

REGIONE CAMPANIA

Acqua Campania S.p.A.

UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE
DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO E
POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE
POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

Stralcio Allegato IV D.L. 31.05.2021 n.77 - L. di conversione 21.07.2021 n.108

Responsabile Unico del Procedimento
Dirigente Ciclo Integrato delle Acque della G.R. della Campania
Ing. Rosario Manzi

Il Concessionario
Acqua Campania S.p.A.
Direttore Generale
Area Tecnica
(Ing. Gianluca Maria SALVIA)

I Progettisti



Coordinatore responsabile della
Integrazione delle Prestazioni
Specialistiche

Revisione	Data	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
0	Febbraio 2022	Integrazioni richieste dal Comitato Speciale (DPCM 4/11/2021)	P. Fantini	G. Ragazzo	F. Rossi
TITOLO : RELAZIONE TECNICA GALLERIA DI DERIVAZIONE E OPERE CONNESSE - ALLEGATO - RELAZIONE DI CALCOLO - CONCI PREFABBRICATI			Progettazione: 		
Allegato	ED.02.7.6		Revisione: 0	Scala: -	

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	4
1.1 Obiettivo della nota	4
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	5
2.1 Normative di riferimento.....	5
2.2 Letteratura scientifica.....	5
3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E CRITERIO DI VERIFICA	6
3.1 Proprietà dei materiali	6
3.1.1 Calcestruzzo gettato in opera per rivestimento definitivo	6
3.1.2 Acciaio per barre di armatura.....	6
3.1.3 Copriferro	6
3.2 Metodi di verifica	8
3.2.1 Metodo degli Stati Limite	8
3.2.2 Vita nominale, classe d'uso e caratteristiche di sismicità	9
3.3 Caratteristiche geotecniche	9
4. CARATTERISTICHE DELL'ANELLO IN CONCI PREFABBRICATI.....	12
4.1 Carpenteria	14
4.2 Armatura	15
4.3 Dispositivi di connessione	15
4.4 Giunto di impermeabilizzazione	16
5. PROCEDURA DI DIMENSIONAMENTO DEI CONCI	16
6. DIMENSIONAMENTO DEI CONCI IN FASE TRANSITORIA	17
6.1 Verifica in fase di scasseratura e di primo trasporto	18
6.2 Verifica in fase di stoccaggio	18
6.3 Verifica in fase di assemblaggio-manipolazione tramite erettore	19
6.4 Verifica in rapporto alla spinta della TBM.....	20
6.4.1 Calcolo della spinta di progetto dei conci	20
6.4.2 Verifica della pressione di contatto	21
6.4.3 Verifica dell'armatura di frettaggio	24
6.5 Verifica degli accessori	27

6.5.1	Verifica dei connettori a fronte di problemi d'installazione.....	27
6.5.2	Verifica dei connettori sotto la pressione di chiusura del gasket.....	27
6.5.3	Verifica dello spigolo del concio sotto l'effetto della spinta del gasket	28
6.5.4	Verifica dei coni di centraggio	29
7.	ANALISI DI INTERAZIONE TERRENO/STRUTTURA	29
7.1	Scelta delle sezioni di calcolo	29
7.2	Ipotesi alla base delle analisi numeriche.....	30
7.3	Definizione del tasso di deconfinamento.....	30
7.3.1	Criterio per l'analisi	30
7.3.2	Curve caratteristiche e di convergenza – FYR-c_75	32
7.3.3	Curve caratteristiche e di convergenza – FYR-ag_125.....	33
7.3.4	Curve caratteristiche e di convergenza – CPA_150.....	34
7.3.5	Curve caratteristiche e di convergenza – AV_100	35
7.3.6	Curve caratteristiche e di convergenza – AV_200.....	36
7.3.7	Curve caratteristiche e di convergenza – UFM_200.....	37
7.4	Analisi statica	38
7.4.1	Parametri geotecnici e pressioni idrauliche	38
7.4.2	Stato tensionale iniziale.....	38
7.4.3	Modellazione dello scarico generato dallo scavo	38
7.4.4	Modellazione del rivestimento definitivo.....	39
7.4.5	Analisi del rigonfiamento	40
7.4.6	Fasi di calcolo.....	42
7.5	Analisi sismica	42
7.5.1	Metodologia di calcolo.....	42
7.5.2	Modellazione numerica	45
7.6	Risultati delle analisi FEM – Anello corrente.....	45
7.6.1	FYR-c_75.....	46
7.6.2	FYR-ag_125	47
7.6.3	CPA_150	48
7.6.4	UFM_200	49

7.6.5	Riassunto delle sollecitazioni nell'anello corrente	50
7.7	Risultati delle analisi FEM – Anello rinforzato	52
7.7.1	FYR-c_15	52
7.7.2	AV_100	53
7.7.3	CPA-AV_200	54
7.7.4	UFM-AV_200.....	55
7.7.5	Riassunto delle sollecitazioni nell'anello rinforzato.....	56
8.	VERIFICHE STRUTTURALI.....	58
8.1	Verifica dei conci – Anello Corrente	59
8.2	Verifica dei conci – Anello Rinforzato.....	60
8.3	Verifica dei giunti – Anello Corrente	61
8.4	Verifica dei giunti– Anello Rinforzato	62

1. INTRODUZIONE

Questo elaborato è realizzato nell'ambito delle attività di progetto di fattibilità tecnica ed economica (con riferimento allo schema di decreto ministeriale recante "definizione dei contenuti della progettazione nei tre livelli progettuali" ai sensi dell'articolo 23, comma 3 del decreto legislativo 18 aprile 2016, n. 50, capo 2), concernenti l'intervento di utilizzo idropotabile delle acque dell'invaso di Campolattaro.



Fig. 1.1 – Configurazione dell'anello universale di conci per il rivestimento della galleria di derivazione

1.1 OBIETTIVO DELLA NOTA

Questo documento presenta le analisi e le verifiche dei conci che compongono il rivestimento definitivo della galleria di derivazione naturale ad un livello di Progetto Definitivo. Lo scopo del lavoro è quindi quello di verificare strutturalmente i conci sottoposti a diversi tipi di carico durante le principali fasi di costruzione:

- ✓ Fase di prefabbricazione (scasseratura, stoccaggio, trasporto),
- ✓ Fase di installazione (movimentazione con erettore, spinta dei martinetti)
- ✓ Fase di esercizio (interazione terreno struttura, azioni sismiche).

Per soddisfare i criteri di resistenza del rivestimento, ma anche di ottimizzazione del progetto, si definiscono due diverse sezioni tipo di rivestimento, che si differenziano per l'armatura installata:

- ✓ Anello corrente,
- ✓ Anello rinforzato.

2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 NORMATIVE DI RIFERIMENTO

- [1] Norme tecniche per le costruzioni, Approvate con Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018
- [2] Ordinanza PCM 3274 del 20/03/2003 e documenti correlati – Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.
- [3] EN 1990 Eurocodice 0: Criteri generali di progettazione strutturale
- [4] EN 1991 Eurocodice 1: Azioni sulle strutture
- [5] EN 1992 Eurocodice 2: Progettazione delle strutture in calcestruzzo
- [6] EN 1997 Eurocodice 7: Progettazione geotecnica
- [7] EN 1998 Eurocodice 8: Progettazione delle strutture per la resistenza sismica
- [8] UNI EN 206-1 “Calcestruzzo - Parte I: specificazione, prestazione e conformità”

2.2 LETTERATURA SCIENTIFICA

- [9] Guglielmetti V., Grasso P., Mahtab A., Xu S. [2007] : “Mechanized Tunnelling in Urban Areas”. Taylor and Francis, London.
- [10] Leonhardt [1977] : “Cemento Armato e Cemento Armato Precompresso - Calcolo di Progetto e Tecniche Costruttive”, Edizioni tecniche Milano.
- [11] Lunardi P., Gatti M., Cassani G. [2009] : The largest TBM-EPB machine in the world, designed to the Appennines. The experience of the Sparvo tunnel.
- [12] Maidl B. & Herrenknecht M. et al. [2012] : "Mechanised shield tunnelling" – Wilhelm Ernest 1 Sohn, 2end Edition.
- [13] Mair & Taylor [1996] : “Geotechnical Aspects of Underground Costruction in Soft Ground”.
- [14] Pescara M., Gaspari G.M., Repetto L. [2011] : “ Design of underground structures under seismic conditions: a long deep tunnel and a metro tunnel”.
- [15] Robert A. et al. [1997] : “Modélisation des effets du gonflement dans les ouvrages souterrains”, Tunnels et ouvrages souterrains, AFTES, Paris.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI E CRITERIO DI VERIFICA

3.1 PROPRIETÀ DEI MATERIALI

3.1.1 Calcestruzzo gettato in opera per rivestimento definitivo

- ✓ Calcestruzzo per conci prefabbricati:
 - Classe: C40/50
 - Resistenza cubica caratteristica: $R_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$
 - Modulo elastico: $E_c = 35220 \text{ N/mm}^2$
 - Resistenza cilindrica caratteristica: $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$
 - Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale: $\gamma_c = 1.50$
 - Coefficiente riduttivo per carichi di lunga durata: $\alpha_c = 0.85$
 - Resistenza cilindrica di progetto: $f_{cd} = 22.67 \text{ MPa}$

3.1.2 Acciaio per barre di armatura

- ✓ Barre a aderenza migliorata per elementi in cemento armato:
 - Classe di acciaio: B450C
 - Modulo elastico: $E_s = 206000 \text{ N/mm}^2$
 - Tensione di snervamento: $f_{yk} = 450 \text{ N/mm}^2$
 - Tensione di rottura: $f_{tk} = 540 \text{ N/mm}^2$
 - Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale: $\gamma_s = 1.15$

3.1.3 Copriferro

Secondo le NTC2018 le condizioni ambientali sono classificabili secondo tre condizioni:

Tab. 3.1 – Descrizione delle condizioni ambientali

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

La definizione delle classi di esposizione viene effettuata con riferimento alla norma UNI EN 206-1:2006 § 4.1. In assenza di indicazione specifiche provenienti dalla caratterizzazione geotecnica, la struttura in esame, è considerata in condizioni ambientali aggressive e con classe di esposizione XC4 – Ciclicamente bagnato ed asciutto.

La tabella seguente della norma UNI-EN 11104-2004 restituisce la classe minima del calcestruzzo da impiegarsi in funzione delle classi di esposizione determinate:

Tab. 3.2 – Valori minimi per la composizione e le proprietà del calcestruzzo

	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/degelo		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	XA3
Massimo rapporto a/c	-	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,45
Minima classe di resistenza ^{*)}	C12/15	C25/30	C28/35	C32/40	C32/40	C35/45	C28/35	C32/40	C35/45	32/40	25/30	28/35	28/35	32/40	32/40	32/40	35/45
Minimo contenuto in cemento (kg/m ³)	-	300	320	340	340	360	320	340	360	320	340	360	320	340	320	340	360
Contenuto minimo in aria (%)												3,0 ^{*)}					
Altri requisiti												Aggregati conformi alla UNI EN 12620 di adeguata resistenza al gelo/degelo			È richiesto l'impiego di cementi resistenti ai solfati ^{*)}		

*) 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/degelo, 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.

Al fine della protezione delle armature dalla corrosione, lo strato di ricoprimento di calcestruzzo (copriferro) deve essere dimensionato in funzione dell'aggressività dell'ambiente e della sensibilità delle armature alla corrosione, tenendo anche conto delle tolleranze di posa delle armature; a tale scopo si può fare utile riferimento alla UNI EN 1992-1-1.

Il copriferro nominale è definito come il copriferro minimo, c_{min} più un margine di progetto per gli scostamenti, Δc_{dev} :

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

Deve essere utilizzato il massimo valore di c_{min} che soddisfi sia i requisiti relativi all'aderenza ($c_{min,b}$), sia quelli relativi alle condizioni ambientali ($c_{min,dur}$).

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

Per far sì che le forze di aderenza siano trasmesse adeguatamente, e che il calcestruzzo sia sufficientemente compatto, si raccomanda che il copriferro minimo non sia inferiore ai valori di $c_{min,b}$ dati nel prospetto seguente.

Tab. 3.3 – Copriferro minimo $c_{min,b}$ richiesto con riferimento all'aderenza

Requisito relativo all'aderenza	
Disposizione delle armature	Copriferro minimo $c_{min,b}$ ^{*)}
Isolate	Diametro della barra
Raggruppate	Diametro equivalente (ϕ_n) (vedere punto 8.9.1)
*) Se la dimensione nominale massima dell'aggregato è maggiore di 32 mm, si raccomanda di maggiorare $c_{min,b}$ di 5 mm.	

Tab. 3.4 – Valori del copriferro minio $c_{min,dur}$ requisiti con riferimento alla durabilità per acciai da armatura ordinaria, in accordo alla EN 10080

Requisito ambientale per $c_{min,dur}$ (mm)							
Classe strutturale	Classe di esposizione secondo il prospetto 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / 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

I valori raccomandati in assenza di prescrizioni aggiuntive per i margini $\Delta C_{dur,g}$, $\Delta C_{dur,st}$, $\Delta C_{dur,add}$ è 0 mm.

$$c_{min} = \max \{31 \text{ mm}; 30 \text{ mm}; 10 \text{ mm}\} = 31 \text{ mm}$$

Nel calcolo del copriferro nominale, c_{nom} , si deve aumentare il copriferro minimo per tener conto degli scostamenti (ΔC_{dev}). Il copriferro minimo richiesto deve essere aumentato del valore assoluto dello scostamento negativo accettato. Per le opere prefabbricate, questo valore puo' assumere il valore di 5 mm, ma a questo stadio progettuale, per semplicità assumiam, in analogia ad altre strutture:

$$\Delta C_{dev} = 10 \text{ mm}$$

In riferimento all'analisi di durabilità, si assume, a favore di sicurezza e per praticità il copriferro riportato di seguito:

Tab. 3.5 – Definizione del copriferro nominale

Campo di impiego	Classe strutturale	Classe di esposizione ambientale	Classe di resistenza $[C(f_{ck}/R_{ck})_{min}]$	Copriferro nominale $C_{nom} = c_{min}+h$
Conci prefabbricati	S4	XC4	C40/50	45 mm

3.2 METODI DI VERIFICA

3.2.1 Metodo degli Stati Limite

Viste le caratteristiche dell'opera oggetto di questa nota si omettono le verifiche geotecniche di stabilità del fronte, che sono descritte nella nota di definizione dei parametri della macchina, e le verifiche al sollevamento idraulico non è necessaria vista le medio-alte coperture ed il contesto idrogeologico. Questa nota si limita alla verifica degli stati limite di tipo strutturale:

- ✓ STR: rottura interna o eccessiva deformazione della struttura o degli elementi

strutturali, nei quali la resistenza dei materiali contribuisce in modo significativo alla resistenza del sistema terreno-struttura.

Conformemente a questo approccio, i valori caratteristici sono calcolati agli stati limite attraverso dei coefficienti parziali, corrispondenti alle combinazioni di Stato Limite Ultimo (SLU) e di Stato Limite di Esercizio (SLE). I fattori sono riduttivi se applicati ai valori caratteristici della resistenza del materiale, mentre sono amplificativi se applicati alle azioni agenti.

3.2.2 Vita nominale, classe d'uso e caratteristiche di sismicità

Con riferimento ad una vita utile di 100 anni, classe d'uso IV, e sottosuolo di classe B, si calcolano i seguenti periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica:

- ✓ SLO: $T_R = 120$ anni
- ✓ SLD: $T_R = 201$ anni
- ✓ SLV: $T_R = 1898$ anni
- ✓ SLC: $T_R = 2475$ anni

A fronte di una categoria di sottosuolo di tipo B, e di una verifica allo SLV si ottiene:

- ✓ $S=1.00$
- ✓ $a_{max}= 0.45g$

3.3 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

La galleria artificiale è collocata in corrispondenza del portale lato Monte. Il profilo geologico è riportato qui di seguito.

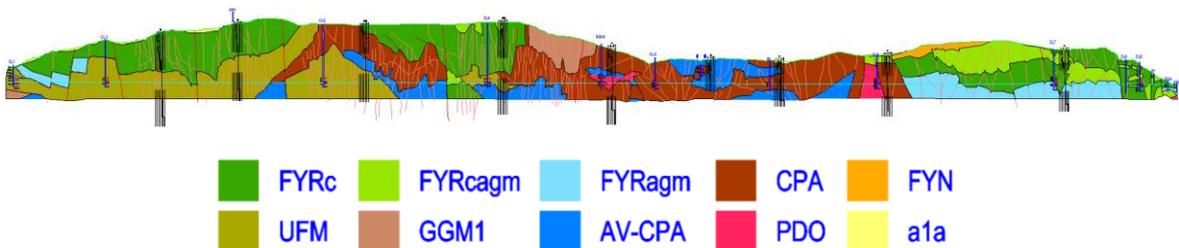


Fig. 3.1 – Profilo geologico della galleria di derivazione

I parametri risultanti dalla caratterizzazione geotecnica sono riassunti nelle seguenti tabelle:

Tab. 3.6 – Parametri geotecnici – lontano dalle zone di faglia

LONTANO DALLE ZONE DI FAGLIA									
UFM PDO	copertura	γ	c'	φ'	E'	k_o	GSI	Ksat	
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]	
	<50	22 - 24	40	31 - 35	80 - 100	0.9	21 - 26	1.00E-07	1.00E-08
	50-100	22 - 24	80	31 - 35	200 - 250	0.9	21 - 26	1.00E-07	1.00E-08
	100-150	22 - 24	105	31 - 35	250 - 300	0.8	21 - 26	1.00E-07	1.00E-08
150-200	22 - 24	120	31 - 35	300 - 400	0.7	21 - 26	1.00E-07	1.00E-08	
FYR-C	copertura	γ	c'	φ'	E'	k_o	GSI	Ksat	
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]	
	<50	25 - 27	50	35	300	1.1	30 - 35	1.00E-02	1.00E-05
	50-100	25 - 27	120	36	400	0.9	30 - 35	1.00E-02	1.00E-05
	100-150	25 - 27	150	37	600	1	30 - 35	1.00E-02	1.00E-05
150-200	25 - 27	160	37	650	1	30 - 35	1.00E-02	1.00E-05	
FYR-ag	copertura	γ	c'	φ'	E'	E_u	k_o	c_u	Ksat
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]
	<50	19 - 20	10	24 - 26	110	180	0.6	150	1.00E-08 1.00E-09
	50-100	19 - 20	30	24 - 26	160	240	1	200	1.00E-08 1.00E-09
	100-150	20 - 21	40	26 - 28	300	500	0.8	450	1.00E-08 1.00E-09
150-200	20 - 21	45	26 - 28	350	600	0.8	500	1.00E-08 1.00E-09	
CPA	copertura	γ	c'	φ'	E'	E_u	k_o	c_u	Ksat
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]
	<50	20 - 21	40	27.5	80 - 130	480	1	400	1.00E-07 1.00E-08
	50-100	20 - 21	45	27.5	130 - 200	720	0.9	600	1.00E-07 1.00E-08
	100-150	20 - 22	60	24	200 - 350	840	0.8	700	1.00E-07 1.00E-08
100-200	20 - 22	70	24	350 - 450	1080	0.8	900	1.00E-07 1.00E-08	
AV-CPA	copertura	γ	c'	φ'	E'	E_u	k_o	c_u	Ksat
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]
	<50	19 - 21	25	23 - 25	30 - 70	480	1.1	400	1.00E-08 1.00E-09
	50-100	19 - 21	30	23 - 25	70 - 150	720	1	600	1.00E-08 1.00E-09
	100-150	19 - 21	35	23 - 25	150 - 250	840	0.9	700	1.00E-08 1.00E-09
100-200	19 - 21	50	23 - 25	250 - 450	1080	0.8	900	1.00E-08 1.00E-09	

