

ASSE VIARIO MARCHE-UMBRIA E QUADRILATERO DI PENETRAZIONE INTERNA MAXI LOTTO 2

LAVORI DI COMPLETAMENTO DELLA DIRETTRICE PERUGIA ANCONA:
SS. 318 DI "VALFABBRICA", TRATTO PIANELLO - VALFABBRICA
SS. 76 "VAL D'ESINO", TRATTI FOSSATO VICO - CANCELLI E ALBACINA - SERRA SAN QUIRICO
"PEDEMONTANA DELLE MARCHE", TRATTO FABRIANO-MUCCIA-SFERCIA.

PROGETTO ESECUTIVO

<p>CONTRAENTE GENERALE:</p> 	<p><i>Il responsabile del Contraente Generale:</i></p> <p style="text-align: center;">Ing. Federico Montanari</p>	<p><i>Il responsabile Integrazioni delle Prestazioni Specialistiche:</i></p> <p style="text-align: center;">Ing. Salvatore Lieto</p>
--	---	--

PROGETTAZIONE: Associazione Temporanea di Imprese	
<p><i>Mandatario:</i> PROGETTAZIONE</p> 	<p><i>Mandanti:</i></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>LOMBARDI SA INGEGNERI CONSULENTI</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>LOMBARDI-REICO INGEGNERIA S.r.l.</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>SGAI s.r.l. di E.Forlani & C. Studio di Ingegneria e Geologia Applicata <small>Via Marconi, 20 - 47833 Montano di Romagna (RN) - ITALY P. IVA 01984620463 - tel: +39 054 54199277 - e-mail: sgai@sgai.com pec: sgai@sgai.pec.com</small></p> <p>www.sgai.com</p> </div> </div>

<p>RESPONSABILE DELLA PROGETTAZIONE PER L'A.T.I. Prof. Ing. Antonio Grimaldi</p> <p>GEOLOGO Dott. Geol. Fabrizio Pontoni</p> <p>COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE Ing. Michele Curiale</p>	  	
--	--	--

<p>IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO</p> <p style="text-align: center;">Ing. Giulio Petrizzelli</p>		
--	--	--

<p>2.1.2 - PEDEMONTANA DELLE MARCHE Secondo stralcio funzionale: Matelica Nord - Matelica sud/Castelraimondo nord</p> <p style="text-align: center;">OPERE D'ARTE MAGGIORI : GALLERIE NATURALI GALLERIA "CROCE DI CALLE" Relazione tecnica di calcolo - Parte 1</p>	<p>SCALA:</p> <p style="text-align: center;">-</p> <p>DATA:</p> <p style="text-align: center;">Luglio 2017</p>
--	---

Codice Unico di Progetto (CUP) **F12C03000050021** (Assegnato CIPE 23-12-2015)

<i>Codice elaborato:</i>	Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id. doc.	N. prog.	Rev.
	L 0 7 0 3	2 1 2	E	1 4	G N 3 2 0 0	R E L	0 1	C

REV.	DATA	DESCRIZIONE	Redatto		Controllato	Approvato
A	AGOSTO 2016	EMISSIONE PER CONSEGNA	PROGIN	PROGIN	S.LIETO	A. GRIMALDI
B	Febbraio 2017	EMISSIONE	PROGIN	PROGIN	S.LIETO	A. GRIMALDI
C	Luglio 2017	EMISSIONE	PROGIN	PROGIN	S.LIETO	A. GRIMALDI

**ASSE VIARIO MARCHE – UMBRIA E QUADRILATERO DI
PENETRAZIONE INTERNA**

MAXI LOTTO 2

Pedemontana delle Marche

Secondo Lotto funzionale –Matelica Nord – Castelraimondo Nord

GALLERIA CROCE DI CALLE

RELAZIONE TECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE

PARTE 1

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	6
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO E NORMATIVE	8
2.1 NORMATIVE, RACCOMANDAZIONI, LINEE GUIDA	8
2.2 NORMATIVE SULLE STRUTTURE IN C.A, IN C.A.P. E ACCIAIO.....	8
2.3 NORMATIVA SUI TERRENI, OPERE DI SOSTEGNO, OPERE DI FONDAZIONE.....	8
3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI.....	9
3.1 CRITERI TECNICI ADOTTATI PER LA MAGGIORAZIONE DEL PESO DELL'ACCIAIO DELLE CENTINE	10
4. PARAMETRI DI CALCOLO DELLE FORMAZIONI ATTRAVERSATE	15
5. LA PRESENZA DELL'ACQUA E IL LIVELLO DELLA FALDA.....	22
6. DURABILITA' DEL CALCESTRUZZO E AGGRESSIVITA' DELLE TERRE.....	25
7. METODO DI AVANZAMENTO DELLO SCAVO E SEZIONI TIPO	34
7.1 CRITERI DI APPLICAZIONE DELLE SEZIONI TIPO.....	34
7.1.1 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 1+876.93 e la Pk. 1+944.96 – Sezione tipo B2V.....	36
7.1.2 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 1+944.96 e la Pk. 2+043.93 – Sezione tipo B2	37
7.1.3 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+043.93 e la Pk. 2+130.29 – Sezione tipo B2	39
7.1.4 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+130.29 e la Pk. 2+175.29 – Sezione tipo Piazzola B0.....	40
7.1.5 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+175.29 e la Pk. 2+255.98 – Sezione tipo B0	41
7.1.6 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+255.98 e la Pk. 2+281.13 – Sezione tipo B2	42
7.1.7 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+281.13 e la Pk. 2+433.98 – Sezione tipo B2	44
7.1.8 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+433.98 e la Pk. 2+478.98 – Sezione tipo Piazzola.....	45
7.1.9 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+478.98 e la Pk. 2+504.84 – Sezione tipo B2	46

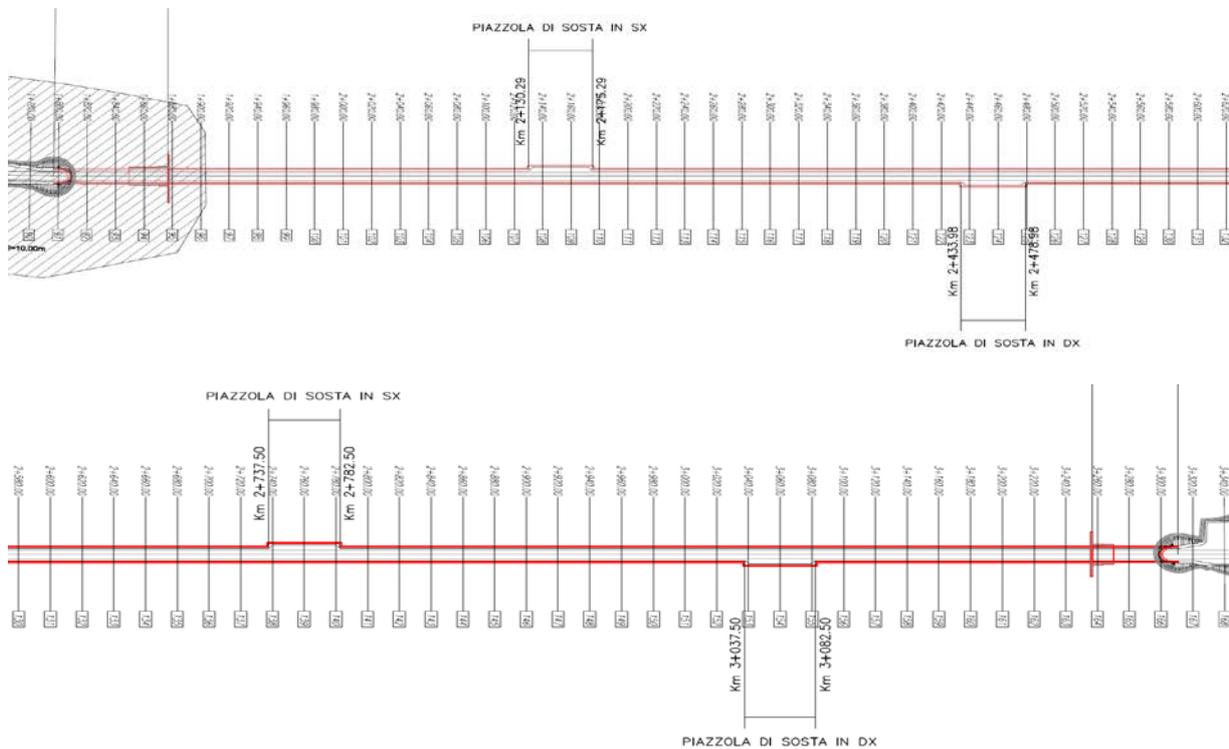
7.1.10	Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+504.84 e la Pk. 2+737.50 – Sezione tipo B2*	47
7.1.11	Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+737.50 e la Pk. 2+782.50 – Sezione tipo Piazzola	48
7.1.12	Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+782.50 e la Pk. 2+832.50 – Sezione tipo B2	49
7.1.13	Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+832.50 e la Pk. 3+037.50 – Sezione tipo B0	50
7.1.14	Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 3+037.50 e la Pk. 3+082.50 – Sezione tipo Piazzola B0	51
7.1.15	Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 3+082.50 e la Pk. 3+162.29 – Sezione tipo B0	52
7.1.16	Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 3+162.29 e la Pk. 3+189.24 – Sezione tipo B0v	53
7.1.17	Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 3+189.24 e la Pk. 3+256.90 – Sezione tipo B2V	54
8.	ANALISI DEL COMPORTAMENTO DEFORMATIVO ALLO SCAVO	55
8.1	METODO DI TAMEZ	57
8.2	LINEE CARATTERISTICHE	60
9.	ANALISI DELLA STABILITÀ DEL FRONTE DI SCAVO	63
9.1	COPERTURA CON $H < 25$ M	63
9.1.1	Sezione tipo B2V	65
9.1.2	Sezione tipo B0V	69
9.1.3	Sezione tipo B2	70
9.1.4	Tabella di sintesi dei risultati	74
9.1.5	Verifica degli infilaggi al contorno	74
9.2	COPERTURA CON $25 < H < 50$ M	75
9.2.1	Sezione tipo B0 – Parametri di resistenza minimi	76
9.2.2	Sezione tipo B0 – Parametri di resistenza massimi	78
9.2.3	Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza minimi	80
9.2.4	Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza massimi	82
9.2.5	Sezione tipo Piazzola B0 – Formazione di Camerino	84
9.2.6	Sezione tipo Piazzola B0 – Formazione dello Schlier	86
9.2.7	Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza minimi	88

9.2.8	Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza massimi	90
9.2.9	Tabella di sintesi dei risultati.....	91
9.3	COPERTURA CON $50 < H < 80$ M	92
9.3.1	Sezione tipo B0 – Parametri di resistenza minimi	93
9.3.2	Sezione tipo B0 – Parametri di resistenza massimi	94
9.3.3	Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza minimi	95
9.3.4	Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza massimi	97
9.3.5	Sezione tipo Piazzola – Parametri di resistenza minimi	99
9.3.6	Sezione tipo Piazzola B0 – Parametri di resistenza massimi.....	101
9.3.7	Tabella di sintesi dei risultati.....	101
9.4	COPERTURA CON $80 < H < 110$ M	102
9.4.1	Sezione tipo B2* – Parametri di resistenza minimi – $H = 110$ m	103
9.4.2	Sezione tipo B2* – Parametri di resistenza massimi – $H = 110$ m	104
9.4.3	Sezione tipo B2* – Parametri di resistenza minimi.....	105
9.4.4	Sezione tipo B2* – Parametri di resistenza massimi	107
9.4.5	Tabella di sintesi dei risultati.....	108
10.	MODALITA' DI SCAVO - INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO	109
10.1	SEZIONI TIPO ADOTTATE IN CONDIZIONI DI SCAVO ORDINARIO	109
10.1.1	Intervento tipo B0V	109
10.1.2	Intervento tipo B0	110
10.1.3	Intervento tipo B2	110
10.1.4	Intervento tipo B2*	111
10.1.5	Intervento tipo Piazzola	111
10.1.6	Intervento tipo Piazzola B0.....	112
10.1.7	Intervento tipo B2 V.....	112
11.	MODELLAZIONI E VERIFICHE.....	113
11.1	CARATTERISTICHE GENERALI DEL CODICE DI CALCOLO ALLE DIFFERENZE FINITE UTILIZZATO E DELLE ANALISI CONDOTTE	113
11.2	VERIFICHE DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI RESISTENTE.....	116
11.2.1	Verifiche allo SLU.....	116
11.2.1.1	Domini resistenti rivestimenti definitivi.....	118
11.2.2	Verifiche allo SLE.....	126
11.2.2.1	Verifiche alle Punte tensionali.....	126
11.2.2.2	Verifiche allo stato limite di fessurazione.....	127

1. INTRODUZIONE

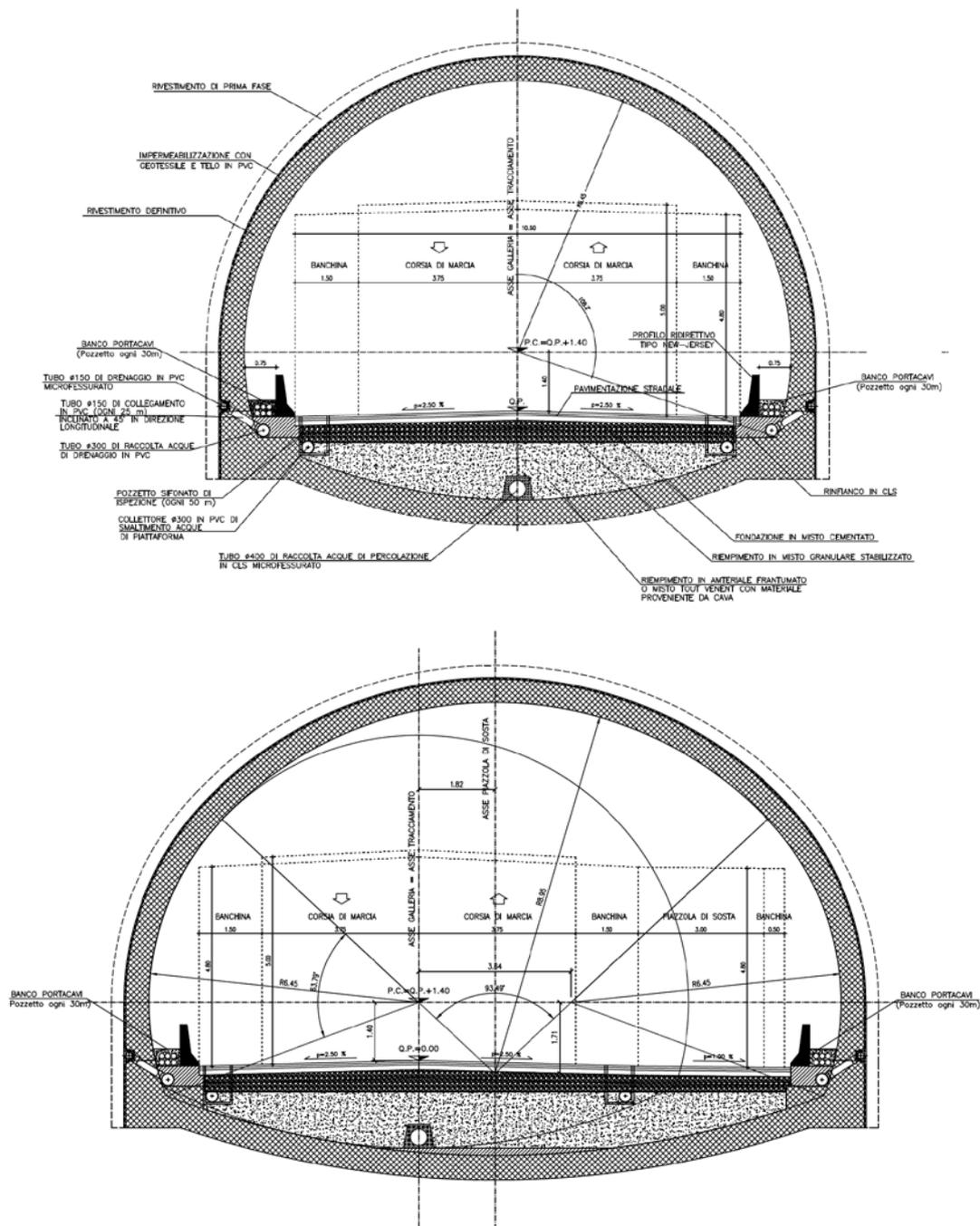
In questa relazione sono illustrati i risultati delle verifiche statiche delle strutture di sostegno di prima fase e di rivestimento definitivo della galleria naturale Croce di Calle prevista nell'ambito del progetto esecutivo del Secondo lotto funzionale della Pedemontana delle Marche, tratto Matelica Nord – Castelraimondo Nord.

La galleria naturale in progetto presenta una lunghezza di 1514.23 (1378.8 m di galleria naturale) m ed è costituita da una canna unica bidirezionale (sezione stradale tipo C1).



La sezione trasversale è caratterizzata da un raggio interno pari a 6.45 m, in modo da contenere la piattaforma stradale di larghezza complessiva pari a 10.50 m (2 corsie di marcia da 3.75 m affiancate da banchine da 1.50 m), delimitata lateralmente da barriere tipo new-jersey. Allo scopo di ospitare un'altezza libera verticale di 5.00 m sulla carreggiata e di 4.80 m sulla piattaforma stradale anche in corrispondenza della pendenza trasversale massima pari al 4.60%, è stato determinato il raggio del profilo d'intradosso della galleria pari a 6.45 m, con centro ubicato ad una distanza di 1.40 m sopra la quota di progetto in corrispondenza della pavimentazione stradale.

Le sezioni tipo della galleria naturale in rettilineo con e senza piazzola di sosta sono riportate nelle figure seguenti.



Lo studio è stato effettuato secondo le fasi di progettazione basate sul metodo di Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli (ADECO-RS).

Le verifiche geotecniche e strutturali sono state eseguite in accordo con quanto previsto dal D.M. 14 gennaio 2008 e con il supporto degli Eurocodici.

Le verifiche sono state eseguite nei confronti degli stati limite ultimi e degli stati limite di esercizio.

2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO E NORMATIVE

2.1 Normative, raccomandazioni, linee guida

- D.M. 14 Gennaio 2008 - *Norme tecniche per le Costruzioni*
- Circolare di applicazione 2 febbraio 2009

2.2 Normative sulle strutture in c.a, in c.a.p. e acciaio

- Legge 05.11.1971, n.1086: "Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio, normale e precompresso ed a struttura metallica" e relative istruzioni (Circ. Min. LL.PP. 14.02.1974, n. 11951).
- D.M. 14.02.1992: "Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche".
- D.M. 09.01.1996: "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche" e relative istruzioni (Circ. Min. LL.PP. 15.10.1996, n. 252 AA.GG./STC).
- D.M. 16.01.1996: "Norme tecniche relative ai «Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi»" e relative istruzioni (Circ. Min. LL.PP. 04.07.1996, n. 156 AA.GG./STC).

2.3 Normativa sui terreni, opere di sostegno, opere di fondazione

- D.M 11.03.1988: "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione" e relative istruzioni (Circ. Min. LL.PP. 24.09.1988, n. 30483).
- Circ. Min. LL.PP. 09.01.1996, n. 218/24/3 "Istruzioni applicative per la redazione della relazione geologica e della redazione geotecnica".
- Raccomandazioni A.I.C.A.P. "Ancoraggi nei terreni e nelle rocce", Giugno 2012.
- AFTES "Recommendations on the Convergence-Confinement Method", Novembre 2001.

Per la stesura della relazione di calcolo si sono infine seguite le indicazioni contenute nel documento:

- CNR-UNI 10024/86: "Analisi di strutture mediante elaboratore: impostazione e redazione delle relazioni di calcolo" (Ottobre 1986).

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Le caratteristiche dei materiali utilizzati per gli interventi strutturali sono di seguito elencate:

Calcestruzzo (rivestimento definitivo di calotta)

Classe di resistenza C25/30;

resistenza caratteristica cubica $R_{ck}=30 \text{ N/mm}^2$;

resistenza caratteristica cilindrica $f_{ck}=0.83 \cdot R_{ck} = 24.9 \text{ N/mm}^2$;

modulo elastico $E_{cm}=22000 \cdot (f_{cm}/10)^{0.3}=31447 \text{ N/mm}^2$;

coefficiente di Poisson $\nu=0.25$;

Calcestruzzo (rivestimento definitivo Arco rovescio e murette)

Classe di resistenza C35/45;

resistenza caratteristica cubica $R_{ck}=45 \text{ N/mm}^2$;

resistenza caratteristica cilindrica $f_{ck}=0.83 \cdot R_{ck} = 37.35 \text{ N/mm}^2$;

modulo elastico $E_{cm}=22000 \cdot (f_{cm}/10)^{0.3}=34625 \text{ N/mm}^2$;

coefficiente di Poisson $\nu=0.25$;

Acciaio per cemento armato

Tipo B450C;

tensione caratteristica di rottura $f_{tk}= 540 \text{ N/mm}^2$;

tensione caratteristica di snervamento $f_{yk}= 450 \text{ N/mm}^2$;

coefficiente parziale di sicurezza $\gamma_s=1.15$;

modulo elastico $E=210000 \text{ N/mm}^2$.

Acciaio per centine, profilati, calastrelli

Qualità dell'acciaio S 355;

tensione caratteristica di snervamento $f_{yk}=355 \text{ N/mm}^2$;

tensione caratteristica di rottura $f_{tk}=510 \text{ N/mm}^2$;

modulo elastico $E=210000 \text{ N/mm}^2$;

Acciaio per infilaggi

Qualità dell'acciaio S 355;

tensione caratteristica di snervamento $f_{yk}=355 \text{ N/mm}^2$;

tensione caratteristica di rottura $f_{tk}=490 \text{ N/mm}^2$;

modulo elastico $E=210000 \text{ N/mm}^2$;

Spritz beton

Rck 28 gg $\geq 30 \text{ N/mm}^2$

Elementi strutturali in vetroresina

Elementi strutturali costituiti da n. 3 piatti in VTR 40x6 mm ad aderenza migliorata, una tubazione centrale in PVC, distanziatori in materiale plastico e fascette per il fissaggio dei piatti al tubo centrale.

Resistenza a trazione $f_{yk} \geq 900 \text{ N/mm}^2$

3.1 Criteri tecnici adottati per la maggiorazione del peso dell'acciaio delle centine

Nel seguito sono descritti i criteri secondi i quali si è proceduto alla maggiorazione del 40 % del peso dell'acciaio delle centine al fine di poter correttamente considerare l'incremento di

prezzo unitario dovuto all'utilizzo di acciaio tipo S 355 (Fe510) in luogo di S 235 (Fe360). A tal proposito si è quindi proceduto, a parità di tipologia di profilato (IPN 200) e di spessore dello spritz-beton (25 cm), ad un confronto tra i domini resistenti ottenuti sia per acciaio S 235 (Fe360) che 355 (Fe510) e per un passo delle centine rispettivamente pari a 0.70 m e 1.00 m ($0.70 \times 1.4 = 1.00$).

Le figure seguenti mostrano gli output del programma di calcolo VCA SLU relativi al calcolo dei domini resistenti nelle due situazioni sopra descritte.

The screenshot shows the 'Verifica C.A. S.L.U.' software interface. The main window contains several panels for data entry and calculation results.

Input Parameters:

- Titolo:** (Empty text field)
- N° strati barre:** 2
- Zoom:** (Control)
- Table 1:**

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	25
- Table 2:**

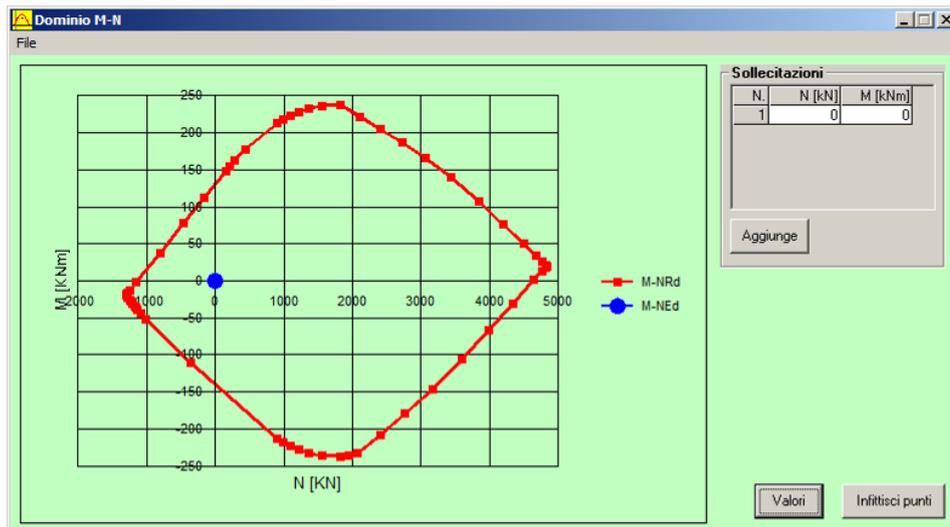
N°	As [cm²]	d [cm]
1	29,06	1
2	29,06	21
- Sollecitazioni (S.L.U.):**
 - N_{Ed}: 0 kN
 - M_{xEd}: 0 kNm
 - M_{yEd}: 0 kNm
- P.to applicazione N:**
 - Centro (selected)
 - Baricentro cls
 - Coord. [cm]: xN=0, yN=0
- Tipo rottura:** Lato calcestruzzo - Acciaio snervato
- Metodo di calcolo:** S.L.U.+ (selected), S.L.U.-, Metodo n
- Tipo flessione:** Retta (selected), Deviata
- N° rett.:** 100
- Calcola MRd / Dominio M-N:** (Buttons)
- L₀:** 0 cm
- Col. modello:** (Control)
- Precompresso:** (Checkbox)

Materiali:

- Fe360:**
 - ϵ_{su} : 67.5 ‰
 - f_{yd} : 223.8 N/mm²
 - E_s : 200.000 N/mm²
 - E_s/E_c : 15
 - ϵ_{syd} : 1.119 ‰
 - $\sigma_{s,adm}$: 160 N/mm²
- C25/30:**
 - ϵ_{c2} : 2 ‰
 - ϵ_{cu} : 3.5 ‰
 - f_{cd} : 14.17 N/mm²
 - f_{cc}/f_{cd} : 0.8
 - $\sigma_{c,adm}$: 9.75 N/mm²
 - τ_{co} : 0.6
 - τ_{c1} : 1.829

Calculation Results:

- M_{xRd}:** 130.7 kNm
- σ_c : -14.17 N/mm²
- σ_s : 223.8 N/mm²
- ϵ_c : 3.5 ‰
- ϵ_s : 52.02 ‰
- d:** 21 cm
- x:** 1.324
- x/d:** 0.06304
- δ :** 0.7



Output del programma di calcolo VCA SLU per la costruzione del dominio resistente del prerivestimento costituito da 2 IPN 200 / 70 – SB = 25 cm – Acciaio Fe 360

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : _____

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	25	1	20,34	1
			2	20,34	21

Tipo Sezione
 Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

Sollecitazioni
 S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 0 kN
 M_{xEd} 0 kNm
 M_{yEd} 0 kNm

P.to applicazione N
 Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura
 Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Metodo di calcolo
 S.L.U.+ S.L.U.-
 Metodo n

Tipo flessione
 Retta Deviate

N° rett. 100

Calcola MRd Dominio M-N

L₀ 0 cm Col. modello

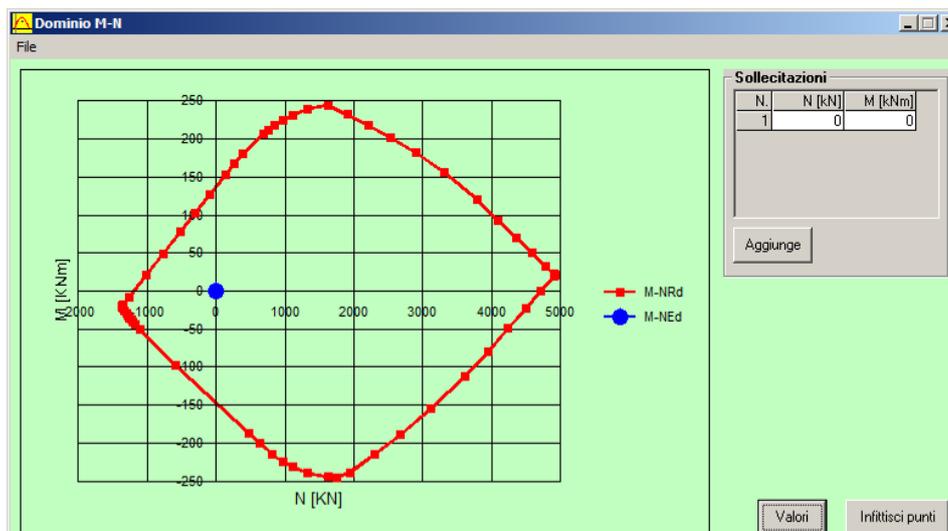
Precompresso

Materiali

Fe510	C25/30
ε _{su} 67,5 ‰	ε _{c2} 2 ‰
f _{yd} 338,1 N/mm²	ε _{cu} 3,5 ‰
E _s 200.000 N/mm²	f _{cd} 14,17
E _s /E _c 15	f _{cc} /f _{cd} 0,8 ?
ε _{syd} 1,691 ‰	σ _{c,adm} 9,75
σ _{s,adm} 240 N/mm²	τ _{co} 0,6
	τ _{c1} 1,829

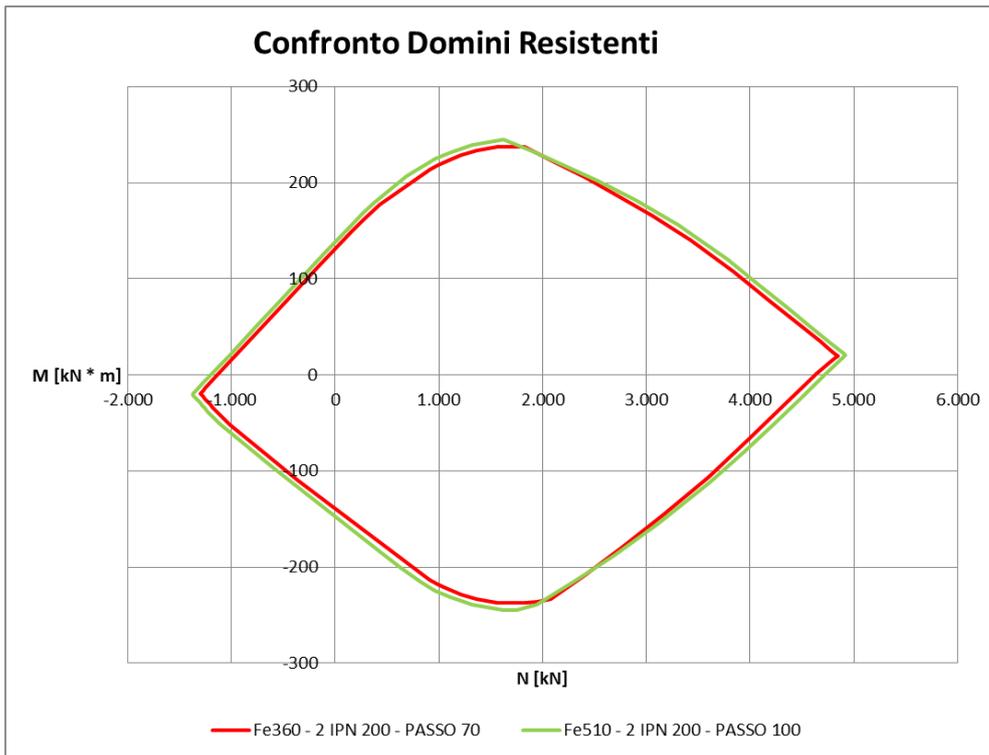
M_{xRd} 138,2 kNm

σ_c -14,17 N/mm²
 σ_s 338,1 N/mm²
 ε_c 3,5 ‰
 ε_s 43,75 ‰
 d 21 cm
 x 1,556 x/d 0,07408
 δ 0,7



Output del programma di calcolo VCA SLU per la costruzione del dominio resistente del preinvestimento costituito da 2 IPN 200 / 100 – SB = 25 cm – Acciaio Fe 510

La figura seguente mostra come confrontando i due domini resistenti costruiti per le situazioni sopra descritte questi siano perfettamente sovrapponibili individuando quindi una condizioni di equi-prestazionalità dei preinvestimenti al variare della tipologia di acciaio e del passo delle centine.



Confronto tra i domini resistenti nelle due situazioni sopra descritte

4. PARAMETRI DI CALCOLO DELLE FORMAZIONI ATTRAVERSATE

Sulla base delle risultanze delle indagini geognostiche eseguite nel periodo febbraio - maggio 2016 è stato possibile meglio definire il modello geologico - geotecnico del rilievo collinare attraversato dalle gallerie.

Nelle due gallerie in progetto sono stati, infatti, eseguiti ulteriori sondaggi geognostici rispetto alle precedenti campagne del definitivo:

- Galleria Croce di Calle: n.19 sondaggi;
- Galleria Mistrianello: n.13 sondaggi

Trattandosi prevalentemente di unità torbiditiche, nelle carote di sondaggio è stata effettuata, oltre all'analisi strutturale, un'analisi di facies con riferimento alla sequenza di Bouma ed è stato calcolato il rapporto sabbia/argilla in riferimento alla classificazione delle sequenze arenaceo-pelitiche pubblicata dall'A.G.I. (1979).

Tale studio ha permesso di individuare livelli e markers diagnostici delle associazioni di facies e quindi di caratterizzare con maggior dettaglio le associazioni presenti nell'ambito della Formazione torbiditica di Camerino e di correlarle stratigraficamente tra loro, consentendo altresì di definire maggiormente anche il locale assetto strutturale che è stato confermato nelle sue linee generali.

In entrambe le gallerie è stato individuato il contatto tettonico ed erosivo tra la Formazione dello Schlier e la sovrastante Formazione di Camerino. Sono state distinte le varie associazioni di litofacies con indicazione del rapporto sabbia/argilla; rapporto che ha permesso di definire la tipologia di complessità strutturale e l'eterogeneità delle associazioni, dovute essenzialmente al processo genetico con la presenza alternata e ritmica di strati con proprietà meccaniche differenti (componente litoide o semilitoide - componente argillosa o marnosa).

Relativamente alla composizione mineralogica si segnala che dalle analisi diffrattometriche effettuate è emersa la presenza di minerali argillosi di tipo espandibile (illite/smectite).

La galleria naturale Croce di Calle si sviluppa da nord verso sud dapprima nella Formazione di Camerino e successivamente, attraverso un contatto tettonico/erosivo, nella Formazione dello Schlier. In particolare la Formazione di Camerino è stata suddivisa, alla luce dei nuovi dati geognostici, in:

- litofacies Pelitica, con rapporto A/P $\leq 0,2$;

- litofacies Pelitico-Arenacea, con rapporto $0,2 \leq A/P \leq 1$;
- litofacies Arenaceo-Pelitica, con rapporto $A/P \geq 1$.

In riferimento alle coperture colluviali, i nuovi sondaggi hanno evidenziato solo localmente spessori di poco maggiori.

Nel seguito sono analizzate in maniera distinta le principali formazioni interessate con particolare riferimento alle principali caratteristiche geotecniche:

Formazione di Schlier

Lo Schlier (Sch), costituito da marne, marne argillose e marne calcaree pseudostratificate, è stato oggetto di maggiori stress tettonici compressivi nella fase di formazione del sottobacino di Matelica dove è poi avvenuta la sedimentazione prevalentemente silicoclastica di tipo torbido (Formazione di Camerino). E' stata intercettata verso la fine della prima Galleria Naturale (Croce di Calle) fino all'imbocco della seconda Galleria (Mistranello).

Il peso di volume naturale è compreso mediamente fra 22.0 e 24.0 kN/m³.

Parametri di resistenza:

In laboratorio si ha a disposizione una sola prova triassiale che ha fornito i seguenti parametri di resistenza:

$c' = 0$ kPa coesione drenata

$\varphi' = 46^\circ$ angolo di resistenza al taglio

Sui campioni litoidi sono state eseguite prove di compressione monoassiale che hanno fornito i seguenti valori:

$\sigma_{c,media}' = 0.8$ MPa per $z < 40$ m resistenza a compressione monoassiale

$\sigma_{c,media}' = 14$ MPa per $z > 40$ m resistenza a compressione monoassiale

$\sigma_{c,10\%}' = 10$ MPa per $z > 40$ m resistenza a compressione monoassiale

Ai fini della descrizione del comportamento meccanico dei materiali si sono assunti i seguenti range di variabilità per i parametri di resistenza:

Per tensioni $\sigma_v' < 550$ kPa ($z < 25$ m) si assumono i seguenti parametri di resistenza:

$\varphi' = 26 \div 28^\circ$ angolo di resistenza al taglio

$c' = 50 \div 60$ kPa coesione drenata

Per tensioni $\sigma_v' > 550$ kPa ($z > 25$ m) si assumono i seguenti parametri di resistenza:

$\varphi' = 25\div 30^\circ$ angolo di resistenza al taglio

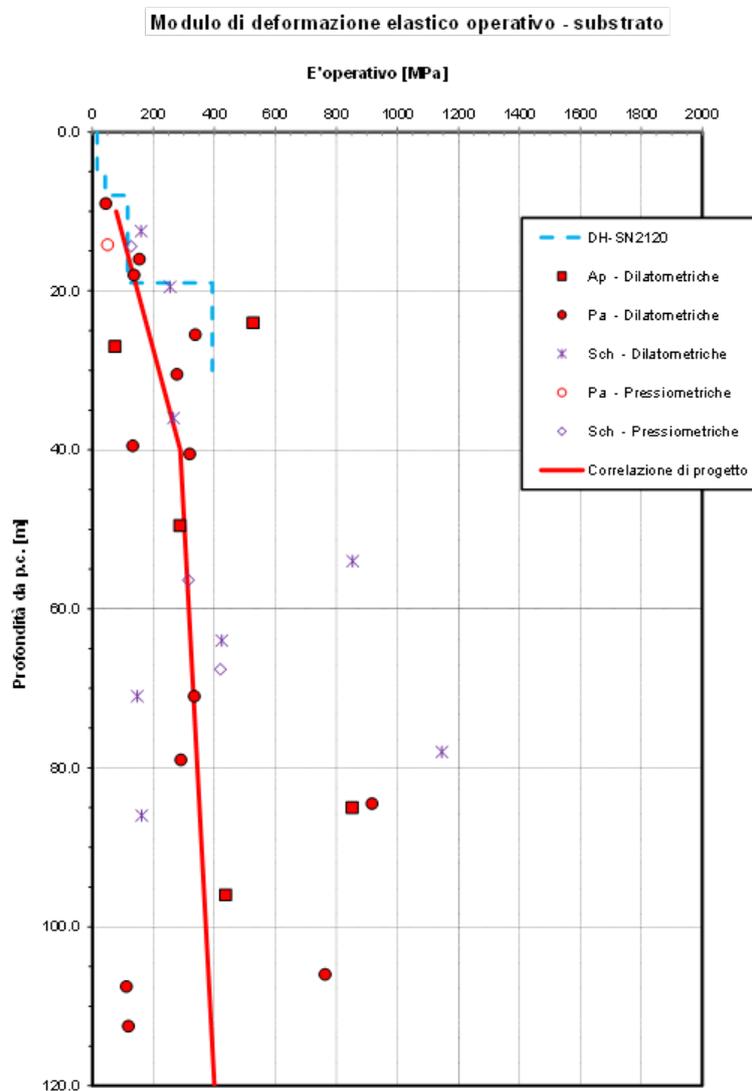
$c' = 220\div 250$ kPa coesione drenata

Parametri di deformabilità:

In Figura seguente sono riportati i valori del modulo di deformazione elastico operativo $E'_{operativo}$ ottenuti dalle varie prove; in progetto si assume la seguente correlazione in funzione della profondità (riportata anche in figura):

$$E'_{operativo} = 20 + 5.75 \cdot z \text{ MPa per } z < 40\text{m}$$

$$E'_{operativo} = 250 + 0.8 \cdot z \text{ MPa per } z > 40\text{m}$$



Formazione di Camerino

Nell'ambito della formazione di Camerino, in accordo alla relazione geologica, sono state distinte le varie associazioni di litofacies in funzione del rapporto sabbia/argilla; tale rapporto ha permesso di definire la tipologia di complessità strutturale e l'eterogeneità delle associazioni, dovute essenzialmente al processo genetico con la presenza alternata e ritmica di strati con proprietà meccaniche differenti (componente litoide o semilitoide - componente argillosa o marnosa). In particolare la Formazione di Camerino è stata suddivisa, alla luce dei nuovi dati geognostici, in:

- litofacies Pelitica, con rapporto $A/P \leq 0,2$;
- litofacies Pelitico-Arenacea, con rapporto $0,2 \leq A/P \leq 1$;
- litofacies Arenaceo-Pelitica, con rapporto $A/P \geq 1$.

