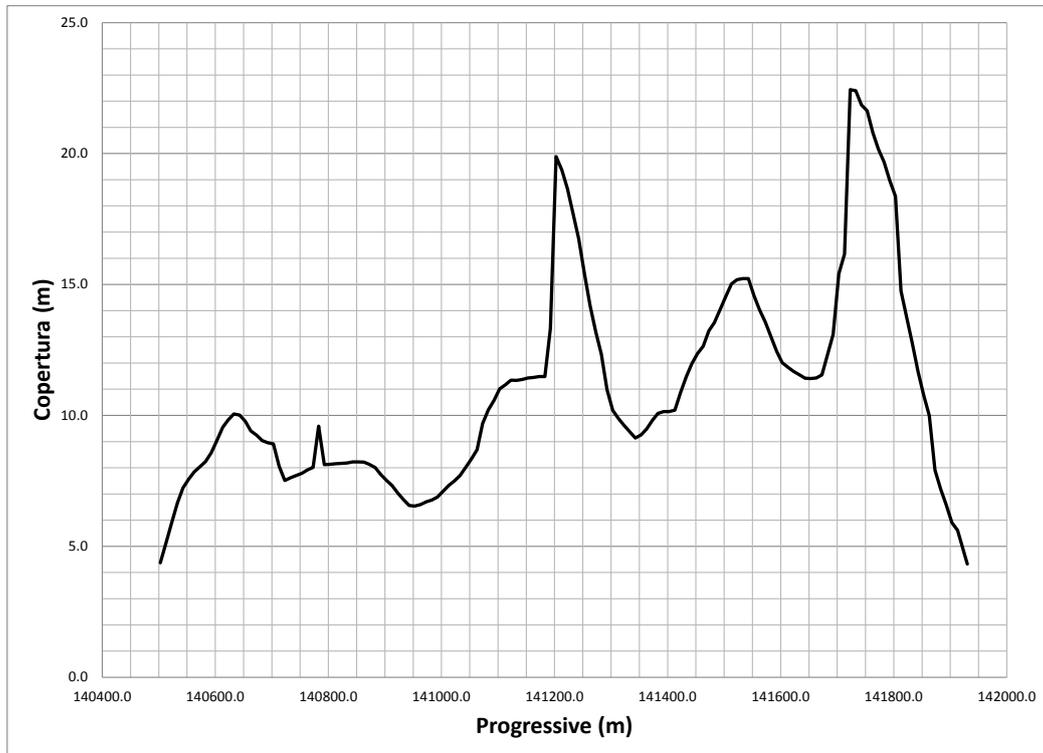
$R$  = raggio della galleria

$$K_p = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$$

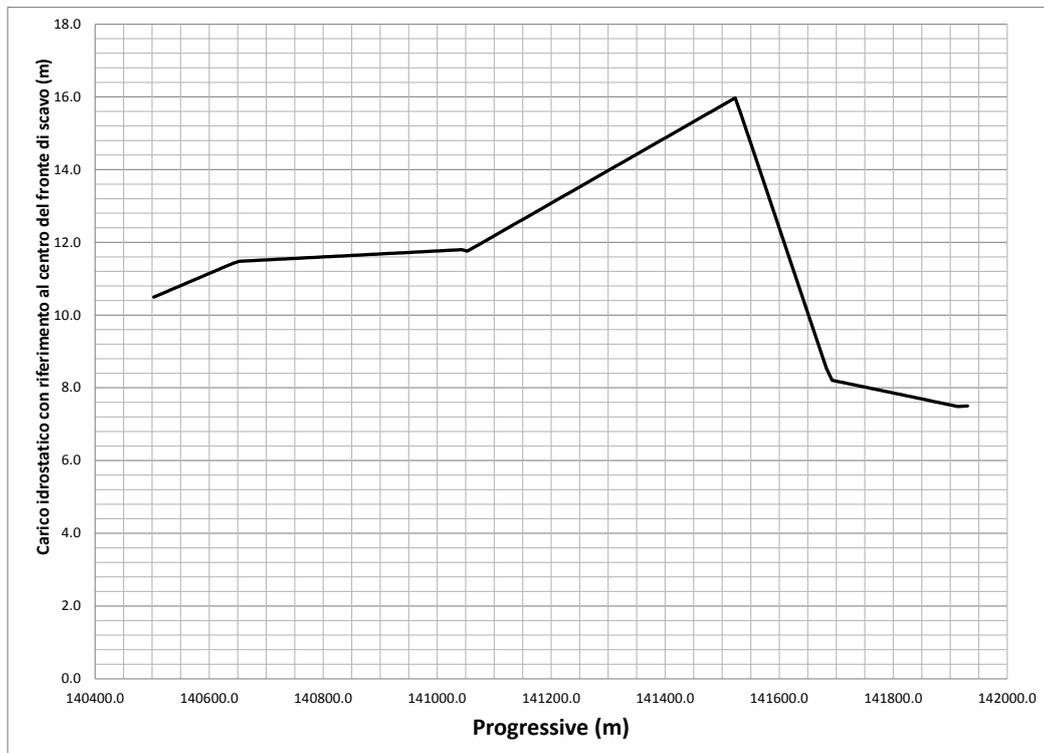
Poiché nella soluzione di Leca & Dormieux il terreno è assunto asciutto, al valore di  $\sigma_T$  è stato sommato il valore della pressione neutra che grava sul fronte di scavo della galleria.

Nelle seguenti Figure sono riportate, in funzione delle progressive: (1) l'andamento delle coperture della galleria, (2) il carico idrostatico, con riferimento al centro/asse del fronte di scavo della galleria; (3) il valore di progetto della coesione del terreno; (4) il valore di progetto dell'angolo di resistenza al taglio del terreno; (5) il valore della pressione di stabilizzazione da applicare al fronte di scavo, ricavata con la soluzione fornita da Leca & Dormieux (1990).

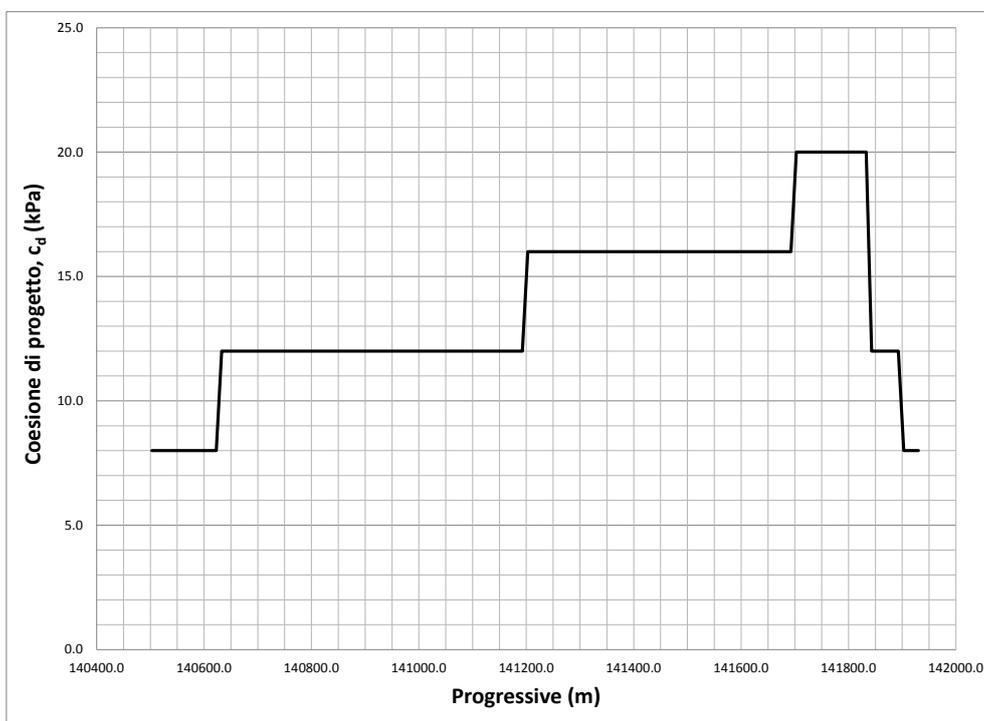
Relativamente ai valori della pressione di stabilizzazione del fronte di scavo, trattandosi di una verifica allo stato limite ultimo di tipo GEO, si è utilizzata la combinazione 2 dell'approccio 1 (A2 + M2 + R2), nella quale i valori caratteristici della resistenza del terreno sono ridotti tramite i coefficienti parziali del gruppo M2, i coefficienti sulla resistenza globale (R2) sono unitari e solo le azioni variabili sfavorevoli sono amplificate con i coefficienti del gruppo A2.