Tab. 3.7 – Parametri geotecnici – attraversamento delle faglie

ATTRAVERSAMENTO FAGLIE									
UFM PDO	copertura	γ	c'	ϕ'	E'	k_o	GSI	Ksat	
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]	
	<50	23 - 25	20	31	70	0.7 - 0.9	18	1.00E-07	1.00E-08
	50-100	23 - 25	40	31	170	0.7 - 0.9	18	1.00E-07	1.00E-08
	100-150	23 - 25	50	31	190	0.7 - 0.9	18	1.00E-07	1.00E-08
150-200	23 - 25	60	31	230	0.7 - 0.9	18	1.00E-07	1.00E-08	
FYR-C	copertura	γ	c'	ϕ'	E'	k_o	GSI	Ksat	
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]	
	<50	25 - 27	20	33	80	0.8	25	1.00E-02	1.00E-05
	50-100	25 - 27	50	33	160	0.8	25	1.00E-02	1.00E-05
	100-150	25 - 27	60	33	300	0.8	25	1.00E-02	1.00E-05
150-200	25 - 27	70	33	350	0.8	25	1.00E-02	1.00E-05	
FYR-ag	copertura	γ	c'	ϕ'	E'	E_u	k_o	c_u	Ksat
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]
	<50	19 - 20	10	23	66	180	0.5	150	1.00E-08 1.00E-09
	50-100	19 - 20	10	23	96	240	0.9	200	1.00E-08 1.00E-09
	100-150	20 - 22	10	23	180	500	0.7	450	1.00E-08 1.00E-09
150-200	20 - 22	10	23	210	600	0.7	500	1.00E-08 1.00E-09	
CPA	copertura	γ	c'	ϕ'	E'	E_u	k_o	c_u	Ksat
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]
	<50	20 - 21	10	24	60	480	0.9	400	1.00E-07 1.00E-08
	50-100	20 - 21	10	24	90	720	0.8	600	1.00E-07 1.00E-08
	100-150	20 - 21	10	24	150	840	0.7	700	1.00E-07 1.00E-08
100-200	20 - 22	70	24	350 - 450	1080	0.7	900	1.00E-07 1.00E-08	
AV-CPA	copertura	γ	c'	ϕ'	E'	E_u	k_o	c_u	Ksat
	[m]	[kN/mc]	[kPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]
	<50	19 - 21	10	22	30	480	1	400	1.00E-08 1.00E-09
	50-100	19 - 21	10	22	50	720	0.9	600	1.00E-08 1.00E-09
	100-150	19 - 21	10	22	130	840	0.8	700	1.00E-08 1.00E-09
100-200	19 - 21	10	22	230	1080	0.7	900	1.00E-08 1.00E-09	

4. CARATTERISTICHE DELL'ANELLO IN CONCI PREFABBRICATI

Due diverse sezioni tipo di rivestimento della galleria di derivazione sono definite in funzione delle condizioni geologiche e geotecniche riscontrate lungo il tracciato:

- ✓ **Anello corrente:**
conci armati con barre principali $\phi 10$, per un'incidenza di circa 100 kg di acciaio / 1 m³ di cls.
- ✓ **Anello rinforzato:**
conci armati con barre principali $\phi 14$, per un'incidenza di circa 150 kg di acciaio / 1 m³ di cls.

Gli anello rinforzati, sono previsti in corrispondenza di zone ove ci si attenda un incremento dei carichi agenti o una dissimmetria di comportamento:

- ✓ attraversamento di faglie principali (indicate in rosso sul profilo geologico),
- ✓ zone di taglio particolarmente estese quale, ad esempio, il tratto F,
- ✓ nelle formazioni in cui si prevede un comportamento rigonfiante di carattere marcato e differito nel tempo (AV, AV-CPA)
- ✓ di intersezione tra le strutture (galleria di derivazione/pozzo piezometrico, galleria di derivazione/discenderia laterale, punto di arrivo della EPB) ove è probabile sopporre un incremento puntuale di carico agente,
- ✓ prima e dopo le zone sopra menzionate, per una distanza minima di $2,5 \cdot D$. Si suggerisce l'installazione di 10 anelli immediatamente prima e dopo l'inizio delle zone identificate (totale di 20 anelli = 30 m).

Inoltre, in corrispondenza delle faglie principali e nelle zone di intersezione con le altre opere di progetto, si prevede l'installazione di bulloni tra i conci in acciaio inossidabile, da installare durante il montaggio dell'anello e lasciare in opera in fase definitiva.

Di seguito, vengono riportati il profilo longitudinale indicante la distribuzione delle sezioni tipo di rivestimento e la tabella con i settori di applicazione.

La seguente distribuzione potrà essere adattata in base alle osservazioni provenienti dalle indagini in corso d'opera (posizione / spessore delle faglie, ...).

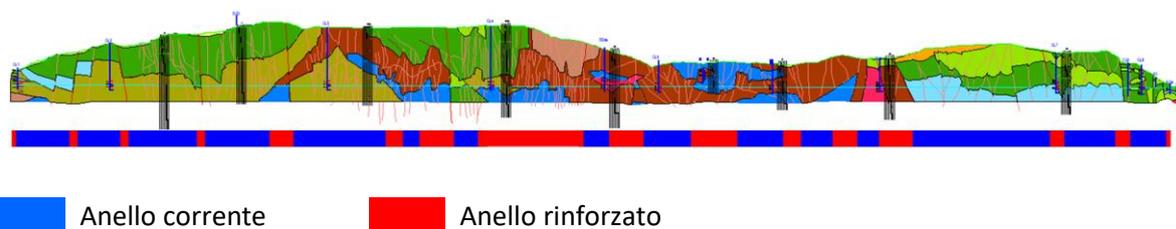


Fig. 4.1 – Applicazione delle sezioni tipo di rivestimento lungo la galleria di derivazione

Tab. 4.1 – Parametri geotecnici – attraversamento delle faglie

Descrizione	PK inizio [m]	Pk fine [m]	AN corrente	AN rinforzato
			L parziale [m]	L parziale [m]
Pozzo Campolattaro	0	30		30
UFM / FYR-ag	30	370	340	
Faglia	370	430		60
UFM	430	700	270	
Faglia	700	760		60
UFM / FYR-c	760	1200	440	
Faglia	1200	1260		60
UFM	1260	1675	415	
AV / CPA	1675	1835		160
UFM	1835	2435	600	
AV / CPA	2435	2545		110
CPA	2545	2650	105	
AV / CPA + Faglia	2650	2880		230
FYR-c/agm	2880	3040	160	
UFM / AV	3040	3190		150
UFM	3190	3230		40
AV / CPA	3230	3620		390
CPA	3620	3665		45
Faglia	3665	3725		60
CPA	3725	3890	165	
AV / CPA	3890	4120		230
CPA	4120	4420	300	
AV + Discenderia	4420	4730		310
CPA	4730	5025	295	
Faglia	5025	5145		120
CPA	5145	5345	200	
AV	5345	5505		160
PDO / CPA	5505	5650	145	
Faglia	5650	5870		220
FYR-c FYR-ag	5870	6760	890	
Faglia	6760	6820		60
FYR-ag	6820	7190	370	
Faglia + Pozzo piezometrico	7190	7290		100
FYR-c/agm	7290	7513	223	
Imbocco Monte + dima	7513	7543		30
Lunghezza Tot [m]			4918	2625
Percentuale sul Tot			65%	35%
Incidenza media [kg/m3]			≈ 120	

4.1 CARPENTERIA

La geometria dell'anello universale, e dei 6 conci trapezoidali che lo compongono, è descritta di seguito ed è uguale per entrambe le sezioni tipo di rivestimento.

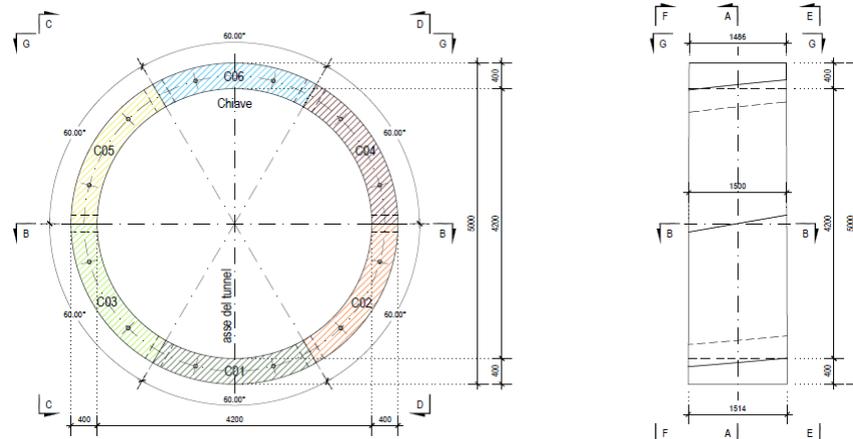
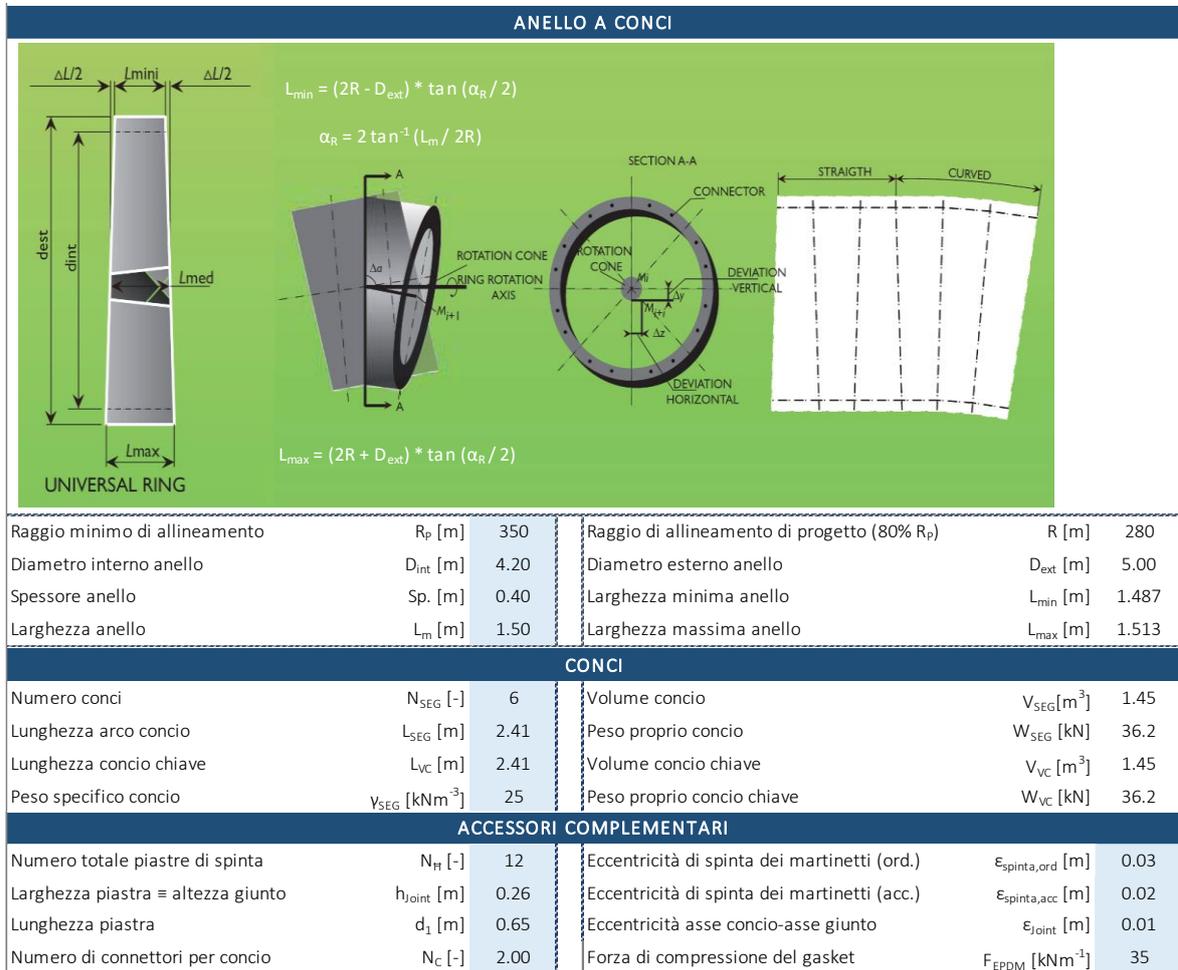


Fig. 4.2 – Dimensioni geometriche dell'anello di conci prefabbricati

4.2 ARMATURA

La differenza in termini di armatura tra anello corrente e rinforzato riguarda le barre principali, quelle perimetrali e di frettaggio. Il dettaglio dei ferri è riportato in tabella.

Tab. 4.2 – Sezione resistente in c.a. – Sezione scatolare

Tipo di armatura	AN corrente	AN rinforzato
Barre circolari	12+12 $\Phi 10$	12+12 $\Phi 14$
Barre longitudinali	1+1 $\Phi 10/20$ cm	1+1 $\Phi 10/20$ cm
Armatura perimetrale (lato spinta)	2+2 $\Phi 10$	2+2 $\Phi 14$
Armatura perimetrale (altri lati)	2 $\Phi 10$	2 $\Phi 12$
Armatura di frettaggio (lato spinta)	staffa + spillo $\Phi 10/10$ cm	staffa + spillo $\Phi 12/10$ cm
Armatura di frettaggio (altri lati)	staffa $\Phi 10/20$ cm	staffa $\Phi 12/20$ cm
Armatura a taglio	spillo $\Phi 10/30 \times 40$ cm	spillo $\Phi 10/30 \times 40$ cm
Spirali per inserti e coni di centraggio	$\Phi 8$	$\Phi 8$

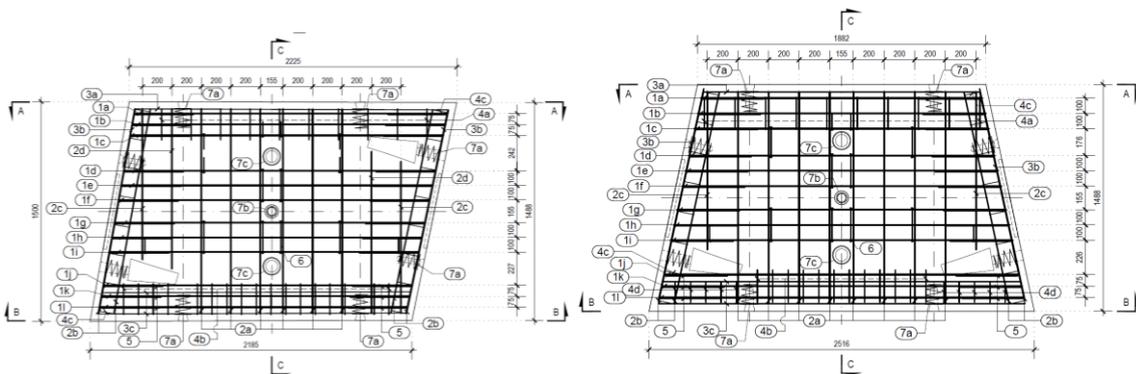


Fig. 4.3 – Tipologico di armatura per concio parallelepipedo (sx) e concio di chiave (dx)

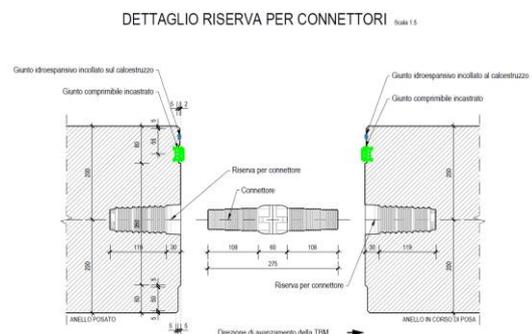
4.3 DISPOSITIVI DI CONNESSIONE

Per la connessione tra anelli si adottano dei connettori con le seguenti caratteristiche di resistenza minima:

Resistenza al pull-out > 80 kN

Resistenza al taglio > 100 kN

Fig. 4.4 – Dettaglio di connettore tra anelli



Per la connessione tra conci di uno stesso anello si adottano dei bulloni in acciaio $\phi 25$ di classe 8.8.

I bulloni vengono serrati inseguito all'installazione dell'anello, e possono essere ritirati ad una distanza minima di 50 m dall'ultimo anello installato.

Nella zona dell'imbocco, nelle zone di faglia e di connessione con altre opere si prevedono dei bulloni in acciaio inox da mantenere in fase definitiva.



Fig. 4.5 – Dettaglio di bullone tra conci

4.4 GIUNTO DI IMPERMEABILIZZAZIONE

Per garantire l'impermeabilizzazione dei conci, si prevede un doppio giunto sulle quattro facce di ogni concio, nella gola estradossale:

- ✓ Gasket in EPDM, tenuta >10 bar
- ✓ Giunto idro-espansivo incollato sul calcestruzzo

Ai fini dei calcoli, si considera una forza di compressione del giunto di 35 kN/m.