Indicazioni circa il valore di detto rapporto sono specificate anche sul profilo geomeccanico della Galleria lungo il quale sono state individuate delle tratte omogenee accumulabili dallo stesso valore di A/P e quindi tali da consentire l'individuazione di porzioni di ammasso più o meno consistenti (*litofacies pelitica piuttosto che pelitica arenacea*).

Il peso di volume naturale è compreso generalmente fra 22.0 e 26.0 kN/m³.

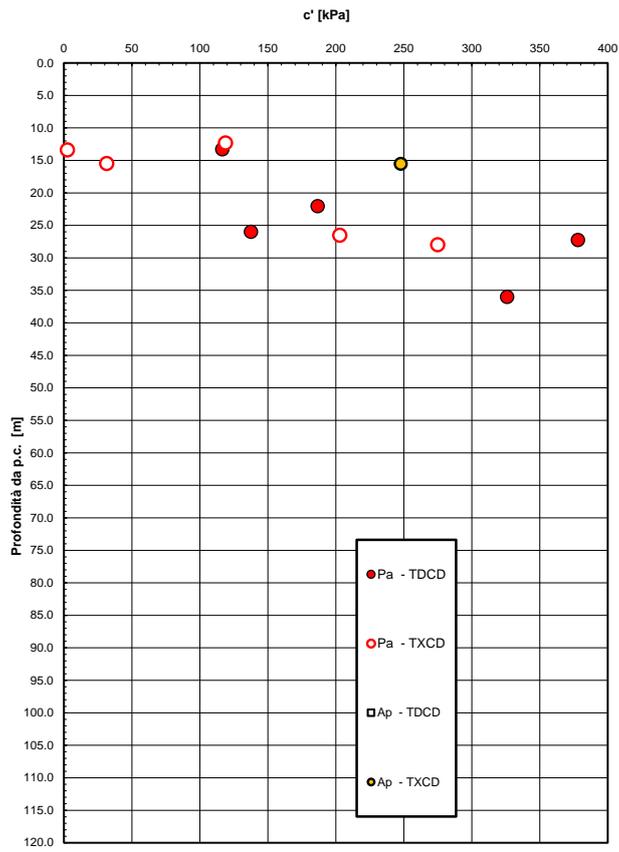
Parametri di resistenza:

Su alcuni campioni indisturbati, prelevati nel corso delle diverse campagne d'indagine, sono state eseguite prove di resistenza di laboratorio (tagli diretti e triassiali). Dalle analisi di laboratorio si sono ottenuti i seguenti valori dei parametri di resistenza mostrati nelle figure seguenti:

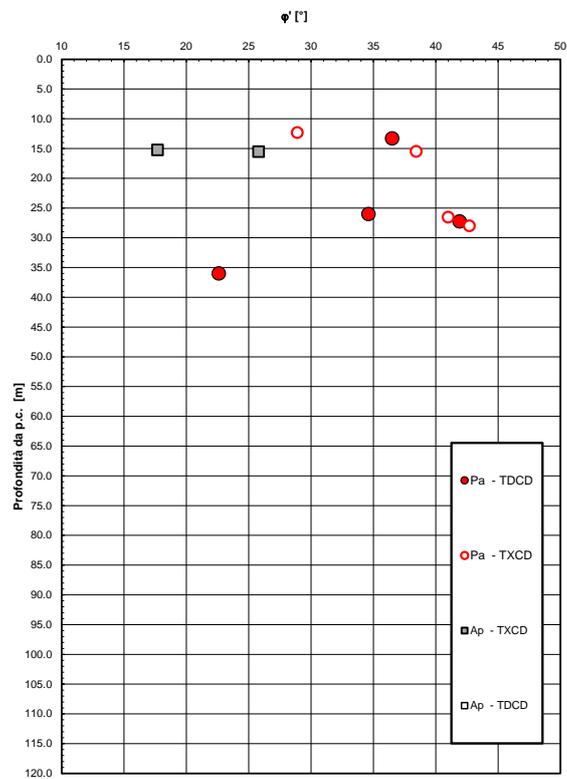
$c' = 3\div 378$ kPa coesione drenata

$\varphi' = 18\div 43$ ° angolo di resistenza al taglio

Andamento della coesione con la profondità



Andamento della resistenza al taglio con la profondità



Sui campioni litoidi sono state eseguite prove di compressione monoassiale che hanno fornito i seguenti valori:

$\sigma_{c,media}' = 0.5 \text{ MPa}$ per $z < 10\text{m}$ resistenza a compressione monoassiale per unità Pa

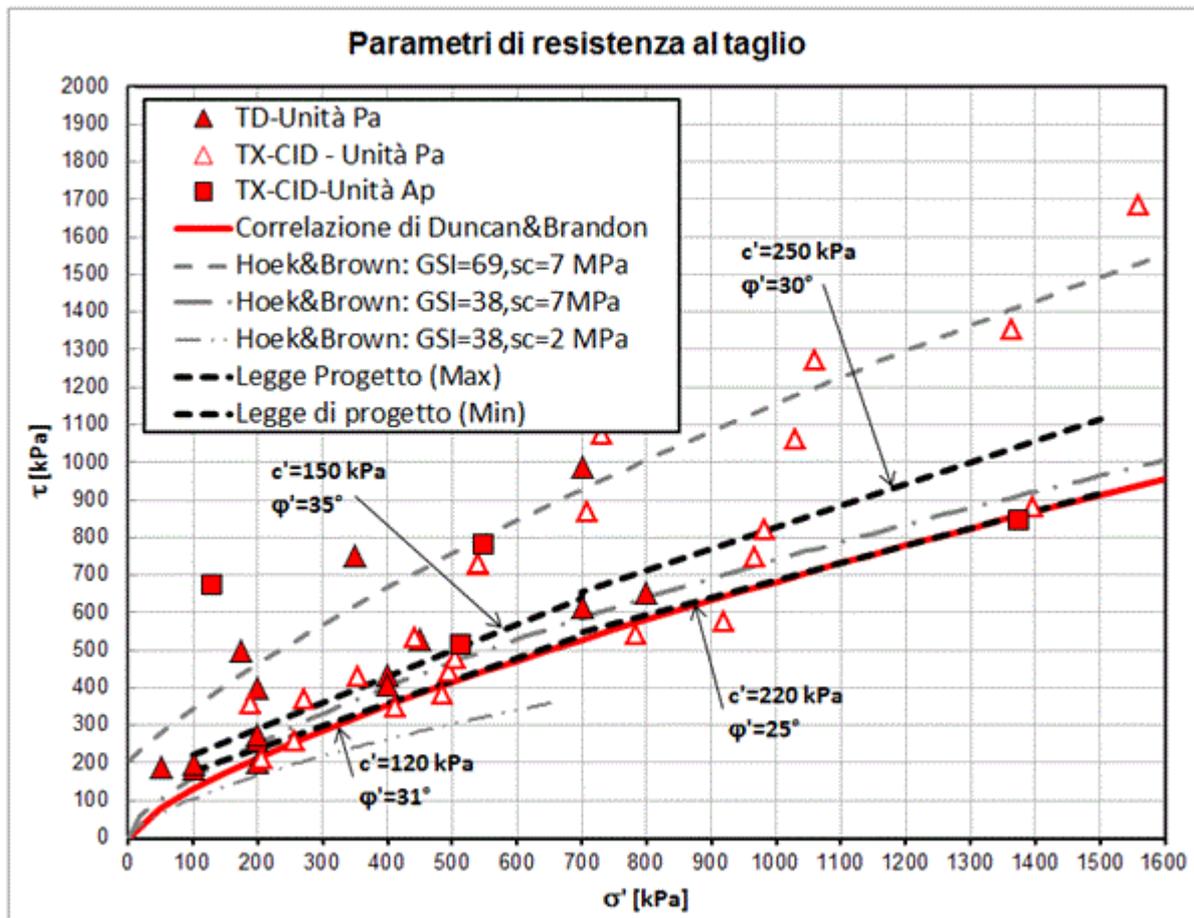
$\sigma_{c,media}' = 2.3 \text{ MPa}$ per $10 < z < 40\text{m}$ resistenza a compressione monoassiale per unità Pa

$\sigma_{c,media}' = 7.2 \text{ MPa}$ per $z > 40\text{m}$ resistenza a compressione monoassiale per unità Pa

$\sigma_{c,media}' = 20 \text{ MPa}$ resistenza a compressione monoassiale per unità Ap

$\sigma_{c,10\%}' = 2 \text{ MPa}$ per $z > 40\text{m}$ resistenza a compressione monoassiale per unità Ap

Nella figura seguente per la formazione di Camerino sono riportati a confronto i risultati delle prove di laboratorio e gli involuipi della caratterizzazione alla Hoek & Brown.



Valori di resistenza di progetto per la formazione di Camerino:

- Per tensioni $\sigma_v' < 700 \text{ kPa}$ ($z < 30 \text{ m}$) si assumono:

$\phi' = 31 \div 35^\circ$ angolo di resistenza al taglio

$c' = 120\div 150$ kPa coesione drenata

- Per tensioni $\sigma_v' > 700$ kPa ($z > 30$ m) si assumono:

$\varphi' = 25\div 30^\circ$ angolo di resistenza al taglio

$c' = 220\div 250$ kPa coesione drenata

Relativamente alla definizione dei parametri di resistenza occorre precisare che la scelta dei valori di coesione ed angolo di attrito è stata sviluppata adottando un involucro di rottura prossimo ai valori medi ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite individuando, inoltre, un range di variabilità tra valori minimi e massimi.

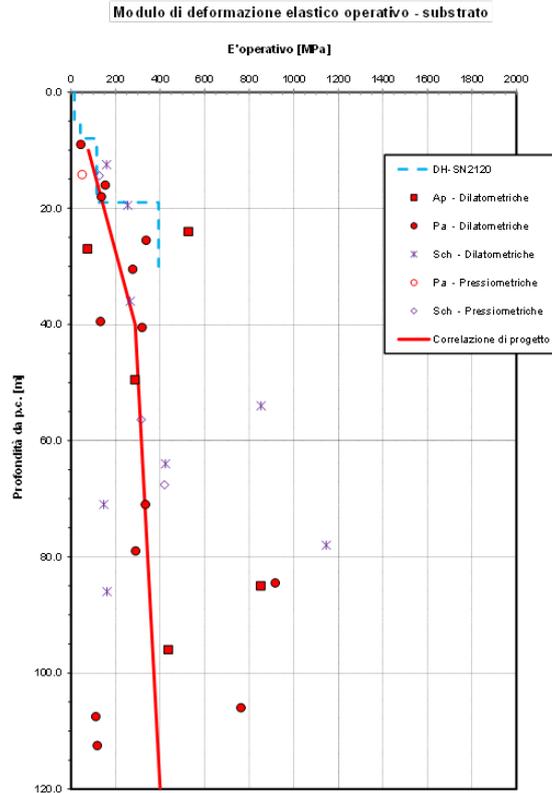
Come risulta tuttavia evidente dall'analisi dei dati riportati nella figura precedente, il range di variabilità di questi parametri, soprattutto in corrispondenza di bassi stati tensionali, appare ridotto e quindi tale da prefigurare una modesta variabilità degli interventi di consolidamento e delle sezioni tipo adottate in fase di progettazione. Valori dei parametri di resistenza più prossimi al limite superiore sono generalmente associabili a porzioni di ammasso maggiormente consistenti (rapporto $A/P \gg 1$) mentre i valori caratteristici dell'involucro di rottura minimo risultano maggiormente rappresentativi del comportamento di porzioni di ammasso poco consistenti ($0 < A/P < 1$). A tal proposito risulta tuttavia utile precisare che, nonostante la campagna di indagine abbia consentito una precisa localizzazione delle tratte di galleria interessate da valori del rapporto $A/P \gg 1$ ed il dimensionamento delle sezioni tipo applicate nelle tratte a media – alta copertura (B2, B0) sia stato effettuato adottando sia i parametri di resistenza (*coesione ed angolo di attrito*) massima che quelli minimi tra quelli della variabilità indicata, sul profilo geomeccanico (e coerentemente anche sul computo metrico estimativo) è indicata, in maniera volutamente ottimistica, la sezione tipo dimensionata con i parametri massimi.

Parametri di deformabilità:

In Figura seguente sono riportati i valori del modulo di deformazione elastico operativo $E'_{\text{operativo}}$ ottenuti dalle varie prove; in progetto si assume la seguente correlazione in funzione della profondità (riportata anche in figura):

$$E'_{\text{operativo}} = 20 + 5.75 \cdot z \text{ MPa per } z < 40\text{m}$$

$$E'_{\text{operativo}} = 250 + 0.8 \cdot z \text{ MPa per } z > 40\text{m}$$



5. LA PRESENZA DELL'ACQUA E IL LIVELLO DELLA FALDA

La galleria Croce di Calle consente l'attraversamento del rilievo collinare costituito dalla litofacies pelitico-arenacea (Pa) della formazione di Camerino e dalla formazione dello Schlier (Sch).

La circolazione idrica all'interno delle formazioni attraversate è tendenzialmente superficiale, in quanto le formazioni presentano permeabilità primaria medio/bassa - bassa e la presenza d'acqua nell'ammasso è imputabile principalmente alle infiltrazioni che hanno luogo nelle discontinuità presenti nella fascia di alterazione e, in misura minore, in profondità.

A causa delle basse permeabilità, durante la fase di scavo sono da attendersi venute d'acqua trascurabili in galleria, con stillicidi concentrati principalmente nelle zone d'imbocco e nelle fasce fratturate attese in corrispondenza delle faglie e dei passaggi litostratigrafici.

Il livello della falda indicato sul profilo geomeccanico della galleria e ricostruito in base alle letture del livello idrico nei fori di sondaggio in generale segue l'andamento del rilievo attraversato dalla galleria, portandosi in molti casi al contatto tra la formazione di substrato e

le coperture eluvio-colluviali, in particolare in prossimità delle zone di imbocco. Tuttavia la struttura dell'ammasso roccioso non consente in generale lo sviluppo di pressioni interstiziali significative al suo interno, che possano considerarsi come azioni spingenti sui rivestimenti della galleria in maniera uniforme e in direzione radiale, così come avviene in un mezzo poroso bifase.

Dalle considerazioni fatte è ragionevole considerare nell'intorno della galleria solo pressioni d'acqua localizzate e puntuali, che troveranno sfogo nelle tubazioni di drenaggio poste al piede dell'impermeabilizzazione della galleria. Ai fini delle verifiche di stabilità nelle fasi di scavo e delle verifiche di resistenza dei rivestimenti provvisori e definitivi delle gallerie in progetto si è quindi ritenuto ragionevole non tener conto della presenza e delle spinte dell'acqua.

Tuttavia, al fine di non trascurare nessuna possibile condizione progettuale si riporta nel seguito il calcolo dello sforzo normale massimo indotto sui rivestimenti definitivi per una condizioni di tubo chiuso (non corrispondente alla realtà) e per un'altezza di battente idrico pari a 50 m.

A tal proposito rileva precisare che la strumentazione installata per il monitoraggio delle pressioni neutre e del livello di falda è costituita da piezometri a tubo aperto che consentono l'individuazione di un livello di falda medio sull'intera altezza del tratto sfinestrato del tubo piuttosto che un riscontro puntuale e caratteristico delle condizioni idrauliche dei vari strati che si alternano lungo le verticali di indagine. L'assunzione di un battente idrico coerente con quello misurato nei piezometri, riportato sul profilo geomeccanico di Progetto esecutivo della galleria, rappresenta, pertanto, la condizione peggiore tra quelle possibili ad oggi riscontrate.

Sulla base di queste osservazioni il valore della tensione massima agente sullo spessore del rivestimento della galleria, calcolato con la formula di Mariot è pari a:

$$\sigma = \frac{P \cdot r}{e} = \frac{500 \cdot 6.61}{0.6} = 5508 \text{ kPa} \quad [\text{kN/mq}]$$

dove:

$$P = \text{carico agente alla profondità di interesse} = \gamma \cdot H = 10 \cdot 50 = 500 \quad [\text{kN/mq}]$$

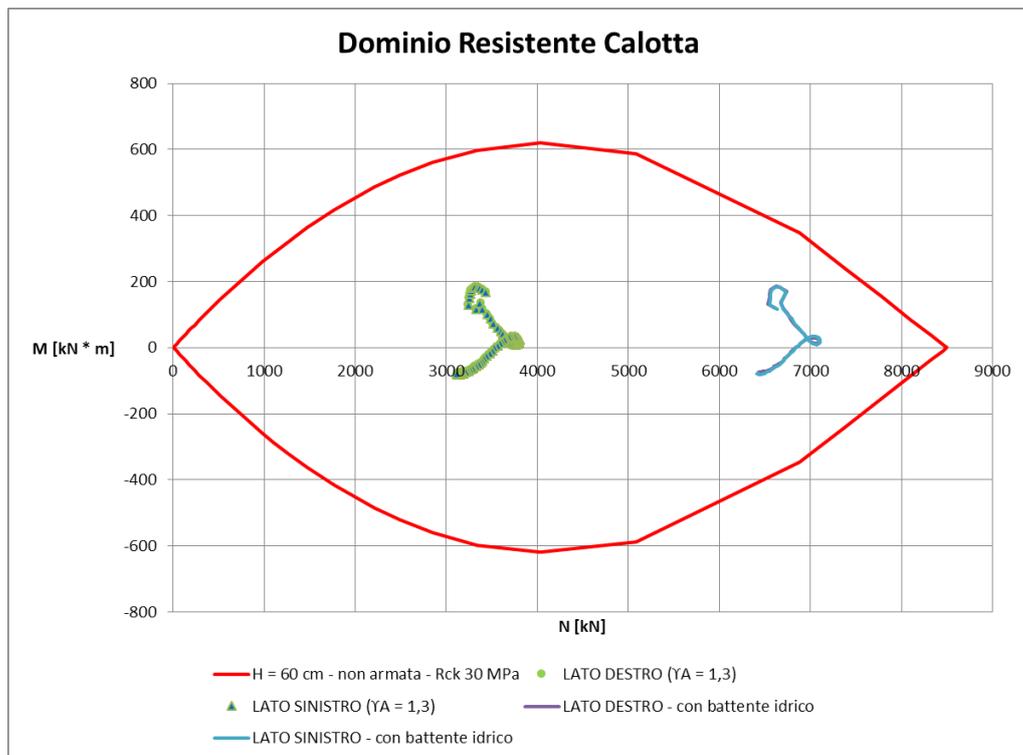
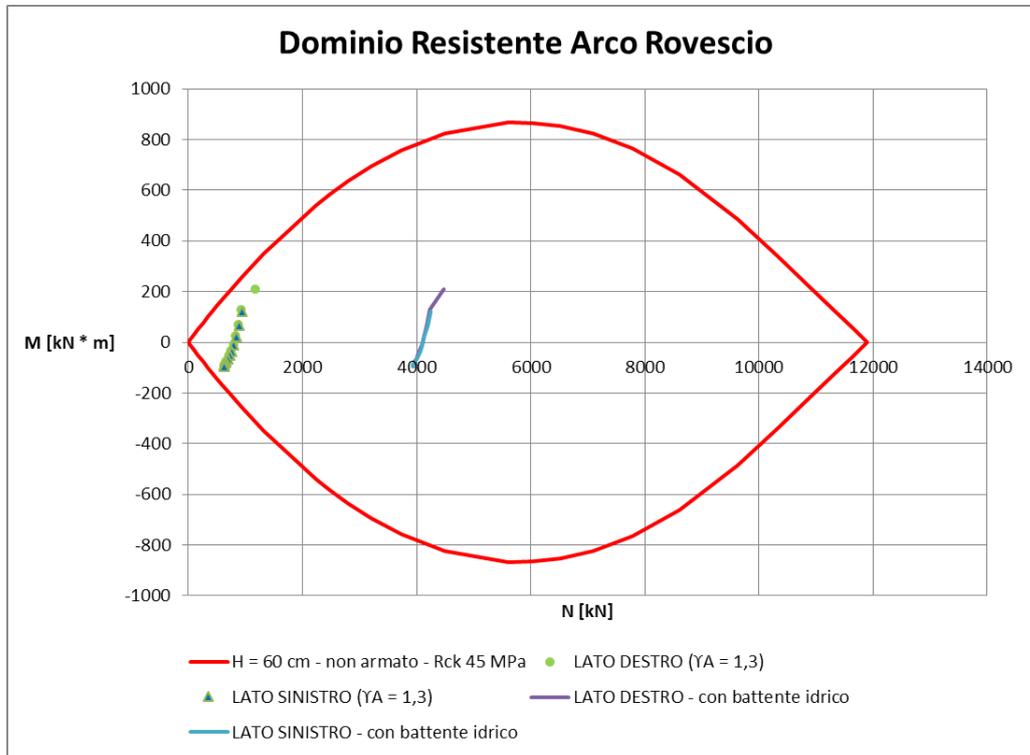
γ = peso per unità di volume dell'acqua

H = profondità della galleria

r = raggio della galleria = 6.61 m

e = spessore del rivestimento della galleria = 60 cm

da cui si ottiene un valore di sforzo normale (Nidrostatico) pari a $\sigma * e = 5508 * 0.6 = 3305$ kN. Tale valore, sommato allo sforzo normale di progetto genera un nuovo stato di sollecitazione sui rivestimenti della galleria in corrispondenza del quale le verifiche strutturali risultano comunque soddisfatte così come evidenziato nel caso esplicativo della sezione tipo B2* (Copertura 110 m).



6. DURABILITA' DEL CALCESTRUZZO E AGGRESSIVITA' DELLE TERRE

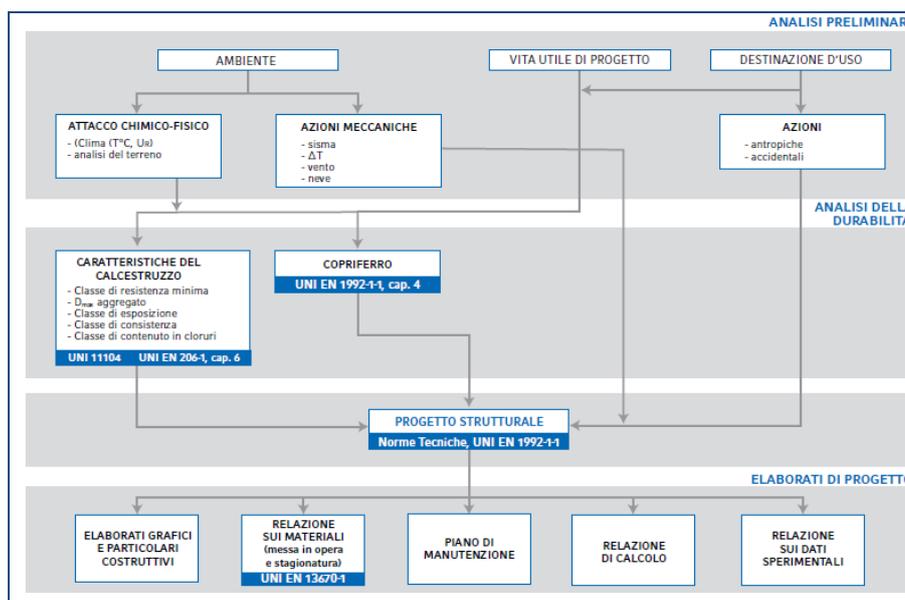
Il livello di aggressività dei terreni nei riguardi dei calcestruzzi è stato individuato mediante una campagna di analisi di laboratorio effettuate su campioni prelevati alla profondità di scavo della galleria in diversi punti lungo l'asse.

Tale campagna di indagine ha consentito, sulla base delle risultanze nel seguito descritte, una opportuna scelta dei materiali e un opportuno dimensionamento delle strutture, al fine di garantire la durabilità dell'opera intesa non solo come il mantenimento dei coefficienti di sicurezza stabiliti in fase di progetto, ma anche come la conservazione dell'efficienza iniziale per tutta la vita di servizio.

Lo schema seguente riassume quanto proposto dalle norme italiane ed europee, e sintetizza il percorso logico che il progettista deve seguire per adempiere alle nuove esigenze di durabilità delle opere.

Tramite le norme UNI EN 1992-1-1 (cap.4), UNI EN 206-1 (cap.6) e UNI 11104 (Norma di recepimento in Italia della EN 206-1) è possibile definire le caratteristiche minime dei materiali e dei copriferri, parametri essenziali per procedere al dimensionamento degli elementi strutturali attraverso la modellazione di calcolo. Il concetto di durabilità riguarda, in modo diretto, il progetto delle strutture verificate allo Stato Limite. L'ambiente, la Vita Utile dell'opera e la Destinazione d'uso definiscono infatti non solo le azioni meccaniche, ed ambientali, gravanti sulla struttura bensì anche le caratteristiche del calcestruzzo e del copriferro tali per cui sia garantita (come nello spirito degli "Stati Limite") la "prestazionalità" della stessa azione progettuale con gli adeguati margini di sicurezza.

Lo schema che segue illustra l'interazione di tali parametri indicando la normativa applicabile.



Il prospetto 4 (di norma UNI 11104) consente di individuare le caratteristiche minime che deve possedere il calcestruzzo per preservare le caratteristiche dell'opera, in base alla combinazione di classi di esposizione, al rapporto acqua/cemento massimo, al contenuto minimo di cemento, ed alla classe di resistenza minima. La scelta della combinazione di classi di esposizione/caratteristiche del calcestruzzo va eseguita per ogni famiglia di elementi strutturali, in base alla loro posizione nella costruzione. Vengono riportate di seguito alcune considerazioni di carattere generale per la prescrizione della classe di esposizione di strutture in c.a. realizzate con armature di acciaio tradizionali.

	Classi di esposizione																	
	Nessun rischio di corrosione dell'armatura	Corrosione delle armature indotta dalla carbonatazione				Corrosione delle armature indotta da cloruri						Attacco da cicli di gelo/disgelo				Ambiente aggressivo per attacco chimico		
		Acqua di mare						Cloruri provenienti da altre fonti										
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2
Massimo rapporto a/c	-	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	0,50	0,50	0,45
Minima classe di resistenza ^{a)}	C12/15	C25/30	C28/35	C32/40	C32/40	C35/45	C28/35	C32/40	C35/45	C32/40	C25/30	C28/35	C28/35	C28/35	C32/40	C35/45	C35/45	C35/45
Minimo contenuto di cemento (kg/m ³)	-	300	320	340	340	360	320	340	360	320	340	360	320	340	360	320	340	360
Contenuto minimo in aria (%)													3,0 ^{b)}					
Altri requisiti													Aggregati conformi alla UNI EN 12620 di adeguata resistenza al gelo/disgelo					È richiesto l'impiego di cementi resistenti ai solfati ^{b)}

^{a)} Nel prospetto 7 della UNI EN 206-1 viene riportata la classe C8/10 che corrisponde a specifici calcestruzzi destinati a sottofondazioni e ricoprimenti. Per tale classe dovrebbero essere definite le prescrizioni di durabilità nei riguardi di acque o terreni aggressivi.

^{a)} Quando il calcestruzzo non contiene aria aggiunta, le sue prestazioni devono essere verificate rispetto ad un calcestruzzo aerato per il quale è provata la resistenza al gelo/disgelo, da determinarsi secondo UNI 7087, per la relativa classe di esposizione.

^{b)} Qualora la presenza di solfati comporti le classi di esposizione XA2 e XA3 è essenziale utilizzare un cemento resistente ai solfati secondo UNI 9156.

Prospetto 4 estratto dalla UNI 11104 in cui vengono elencati i requisiti minimi del calcestruzzo per ciascuna classe di esposizione ambientale.

Rileva considerare che per le strutture interrato si è definita una classe di esposizione XA. In seguito ad analisi del terreno o dell'acqua in esso contenuta, in base al prospetto 2, è possibile ricavare l'eventuale classe di aggressione chimica.

Gli ambienti chimicamente aggressivi classificati di seguito sono basati sul suolo naturale e per acqua nel terreno a temperature dell'acqua/terreno comprese tra 5° e 25°C ed una velocità dell'acqua sufficientemente bassa da poter essere approssimata a condizioni statiche. La condizione più gravosa per ognuna delle condizioni chimiche determina la classe di esposizione. Se due o più caratteristiche di aggressività appartengono alla stessa classe, l'esposizione sarà classificata nella classe più elevata successiva, salvo il caso che uno studio specifico provi che ciò non è necessario.

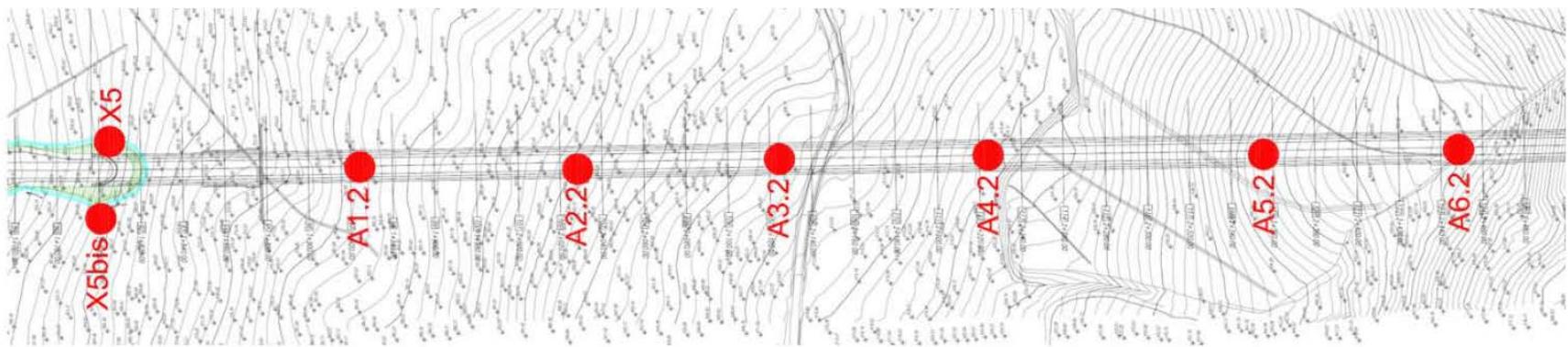
Caratteristica chimica	Metodo di prova chimica di riferimento	XA1	XA2	XA3
Acqua nel terreno				
SO ₄ ²⁻ mg/l	EN 196-2	≥200 e ≤600	>600 e ≤3000	>3000 e ≤6000
pH	ISO 4316	≤6,5 e ≥5,5	<5,5 e ≥4,5	<4,5 e ≥4,0
CO ₂ mg/l aggressiva	prEN 13577:199-9	≥15 e ≤40	>40 e ≤100	>100 fino a saturazione
NH ₄ ⁺ mg/l	ISO 7150-1 oppure ISO 7150-2	≥15 e ≤30	>30 e ≤60	>60 e ≤100
Terreno				
SO ₄ ²⁻ mg/kg ^d totale	EN 196-2 ^{a)}	≥2000 e ≤3000 ^d	>3000 ^d e ≤12000	>12000 e ≤24000
Acidità ml/kg	DIN 4030-2	>200 Baumann Gully	Non incontrato in pratica	

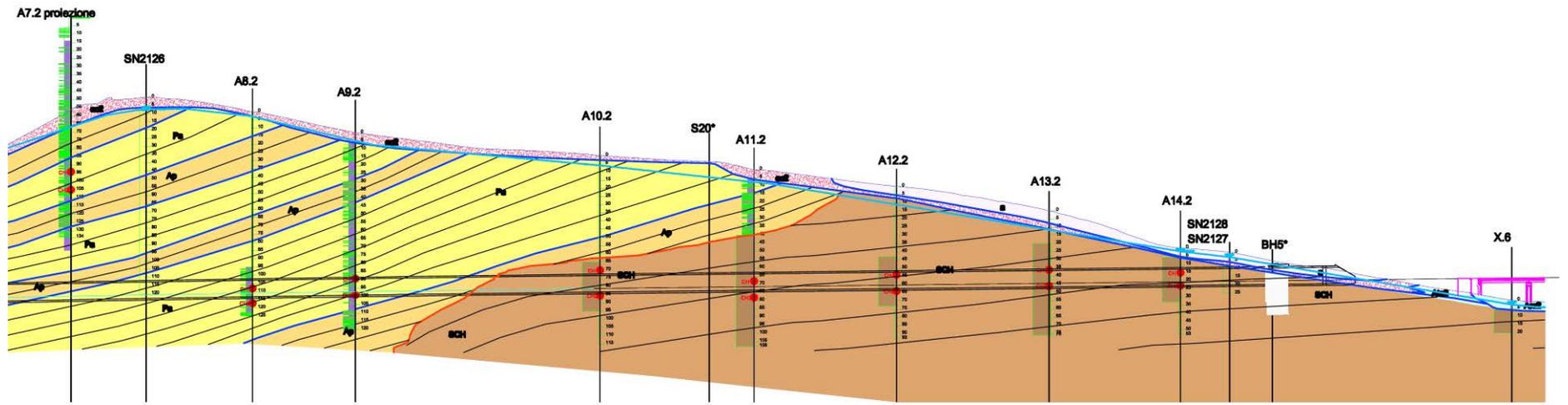
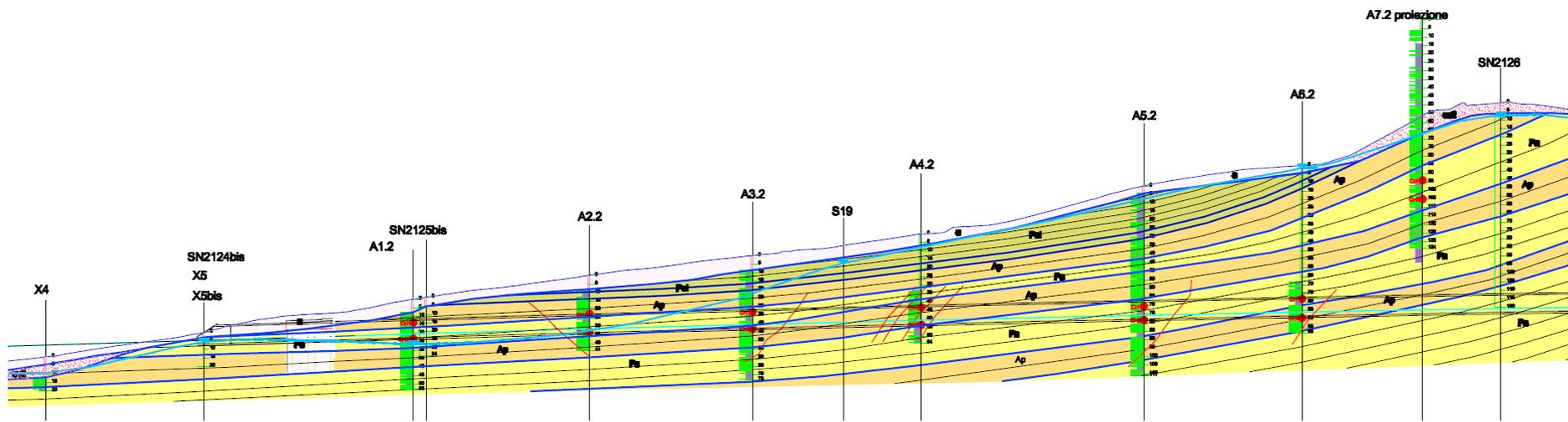
^{a)} I terreni argillosi con una permeabilità minore di 10⁻⁴ m/s possono essere classificati in una classe inferiore
^{b)} Il metodo di prova prescrive l'estrazione di SO₄²⁻ mediante acido cloridrico; in alternativa si può usare l'estrazione con acqua se nel luogo di impiego del calcestruzzo c'è questa pratica.
^{c)} Il limite di 3000 mg/kg, deve essere ridotto a 2000 mg/kg se esiste il rischio di accumulo di ioni solfato nel calcestruzzo causato da cicli di essiccamento/bagnatura oppure suzione capillare.

Prospetto 2 estratto dalla norma UNI EN 206-1 in cui vengono elencati i valori limite per ogni agente aggressivo contemplato dalla classe di esposizione XA.

Sulla base dei risultati nel seguito riportati è stato quindi possibile individuare per il calcestruzzo di arco rovescio e murette (considerata l'assenza di protezione dello strato di impermeabilizzazione) una classe di esposizione pari ad **XA3**.

Le figure seguenti mostrano i punti di prelievo dei campioni sottoposti ad analisi chimica nel corso della campagna di indagine, la loro distribuzione in profilo ed una sintesi dei risultati (*i certificati di prova sono consultabili in appendice*).