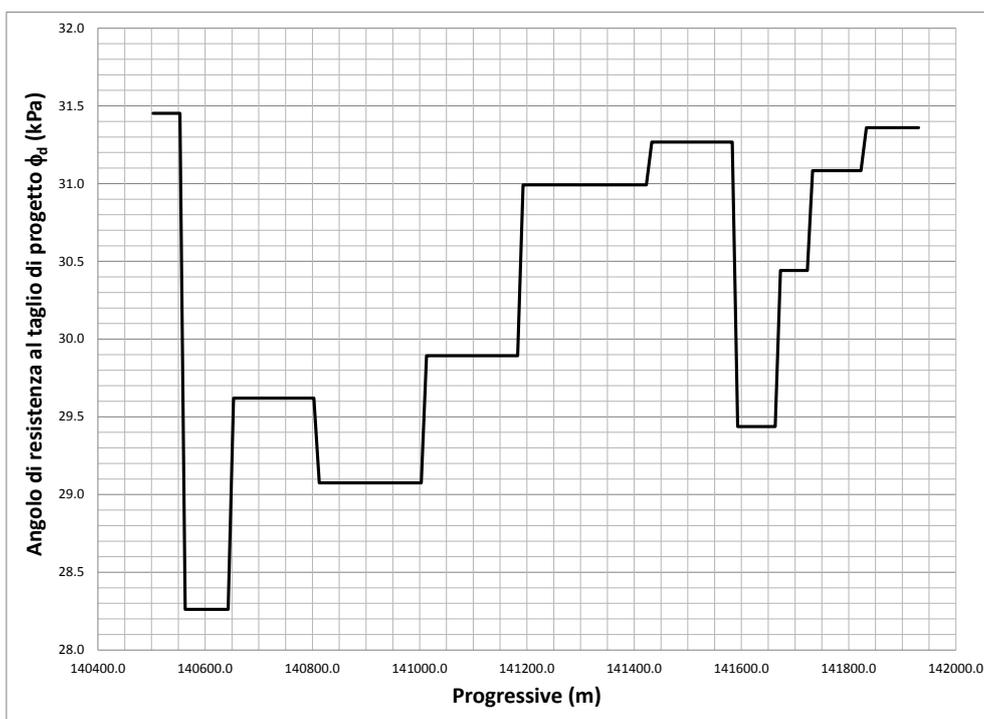
**Figura 4.8– Analisi di stabilità del fronte di scavo, andamento della copertura della galleria in funzione delle progressive, per la valutazione della stabilità del fronte di scavo con il metodo di Leca & Dormieux, 1990.**



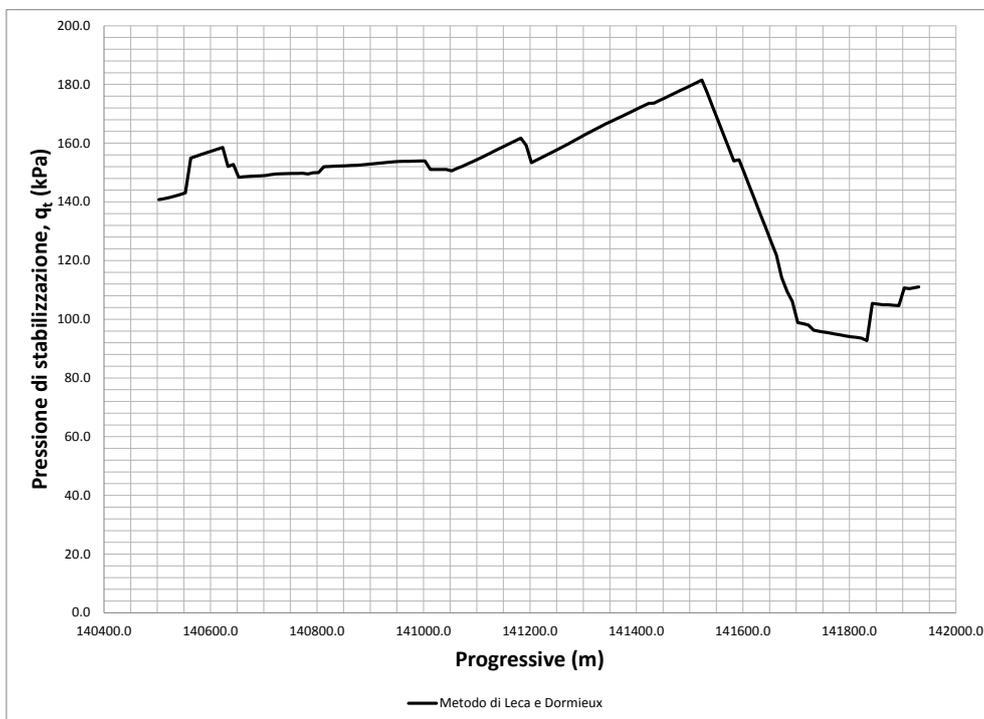
**Figura 4.9– Analisi di stabilità del fronte di scavo, andamento del carico idrostatico della galleria in funzione delle progressive, per la valutazione della stabilità del fronte di scavo con il metodo di Leca & Dormieux, 1990.**



**Figura 4.10– Analisi di stabilità del fronte di scavo, andamento del valore caratteristico della coesione alla quota del fronte di scavo della galleria in funzione delle progressive, per la valutazione della stabilità del fronte di scavo con il metodo di Leca & Dormieux, 1990.**



**Figura 4.11– Analisi di stabilità del fronte di scavo, andamento del valore caratteristico dell'angolo di resistenza al taglio alla quota del fronte di scavo della galleria in funzione delle progressive, per la valutazione della stabilità del fronte di scavo con il metodo di Leca & Dormieux, 1990.**



**Figura 4.12– Analisi di stabilità del fronte di scavo, andamento del valore della pressione di stabilizzazione da applicare al fronte di scavo in funzione delle progressive, ricavata con il metodo di Leca & Dormieux, 1990.**

#### 4.3.2. Modellazione degli interventi di stabilizzazione

Con riferimento ai valori della pressione di stabilizzazione, riportati nel precedente paragrafo, che consentono di garantire la stabilità del fronte di scavo durante gli scavi di avanzamento della galleria naturale, è necessario effettuare un intervento di preconsolidamento del fronte di scavo realizzato con tubi in vetroresina, del diametro 60/40 mm, che realizzando un irrigidimento del nucleo d'avanzamento prevengono i fenomeni di estrusione e mantengono i conseguenti fenomeni deformativi entro valori tali da mantenere l'ammasso in campo elastico.

La capacità di contenimento dipende dal numero di barre in vetroresina installate al fronte e dal loro numero. Il tiro massimo (T) sopportabile dal tubo in VTR è pari al valore minimo tra la resistenza ultima allo sfilamento (T1) ed il limite di rottura del materiale (T2):

L'effetto stabilizzante dei tubi in VTR può essere valutato in base alla seguente relazione:

$$P_{fronte} = \min \left\{ \frac{n \cdot A \cdot \sigma_{adm}}{S}; \frac{n \cdot s_l \cdot \tau_{adm}}{S} \right\}$$

dove:

n = numero delle barre

A = area della sezione delle barre = 1571 mm<sup>2</sup>

$\sigma_{adm}$  = tensione ammissibile del materiale costituente la barra; assumendo  $f_{yk} = 1000$  MPa; si avrebbe un valore pari a  $2/3 \times 1000 = 666$  MPa in accordo alle indicazioni di letteratura (Ribacchi et al., 2004)