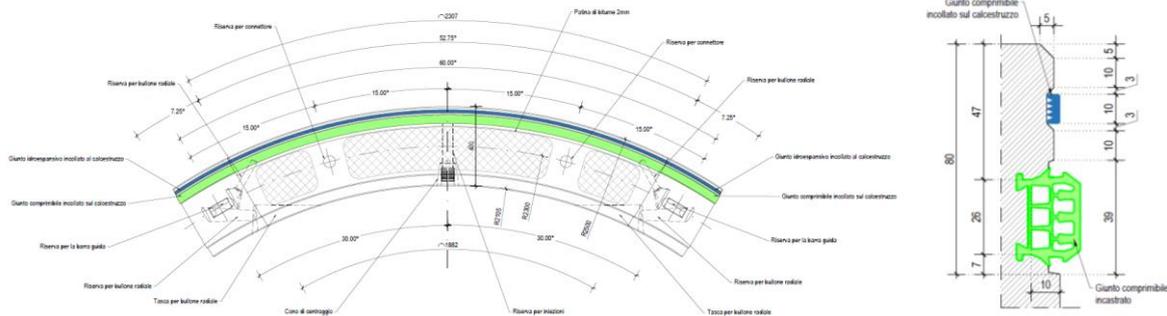


Fig. 4.6 – Dettaglio del doppio giunto di impermeabilizzazione dei conci

5. PROCEDURA DI DIMENSIONAMENTO DEI CONCI

Il rivestimento del tunnel si compone di conci prefabbricati in cemento armato installati a livello dello scudo di coda della TBM, alla fine di ogni avanzamento della macchina. Durante la loro vita, i conci sono soggetti a differenti stati di sforzo, in termini di schema statico e valore del carico applicato.

La procedura scelta per il dimensionamento dei conci a come obiettivo la verifica di questi elementi durante tutte le fasi di vita, dalla fase di prefabbricazione fino alla fase di

esercizio (lungo temine). Per le prime fasi (prefabbricazione, stoccaggio, installazione dei conci) le verifiche sono svolte in maniera analitica. Per la fase di esercizio (carico del terreno, carico idraulico, sisma) si ricorre alla modellazione numerica dell'interazione terreno struttura.

Le verifiche condotte sono riassunte di seguito:

- ✓ Fase di prefabbricazione (transitoria)
 - Verifica in fase di scasseratura
 - Verifica in fase di primo trasporto
 - Verifica in fase di stoccaggio
- ✓ Fase di installazione (transitoria)
 - Verifica in fase di assemblaggio-manipolazione tramite erettore
 - Verifica in rapporto alla spinta della TBM
 - Verifica degli accessori
- ✓ Fase di esercizio
 - Verifiche allo SLU e SLE dei conci soggetti al carico del terreno (compreso il rigonfiamento) e idraulico
 - Verifiche SLV sotto azione sismica
 - Verifiche dei giunti longitudinali

6. DIMENSIONAMENTO DEI CONCI IN FASE TRANSITORIA

Come descritto precedentemente, la fase transitoria comprende la fase di prefabbricazione e quella di installazione dei conci.

La fase di prefabbricazione è la medesima per entrambi i tipi di anello, dunque le verifiche verranno condotte unicamente l'anello corrente, considerando uno stadio di maturazione parziale: $f_{ck30\%}=30\%*f_{ck,28h}$. La fase di installazione presenta una variabile importante lungo il tracciato: la spinta sui martinetti per avanzare o, in caso di emergenza, sbloccare la macchina. Si distingueranno quindi i carichi agenti e le verifiche per Anello Corrente e Anello Rinforzato. Di seguito sintetizziamo il momento resistente, il taglio resistente e le armature di frettaggio adoperate nelle verifiche transitorie.

Tab. 6.1 – Sforzi resistenti e armature di frettaggio per le verifiche transitorie

AN Corrente				AN Rinforzato	
Med (30%)	Ved (30%)	Med (28g)	Ved (28g)	Frettaggio	Frettaggio
141 kNm	352 kN	165 kNm	352 kN	2 Φ 10/10cm 2 Φ 10	2 Φ 12/10cm 2 Φ 14

6.1 VERIFICA IN FASE DI SCASSERATURA E DI PRIMO TRASPORTO

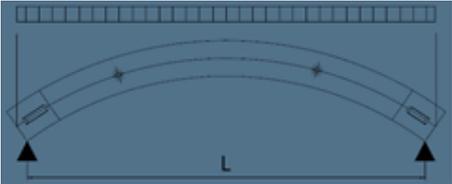
La resistenza minima per poter scasserare i conci è il 30% della loro resistenza caratteristica di compressione. Lo schema statico assunto per entrambe le verifiche è il seguente, ovvero una trave appoggio-appoggio soggetta a carico distribuito uniforme:

Per la verifica in fase di scasseratura, si considera il seguente carico:

- ✓ Peso proprio (W_{SEG}) aumentato per tenere conto degli effetti dinamici (ζ_s) $\rightarrow (1 + \zeta_s) * W_{SEG}$,
- ✓ Tensione tangenziale di aderenza tra il lato del concio e il cassero (t_A).

Per la verifica in fase di primo trasporto, si considera il seguente carico:

- ✓ Peso proprio (W_{SEG}) aumentato ulteriormente per tenere conto di maggiori effetti dinamici (ζ_{1T}) $\rightarrow (1 + \zeta_{1T}) * W_{SEG}$

VERIFICA DEI SEGMENTI IN FASE DI SCASSERATURA E PRIMO TRASPORTO					
Peso proprio segmento	W_{SEG} [kNm ⁻¹]	15.0			
Coeff. effetti dinamici di scasseratura	ζ_s [-]	0.3			
Coeff. effetti dinamici di trasporto	ζ_{1T} [-]	0.5			
Aderenza segmento-cassero	t_A [kPa]	4.0			
Larghezza segmento	L_m [m]	1.5			
Lunghezza arco segmento	L_{SEG} [m]	2.4			
Coeff. di sicurezza SLU	γ_{SLU} [-]	1.30			
$f_{ck1} = 30\% f_{ck,28j}$					
Momento flettente resistente per N=(M_{Rd} [kNm]	141	$\Sigma F_s = (1 + \zeta_s) * W_{SEG} + t_A * L_m$ $\Sigma F_{1T} = (1 + \zeta_{1T}) * W_{SEG}$ $M_{Ed} = [\Sigma F * L_{SEG}^2 / 8] * \gamma_{SLU}$ $V_{Ed} = [\Sigma F * L_{SEG} / 2] * \gamma_{SLU}$		
Resistenza a taglio di progetto	V_{Rd} [kN]	352			
Momento flettente sollecitante SLU	M_{Ed} [kNm]	24		Fattore di sicurezza "scasseratura" $FS_{S,M}$	5.9
Taglio sollecitante SLU	V_{Ed} [kN]	40		Fattore di sicurezza "scasseratura" $FS_{S,V}$	8.8
Momento flettente sollecitante SLU	M_{Ed} [kNm]	21		Fattore di sicurezza "primo trasporto" $FS_{1T,M}$	6.6
Taglio sollecitante SLU	V_{Ed} [kN]	35		Fattore di sicurezza "primo trasporto" $FS_{1T,V}$	10.0

La verifica è soddisfatta.

6.2 VERIFICA IN FASE DI STOCCAGGIO

I conci verranno poi trasportati sul sito di stoccaggio. In questa fase, le caratteristiche di 28 giorni non sono ancora raggiunte (si assume ancora la resistenza al 30%). I conci vengono impilati in gruppi di anelli. Il concio situato più in basso nella pila riprende quindi il carico indotto dall'accatastamento degli altri. Il peso dei conci viene trasmesso tramite i cunei su cui poggiano, per cui le risultanti sono due forze concentrate (N) in corrispondenza di essi.

Lo schema statico è quello di una trave appoggio-appoggio, con due sbalzi laterali e si assume un'eccentricità (dR-dN) di 10 cm tra il peso degli anelli superiori e la reazione degli appoggi (R) del concio sottostante.

Si il seguente carico:

- ✓ Peso proprio di un concio (W_{SEG}) aumentato per tenere conto degli effetti dinamici (ζ_{D-V}) $\rightarrow (1 + \zeta_{D-V}) * W_{SEG}$
- ✓ Peso proprio degli altri 5 conci della pila (W_{SEG}) senza fattore di amplificazione dinamica.

VERIFICA DEI SEGMENTI IN FASE DI STOCCAGGIO							
Numero di segmenti per colonna	$N_{\%}$ [-]	6	$N = [([N_{\%} - 2] * W_{SEG} * L_{SEG}) + \zeta_{D-V} * W_{SEG} * L_{SEG}] / 2$ $R = [W_{SEG} * L_{SEG}] / 2 + N$				
Coeff. effetti dinamici/di vibrazione	ζ_{D-V} [-]	1.5					
Interasse appoggi	d_R [m]	0.8					
Supports maximal eccentricity	d_N [m]	0.6					
Altezza utile sezione	d [m]	0.35					
Coeff. di riduzione a taglio (EC2 - §6.2)	β [-]	0.25					
Peso totale su segmento di base	N [kN]	99.41					
Reazione appoggi	R [kN]	117.49					
$f_{ck1} = 30\% f_{ck,28j}$							
Momento flettente resistente per $N=($	M_{Rd} [kNm]	141					
Resistenza a taglio di progetto	V_{Rd} [kN]	352					
Sugli appoggi	$M_{Ed} = [W_{SEG} * (L_{SEG}/2 - d_R/2)^2 / 2] * \gamma_{SLU}$ $V_{Ed} = [W_{SEG} * (L_{SEG}/2 - d_R/2)] * \gamma_{SLU} * \beta$						
Con eccentricità	$M_{Ed} = ([W_{SEG} * (L_{SEG}/2 - d_N/2)^2 / 2] - [R * (d_R - d_N)/2]) * \gamma_{SLU}$ $V_{Ed} = [W_{SEG} * (L_{SEG}/2 - d_N/2) - R] * \gamma_{SLU} * \beta$						
In mezzeria	$M_{Ed} = ([W_{SEG} * (L_{SEG}/2)^2 / 2] - [R * d_R/2] + [N * d_N/2]) * \gamma_{SLU}$ $V_{Ed} = [W_{SEG} * (L_{SEG}/2) - R + N] * \gamma_{SLU}$						
Momento flettente sollecitante SLU	M_{Ed} [kNm]	6.32	FS "sugli appoggi"	$FS_{APP,M}$	22.3		
Taglio sollecitante SLU	V_{Ed} [kN]	3.92		$FS_{APP,V}$	89.7		
Momento flettente sollecitante SLU	M_{Ed} [kNm]	7.29	FS "con eccentricità"	$FS_{ECC,M}$	19.3		
Taglio sollecitante SLU	V_{Ed} [kN]	33.77		$FS_{ECC,V}$	10.4		
Momento flettente sollecitante SLU	M_{Ed} [kNm]	8.17	FS "in mezzeria"	$FS_{MEZZ,M}$	17.3		
Taglio sollecitante SLU	V_{Ed} [kN]	0		$FS_{MEZZ,V}$	∞		

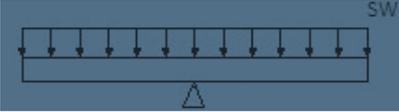
La verifica è soddisfatta.

6.3 VERIFICA IN FASE DI ASSEMBLAGGIO-MANIPOLAZIONE TRAMITE ERETTORE

A questa fase, i conci hanno raggiunto le loro caratteristiche finali, cioè il 100% della resistenza. Questa fase è assimilata ad una trave con un punto di appoggio, rappresentato dall'erettore del concio.

Si considera il seguente carico:

- ✓ Peso proprio (W_{SEG}) aumentato per tenere conto degli effetti dinamici-manipolazione (ζ_{MV}) $\rightarrow (1 + \zeta_{MV}) * W_{SEG}$

VERIFICA DEI SEGMENTI IN FASE DI ASSEMBLAGGIO			
Peso proprio concio	W_{SEG} [kNm ⁻¹]	15.0	
Coeff. effetti di manipolazione/di vibrazione	ζ_{MV} [-]	0.5	
Lunghezza arco concio	L_{SEG} [m]	2.4	
Coeff. di sicurezza SLU	γ_{SLU} [-]	1.30	
$f_{ck1} = f_{ck,28j}$			
Momento flettente resistente per N=0	M_{Rd} [kNm]	141	$\Sigma F = W_{SEG} + \zeta_{MV} * W_{SEG}$
Resistenza a taglio di progetto	V_{Rd} [kN]	352	$M_{Ed} = [\Sigma F * (L_{SEG} / 2)^2 / 2] * \gamma_{SLU}$
Momento flettente sollecitante SLU	M_{Ed} [kNm]	21.24	$V_{Ed} = [\Sigma F * L_{SEG} / 2] * \gamma_{SLU}$
Taglio sollecitante SLU	V_{Ed} [kN]	35.25	FS "manipolazione dall'erettore" FS_M 6.6
			FS_V 10.0

La verifica è soddisfatta.

6.4 VERIFICA IN RAPPORTO ALLA SPINTA DELLA TBM

La forza di spinta della TBM è trasferita tramite i martinetti al rivestimento. Questa forza agisce in direzione longitudinale e induce degli sforzi di compressione sulle placche di spinta dei martinetti, come rappresentato dalla seguente vista sviluppata.

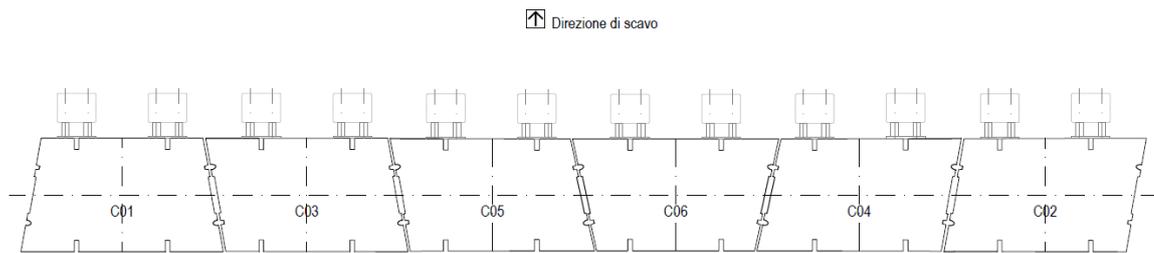


Figura 1- Spinta dei martinetti sui conci: due martinetti agiscono su ciascun concio

6.4.1 Calcolo della spinta di progetto dei conci

Per poter avanzare, la TBM esercita una spinta, parallela all'asse della galleria, tramite i martinetti di spinta. La spinta è esercitata sulla faccia dei conci orientata verso la direzione di avanzamento. La spinta totale esercitata dalla TBM è definita in funzione delle condizioni geomeccaniche dell'ammasso al fronte e al contorno dello scudo, oltre che della pressione di confinamento applicata.

I valori di calcolo della spinta totale sono determinati a partire dalle formulazioni proposte in letteratura (JSCE, Maidl, Godinez):

$$P = \gamma_P \cdot \sum P = \gamma_P \cdot (P_{fr} + P_{PC} + P_{Pt} + P_j + P_{ts} + P_{exc})$$

I dettagli di questa formula sono riportati nella nota di Basi di Calcolo DOC.GN.14.01.

Le due condizioni più gravose per ogni tipo di anello sono analizzate:

- ✓ Anello Corrente: attraversamento FYR-ag ($\sigma_m=450$ kPa calcolata con il metodo di Terzaghi, $P_{TBM}=3.5$ bar),
- ✓ Anello Rinforzato: attraversamento AV in zona di faglia ($\sigma_m=900$ kPa calcolata con il metodo di Terzaghi, $P_{TBM}=4.5$ bar).

La spinta eccezionale è 1.5 volte la spinta ordinaria. Per il caso dell'anello Rinforzato, una ulteriore maggiorazione del 10% è applicata alla spinta di calcolo eccezione P_{fr} , vista la natura rigonfiante delle formazioni attraversate.

Le spinte di calcolo dei conci e di dimensionamento della macchina potrebbero risultare più alte di quelle indicate nel profilo dei parametri di scavo, in quanto si considera una condizione critica in cui l'attrito con il suolo agisca su tutta la lunghezza dello scudo.

SPINTA DELLA TBM - ANELLO CORRENTE				
Raggio esterno scudo (valore medio)	R_s [m]	2.675	Forza di attrito tra scudo e terreno	P_{fr} [kN] 14130
Sezione scudo	A_s [m ²]	22.5	Forza totale normale allo scudo	P_{pc} [kN] 7868
Lunghezza scudo	L_s [m]	11.0	Forza richiesta per scavo	P_{exc} [kN] 6300
Pressione radiale allo scudo	σ_m [kPa]	450	Forza richiesta per trasporto back-up	P_{ts} [kN] 420
Peso totale TBM (scudo + back-up)	F_w [ton]	1100	$\Sigma F = P_{fr} + P_{pc} + P_{exc} + P_{ts}$ $T_{TBM} = \gamma_F * \Sigma F$	
Coeff. di attrito lubrificante	μ [-]	0.15	Fattore di sicurezza	γ_F [-] 1.1
Pressione di confinamento della TBM	P_c [bar]	3.5	Spinta totale TBM	$T_{TBM,ord}$ [MN] 32
Number of cutters	N_{out} [-]	42	Spinta accidentale TBM	$T_{TBM,acc}$ [kN] 47
Force on single cutter	P_{out} [kN]	150		
Forza lineare per trasporto back-up	P_l [kNm ⁻¹]	25		

SPINTA DELLA TBM - ANELLO RINFORZATO				
Raggio esterno scudo (valore medio)	R_s [m]	2.675	Forza di attrito tra scudo e terreno	P_{fr} [kN] 21287
Sezione scudo	A_s [m ²]	22.5	Forza totale normale allo scudo	P_{pc} [kN] 10116
Lunghezza scudo	L_s [m]	11.0	Forza richiesta per scavo	P_{exc} [kN] 6300
Pressione radiale allo scudo	σ_m [kPa]	900	Forza richiesta per trasporto back-up	P_{ts} [kN] 420
Peso totale TBM (scudo + back-up)	F_w [ton]	1100	$\Sigma F = P_{fr} + P_{pc} + P_{exc} + P_{ts}$ $T_{TBM} = \gamma_F * \Sigma F$	
Coeff. di attrito lubrificante	μ [-]	0.12	Fattore di sicurezza	γ_F [-] 1.1
Pressione di confinamento della TBM	P_c [bar]	4.5	Spinta totale TBM	$T_{TBM,ord}$ [MN] 42
Number of cutters	N_{out} [-]	42	Spinta accidentale TBM	$T_{TBM,acc}$ [kN] 69
Force on single cutter	P_{out} [kN]	150		
Forza lineare per trasporto back-up	P_l [kNm ⁻¹]	25		

6.4.2 Verifica della pressione di contatto

In questo sottoparagrafo si verifica unicamente la tensione di compressione nel calcestruzzo, quindi non distinguiamo tra i due tipi di rivestimento, essendo la sezione in cls la medesima. La spinta considerata è quella massima lungo il tracciato (Anello Rinforzato): $T_{TBM,ORD}=42$ MN , $T_{TBM,acc}=69$ MN.