GN CROCE DI CALLE

TIPO DI CAMPIONE	Misura	Metodo di Prova	U.M.	A1.2		A2.2		A3.2		A4.2		A5.2											
				Formazione geologica		Formazione geologica		Formazione geologica		Formazione geologica		Formazione geologica											
				CH1	CH2																		
				z camp [m]	Classe esp.	z camp [m]	Classe esp.																
TERRENO	Umidità	DM 13/09/1999 GU n°248 21/10/1999 SO n°185 Met II.2	%	5.41	-	8.34	-	7.9	-	8.08	-	6	-	6.9	-	6.41	-	8.86	-	6.7	-	4.69	-
	Terra fine (gran < 2 mm)	DM 13/09/1999 SO n°185 GU n°248 21/10/1999 Met II.1	%	100	-	100	-	100	-	99.3	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-
	Scheletro (gran > 2 mm)	DM 13/09/1999 SO n°185 GU n°248 21/10/1999 Met II.1	%	< 0.10	-	< 0.10	-	<0,1	-	0.7	-	< 0,10	-	< 0,10	-	<0,1	-	<0,1	-	<0,1	-	<0,10	-
	Acidità (come Baumann - Gully)	DIN 4030 - 22008	ml/kg s.s.	< 50	-	< 50	-	<50	-	<50	-	< 50	-	< 50	-	<0,5	-	<0,5	-	<50	-	<50	-
	Solfati (come SO ₄ ²⁻)	DIN EN 196 - 22005	mg/kg s.s.	685	-	2403	XA1	2880	XA1	447	-	1709	-	3391	XA2	3774	XA2	2524	XA1	2041	XA1	1033	-

TIPO DI CAMPIONE	Misura	Metodo di Prova	U.M.	z campione [m]									
				z campione [m]	Classe esp.								
ACQUA SOTTERRANEA	Ph	ISO 4316	-	9.15	-	7.55	-	8.45	-	8.8	-	8.5	-
	Magnesio	EPA 6010C 2007	mg/l	17.2	-	16.8	-	6.5	-	1.03	-	6.7	-
	Azoto Ammoniacale (NH ₄ ⁺)	APAT CNR IRSA 4030 A1 Man 29 2003	mg/l	0.411	-	0.207	-	2.69	-	3.99	-	5.8	-
	Solfati (come SO ₄ ²⁻)	DIN EN 196 - 22005	mg/l	270	XA1	134	-	36.9	-	68.1	-	272	XA1
	Anidride Carbonica (CO ₂)	DIN EN 13577:1999	mg/l	12.1	-	23.1	XA1	66	XA2	18.7	XA1	11	-
	Magnesio	UNI EN ISO 7980:2002	mg/l	18.3	-	14.8	-	6.3	-	0.918	-	6.36	-
	Azoto Ammoniacale (NH ₄ ⁺)	ISO 7150/1-1984	mg/l	0.411	-	0.207	-	2.69	-	3.99	-	5.43	-

TIPO DI CAMPIONE	Misura	Metodo di Prova	U.M.	A6.2		A7.2		A8.2		A9.2		A10.2											
				Formazione geologica		Formazione geologica		Formazione geologica		Formazione geologica		Formazione geologica											
				CH1	CH2																		
				z camp [m]	Classe esp.	z camp [m]	Classe esp.																
TERRENO	Umidità	DM 13/09/1999 GU n°248 21/10/1999 SO n°185 Met II.2	%	7.71	-	6.08	-	8.69	-	7.14	-	7.66	-	6.37	-	7.37	-	7.91	-	4.59	-	4.65	-
	Terra fine (gran < 2 mm)	DM 13/09/1999 SO n°185 GU n°248 21/10/1999 Met II.1	%	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-
	Scheletro (gran > 2 mm)	DM 13/09/1999 SO n°185 GU n°248 21/10/1999 Met II.1	%	<0,10	-	<0,10	-	<0,10	-	<0,1	-	<0,1	-	<0,10	-	<0,10	-	<0,10	-	<0,10	-	<0,10	-
	Acidità (come Baumann - Gully)	DIN 4030 - 22008	ml/kg s.s.	<50	-	<50	-	<50	-	<50	-	<50	-	<50	-	<50	-	<50	-	<50	-	<50	-
	Solfati (come SO ₄ ²⁻)	DIN EN 196 - 22005	mg/kg s.s.	942	-	2322	XA1	687	-	1070	-	832	-	883	-	1132	-	3337	XA2	842	-	1672	-

TIPO DI CAMPIONE	Misura	Metodo di Prova	U.M.	z campione [m]									
				z campione [m]	Classe esp.								
ACQUA SOTTERRANEA	Ph	ISO 4316	-	8.1	-	7.9	-	8.5	-	9.6	-	7.95	-
	Magnesio	EPA 6010C 2007	mg/l	1.34	-	1.61	-	3	-	1.44	-	3.8	-
	Azoto Ammoniacale (NH ₄ ⁺)	APAT CNR IRSA 4030 A1 Man 29 2003	mg/l	3.43	-	3.02	-	1.41	-	2.61	-	0.97	-
	Solfati (come SO ₄ ²⁻)	DIN EN 196 - 22005	mg/l	143	-	104	-	33.4	-	40.2	-	47.1	-
	Anidride Carbonica (CO ₂)	DIN EN 13577:1999	mg/l	6.6	-	11	-	13.2	-	17.6	XA1	6.6	-
	Magnesio	UNI EN ISO 7980:2002	mg/l	1.26	-	1.56	-	3.6	-	1.22	-	4.1	-
	Azoto Ammoniacale (NH ₄ ⁺)	ISO 7150/1-1984	mg/l	3.22	-	2.89	-	1.37	-	2.38	-	0.97	-

TIPO DI CAMPIONE	Misura	Metodo di Prova	U.M.	A11.2				A12.2				A13.2				A14.2				X5			
				Formazione geologica				Formazione geologica				Formazione geologica				Formazione geologica				Formazione geologica			
				CH1		CH2		CH1		CH2		CH1		CH2		CH1		CH2		CH1		CH2	
				z camp [m]	Classe esp.	z camp [m]	Classe esp.	z camp [m]	Classe esp.	z camp [m]	Classe esp.	z camp [m]	Classe esp.	z camp [m]	Classe esp.	z camp [m]	Classe esp.	z camp [m]	Classe esp.	z camp [m]	Classe esp.	z camp [m]	Classe esp.
TERRENO	Umidità	DM 13/09/1999 GU n°248 21/10/1999 SO n° 185 Met II.2	%	5.1	-	8.19	-	7.19	-	6.72	-	6.23	-	5.52	-	7.68	-	6.21	-	-	-		
	Terra fine (gran < 2 mm)	DM 13/09/1999 SO n° 185 GU n°248 21/10/1999 Met II.1	%	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	-	-		
	Scheletro (gran > 2 mm)	DM 13/09/1999 SO n° 185 GU n°248 21/10/1999 Met II.1	%	<0.10	-	<0.10	-	<0.10	-	<0.10	-	<0.10	-	<0.10	-	<0.10	-	<0.10	-	-	-		
	Acidità (come Baumann - Gully)	DIN 4039 - 22008	ml/kg s.s.	50	-	50	-	50	-	<50	-	<50	-	<50	-	<50	-	<50	-	-	-		
	Solfati (come SO ₄ ²⁻)	DIN EN 196 - 22005	mg/kg s.s.	2181	XA1	2063	XA1	3414	XA2	2195	XA1	1779	-	1533	-	23.6	-	19.9	-	-	-		
				z campione [m]		Classe esp.	z campione [m]		Classe esp.	z campione [m]		Classe esp.	z campione [m]		Classe esp.	z campione [m]		Classe esp.	z campione [m]		Classe esp.		
ACQUA SOTTERRANEA	Ph	ISO 4316	-	75			60			44			20			20			8				
	Magnesio	EPA 6010C 2007	mg/l	8.3		-	8.3		-	8.4		-	9.3		-	8		-	43		-		
	Azoto Ammoniacale (NH ₄ ⁺)	APAT CNR IRSA 4030 Al Mar 29 2003	mg/l	4.1		-	4.1		-	4.2		-	1		-	43		-	0.02		-		
	Solfati (come SO ₄ ²⁻)	DIN EN 196 - 22005	mg/l	2.13		-	2.18		-	2.45		-	5.47		-	0.02		-	163		-		
	Anidride Carbonica (CO ₂)	DIN EN 13577:1999	mg/l	140		-	134		-	101		-	48.5		-	163		-	8.8		-		
	Magnesio	UNI EN ISO 7980:2002	mg/l	19.8		XA1	11		-	17.6		XA1	15.4		XA1	8.8		-	35.1		-		
	Azoto Ammoniacale (NH ₄ ⁺)	ISO 7150/1-1984	mg/l	3.4		-	3.5		-	3.5		-	1.04		-	35.1		-	0.02		-		
				1.97		-	2		-	2.29		-	5.14		-	0.02		-	-		-		

La classe di esposizione sopra definita è stata utilizzata anche per il dimensionamento del copriferro tale per cui si abbia un ricoprimento sopra le barre tale da proteggere le armature contro la corrosione.

In particolare modo per il dimensionamento del copriferro si è adottata la formula seguente:

$$c_{\text{nom}} = c_{\text{min}} + \Delta c_{\text{dev}}$$

dove:

$$c_{\text{min}} = \max \{ c_{\text{min},b} ; c_{\text{min},dur} + \Delta c_{\text{dur},\gamma} - \Delta c_{\text{dur},st} - \Delta c_{\text{dur},add} ; 10\text{mm} \}$$

$$\Delta c_{\text{dev}} = 10\text{mm} \text{ e } \Delta c_{\text{dur},\gamma} = \Delta c_{\text{dur},st} = \Delta c_{\text{dur},add} = 0_{[N10]}$$

$c_{\text{min},b}$ = copriferro minimo necessario per l'aderenza delle armature (è pari al diametro delle barre) = 1.6 cm o 2.0 cm a seconda dei casi

$c_{\text{min},dur}$ = copriferro minimo correlato alle condizioni ambientali e si ricava dai prospetti 4.3 N, 4.4 N e 4.5 N in funzione della classe di esposizione e ricordando che la classe strutturale per un periodo di vita presunta della struttura pari a 50 anni è la classe S4.

In particolare il prospetto 4.3N consente di variare la classe strutturale nella maniera seguente:

- n1 – per vite utili di progetto di 100 anni si incrementa la classe strutturale di 2
- n2 – si riduce la classe di 1 se si utilizzano calcestruzzi con classe di resistenza superiore ai minimi previsti dal prospetto 4.3 N
- n3 – per elementi strutturali assimilabili a solette si riduce la classe strutturale di 1
- n4 – se la produzione del calcestruzzo è sottoposta ad un rigoroso controllo di qualità si riduce la classe strutturale di 1.

FIGURA 3.1 Classe Strutturale

Criterio	Classe di esposizione secondo il prospetto 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1	XD2 / XS1	XD3 / XS2 / XS3
Vita utile di progetto di 100 anni	aumentare di 2 classi	aumentare di 2 classi	aumentare di 2 classi	aumentare di 2 classi	aumentare di 2 classi	aumentare di 2 classi	aumentare di 2 classi
Classe di resistenza ^{1) 2)}	≥ C30/37 ridurre di 1 classe	≥ C30/37 ridurre di 1 classe	≥ C35/45 ridurre di 1 classe	≥ C40/50 ridurre di 1 classe	≥ C40/50 ridurre di 1 classe	≥ C40/50 ridurre di 1 classe	≥ C45/55 ridurre di 1 classe
Elemento di forma simile ad una soletta (posizione delle armature non influenzata dal processo costruttivo)	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe
È assicurato un controllo di qualità speciale della produzione del calcestruzzo	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe	ridurre di 1 classe

Prospetto 4.3N estratto dalla UNI EN 1992-1-1^[104] che permette di variare la classe strutturale in funzione di alcuni criteri costruttivi.

Dal prospetto 4.3 N si definisce una classe strutturale del calcestruzzo di S4.

Pertanto, entrando nel prospetto 4.4 N con i dati di cui sopra si ottiene un valore di $c_{\min,dur}$ pari a 45 mm.

FIGURA 3.2 Requisito Ambientale per $c_{\min,dur}$ (mm)

Classe strutturale	Classe di esposizione secondo il prospetto 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1	XD2 / XS1	XD3 / XS2 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Prospetto 4.4N estratto dalla UNI EN 1992-1-1^[104] che prescrive i valori del copriferro minimo $c_{\min,dur}$ con riferimento alla durabilità per acciai da armatura ordinaria, in accordo alla EN 10080.

Il valore del copriferro risulta quindi pari a:

$$c_{nom} = 4.5 + 1.0 = 5.5 \text{ cm}$$

7. METODO DI AVANZAMENTO DELLO SCAVO E SEZIONI TIPO

Lo scavo della galleria naturale è previsto con metodo tradizionale.

Sulla base dei parametri geotecnici assegnati a ciascun tratto geotecnicamente omogeneo individuato lungo lo sviluppo della galleria e delle caratteristiche litologiche delle formazioni, sono state predisposte numero 4 + 2 (sezioni tipo per lo scavo della piazzola) diverse sezioni di progetto, applicate secondo i criteri di progetto descritti nel seguente paragrafo.

7.1 Criteri di applicazione delle sezioni tipo

Con riferimento al profilo geomeccanico, lo scavo della galleria sarà eseguito con le 7 sezioni tipo descritte nei seguenti paragrafi. Le sezioni tipo previste per i vari tratti di galleria sono state dimensionate in funzione delle caratteristiche geotecniche, delle coperture, del comportamento tenso-deformativo dei terreni allo scavo ed in ultimo sulla scorta della suddivisione in tratte omogenee (medesimo valore del rapporto A/P) eseguita nel corso della caratterizzazione geologica degli ammassi.

L'attribuzione delle sezioni di scavo e consolidamento alle varie tratte di galleria è stata, pertanto, effettuata non solo in considerazione delle classi di copertura incontrate lungo lo sviluppo delle tratte in sotterraneo ma, soprattutto per le sezioni interferenti con la Formazione di Camerino, sulla base dei valori del rapporto A/P (*arenaria / pelite*) individuati per le varie tratte di galleria.

In particolare:

- **Tratte pelitico - arenacee** (rapporto $0 < A/P < 1$): sezioni tipo maggiormente consolidate (B2, B2V)
- **Tratte arenaceo – pelitico** (rapporto $A/P \gg 1$): sezioni tipo poco consolidate (B0, B0v)

A tal proposito rileva precisare che, come desumibile da quanto nel seguito esposto, il dimensionamento delle sezioni tipo B0, B2 e Piazzola B0 è stato sviluppato sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche effettuate assumendo gli interventi di consolidamento risultanti dall'adozione dei valori massimi del range di variabilità dei parametri di resistenza (nella presente relazione sono tuttavia indicati anche gli interventi di consolidamento e prerivestimento dimensionati per i parametri di resistenza minimi).

In generale per le porzioni di gallerie in prossimità degli imbocchi, considerato il particolare stato di detensionamento degli ammassi dovuto anche alla presenza di fenomeni franosi, si è adottata una sezione tipo caratterizzata da consolidamento al contorno mediante infilaggi metallici e al fronte con VTR iniettati.

Relativamente ai tratti a media ed alta copertura, ad esclusione di quelli per i quali si è ritenuto possibile applicare la sezione tipo B0 secondo i criteri sopra esposti, sono stati invece previsti interventi di consolidamento del fronte di scavo mediante elementi in VTR necessari per il contenimento dell'estrusione del fronte e per limitare le convergenze del cavo.

La tabella seguente riporta una sintesi delle principali sezioni tipo applicate e le corrispondenti classi di copertura.

Fascia di Profondità [m]	Camerino Pelitico Arenacea	Schlier
80 < z < 110	B2*	-
50 < z < 80	B2	B0 / B2
	Piazzola	Piazzola / Piazzola B0
25 < z < 50	B0 / B2 – Piazzola B0	B0 – Piazzola B0
0 < z < 25	B2 / B2V	B2V / B0v

Applicazione delle sezioni tipo. Tabella riassuntiva

Nei capitoli successivi si descriveranno, tratta per tratta, le principali considerazioni progettuali sviluppate a supporto della sezione tipo applicata.

7.1.1 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 1+876.93 e la Pk. 1+944.96 – Sezione tipo B2V

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 1+876.93 e la Pk. 1+944.96 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà all'interno dell'associazione Pelitico – Arenacea della formazione di Camerino caratterizzata da un rapporto $A / P = 0.41$. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano comprese tra 0 e 15 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione di Camerino (Associazione pelitico – arenacea)		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
0 < z < 15	c'	[kPa]	120 – 150	120	150
	φ'	[°]	31 – 35	31	35
	E	[MPa]	100	100	100
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo di Tamez (per i dettagli si rimanda allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto minimi riportati in tabella consente di definire un fattore di sicurezza pari a 2.48.

Sebbene dal calcolo analitico è possibile definire una condizione di fronte stabile, per la tratta in esame, tenuto conto che lo scavo si sviluppa totalmente in:

- condizione di copertura superficiale;
- contesti particolarmente detensionati quali le pendici dell'ammasso interessato dallo scavo della galleria,

il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo B2v. Detta sezione tipo, caratterizzata dalla presenza di un sistema di consolidamento al fronte ed al contorno ottenuto mediante la realizzazione rispettivamente di VTR ed infilaggi metallici, si rende particolarmente idonea allo scavo in contesti fortemente detensionati e caratterizzati dalla presenza di strati di terreno al di sopra della calotta con scadenti caratteristiche meccaniche.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo B2v sono stati invece dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di

calcolo massima e utilizzando i parametri geotecnici (inferiori rispetto a quelli relativi alla tratta in esame) relativi alla medesima condizioni di copertura ma afferenti alla formazione dello Schlier in prossimità dell'imbocco Sud.

7.1.2 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 1+944.96 e la Pk. 2+043.93 – Sezione tipo B2

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 1+944.96 e la Pk. 2+043.93 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà all'interno dell'associazione Pelitico – Arenacea della formazione di Camerino caratterizzata da un rapporto $A / P = 0.41$. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano comprese tra 15 e 25 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione di Camerino (Associazione pelitico – arenacea)		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
15 < z < 25	c'	[kPa]	120 – 150	120	150
	φ'	[°]	31 – 35	31	35
	E	[MPa]	100	100	100
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo di Tamez (per i dettagli si rimanda allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto minimi riportati in tabella consente di definire un fattore di sicurezza pari a 3.24.

Sebbene dal calcolo analitico è possibile definire una condizione di fronte stabile, per la tratta in esame, tenuto conto che lo scavo si sviluppa totalmente in:

- condizione di copertura superficiale;
- contesti particolarmente detensionati quali le pendici dell'ammasso interessato dallo scavo della galleria e caratterizzati da un valori di $A/P \ll 1$,

il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo B2. Detta sezione tipo, caratterizzata dalla presenza di un sistema di consolidamento al fronte ottenuto mediante la

realizzazione di VTR, si rende particolarmente idonea allo scavo in contesti fortemente detensionati per i quali si possono sviluppare fenomeni di instabilità del fronte di scavo.

Per il caso in esame i fenomeni di instabilità attesi per il fronte possono essere sia di tipo locale, e quindi limitati al distacco di porzioni di ammasso, oppure diffusi e quindi tali da coinvolgere l'intero fronte di scavo e le porzioni di ammasso dietro di questo. Per quanto sopra esposto, ed in considerazione del fatto che la formazione sia caratterizzata da un'alternanza di strati pelitici - arenacei, con prevalente presenza di strati pelitici in ragione del basso rapporto A/P, l'utilizzo di una sezione tipo senza sistema di consolidamento non si ritiene adeguata.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo B2 sono stati invece dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo massima e utilizzando i parametri geotecnici sopra specificati. In particolare si precisa che il rivestimento provvisorio applicato e il sistema di consolidamento del fronte è stato verificato in corrispondenza dei parametri geotecnici massimi mentre le verifiche statiche dei rivestimenti definitivi risultano soddisfatte anche in corrispondenza dei parametri minimi. Rispetto alla sezione B2 applicata nelle rimanenti tratte della galleria, nel caso in esame (bassa copertura), si prevede l'adozione del rivestimento definitivo di arco rovescio armato.

7.1.3 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+043.93 e la Pk. 2+130.29 – Sezione tipo B2

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+043.93 e la Pk. 2+130.29 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà all'interno dell'associazione Pelitico – Arenacea della formazione di Camerino caratterizzata da un rapporto $A / P = 0.41$. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano comprese tra 25 e 35 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione di Camerino (Associazione pelitico – arenacea)		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	220	250
	φ'	[°]	25 – 30	25	30
	E	[MPa]	200	200	200
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo delle Curve caratteristiche per la copertura di calcolo massima pari a 35 m (per i dettagli si rimanda allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto riportati in tabella consente di definire una condizione di fronte stabile.

Sebbene dal calcolo analitico è possibile definire una condizione di fronte stabile, per la tratta in esame, tenuto conto che lo scavo si sviluppa totalmente in:

- contesti caratterizzati da un valori di $A/P \ll 1$ e quindi da una alternanza di strati più o meno competenti,

il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo B2. Detta sezione tipo, caratterizzata dalla presenza di un sistema di consolidamento al fronte ottenuto mediante la realizzazione di VTR, si rende particolarmente idonea allo scavo per quelle situazioni in cui risulta necessario ridurre i fenomeni di estrusione del fronte e l'entità delle convergenze delle pareti del cavo.

Per il caso in esame i fenomeni di instabilità attesi per il fronte possono essere sia di tipo locale, e quindi limitati al distacco di porzioni di ammasso, oppure diffusi e quindi tali da coinvolgere l'intero fronte di scavo e le porzioni di ammasso dietro di questo. L'applicazione di

detta sezione tipo consente altresì di ridurre il rischio connesso allo sviluppo di fenomeni di instabilità locale del fronte molto frequenti per quelle situazioni in cui l'ammasso e il fronte di scavo sono caratterizzati dall'alternanza ritmica di strati più o meno consistenti (variazione di A/P) sconsigliando l'utilizzo di una sezione tipo senza sistema di consolidamento.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo B2 sono stati invece dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo massima (50 m) e utilizzando i parametri geotecnici sopra specificati. In particolare si precisa che il rivestimento provvisorio applicato e il sistema di consolidamento del fronte è stato verificato in corrispondenza dei parametri geotecnici massimi mentre le verifiche statiche dei rivestimenti definitivi risultano soddisfatte anche in corrispondenza dei parametri minimi.

7.1.4 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+130.29 e la Pk. 2+175.29 – Sezione tipo Piazzola B0

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+130.29 e la Pk. 2+175.29 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà all'interno dell'associazione Arenaceo - Pelitico della formazione di Camerino caratterizzata da un rapporto $A / P = 1.84$. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano comprese tra 35 e 40 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione di Camerino (Associazione pelitico – arenacea)		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	220	250
	φ'	[°]	25 – 30	25	30
	E	[MPa]	200	200	200
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo delle Curve caratteristiche per la copertura di calcolo massima pari a 40 m (per i dettagli si rimando allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto massimi riportati in tabella consente di definire una condizione di fronte stabile.

Per la tratta in esame, tenuto conto che lo scavo si sviluppa totalmente in un ammasso caratterizzato da un valore di $A/P > 1$, il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo Piazzola B0. Detta sezione tipo, caratterizzata dall'assenza di un sistema di consolidamento del fronte, si rende particolarmente idonea per quelle situazioni in cui l'ammasso in scavo risulta maggiormente competente e tale da lasciar prevedere lo sviluppo di convergenze limitate e l'assenza di fenomeni di instabilità del fronte poiché caratterizzata da una prevalenza di materiale arenaceo.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo Piazzola B0 sono stati invece dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo massima (50 m) e utilizzando il range massimo dei parametri geotecnici sopra specificati.

7.1.5 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+175.29 e la Pk. 2+255.98 – Sezione tipo B0

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+175.29 e la Pk. 2+255.98 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà all'interno dell'associazione Arenaceo - Pelitica della formazione di Camerino caratterizzata da un rapporto $A / P = 1.84$. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano comprese tra 40 e 50 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione di Camerino (Associazione pelitico – arenacea)		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	220	250
	φ'	[°]	25 – 30	25	30
	E	[MPa]	200	200	200
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo delle Curve caratteristiche (per i dettagli si rimando allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto riportati in tabella consente di definire una condizione di fronte stabile.

Per la tratta in esame, tenuto conto che lo scavo si sviluppa totalmente in un ammasso caratterizzato da un valore di $A/P > 1$, il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo B0. Detta sezione tipo, caratterizzata dall'assenza di un sistema di consolidamento del fronte, si rende particolarmente idonea per quelle situazioni in cui l'ammasso in scavo risulta maggiormente competente e tale da lasciar prevedere lo sviluppo di convergenze limitate e l'assenza di fenomeni di instabilità del fronte poiché caratterizzata da una prevalenza di materiale arenaceo.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo B0 sono stati invece dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo massima e utilizzando i parametri geotecnici sopra specificati. In particolare si precisa che il rivestimento provvisorio applicato e il sistema di consolidamento del fronte è stato verificato in corrispondenza dei parametri geotecnici massimi mentre le verifiche statiche dei rivestimenti definitivi risultano soddisfatte anche in corrispondenza dei parametri minimi.

7.1.6 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+255.98 e la Pk. 2+281.13 – Sezione tipo B2

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+255.98 e la Pk. 2+281.13 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà all'interno dell'associazione Pelitico – Arenacea della formazione di Camerino caratterizzata da un rapporto $A / P = 0.25$. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano pari a 50 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione di Camerino (Associazione pelitico – arenacea)		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	220	250
	φ'	[°]	25 – 30	25	30
	E	[MPa]	200	200	200
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo delle Curve caratteristiche (per i dettagli si rimando allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto riportati in tabella consente di definire una condizione di fronte stabile.

Sebbene dal calcolo analitico è possibile definire una condizione di fronte stabile, per la tratta in esame, tenuto conto che lo scavo si sviluppa totalmente in:

- contesti caratterizzati da un valori di $A/P \ll 1$ e quindi da una alternanza di strati più o meno competenti,

il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo B2. Detta sezione tipo, caratterizzata dalla presenza di un sistema di consolidamento al fronte ottenuto mediante la realizzazione di VTR, si rende particolarmente idonea allo scavo per quelle situazioni in cui risulta necessario ridurre i fenomeni di estrusione del fronte e l'entità delle convergenze delle pareti del cavo.

Per il caso in esame i fenomeni di instabilità attesi per il fronte possono essere sia di tipo locale, e quindi limitati al distacco di porzioni di ammasso, oppure diffusi e quindi tali da coinvolgere l'intero fronte di scavo e le porzioni di ammasso dietro di questo. L'applicazione di detta sezione tipo consente altresì di ridurre il rischio connesso allo sviluppo di fenomeni di instabilità locale del fronte molto frequenti per quelle situazioni in cui l'ammasso e il fronte di scavo sono caratterizzati dall'alternanza ritmica di strati più o meno consistenti (variazione di A/P) sconsigliando l'utilizzo di una sezione tipo senza sistema di consolidamento.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo B2 sono stati invece dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo massima e utilizzando i parametri geotecnici sopra specificati. In particolare si precisa che il rivestimento provvisorio applicato e il sistema di consolidamento del fronte è stato verificato in corrispondenza dei parametri geotecnici massimi mentre le verifiche statiche dei rivestimenti definitivi risultano soddisfatte anche in corrispondenza dei parametri minimi.

7.1.7 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+281.13 e la Pk. 2+433.98 – Sezione tipo B2

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+281.13 e la Pk. 2+433.98 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà all'interno dell'associazione Pelitico – Arenacea della formazione di Camerino caratterizzata da un rapporto $A / P = 0.25$. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano comprese tra 50 e 80 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione di Camerino (Associazione pelitico – arenacea)		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
50 < z < 80	c'	[kPa]	220 – 250	220	250
	φ'	[°]	25 – 30	25	30
	E	[MPa]	300	300	300
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo delle Curve caratteristiche (per i dettagli si rimando allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto riportati in tabella consente di definire una condizione di fronte stabile a breve termine.

In aggiunta alle risultanze del calcolo analitico, tenuto conto che lo scavo si sviluppa totalmente in contesti caratterizzati da un valori di $A/P \ll 1$ e quindi da una alternanza di strati più o meno competenti, il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo B2. Detta sezione tipo, caratterizzata dalla presenza di un sistema di consolidamento al fronte ottenuto mediante la realizzazione di VTR, si rende particolarmente idonea allo scavo per quelle situazioni in cui risulta necessario ridurre i fenomeni di estrusione del fronte e l'entità delle convergenze delle pareti del cavo.

Per il caso in esame i fenomeni di instabilità attesi per il fronte possono essere sia di tipo locale, e quindi limitati al distacco di porzioni di ammasso, oppure diffusi e quindi tali da coinvolgere l'intero fronte di scavo e le porzioni di ammasso dietro di questo. L'applicazione di detta sezione tipo consente altresì di ridurre il rischio connesso allo sviluppo di fenomeni di instabilità locale del fronte molto frequenti per quelle situazioni in cui l'ammasso e il fronte di

scavo sono caratterizzati dall'alternanza ritmica di strati più o meno consistenti (variazione di A/P) sconsigliando l'utilizzo di una sezione tipo senza sistema di consolidamento.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo B2 sono stati dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo massima e utilizzando i parametri geotecnici sopra specificati. In particolare si precisa che il rivestimento provvisorio applicato e il sistema di consolidamento del fronte è stato verificato in corrispondenza dei parametri geotecnici massimi mentre le verifiche statiche dei rivestimenti definitivi risultano soddisfatte anche in corrispondenza dei parametri minimi.

7.1.8 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+433.98 e la Pk. 2+478.98 – Sezione tipo Piazzola

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+433.98 e la Pk. 2+478.98 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà all'interno dell'associazione Arenaceo - Pelitico della formazione di Camerino caratterizzata da un rapporto A / P = 1.38. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano comprese tra 50 e 80 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione di Camerino (Associazione pelitico – arenacea)		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
50 < z < 80	c'	[kPa]	220 – 250	220	250
	φ'	[°]	25 – 30	25	30
	E	[MPa]	300	300	300
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo delle Curve caratteristiche (per i dettagli si rimando allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto riportati in tabella consente di definire una condizione di fronte stabile a breve termine per la quale Il Progetto esecutivo prevede dunque l'applicazione della sola sezione tipo Piazzola. Detta sezione tipo, caratterizzata dalla presenza di un sistema di consolidamento al fronte ottenuto mediante la realizzazione di VTR, si rende particolarmente idonea per quelle situazioni in cui risulta

necessario ridurre i fenomeni di estrusione del fronte e l'entità delle convergenze delle pareti del cavo. L'applicazione di detta sezione tipo consente altresì di ridurre il rischio connesso allo sviluppo di fenomeni di instabilità locale del fronte molto frequenti per quelle situazioni in cui l'ammasso e il fronte di scavo sono caratterizzati dall'alternanza ritmica di strati più o meno consistenti.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo Piazzola sono stati dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo massima e utilizzando i parametri geotecnici sopra specificati.

7.1.9 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+478.98 e la Pk. 2+504.84 – Sezione tipo B2

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+478.98 e la Pk. 2+504.84 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà all'interno dell'associazione Pelitico – Arenacea della formazione di Camerino caratterizzata da un rapporto $A / P = 0.25$. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano ad una copertura di circa 80 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione di Camerino (Associazione pelitico – arenacea)		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
80 < z < 110	c'	[kPa]	220 – 250	220	250
	φ'	[°]	25 – 30	25	30
	E	[MPa]	300	300	300
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo delle Curve caratteristiche (per i dettagli si rimando allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto riportati in tabella consente di definire una condizione di fronte stabile a breve termine per la quale il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo B2. Detta sezione tipo, caratterizzata dalla presenza di un sistema di consolidamento al fronte ottenuto mediante la realizzazione di

VTR, si rende particolarmente idonea al fine di ridurre la convergenza e l'estrusione del fronte.

Per il caso in esame i fenomeni di instabilità attesi per il fronte possono essere sia di tipo locale, e quindi limitati al distacco di porzioni di ammasso, oppure diffusi e quindi tali da coinvolgere l'intero fronte di scavo e le porzioni di ammasso dietro di questo.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo B2 sono stati dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo pari a 80 m e utilizzando i parametri geotecnici sopra specificati. In particolare si precisa che il rivestimento provvisorio applicato e il sistema di consolidamento del fronte è stato verificato in corrispondenza dei parametri geotecnici massimi mentre le verifiche statiche dei rivestimenti definitivi risultano soddisfatte anche in corrispondenza dei parametri minimi.

7.1.10 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+504.84 e la Pk. 2+737.50 – Sezione tipo B2*

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+504.84 e la Pk. 2+737.50 è relativo ad una tratta di galleria con la massima copertura per la quale lo scavo avverrà all'interno dell'associazione Pelitico - Arenacea della formazione di Camerino caratterizzata da un rapporto $A / P = 0.23$. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano comprese tra 80 e 110 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione di Camerino (Associazione pelitico – arenacea)		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
80 < z < 110	c'	[kPa]	220 – 250	220	250
	φ'	[°]	25 – 30	25	30
	E	[MPa]	300	300	300
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo delle Curve caratteristiche (per i dettagli si rimanda allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto riportati in tabella

consente di definire una condizione di fronte instabile per la quale il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo B2*. Detta sezione tipo, caratterizzata dalla presenza di un sistema di consolidamento al fronte ottenuto mediante la realizzazione di VTR, si rende particolarmente idonea per quelle situazioni in cui risulta necessario ridurre i fenomeni di estrusione del fronte e l'entità delle convergenze delle pareti del cavo. L'applicazione di detta sezione tipo consente altresì di ridurre il rischio connesso allo sviluppo di fenomeni di instabilità locale del fronte molto frequenti per quelle situazioni in cui l'ammasso e il fronte di scavo sono caratterizzati dall'alternanza ritmica di strati più o meno consistenti.

In considerazione del fatto che la copertura massima (110m) si estende per un tratto ridotto della galleria il sistema di consolidamento del fronte, i rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo B2* sono stati dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo media maggiormente significativa pari a 95 m e utilizzando il range massimo dei parametri geotecnici sopra specificati.

7.1.11 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+737.50 e la Pk. 2+782.50 – Sezione tipo Piazzola

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+737.50 e la Pk. 2+782.50 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà in parte all'interno dell'associazione Arenacea - Pelitica della formazione di Camerino, caratterizzata da un rapporto $A / P = 1.52$, ed in parte all'interno della formazione dello Schlier. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano pari a circa 80 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione di Camerino (Associazione pelitico - arenacea)/ Formazione dello Schlier		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
50 < z < 80	c'	[kPa]	220 – 250	220	250
	φ'	[°]	25 – 30	25	30
	E	[MPa]	300	300	300
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo delle Curve caratteristiche (per i dettagli si rimanda allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto riportati in tabella consente di definire una condizione di fronte stabile a breve termine per la quale il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo Piazzola. Detta sezione tipo, caratterizzata dalla presenza di un sistema di consolidamento al fronte ottenuto mediante la realizzazione di VTR, si rende particolarmente idonea per quelle situazioni in cui risulta necessario ridurre i fenomeni di estrusione del fronte e l'entità delle convergenze delle pareti del cavo.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo Piazzola sono stati invece dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo massima e utilizzando i parametri geotecnici sopra specificati.

7.1.12 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+782.50 e la Pk. 2+832.50 – Sezione tipo B2

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+782.50 e la Pk. 2+832.50 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà all'interno della formazione dello Schlier. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano pari a circa 80 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione dello Schlier		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
50 < z < 80	c'	[kPa]	220 – 250	220	250
	φ'	[°]	25 – 30	25	30
	E	[MPa]	300	300	300
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo delle Curve caratteristiche (per i dettagli si rimanda allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto riportati in tabella consente di definire una condizione di fronte stabile a breve termine per la quale il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo B2. Detta sezione tipo,

caratterizzata dalla presenza di un sistema di consolidamento al fronte ottenuto mediante la realizzazione di VTR, si rende particolarmente idonea per quelle situazioni in cui risulta necessario ridurre i fenomeni di estrusione del fronte e l'entità delle convergenze delle pareti del cavo.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo B2 sono stati dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo massima e utilizzando i parametri geotecnici sopra specificati. In particolare si precisa che il rivestimento provvisorio applicato e il sistema di consolidamento è stato verificato in corrispondenza dei parametri geotecnici massimi mentre le verifiche statiche dei rivestimenti definitivi risultano soddisfatte anche in corrispondenza dei parametri minimi.

7.1.13 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+832.50 e la Pk. 3+037.50 – Sezione tipo B0

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 2+832.50 e la Pk. 3+037.50 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà all'interno della formazione dello Schlier. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano comprese tra 50 e 80 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione dello Schlier		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
50 < z < 80	c'	[kPa]	220 – 250	220	250
	φ'	[°]	25 – 30	25	30
	E	[MPa]	300	300	300
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo delle Curve caratteristiche (per i dettagli si rimanda allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto massimi riportati in tabella consente di definire una condizione di fronte stabile.

Il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo B0. Detta sezione tipo, caratterizzata dall'assenza di un sistema di consolidamento del fronte, si rende

particolarmente idonea per quelle situazioni in cui l'ammasso in scavo risulta maggiormente competente e tale da lasciar prevedere lo sviluppo di convergenze limitate e l'assenza di fenomeni di instabilità del fronte.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo B0 sono stati dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo massima e utilizzando il range massimo dei parametri geotecnici sopra specificati.

In particolare si precisa che il rivestimento provvisorio applicato e il sistema di consolidamento è stato verificato in corrispondenza dei parametri geotecnici massimi mentre le verifiche statiche dei rivestimenti definitivi risultano soddisfatte anche in corrispondenza dei parametri minimi.

7.1.14 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 3+037.50 e la Pk. 3+082.50 – Sezione tipo Piazzola B0

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 3+037.50 e la Pk. 3+082.50 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà all'interno della formazione dello Schlier. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risulta pari a circa 50 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione dello Schlier		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	220	250
	φ'	[°]	25 – 30	25	30
	E	[MPa]	200	200	200
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo delle Curve caratteristiche (per i dettagli si rimanda allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto massimi riportati in tabella consente di definire una condizione di fronte stabile.

Il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo Piazzola B0. Detta sezione tipo, caratterizzata dall'assenza di un sistema di consolidamento del fronte, si rende

particolarmente idonea per quelle situazioni in cui l'ammasso in scavo risulta maggiormente competente e tale da lasciar prevedere lo sviluppo di convergenze limitate e l'assenza di fenomeni di instabilità del fronte.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo Piazzola B0 sono stati dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo massima e utilizzando il range massimo dei parametri geotecnici sopra specificati.

7.1.15 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 3+082.50 e la Pk. 3+162.29 – Sezione tipo B0

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 3+082.50 e la Pk. 3+162.29 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà all'interno della formazione dello Schlier. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano comprese tra 25 e 50 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione dello Schlier		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	220	250
	φ'	[°]	25 – 30	25	30
	E	[MPa]	200	200	200
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo delle Curve caratteristiche (per i dettagli si rimanda allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto riportati in tabella consente di definire una condizione di fronte stabile.

Il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo B0. Detta sezione tipo, caratterizzata dall'assenza di un sistema di consolidamento del fronte, si rende particolarmente idonea per quelle situazioni in cui l'ammasso in scavo risulta maggiormente competente e tale da lasciar prevedere lo sviluppo di convergenze limitate e l'assenza di fenomeni di instabilità del fronte.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo B0 sono stati dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo massima e utilizzando i parametri geotecnici sopra specificati. In particolare si precisa che il rivestimento provvisorio applicato e il sistema di consolidamento è stato verificato in corrispondenza dei parametri geotecnici massimi mentre le verifiche statiche dei rivestimenti definitivi risultano soddisfatte anche in corrispondenza dei parametri minimi.

7.1.16 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 3+162.29 e la Pk. 3+189.24 – Sezione tipo B0v

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 3+162.29 e la Pk. 3+189.24 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà all'interno della formazione dello Schlier. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano comprese tra 15 e 25 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione dello Schlier		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
15 < z < 25	c'	[kPa]	50 – 60	50	60
	φ'	[°]	26 - 28	26	28
	E	[MPa]	100	100	100
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo di Tamez (per i dettagli si rimanda allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto riportati in tabella consente di definire un fattore di sicurezza pari a 1,25.

Il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo B0v. Detta sezione tipo è caratterizzata dall'assenza di un sistema di consolidamento del fronte ma da infilaggi metallici al contorno e si rende particolarmente idonea per quelle situazioni in cui l'ammasso in scavo risulta maggiormente competente e tale da lasciar prevedere lo sviluppo di convergenze limitate e l'assenza di fenomeni di instabilità del fronte. Gli infilaggi metallici si rendono necessari in considerazione delle basse coperture a cui è applicata la sezione tipo.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo B0v sono stati invece dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo massima e utilizzando il range minimo dei parametri geotecnici sopra specificati.

7.1.17 Intervallo di progressive compreso tra la Pk. 3+189.24 e la Pk. 3+256.90 – Sezione tipo B2V

L'intervallo di progressive compreso tra la Pk. 3+189.24 e la Pk. 3+256.90 è relativo ad una tratta di galleria per la quale lo scavo avverrà all'interno della Formazione dello Schlier. Le coperture, misurate a partire dalla chiave della calotta, risultano comprese tra 0 e 15 m.

I parametri geotecnici caratteristici di questo tratto di galleria sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione dello Schlier		
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto min	Parametri di progetto max
15 < z < 25	c'	[kPa]	50 – 60	50	60
	φ'	[°]	26 - 28	26	28
	E	[MPa]	100	100	100
	γ	[kN/mc]	23	23	23

L'analisi di stabilità del fronte di scavo condotta con il metodo di Tamez (per i dettagli si rimando allo specifico capitolo) e con i parametri di progetto riportati in tabella consente di definire un fattore di sicurezza pari a 0.96.

Il Progetto esecutivo prevede l'applicazione della sola sezione tipo B2v. Detta sezione tipo, caratterizzata dalla presenza di un sistema di consolidamento al fronte ed al contorno ottenuto mediante la realizzazione rispettivamente di VTR ed infilaggi metallici, si rende particolarmente idonea allo scavo in contesti fortemente detensionati e caratterizzati dalla presenza di strati di terreno al di sopra della calotta con scadenti caratteristiche meccaniche.

I rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo B2v sono stati dimensionati sulla scorta delle risultanze delle analisi numeriche eseguite in corrispondenza della copertura di calcolo massima e utilizzando il range minimo dei parametri geotecnici riportati in tabella.