S = area del fronte di scavo  $\approx 156$  m<sup>2</sup>

$s_l$  = superficie laterale delle barre =  $\pi \times D \times L$

D = diametro di perforazione = 100 mm

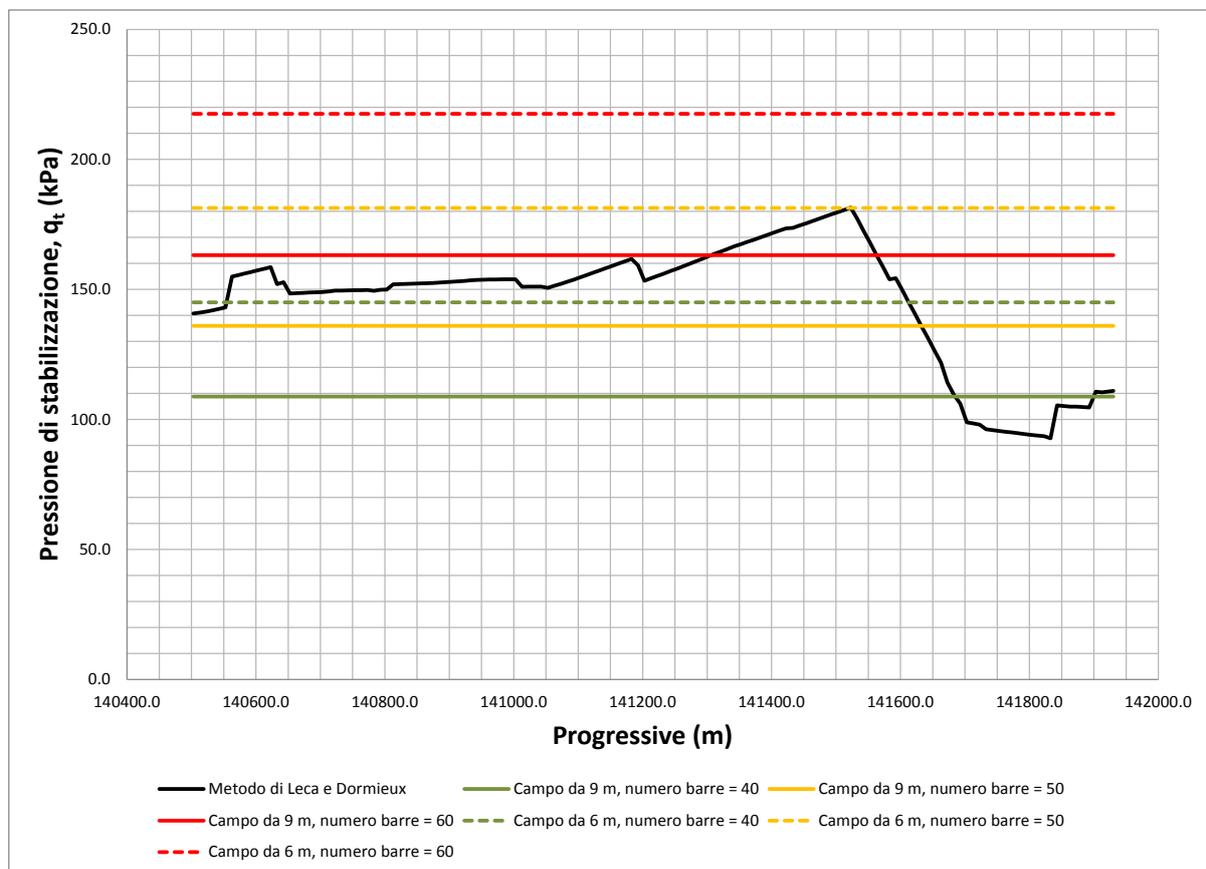
L = lunghezza efficace dei tubi in VTR pari, in funzione della lunghezza di sovrapposizione variabile, a seconda della lunghezza del campo di avanzamento, da 9 m (campo di avanzamento di 9 m) a 12 m (campo di avanzamento di 6 m), essendo la lunghezza delle barre pari a 18 m

$\tau_{adm}$  = tensione di taglio ammissibile all'interfaccia barra - terreno; assunta, assunta pari, in accordo alle indicazioni di letteratura, a 120 kPa

Il valore di  $\sigma_{adm}$  può essere assunto pari a 2/3 della tensione di snervamento della barra per tenere conto del comportamento fragile alla rottura e della scadente resistenza all'interfaccia cemento - terreno (Ribacchi et al., 2004).

Nella Figura 4.13 è riportato l'andamento del numero di barre in VTR della lunghezza di 18 m, in funzione del valore della pressione di stabilizzazione, riportata nel precedente paragrafo, sia per il campo di avanzamento di 9 m e conseguente lunghezza minima di ancoraggio delle barre, a fine campo, di 9 m sia per il campo di avanzamento di 6 m e conseguente lunghezza minima di ancoraggio delle barre, a fine campo, di 12 m.

In tale Figura 4.13 sono riportati, i valori della pressione di stabilizzazione forniti dal valore minimo di barre in VTR (40 barre), medio (50 barre), massimo (60 barre).

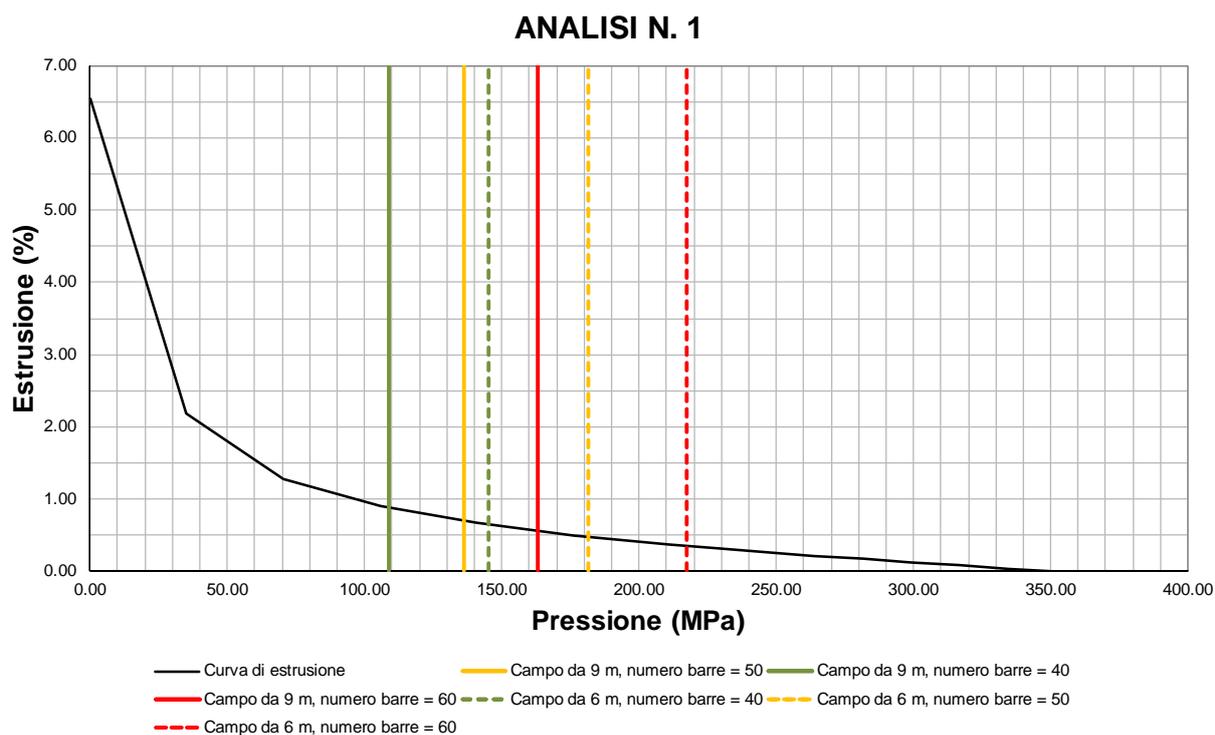


**Figura 4.13– Andamento della pressione di stabilizzazione da applicare al fronte di scavo e valori della pressione di stabilizzazione fornita dalle barre in VTR.**

#### 4.3.3. Valutazione dell'entità delle estrusioni al fronte di scavo

Relativamente alle 5 sezioni, scelte come rappresentative delle diverse condizioni geotecniche presenti lungo il tracciato della galleria, già esaminate con il metodo delle curve caratteristiche, è stata effettuata una valutazione dell'entità delle estrusioni del fronte di scavo, adottando le soluzioni in forma chiusa proposte da Hoek ("Big tunnels in bad rock, 2000 Terzaghi Lecture, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 9. September 2001, pages 726-740).