Resistenza del concio

Al fine di assumere che la spinta della TBM (T_{TBM}) possa essere ripresa dai conci, due combinazioni di carico sono prese in conto per la verifica:

- ✓ La combinazione fondamentale ELU, che permette di verificare la spinta totale della TBM in condizioni ordinarie,
- ✓ La combinazione accidentale ELU, che permette di verificare la spinta totale della TBM in condizioni eccezionali.

La forza generata (F_{SD}) su ciascun punto di contatto tra i martinetti e i conci è data dalla forza della TBM diviso il numero dei punti (N_H), ovvero 2 su ogni concio, in totale 12.

Al fine di verificare la resistenza di ciascun concio, si deve considerare la forza totale (N_{SD}) esercitata su ciascun concio per il numero di placche (n_H).

Considerando ci sia sempre una certa eccentricità (ϵ_{spinta}) della spinta, si crea un momento flettente (M_{SD}), tenuto in considerazione nelle verifiche.

Come mostrato nei diagrammi sottostanti d'interazione M-N, sia per il caso ordinario che nel caso accidentale, gli sforzi sono ammissibili.

Schiacciamento cls sotto le piastre di spinta

Si verifica l'assenza del fenomeno di schiacciamento locale del cls al di sotto delle piastre di spinta dei martinetti. Affinché la verifica sia soddisfatta, deve valere la seguente disequazione:

$$F_{Sd} \leq F_{Rd} \leq F_{max}$$

Dove:

- ✓ F_{Sd} = forza sollecitante di spinta su una placca = T_{TBM} / N_H
- ✓ F_{Rd} = resistenza alla pressione di contatto = $A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot \sqrt{A_{c1} / A_{c0}}$
- ✓ F_{max} = resistenza alla pressione massima di contatto = $3 \cdot A_{c0} \cdot f_{cd}$

Di seguito uno schema di diffusione delle tensioni attraverso il concio, dal quale si può determinare l'area di diffusione.

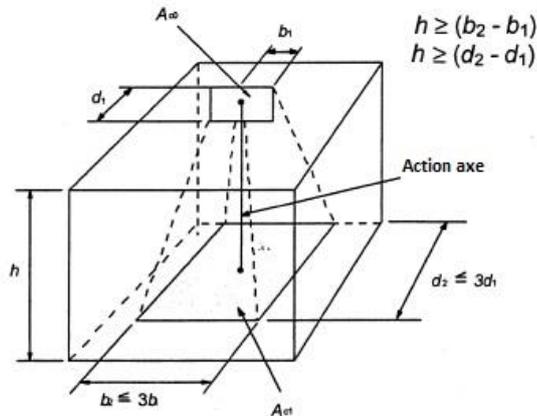


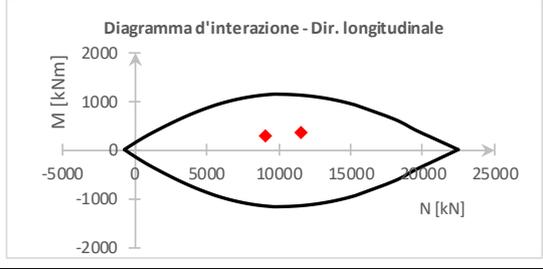
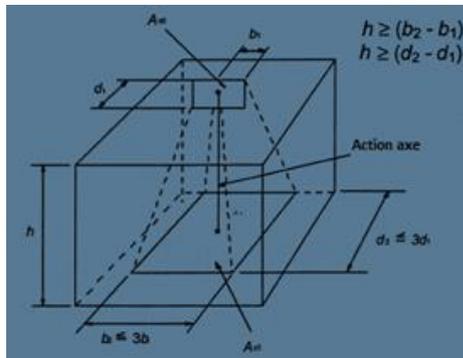
Figura 2- Schema di diffusione delle tensioni

Si ha dunque che la superficie della zona di contatto del carico è determinata come:

$$A_{c0} = b_1 \cdot d_1$$

Mentre la superficie diffusa attraverso la larghezza del concio si definisce come:

$$A_{c1} = b_2 \cdot d_2$$

VERIFICA DEI CONCI ALLA SPINTA DELLA TBM-pressione di contatto																			
Spinta totale TBM	$T_{TBM,ord}$ [MN]	41.94																	
Spinta accidentale TBM	$T_{TBM,acc}$ [MN]	69																	
Numero totale piastre di spinta	N_H [-]	12																	
Eccentricità di spinta martinetti	ϵ_{spinta} [m]	0.03																	
Numero di piastre di spinta per concio	n_H [-]	2																	
Coeff. di sicurezza SLU	γ_{SLU} [-]	1.30																	
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;">  <p style="text-align: center;">Diagramma d'interazione - Dir. longitudinale</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>COMBINAZIONE FONDAMENTALE SLU</p> $N_{SD,SLU} = n_H \cdot (T_{TBM,ord} / N_H) \cdot \gamma_{SLU}$ $M_{SD,SLU} = N_{SD,SLU} \cdot \epsilon_{spinta}$ <p>COMBINAZIONE ECCEZIONALE SLU</p> $N_{SD,SLU,A} = n_H \cdot (T_{TBM,acc} / N_H)$ $M_{SD,SLU,A} = N_{SD,SLU,A} \cdot \epsilon_{spinta}$ <p style="text-align: center;">Sollecitazioni segmento</p> <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>SLU</td> <td>Sforzo assiale</td> <td>$N_{SD,SLU}$ [kN]</td> <td>9086</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Momento flettente</td> <td>$M_{SD,SLU}$ [kNm]</td> <td>273</td> </tr> <tr> <td>SLU,A</td> <td>Sforzo assiale</td> <td>$N_{SD,SLU,A}$ [kN]</td> <td>11532</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Momento flettente</td> <td>$M_{SD,SLU,A}$ [kNm]</td> <td>346</td> </tr> </table> </div> </div>				SLU	Sforzo assiale	$N_{SD,SLU}$ [kN]	9086		Momento flettente	$M_{SD,SLU}$ [kNm]	273	SLU,A	Sforzo assiale	$N_{SD,SLU,A}$ [kN]	11532		Momento flettente	$M_{SD,SLU,A}$ [kNm]	346
SLU	Sforzo assiale	$N_{SD,SLU}$ [kN]	9086																
	Momento flettente	$M_{SD,SLU}$ [kNm]	273																
SLU,A	Sforzo assiale	$N_{SD,SLU,A}$ [kN]	11532																
	Momento flettente	$M_{SD,SLU,A}$ [kNm]	346																
Resistenza del concio a pressione di contatto " $F_{sd} \leq F_{rd} \leq F_{max}$ "																			
Larghezza piastra di spinta	b_1 [m]	0.26	Impronta distribuzione forza - larghezza b_2 [m] 0.34																
Lunghezza piastra di spinta	d_1 [m]	0.65	Impronta distribuzione forza - lunghezza d_2 [m] 1.21																
Resistenza a compressione cls	SLU	$f_{cd,SLU}$ [MPa]	22.7																
	SLU,A	$f_{cd,SLU,A}$ [MPa]	34.0																
$F_{sd} = \Sigma F \cdot \gamma_F$ $F_{rd} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot \nu \cdot (A_{c1} / A_{c0})$ $F_{max} = 3 \cdot A_{c0} \cdot f_{cd}$																			
Sforzi sollecitanti	SLU	$F_{sd,SLU}$ [kN]	4543																
	SLU,A	$F_{sd,SLU,A}$ [kN]	5766																
Resistenza	SLU	$F_{rd,SLU}$ [kN]	5964																
	SLU,A	$F_{rd,SLU,A}$ [kN]	8947																
	SLU	$F_{max,SLU}$ [kN]	11492																
	SLU,A	$F_{max,SLU,A}$ [kN]	17238																
																			

Le verifiche alla pressione di contatto risultano entrambe soddisfatte.

6.4.3 Verifica dell'armatura di frettaggio

La spinta dei martinetti che agisce sulla sezione di ciascun concio genera uno stato di tensione di trazione. L'intensità di questo può essere calcolata come segue:

$$Z=0.25 \cdot P \cdot (1-a/d)$$

Dove:

- ✓ a = larghezza della superficie di applicazione del carico
- ✓ d = spessore della sezione caricata
- ✓ P = spinta al di sopra della placca del martinetto

L'area di acciaio minima è calcolata secondo la seguente espressione:

$$A_{s, \min} = Z / f_{yd}$$

Si verifica quindi che l'area di armatura A_s sia superiore all'area minima $A_{s, \min}$.

Per localizzare le armature necessarie, si deve prima di tutto calcolare il rapporto d/a . Da questo valore si deduce:

- ✓ Il copriferro massimo per le armature di ripresa della spinta della TBM sotto le placche di spinta coincidente con l'ascissa in cui il diagramma delle tensioni di trazione si annulla (x_1)
- ✓ La distanza corrispondente al valore massimo di trazione dovuta alla spinta dei martinetti (x_2)

La teoria della distribuzione del carico in un dominio elastico sviluppata da Leonhardt (1977) fornisce gli abachi, che possono essere utilizzati per localizzare la trazione nella sezione e quindi per ottenere un rinforzo minimo.

La diffusione della tensione viene valutata sia in direzione radiale che in direzione circonferenziale.

Di seguito si riportano le verifiche per i due anelli:

- ✓ Anello corrente:
 - Direzione radiale: staffe $\phi 10/ 10$ cm
 - Direzione circonferenziale: barre $\phi 10/12.5$ cm + $2\phi 10$ nella zona di spinta
- ✓ Anello Rinforzato:
 - Direzione radiale: staffe $\phi 12/ 10$ cm
 - Direzione circonferenziale: barre $\phi 14/12.5$ cm + $2\phi 14$ nella zona di spinta

Anello Corrente

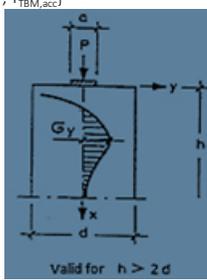
Direzione radiale

VERIFICA DEI CONCI SOGGETTI ALLA SPINTA DELLA TBM-trazioni radiali (pressione deviatorica)

Spinta totale TBM	$T_{TBM,ord}$ [MN]	32
Spinta accidentale TBM	$T_{TBM,acc}$ [MN]	47
Numero totale piastre di spinta	N_H [-]	12
Lunghezza arco concio	L_{SEG} [m]	2.4
Lunghezza piastra di spinta	b [m]	0.65
Larghezza piastre di spinta	a [m]	0.26
Spessore concio	d [m]	0.40
Coeff. di sicurezza SLU	γ_{SLU} [-]	1.30
Resistenza di progetto acciaio	f_{yd} [MPa]	450
Diametro barre armatura	\varnothing [mm]	10
Interasse barre armatura	i [cm]	10
Numero bracci	n_{arm} [-]	2

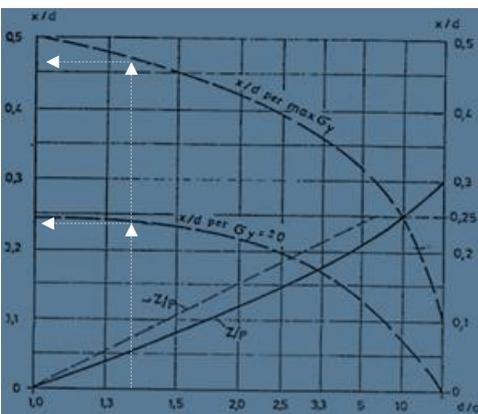
$F_{sd} = \max \{ T_{TBM,ord}, T_{TBM,acc} \}$

$P = F_{sd,SLU}$
 $Z = 0.3 P * [1 - a / d]$
 $A_{s,min} = Z / f_{yd}$



Valid for $h > 2d$

$A_s = n_{arm} * [b / i] * A_{\varnothing}$
 $x_1 = k_1 * d$
 $x_2 = k_2 * d$



Trazione indotta		
Rapporto d/a	d/a [-]	1.538
Forza di trazione	Z [kN]	414.6
Area min strato acciaio	$A_{s,min}$ [cm ²]	9.2
Area strato acciaio	A_s [cm ²]	10.2
Fattore di sicurezza	FS	1.1

Coprifermo massimo per la ripresa della spinta della TBM al di sotto delle piastre di spinta

$k_1 = x_1 / d = 0.24 \quad x_1 = 9.6$ [cm]

Profondità corrispondente a trazione massima al di sotto delle piastre di spinta

$k_2 = x_2 / d = 0.48 \quad x_2 = 19$ [cm]

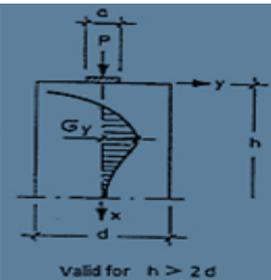
Direzione circonferenziale

VERIFICA DEI CONCI SOGGETTI ALLA SPINTA DELLA TBM-trazioni circonferenziali (pressione deviatorica)

Spinta totale TBM	$T_{TBM,ord}$ [MN]	32
Spinta eccezionale TBM	$T_{TBM,acc}$ [MN]	47
Numero totale piastre di spinta	N_H [-]	12
Lunghezza area influenzata dalla spinta	L_1 [m]	0.9
Lunghezza piastra	a [m]	0.65
Larghezza area influenzata dalla spinta	d [m]	1.21
Coeff. di sicurezza SLU	γ_{SLU} [-]	1.30
Resistenza allo snervamento	f_{yd} [MPa]	450
Diametro barre armatura	\varnothing [mm]	10
Interasse barre armatura	i [cm]	12.5
Numero barre area tesa	n [-]	2

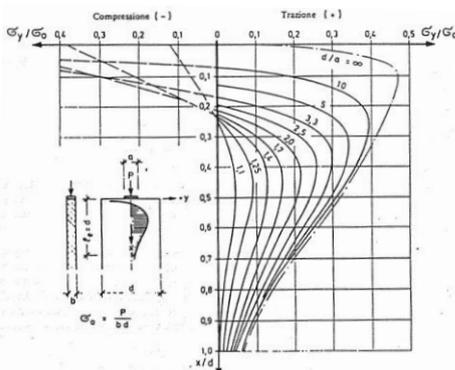
$F_{sd} = \max \{ T_{TBM,ord}, T_{TBM,acc} \}$

$P = F_{sd,SLU}$
 $Z = 0.3 P * [1 - a / d]$
 $A_{s,min} = Z / f_{yd}$



Valid for $h > 2d$

$A_s = n * [L_1 / i] * A_{\varnothing}$
 $x_1 = k_1 * d$
 $x_2 = k_2 * d$



Trazione indotta		
Forza di trazione	Z [kN]	546
Area min strato acciaio	$A_{s,min}$ [cm ²]	12.1
Area strato acciaio	A_s [cm ²]	12.9
Fattore di sicurezza	FS_{sd} [-]	1.1

Coprifermo massimo per la ripresa della spinta della TBM al di sotto delle piastre di spinta

$k_1 = x_1 / d = 0.22 \quad x_1 = 27$ [cm]

Profondità corrispondente a trazione massima al di sotto delle piastre di spinta

$k_2 = x_2 / d = 0.45 \quad x_2 = 54$ [cm]

Anello Rinforzato

Direzione radiale

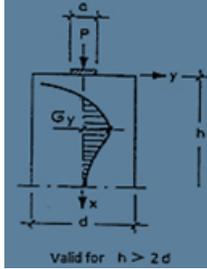
VERIFICA DEI CONCI SOGGETTI ALLA SPINTA DELLA TBM-trazioni radiali (pressione deviatorica)

Spinta totale TBM	$T_{TBM,ord}$ [MN]	42
Spinta accidentale TBM	$T_{TBM,acc}$ [MN]	69
Numero totale piastre di spinta	N_H [-]	12
Lunghezza arco concio	L_{SEG} [m]	2.4
Lunghezza piastra di spinta	b [m]	0.65
Larghezza piastre di spinta	a [m]	0.26
Spessore concio	d [m]	0.40
Coeff. di sicurezza SLU	γ_{SLU} [-]	1.30
Resistenza di progetto acciaio	f_{yd} [MPa]	450
Diametro barre armatura	\varnothing [mm]	12
Interasse barre armatura	i [cm]	10
Numero bracci	n_{arm} [-]	2

$F_{sd} = \max \{ T_{TBM,ord}, T_{TBM,acc} \}$

$P = F_{sd,SLU}$
 $Z = 0.3 P * [1 - a / d]$
 $A_{s,min} = Z / f_{yd}$

$A_s = n_{arm} * [b / i] * A_{\varnothing}$
 $x_1 = k_1 * d$
 $x_2 = k_2 * d$



Valid for $h > 2d$

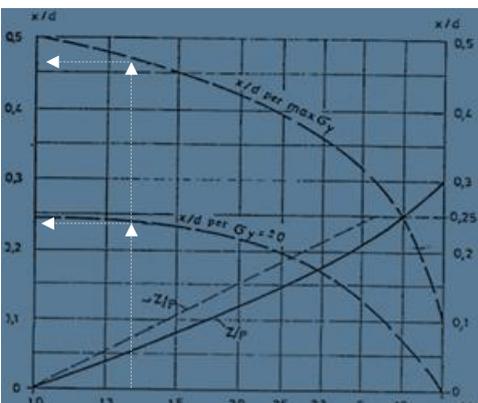
Trazione indotta		
Rapporto d/a	d/a [-]	1.538
Forza di trazione	Z [kN]	605.4
Area min strato acciaio	$A_{s,min}$ [cm ²]	13.5
Area strato acciaio	A_s [cm ²]	14.7
Fattore di sicurezza	FS	1.1

Copriferro massimo per la ripresa della spinta della TBM al di sotto delle piastre di spinta

$k_1 = x_1 / d = 0.24 \quad x_1 = 9.6$ [cm]

Profondità corrispondente a trazione massima al di sotto delle piastre di spinta

$k_2 = x_2 / d = 0.48 \quad x_2 = 19$ [cm]



Direzione circonferenziale

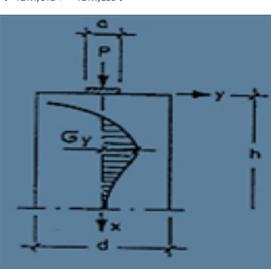
VERIFICA DEI CONCI SOGGETTI ALLA SPINTA DELLA TBM-trazioni circonferenziali (pressione deviatorica)

Spinta totale TBM	$T_{TBM,ord}$ [MN]	42
Spinta eccezionale TBM	$T_{TBM,acc}$ [MN]	69
Numero totale piastre di spinta	N_H [-]	12
Lunghezza area influenzata dalla spinta	L_1 [m]	0.9
Lunghezza piastra	a [m]	0.65
Larghezza area influenzata dalla spinta	d [m]	1.21
Coeff. di sicurezza SLU	γ_{SLU} [-]	1.30
Resistenza allo snervamento	f_{yd} [MPa]	450
Diametro barre armatura	\varnothing [mm]	14
Interasse barre armatura	i [cm]	12.5
Numero barre area tesa	n [-]	2

$F_{sd} = \max \{ T_{TBM,ord}, T_{TBM,acc} \}$

$P = F_{sd,SLU}$
 $Z = 0.3 P * [1 - a / d]$
 $A_{s,min} = Z / f_{yd}$

$A_s = n * [L_1 / i] * A_{\varnothing}$
 $x_1 = k_1 * d$
 $x_2 = k_2 * d$



Valid for $h > 2d$

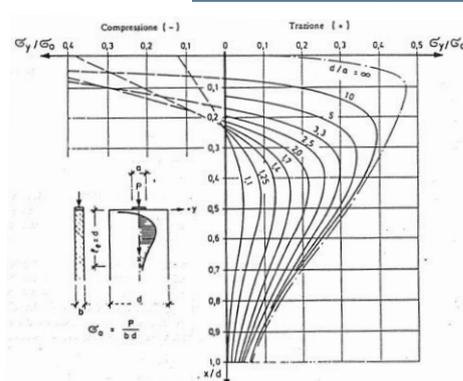
Trazione indotta		
Forza di trazione	Z [kN]	797
Area min strato acciaio	$A_{s,min}$ [cm ²]	17.7
Area strato acciaio	A_s [cm ²]	25.3
Fattore di sicurezza	FS_{sd} [-]	1.4

Copriferro massimo per la ripresa della spinta della TBM al di sotto delle piastre di spinta

$k_1 = x_1 / d = 0.22 \quad x_1 = 27$ [cm]

Profondità corrispondente a trazione massima al di sotto delle piastre di spinta

$k_2 = x_2 / d = 0.45 \quad x_2 = 54$ [cm]



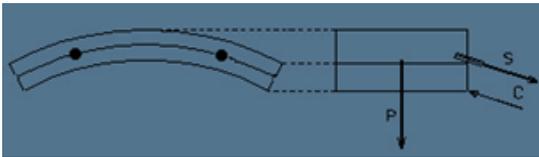
6.5 VERIFICA DEGLI ACCESSORI

Le verifiche degli accessori fornite di seguito sono valide per entrambi i tipi di anello, senza distinzione tra Corrente e Rinforzato. Il fattore di sicurezza considerato sulla resistenza dei connettori tra conci è di $\gamma_R=1.25$.