8. ANALISI DEL COMPORTAMENTO DEFORMATIVO ALLO SCAVO

Lo scavo della galleria viene operato in passi graduali, procedendo a poca distanza dal fronte di scavo alla posa dei rivestimenti provvisori e successivamente alla realizzazione dei rivestimenti definitivi.

Il comportamento deformativo all'avanzamento dello scavo, che si traduce in una ridistribuzione dello stato di sforzo nell'ammasso attraversato, con incrementi tensionali e detensionamenti nelle diverse zone al contorno del cavo, dipende dalle tempistiche esecutive e dalla rigidità dei diversi sistemi di consolidamento e rivestimento.

Nel complesso il fenomeno può essere visto nella singola sezione come una progressiva convergenza, all'allontanarsi del fronte di scavo, delle pareti dello scavo stesso verso il centro, che può avvenire in campo elastico o in campo progressivamente plastico in dipendenza dall'ampiezza dello scavo e delle caratteristiche dell'ammasso; la convergenza viene contrastata mediante la deformazione dei diversi sistemi di contenimento e rivestimento, più o meno rigidi.

Il comportamento del fronte di scavo, al quale è legato quello della cavità, può essere sostanzialmente ricondotto a tre categorie di comportamento:

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, e 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 oppure se si intende limitare le convergenze del cavo. 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, ed assume 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 caratteristica 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 tal modo si fornisce l'opportuno

contenimento all'ammasso, che manterrà un comportamento stabile. Nel caso non si prevedano opportuni interventi, lo stato tenso - deformativo potrà evolvere verso situazioni di instabilità del cavo in via di realizzazione. Ancora, il rivestimento definitivo costituirà il margine di sicurezza a lungo termine.

Categoria C: Galleria a fronte instabile.

L'instabilità progressiva del fronte di scavo è attribuibile ad una accentuazione 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 più accentuata 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 contenuto 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.

Nella fase di diagnosi, sulla base degli elementi raccolti nella fase conoscitiva, vengono sviluppate le previsioni sul comportamento deformativo del cavo in assenza di interventi, al fine di giungere all'individuazione di tratte a comportamento omogeneo, suddivise nelle tre categorie di comportamento precedentemente descritte.

Per la determinazione del comportamento dell'ammasso allo scavo si usa il Metodo delle Linee Caratteristiche nel caso di coperture elevate, mentre si conducono verifiche con il metodo di Tamez nel caso di coperture modeste.

Una prima valutazione del comportamento allo scavo e la conseguente determinazione delle opere di consolidamento necessarie viene condotta considerando le principali condizioni al contorno, geometria dello scavo e stato dell'ammasso roccioso, e studiando la stabilità del fronte di scavo.

Il metodo di Tamez, di seguito descritto, e la classificazione che ne deriva, è frutto di una teoria che consente di valutare la stabilità del fronte di scavo tenendo conto:

- dell'ampiezza dello scavo (tramite la larghezza ed altezza della sezione);
- dell'entità del passo di avanzamento dello scavo prima della posa di rivestimenti;
- delle caratteristiche fisiche e meccaniche dell'ammasso (parametri di resistenza e peso di volume);
- dello stato tensionale dell'ammasso sottoposto a scavo (profondità dello scavo e stato di sforzo orizzontale).

Il metodo di Tamez, tramite la definizione di un fattore di sicurezza della stabilità, classifica i diversi tratti in scavo in zone stabili, stabili a breve termine, ed instabili, determinando la necessità o meno di un consolidamento in avanzamento del fronte di scavo.

8.1 Metodo di Tamez

Il metodo di Tamez ipotizza una superficie di rottura che dipende dai parametri caratteristici del terreno stesso, e che viene schematizzata attraverso tre prismi (cfr. Cornejo "El fenomeno de la inestabilidad del frente de excavation y su repercusion en la construccion de tuneles", tratto da Tunnels and Water 1968 Balkema).

Il metodo determina le tensioni tangenziali che le facce di ogni prisma possono sopportare senza scorrimenti (forze resistenti) e le forze di massa di ogni prisma (forze agenti). Il rapporto delle forze agenti su quelle resistenti fornisce un coefficiente di sicurezza denominato FSF (face security factor).

Per stabilire il comportamento del fronte si ritiene stabile un fronte con $FSF \geq 1.1$ (coefficiente $\gamma_R = 1.1$ – rif. Cap. 6.8.2 NTC 2008).

Di seguito si riporta la procedura di calcolo valida per la valutazione del coefficiente di sicurezza all'interno di un mezzo omogeneo dotato di attrito e coesione.

Il volume di roccia che gravita sul colmo della calotta è individuato dal paraboloide definito dalla parabola direttrice nella quale:

$$OO' = a + l; h_1 = \frac{B}{2 \cdot f}$$

e dalla parabola di Protodyakonov (vedi fig.2) nella quale $HI=B$.

i parametri che intervengono sono:

$$l = h \cdot \operatorname{tg} \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right);$$

$$B = b + 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right);$$

b = larghezza dello scavo;

h = altezza dello scavo;

σ_c = resistenza a compressione semplice $2c\sqrt{N_\Phi}$;

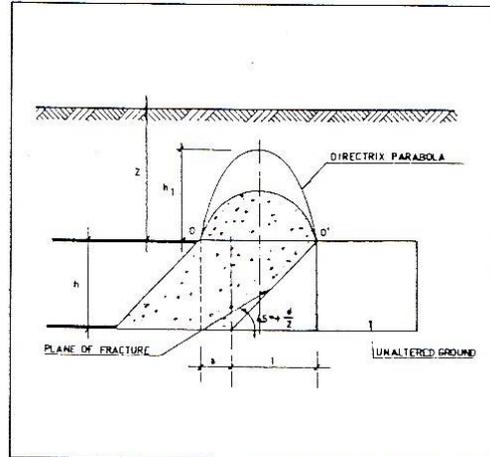
c = coesione;

Z = spessore di terreno gravante sulla calotta della galleria;

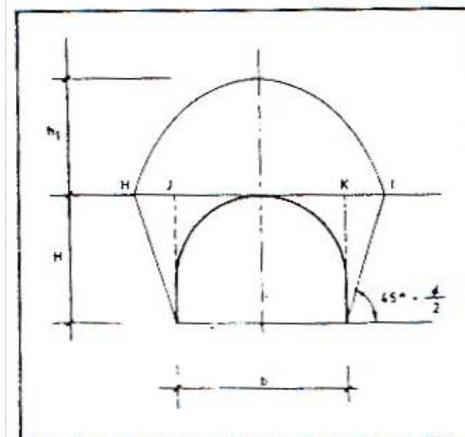
a = passo di avanzamento;

$h_1 = B/2f$ (e comunque $\leq Z$ per gallerie con $Z/D < 3$);

$f = \frac{c}{\sigma_c} + \text{tg} \varphi = \text{fattore di Protodyakonov.}$



Schema del paraboloide



Parabola di Protodyakonov

Per semplificare i calcoli di verifica il paraboloide viene assimilato a tre prismi aventi volume equivalente (vedi fig.3), nel quale definite le forze agenti e le forze resistenti si determina la stabilità del fronte mediante l'espressione generale proposta da Tamez:

$$FSF = \frac{\left[\frac{2 \cdot (\tau_{m2} - \tau_{m3})}{\left(1 + \frac{a}{l}\right)^2} + 2 \cdot \tau_{m3} \right] \cdot \frac{h_1}{b} + \frac{2 \cdot \tau_{m3}}{\left(1 + \frac{a}{l}\right) \cdot \sqrt{K_A}} \cdot \frac{h_1}{h} + \frac{3.4 \cdot c}{\left(1 + \frac{a}{l}\right)^2 \cdot \sqrt{K_A}}}{\left[1 + \frac{2 \cdot h}{3 \cdot Z \cdot \left(1 + \frac{a}{l}\right)^2} \right] \cdot [\gamma \cdot Z - P_E]}$$

In alcuni casi risulta più gravosa la condizione di stabilità relativa al solo prisma 3, per cui è necessario calcolare anche il seguente coefficiente di sicurezza:

$$FS_3 = \frac{2 \cdot \tau_{m3}}{\gamma \cdot Z - P_E} \left[\frac{h_1}{b} \right] \cdot \left[1 + \frac{b}{a} \right]$$

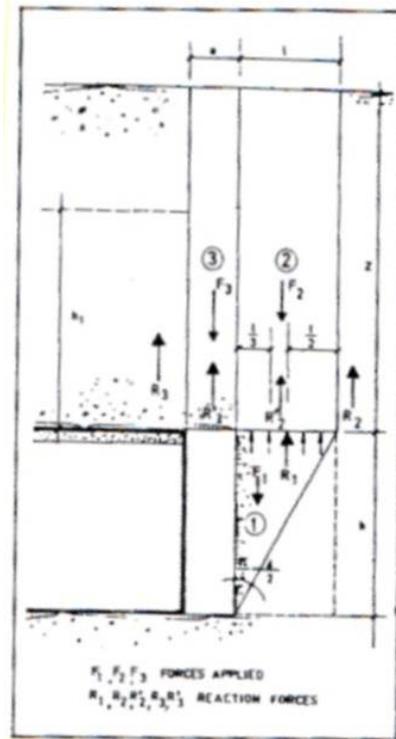
I parametri τ_{m2} e τ_{m3} rappresentano i valori medi delle tensioni di taglio agenti nel terreno lungo le facce dei prismi.

Per gallerie superficiali ($Z/D < 3$) tali parametri sono assunti pari a:

$$\tau_{m2} = c + \frac{K_0}{2} \cdot \left[\frac{3.4 \cdot c}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\gamma - \gamma_w)}{2} \cdot h \right];$$

$$\tau_{m3} = c$$

Nei casi in cui si ritiene che il coefficiente di sicurezza non garantisca la stabilità del fronte si può operare nell'espressione generale di FSF su P_E , che esprime una pressione di stabilizzazione applicata sul fronte di scavo. Tale pressione si può ad esempio ottenere mediante il consolidamento del fronte con barre in VTR.



8.2 Linee caratteristiche

Il metodo delle linee caratteristiche, ovvero della convergenza-confinamento, consiste nella simulazione dello scavo sotto le ipotesi di simmetria assiale (tanto geometrica quanto dello stato tensionale) e in stato di deformazione piana.

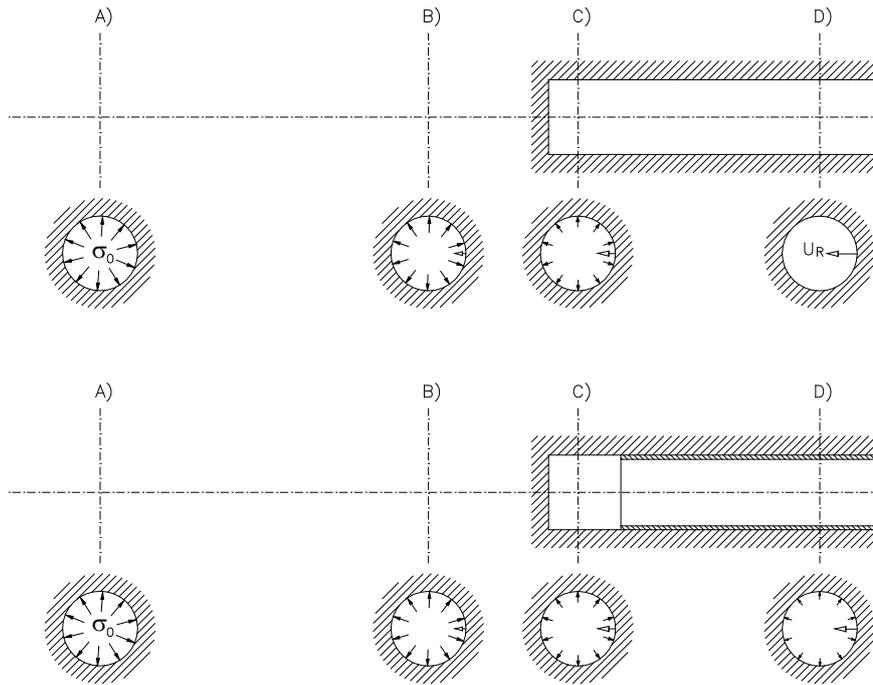
Tale ipotesi è applicabile pertanto in modo soddisfacente solo nel caso di galleria profonda; nel presente caso può assumersi come condizione minima per l'applicabilità del metodo un ricoprimento in calotta superiore ai due diametri.

Lo scavo è rappresentato come una riduzione graduale della pressione di confinamento fittizia σ applicata alla parete della galleria e conseguente alla prossimità del fronte di scavo.

Nella generica sezione, in condizione di cavo non sostenuto, la pressione iniziale σ_0 si riduce via via all'avvicinarsi del fronte di scavo, e successivamente al passaggio di questo attraverso la sezione si porta via via al valore nullo, quando la distanza è tale da essere paragonabile alla condizione con foro di lunghezza indefinita.

Se la galleria è scavata con l'utilizzo di sostegni, applicati prima che la pressione fittizia σ si annulli, il rivestimento esercita al termine dello scavo una pressione, che dipende dal momento in cui il rivestimento è stato eseguito e dalla rigidità dello stesso.

Lo schema generale è mostrato in figura seguente.



Il termine di variazione della pressione in funzione della distanza x del fronte di scavo dalla sezione in esame (assumendo un valore positivo quando il fronte di scavo ha superato la sezione), o ancor meglio in funzione del rapporto adimensionale x/R , essendo R il raggio della galleria in scavo, è stato studiato da Panet, che ha fornito l'espressione:

$$\sigma = (1-\lambda)\sigma_0 = (1-\alpha(x))\sigma_0$$

definendo il valore della funzione $\alpha(x)$

$$\alpha(x) = \alpha_0 + (1 - \alpha_0) \left[1 - \left(\frac{m}{m + x/R} \right)^2 \right]$$

essendo α_0 il valore di α per il passaggio del fronte di scavo nella sezione ($x=0$); i valori delle costanti proposti sono $\alpha_0 = 0.25$ e $m = 0.75$.

Il valore della convergenza (deformazione radiale verso lo scavo) u_R , valutata in corrispondenza della parete dello scavo, è data secondo lo stesso Panet, in accordo ad una definizione del comportamento dell'ammasso di tipo elasto-plastico alla Mohr-Coulomb, dalle espressioni:

$$\frac{2G}{\sigma_0} \cdot \frac{u_R}{R} = \lambda \quad \text{per } \lambda < \lambda_e \quad (\text{in campo elastico})$$

$$\frac{2G}{\sigma_0} \cdot \frac{u_R}{R} = \lambda_e \left[F_1 + F_2 \left(\frac{R}{R_p} \right)^{K_p-1} + F_3 \left(\frac{R_p}{R} \right)^{k+1} \right] \quad \text{per } \lambda_e \leq \lambda \leq 1 \quad (\text{in campo plastico})$$

dove come anzidetto $\lambda = \alpha(x)$ è una misura della pressione fittizia non più sviluppata dal fronte ($\lambda = 1$ per $x \rightarrow \infty$), e λ_e è il valore di λ per il quale avviene la transizione dell'ammasso tra le condizioni elastiche e quelle elasto-plastiche per effetto dello scavo (che dipende dallo stato tensionale e dalle caratteristiche di resistenza dell'ammasso), essendo:

$$\lambda_e = \frac{1}{K_p + 1} \left[K_p - 1 + \frac{2}{N} \right]$$

$$N = \frac{2\sigma_0}{\sigma_c}$$

$$\sigma_c = \frac{2c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

coefficiente di spinta passiva

$$F_1 = 1 - (1 - 2\nu) \frac{K_p + 1}{K_p - 1}$$

$$F_2 = 2 \frac{1 + KK_p - \nu(K_p + 1)(K + 1)}{(K_p - 1)(K + K_p)}$$

$$F_3 = 2(1 - \nu) \frac{K_p + 1}{K_p + K}$$

$$K = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}$$

$$R_p = R \left[\frac{2\lambda_e}{(K_p + 1)\lambda_e - (K_p - 1)\lambda} \right]^{\frac{1}{k_p - 1}}$$

raggio dell'area plasticizzata nell'intorno del foro

dove c e φ sono i parametri di resistenza geomeccanica dell'ammasso, ν e G i parametri di deformabilità elastica e ψ l'angolo di dilatanza.

9. ANALISI DELLA STABILITÀ DEL FRONTE DI SCAVO

Le analisi condotte, con riferimento ai risultati ottenuti dalle Linee Caratteristiche e alle verifiche di stabilità condotte con il metodo di Tamez, hanno permesso di assegnare a ciascun contesto geomeccanico uno dei tre comportamenti del fronte allo scavo menzionati nei paragrafi precedenti; verranno nel seguito discusse le principali formazioni geomeccaniche analizzate. Si precisa che si è proceduto alla verifica di stabilità del fronte con la metodologia di TAMEZ per le sezioni applicate a coperture fino a 25 m mentre la verifica con le linee caratteristiche è stata effettuata per le sezioni applicate a coperture superiori a 25 m.

9.1 Copertura con $H < 25$ m

Le formazioni incluse nella tratta di copertura tra 0 e 25 m sono:

- Formazione di Camerino (Associazione Pelitica - Arenacea)
- Formazione dello Schlier (Marne argillose - siltose)

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo degli elementi di consolidamento al fronte sono riportati nelle tabelle seguenti:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Schlier	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
0 < z < 25	c'	[kPa]	50 – 60	50
	φ'	[°]	26 – 28	26
	E	[MPa]	100	100
	γ	[kN/mc]	23	23

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Formazione di Camerino (Associazione pelitico – arenacea)	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
0 < z < 25	c'	[kPa]	120 – 150	120
	φ'	[°]	31 – 35	31
	E	[MPa]	100	100
	γ	[kN/mc]	23	23

Si precisa che i parametri di resistenza dei materiali sono stati ridotti secondo i fattori riduttivi proposti dalla normativa solo per le sezioni tipo in corrispondenza degli imbocchi ($H < 15\text{m}$). Tale particolare cautela si rende infatti necessaria considerato che le sezioni tipo sono applicate in corrispondenza degli imbocchi della galleria interagenti con contesti particolarmente detensionati ed in frana. Per tali situazioni sono stati pertanto adottati, in accordo a quanto indicato nel DM 2008 al capitolo relativo alla stabilità dei fronti di scavo (Cap. 6.8.6), i fattori riduttivi (M2) riportati nella tabella seguente:

grandezza alla quale applicare il coefficiente	M1	M2
$\tan \phi'$	1	1.25
c'	1	1.25
γ	1	1

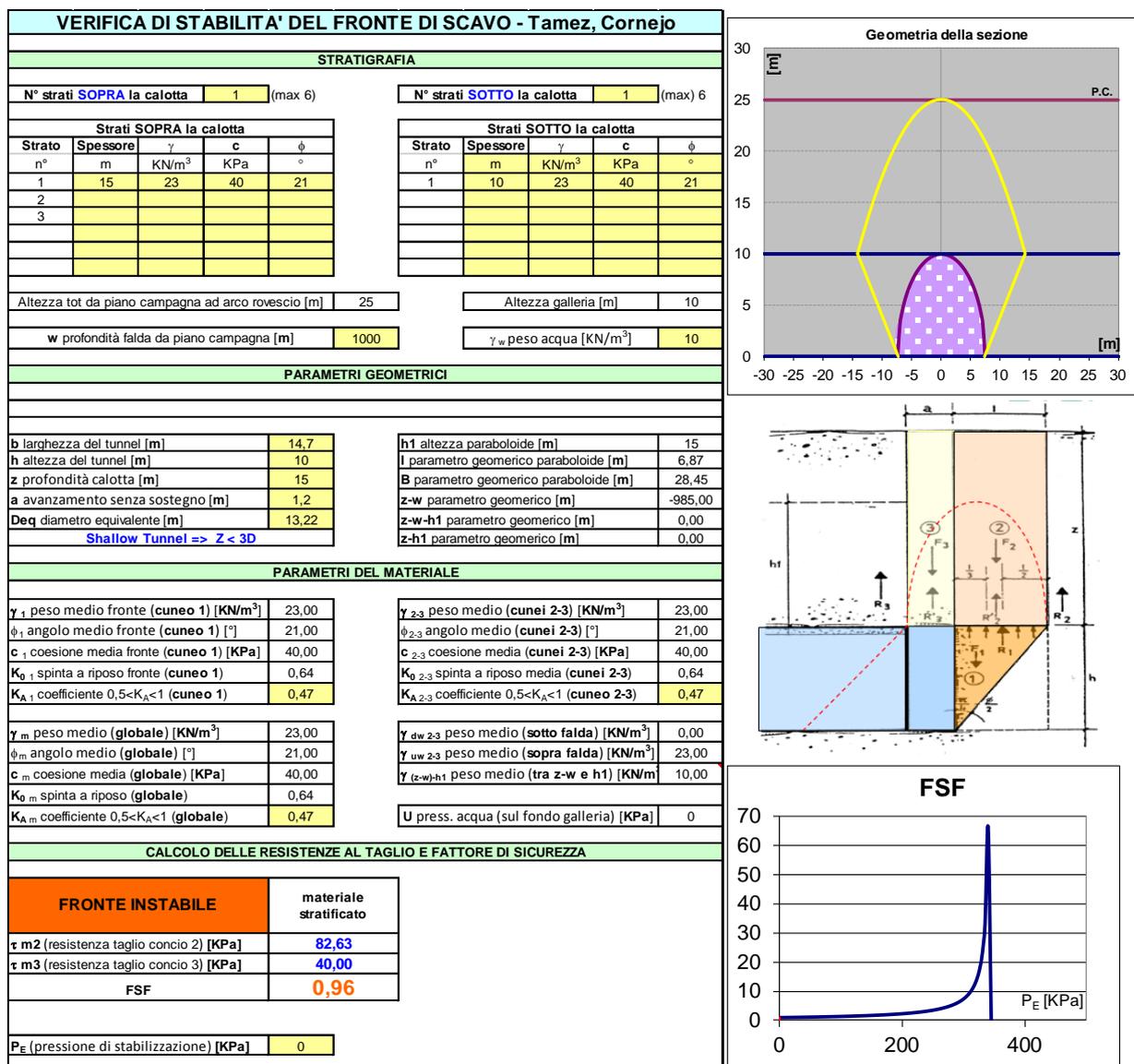
La scheda seguente riporta la verifica di stabilità del fronte in presenza ed in assenza di consolidamenti al fronte ed in corrispondenza della condizioni di calcolo ritenuta più gravosa.

9.1.1 Sezione tipo B2V

La sezione tipo B2V risulta applicata nelle tratte di imbocco della galleria naturale.

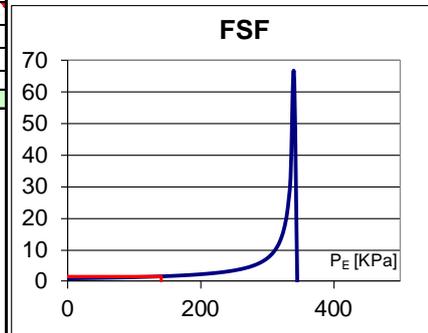
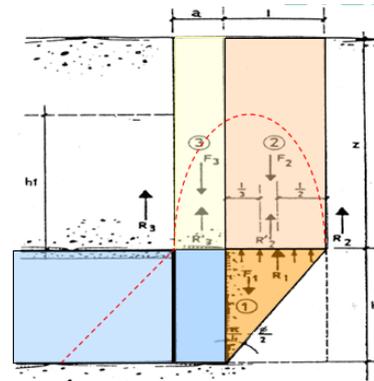
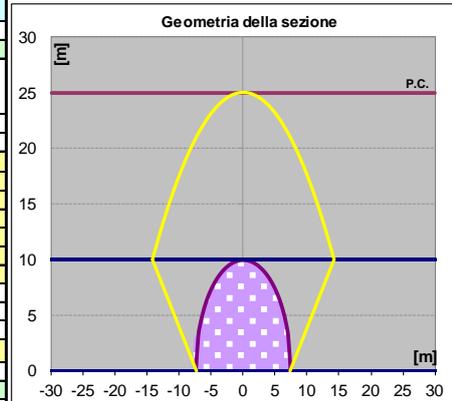
In considerazione dell'interazione di queste sezioni di avanzamento con contesti particolarmente detensionati ed in frana il progetto prevede per tali tratte l'applicazione di sezioni tipo maggiormente consolidate. Il dimensionamento degli elementi di sostegno è stato inoltre effettuato utilizzando dei parametri geotecnici ridotti in accordo con quanto indicato nella colonna M2 della tabella sopra riportata.

Formazione dello Schier



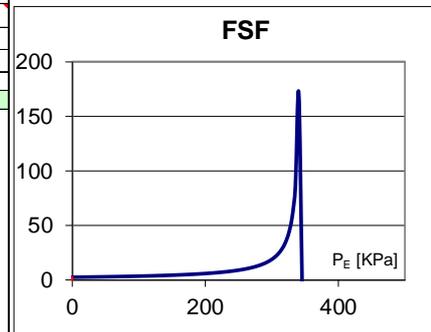
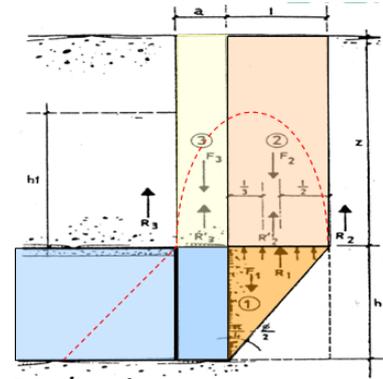
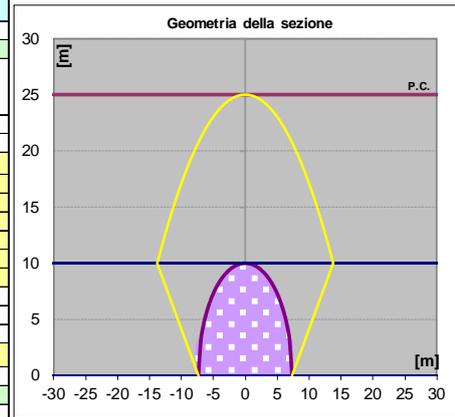
Con l'introduzione di 80 VTR al fronte ed un sistema di consolidamento al contorno costituito da 40 infillaggi si ottiene:

VERIFICA DI STABILITA' DEL FRONTE DI SCAVO - Tamez, Cornejo					
STRATIGRAFIA					
N° strati SOPRA la calotta			N° strati SOTTO la calotta		
1 (max 6)			1 (max 6)		
Strati SOPRA la calotta					
Strato n°	Spessore [m]	γ [KN/m ³]	c [KPa]	ϕ [°]	
1	15	23	40	21	
2					
3					
Strati SOTTO la calotta					
Strato n°	Spessore [m]	γ [KN/m ³]	c [KPa]	ϕ [°]	
1	10	23	40	21	
Altezza tot da piano campagna ad arco rovescio [m] = 25					
Altezza galleria [m] = 10					
w profondità falda da piano campagna [m] = 1000					
γ_w peso acqua [KN/m ³] = 10					
PARAMETRI GEOMETRICI					
b larghezza del tunnel [m] = 14,7					
h altezza del tunnel [m] = 10					
z profondità calotta [m] = 15					
a avanzamento senza sostegno [m] = 1,2					
Deq diametro equivalente [m] = 13,2					
Shallow Tunnel => Z < 3D					
PARAMETRI DEL MATERIALE					
γ_1 peso medio fronte (cuneo 1) [KN/m ³] = 23,00			γ_{2-3} peso medio (cunei 2-3) [KN/m ³] = 23,00		
ϕ_1 angolo medio fronte (cuneo 1) [°] = 21,00			ϕ_{2-3} angolo medio (cunei 2-3) [°] = 21,00		
c ₁ coesione media fronte (cuneo 1) [KPa] = 40,00			c ₂₋₃ coesione media (cunei 2-3) [KPa] = 40,00		
K _{0 1} spinta a riposo fronte (cuneo 1) = 0,64			K _{0 2-3} spinta a riposo media (cunei 2-3) = 0,64		
K _{A 1} coefficiente 0,5 < K _A < 1 (cuneo 1) = 0,47			K _{A 2-3} coefficiente 0,5 < K _A < 1 (cuneo 2-3) = 0,47		
γ_m peso medio (globale) [KN/m ³] = 23,00			$\gamma_{dw 2-3}$ peso medio (sotto falda) [KN/m ³] = 0,00		
ϕ_m angolo medio (globale) [°] = 21,00			$\gamma_{uw 2-3}$ peso medio (sopra falda) [KN/m ³] = 23,00		
c _m coesione media (globale) [KPa] = 40,00			$\gamma_{(z-w)-h1}$ peso medio (tra z-w e h1) [KN/m] = 10,00		
K _{0 m} spinta a riposo (globale) = 0,64			U press. acqua (sul fondo galleria) [KPa] = 0		
K _{A m} coefficiente 0,5 < K _A < 1 (globale) = 0,47					
CALCOLO DELLE RESISTENZE AL TAGLIO E FATTORE DI SICUREZZA					
FRONTE STABILE		materiale stratificato			
τ_{m2} (resistenza taglio concio 2) [KPa]		82,63			
τ_{m3} (resistenza taglio concio 3) [KPa]		40,00			
FSF		1,62			
P _E (pressione di stabilizzazione) [KPa]		141			

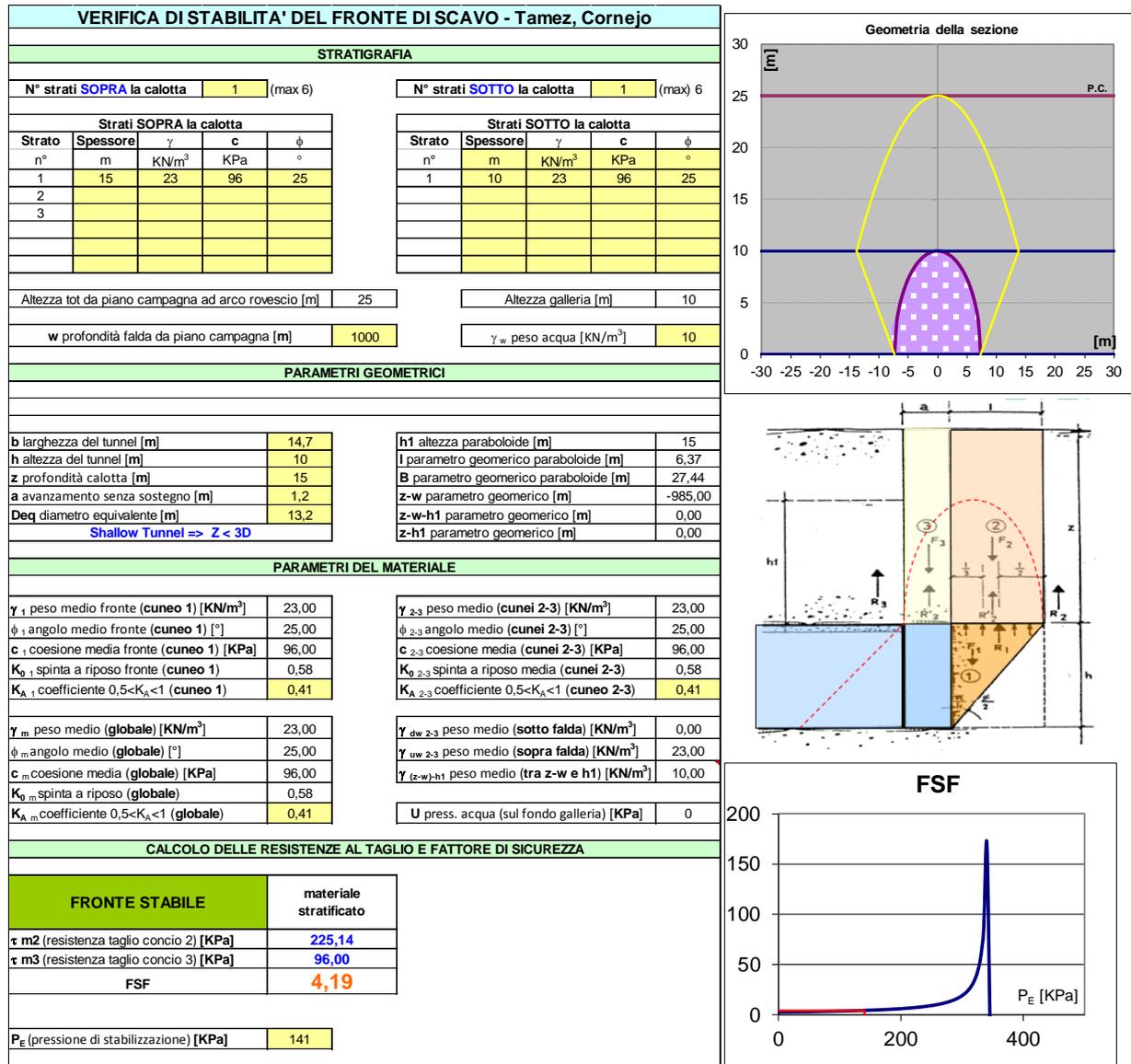


Formazione di Camerino

VERIFICA DI STABILITA' DEL FRONTE DI SCAVO - Tamez, Cornejo					
STRATIGRAFIA					
N° strati SOPRA la calotta			N° strati SOTTO la calotta		
1 (max 6)			1 (max 6)		
Strati SOPRA la calotta					
Strato	Spessore	γ	c	ϕ	
n°	m	KN/m ³	KPa	°	
1	15	23	96	25	
2					
3					
Strati SOTTO la calotta					
Strato	Spessore	γ	c	ϕ	
n°	m	KN/m ³	KPa	°	
1	10	23	96	25	
Altezza tot da piano campagna ad arco rovescio [m] = 25					
Altezza galleria [m] = 10					
w profondità falda da piano campagna [m] = 1000					
γ_w peso acqua [KN/m ³] = 10					
PARAMETRI GEOMETRICI					
b larghezza del tunnel [m] = 14,7					
h1 altezza paraboloide [m] = 15					
h altezza del tunnel [m] = 10					
l parametro geometrico paraboloide [m] = 6,37					
B parametro geometrico paraboloide [m] = 27,44					
z profondità calotta [m] = 15					
z-w parametro geometrico [m] = -985,00					
a avanzamento senza sostegno [m] = 1,2					
z-w-h1 parametro geometrico [m] = 0,00					
Deq diametro equivalente [m] = 13,22					
z-h1 parametro geometrico [m] = 0,00					
PARAMETRI DEL MATERIALE					
γ_1 peso medio fronte (cuneo 1) [KN/m ³] = 23,00					
γ_{2-3} peso medio (cunei 2-3) [KN/m ³] = 23,00					
ϕ_1 angolo medio fronte (cuneo 1) [°] = 25,00					
ϕ_{2-3} angolo medio (cunei 2-3) [°] = 25,00					
c ₁ coesione media fronte (cuneo 1) [KPa] = 96,00					
c ₂₋₃ coesione media (cunei 2-3) [KPa] = 96,00					
K _{0 1} spinta a riposo fronte (cuneo 1) = 0,58					
K _{0 2-3} spinta a riposo media (cunei 2-3) = 0,58					
K _{A 1} coefficiente 0,5<K _A <1 (cuneo 1) = 0,41					
K _{A 2-3} coefficiente 0,5<K _A <1 (cuneo 2-3) = 0,41					
γ_m peso medio (globale) [KN/m ³] = 23,00					
$\gamma_{dw 2-3}$ peso medio (sotto falda) [KN/m ³] = 0,00					
ϕ_m angolo medio (globale) [°] = 25,00					
$\gamma_{uw 2-3}$ peso medio (sopra falda) [KN/m ³] = 23,00					
c _m coesione media (globale) [KPa] = 96,00					
$\gamma_{(z-w)-h1}$ peso medio (tra z-w e h1) [KN/m ³] = 10,00					
K _{0 m} spinta a riposo (globale) = 0,58					
K _{A m} coefficiente 0,5<K _A <1 (globale) = 0,41					
U press. acqua (sul fondo galleria) [KPa] = 0					
CALCOLO DELLE RESISTENZE AL TAGLIO E FATTORE DI SICUREZZA					
FRONTE STABILE		materiale stratificato			
τ_{m2} (resistenza taglio concio 2) [KPa]		225,14			
τ_{m3} (resistenza taglio concio 3) [KPa]		96,00			
FSF		2,48			
P _E (pressione di stabilizzazione) [KPa]		0			

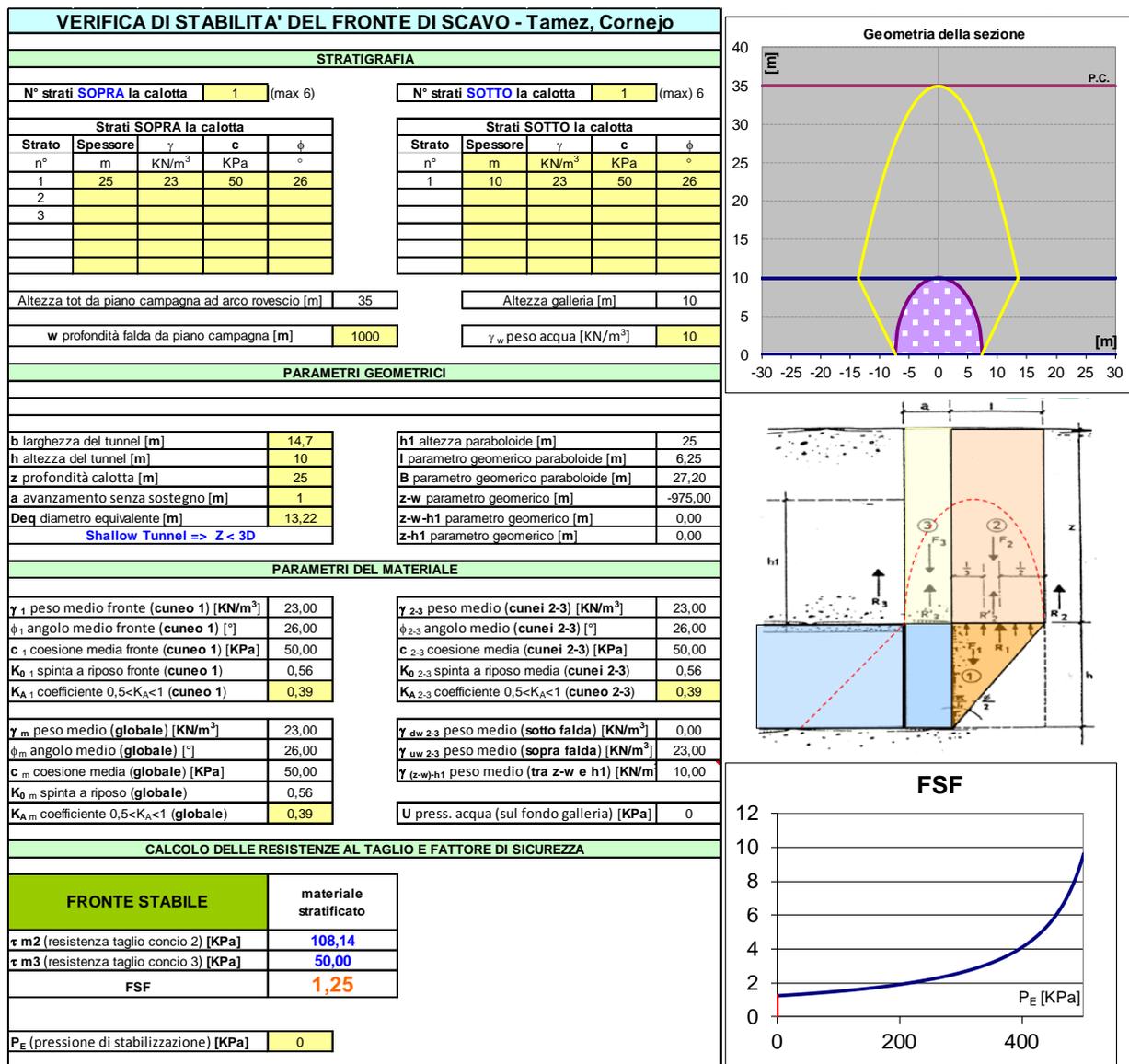


Con l'introduzione di 80 VTR al fronte ed un sistema di consolidamento al contorno costituito da 40 infillaggi si ottiene:



9.1.2 Sezione tipo B0V

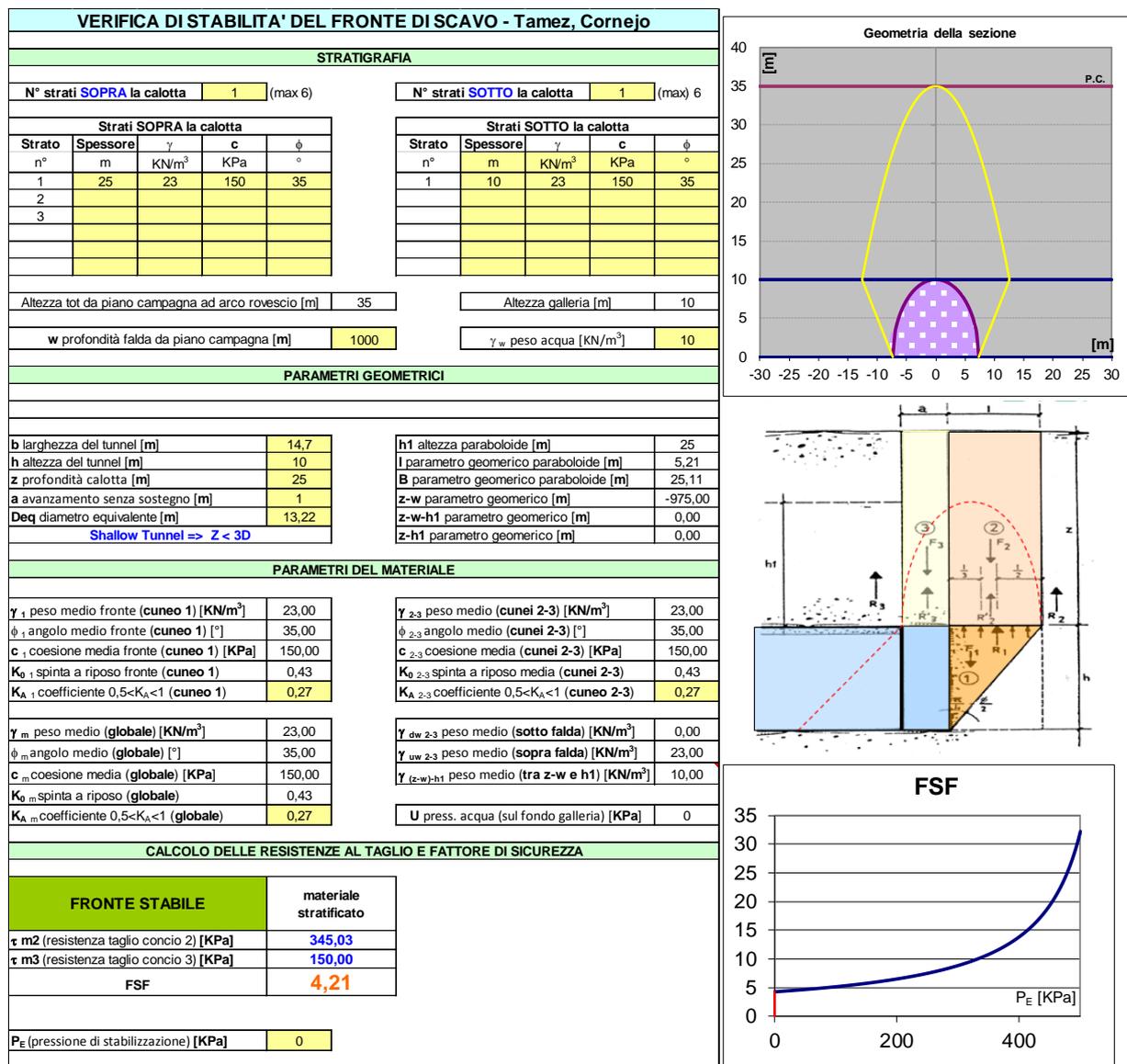
La sezione tipo B0V è applicata nella tratta successiva a quelle dell'imbocco Sud e per un intervallo di coperture comprese tra 15 e 25 m. La figura seguente riporta la verifica di stabilità del fronte che evidenzia come il fattore di sicurezza nei confronti dei fenomeni di rottura sia pari a 1.25 in assenza di interventi di consolidamento al fronte. Si precisa che i parametri di resistenza non sono stati ridotti secondo la norma.