Nelle seguenti Figure, sono riportati i risultati ottenuti in termini di andamento dell'estrusione al fronte di scavo in funzione della pressione presente al fronte; nelle stesse figure sono anche riportati i valori di pressione esercitati dall'intervento di preconsolidamento – precontenimento del fronte di scavo mediante le barre in vetroresina. Come è possibile apprezzare l'intervento di preconsolidamento riduce considerevolmente l'entità delle estrusioni del fronte di scavo, ovvero consentono di ridurre il detensionamento dell'ammasso al contorno del cavo e il conseguente decadimento delle proprietà geomeccaniche dei terreni presenti sia al fronte sia in corrispondenza del nucleo d'avanzamento.



**Figura 4.14– Valutazione dell'entità delle estrusioni relative alle condizioni geotecniche dell'analisi 1 già condotta con il metodo delle curve caratteristiche.**

## ANALISI N. 2

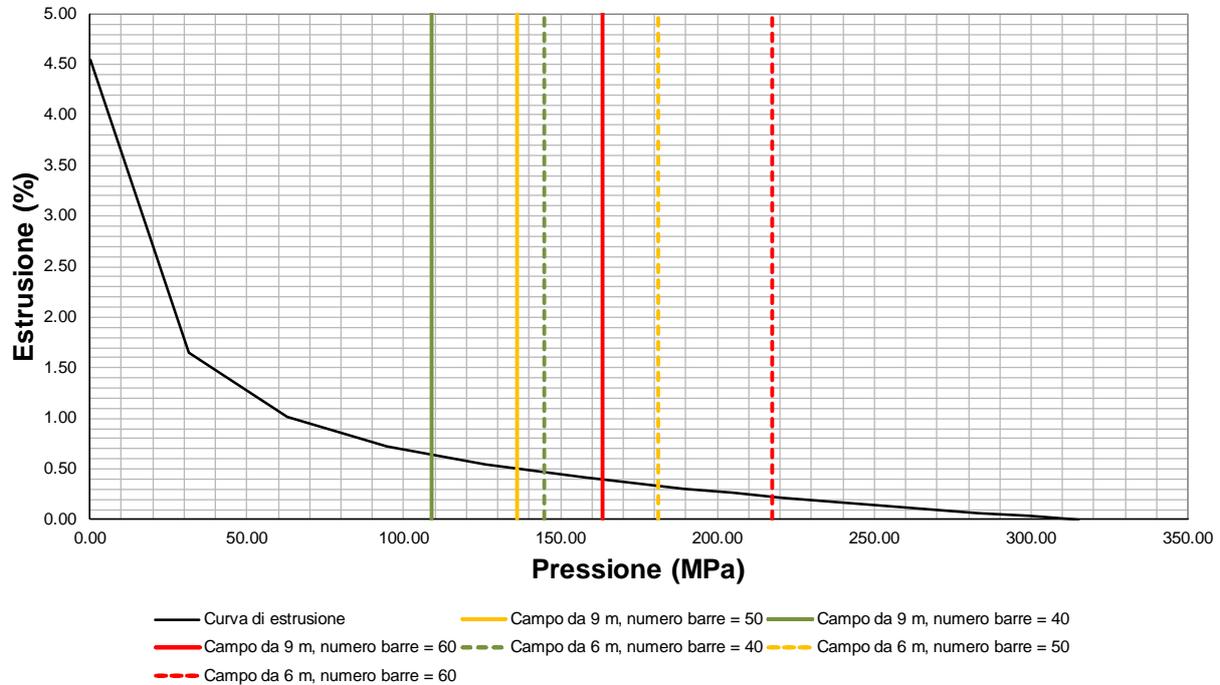


Figura 4.15– Valutazione dell’entità delle estrusioni relative alle condizioni geotecniche dell’analisi 2 già condotta con il metodo delle curve caratteristiche.

## ANALISI N. 3

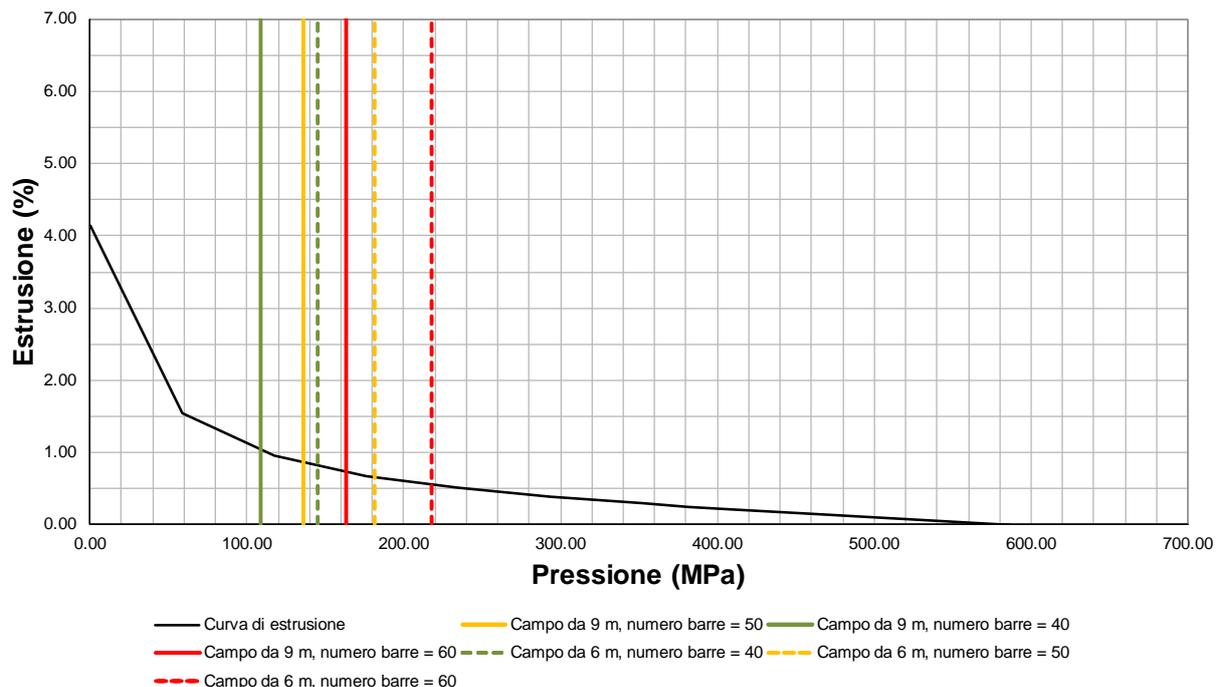


Figura 4.16– Valutazione dell’entità delle estrusioni relative alle condizioni geotecniche dell’analisi 3 già condotta con il metodo delle curve caratteristiche.

## ANALISI N. 4

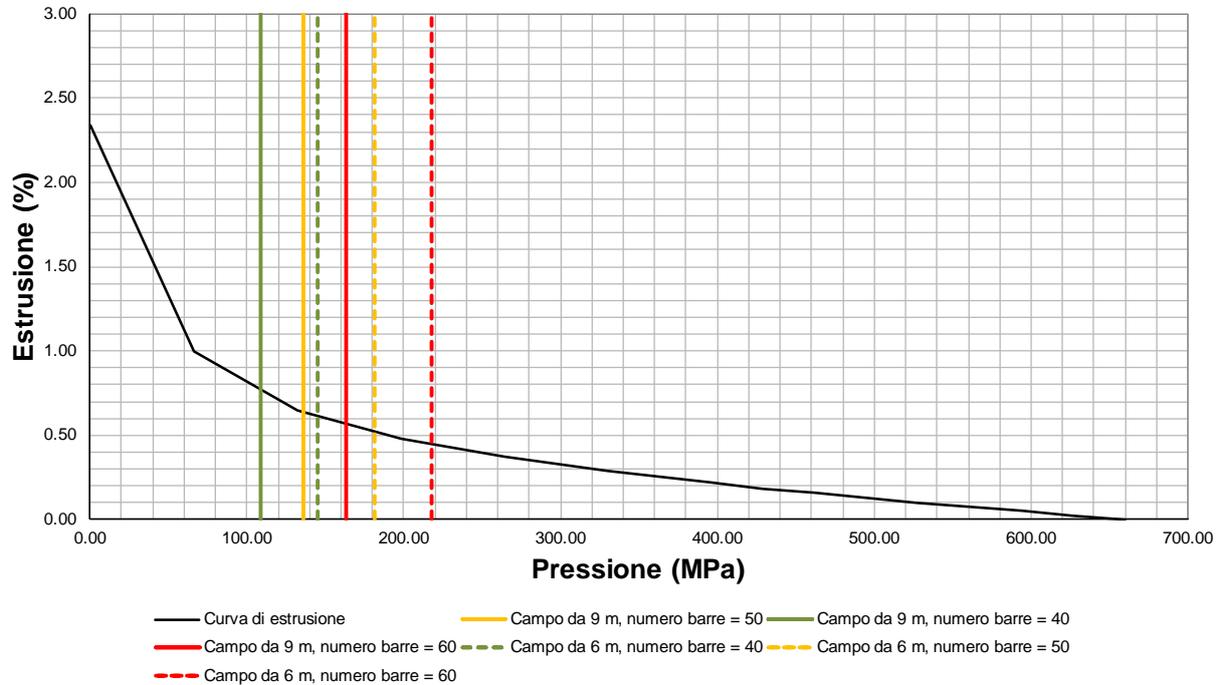


Figura 4.17– Valutazione dell'entità delle estrusioni relative alle condizioni geotecniche dell'analisi 4 già condotta con il metodo delle curve caratteristiche.