6.5.1 Verifica dei connettori a fronte di problemi d'installazione

La configurazione analizzata è poco probabile in quanto rappresenta il ritrarsi del martinetto di spinta della TBM, cosa non consentita dal software di controllo della TBM. Tuttavia, nel caso della perdita della spinta, i connettori longitudinali (tra i conci di anelli adiacenti), devono essere in grado di supportare il peso del concio.

I connettori, si assimilano a delle barre S355 di diametro 20 mm. Il taglio agente sul connettore sarà uguale al peso del concio diviso il numero di connettori. Per ottenere lo sforzo di trazione agente sul connettore si fa l'equilibrio alla rotazione attorno all'estremità del concio.

VERIFICA DEI CONNETTORI A FRONTE DI UN'ERRATA INSTALLAZIONE					
Numero di connettori per concio	N_C [-]	2			
Peso concio	W_{SEG} [kN]	36.2		$V_{Ed} = W_{SEG} / N_C$	
Spessore concio	Sp. [m]	0.40		$M_{Ed} = V_{Ed} * [L_m / 2]$	
Larghezza concio	L_m [m]	1.5		$S_{Ed} = M_{Ed} / Sp$	
			Taglio sollecitante	V_{Ed} [kN]	18.1
			Momento flettente	M_{Ed} [kNm]	13.6
			Forza normale sollecitante	S_{Ed} [kN]	33.9
Fulcro d'acciaio connettori			$\tau_{yd} = \sigma_{yd} / \sqrt{3}$		
			$T + S \leq 1$		
			$T = [V_{Ed} / (A_v * \tau_{yd})]^2$		
			$S = [S_{Ed} / (A_{res} * \sigma_{yd})]^2$		
Tensione di progetto snervamento acciai	σ_{yd} [MPa]	284	Contributo tagliante	T [-]	0.12
Tens. tangenziale di progetto acciaio	τ_{yd} [MPa]	164	Contributo pull-out	S [-]	0.14
Area sezione resistente	A_{res} [mm ²]	314	Somma dei contributi < 1		
Area sezione resistente a taglio	A_v [mm ²]	314			
				Σ_C [-]	0.27

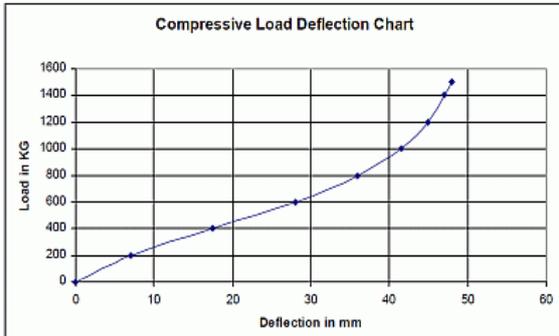
La verifica risulta soddisfatta.

6.5.2 Verifica dei connettori sotto la pressione di chiusura del gasket

Durante la fase di installazione dei conci, la chiusura del giunto EPDM genera una tensione localizzata che può produrre la rottura a pull-out dei connettori.

Poiché i connettori vengono caricati dopo alcuni minuti dalla compressione del gasket, non si cordiera la forza di chiusura di picco, ma bensì un rilassamento del giunto. Un valore usuale per questo genere di gasket è 30 kN/m.

VERIFICA CONNETTORI SOTTO PRESSIONE ESERCITATA DAI GASKETS			
Numero di connettori per concio	N_c [-]	2	
Lunghezza arco concio	L_{SEG} [m]	2.4	
Forza di compressione del gasket	F_{EPDM} [kNm ⁻¹]	35	
Coeff. di sicurezza SLU	γ_{SLU} [-]	1.30	
Numero di gaskets	N_g [-]	1	
Trazione indotta sui connettori dal gasket			
$S_{Ed,SLU} = N_g * F_{EPDM} * L_{SEG} * \gamma_{SLU} / N_c$			
Resistenza a pull-out connettori	S_{rd} [kN]	64	
Azione sollecitante a pull-out	S_{Ed} [kN]	55	
Fattore di sicurezza	FS [-]	1.2	



Compressive Load Deflection Chart

La verifica risulta soddisfatta.

6.5.3 Verifica dello spigolo del concio sotto l'effetto della spinta del gasket

Durante la fase di installazione dei conci, la chiusura del giunto EPDM genera una tensione localizzata che può produrre la rottura a taglio dello spigolo di calcestruzzo del concio. Per meglio ripartire questi sforzi ed evitare lo sfaldamento dell'angolo, il gasket è posizionato ad una certa distanza rispetto all'estradosso del concio.

La verifica della resistenza a taglio dello spigolo del concio è la seguente:

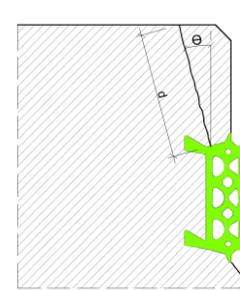
$$f_{cvd} > \tau_{cpd}$$

Dove:

- ✓ f_{cvd} = resistenza di progetto a taglio del cls = $\sqrt{([f_{ctd}]^2 + \sigma_{cpd} \cdot f_{ctd})}$
- ✓ τ_{cpd} = sforzo sollecitante a taglio di progetto del cls

La superficie di rottura, come mostrato sotto, è inclinata di un angolo θ rispetto alla verticale ed ha una lunghezza pari a d . La forza lineare generata per la chiusura del giunto EPDM (F_{EPDM}) si decompone secondo le due direzioni perpendicolare e parallela alla sezione di rottura del cls. Ipotizzando che ci sia solo la componente tangenziale V_{Ed} , dividendola per l'area su cui insiste, si ottiene la corrispondente tensione τ_{cpd} .

VERIFICA SPIGOLO CALCESTRUZZO SOTTO PRESSIONE ESERCITATA DAI GASKETS			
Lunghezza superficie di rottura	d [m]	0.08	
Angolo superficie di rottura	θ [°]	45	
Forza di compressione del gask	F_{EPDM} [kN/m]	35	
Coeff. di sicurezza SLU	γ_{SLU} [-]	1.30	
Resistenza a trazione del calcestruzzo	f_{ctd} [MPa]	1.64	
Resistenza a taglio del calcestruzzo	f_{cvd} [MPa]	1.64	
Sforzo normale sollecitante	$N_{ed,SLU}$ [kN/m]	0.0	
	σ_{cpd} [MPa]	0.00	
Taglio sollecitante	$V_{ed,SLU}$ [kN/m]	32.2	
	τ_{cpd} [MPa]	0.60	



$N_{ed,SLU} = 0$ (hp.)
 $\sigma_{cpd} = N_{ed,SLU} / (b * d) / 1000$
 $V_{ed,SLU} = F_{EPDM} * \cos(\theta) * \gamma_{SLU}$
 $\tau_{cpd} = k * V_{ed,SLU} / (b * d) / 1000$
 $b = 1 \text{ m} \quad , \quad k = 1,5$
 $f_{cvd} = (f_{ctd}^2 + \sigma_{cpd} * f_{ctd})^{1/2}$

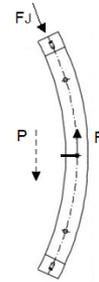
Fattore di sicurezza FS 2.7

La verifica risulta soddisfatta.

6.5.4 Verifica dei coni di centraggio

Durante l'installazione del cono, verrà esercitata sui coni di centraggio una forza data dal peso del cono e della pressione del gasket. Si verifica allora che questa pressione, trasmessa poi dai "pins" dell'erettore al calcestruzzo, sia inferiore alla resistenza a compressione di progetto del cls.

VERIFICA CONI DI CENTRAGGIO					
Peso proprio cono	W_{SEG} [kN]	36.2			
Coeff. effetti di manipolazione/di vibrazioni	ζ_{MV} [-]	0.5			
Forza di compressione del gasket	F_{EPDM} [kN/m]	35	$F_{cono} = [W_{SEG} * \zeta_{MV} + F_J * L_m] / n_{coni}$		
Carico agente del gasket (50% of F_{EPT})	F_J [kN/m]	18			
Larghezza cono	L_m [m]	1.5	$p_{cono,SLU} = [F_{cono} / (d_{cono} * h_{cono})] * \gamma_{SLU}$ $FS = f_{cd} / p_{cono,SLU}$		
Coeff. di sicurezza SLU	γ_{SLU} [-]	1.30			
Numero coni di centraggio	n_{coni} [-]	2			
Diametro cono	d_{coni} [m]	0.15			
Profondità cono	h_{coni} [m]	0.18			
Forza agente su singolo cono	$F_{cono, SLU}$ [kN]	28.8	Resistenza a compressione calcestruzzo	f_{cd} [MPa]	22.7
Pressione agente su singolo cono	$p_{cono,SLU}$ [MPa]	1.07	Fattore di sicurezza	FS	21.2



La verifica risulta soddisfatta.

7. ANALISI DI INTERAZIONE TERRENO/STRUTTURA

Per la valutazione delle sollecitazioni indotte dalla spinta del terreno si ricorre all'analisi di interazione terreno-struttura.

7.1 SCELTA DELLE SEZIONI DI CALCOLO

Le sezioni di calcolo individuate sono le seguenti:

- ✓ Anello Corrente:
 - FYR-c_75 - Unità geologica: FYR-c in zona di faglia, copertura H=75
 - FYR-ag_125 - Unità geologica: FYR-ag, copertura H=125 m con rigonfiamento
 - CPA_150 – Unità geologica: CPA, copertura H=150 m
 - UFM_200 – Unità geologica: UFM, alta copertura H=200 m
- ✓ Anello Rinforzato:
 - FYR-c_15 - Unità geologica: FYR-c in zona di faglia, bassa copertura H=15 m
 - AV_100 – Unità geologica: AV, copertura H=100 m con rigonfiamento
 - CPA-AV_200 – Unità geologica: fronte CPA/AV, H= 200 m con rigonfiamento
 - UFM-AV_200 – Unità geologica: front UFM/AV, H=200 m con rigonfiamento

7.2 IPOTESI ALLA BASE DELLE ANALISI NUMERICHE

Per rappresentare il problema tridimensione dello scavo di una galleria, ricorriamo a due differenti modelli, in questo caso entrambi numerici:

- ✓ Modello assialsimmetrico: permette di definire le curve caratteristiche e di convergenza del cavo e di valutare il rilascio tensionale alla fine dello scudo, dove vengono installati i conci prefabbricati.
- ✓ Modello a deformazioni piane: permette di tenere conto della presenza di differenti formazioni geologiche, di uno stato tensionale iniziale anisotropo e delle pressioni idrauliche. Serve per valutare le tensioni principali attorno al cavo e gli sforzi agenti sul rivestimento.

Per il modello assialsimmetrico si utilizza il software “Phase2, ver.8.0 – Rocscience Inc.”

Per il modello a deformazioni piane si utilizza il software “Plaxis2D” che permette di eseguire analisi di consolidazione delle sovrappressioni interstiziali.

7.3 DEFINIZIONE DEL TASSO DI DECONFINAMENTO

Il tasso di deconfinamento esprime l’influenza dello scavo sullo stato tensionale radiale alla galleria. Per il caso in esame, questo valore è funzione della distanza dal fronte e della pressione di confinamento applicata dalla TBM nella camera di scavo e lungo lo scudo.

Se il tasso di deconfinamento prima dell’installazione dei conci è elevato, il carico residuo agente sui conci sarà inferiore. Al contrario, se il tasso di deconfinamento è basso, i conci si caricheranno maggiormente. Il secondo caso è quello determinante nel dimensionamento dei conci, eccezione fatta per la sezione di calcolo a bassa copertura, dove la distorsione indotta dal sisma è più gravosa per un anello debolmente compresso.

7.3.1 Criterio per l’analisi

Per le sezioni di calcolo sopra indicate, si determinano nelle due condizioni limite (ammasso/faglia oppure comportamento drenato/non-drenato):

- ✓ la curva caratteristica al fronte,
- ✓ la curva caratteristica del cavo,
- ✓ la curva di convergenza intrinseca del cavo.

Queste informazioni permettono di avere un’idea sull’influenza dello scavo in condizioni intrinseche e di determinare una pressione di confinamento di progetto per il dimensionamento dei conci.

Questa pressione è calcolata come la pressione necessaria a limitare la convergenza al fronte al disotto dell’1%. La giustificazione della scelta di uno dei due casi limite è fornita di seguito.

Si noti, che questa pressione può risultare più alta della pressione di progetto per l'avanzamento della macchina, ma che questa assunzione è a favore di sicurezza per l'analisi strutturale del rivestimento in quanto massimizza il carico sui conci. A tale scopo, ove ritenuto opportuno, si applica un ulteriore incremento di +0.5 bar della pressione minima per tener conto della sua oscillazione durante lo scavo.

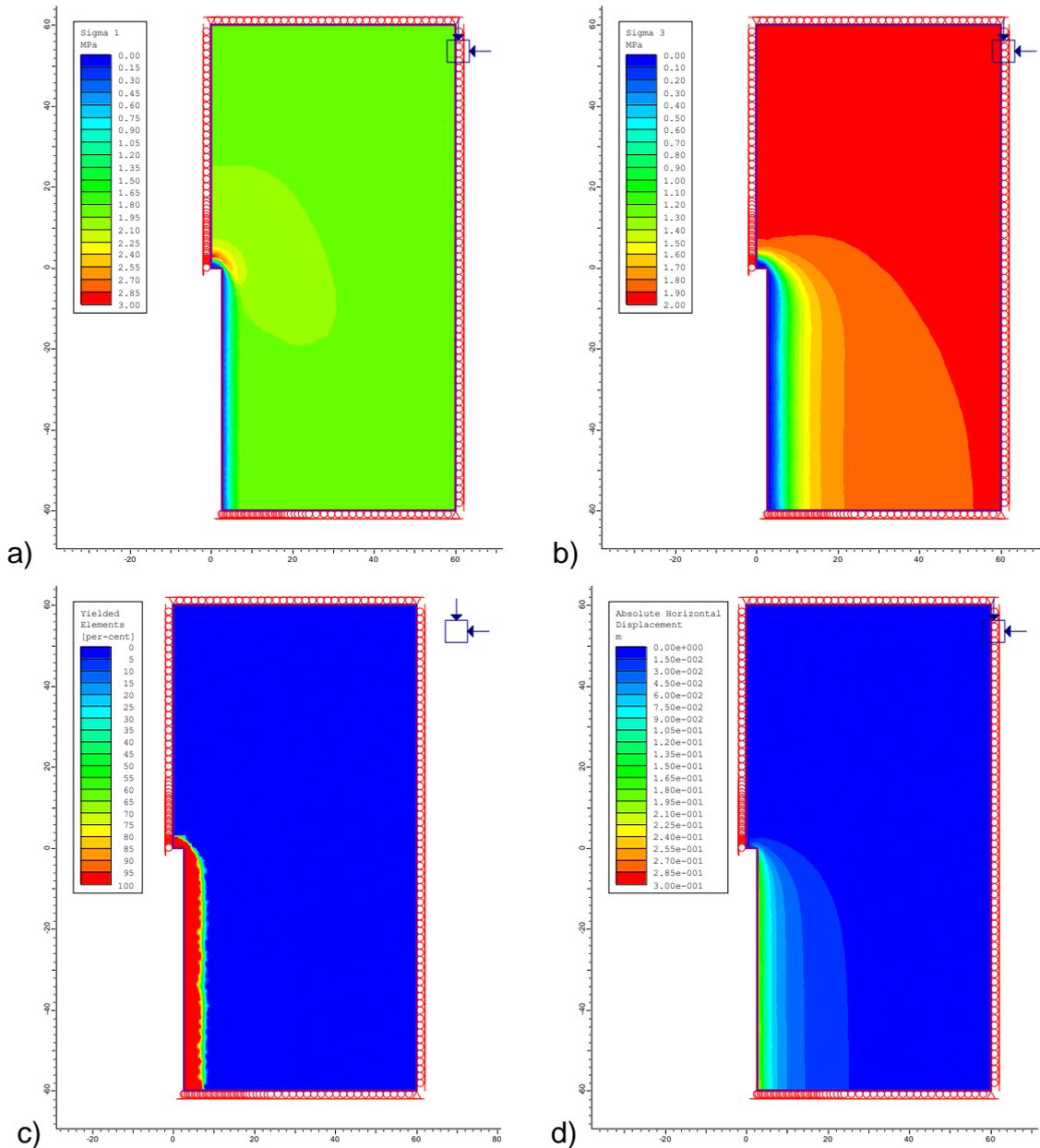
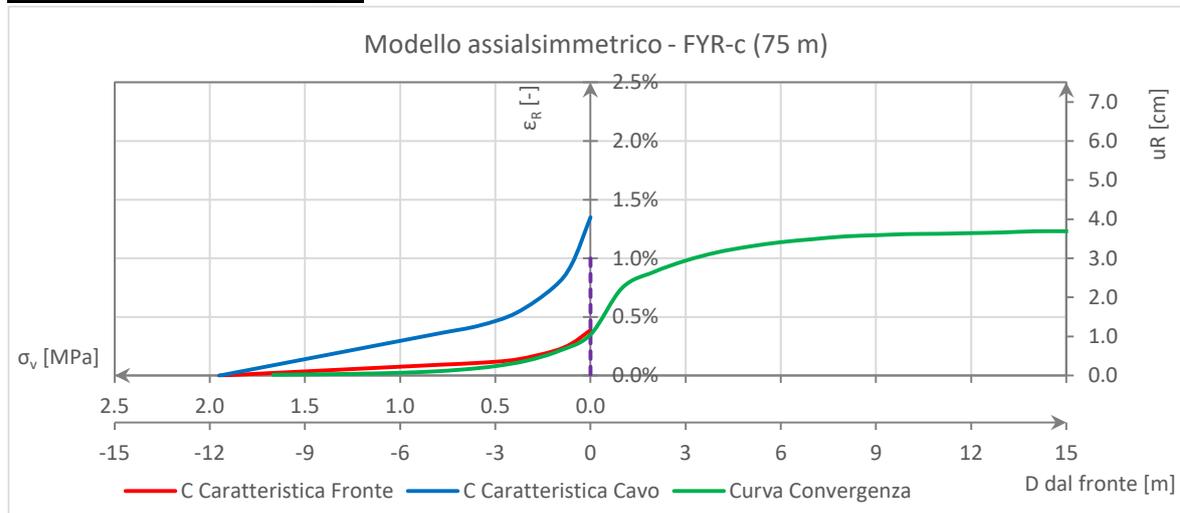