9.1.3 Sezione tipo B2

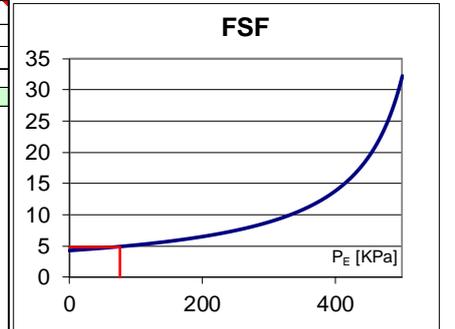
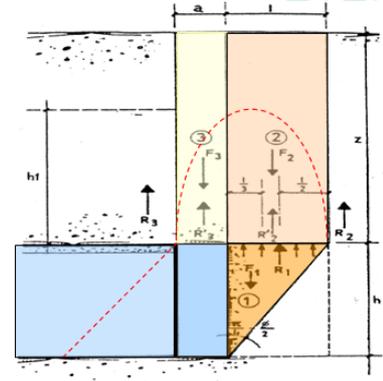
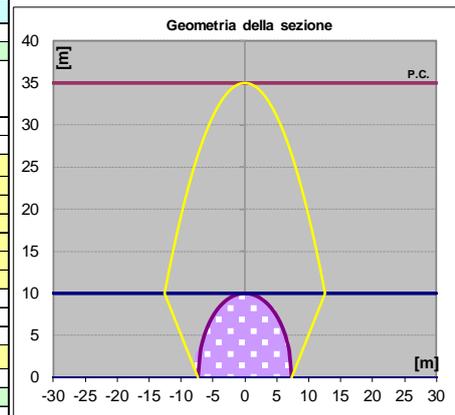
La sezione tipo B2 è applicata nella tratta successiva a quelle dell'imbocco Nord e per un intervallo di coperture comprese tra 15 e 25 m. La figura seguente riporta la verifica di stabilità del fronte che evidenzia come il fattore di sicurezza nei confronti dei fenomeni di rottura sia pari a 1.25 in assenza di interventi di consolidamento al fronte. Si precisa che i parametri di resistenza non sono stati ridotti secondo la norma.

Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza massimi



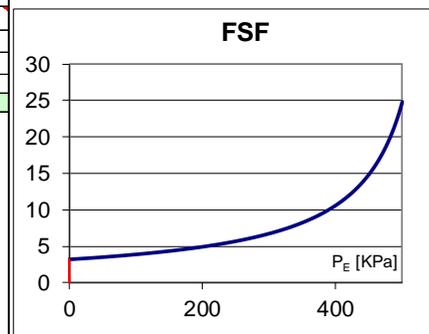
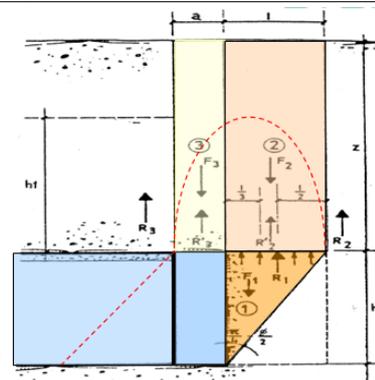
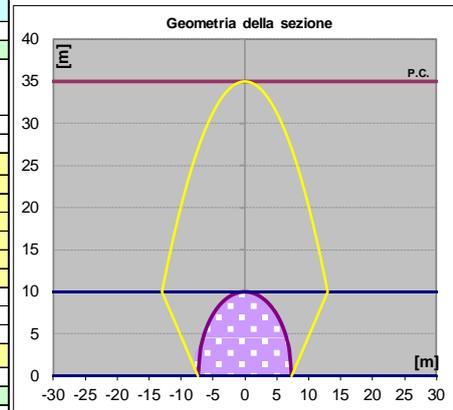
Con l'introduzione di 50 VTR al fronte con sovrapposizione pari a 4 m si ottiene:

VERIFICA DI STABILITA' DEL FRONTE DI SCAVO - Tamez, Cornejo					
STRATIGRAFIA					
N° strati SOPRA la calotta			N° strati SOTTO la calotta		
1 (max 6)			1 (max 6)		
Strati SOPRA la calotta					
Strato	Spessore	γ	c	ϕ	
n°	m	KN/m ³	KPa	°	
1	25	23	150	35	
2					
3					
Strati SOTTO la calotta					
Strato	Spessore	γ	c	ϕ	
n°	m	KN/m ³	KPa	°	
1	10	23	150	35	
Altezza tot da piano campagna ad arco rovescio [m] 35					
Altezza galleria [m] 10					
w profondità falda da piano campagna [m] 1000					
γ_w peso acqua [KN/m ³] 10					
PARAMETRI GEOMETRICI					
b larghezza del tunnel [m] 14,7					
h altezza del tunnel [m] 10					
z profondità calotta [m] 25					
a avanzamento senza sostegno [m] 1					
Deq diametro equivalente [m] 13,2					
Shallow Tunnel => $Z < 3D$					
PARAMETRI DEL MATERIALE					
γ_1 peso medio fronte (cuneo 1) [KN/m ³] 23,00			γ_{2-3} peso medio (cunei 2-3) [KN/m ³] 23,00		
ϕ_1 angolo medio fronte (cuneo 1) [°] 35,00			ϕ_{2-3} angolo medio (cunei 2-3) [°] 35,00		
c ₁ coesione media fronte (cuneo 1) [KPa] 150,00			c ₂₋₃ coesione media (cunei 2-3) [KPa] 150,00		
K _{0 1} spinta a riposo fronte (cuneo 1) 0,43			K _{0 2-3} spinta a riposo media (cunei 2-3) 0,43		
K _{A 1} coefficiente 0,5<K _A <1 (cuneo 1) 0,27			K _{A 2-3} coefficiente 0,5<K _A <1 (cuneo 2-3) 0,27		
γ_m peso medio (globale) [KN/m ³] 23,00			$\gamma_{dw 2-3}$ peso medio (sotto falda) [KN/m ³] 0,00		
ϕ_m angolo medio (globale) [°] 35,00			$\gamma_{uw 2-3}$ peso medio (sopra falda) [KN/m ³] 23,00		
c _m coesione media (globale) [KPa] 150,00			$\gamma_{(z-w)h1}$ peso medio (tra z-w e h1) [KN/m ³] 10,00		
K _{0 m} spinta a riposo (globale) 0,43			U press. acqua (sul fondo galleria) [KPa] 0		
K _{A m} coefficiente 0,5<K _A <1 (globale) 0,27					
CALCOLO DELLE RESISTENZE AL TAGLIO E FATTORE DI SICUREZZA					
FRONTE STABILE		materiale stratificato			
τ_{m2} (resistenza taglio concio 2) [KPa]		345,03			
τ_{m3} (resistenza taglio concio 3) [KPa]		150,00			
FSF		4,85			
P _E (pressione di stabilizzazione) [KPa]		75			



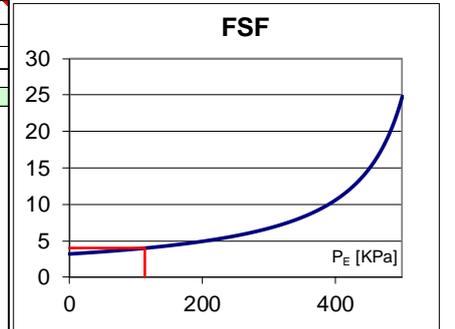
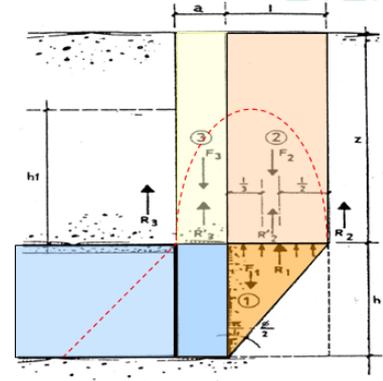
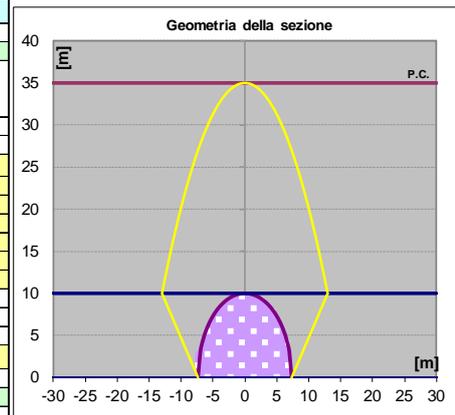
Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza minimi

VERIFICA DI STABILITA' DEL FRONTE DI SCAVO - Tamez, Cornejo					
STRATIGRAFIA					
N° strati SOPRA la calotta			N° strati SOTTO la calotta		
1 (max 6)			1 (max 6)		
Strati SOPRA la calotta					
Strato	Spessore	γ	c	ϕ	
n°	m	KN/m ³	KPa	°	
1	25	23	120	31	
2					
3					
Strati SOTTO la calotta					
Strato	Spessore	γ	c	ϕ	
n°	m	KN/m ³	KPa	°	
1	10	23	120	31	
Altezza tot da piano campagna ad arco rovescio [m]		35		Altezza galleria [m]	
w profondità falda da piano campagna [m]		1000		γ_w peso acqua [KN/m ³]	
				10	
PARAMETRI GEOMETRICI					
b larghezza del tunnel [m]					
14,7					
h1 altezza del tunnel [m]					
10					
z profondità calotta [m]					
25					
a avanzamento senza sostegno [m]					
1					
Deq diametro equivalente [m]					
13,22					
Shallow Tunnel => Z < 3D					
PARAMETRI DEL MATERIALE					
γ_1 peso medio fronte (cuneo 1) [KN/m ³]		23,00		γ_{2-3} peso medio (cunei 2-3) [KN/m ³]	
ϕ_1 angolo medio fronte (cuneo 1) [°]		31,00		ϕ_{2-3} angolo medio (cunei 2-3) [°]	
c_1 coesione media fronte (cuneo 1) [KPa]		120,00		c_{2-3} coesione media (cunei 2-3) [KPa]	
K_{ϕ_1} spinta a riposo fronte (cuneo 1)		0,48		$K_{\phi_{2-3}}$ spinta a riposo media (cunei 2-3)	
K_{A_1} coefficiente 0,5 < K_A < 1 (cuneo 1)		0,32		$K_{A_{2-3}}$ coefficiente 0,5 < K_A < 1 (cuneo 2-3)	
γ_m peso medio (globale) [KN/m ³]		23,00		γ_{dw-2-3} peso medio (sotto falda) [KN/m ³]	
ϕ_m angolo medio (globale) [°]		31,00		γ_{uw-2-3} peso medio (sopra falda) [KN/m ³]	
c_m coesione media (globale) [KPa]		120,00		$\gamma_{(z-w)-h1}$ peso medio (tra z-w e h1) [KN/m ³]	
K_{ϕ_m} spinta a riposo (globale)		0,48		U press. acqua (sul fondo galleria) [KPa]	
K_{A_m} coefficiente 0,5 < K_A < 1 (globale)		0,32		0	
CALCOLO DELLE RESISTENZE AL TAGLIO E FATTORE DI SICUREZZA					
FRONTE STABILE		materiale stratificato			
τ_{m2} (resistenza taglio concio 2) [KPa]		279,10			
τ_{m3} (resistenza taglio concio 3) [KPa]		120,00			
FSF		3,24			
P_E (pressione di stabilizzazione) [KPa]		0			



Con l'introduzione di 50 VTR al fronte con sovrapposizione pari a 6 m si ottiene:

VERIFICA DI STABILITA' DEL FRONTE DI SCAVO - Tamez, Cornejo					
STRATIGRAFIA					
N° strati SOPRA la calotta			N° strati SOTTO la calotta		
1 (max 6)			1 (max 6)		
Strati SOPRA la calotta					
Strato	Spessore	γ	c	ϕ	
n°	m	KN/m ³	KPa	°	
1	25	23	120	31	
2					
3					
Strati SOTTO la calotta					
Strato	Spessore	γ	c	ϕ	
n°	m	KN/m ³	KPa	°	
1	10	23	120	31	
Altezza tot da piano campagna ad arco rovescio [m] 35					
Altezza galleria [m] 10					
w profondità falda da piano campagna [m] 1000					
γ_w peso acqua [KN/m ³] 10					
PARAMETRI GEOMETRICI					
b larghezza del tunnel [m] 14,7					
h altezza del tunnel [m] 10					
z profondità calotta [m] 25					
a avanzamento senza sostegno [m] 1					
Deq diametro equivalente [m] 13,2					
Shallow Tunnel => $Z < 3D$					
PARAMETRI DEL MATERIALE					
γ_1 peso medio fronte (cuneo 1) [KN/m ³] 23,00			γ_{2-3} peso medio (cunei 2-3) [KN/m ³] 23,00		
ϕ_1 angolo medio fronte (cuneo 1) [°] 31,00			ϕ_{2-3} angolo medio (cunei 2-3) [°] 31,00		
c ₁ coesione media fronte (cuneo 1) [KPa] 120,00			c ₂₋₃ coesione media (cunei 2-3) [KPa] 120,00		
K _{0 1} spinta a riposo fronte (cuneo 1) 0,48			K _{0 2-3} spinta a riposo media (cunei 2-3) 0,48		
K _{A 1} coefficiente 0,5 < K _A < 1 (cuneo 1) 0,32			K _{A 2-3} coefficiente 0,5 < K _A < 1 (cuneo 2-3) 0,32		
γ_m peso medio (globale) [KN/m ³] 23,00			$\gamma_{dw 2-3}$ peso medio (sotto falda) [KN/m ³] 0,00		
ϕ_m angolo medio (globale) [°] 31,00			$\gamma_{uw 2-3}$ peso medio (sopra falda) [KN/m ³] 23,00		
c _m coesione media (globale) [KPa] 120,00			$\gamma_{(z-w)h1}$ peso medio (tra z-w e h1) [KN/m ³] 10,00		
K _{0 m} spinta a riposo (globale) 0,48			U press. acqua (sul fondo galleria) [KPa] 0		
K _{A m} coefficiente 0,5 < K _A < 1 (globale) 0,32					
CALCOLO DELLE RESISTENZE AL TAGLIO E FATTORE DI SICUREZZA					
FRONTE STABILE		materiale stratificato			
τ_{m2} (resistenza taglio concio 2) [KPa]		279,10			
τ_{m3} (resistenza taglio concio 3) [KPa]		120,00			
FSF		4,03			
P _E (pressione di stabilizzazione) [KPa]		113			



9.1.4 Tabella di sintesi dei risultati

Formazione di calcolo	Copertura di calcolo (m)	Sezione tipo	Parametri di calcolo		FSF assenza Vtr	FSF Presenza VTR	Nvtr	L sovrapp	N infilaggi
			c' (kPa)	φ' (°)					
Schlier	15	B2V	40	21	0,96	1,62	80	10	40
Camerino	15	B2V	96	25	2,48	4,19	80	10	40
Schlier	25	B0V	50	26	1,25	-	-	-	40
Camerino	25	B2	150	35	4,21	4,85	50	4	-
Camerino	25	B2	120	31	3,24	4,03	50	6	-

9.1.5 Verifica degli infilaggi al contorno

Nel seguito si riporta la verifica effettuata nei confronti della rottura strutturale degli infilaggi.

DIMENSIONAMENTO INFILAGGI		
$L = \delta + a + \lambda$	1,2	
δ	1,2	interasse centine [m]
a	0	distanza centina fronte [m]
λ	0	lunghezza fittizia immersione (0.5 - 0.7 m)
$q = P_i$	129,375	carico agente su tubo metallico [kPa]
$P = 0.75 P_v$	431,25	[kPa]
$P_v = \gamma H$	575	[kPa]
γ	23	densità [kN/m ³]
H	25	Altezza terreno [m]
i	0,3	interasse tra i tubi [m]
M_{max} di progetto ($\gamma_a = 1.3$ - DM 2008)	20,1825	Momento massimo [kNm]
$W = 3.14 * (Rest^4 - Rin^4) / 4Rest$	8,42692E-05	Momento resistente tubo
ϕ_{est}	0,1397	[m]
Rest	0,0699	Raggio esterno tubo [m]
spessore	0,0063	Spessore tubo [m]
Rin	0,0636	Raggio interno tubo [m]
σ_{max}	239,5002139	MPa
tensione caratteristica a snervamento dell'acciaio	338	Mpa
Condizione di verifica	VERIFICA	

9.2 Copertura con $25 < H < 50\text{m}$

Nella tratta di medie coperture si è esaminata la stabilità del fronte di scavo attraverso le linee caratteristiche. In tali situazioni di calcolo si definisce la condizioni di stabilità del fronte in funzione del rapporto tra lo spostamento radiale sul fronte (u_f) ed il raggio della galleria (R_0). In particolare, le categorie ADECO - RS sono state definite secondo quanto indicato nella tabella seguente:

u_f/R_0	Categoria ADECO - RS
[%]	[-]
< 0.5	A – Fronte Stabile
0.5 – 1.1	B – Fronte stabile a Breve Termine
> 1.1	C – Fronte instabile

Le formazioni incluse nella tratta di copertura tra 25 e 50 m sono:

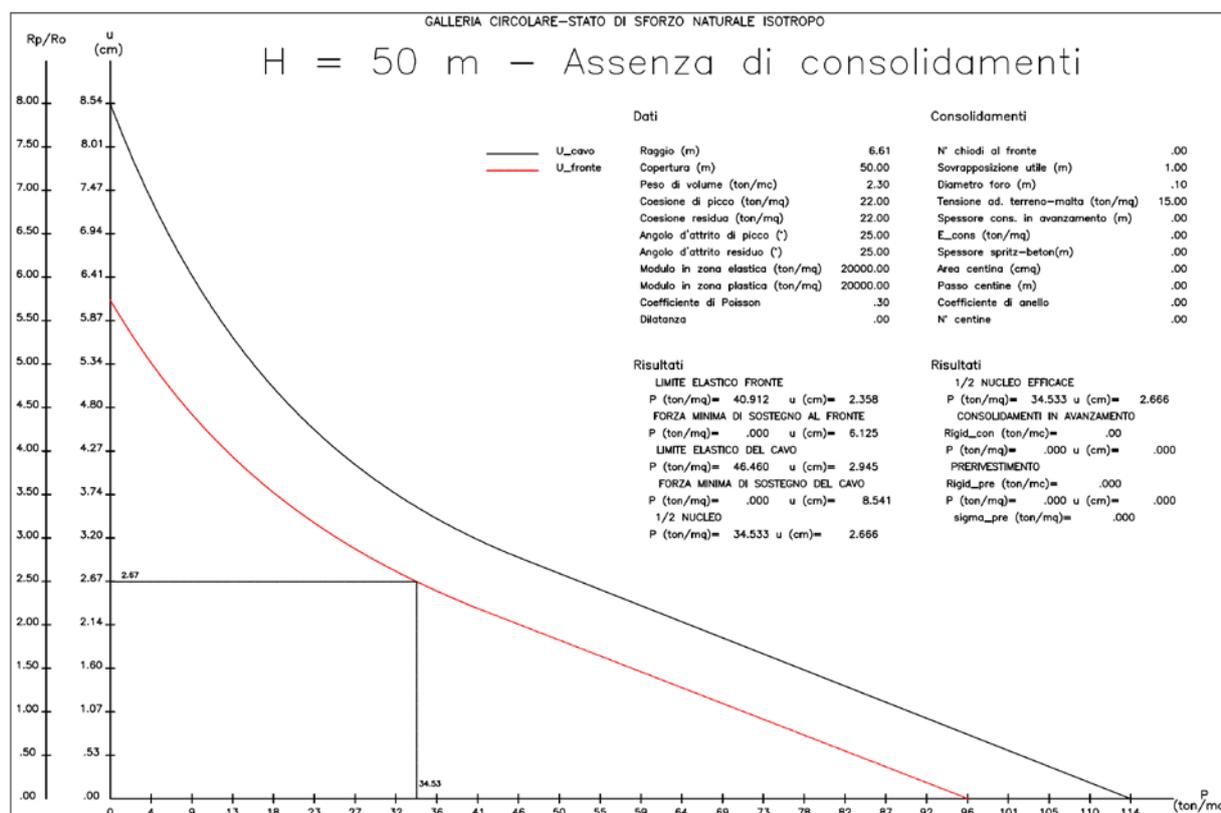
- Formazione di Camerino (Associazione Pelitica - Arenacea)
- Formazione dello Schlier (Marne argillose - siltose)

9.2.1 Sezione tipo B0 – Parametri di resistenza minimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo degli elementi di consolidamento al fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B0	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	220
	φ'	[°]	25 – 30	25
	E	[MPa]	200	200
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica della sezione tipo B0 applicata nelle formazioni di Camerino e dello Schlier è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 50 m.



La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

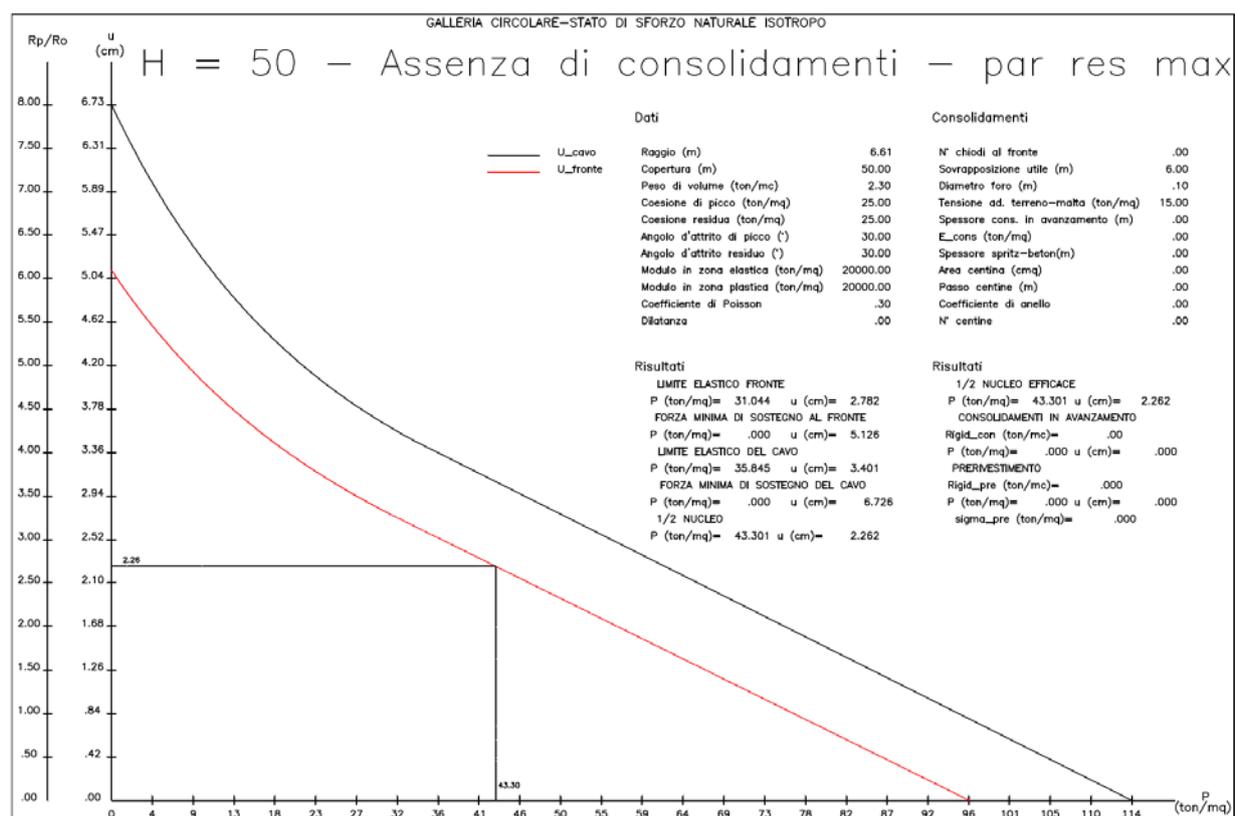
Condizione di verifica	u_t/R_0 [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.40 %	A – Fronte stabile

9.2.2 Sezione tipo B0 – Parametri di resistenza massimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo degli elementi di consolidamento al fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B0	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	250
	φ'	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	200	200
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica della sezione tipo B0 applicata nelle formazioni di Camerino e dello Schlier è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 50 m.



La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

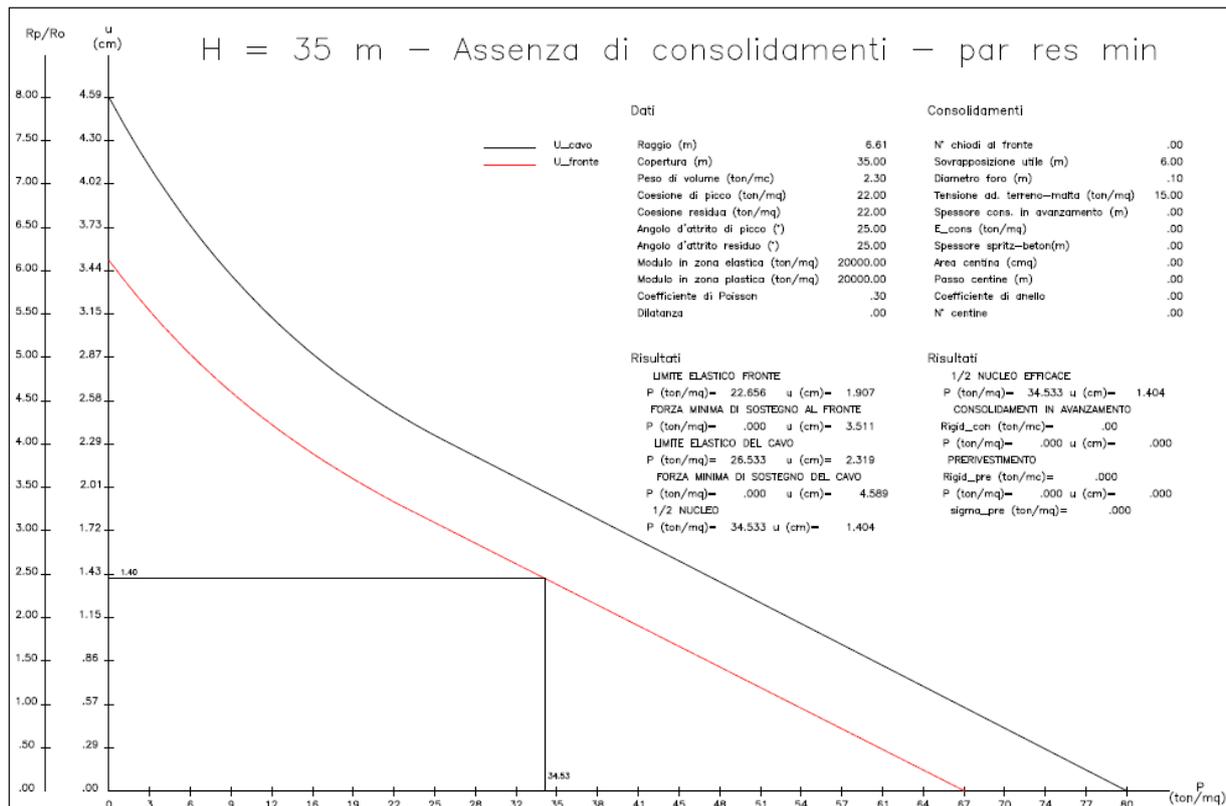
Condizione di verifica	u_t/R_0 [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.34 %	A – Fronte stabile

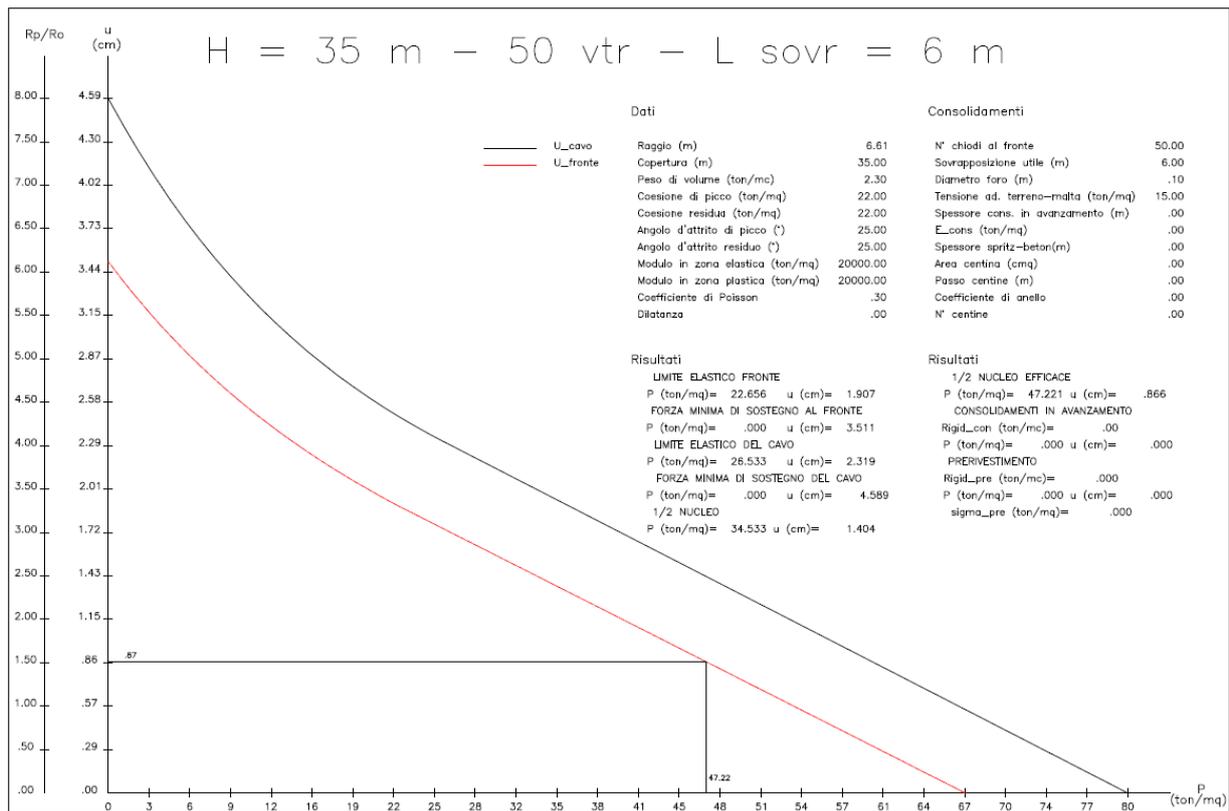
9.2.3 Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza minimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo degli elementi di consolidamento al fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B0	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	220
	φ'	[°]	25 – 30	25
	E	[MPa]	200	200
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica della sezione tipo B2 applicata nella formazione di Camerino è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 35 m.





La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

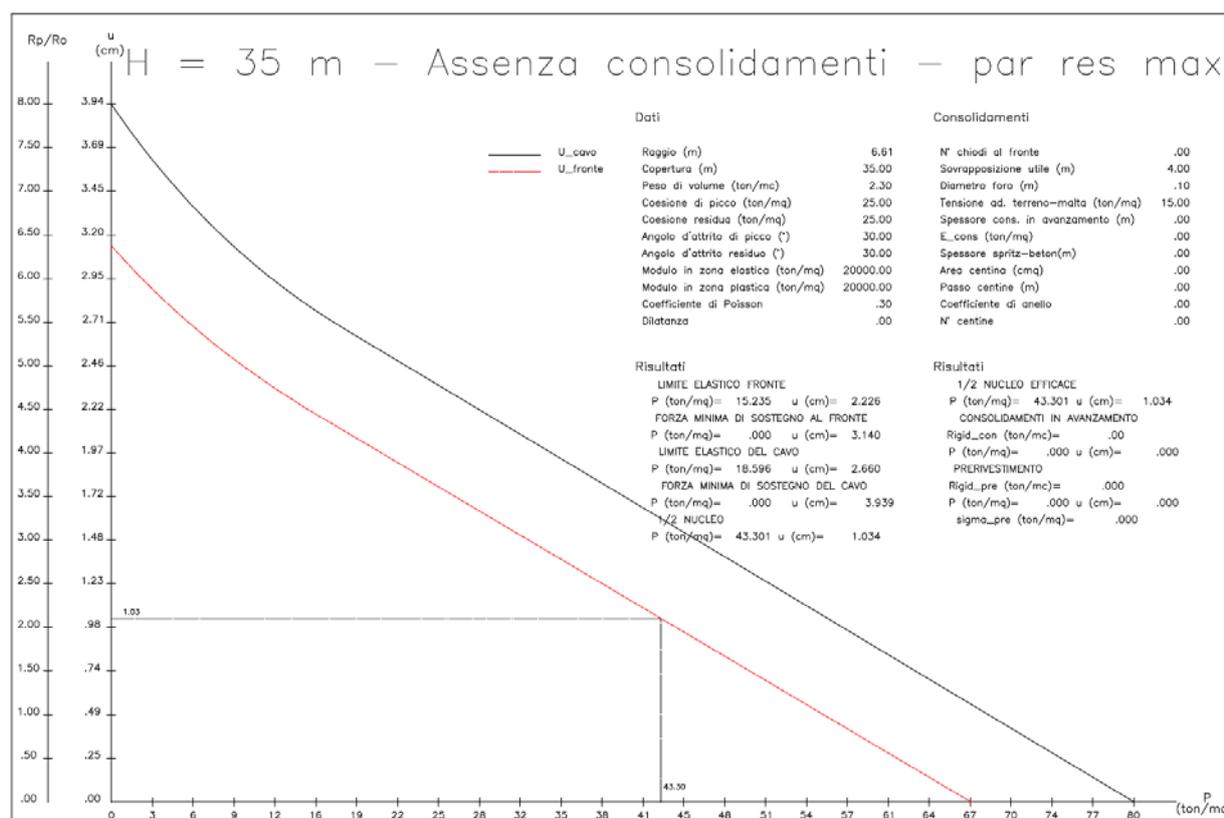
Condizione di verifica	u_f/R_0 [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.21 %	A – Fronte stabile
50 VTR Lsovrapp = 6	0.13 %	A – Fronte stabile

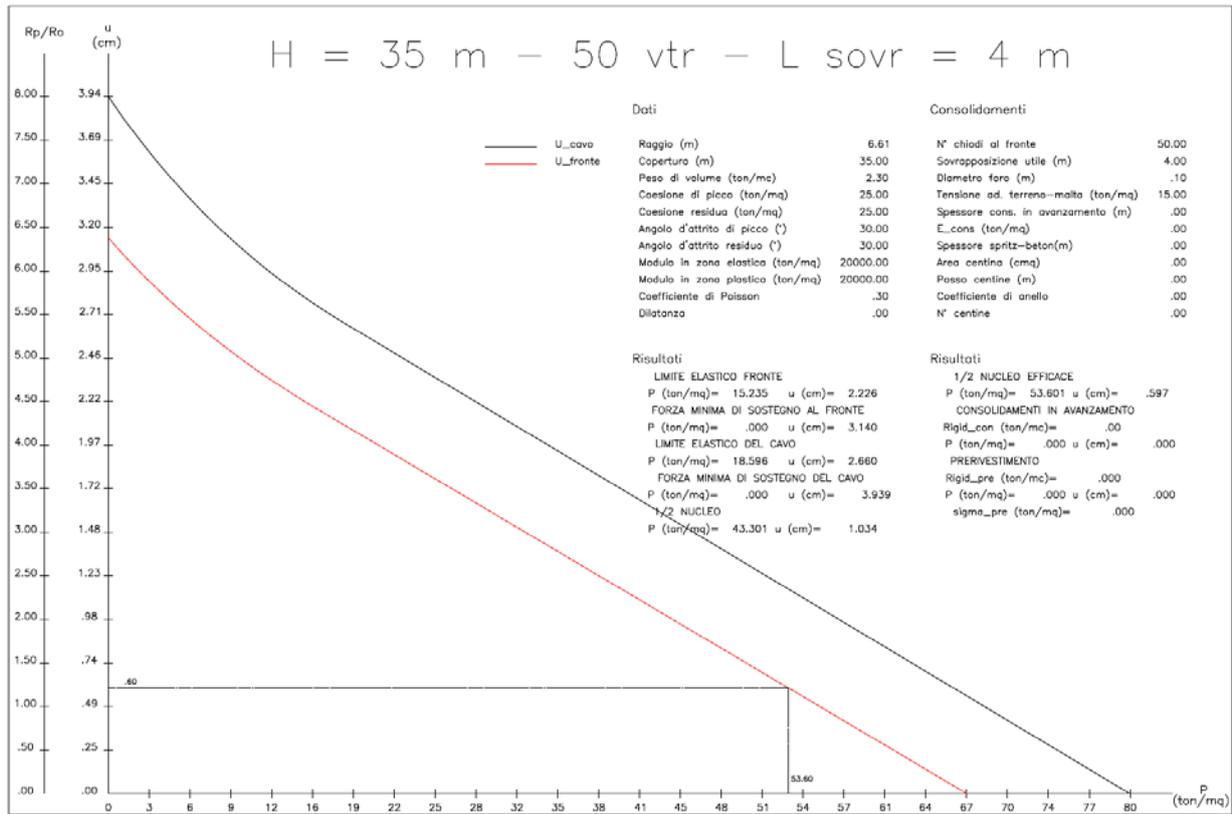
9.2.4 Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza massimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo degli elementi di consolidamento al fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B0	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	250
	φ'	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	200	200
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica della sezione tipo B2 applicata nella formazione di Camerino è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 35 m.