## ANALISI N. 5

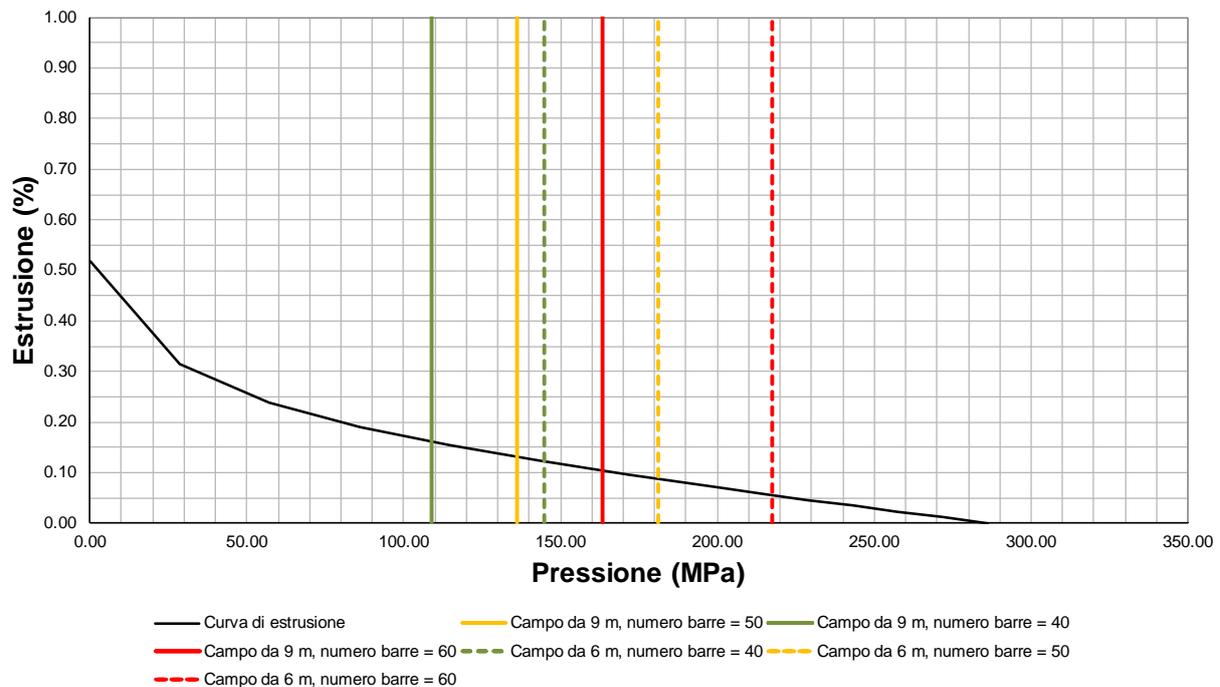


Figura 4.18– Valutazione dell'entità delle estrusioni relative alle condizioni geotecniche dell'analisi 5 già condotta con il metodo delle curve caratteristiche.

#### 4.4. Definizione delle sezioni tipo

Nel presente paragrafo vengono illustrati gli interventi adottati durante la realizzazione della galleria, necessari a garantire la stabilità del cavo a breve e a lungo termine, per le diverse tratte. La percentuale di applicazione delle sezioni di avanzamento previste è riportata nel profilo longitudinale geotecnico di previsione e di monitoraggio.

Tutte le sezioni tipo prevedono lo scavo a piena sezione e sono state messe a punto per garantire elevate condizioni di sicurezza. Infatti, al fine di garantire condizioni di sicurezza durante gli avanzamenti occorre:

- Garantire la stabilità del fronte di scavo attraverso il controllo dei fenomeni deformativi interessanti il nucleo, sottoposto ai carichi gravitativi ed alla redistribuzione tensionale connessa all'apertura del cavo (estrusioni e preconvergenze). Per tutti i terreni interessati dallo scavo della galleria San Giorgio in Salici appartenenti ai depositi glaciali e fluvioglaciali dell'Allogruppo di San Giorgio (Anfiteatro Morenico del Garda), si è stimato, prevalentemente, un comportamento del fronte di tipo "instabile", con deformazioni significative che evolvono in campo elastoplastico e formazione di fasce plastiche già presso il fronte; sono quindi previsti interventi di consolidamento del fronte mediante tubi in vetroresina, con intensità funzione del carico litostatico e dei parametri di resistenza e deformabilità dei materiali (misurabili in corso d'opera dall'entità dei valori di preconvergenza ed estrusione), nonché interventi di presostegno mediante infilaggi metallici e interventi di precontenimento realizzati in avanzamento mediante colonne sub-orizzontali di jet - grouting. Inoltre, poiché la galleria è interamente sotto falda, al fine di abbattere le eventuali pressioni neutre nel nucleo saranno posti in opera, con le geometrie indicate negli elaborati grafici, dei drenaggi in avanzamento.
- Garantire la stabilità del profilo di scavo, specie in calotta, in corrispondenza del fronte; tenendo conto della natura dei terreni è previsto, nella maggior parte delle sezioni tipo correnti, al contorno del cavo un intervento di "presostegno" mediante la messa in opera di una coronella di tubi in acciaio.
- Garantire un adeguato contenimento del cavo, allo scopo di controllare i fenomeni di convergenza ed evitare i conseguenti detensionamenti e rilasci dell'ammasso al contorno del cavo; tale azione sarà effettuata dal priverivestimento, costituito da centine metalliche inglobate in uno strato di calcestruzzo, di rigidità funzione delle caratteristiche geotecniche dell'ammasso, ovvero delle spinte in gioco.
- Garantire il raggiungimento di "condizioni di stabilità definitive" del cavo nel più breve tempo possibile. Tale azione sarà condotta attraverso la tempestiva messa in opera dei priverivestimenti, a seguito di ogni singolo sfondo, e mediante il getto dell'arco rovescio a ridosso del fronte di scavo, così da contrastare efficacemente il piede del priverivestimento, incrementandone la capacità portante. Il getto della calotta dovrà essere effettuato ad una distanza dal fronte funzione del comportamento deformativo del cavo, talora a ridosso del fronte stesso.

Nella Tabella 4.4 si riportano i criteri di applicazione delle diverse sezioni tipo mentre nel seguito si riporta una descrizione dettagliata delle sezioni tipo di avanzamento previste per lo scavo della galleria San Giorgio in Salici e una descrizione delle fasi esecutive. Per una rappresentazione dettagliata delle sezioni tipo si rimanda agli elaborati grafici.