Fig. 7.1 –Risultati analisi FYR-c_75 foglia: a) σ_1 , b) σ_3 , c) politicizzazione, d) convergenza

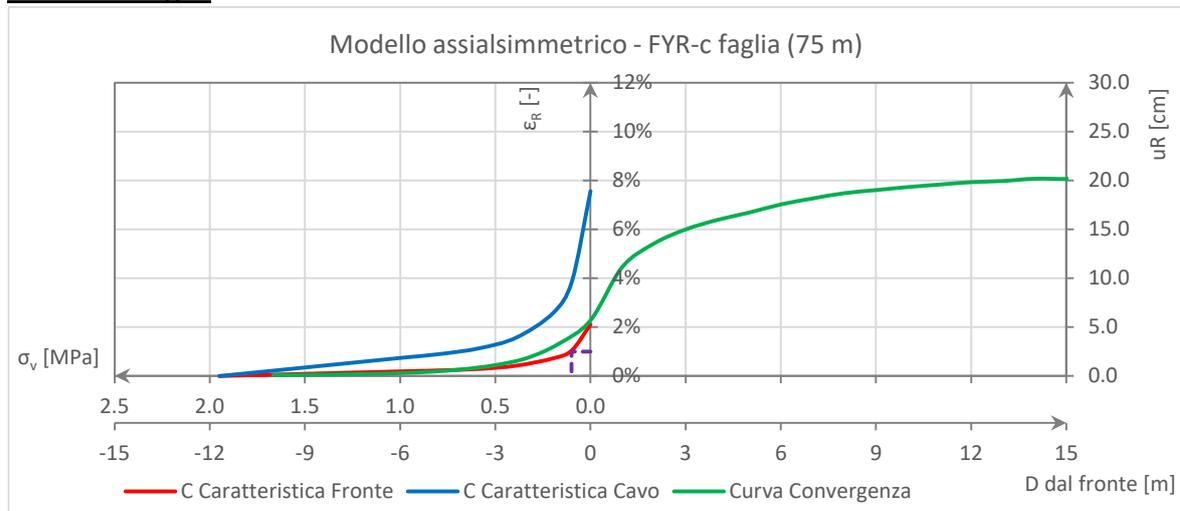
7.3.2 Curve caratteristiche e di convergenza – FYR-c_75

Lontano dalla zona di faglia



$\sigma_0=1950$ kPa
 $c'=120$ kPa
 $\phi'=36^\circ$
 $E'=400$ MPa
 $\nu=0.3$
 $P_{C(e_f=1\%)}=0$ bar

In zona di faglia

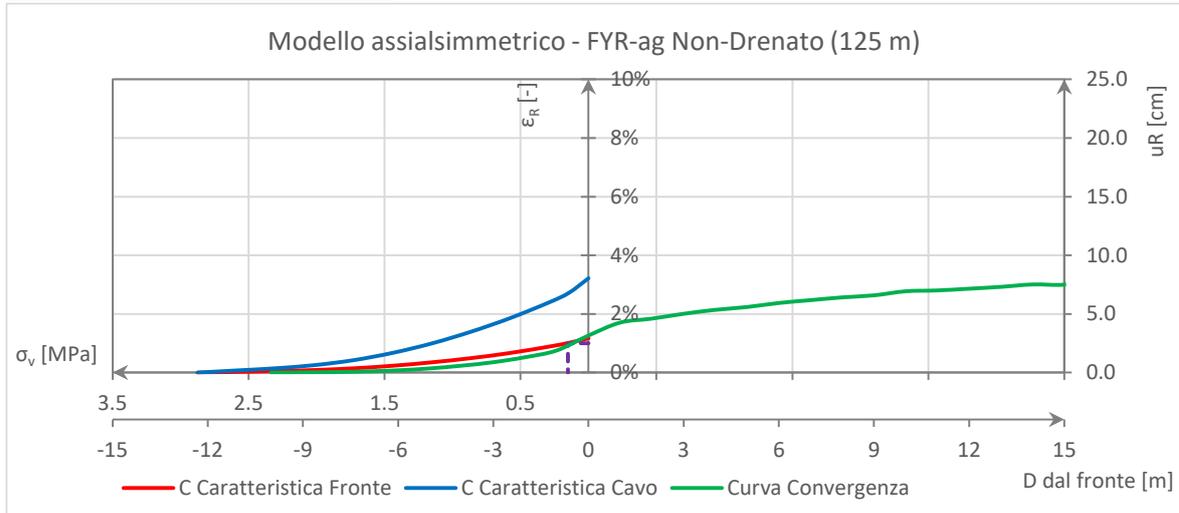


$\sigma_0=1950$ kPa
 $c'=50$ kPa
 $\phi'=33^\circ$
 $E'=160$ MPa
 $\nu=0.3$
 $P_{C(e_f=1\%)}=1$ bar

L'analisi lontano dalla faglia mostra che non serve una pressione di confinamento per sostenere il fronte (si prevede comunque di mantenere una pressione minima di 0.5 bar per evitare ingresso di gas), mentre l'analisi in faglia restituisce una pressione di 1 bar. Scegliendo il caso più sfavorevole, ed applicando un incremento di 0.5 bar, la pressione di confinamento considerata per il dimensionamento del rivestimento in questa sezione è $P_c=1+0,5=1,5$ bar.

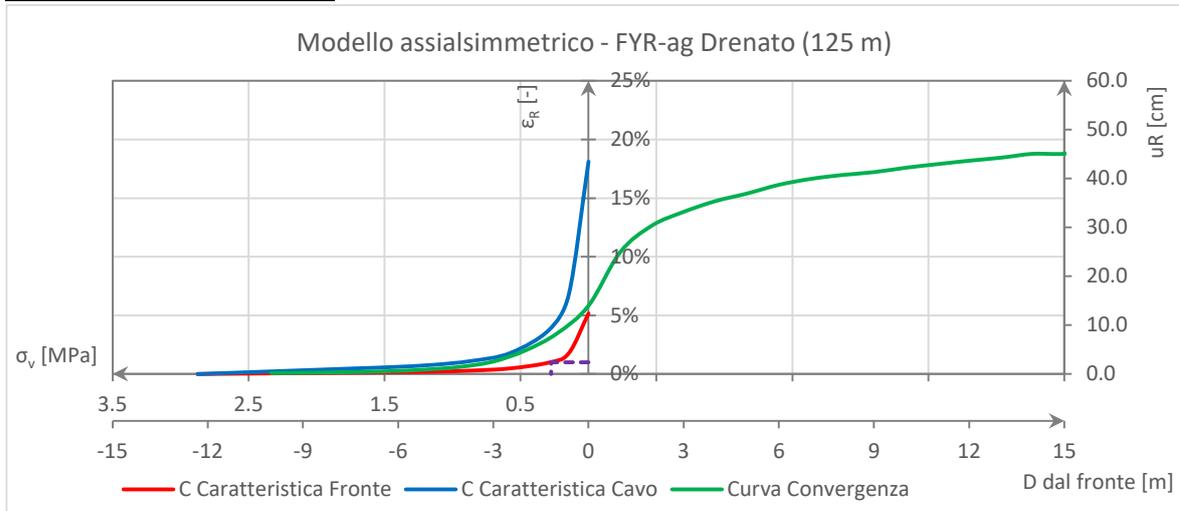
7.3.3 Curve caratteristiche e di convergenza – FYR-ag_125

Comportamento non-drenato



$\sigma_0=2875$ kPa $c_u=450$ kPa $\phi u=0^\circ$ $E_u=500$ MPa $\nu=0.5$ $P_{C(ef=1\%)}=1.50$ bar

Comportamento drenato



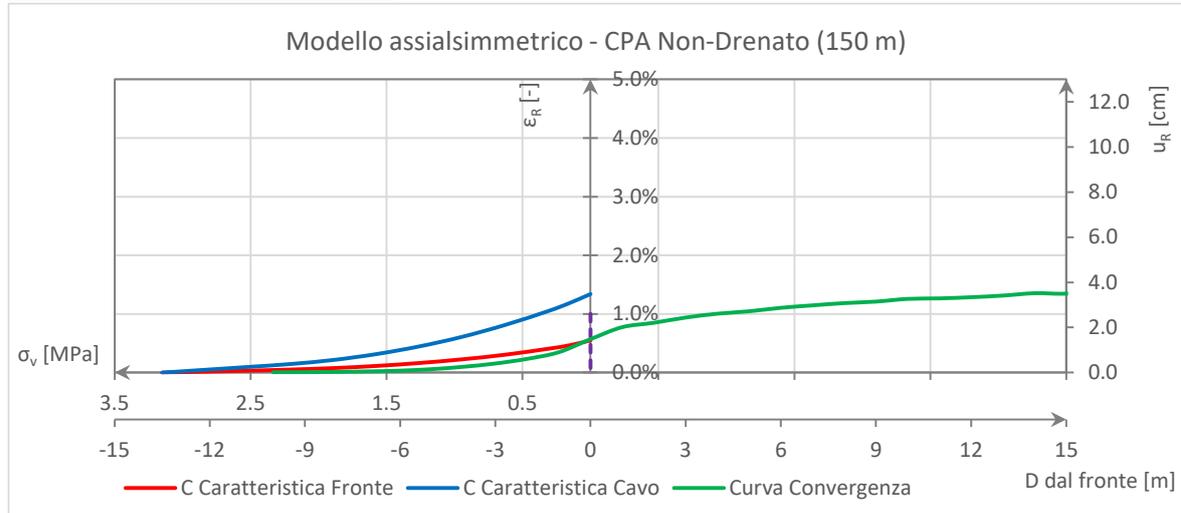
$\sigma_0=2875$ kPa $c'=40$ kPa $\phi'=27^\circ$ $E'=300$ MPa $\nu=0.3$ $P_{C(ef=1\%)}=2.75$ bar

Vista la variabilità di composizione dei Flysch, per l'analisi dei conci non si esclude a priori il comportamento di tipo drenato del cavo in fase di scavo (più sfavorevole).

La pressione di confinamento considerata per questa analisi è dunque $P_c=2.75+0.5=3.25$ bar.

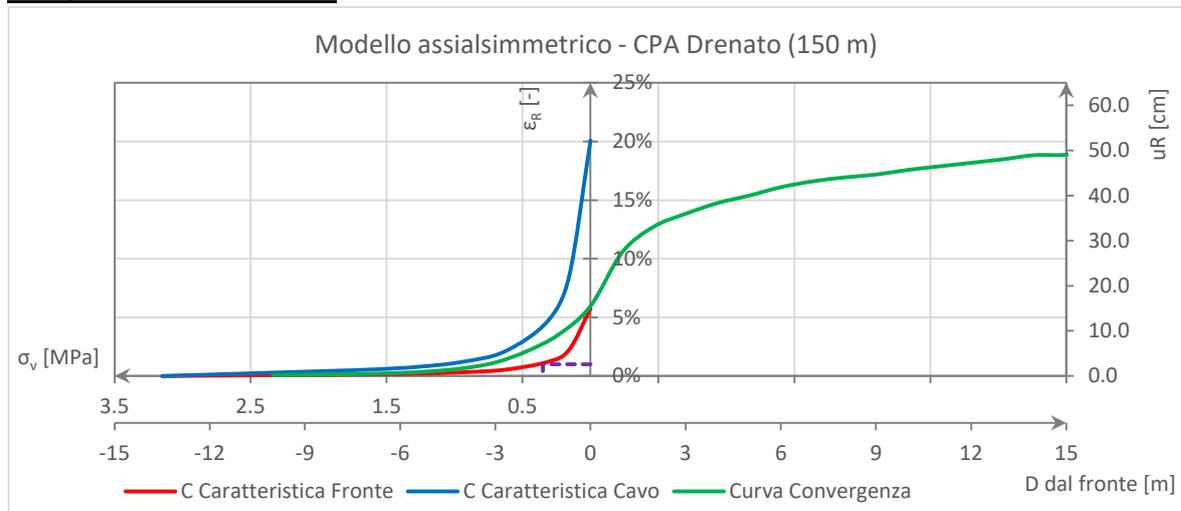
7.3.4 Curve caratteristiche e di convergenza – CPA_150

Comportamento non-drenato



$\sigma_0=3150$ kPa $c_u=700$ kPa $\phi_u=0^\circ$ $E_u=840$ MPa $\nu=0.5$ $P_{C(ef=1\%)}=0$ bar

Comportamento drenato



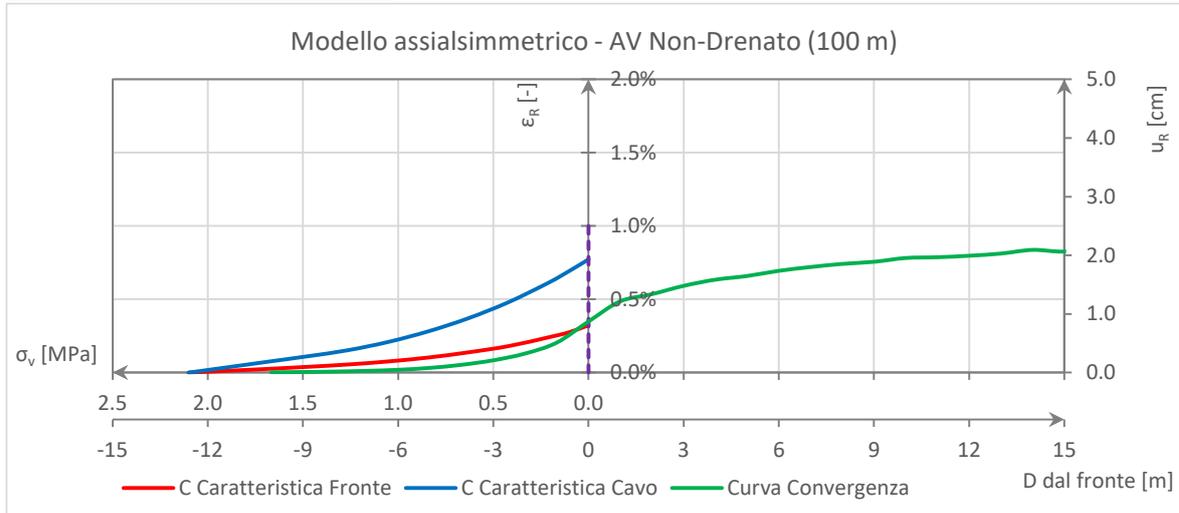
$\sigma_0=3150$ kPa $c'=60$ kPa $\phi'=24^\circ$ $E'=360$ MPa $\nu=0.3$ $P_{C(ef=1\%)}=3.5$ bar

I risultati sono nettamente differenti nei due casi, essendo i parametri di deformabilità non-drenati nettamente superiori.

Vista la variabilità di composizione della formazione Corleto Perticara, per l'analisi dei conci non si esclude a priori il comportamento di tipo drenato del cavo in fase di scavo (più sfavorevole). I conci vengono dimensionati nella condizione limite peggiore, ma senza aggiungere nessun margine ulteriore alla pressione di confinamento impiegata per questa analisi $P_c=3.5+0=3.5$ bar.