La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

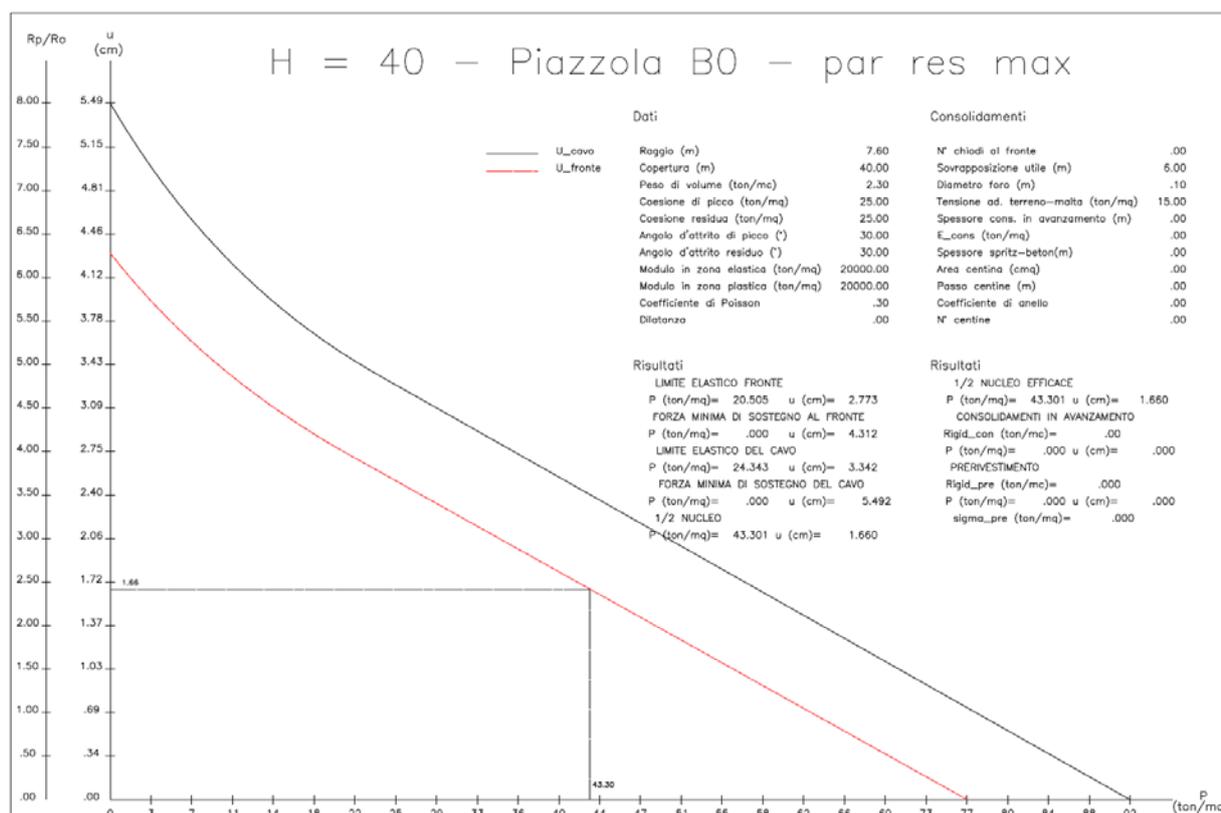
Condizione di verifica	u_f/R_0 [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.15 %	A – Fronte stabile
50 VTR Lsovrapp = 4	0.09 %	A – Fronte stabile

9.2.5 Sezione tipo Piazzola B0 – Formazione di Camerino

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo degli elementi di consolidamento al fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B0	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	250
	φ'	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	200	200
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica della sezione tipo Piazzola B0 applicata nella formazione di Camerino è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 40 m.



La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

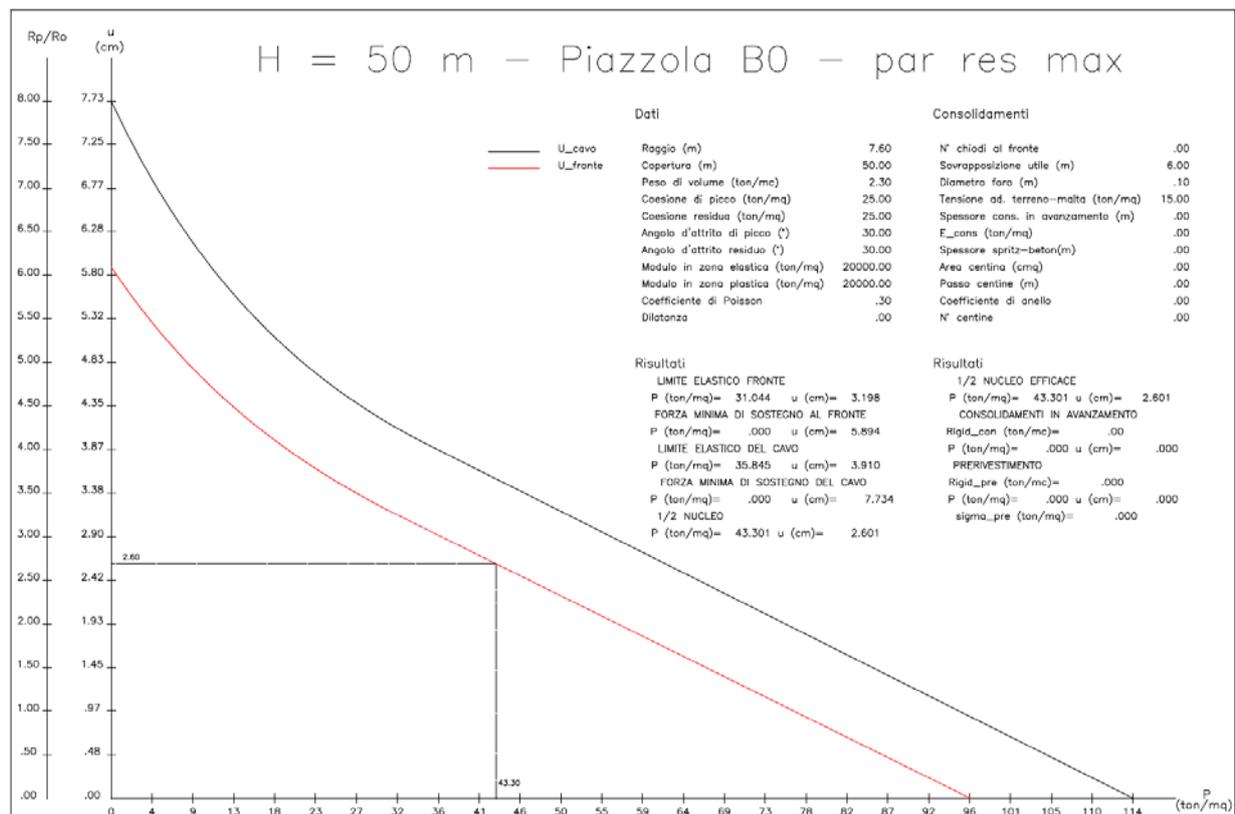
Condizione di verifica	u_f/R_0 [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.22 %	A – Fronte stabile

9.2.6 Sezione tipo Piazzola B0 – Formazione dello Schlier

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo degli elementi di consolidamento al fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B0	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	250
	φ'	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	200	200
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica della sezione tipo Piazzola B0 applicata nella formazione dello Schlier è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 50 m.



La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

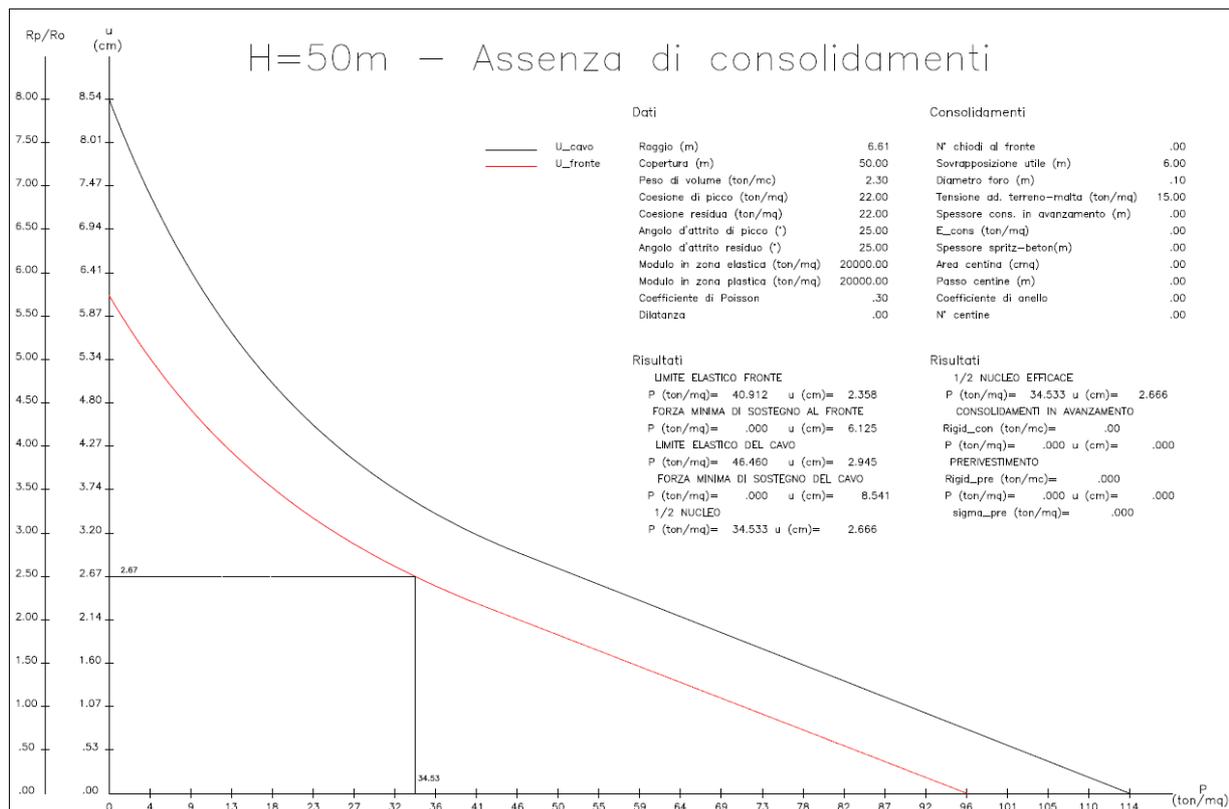
Condizione di verifica	u_f/R_0 [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.34 %	A – Fronte stabile

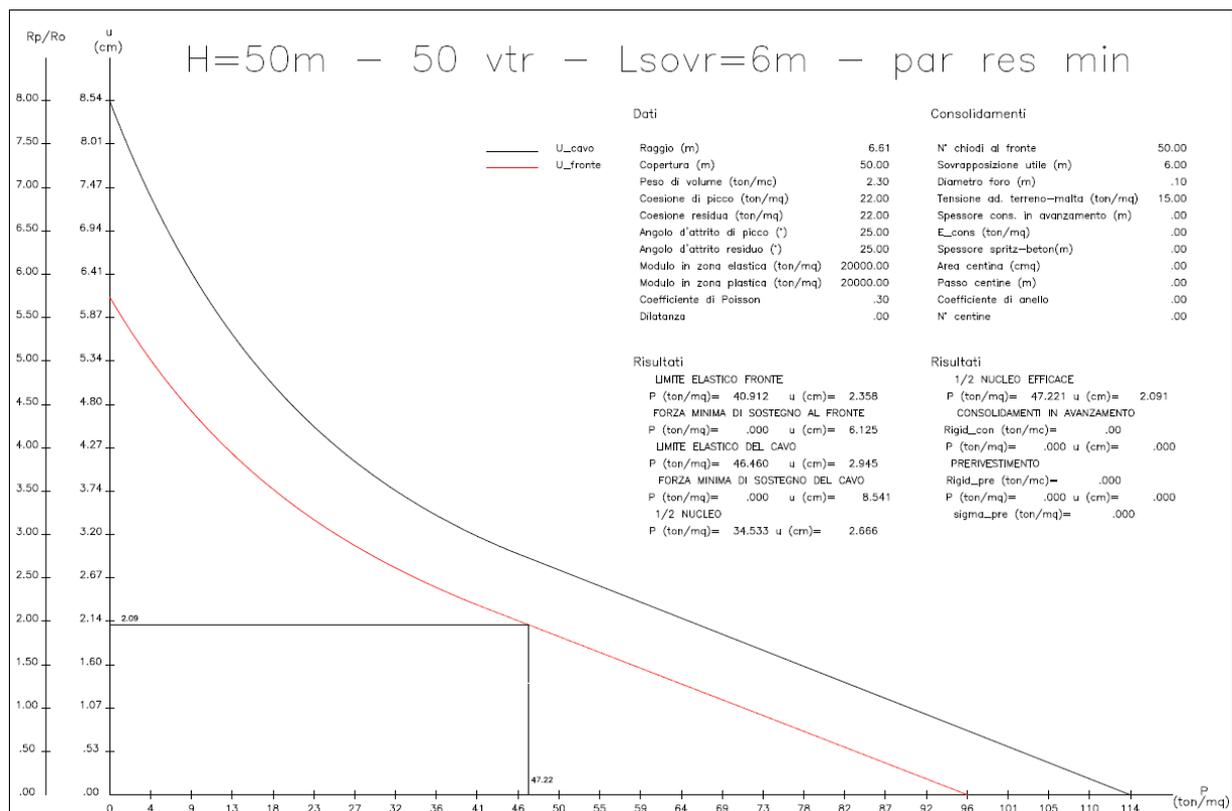
9.2.7 Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza minimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo degli elementi di consolidamento al fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B0	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	220
	φ'	[°]	25 – 30	25
	E	[MPa]	200	200
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica della sezione tipo B2 applicata nella formazione di Camerino è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 50 m.





La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

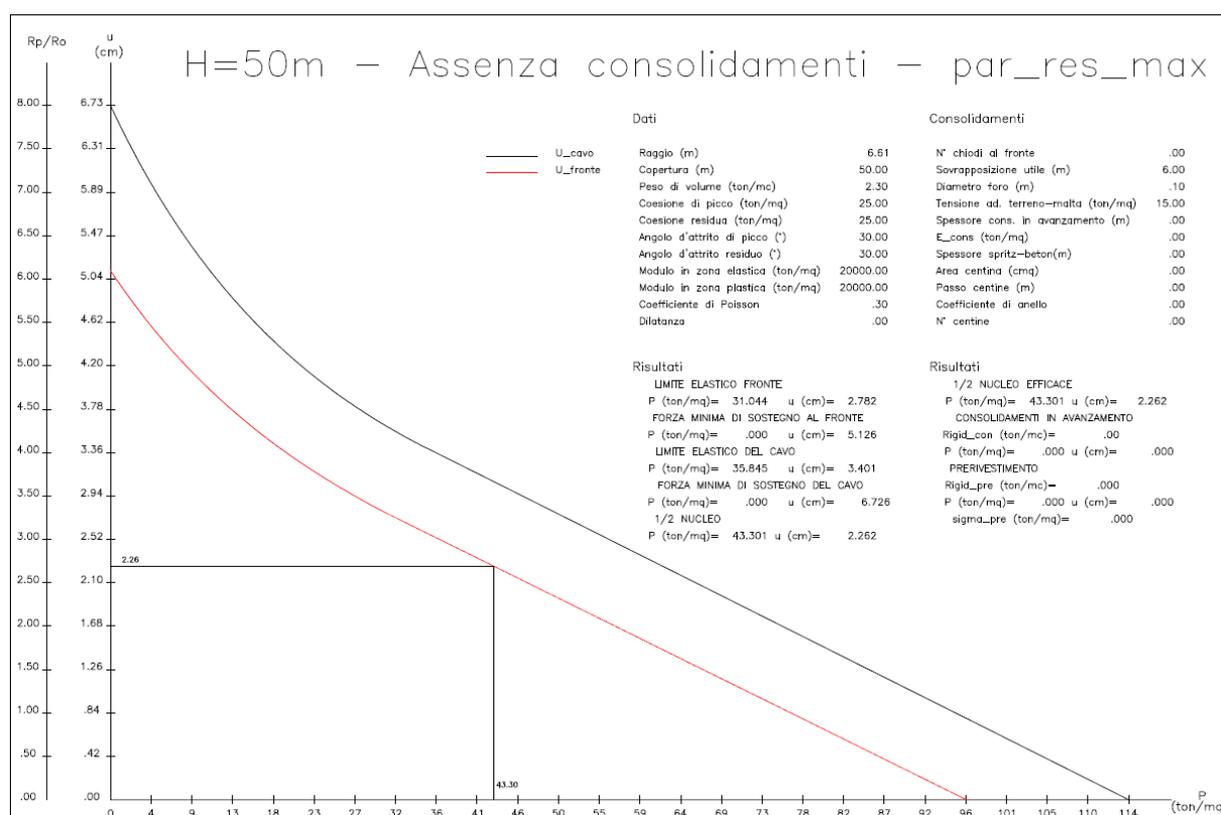
Condizione di verifica	u_f/R_0 [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.40 %	A – Fronte stabile
50 VTR Lsovrapp = 6	0.31 %	A – Fronte stabile

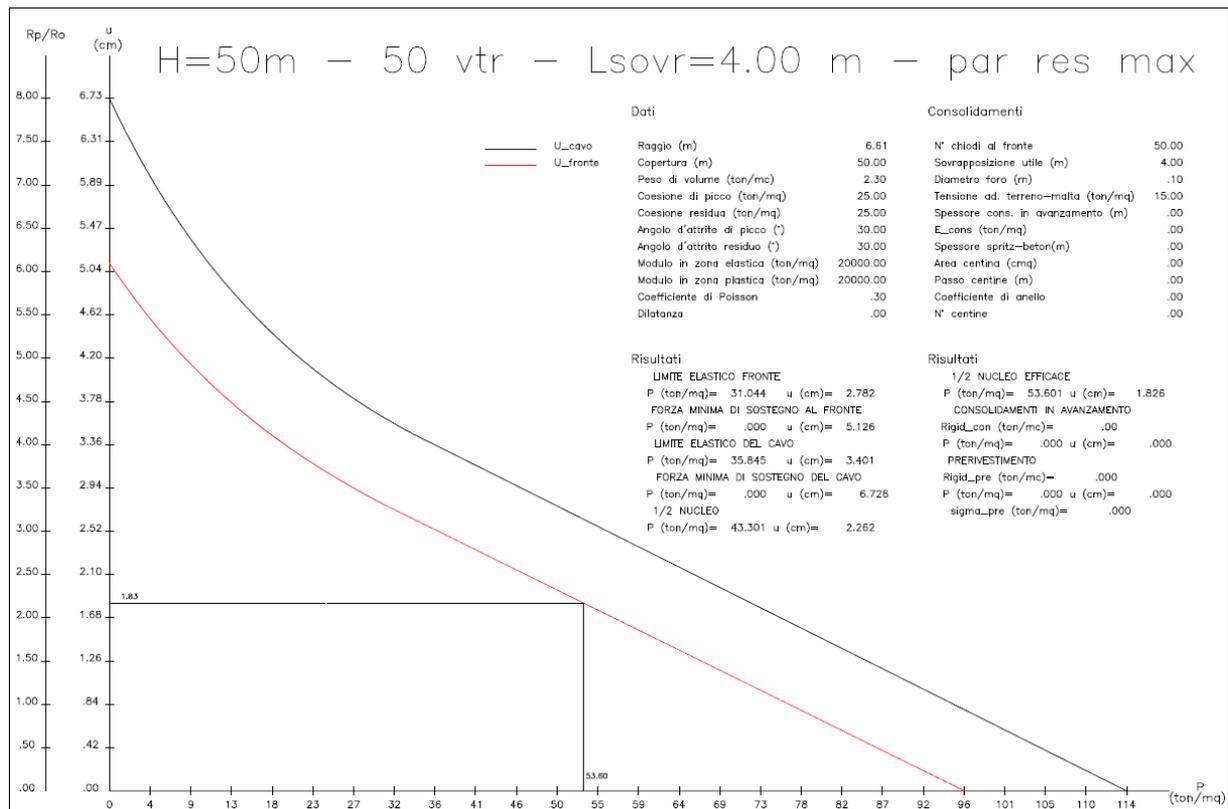
9.2.8 Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza massimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo degli elementi di consolidamento al fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B0	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
25 < z < 50	c'	[kPa]	220 – 250	250
	φ'	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	200	200
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica della sezione tipo B2 applicata nella formazione di Camerino è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 50 m.





La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

Condizione di verifica	u_f/R_0 [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.34 %	A - Fronte stabile
50 VTR Lsovrapp = 4	0.28 %	A - Fronte stabile

9.2.9 Tabella di sintesi dei risultati

Formazione	Copertura (m)	Parametri di calcolo			Sezione tipo	Ufr assenza VTR (cm)	Ufr/R ₀	Condizione di stabilità	N vtr	L sovrapp (m)	Ufr presenza VTR (cm)	Ufr/R ₀	Condizione di stabilità
		c' (kPa)	φ' (°)	E (Mpa)									
Camerino/Schlier	50	220	25	200	B0	2,67	0,40%	A - Fronte Stabile	-	-	-	-	-
Camerino/Schlier	50	250	30	200	B0	2,26	0,34%	A - Fronte Stabile	-	-	-	-	-
Camerino	35	250	25	200	B2	1,40	0,21%	A - Fronte Stabile	50	6	0,87	0,13%	A - Fronte Stabile
Camerino	35	220	30	200	B2	1,03	0,15%	A - Fronte Stabile	50	4	0,6	0,09%	A - Fronte Stabile
Camerino	40	220	30	200	Piaz - B0	1,66	0,22%	A - Fronte Stabile	-	-	-	-	-
Schlier	50	220	30	200	Piaz - B0	2,60	0,34%	A - Fronte Stabile	-	-	-	-	-
Camerino	50	220	25	200	B2	2,67	0,40%	A - Fronte Stabile	50	6	2,09	0,32%	A - Fronte Stabile
Camerino	50	250	30	200	B2	2,26	0,34%	A - Fronte Stabile	50	4	1,83	0,28%	A - Fronte Stabile

9.3 Copertura con $50 < H < 80$ m

Nella tratta di alte coperture si è esaminata la stabilità del fronte di scavo attraverso le linee caratteristiche. In tali situazioni di calcolo si definisce la condizioni di stabilità del fronte in funzione del rapporto tra lo spostamento radiale sul fronte (u_f) ed il raggio della galleria (R_0). In particolare, le categorie ADECO - RS sono state definite secondo quanto indicato nella tabella seguente:

u_f/R_0	Categoria ADECO - RS
[%]	[-]
< 0.5	A – Fronte Stabile
0.5 – 1.1	B – Fronte stabile a Breve Termine
> 1.1	C – Fronte instabile

Le formazioni incluse nella tratta di copertura tra 50 e 80 m sono:

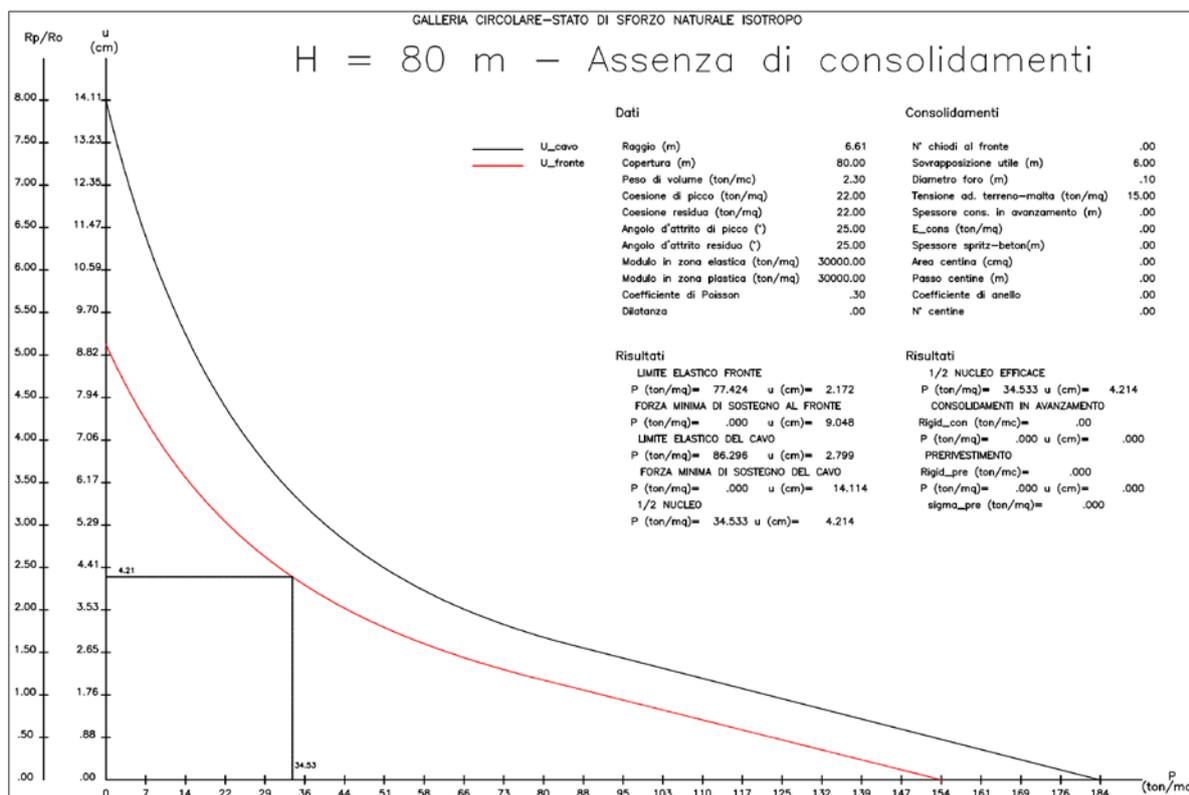
- Formazione di Camerino (Associazione Pelitica - Arenacea)
- Formazione dello Schlier (Marne argillose - siltose)

9.3.1 Sezione tipo B0 – Parametri di resistenza minimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo degli elementi di consolidamento al fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2 / B0 / Piazzola	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
50 < z < 80	c'	[kPa]	220 – 250	220
	φ'	[°]	25 – 30	25
	E	[MPa]	300	300
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica della sezione tipo B0 applicata nelle formazioni di Camerino e dello Schlier è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 80 m.



La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

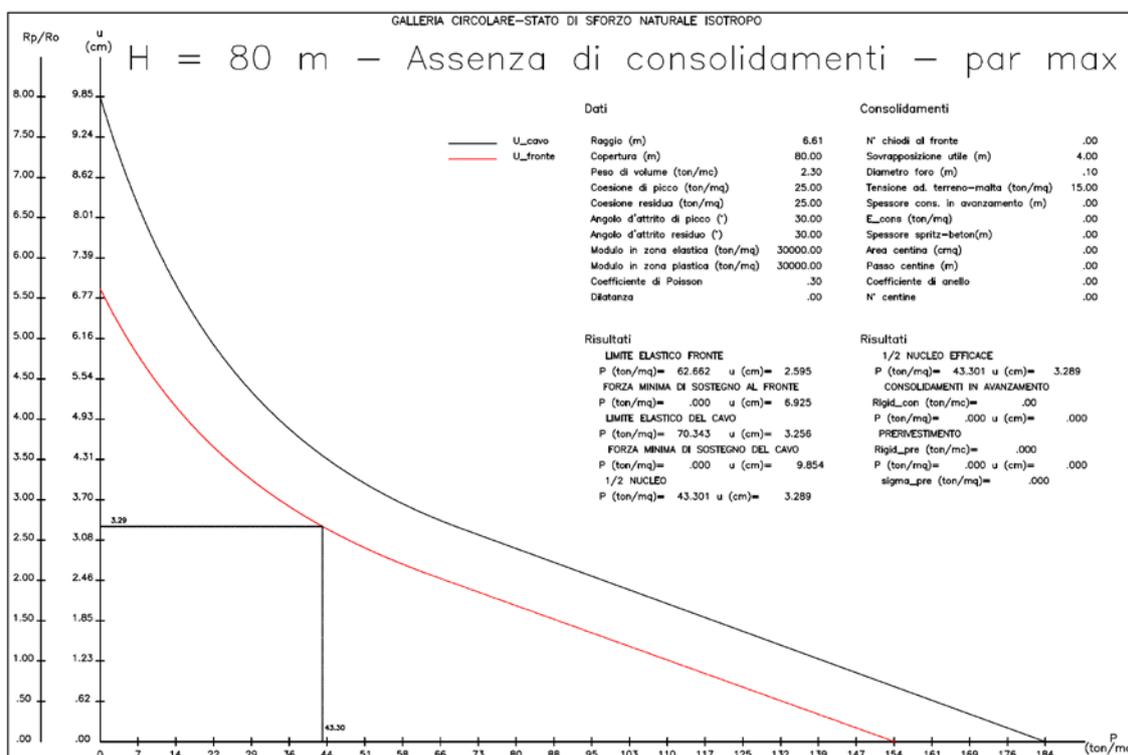
Condizione di verifica	u _f /R ₀ [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.64 %	B – Fronte stabile a breve termine

9.3.2 Sezione tipo B0 – Parametri di resistenza massimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo degli elementi di consolidamento al fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2 / B0 / Piazzola	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
50 < z < 80	c'	[kPa]	220 – 250	250
	φ'	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	300	300
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica della sezione tipo B0 applicata nelle formazioni di Camerino e dello Schlier è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 80 m.



La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

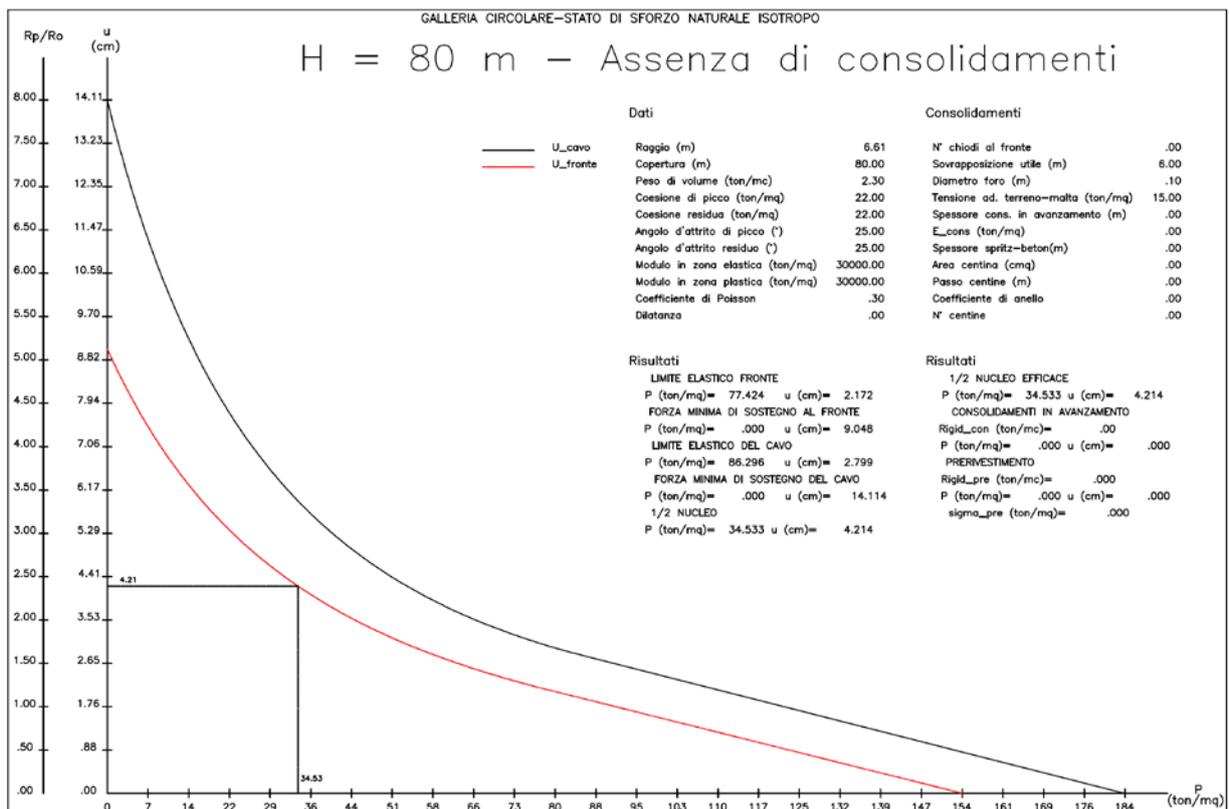
Condizione di verifica	u _f /R ₀ [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.50 %	B – Fronte stabile a breve termine

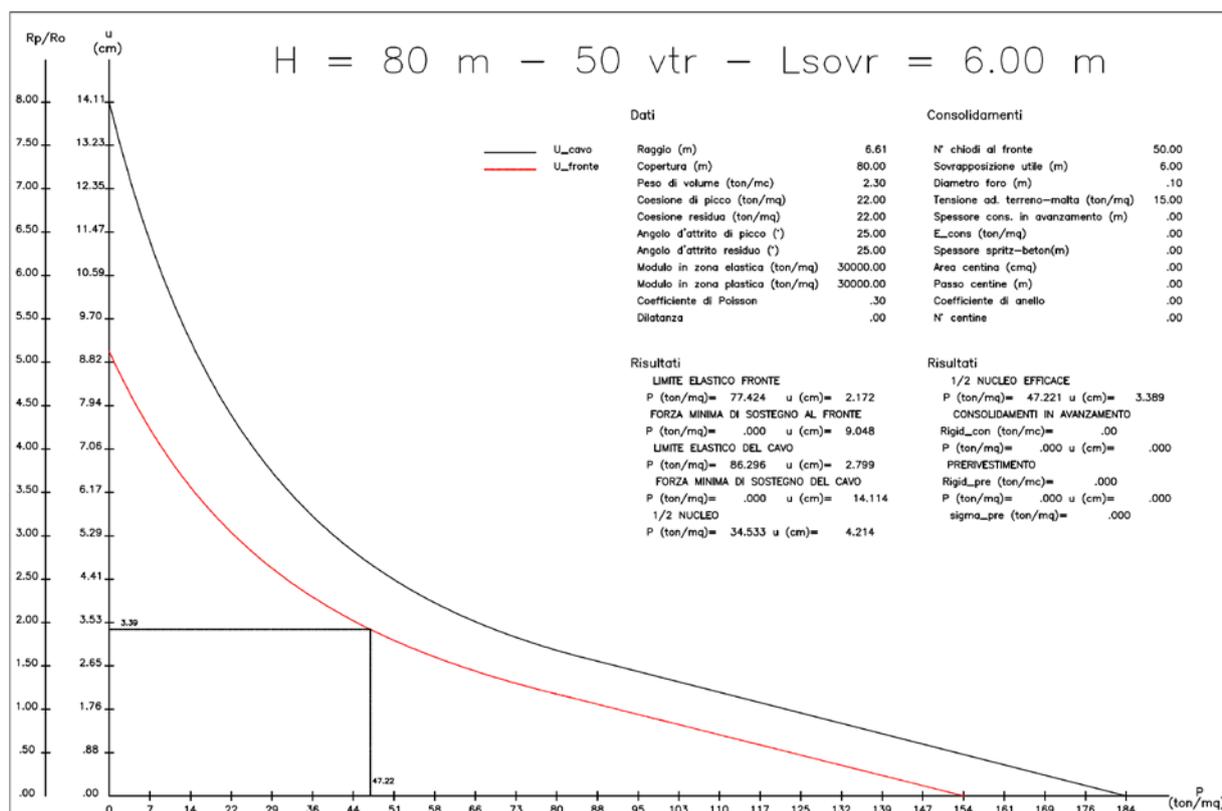
9.3.3 Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza minimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo degli elementi di consolidamento al fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2 / B0 / Piazzola	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
50 < z < 80	c'	[kPa]	220 – 250	220
	φ'	[°]	25 – 30	25
	E	[MPa]	300	300
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica della sezione tipo B2 applicata nelle formazioni di Camerino e dello Schlier è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 80 m.