**Tabella 4.4 – Criteri di applicazione delle sezioni tipo.**

Sezione tipo	Criteri di applicazione delle sezioni tipo
C1A (campo di avanzamento da 9 m) C1A-rid (campo di avanzamento da 6 m)	Attraversamento dei depositi glaciali e fluvioglaciali dell'Allogruppo di San Giorgio (Anfiteatro Morenico del Garda) con terreni prevalentemente a grana fine (limo argillosi, limo sabbiosi, limi debolmente sabbiosi con ghiaia), con conseguente necessità del preconsolidamento del fronte di scavo – nucleo d'avanzamento e di un presostegno in calotta, a causa delle ridotte coperture della galleria (comportamento del fronte di tipo "instabile", con deformazioni elevate in campo plastico).
C1B (campo di avanzamento da 9 m) C1B-rid (campo di avanzamento da 6 m)	Attraversamento dei depositi glaciali e fluvioglaciali dell'Allogruppo di San Giorgio (Anfiteatro Morenico del Garda) nelle tratte della galleria caratterizzate da terreni con una maggiore percentuale di terreni a grana grossa e comportamento incoerente del terreno (ghiaie limose e sabbie limose con ghiaia), con conseguente necessità del preconsolidamento del fronte di scavo – nucleo d'avanzamento, di un presostegno in calotta, a causa delle ridotte coperture della galleria, e di un preconsolidamento al contorno del cavo con una coronella di colonne in jet - grouting (comportamento del fronte di tipo "instabile", con deformazioni elevate in campo plastico).
C1Bbis	E' prevista in corrispondenza della tratta del sotto attraversamento dell'autostrada A4, nella quale viene realizzato un consolidamento in jet – grouting dal piano campagna che interessa tutto il profilo di scavo della galleria incluso l'arco rovescio. L'intervento di consolidamento in jet – grouting dalla superficie viene eseguito mediante un apposito piano di deviazione della piattaforma autostradale, concordato con la Concessionaria dell'A4, con la duplice finalità di: (1) realizzare lo stesso consolidamento in corrispondenza della piattaforma autostradale; (2) evitare la presenza del traffico in superficie nella zona dove si stanno eseguendo gli scavi (presenza del fronte di scavo della galleria). In questo caso la sezione tipo è cilindrica con il solo preconsolidamento del fronte di scavo – nucleo di avanzamento.

#### 4.5. Considerazioni conclusive

Nella seguente Tabella 4.5 si riportano, per ciascuna sezione tipo, i valori di convergenza diametrale e di estrusione attesi durante lo scavo della galleria. Tali valori costituiscono i campi di variabilità di riferimento per la regolazione in corso d'opera degli interventi di consolidamento e sostegno, come in dettaglio descritto nel capitolo successivo.

GENERAL CONTRACTOR

Cepav due



ALTA SORVEGLIANZA



Doc. N.

Progetto  
INORLotto  
11Codifica Documento  
E E2 RO GN 040 0 004Rev.  
AFoglio  
34 di 42**Tabella 4.5 – Valori di convergenza ed estrusione attesi.**

Sezione tipo	Condizioni geotecniche	Convergenza diametrica attesa  (cm)	Estrusione cumulata attesa  (cm)
C1A	Depositi glaciali e fluvioglaciali dell'Allogruppo di San Giorgio (Anfiteatro Morenico del Garda) con terreni prevalentemente a grana fine (limo argillosi, limo sabbiosi, limi debolmente sabbiosi con ghiaia).	5 - 9	4 - 8
C1A-rid		5 - 12	< 10
C1B	Attraversamento dei depositi glaciali e fluvioglaciali dell'Allogruppo di San Giorgio (Anfiteatro Morenico del Garda) nelle tratte della galleria caratterizzate da terreni con una maggiore percentuale di terreni a grana grossa e comportamento incoerente del terreno (ghiaie limose e sabbie limose con ghiaia).	6 - 10	5 - 9
C1B-rid		6 - 15	< 10
C1Bbis	Depositi glaciali e fluvioglaciali dell'Allogruppo di San Giorgio (Anfiteatro Morenico del Garda) con terreni prevalentemente a grana fine (limo argillosi, limo sabbiosi, limi debolmente sabbiosi con ghiaia). E' prevista in corrispondenza del sotto attraversamento dell'autostrada A4.	3 - 5	< 5

## 5. LINEE GUIDA PER L'APPLICAZIONE DELLE SEZIONI TIPO E DELLE RELATIVE VARIABILITA'

### 5.1. Criteri per l'applicazione delle linee guida

La previsione del comportamento deformativo del fronte e del cavo descritta al capitolo 4 permetterà, nel corso degli avanzamenti, l'applicazione delle linee guida con riferimento a 5 casi:

1. se i valori di estrusione e di convergenza misurati risultano coerenti con quanto previsto si procede con la sezione tipo prevista, con riferimento alla situazione media degli interventi previsti;
2. se i valori di estrusione e di convergenza risultano minori di quelli attesi si procede nell'ambito delle variabilità previste per la sezione stessa (portandosi verso il minimo degli interventi previsti) sino a raggiungere i valori di riferimento;
3. se i valori di estrusione e di convergenza risultano maggiori di quelli attesi si procede nell'ambito delle variabilità previste per la sezione stessa (portandosi verso il massimo degli interventi previsti) nell'intento di riportarsi ai valori di riferimento;
4. se l'appesantimento degli interventi non risulta sufficiente a normalizzare la situazione delle convergenze e delle estrusioni si procede all'applicazione di una sezione diversa, tra quelle già previste per la tratta di galleria in oggetto.
5. se i successivi cambiamenti di sezione giungono ai limiti superiori previsti sarà necessaria una nuova valutazione delle condizioni geomeccaniche e di avanzamento.

Accanto all'analisi del comportamento deformativo, un ruolo fondamentale è rappresentato dalla raccolta dei dati geomeccanici dei fronti, tramite il rilievo sistematico.

In conclusione, i criteri di valutazione nell'ambito dell'applicazione delle sezioni tipo e delle loro caratteristiche di pre-rivestimento e consolidamento sono essenzialmente legati a due procedure.

La prima procedura, a carattere quantitativo si propone di valutare le convergenze medie della cavità e, ove ritenuto necessario, le estrusioni del fronte di scavo.

La seconda procedura, di tipo qualitativo e osservativo, è costituita dai rilievi del fronte e dalla continua descrizione e analisi dei terreni attraversati.

Le grandezze che saranno regolate in corso d'opera, nell'ambito delle variabilità, sono principalmente:

- passo della centina;
- spessore del calcestruzzo proiettato;
- numero degli elementi in VTR al fronte e lunghezza di sovrapposizione,
- distanza di getto dal fronte dei rivestimenti definitivi (murette, arco rovescio e calotta).

L'approccio proposto permette dunque di definire la strategia di variazione delle caratteristiche strutturali delle sezioni di avanzamento in funzione di quanto osservato durante le lavorazioni.

Il cambiamento di sezione tipo o la variazione, per una medesima sezione tipo, degli interventi di consolidamento e confinamento, dovrà considerare la tendenza di comportamento della cavità. L'analisi dovrà essere condotta per due campi di avanzamento per condurre a variazioni nel terzo campo.

L'approccio progettuale identifica questo processo come:

- campo 1: situazione di allerta/raccolta dati
- campo 2: verifica di quanto evidenziato nel campo 1
- campo 3: situazione di intervento.

La convergenza all'interno della cavità sarà valutata come media di cinque misurazioni. Tali misurazioni si riferiscono a cinque corde che collegano cinque punti situati in prossimità sull'asse equatoriale della sezione di scavo, in prossimità delle reni e in chiave di calotta. Questa scelta si basa su esperienze effettuate in contesti analoghi e nell'intento di rendere il più coerenti possibili i risultati ottenuti con i metodi di calcolo utilizzati e quelli ottenuti dalle misurazioni.

Il confronto andrà effettuato dunque con le convergenze diametrali assunte come riferimento e descritte nei paragrafi precedenti.

Le misurazioni dell'estrusione saranno effettuate mediante l'estrusometro per alcune tratte ritenute significative e indicate nel profilo longitudinale geotecnico di previsione e di monitoraggio; l'adozione dell'estrusometro permetterà di valutare il livello deformativo entro il nucleo di scavo, in profondità.

## 5.2. Sezione tipo C1A

### 5.2.1. Campo di applicazione

Attraversamento dei depositi glaciali e fluvioglaciali dell'Allogruppo di San Giorgio (Anfiteatro Morenico del Garda) con terreni prevalentemente a grana fine (limo argillosi, limo sabbiosi, limi debolmente sabbiosi con ghiaia), con conseguente necessità del preconsolidamento del fronte di scavo – nucleo d'avanzamento e di un presostegno in calotta, a causa delle ridotte coperture della galleria (comportamento del fronte di tipo "instabile", con deformazioni elevate in campo plastico).