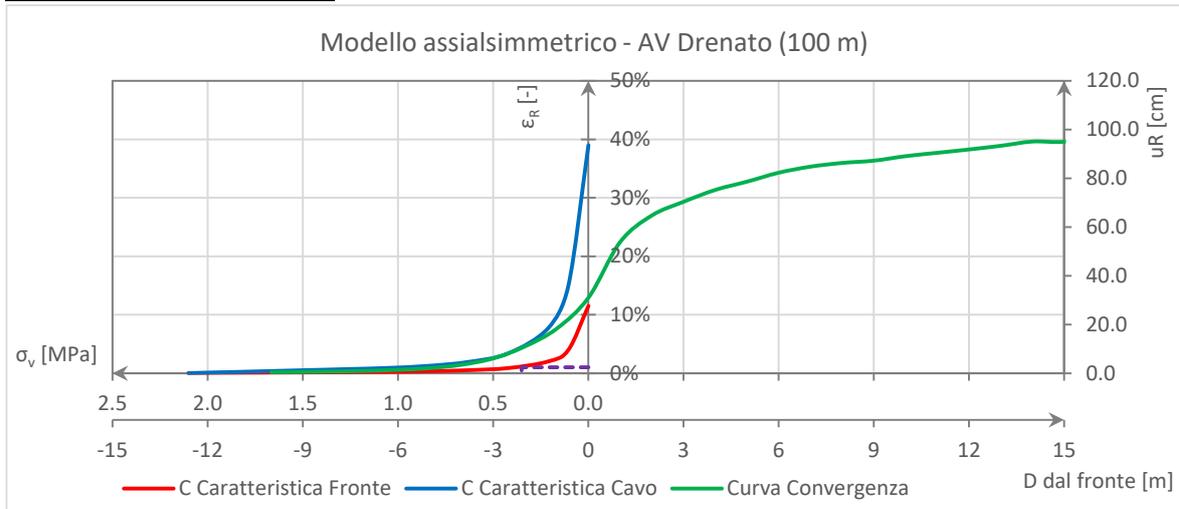
7.3.5 Curve caratteristiche e di convergenza – AV_100

Comportamento non-drenato



$\sigma_0=2100$ kPa
 $c_u=600$ kPa
 $\phi_u=0^\circ$
 $E_u=720$ MPa
 $\nu=0.5$
 $P_{C(ef=1\%)}=0$ bar

Comportamento drenato

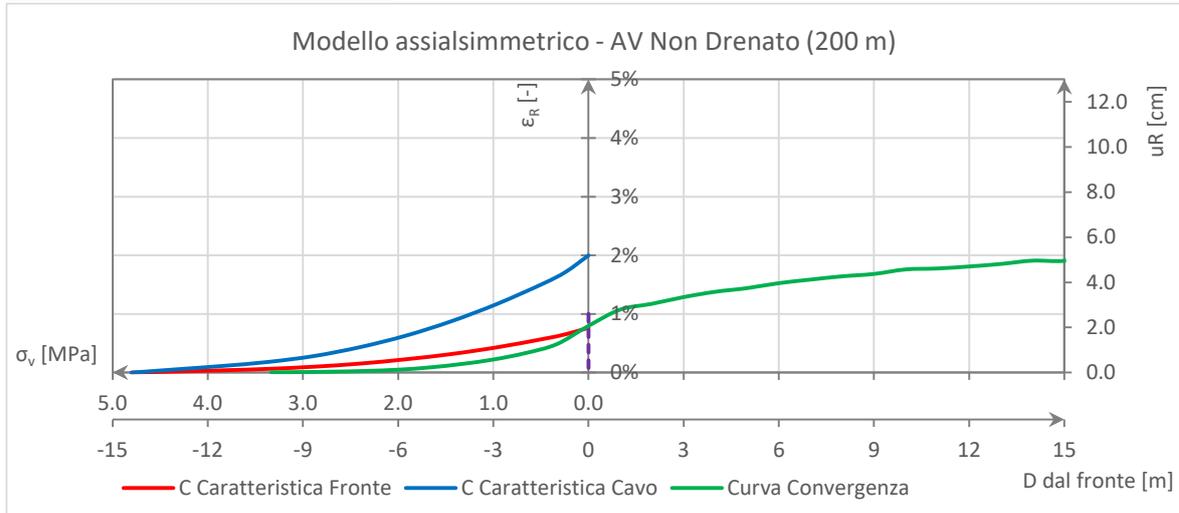


$\sigma_0=2100$ kPa
 $c'=30$ kPa
 $\phi'=24^\circ$
 $E'=150$ MPa
 $\nu=0.3$
 $P_{C(ef=1\%)}=3.5$ bar

Per la formazione AV, il comportamento di tipo drenato in fase di scavo è da escludersi ad eccezione delle zone di contatto con altre formazioni o di faglia. Scegliendo quest'ultima condizione geomeccanica (più sfavorevole) per l'analisi dei conci, la pressione adottata è $P_c=3.5$ bar.

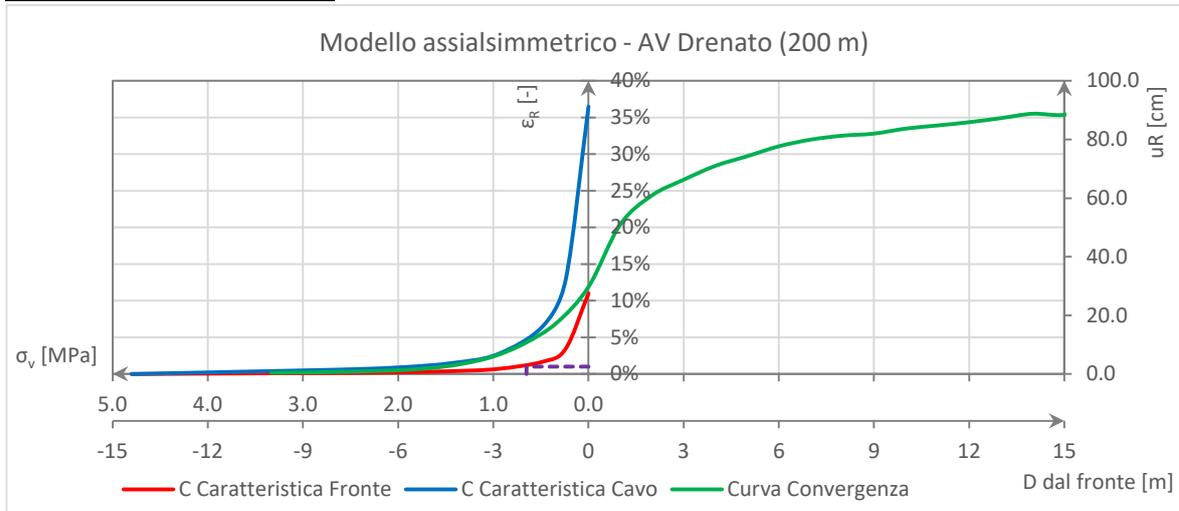
7.3.6 Curve caratteristiche e di convergenza – AV_200

Comportamento non-drenato



$\sigma_0=4800$ kPa $c_u=900$ kPa $\phi_u=0^\circ$ $E_u=1080$ MPa $\nu=0.5$ $P_{C(\epsilon_f=1\%)}=0.00$ bar

Comportamento drenato

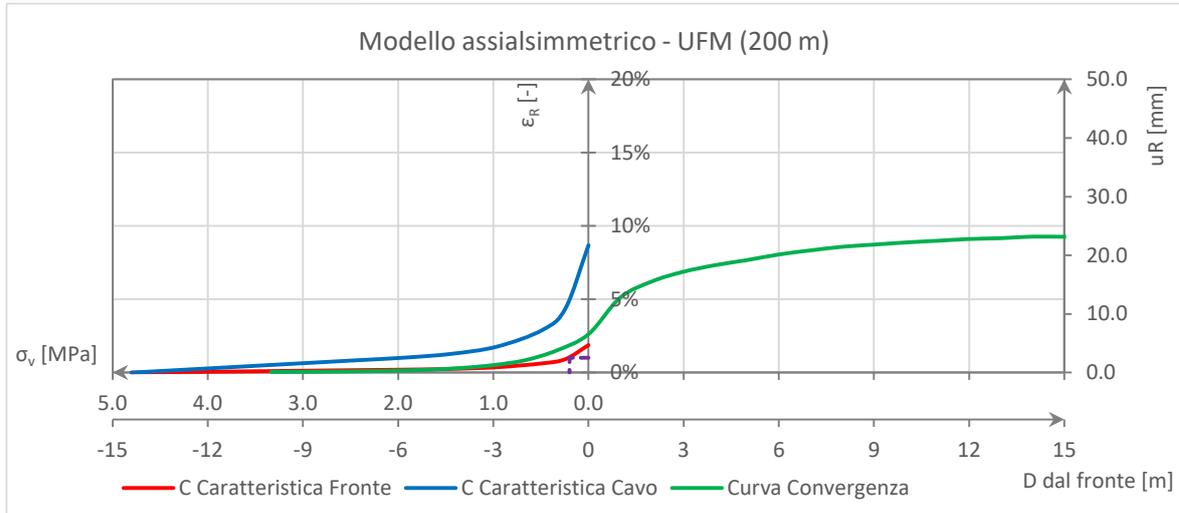


$\sigma_0=4800$ kPa $c'=50$ kPa $\phi'=24^\circ$ $E'=450$ MPa $\nu=0.3$ $P_{C(\epsilon_f=1\%)}=6.50$ bar

Valgono le considerazioni fatte nel paragrafo precedente, ma considerando che la pressione di calcolo in condizioni drenate per ottenere $\epsilon_f < 1\%$ è maggiore del limite operativo della TBM (4,5 bar), a questa condizione limite saranno associate delle convergenze superiori. Si sceglie quindi di calibrare la pressione di calcolo nel modello a deformazioni piane, imponendo il limite massimo di convergenza radiale di 25 cm (raggio di scavo 2,7 m – raggio estradosso conci 2,5 m + sovrascavo variabile 0,05 m = 25 cm).

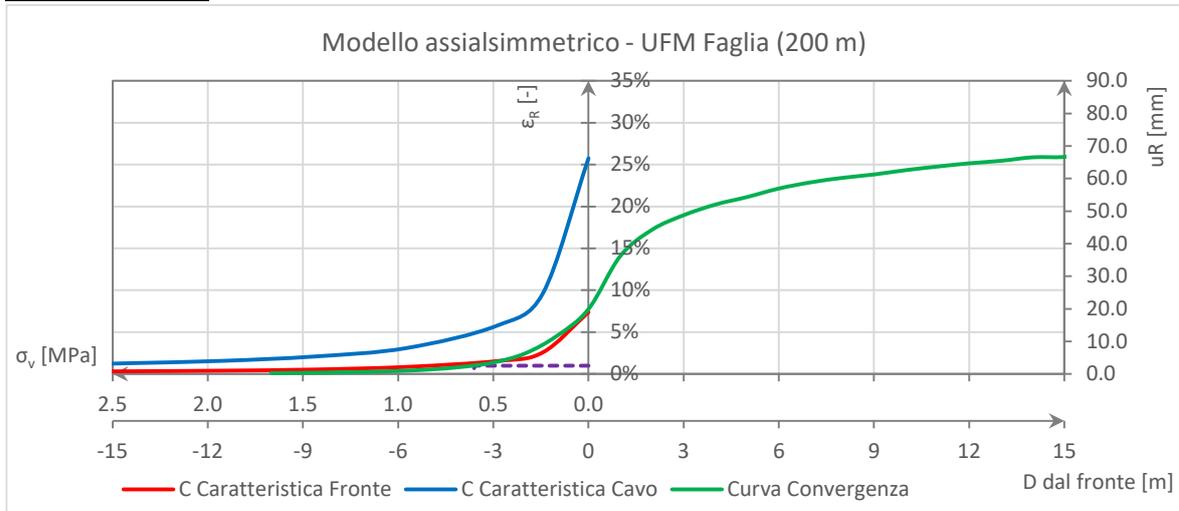
7.3.7 Curve caratteristiche e di convergenza – UFM_200

Lontano dalla zona di faglia



$\sigma_0=4800$ kPa $c'=120$ kPa $\phi'=33^\circ$ $E'=400$ MPa $\nu=0.3$ $P_{C(e_f=1\%)}=2.50$ bar

In zona di faglia



$\sigma_0=4800$ kPa $c'=60$ kPa $\phi'=31^\circ$ $E'=230$ MPa $\nu=0.3$ $P_{C(e_f=1\%)}=6.00$ bar

La pressione di confinamento in faglia é molto elevata (6 bar). Per queste strutture geomeccaniche profonde, è necessario tener conto di una riduzione della tensione agente per effetto dell'attrito tra faglia e roccia sana (effetto silo). Inoltre, si devono prevedere dei trattamenti al fronte per migliorare le caratteristiche dell'ammasso. Si considera in maniera forfettaria una pressione di confinamento $P_c=4.00$ bar per l'attraversamento delle faglie precedentemente trattate con interventi di consolidamento.

7.4 ANALISI STATICA

7.4.1 Parametri geotecnici e pressioni idrauliche

Per le analisi drenate, si adottano il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb ed il modulo drenato di riferimento E' .

Per le analisi non drenate, si utilizza la funzione “*Undrained A*” di Plaxis2D, che permette il calcolo delle sovrappressioni interstiziali generate dallo scavo. Il criterio di resistenza è valutato in termini di parametri drenati (c' , ϕ'). Per l'analisi delle deformazioni, il software applica il modulo drenato E' allo scheletro solido, e impone come indeformabile la componente idraulica del mezzo. Nei confronti della fase di scavo, ne risulta un'analisi con risultati intermedi tra le due condizioni limite di ammasso drenato e non-drenato, con generazione delle sovrappressioni interstiziali.

Sulla base del modello idrogeologico di riferimento, consideriamo due diverse situazioni. Per le analisi drenate, non sono presenti pressioni idrauliche al momento dello scavo (bassa permeabilità delle arenarie e assenza di falda freatica nei calcari), successivamente si applica una pressione idrostatica al rivestimento pari a $H_w=30$ m a lungo termine. Per le analisi non drenate, si considera una pressione interstiziale pari a $H_w=30$ m al momento dello scavo, senza filtrazione verso la galleria. In seguito alla dissipazione delle pressioni interstiziali, si ripristina il carico idraulico di $H_w=30$ m sul rivestimento.

7.4.2 Stato tensionale iniziale

Ad eccezione della sezione di imbocco (FYR-c_15) le altre sezioni di calcolo possono essere considerate profonde ($Z > 10 \cdot \Phi$). Si impone dunque lo stato tensionale al modello, tenendo conto del coefficiente di spinta a riposo, per il calcolo della tensione orizzontale. In assenza di indicazioni specifiche provenienti dalla caratterizzazione geotecnica, si assume $\sigma_1 = \sigma_v$, $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_h$.

7.4.3 Modellazione dello scarico generato dallo scavo

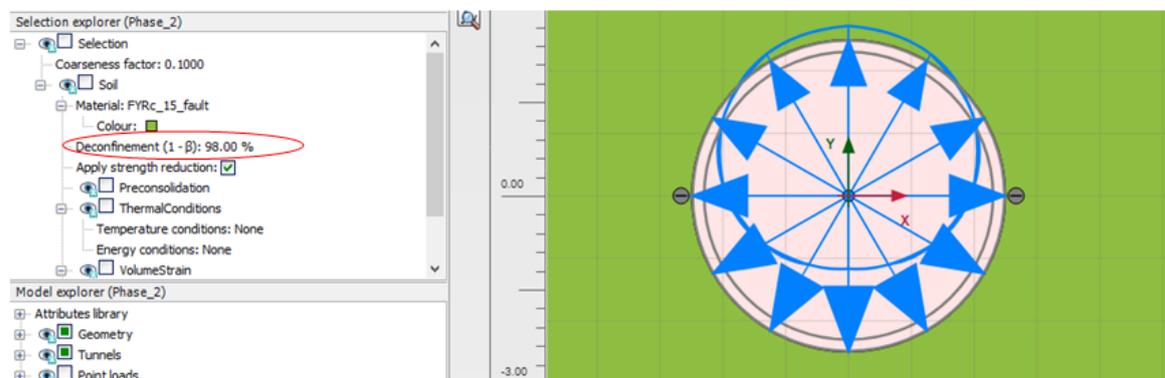


Fig. 7.2 – Scarico intrinseco e della pressione di confinamento per il calcolo dei conci

Per modellare lo scarico generato dallo scavo si utilizzano le seguenti funzioni:

- ✓ Applicazione al cavo di un tasso di deconfinamento intrinseco pari al 98% (Deconfinamento intrinseco elastico per una galleria $\Phi=5.4$ m, ad una distanza dal fronte pari a $L=11$ m – fine dello scudo),
- ✓ Applicazione della pressione di calcolo della TBM (rif. §7.3).

7.4.4 Modellazione del rivestimento definitivo

Il rivestimento definitivo sarà composto da una sequenza di anelli di conci. È modellato da un elemento "plate" bidimensionale, elastico, con un'interfaccia avente una resistenza mobilizzabile pari a $2/3$ dell'angolo di attrito interno del terreno.

Per la modellazione dell'anello, è necessario considerare il comportamento dei giunti longitudinali e la loro influenza sul comportamento finale del rivestimento. Infatti, l'insieme degli anelli non può essere considerato un guscio cilindrico omogeneo. Il momento flettente, che non può essere trasmesso dai giunti, è trasferito ai conci dell'anello adiacente, come mostrato nel seguente schema.

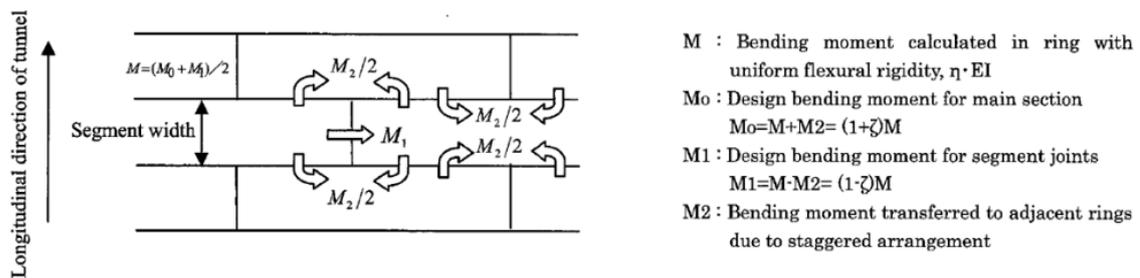


Fig. 7.3 – Trasferimento del momento tra differenti anelli

Un approccio universalmente riconosciuto è di attribuire al rivestimento una rigidità flessionale intermedia (E_{eq}) opportunamente ridotta tramite un coefficiente η per tenere conto della rigidità dei giunti:

$$\eta = (E_{eq}) / (E_{lv})$$

E: modulo di Young del cls (per la fase a lungo termine si considera $E_{LT} = E_{CT} / 3$)

I_{eq} : inerzia equivalente

I_v : inerzia di un cono

Il metodo di Muir-Wood è adottato per calcolare questa rigidità intermedia:

$$I_{eq} = I_j + (4/n)^2 * e^3 / 12$$

n: numero di conci = 6

I_j : inerzia a livello del giunto uguale a $I_j = (\alpha e^3 \cdot \beta L) / 12 = 1,98E-3 \text{ m}^4$

$\alpha e = 0,26$ m: zona di contatto trasversale tra conci

$\beta L = 1,5$ m: zona di contatto longitudinale tra conci

La rigidità assiale è invece considerata a partire dallo spessore reale del cono.

Tab. 7.1 – Rigidezza dell'anello equivalente di conci

Rivestimento	E [GPa]	EA [kN/m]	El _{eq} [kNm ² /m]
Corto termine	35	1,40*E7	1,29*E5
Lungo termine	11,67	4,67*E6	4,30*E4

7.4.5 Analisi del rigonfiamento

La metodologia di calcolo adottata si ispira direttamente al metodo proposto da Robert et al. [15], che ricerca la deformazione dello strato rigonfiante in funzione del tasso di deconfinamento. Si realizza un sotto-modello numerico che permette di determinare la deformazione volumica dello strato rigonfiante con le seguenti fasi:

- ✓ dopo la fase di installazione dei conci e consolidazione, si impone una deformazione volumica (ϵ_v) nello strato rigonfiante, ipotizzato avere uno sviluppo di 120° in arco rovescio ed uno spessore di 2 m (ipotizzato a partire da raggio plastico),
- ✓ Questa deformazione imposta genera un aumento dello sforzo al di sotto dell'arco rovescio della galleria ed un aumento dello spessore dello strato rigonfiante
- ✓ Si può quindi dedurre la deformazione verticale dello strato (ΔH) e lo sforzo verticale ottenuto sotto l'arco rovescio (σ_v),
- ✓ Questa procedura è ripetuta per diversi valori di deformazione imposta e permette di tracciare la curva di rigonfiamento per questa specifica sezione.
- ✓ Intersecando la curva di rigonfiamento della sezione con la retta di Huder-Amberg del terreno, si determina il punto di equilibrio e si identifica la deformazione volumica di calcolo.