La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

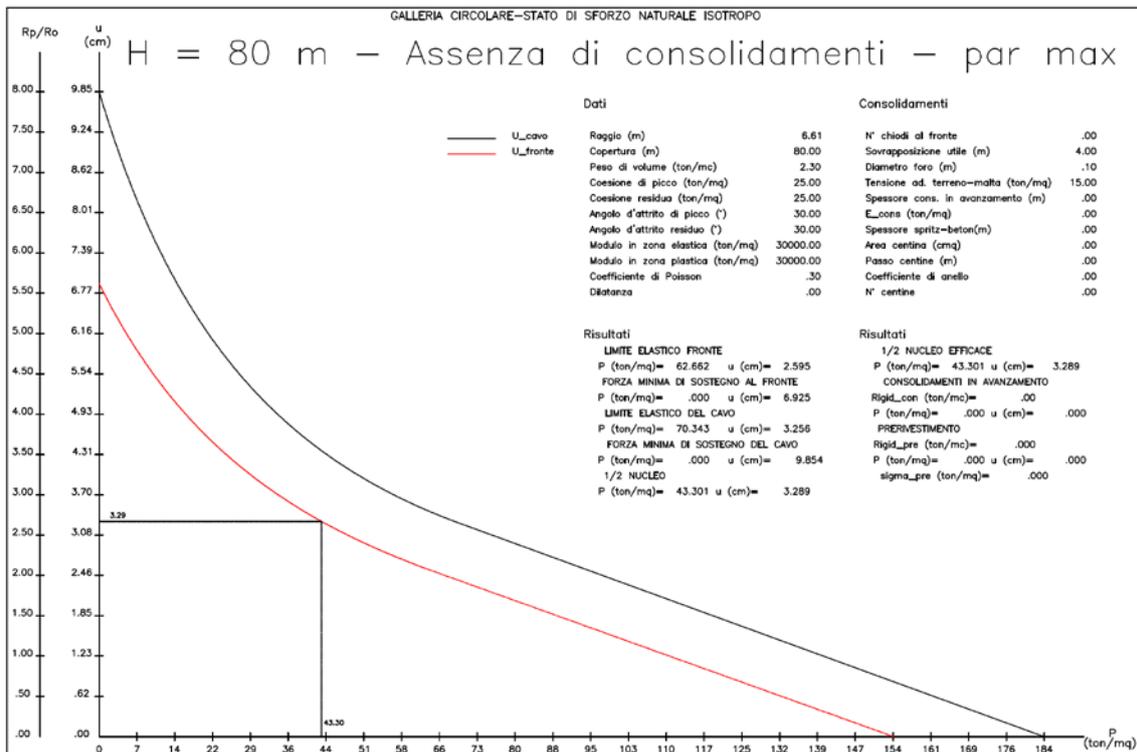
Condizione di verifica	u_f/R_0 [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.64 %	B – Fronte stabile a breve termine
50 VTR $L_{\text{sovrapp}} = 6$	0.50 %	B – Fronte stabile a breve termine

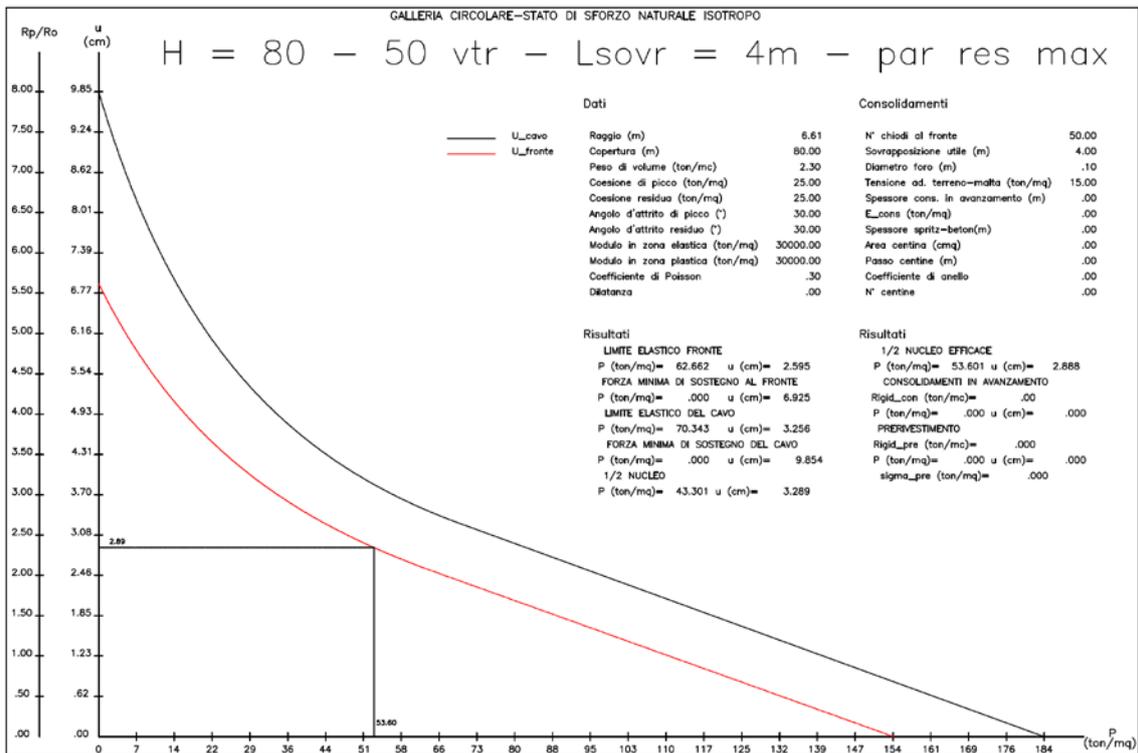
9.3.4 Sezione tipo B2 – Parametri di resistenza massimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo degli elementi di consolidamento al fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2 / B0 / Piazzola	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
50 < z < 80	c'	[kPa]	220 – 250	250
	φ'	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	300	300
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica della sezione tipo B2 applicata nelle formazioni di Camerino e dello Schlier è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 80 m.



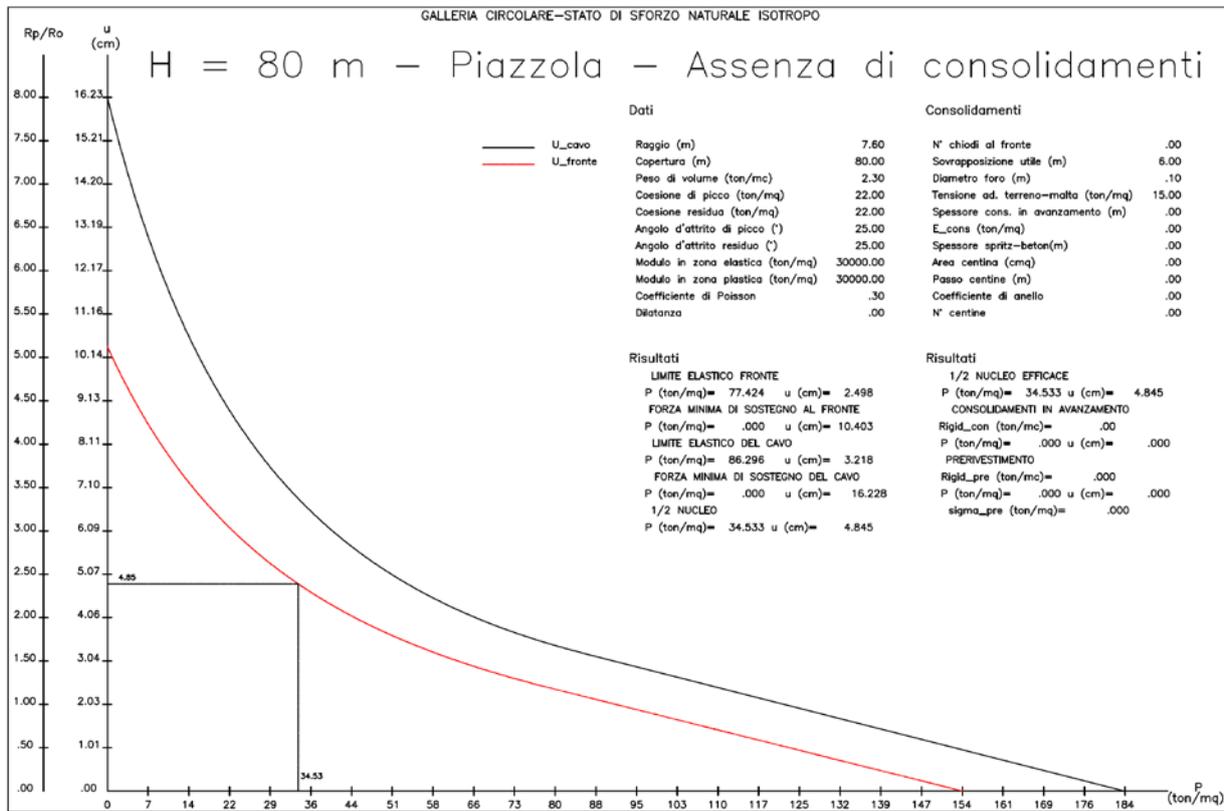


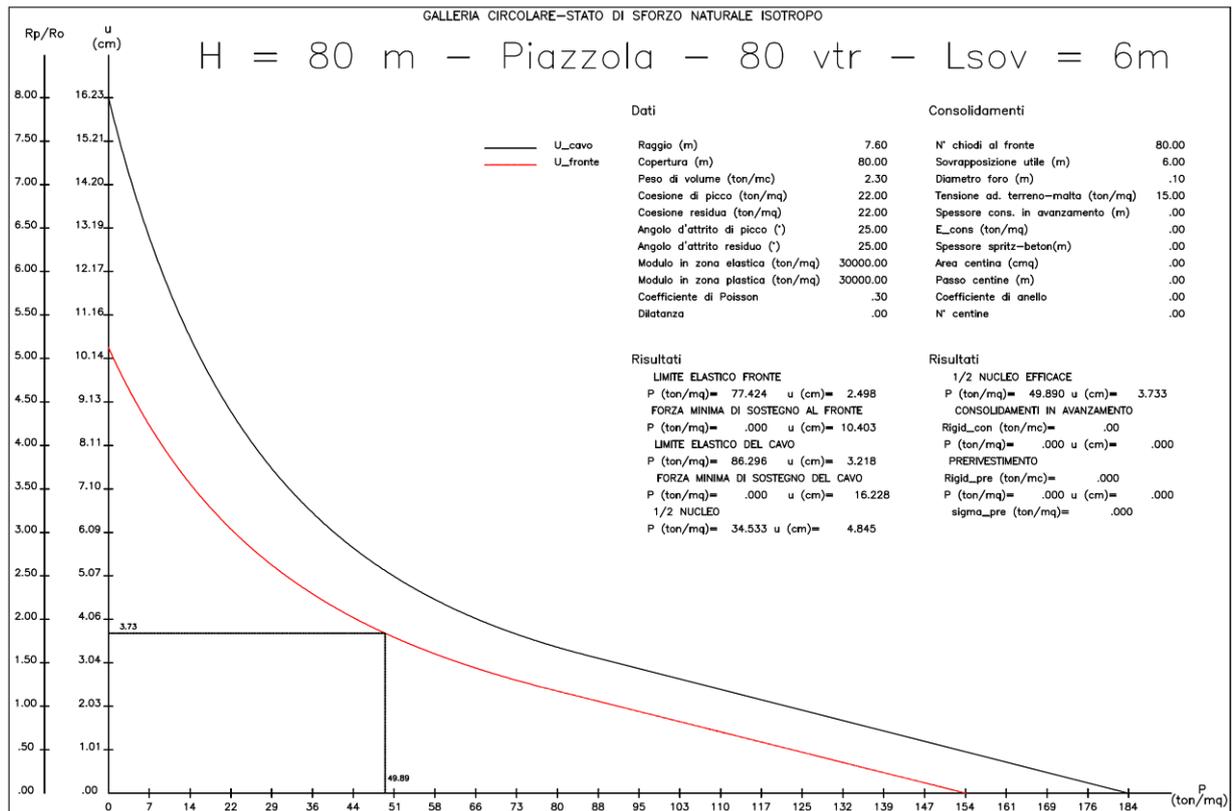
La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

Condizione di verifica	u_f/R_0 [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.50 %	B – Fronte stabile a breve termine
50 VTR Lsovrapp = 4	0.44 %	A – Fronte stabile

9.3.5 Sezione tipo Piazzola – Parametri di resistenza minimi

La verifica della sezione tipo Piazzola applicata nelle formazioni di Camerino e dello Schlier è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 80 m.

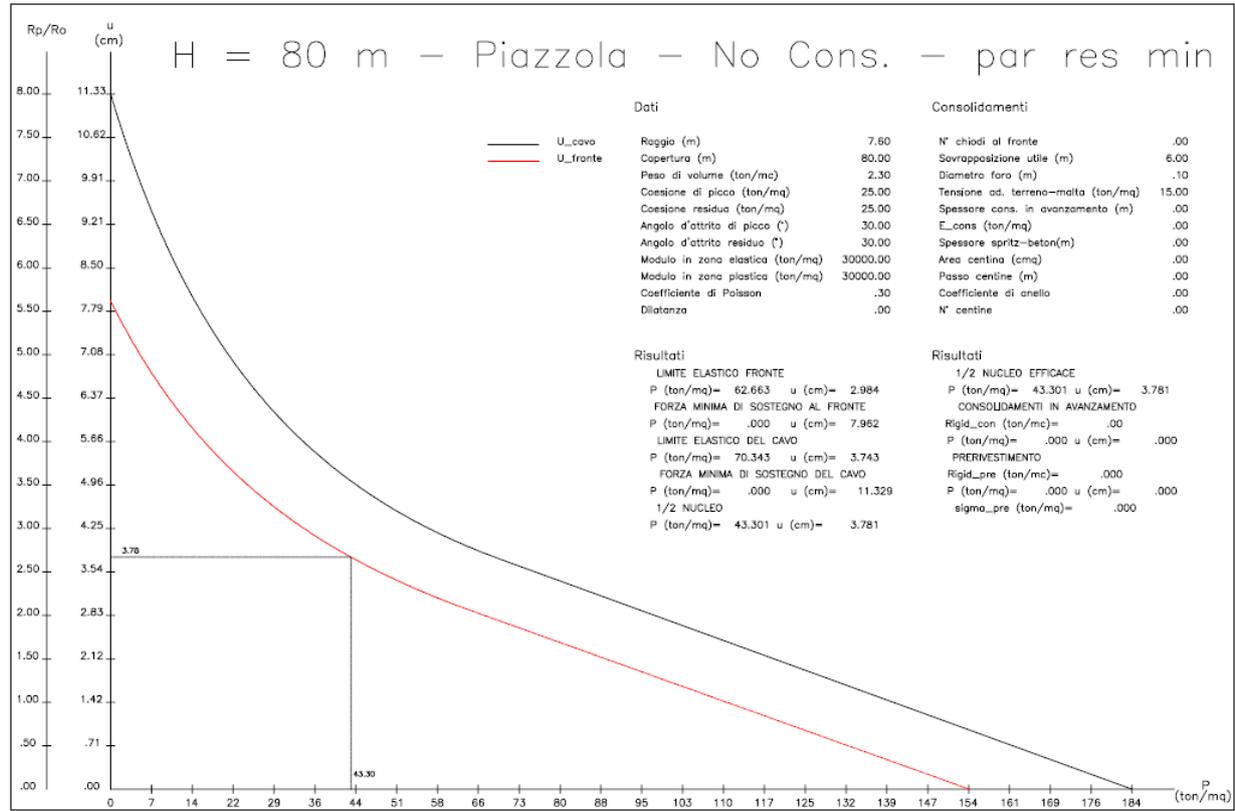




La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

Condizione di verifica	u_f/R_0 [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.64 %	B – Fronte stabile a breve termine
80 VTR Lsovrapp = 6	0.49 %	A – Fronte stabile

9.3.6 Sezione tipo Piazzola B0 – Parametri di resistenza massimi



9.3.7 Tabella di sintesi dei risultati

Formazione	Copertura (m)	Parametri di calcolo			Sezione tipo	Ufr assenza	Ufr/R0	Condizione di stabilità	Nvtr	Lsovrapp (m)	Ufr presenza	Ufr/R0	Condizioni di stabilità
		c' (kPa)	φ' (°)	E (Mpa)									
Camerino / Schlier	80	220	25	300	B2	4,21	0,64 %	B - Fronte Stabile a breve termine	50	6	3,39	0,50 %	A - Fronte Stabile
Camerino / Schlier	80	250	30	300	B2	3,29	0,50 %	B - Fronte Stabile a breve termine	50	4	2,89	0,44 %	A - Fronte Stabile
Camerino / Schlier	80	220	25	300	B0	4,21	0,64 %	B - Fronte Stabile a breve termine	-	-	-	-	-
Camerino / Schlier	80	250	30	300	B0	3,29	0,50 %	A - Fronte Stabile	-	-	-	-	-
Camerino / Schlier	80	220	25	300	Piazzola	4,85	0,64 %	B - Fronte Stabile a breve termine	80	6	3,73	0,49 %	A - Fronte Stabile
Camerino / Schlier	80	250	30	300	Piazzola B0	3,78	0,49 %	A - Fronte Stabile	-	-	-	-	-

9.4 Copertura con $80 < H < 110$ m

Nella tratta di alte coperture si è esaminata la stabilità del fronte di scavo attraverso le linee caratteristiche. In tali situazioni di calcolo si definisce la condizioni di stabilità del fronte in funzione del rapporto tra lo spostamento radiale sul fronte (u_f) ed il raggio della galleria (R_0). In particolare, le categorie ADECO - RS sono state definite secondo quanto indicato nella tabella seguente:

u_f/R_0	Categoria ADECO - RS
[%]	[-]
< 0.5	A – Fronte Stabile
0.5 – 1.1	B – Fronte stabile a Breve Termine
> 1.1	C – Fronte instabile

Le formazioni incluse nella tratta di copertura tra 50 e 110 m sono:

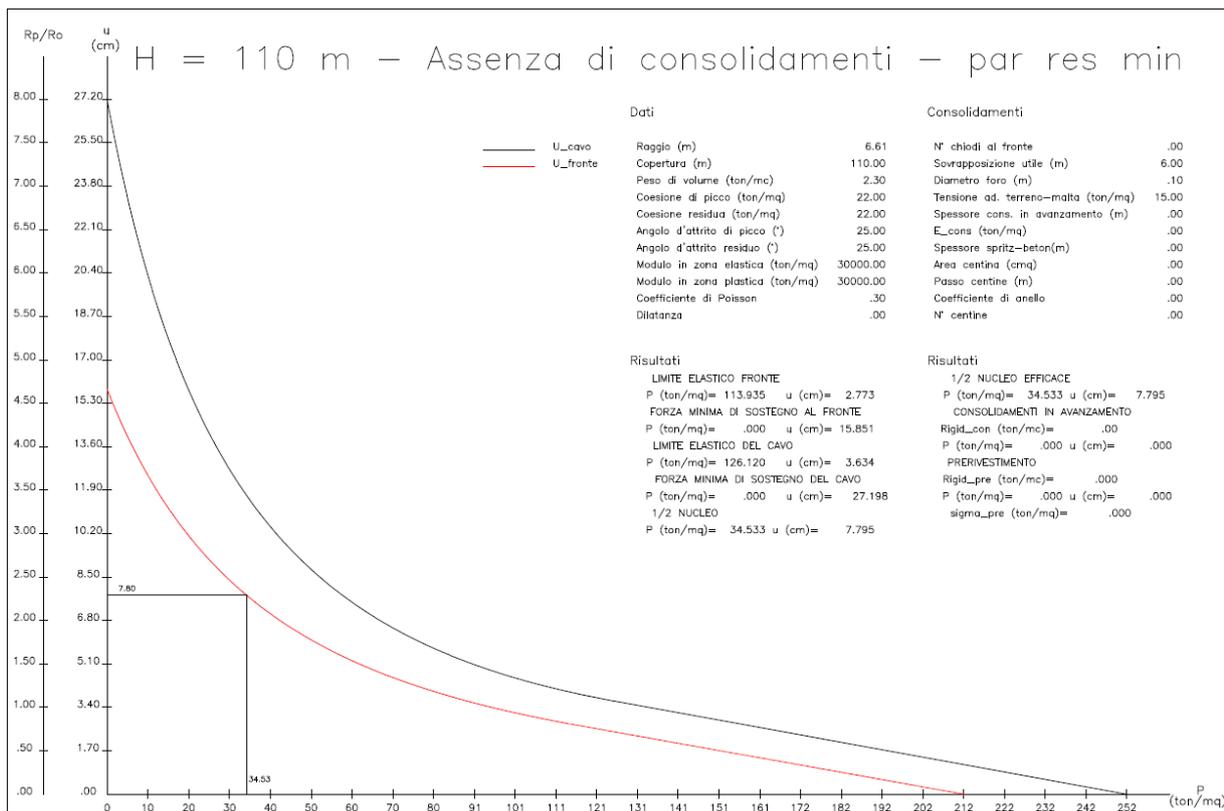
- Formazione di Camerino (Associazione Pelitica - Arenacea)
- Formazione dello Schlier (Marne argillose - siltose)

9.4.1 Sezione tipo B2* – Parametri di resistenza minimi – H = 110 m

I parametri geotecnici utilizzati per l'analisi di stabilità del fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2*	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
80 < z < 110	c'	[kPa]	220 – 250	220
	φ'	[°]	25 – 30	25
	E	[MPa]	300	300
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica di stabilità applicata nella formazione di Camerino è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 110 m.



La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

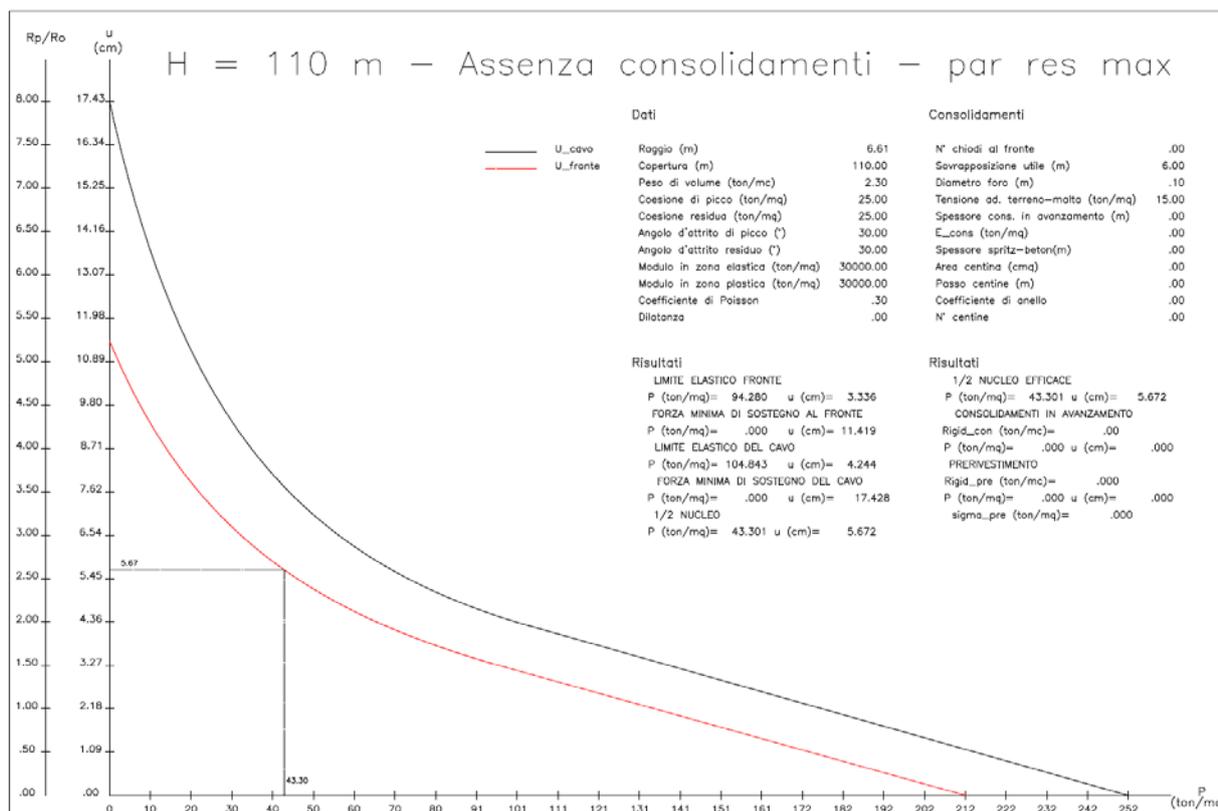
Condizione di verifica	u _f /R ₀ [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	1.18 %	C – Fronte instabile

9.4.2 Sezione tipo B2* – Parametri di resistenza massimi – H = 110 m

I parametri geotecnici utilizzati per l'analisi di stabilità del fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2*	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
80 < z < 110	c'	[kPa]	220 – 250	250
	φ'	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	300	300
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica di stabilità applicata nella formazione di Camerino è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 110 m.



La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

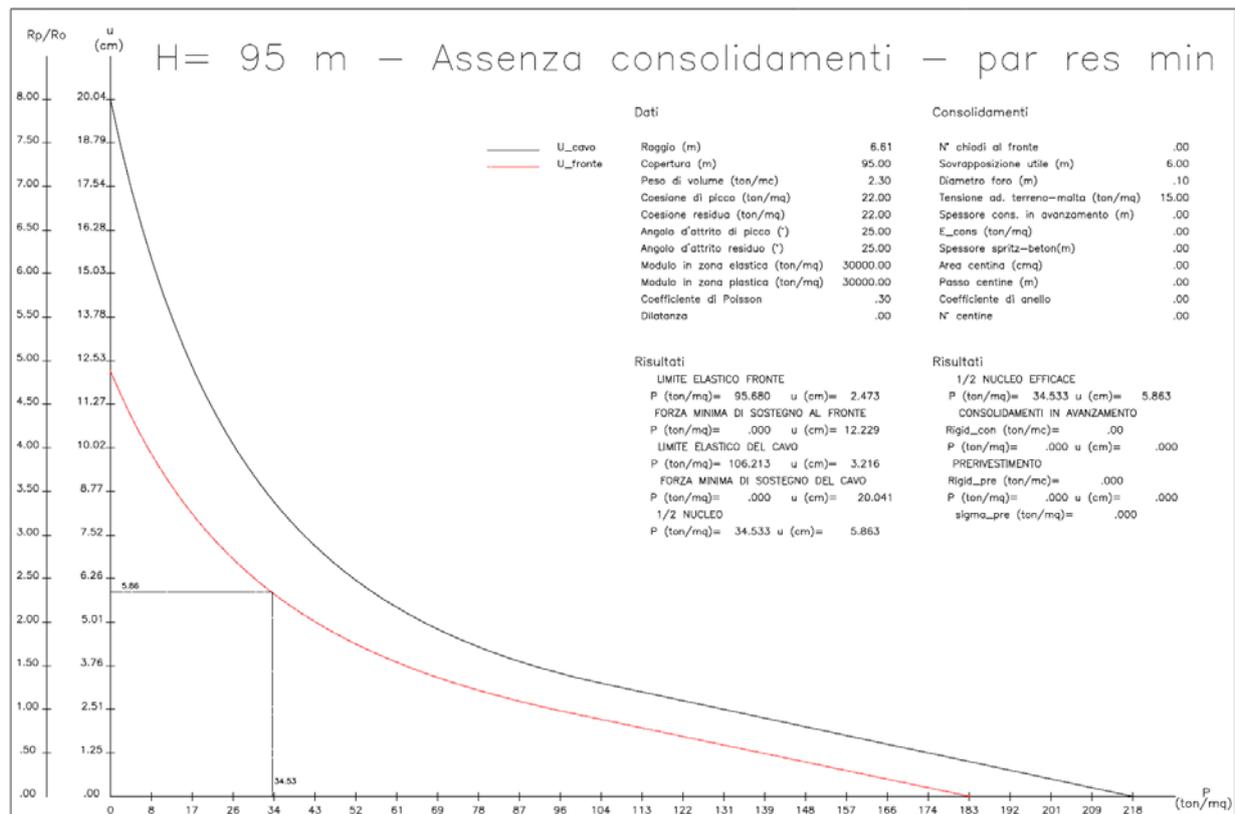
Condizione di verifica	u _f /R ₀ [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.86%	C – Fronte stabile a breve termine

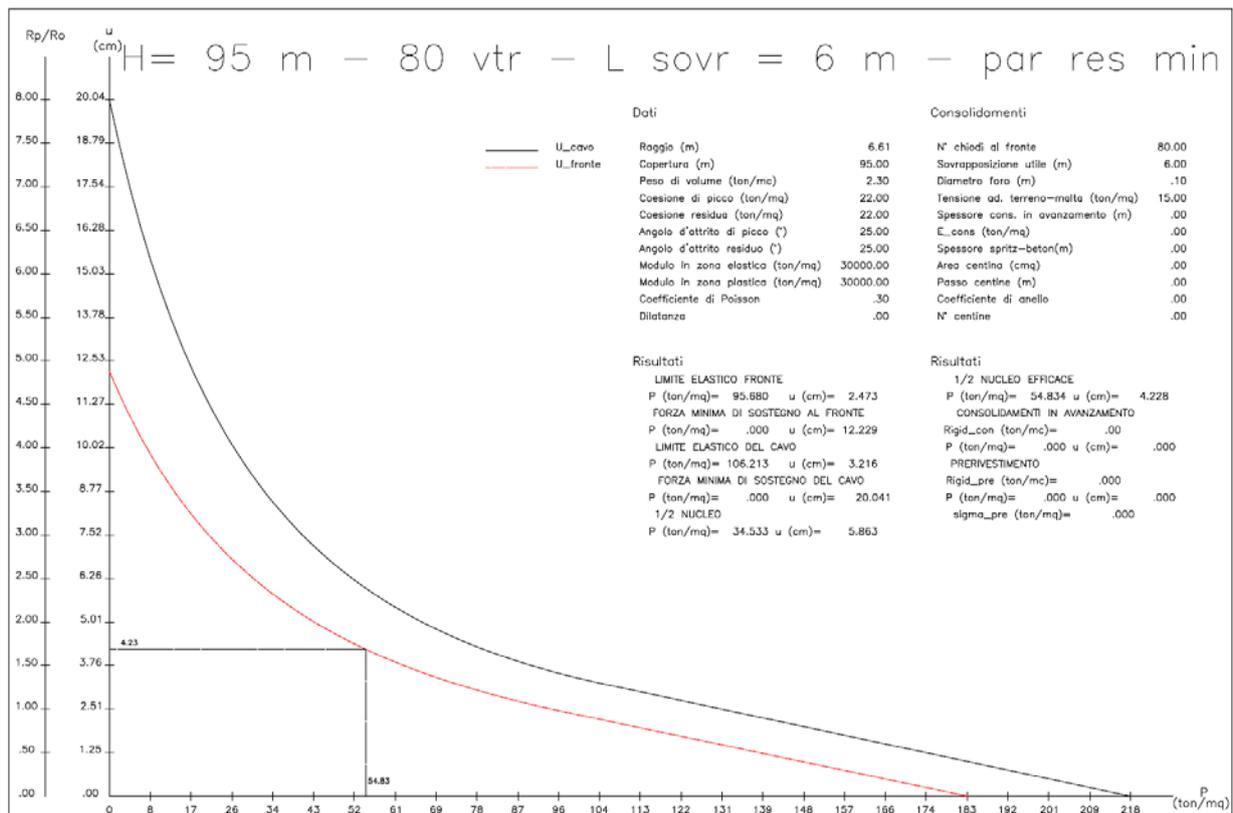
9.4.3 Sezione tipo B2* – Parametri di resistenza minimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo degli elementi di consolidamento al fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2*	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
80 < z < 110	c'	[kPa]	220 – 250	220
	φ'	[°]	25 – 30	25
	E	[MPa]	300	300
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica della sezione tipo B2* applicata nella formazione di Camerino è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 95 m.





La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

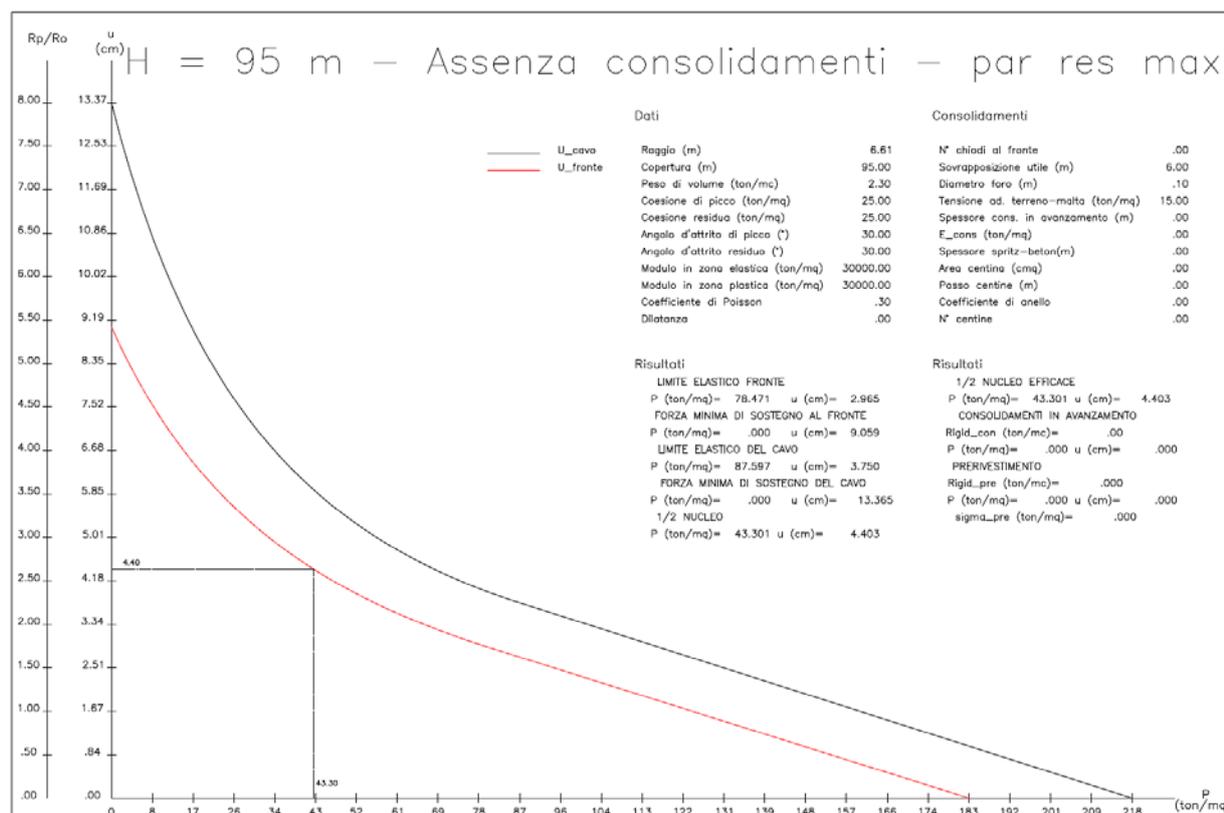
Condizione di verifica	u_f/R_0 [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.88 %	B – Fronte stabile a breve termine
80 VTR Lsovrapp = 6	0.64 %	B – Fronte stabile a breve termine

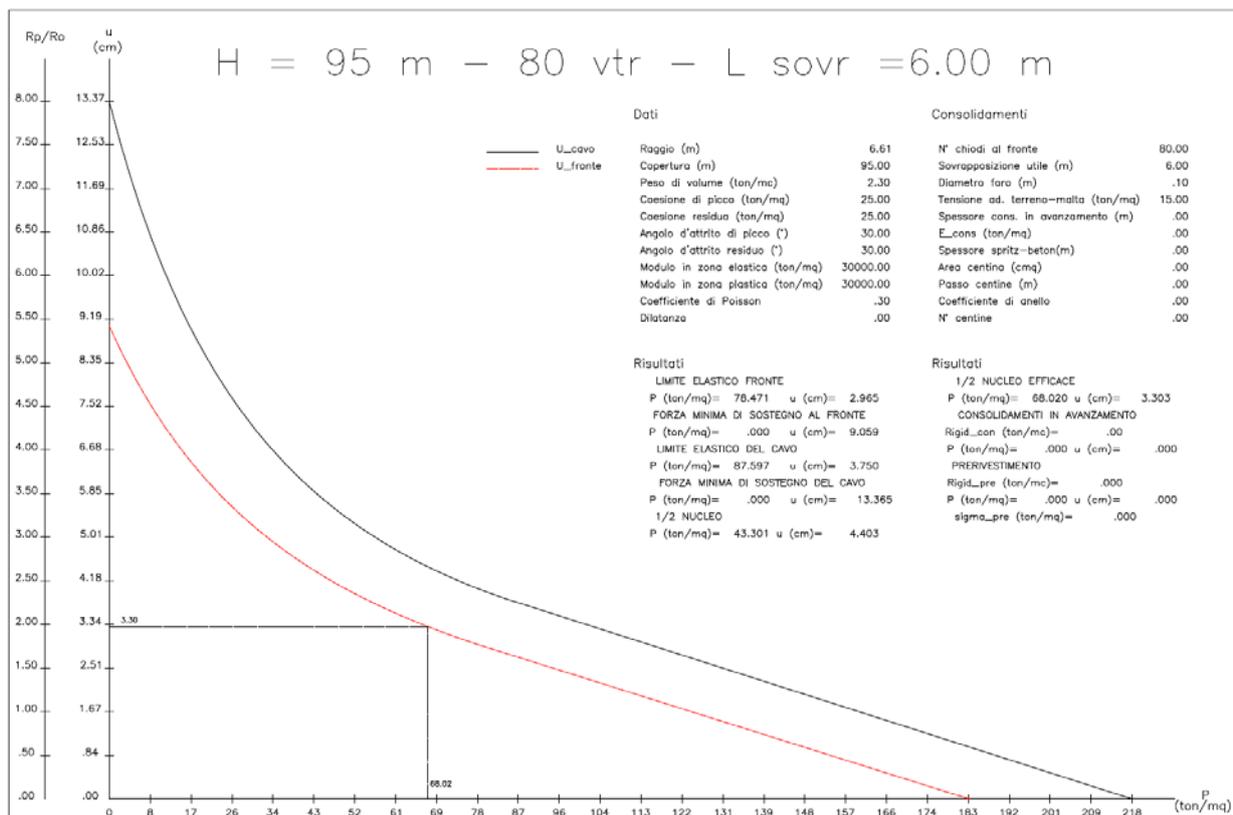
9.4.4 Sezione tipo B2* – Parametri di resistenza massimi

I parametri geotecnici utilizzati per il calcolo degli elementi di consolidamento al fronte sono riportati nella tabella seguente:

Fascia di Profondità [m]	Parametro	U.M.	Sezione tipo B2*	
			Intervallo di variabilità	Parametri di progetto
80 < z < 110	c'	[kPa]	220 – 250	250
	φ'	[°]	25 – 30	30
	E	[MPa]	300	300
	γ	[kN/mc]	23	23

La verifica della sezione tipo B2* applicata nella formazione di Camerino è stata condotta in corrispondenza di una copertura di calcolo pari a 95 m.





La tabella seguente riporta i risultati in termini di stabilità del fronte.

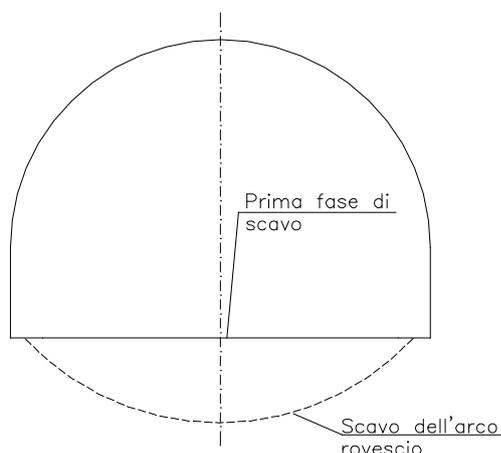
Condizione di verifica	u_f/R_0 [%]	Categoria ADECO - RS
Assenza di consolidamenti al fronte	0.66 %	B – Fronte stabile a breve termine
80 VTR Lsovrapp = 6	0.49 %	A – Fronte stabile

9.4.5 Tabella di sintesi dei risultati

Formazione	Copertura (m)	Parametri di calcolo			Sezione tipo	Ufr assenza VTR (cm)	Ufr/R ₀	Condizione di stabilità	N vtr	L sovrapp (m)	Ufr presenza VTR (cm)	Ufr/R ₀	Condizione di stabilità
		c' (kPa)	ϕ' (°)	E (Mpa)									
Camerino	95	250	30	300	B2*	4,40	0,66%	B - Fronte stabile a breve termine	80	6	3,3	0,49%	A - Fronte stabile
Camerino	95	220	25	300	B2*	5,86	0,88%	B - Fronte stabile a breve termine	80	6	4,23	0,64%	B - Fronte stabile a breve termine
Camerino	110	220	25	300	-	7,80	1,18%	C - Fronte instabile	-	-	-	-	-
Camerino	110	250	30	300	-	5,67	0,86%	B - Fronte stabile a breve termine	-	-	-	-	-

10. MODALITA' DI SCAVO - INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO

La modalità di scavo prevista è a sezione piena, con approfondimento dello scavo nella zona di arco rovescio realizzato successivamente alla posa del rivestimento provvisorio e coerentemente con la distanza di getto prevista in progetto.



Le fasi prevedono il getto dell'arco rovescio, in alcuni casi, a ridosso dei rivestimenti come incremento della capacità portante dei rivestimenti provvisori installati subito dopo l'esecuzione di ogni sfondo. Successivamente viene eseguito il completamento del rivestimento definitivo.