### 5.2.2. Interventi previsti

La sezione tipo in fase costruttiva è costituita da:

- n° 2 + 2 drenaggi eseguiti sul fronte di scavo della lunghezza  $L = 24.00$  m ogni 12 m di avanzamento;
- intervento di consolidamento al fronte tramite n° 50 tubi (da intendendersi come valore medio compreso fra un valore minimo di 40 e un valore massimo di 60, in accordo ai criteri riportati nella relazione linee guida per l'applicazione delle sezioni tipo) in vetroresina,  $\phi = 60$  mm, cementati aventi lunghezza  $L = 18.00$  m e sovrapposizione 9.00 m;
- intervento di presostegno tramite 55 tubi in acciaio  $\phi 88.9$  mm, sp. = 10 mm, passo 0.35 m, cementati, lunghezza  $L = 14.00$  m e sovrapposizione di 5.00 m;
- centine costituite da 2 IPN180 passo 1.00 m;
- calcestruzzo proiettato al contorno dello spessore di 25 cm;
- arco rovescio dello spessore 0.8 m;
- rivestimento definitivo di calotta in c.a. avente spessore variabile da 0.5 a 1.50 m.

### 5.2.3. Fasi esecutive

Le fasi esecutive principali sono:

- esecuzione dei drenaggi in avanzamento;
- esecuzione del preconsolidamento del fronte di scavo mediante tubi in VTR;
- posa in opera dei tubi metallici per il presostegno al contorno;
- esecuzione dello scavo a piena sezione, per sfondi di massimo 1.0 m, sagomando il fronte a forma concava;
- posa in opera di centine e calcestruzzo proiettato;
- posa dell'impermeabilizzazione in corrispondenza delle murette e dell'arco rovescio;
- getto di murette ed arco rovescio in c.a., ad una distanza dal fronte  $\leq 27$  m;
- posa dell'impermeabilizzazione di completamento in calotta;
- getto del rivestimento definitivo di calotta, ad una distanza massima dal fronte di scavo  $\leq 36$  m, da verificare in funzione del comportamento deformativo del cavo.

#### 5.2.4. Variabilità

Qualora dai rilievi di convergenza e di estrusione si evidenzi un quadro deformativo verso il massimo del campo di variabilità atteso, l'intensità degli interventi deve essere variata posizionandosi nella parte superiore delle variabilità; qualora invece dai rilievi emerga un quadro deformativo verso il minimo, l'intensità degli interventi deve essere variata posizionandosi nella parte inferiore delle variabilità.

**Tabella 5.1 – Variabilità sezione tipo C1A.**

Applicazione minima	Applicazione massima
Calcestruzzo proiettato: 25 cm	Calcestruzzo proiettato: 25 cm
Passo centine: 1 m	Passo centine: 1 m
40 barre in VTR al fronte, sovrapposizione = 9 m	60 barre in VTR al fronte, sovrapposizione = 9 m

### 5.3. Sezione tipo C1A - rid

#### 5.3.1. Campo di applicazione

Attraversamento dei depositi glaciali e fluvioglaciali dell'Allogruppo di San Giorgio (Anfiteatro Morenico del Garda) con terreni prevalentemente a grana fine (limo argillosi, limo sabbiosi, limi debolmente sabbiosi con ghiaia), con conseguente necessità del preconsolidamento del fronte di scavo – nucleo d'avanzamento e di un presostegno in calotta, a causa delle ridotte coperture della galleria (comportamento del fronte di tipo "instabile", con deformazioni elevate in campo plastico).

#### 5.3.2. Interventi previsti

La sezione tipo in fase costruttiva è costituita da:

- n° 2 + 2 drenaggi eseguiti sul fronte di scavo della lunghezza  $L = 24.00$  m ogni 12 m di avanzamento;
- intervento di consolidamento al fronte tramite n° 60 tubi in vetroresina,  $\phi = 60$  mm, cementati aventi lunghezza  $L = 18.00$  m e sovrapposizione 12.00 m;

- intervento di presostegno tramite 55 tubi in acciaio  $\phi$  88.9 mm, sp. = 10 mm, passo 0.35 m, cementati, lunghezza  $L = 14.00$  m e sovrapposizione di 8.00 m;
- centine costituite da 2 IPN180 passo 1.00 m;
- calcestruzzo proiettato al contorno dello spessore di 25 cm;
- arco rovescio dello spessore 0.8 m;
- rivestimento definitivo di calotta in c.a. avente spessore variabile da 0.5 a 1.50 m.

### 5.3.3. Fasi esecutive

Le fasi esecutive principali sono:

- esecuzione dei drenaggi in avanzamento;
- esecuzione del preconsolidamento del fronte di scavo mediante tubi in VTR;
- posa in opera dei tubi metallici per il presostegno al contorno;
- esecuzione dello scavo a piena sezione, per sfondi di massimo 1.0 m, sagomando il fronte a forma concava;
- posa in opera di centine e calcestruzzo proiettato;
- posa dell'impermeabilizzazione in corrispondenza delle murette e dell'arco rovescio;
- getto di murette ed arco rovescio in c.a., ad una distanza dal fronte  $\leq 27$  m;
- posa dell'impermeabilizzazione di completamento in calotta;
- getto del rivestimento definitivo di calotta, ad una distanza massima dal fronte di scavo  $\leq 36$  m, da verificare in funzione del comportamento deformativo del cavo.

### 5.3.4. Variabilità

Di fatto tale sezione tipo non ha variabilità in quanto se durante l'applicazione della sezione tipo C1A i valori di estrusione e convergenza dovessero superare i valori massimi consentiti per la sezione tipo C1A, il campo di avanzamento viene ridotto da 9 m (sezione tipo C1A) a 6 m (sezione tipo C1A-rid) adottando il massimo numero di barre in VTR contemplato dalla sezione tipo C1A pari a 60.

**Tabella 5.2 – Riepilogo interventi di preconsolidamento e sostegno di prima fase per la sezione tipo C1A - rid.**

Calcestruzzo proiettato: 25 cm

Passo centine: 1 m

60 barre in VTR al fronte, sovrapposizione = 12 m

## 5.4. Sezione tipo C1B

### 5.4.1. Campo di applicazione

Attraversamento dei depositi glaciali e fluvioglaciali dell'Allogruppo di San Giorgio (Anfiteatro Morenico del Garda) nelle tratte della galleria caratterizzate da terreni con una maggiore percentuale di terreni a grana grossa e comportamento incoerente del terreno (ghiaie limose e sabbie limose con ghiaia), con conseguente necessità del preconsolidamento del fronte di scavo – nucleo d'avanzamento, di un presostegno in calotta, a causa delle ridotte coperture della galleria, e di un preconsolidamento al contorno del cavo con una coronella di colonne in jet - grouting (comportamento del fronte di tipo "instabile", con deformazioni elevate in campo plastico).

#### 5.4.2. Interventi previsti

La sezione tipo in fase costruttiva è costituita da:

- esecuzione di n° 2 + 2 drenaggi eseguiti sul fronte di scavo della lunghezza  $L = 24.00$  m ogni 12 m di avanzamento;
- intervento di consolidamento al fronte tramite n° 50 tubi (da intendendersi come valore medio compreso fra un valore minimo di 40 e un valore massimo di 60, in accordo ai criteri riportati nella relazione linee guida per l'applicazione delle sezioni tipo) in vetroresina,  $\phi = 60$  mm, cementati aventi lunghezza  $L = 18.00$  m e sovrapposizione 9.00 m;
- intervento di presostegno tramite 32 tubi in acciaio  $\phi 88.9$  mm, sp. = 10 mm, passo 0.35 m, cementati, lunghezza  $L = 14.00$  m e sovrapposizione di 5.00 m;
- un preconsolidamento al contorno della sezione di scavo realizzato mediante 61 colonne in jet - grouting del diametro di 600 mm della lunghezza di 14 m con sovrapposizione di 5 m;
- un preconsolidamento al piede delle centine costituito da 5 + 5 colonne in jet - grouting della lunghezza massima di 15.6 m eseguite ogni campo di avanzamento di 9 m;
- centine costituite da 2 IPN180 passo 1.00 m;
- calcestruzzo proiettato al contorno dello spessore di 25 cm;
- murette ed arco rovescio dello spessore 0.8 m;
- rivestimento definitivo di calotta in c.a. avente spessore variabile da 0.5 a 1.50 m.

#### 5.4.3. Fasi esecutive

Le fasi esecutive principali sono:

- esecuzione dei drenaggi in avanzamento;
- esecuzione del preconsolidamento del fronte di scavo mediante tubi in VTR;
- posa in opera dei tubi metallici per il presostegno al contorno;
- esecuzione del preconsolidamento al contorno del cavo e al di sotto del piede delle centine;
- esecuzione dello scavo a piena sezione, per sfondi di massimo 1.0 m, sagomando il fronte a forma concava;
- posa in opera di centine e calcestruzzo proiettato;
- posa dell'impermeabilizzazione in corrispondenza delle murette e dell'arco rovescio;
- getto di murette ed arco rovescio in c.a., ad una distanza dal fronte  $\leq 27$  m;
- posa dell'impermeabilizzazione di completamento in calotta;

- getto del rivestimento definitivo di calotta, ad una distanza massima dal fronte di scavo  $\leq 36$  m, da verificare in funzione del comportamento deformativo del cavo.

#### 5.4.4. Variabilità

Qualora dai rilievi di convergenza e di estrusione si evidenzi un quadro deformativo verso il massimo del campo di variabilità atteso, l'intensità degli interventi deve essere variata posizionandosi nella parte superiore delle variabilità; qualora invece dai rilievi emerga un quadro deformativo verso il minimo, l'intensità degli interventi deve essere variata posizionandosi nella parte inferiore delle variabilità.

**Tabella 5.3 – Variabilità sezione tipo C1B.**

Applicazione minima	Applicazione massima
Calcestruzzo proiettato: 25 cm	Calcestruzzo proiettato: 25 cm
Passo centine: 1 m	Passo centine: 1 m
40 barre in VTR al fronte, sovrapposizione = 9 m	60 barre in VTR al fronte, sovrapposizione = 9 m

### 5.5. Sezione tipo C1B - rid

#### 5.5.1. Campo di applicazione

Attraversamento dei depositi glaciali e fluvioglaciali dell'Allogruppo di San Giorgio (Anfiteatro Morenico del Garda) nelle tratte della galleria caratterizzate da terreni con una maggiore percentuale di terreni a grana grossa e comportamento incoerente del terreno (ghiaie limose e sabbie limose con ghiaia), con conseguente necessità del preconsolidamento del fronte di scavo – nucleo d'avanzamento, di un presostegno in calotta, a causa delle ridotte coperture della galleria, e di un preconsolidamento al contorno del cavo con una coronella di colonne in jet - grouting (comportamento del fronte di tipo "instabile", con deformazioni elevate in campo plastico).

#### 5.5.2. Interventi previsti

La sezione tipo in fase costruttiva è costituita da:

- esecuzione di n° 2 + 2 drenaggi eseguiti sul fronte di scavo della lunghezza  $L = 24.00$  m ogni 12 m di avanzamento;
- intervento di consolidamento al fronte tramite n° 60 tubi in vetroresina,  $\phi = 60$  mm, cementati aventi lunghezza  $L = 18.00$  m e sovrapposizione 12.00 m;
- intervento di presostegno tramite 32 tubi in acciaio  $\phi 88.9$  mm, sp. = 10 mm, passo 0.35 m, cementati, lunghezza  $L = 14.00$  m e sovrapposizione di 8.00 m;
- un preconsolidamento al contorno della sezione di scavo realizzato mediante 61 colonne in jet – grouting del diametro di 600 mm della lunghezza di 14 m con sovrapposizione di 8 m;
- un preconsolidamento al piede delle centine costituito da 5 + 5 colonne in jet – grouting della lunghezza massima di 10 m eseguite ogni campo di avanzamento di 6 m;
- centine costituite da 2 IPN180 passo 1.00 m;
- calcestruzzo proiettato al contorno dello spessore di 25 cm;

- murette ed arco rovescio dello spessore 0.8 m;
- rivestimento definitivo di calotta in c.a. avente spessore variabile da 0.5 a 1.50 m.

### 5.5.3. Fasi esecutive

Le fasi esecutive principali sono:

- esecuzione dei drenaggi in avanzamento;
- esecuzione del preconsolidamento del fronte di scavo mediante tubi in VTR;
- posa in opera dei tubi metallici per il presostegno al contorno;
- esecuzione del preconsolidamento al contorno del cavo e al di sotto del piede delle centine;
- esecuzione dello scavo a piena sezione, per sfondi di massimo 1.0 m, sagomando il fronte a forma concava;
- posa in opera di centine e calcestruzzo proiettato;
- posa dell'impermeabilizzazione in corrispondenza delle murette e dell'arco rovescio;
- getto di murette ed arco rovescio in c.a., ad una distanza dal fronte  $\leq 27$  m;
- posa dell'impermeabilizzazione di completamento in calotta;
- getto del rivestimento definitivo di calotta, ad una distanza massima dal fronte di scavo  $\leq 36$  m, da verificare in funzione del comportamento deformativo del cavo.

### 5.5.4. Variabilità

Di fatto tale sezione tipo non ha variabilità in quanto se durante l'applicazione della sezione tipo C1B i valori di estrusione e convergenza dovessero superare i valori massimi consentiti per la sezione tipo C1A, il campo di avanzamento viene ridotto da 9 m (sezione tipo C1B) a 6 m (sezione tipo C1B-rid) adottando il massimo numero di barre in VTR contemplato dalla sezione tipo C1B pari a 60.

**Tabella 5.4 – Riepilogo interventi di preconsolidamento e sostegno di prima fase per la sezione tipo C1B - rid.**

Calcestruzzo proiettato: 25 cm

Passo centine: 1 m

60 barre in VTR al fronte, sovrapposizione = 12 m

## 5.6. Sezione tipo C1Bbis

### 5.6.1. Campo di applicazione

E' prevista in corrispondenza del sotto attraversamento dell'autostrada A4, dove viene realizzato, mediante un apposito piano di spostamento delle corsie dell'autostrada, un consolidamento in jet – grouting dal piano campagna e dalla piattaforma autostradale, che interessa tutto il profilo di scavo della galleria incluso l'arco rovescio. In questo caso la sezione tipo è cilindrica con il solo preconsolidamento del fronte di scavo – nucleo di avanzamento.

### 5.6.2. Interventi previsti

La sezione tipo in fase costruttiva è costituita da:

- consolidamento da piano campagna mediante colonne di jet – grouting  $\phi = 1200$  mm, maglia 1.20 x 1.00 m;
- intervento di consolidamento al fronte tramite n° 35 tubi in vetroresina,  $\phi = 60$  mm, cementati aventi lunghezza  $L = 18.00$  m e sovrapposizione 6.00 m, conseguentemente, con un campo di avanzamento di 12 m;
- centine costituite da 2 IPN180 passo 1.00 m;
- calcestruzzo proiettato al contorno dello spessore di 25 cm;
- arco rovescio dello spessore 0.8 m;
- rivestimento definitivo di calotta in c.a. avente spessore di 0.7 m.

### 5.6.3. Fasi esecutive

Le fasi esecutive principali sono:

- consolidamento da piano campagna mediante colonne di jet – grouting;
- esecuzione del preconsolidamento del fronte di scavo mediante tubi in VTR;
- esecuzione dello scavo a piena sezione, per sfondi di massimo 1.0 m, sagomando il fronte a forma concava;
- posa in opera di centine e calcestruzzo proiettato;
- posa dell'impermeabilizzazione in corrispondenza delle murette e dell'arco rovescio;
- getto di murette ed arco rovescio in c.a., ad una distanza dal fronte  $\leq 18$  m;
- posa dell'impermeabilizzazione di completamento in calotta;
- getto del rivestimento definitivo di calotta, ad una distanza massima dal fronte di scavo  $\leq 24$  m, da verificare in funzione del comportamento deformativo del cavo.

### 5.6.4. Variabilità

Qualora dai rilievi di convergenza e di estrusione si evidenzino un quadro deformativo verso il massimo del campo di variabilità atteso, l'intensità degli interventi deve essere variata posizionandosi nella parte superiore delle variabilità; qualora invece dai rilievi emerga un quadro deformativo verso il minimo, l'intensità degli interventi deve essere variata posizionandosi nella parte inferiore delle variabilità.

**Tabella 5.5 – Variabilità sezione tipo C1Bbis.**

Applicazione minima	Applicazione massima
Calcestruzzo proiettato: 25 cm	Calcestruzzo proiettato: 25 cm
Passo centine: 1 m	Passo centine: 1.25 m
35 barre in VTR al fronte, sovrapposizione = 9 m	35 barre in VTR al fronte, sovrapposizione = 9 m