10.1 Sezioni tipo adottate in condizioni di scavo ordinario

Le sezioni tipo adottate sono state progettate sulla base delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso per le diverse formazioni, in funzione delle classi di copertura ed al fine di limitare i valori di convergenza del cavo.

La distribuzione di tali sezioni tipo lungo l'asse della galleria è riportata nel profilo geomeccanico.

10.1.1 Intervento tipo B0V

La sezione tipo B0V è composta da:

- Eventuali 3+3 dreni in avanzamento nel caso di presenza d'acqua;
- Centine metalliche:
 - 2 IPN 200 in acciaio S355 con passo longitudinale pari a 1.00 m (± 20 %);

- Spritz-beton al contorno di spessore 25 cm;
- Elementi di consolidamento al contorno costituiti da n. 40 infilaggi metallici ϕ 139.7 sp. 6.3 con lunghezza totale 18 m e sovrapposizione 4;
- Rivestimento definitivo dell'arco rovescio di spessore 60 cm non armato e gettato ad una distanza massima dal fronte non vincolata;
- Rivestimento definitivo della calotta di spessore 60/140 cm non armato e gettato ad una distanza massima dal fronte non vincolata;

10.1.2 Intervento tipo B0

La sezione tipo B0 è composta da:

- Eventuali 3+3 dreni in avanzamento nel caso di presenza d'acqua;
- Centine metalliche:
 - 2 IPN 180 in acciaio S355 con passo longitudinale pari a 1.00 m (± 20 %);
- Spritz-beton al contorno di spessore 20 cm;
- Rivestimento definitivo dell'arco rovescio di spessore 60 cm non armato e gettato ad una distanza massima dal fronte non vincolata;
- Rivestimento definitivo della calotta di spessore 60 cm non armato e gettato ad una distanza massima dal fronte non vincolata;

10.1.3 Intervento tipo B2

La sezione tipo B2 è composta da:

- Eventuali 3+3 dreni in avanzamento nel caso di presenza d'acqua;
- 50 (± 20 %) elementi di consolidamento al fronte costituiti da n. 3 piatti in VTR 40x6 mm ad aderenza migliorata o equivalenti con lunghezza totale pari a 24 m e sovrapposizione 4 m;
- Centine metalliche:
 - 2 IPN 180 in acciaio S355 con passo longitudinale pari a 1.00 m (± 20 %);
- Spritz-beton al contorno di spessore 20 cm;
- Rivestimento definitivo dell'arco rovescio di spessore 60 cm non armato (armato solamente nelle tratte specificate nel profilo geomeccanico) e gettato ad una distanza massima dal fronte di 2 D;

- Rivestimento definitivo della calotta di spessore 60 cm non armato e gettato ad una distanza massima dal fronte non vincolata;

10.1.4 Intervento tipo B2*

La sezione tipo B2* è composta da:

- Eventuali 3+3 dreni in avanzamento nel caso di presenza d'acqua;
- 80 elementi di consolidamento al fronte costituiti da n. 3 piatti in VTR 40x6 mm ad aderenza migliorata o equivalenti con lunghezza totale pari a 24 m e sovrapposizione 6 m;
- Centine metalliche:
 - 2 IPN 200 in acciaio S355 con passo longitudinale pari a 1.00 m ($\pm 20\%$);
- Spritz-beton al contorno di spessore 30 cm;
- Rivestimento definitivo dell'arco rovescio di spessore 60 cm non armato e gettato ad una distanza massima dal fronte di 2 D;
- Rivestimento definitivo della calotta di spessore 60 cm non armato e gettato ad una distanza massima dal fronte non vincolata;

10.1.5 Intervento tipo Piazzola

La sezione tipo Piazzola è composta da:

- Eventuali 3+3 dreni in avanzamento nel caso di presenza d'acqua;
- 80 elementi di consolidamento al fronte costituiti da n. 3 piatti in VTR 40x6 mm ad aderenza migliorata o equivalenti con lunghezza totale pari a 24 m e sovrapposizione 6 m;
- Centine metalliche:
 - 2 IPN 220 in acciaio S355 con passo longitudinale pari a 1.00 m ($\pm 20\%$);
- Spritz-beton al contorno di spessore 25 cm;
- Rivestimento definitivo dell'arco rovescio di spessore 80 cm armato e gettato ad una distanza massima dal fronte di 2 D;
- Rivestimento definitivo della calotta di spessore 70 cm armato e gettato ad una distanza massima dal fronte non vincolata;

10.1.6 Intervento tipo Piazzola B0

La sezione tipo Piazzola è composta da:

- Eventuali 3+3 dreni in avanzamento nel caso di presenza d'acqua;
- Centine metalliche:
 - 2 IPN 220 in acciaio S355 con passo longitudinale pari a 1.00 m (± 20 %);
- Spritz-beton al contorno di spessore 25 cm;
- Rivestimento definitivo dell'arco rovescio di spessore 80 cm non armato e gettato ad una distanza dal fronte non vincolata;
- Rivestimento definitivo della calotta di spessore 70 cm non armato e gettato ad una distanza massima dal fronte non vincolata;

10.1.7 Intervento tipo B2 V

La sezione tipo B2 V è composta da:

- Eventuali 3+3 dreni in avanzamento nel caso di presenza d'acqua;
- 80 elementi di consolidamento al fronte costituiti da n. 3 piatti in VTR 40x6 mm ad aderenza migliorata o equivalenti con lunghezza totale pari a 24 m e sovrapposizione 10 m;
- Elementi di consolidamento al contorno costituiti da n. 40 infilaggi metallici ϕ 139.7 sp. 6.3 con lunghezza totale 18 m e sovrapposizione 4;
- Centine metalliche:
 - 2 IPN 200 in acciaio S355 con passo longitudinale pari a 1.00 m (± 20 %);
- Spritz-beton al contorno di spessore 25 cm;
- Rivestimento definitivo dell'arco rovescio di spessore 60 cm armato e gettato ad una distanza massima dal fronte di 3 D;
- Rivestimento definitivo della calotta di spessore 60/140 cm armato e gettato ad una distanza massima dal fronte non vincolata;

11. MODELLAZIONI E VERIFICHE

Nel presente capitolo vengono effettuate, sezione per sezione, le analisi numeriche alle differenze finite condotte per la valutazione del comportamento tenso - deformativo durante lo scavo, e la determinazione del corrispondente stato di sollecitazione dei rivestimenti nelle diverse fasi di lavoro.

Vengono poi eseguite le verifiche agli Stati Limite delle sezioni strutturali utilizzate.

11.1 Caratteristiche generali del Codice di Calcolo alle differenze finite utilizzato e delle analisi condotte

Le analisi tenso - deformative sono state condotte impiegando il codice di calcolo FLAC 7.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua), il quale consente di affrontare problemi di meccanica del continuo, determinando gli stati tensionali e deformativi in un dominio bidimensionale, le cui caratteristiche sono definite da leggi di comportamento, di tipo elastico o plastico, e da imposte condizioni al contorno, implementando il metodo delle differenze finite.

Tale metodo si basa sulla discretizzazione delle equazioni differenziali che governano il problema fisico in esame (equazioni derivanti dal teorema della divergenza di Gauss), attraverso la sostituzione delle derivate con quozienti di differenze finite. In questo modo, le equazioni differenziali vengono trasformate in equazioni algebriche, da risolversi in successivi passi di calcolo. L'algoritmo di calcolo segue uno schema lagrangiano denominato "esplicito per integrazione diretta nel tempo" (explicit time marking), il quale è in grado di lavorare agevolmente e molto velocemente per sistemi con grandi deformazioni, con stati di collasso molto avanzati e in condizioni di instabilità (la possibilità di giungere al collasso non è infatti limitata da problemi di stabilità numerica, quale l'invertibilità di matrici). L'adattamento del metodo alle differenze finite a casi di griglia di forma qualunque segue l'approccio di Wilkins M.L.

La discretizzazione viene operata sovrapponendo alla porzione di continuo considerata un reticolo di maglie quadrilatera in corrispondenza dei cui nodi (gridpoints) sono definite le grandezze in gioco. E' allora possibile approssimare la derivata prima di una funzione rispetto a una variabile indipendente, con il rapporto tra la variazione subita dalla funzione stessa nel passare da un nodo ad uno contiguo, e la corrispondente variazione della variabile indipendente.

La legge costitutiva del materiale viene espressa nella seguente forma:

$$\sigma = E \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Rightarrow \sigma_{i,j}^t = E \cdot \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i,j}^t}{\Delta x}$$

Il codice di calcolo FLAC usa uno schema di soluzione “esplicito condizionatamente stabile”, la cui sequenza di calcolo iterativo comprende i seguenti passi:

- per ogni nodo della griglia si valuta la massa m , la risultante delle forze esterne F_e (gravità, carichi esterni ...), la risultante delle forze interne F_i , calcolata per integrazione degli sforzi nelle zone collegate al nodo stesso, così che è possibile determinare la forza squilibrata agente sul nodo F_u (unbalanced force $F_u = F_e - F_i$); affinché il sistema sia in equilibrio, tale forza deve essere nulla;
- per ogni nodo si scrive l'equazione di Newton $F_u = m \cdot a$, tramite la quale è possibile determinare l'accelerazione del nodo in esame; integrando due volte l'accelerazione si ottiene la velocità e lo spostamento incrementale di ogni nodo;
- dal campo di spostamenti incrementali, è possibile risalire al campo di deformazioni incrementali e quindi, attraverso il legame costitutivo dei materiali, al campo di variazioni degli sforzi nel reticolo;
- la variazione degli sforzi comporta la modifica, per ogni nodo della griglia, della risultante delle forze interne e conseguentemente la necessità di rideterminare la F_u , dando inizio ad un nuovo passo di calcolo. Il processo iterativo ha termine qualora si ottenga una forza squilibrata che abbia un valore minore di una tolleranza prestabilita. In generale, l'analisi può essere terminata quando la “unbalanced force” è pari allo 0.1% o all'1% della forza iniziale agente sul nodo.

Nell'analisi condotta per l'ammasso si è assunto modello di comportamento elasto-plastico con criterio di rottura di Mohr-Coulomb, definito dalle seguente espressione:

$$F = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{(1 + \sin\phi)}{(1 - \sin\phi)} - 2c \frac{(1 + \sin\phi)}{(1 - \sin\phi)}^{0.5}$$

$$F = \sigma_{\text{traz}} - \sigma_3$$

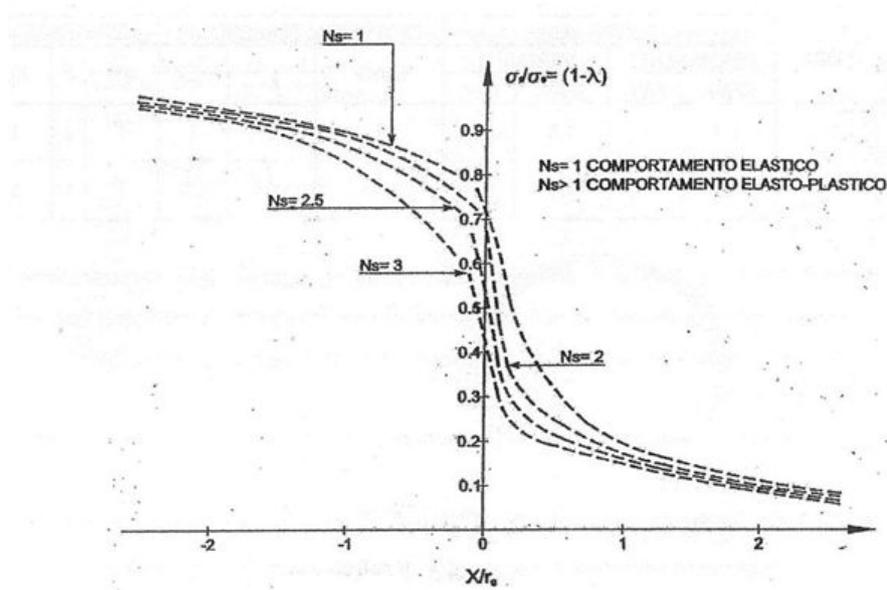
secondo tali ipotesi il comportamento del materiale è elastico per sforzi tali da risultare $F < 0$, oppure plastico per sforzi con $F > 0$.

Nel criterio di Mohr-Coulomb i parametri di resistenza sono coesione e angolo di attrito (c, ϕ) integrati dal valore di trazione ammissibile nel materiale (σ_{traz}).

Gli elementi rappresentativi dei rivestimenti sono attivati "free stress" (senza sforzi inerziali) e sono soggetti al peso proprio e agli spostamenti indotti dalle variazioni di rigidezza e di sollecitazione che intervengono nello stesso step di calcolo e nei successivi.

Le analisi sono state condotte in condizioni di deformazione piane (PLANE STRAIN), ma con accorgimenti tali, da rappresentare il progressivo passaggio dal problema tridimensionale, vicino al fronte, a quello piano, lontano dal fronte. Le modalità con cui è stato affrontato tale passaggio sono descritte nei paragrafi successivi.

Il comportamento tridimensionale legato all'allontanamento del fronte di scavo è stato simulato mediante il differimento in step successivi delle forze di scavo, cioè delle azioni esercitate al contorno della parte in scavo al tempo $t=0$. La percentuale di rilascio delle forze di scavo λ è stata determinata in accordo alla curva proposta da Panet, per comportamento elastico (curva $N_s=1$ del diagramma seguente), funzione di X/r_0 , essendo X la distanza del fronte di scavo dal punto considerato e r_0 il raggio dello scavo.



I terreni (rocce) sono stati caratterizzati mediante il modello elastoplastico di Mohr-Coulomb ed i parametri definiti nei capitoli precedenti. Per i rivestimenti è stato utilizzato un modello costitutivo di tipo elastico.

11.2 Verifiche degli elementi strutturali resistente

Le verifiche sono state condotte sia nei riguardi dello stato limite di esercizio che nei riguardi dello stato limite ultimo mediante il metodo dei coefficienti parziali di sicurezza sulle azioni e sulle resistenze.

11.2.1 Verifiche allo SLU

Relativamente alla verifica allo SLU è necessario verificare che:

$$E_d < R_d$$

dove:

E_d = azione di progetto (azione caratteristica maggiorata di un fattore amplificativo (γ_A) pari ad 1.3)

R_d = resistenza di progetto (definita sulla base dei coefficiente di riduzione parziale della resistenza dei materiali).

In particolar modo, per le verifiche nei confronti delle sollecitazioni di presso / tenso flessione si è verificato che i punti rappresentativi delle sollecitazioni degli elementi siano all'interno del dominio resistente calcolato con il programma di calcolo VCA Slu.

Si precisa che i valori della resistenza dell'acciaio e del calcestruzzo sono stati calcolati attraverso le formulazioni seguenti:

- Calcestruzzo (Cap. 4.1.2.1.1.1 – DM 2008):

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_C$$

f_{ck} = resistenza caratteristica cilindrica a compressione del calcestruzzo a $t = 28$ giorni

γ_c = fattore riduttivo della resistenza del calcestruzzo = 1.5

α_{cc} = coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata = 0.85

- Acciaio (Cap. 4.1.2.1.1.3 – DM 2008)

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_S$$

f_{yk} = tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio

γ_s = coefficiente parziale di sicurezza per l'acciaio = 1.15 - barre B450C (rif. Cap. 4.1.2 NTC 2008)

γ_s = coefficiente parziale di sicurezza per l'acciaio = 1.05 – Profili metallici (rif. Cap. 4.2.4 NTC 2008)

Le resistenze di progetto dei materiali sono pertanto:

- **Calcestruzzo C 35/45** (Rivestimento definitivo di arco rovescio e murette) =
= $0.85 * 35 / 1.5 = 19.83$ MPa
- **Calcestruzzo C 25/30** (Spritz Beton e rivestimento definitivo di calotta) =
= $0.85 * 25 / 1.5 = 14.17$ MPa
- **Acciaio da carpenteria** (Armatura rivestimento definitivo) = $450 / 1.15 = 391$ MPa
- **Acciaio centine S 355 (Fe 510)** = $355 / 1.05 = 338$ MPa

11.2.1.1 Domini resistenti rivestimenti definitivi

Nel seguito sono riportati gli output del programma di calcolo VCA Slu relativi alla costruzione dei domini resistenti di calotta e arco rovescio per tutte le tipologie di rivestimenti presenti e descritti nel seguito.

Arco rovescio – H = 60 cm

Arco rovescio non armato

Verifica C.A. S.L.U. - File:

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : _____

N° strati barre 0 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	60

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 0 0 kN
M_{xEd} 0 0 kNm
M_{yEd} 0 0

P.to applicazione N
 Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura
Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Materiali

Materiali	B450C	C35/45
ϵ_{su}	67.5 ‰	2 ‰
f_{yd}	391.3 N/mm ²	3.5
E_s	200.000 N/mm ²	19.83
E_s/E_c	15	f_{cc}/f_{cd} 0.8
ϵ_{syd}	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 13.5
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm ²	τ_{co} 0.8
		τ_{c1} 2.257

M_{xRd} 126.2 kN m
 σ_c -14.17 N/mm²
 σ_s 308.7 N/mm²
 ϵ_c 3.5 ‰
 ϵ_s 46.36 ‰
d 21 cm
x 1.474 x/d 0.0702
 δ 0.7

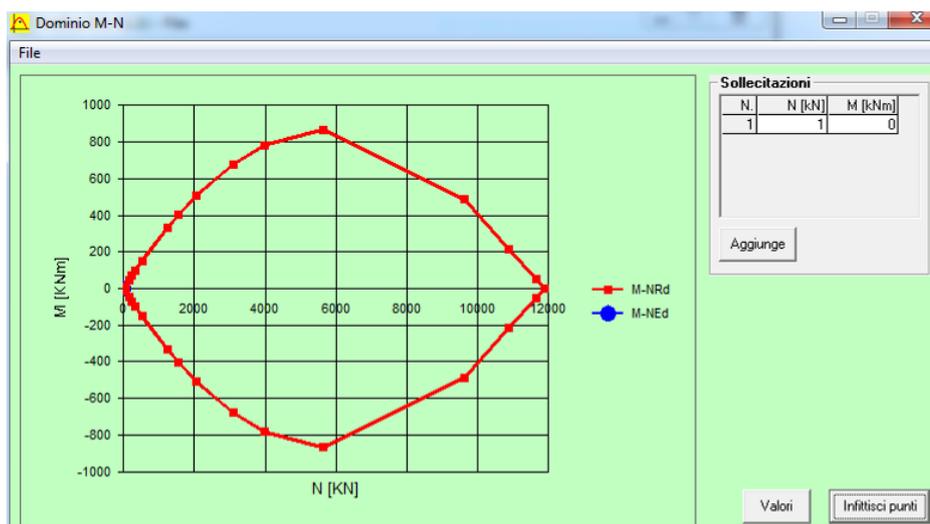
Tipo Sezione
 Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

Metodo di calcolo
 S.L.U.+ S.L.U.-
 Metodo n

Tipo flessione
 Retta Deviata

N° rett. 100
Calcola MRd Dominio M-N
L_o 0 cm Col. modello

Precompresso



Arco rovescio armato con 4 ϕ 20 per lembo

Verifica C.A. S.L.U. - File:

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : _____

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	12,57	5,5
			2	12,57	54,5

Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

S.L.U.+ S.L.U.-
 Metodo n

Retta Deviata

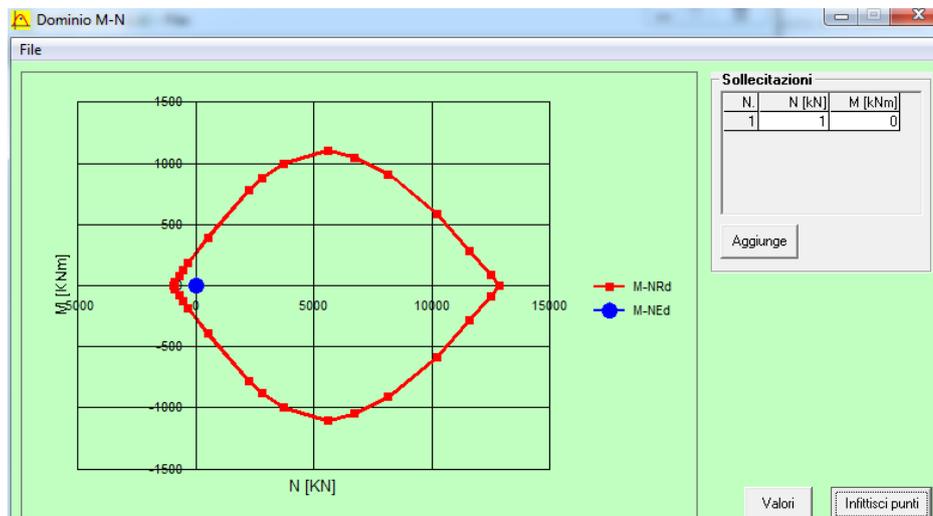
N° rett. 100
 Calcola MRd Dominio M-N
 L₀ 0 cm Col. modello
 Precompresso

Sollecitazioni
 S.L.U. Metodo n
 N_{Ed} 1 0 kN
 M_{xEd} 0 0 kNm
 M_{yEd} 0 0

P.to applicazione N
 Tipo rottura
 Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Materiali
 B450C C35/45
 ε_{su} 67,5 ‰ ε_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391,3 N/mm² ε_{cu} 3,5 ‰
 E_s 200.000 N/mm² f_{cd} 19,83 ‰
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0,8
 ε_{syd} 1,957 ‰ σ_{c,adm} 13,5
 σ_{s,adm} 255 N/mm² τ_{co} 0,8
 τ_{c1} 2,257

M_{xRd} 267,2 kNm
 σ_c -19,83 N/mm²
 σ_s 391,3 N/mm²
 ε_c 3,5 ‰
 ε_s 39,75 ‰
 d 54,5 cm
 x 4,41 x/d 0,08092
 δ 0,7



Arco rovescio – H = 80 cm

Arco rovescio non armato

Verifica C.A. S.L.U. - File:

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : _____

N° strati barre Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	80

Tipo Sezione

Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

Sollecitazioni

S.L.U. Metodo n

N_{Ed} kN
M_{xEd} kNm
M_{yEd}

P.to applicazione N

Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN
yN

Tipo rottura

Solo cls - Sez. parzializzata

Metodo di calcolo

S.L.U.+ S.L.U.-
 Metodo n

Tipo flessione

Retta Deviata

N° rett.

Calcola MRd

L_o cm

Precompresso

Materiali

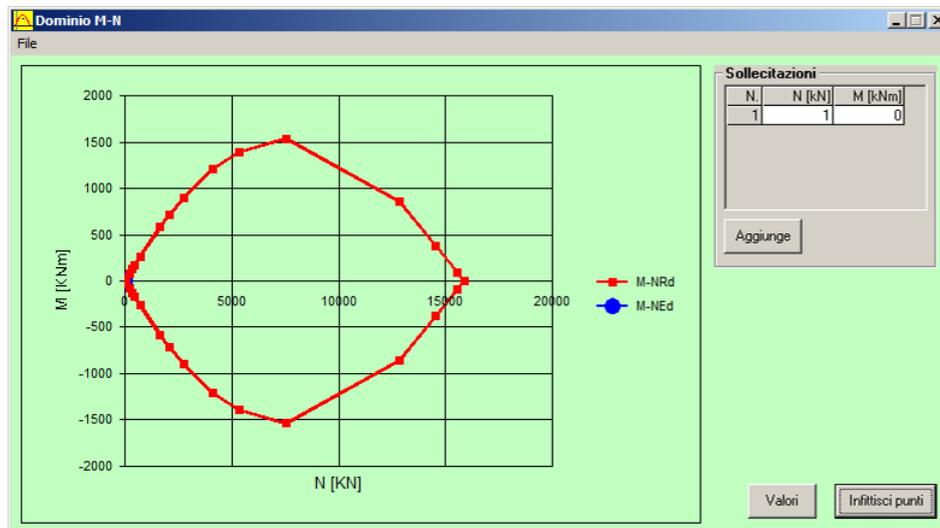
B450C **C35/45**

ε_{su} ‰ ε_{c2} ‰
f_{yd} N/mm² ε_{cu} ‰
E_s N/mm² f_{cd} ‰
E_s/E_c f_{cc}/f_{cd} ?
ε_{syd} ‰ σ_{c,adm} ‰
σ_{s,adm} N/mm² τ_{co} ‰
τ_{c1} ‰

M_{xRd} kN m

σ_{cs} N/mm²
σ_{ci} N/mm²
ε_{cs} ‰
ε_{ci} ‰

x 0.050€



Arco rovescio armato con 4 ϕ 20 per lembo

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

TITOLO :

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	80	1	12,57	5,5
			2	12,57	74,5

Tipo Sezione
 Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

Sollecitazioni
 S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 1 0 kN
 M_{xEd} 0 0 kNm
 M_{yEd} 0 0

P.to applicazione N
 Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura
 Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

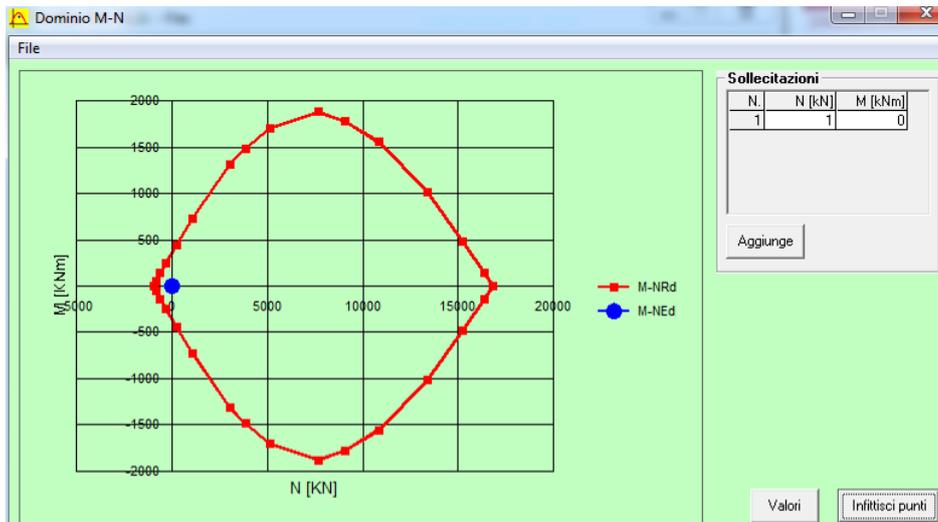
Metodo di calcolo
 S.L.U.+ S.L.U.-
 Metodo n

Tipo flessione
 Retta Deviata

Materiali
 B450C C35/45
 ϵ_{su} 67,5 ‰ ϵ_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391,3 N/mm² ϵ_{cu} 3,5 ‰
 E_s 200.000 N/mm² f_{cd} 19,83
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0,8
 ϵ_{syd} 1,957 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 13,5
 $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm² τ_{co} 0,8
 τ_{c1} 2,257

M_{xRd} 365,7 kNm
 σ_c -19,83 N/mm²
 σ_s 391,3 N/mm²
 ϵ_c 3,5 ‰
 ϵ_s 55,68 ‰
 d 74,5 cm
 x 4,406 x/d 0,05914
 δ 0,7

N° rett. 100
 Calcola MRd Dominio M-N
 L₀ 0 cm Col. modello
 Precompresso



Calotta armata con 4 ϕ 16 per lembo

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal_60_rck30_4fi16

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : _____

N° figure elementari Zoom N° strati barre Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	60	1	8,04	5,5
			2	8,04	54,5

Tipo Sezione
 Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

Diagramma di sezione:

Sollecitazioni
 S.L.U. Metodo n

P.to applicazione N
 Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN yN

Tipo rottura
 Lato calcestruzzo - Acciaio snerato

Metodo di calcolo
 S.L.U.+ S.L.U.-
 Metodo n

Tipo flessione
 Retta Deviata

N° rett.

Calcola MRd

L₀ cm Col. modello

Precompresso

Materiali

B450C		C25/30	
ϵ_{su}	67,5 ‰	ϵ_{c2}	2 ‰
f_{yd}	391,3 N/mm ²	ϵ_{cu}	3,5 ‰
E_s	200.000 N/mm ²	f_{cd}	14,17
E_s/E_c	15	f_{cc}/f_{cd}	0,8
ϵ_{syd}	1,957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	9,75
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm ²	τ_{co}	0,6
		τ_{c1}	1,829

M_{xRd} kN m

σ_c N/mm²

σ_s N/mm²

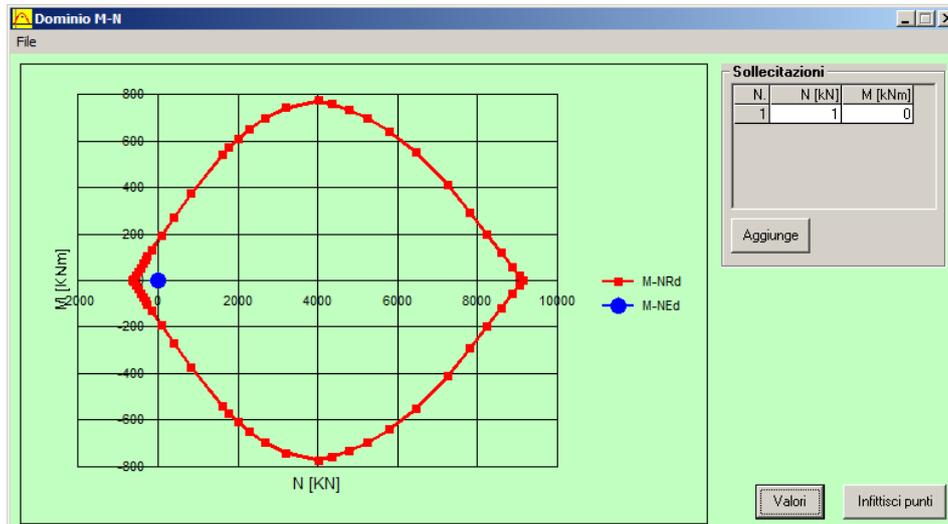
ϵ_c ‰

ϵ_s ‰

d cm

x x/d

δ



Calotta – H = 70 cm

Calotta non armata

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal_70_rck30

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : _____

N° figure elementari Zoom N° strati barre Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	100	70

Tipo Sezione
 Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

Diagramma della sezione rettangolare con dimensioni b e h.

Sollecitazioni
 S.L.U. Metodo n

N_{Ed} kN
 M_{Ed} kNm
 M_{yEd}

P.to applicazione N
 Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN yN

Tipo rottura
 Solo cls - Sez. parzializzata

Metodo di calcolo
 S.L.U.+ S.L.U.-
 Metodo n

Tipo flessione
 Retta Deviata

N° rett.

Calcola MRd Dominio M-N

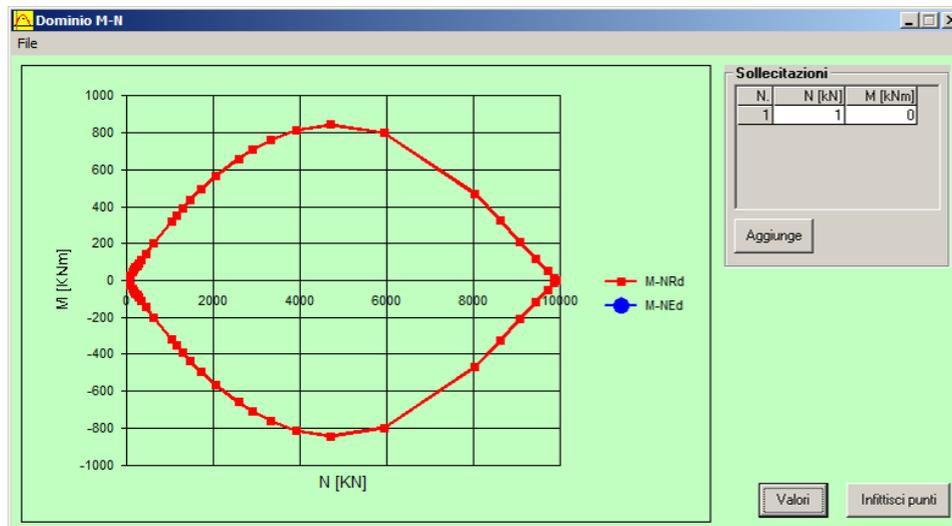
L₀ cm Col. modello

Precompresso

Materiali
 B450C C25/30

ε_{su} ‰ ε_{c2} ‰
 f_{yd} N/mm² ε_{cu} ‰
 E_s N/mm² f_{cd} ‰
 E_s/E_c f_{cc}/f_{cd} ?
 ε_{syd} ‰ σ_{c,adm} ‰
 σ_{s,adm} N/mm² τ_{co} ‰
 τ_{c1} ‰

M_{xRd} kN m
 σ_{cs} N/mm²
 ε_{cs} ‰
 ε_{ci} ‰
 x



Calotta armata con 4 ϕ 16 per lembo

Verifica C.A. S.L.U. - File: Cal_70_rck30_4fi16

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo: _____

N° figure elementari Zoom N° strati barre Zoom

N°	b [cm]	h [cm]	N°	As [cm²]	d [cm]
1	100	70	1	8,04	5,5
			2	8,04	64,5

Tipo Sezione
 Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

Sollecitazioni
 S.L.U. Metodo n

P.to applicazione N
 Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN yN

Tipo rottura
 Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Metodo di calcolo
 S.L.U.+ S.L.U.-
 Metodo n

Tipo flessione
 Retta Deviata

N° rett.

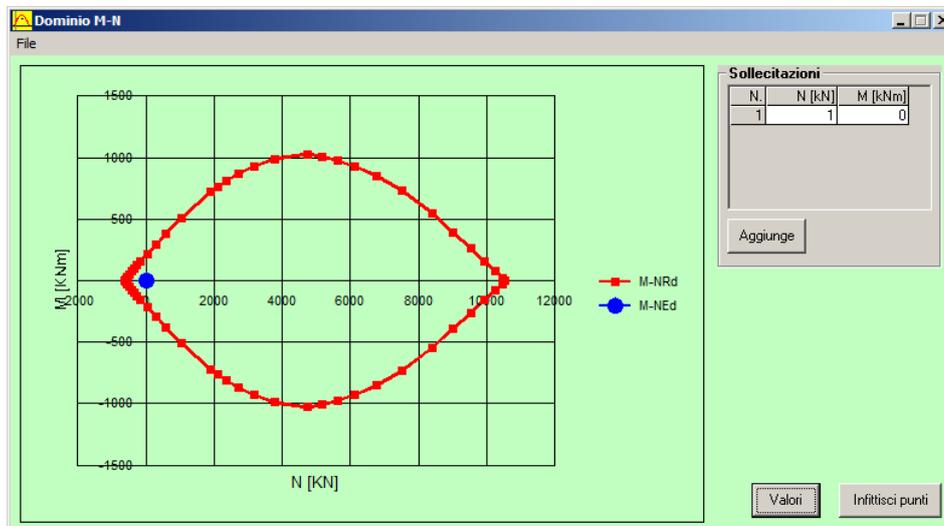
Calcola MRd

L₀ cm Precompresso

Materiali

B450C		C25/30	
ϵ_{su}	67,5 ‰	ϵ_{c2}	2 ‰
f_{yd}	391,3 N/mm ²	ϵ_{cu}	3,5 ‰
E_s	200.000 N/mm ²	f_{cd}	14,17
E_s/E_c	15	f_{cc}/f_{cd}	0,8
ϵ_{syd}	1,957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	9,75
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm ²	τ_{co}	0,6
		τ_{c1}	1,829

M_{xRd} kN m
 σ_c N/mm²
 ϵ_c ‰
 ϵ_s ‰
 d cm
 x x/d
 δ



11.2.2 Verifiche allo SLE

Le verifiche da condurre nei confronti dello SLE sono:

- Punte tensionali
- Stato limite di fessurazione

11.2.2.1 Verifiche alle Punte tensionali

Nel caso di sezioni armate, al fine della verifica nei confronti delle tensioni massime di esercizio è necessario verificare che:

- $\sigma_c < 0,60 f_{ck}$ per combinazione caratteristica (rara) (calcestruzzo)
- $\sigma_c < 0,45 f_{ck}$ per combinazione quasi permanente (calcestruzzo)

Il valore limite di σ_c è pertanto pari a:

- $\sigma_c = 0.45 * 35 = 15.75$ MPa (Arco rovescio e murette)
- $\sigma_c = 0.45 * 25 = 11.25$ MPa (Calotta)
- $\sigma_s < 0,8 f_{yk}$ (acciaio)

dove f_{yk} per un acciaio di tipo B450 C è pari a 450 MPa.

Il valore limite della tensione sull'acciaio è pertanto pari a $0.8 * 450 = 360$ MPa.

Nel caso di sezioni con bassa percentuale di armatura o non armate, al fine della verifica nei confronti delle tensioni massime di esercizio è necessario verificare che:

- $\sigma_c = 0,30 f_{ck}$ per calcestruzzo debolmente armato
- $\sigma_c = 0,25 f_{ck}$ per calcestruzzo non armato

Il valore limite di σ_c è pertanto pari a:

- $\sigma_c = 0.25 * 35 = 8.75$ MPa (Arco rovescio e murette)
- $\sigma_c = 0.25 * 25 = 6.25$ MPa (Calotta)

11.2.2.2 Verifiche allo stato limite di fessurazione

Per le verifiche allo stato limite di fessurazione si definiscono diversi ordini di severità dello stato tensionale indotto sulle sezioni:

- Stato limite di decompressione (la tensione normale agente sulla sezione è ovunque di compressione o al più uguale a zero)
- Stato limite di formazione delle fessure (la tensione normale agente di trazione sulla fibra più sollecitata è:
 - $f_{ctm} / 1.2 = 0.3 * f_{ck}^{2/3} / 1.2 = 3.21 / 1.2 = 2.67$ MPa (Arco rovescio e murette)
 - $f_{ctm} / 1.2 = 0.3 * f_{ck}^{2/3} / 1.2 = 2.56 / 1.2 = 2.14$ MPa (Calotta)
- Stato limite di apertura delle fessure

Al fine di verificare la sezione nei confronti della fessurazione è necessario definire il valore massimo di apertura delle fessure e confrontarlo con quello imposto da normativa e riportato nella tabella seguente:

Gruppi di esigenze	Condizioni ambientali	Combinazione di azioni	Armatura			
			Sensibile		Poco sensibile	
			Stato limite	w_d	Stato limite	w_d
a	Ordinarie	frequente	ap. fessure	$\leq w_2$	ap. fessure	$\leq w_3$
		quasi permanente	ap. fessure	$\leq w_1$	ap. fessure	$\leq w_2$
b	Aggressive	frequente	ap. fessure	$\leq w_1$	ap. fessure	$\leq w_2$
		quasi permanente	decompressione	-	ap. fessure	$\leq w_1$
c	Molto aggressive	frequente	formazione fessure	-	ap. fessure	$\leq w_1$
		quasi permanente	decompressione	-	ap. fessure	$\leq w_1$

w_1, w_2, w_3 sono definiti al § 4.1.2.2.4.1, il valore di calcolo w_d , è definito al § 4.1.2.2.4.6. In particolare, i limiti sull'apertura delle fessure dipendono da:

- Combinazioni di carico
 - Quasi permanenti
 - Frequenti
- Condizioni ambientali (definite in base alle classi di esposizione riportate nella tabella sotto)

CONDIZIONI AMBIENTALI	CLASSE DI ESPOSIZIONE
Ordinarie	X0, XC1, XC2, XC3, XF1
Aggressive	XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3
Molto aggressive	XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4

- Sensibilità delle armature alla corrosione
 - Sensibile – (acciaio da precompresso)

- Poco sensibile – (acciaio ordinario)

I valori di apertura riportati nella tabella sopra sono:

$$w_1 = 0,2 \text{ mm}$$

$$w_2 = 0,3 \text{ mm}$$

$$w_3 = 0,4 \text{ mm}$$

Il valore di calcolo delle fessure (w_d) è pari a:

$$w_d = 1,7 w_m$$

$$w_m = \varepsilon_{sm} \Delta_{sm}$$

Per il caso in analisi si assume un valore di apertura delle fessure pari a $w_1 = 0.20 \text{ mm}$.