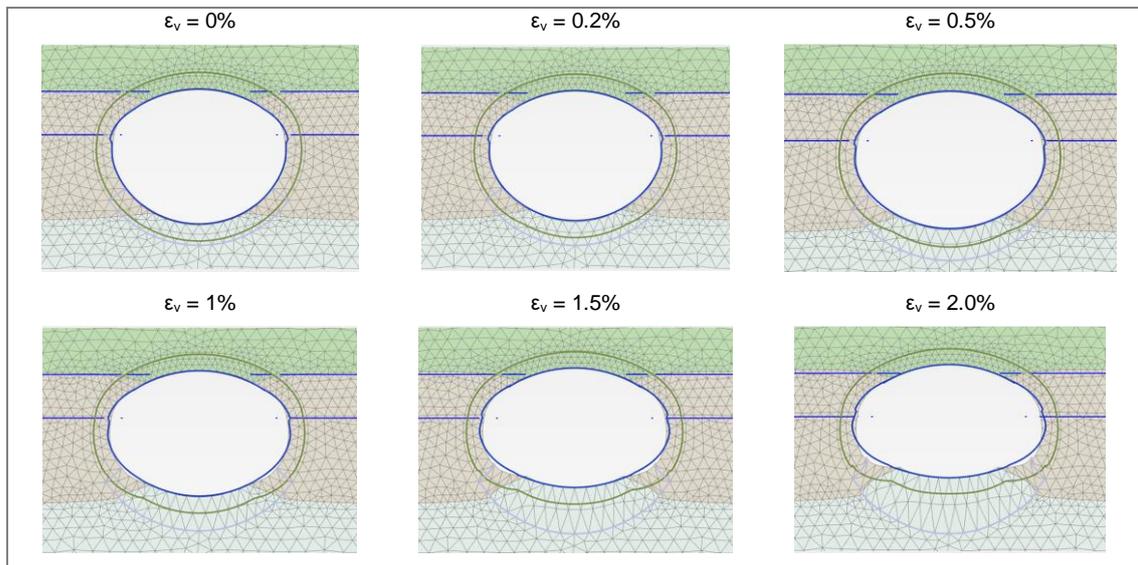


Fig. 7.4 – Modellazione del rigonfiamento tramite deformazione volumica imposta ad uno strato di terreno in arco rovescio

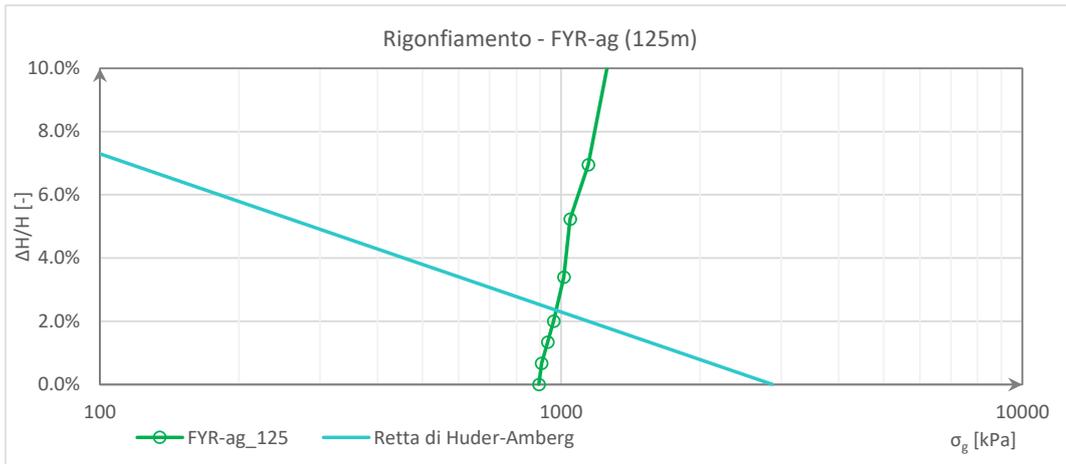


Fig. 7-5 : Diagramma di rigonfiamento – Sezione FYR-ag_125

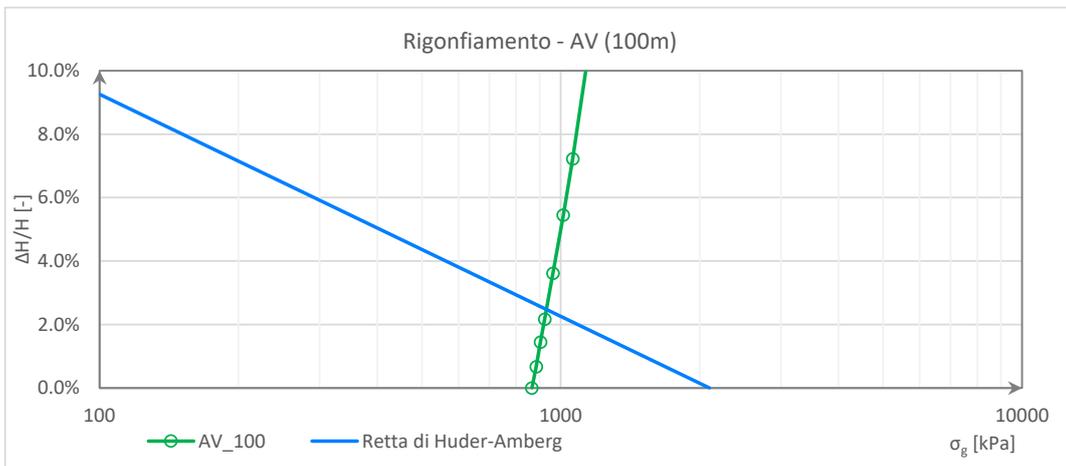


Fig. 7-6 : Diagramma di rigonfiamento – Sezione AV_100

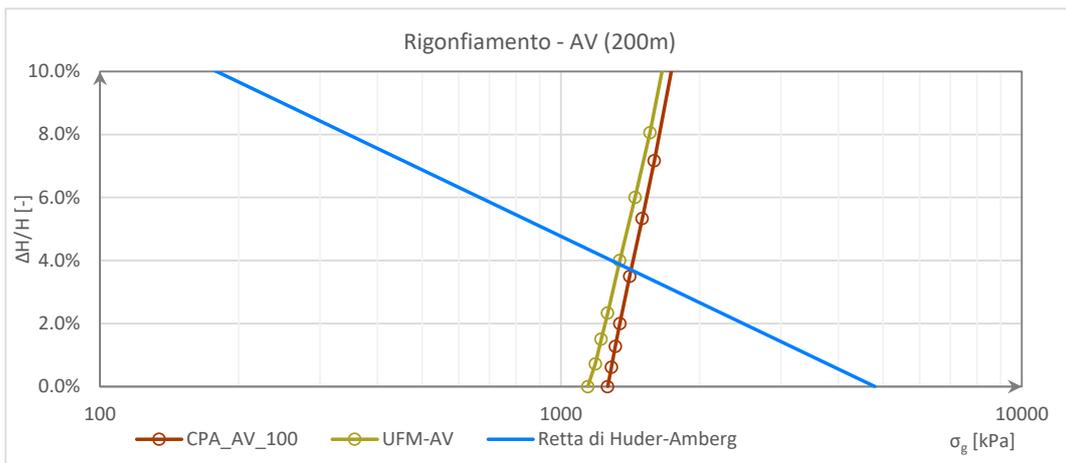


Fig. 7-7 : Diagramma di rigonfiamento – Sezione AV_200

Il rigonfiamento si considera agente nelle formazioni FYR-ag e AV. In assenza di informazioni specifiche sulle pressioni di rigonfiamento, si considera, a favore di sicurezza, che siano uguali alle tensioni geostatiche. Per quanto riguarda il coefficiente di rigonfiamento, dalle prove edometriche si ottiene $R_g=0.05$ per FYR-ag e $R_g=0.07$ per AV. I grafici di sopra mostrano i risultati dei sotto-modelli per valutare il punto di equilibrio del rigonfiamento. Si ottiene:

- ✓ $\epsilon_v=0.3\%$ per le sezioni FYR-ag_125 e AV_100
- ✓ $\epsilon_v=0.5\%$ per le due sezioni AV_200

7.4.6 Fasi di calcolo

Le fasi di calcolo per l'analisi a deformazioni piane sono le seguenti:

- 1) Fase geostatica: inizializzazione delle tensioni nel modello,
- 2) Scavo: scavo del tunnel, applicazione dello scarico intrinseco del 98% + pressione di confinamento di calcolo al contorno dello scavo, (per i modelli non drenati: generazione delle sovrappressioni interstiziali),
- 3) Conci: Installazione del rivestimento definitivo e del grout nel vuoto anulare, scarico 100% e disattivazione della pressione della TBM,

Comportamento drenato

- 4a) Lungo termine: caratteristiche di lungo termine per il grout ed il rivestimento in conci, applicazione della pressione idrostatica ($H_w=30$ m, ad eccezione di FYR-c_15).

Comportamento non-drenato:

- 4b) Consolidazione: delle sovra-pressioni interstiziali generate dallo scavo,
- 5b) Lungo termine: caratteristiche di lungo termine per il grout ed il rivestimento in conci, comportamento drenato dell'ammasso,
- 6b) Rigonfiamento (solo per FYR-ag e AV): applicazione della deformazione volumica di rigonfiamento in arco rovescio.

7.5 ANALISI SISMICA

7.5.1 Metodologia di calcolo

L'azione sismica è valutata tramite un'analisi numerica che simula l'effetto di ovalizzazione sulla sezione trasversale del tunnel generata dalle onde di taglio del sisma. L'approccio adottato per studiare questo effetto è il metodo di deformazioni di taglio in campo libero (Wang, 1993, Power et al. 1998; Hashash et al. 2001), che rappresenta la condizione maggiormente conservativa. Questo approccio suppone che la deformazione della struttura sia uguale alla deformazione del terreno, in campo libero, sotto l'azione del sisma di progetto.

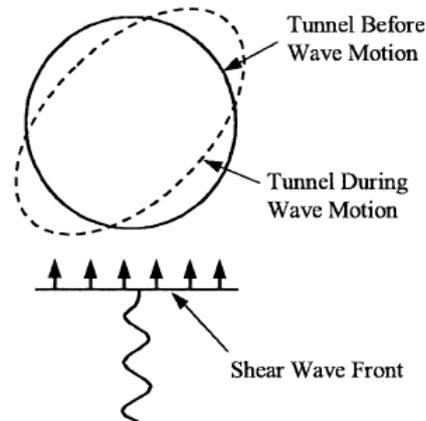


Fig. 7-8 : Effetto di ovalizzazione della galleria soggetta a onde sismiche

La deformazione a taglio di progetto (γ_{\max}) è calcolata come il rapporto tra la velocità delle onde sismiche e la velocità apparente di propagazione delle onde sismiche nel terreno:

$$\gamma_{\max} = V_s / C_s$$

C_s è la velocità apparente di propagazione delle onde S nel terreno (estratta dalle indagini sismiche)

$V_s = k \cdot a_{z,\max}$: con k uguale al rapporto tra la velocità di picco al suolo e l'accelerazione di picco al suolo, ottenuto a partire dalla tabella seguente.

Tab. 7-2 : Valori raccomandati per il coefficiente k [Power et al. 1996]

Moment magnitude (M_w)	Ratio of peak ground velocity (cm/s) to peak ground acceleration (g)		
	Source-to-site distance (km)		
	0-20	20-50	50-100
<i>Rock^a</i>			
6.5	66	76	86
7.5	97	109	97
8.5	127	140	152
<i>Stiff soil^a</i>			
6.5	94	102	109
7.5	140	127	155
8.5	180	188	193
<i>Soft soil^a</i>			
6.5	140	132	142
7.5	208	165	201
8.5	269	244	251

Considerando il diagramma di disgregazione per il sito in esame, si considera una magnitudo $M_w=6.5$ ed una distanza tra sorgente e sito pari minore di 20 km.

Modello di pericolosità sismica MPS04-S1

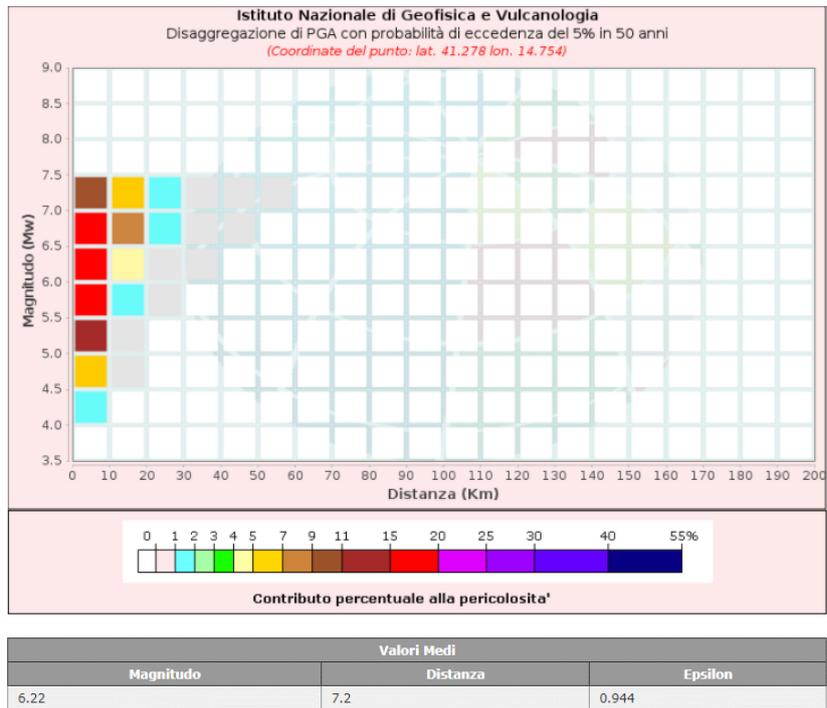
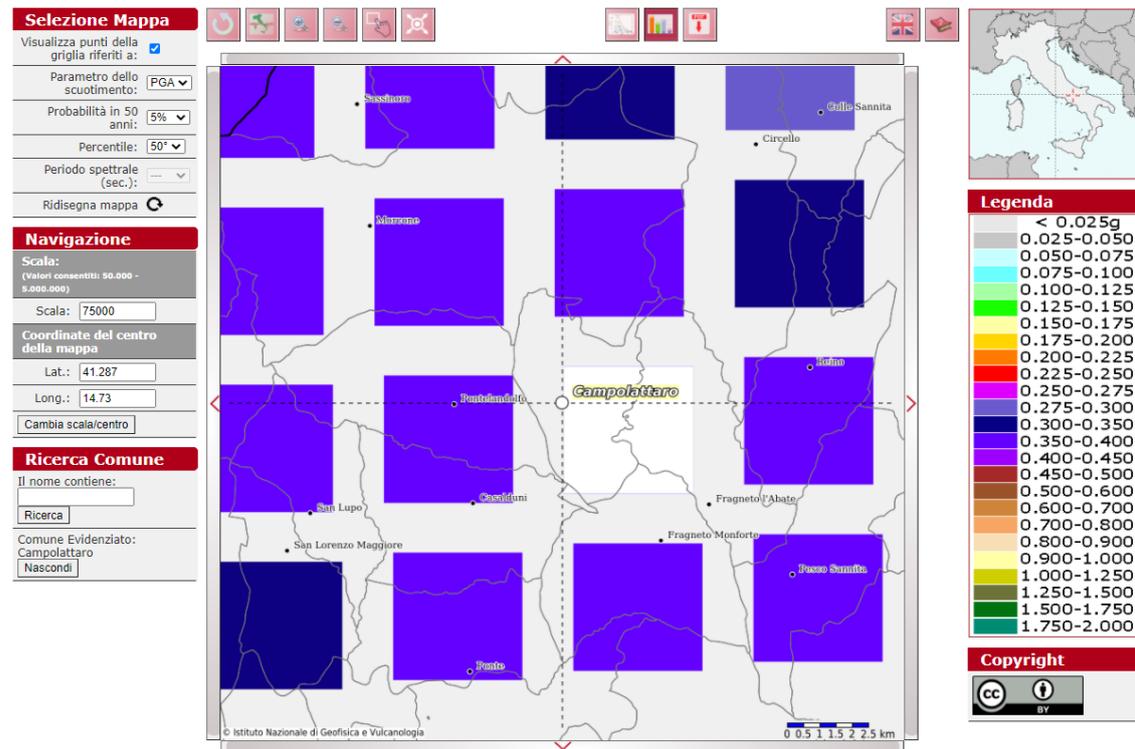


Fig. 7-9 : Diagramma di disagregazione della PGA per il sito in esame

7.5.2 Modellazione numerica

Ai fini della modellazione numerica, si realizza un modello con le seguenti caratteristiche:

- ✓ Stato di sforzo iniziale nullo,
- ✓ Terreno con comportamento elastico e modulo dinamico $E_{dyn}=C_s^2*(\gamma/g)*2*(1+\nu)$,
- ✓ Scavo della galleria senza deconfinamento ed installazione del rivestimento con proprietà a lungo termine,
- ✓ Condizioni al contorno del modello: spostamenti orizzontali $\Delta x_{max} = \gamma_{max} * h_{mod} / 2$ imposti sul lato superiore e inferiore. Aggiunta di bordi rigidi sulle facce laterali.

Le sollecitazioni così determinate sul rivestimento vengono successivamente sommate alle sollecitazioni statiche a lungo termine e verificate allo SLV. Le velocità apparenti di propagazione delle onde S e le distorsioni imposte al modello sono presentate nella seguente tabella:

Tab. 7-3 : Valori di distorsione per le analisi sismiche

Sezione	C_s [km/s]	γ_{max} [-]	Sezione	C_s [km/s]	γ_{max} [-]
FYR-c_75	0,5	0,042%	FYR-c_15	0,4	0,067%
FYR-ag_125	0,64	0,046%	AV_100	0,7	0,042%
CPA_150	0,7	0,042%	CPA-AV_200	0,8	0,037%
UFM_200	0,8	0,032%	UFM-AV_200	0,8	0,037%

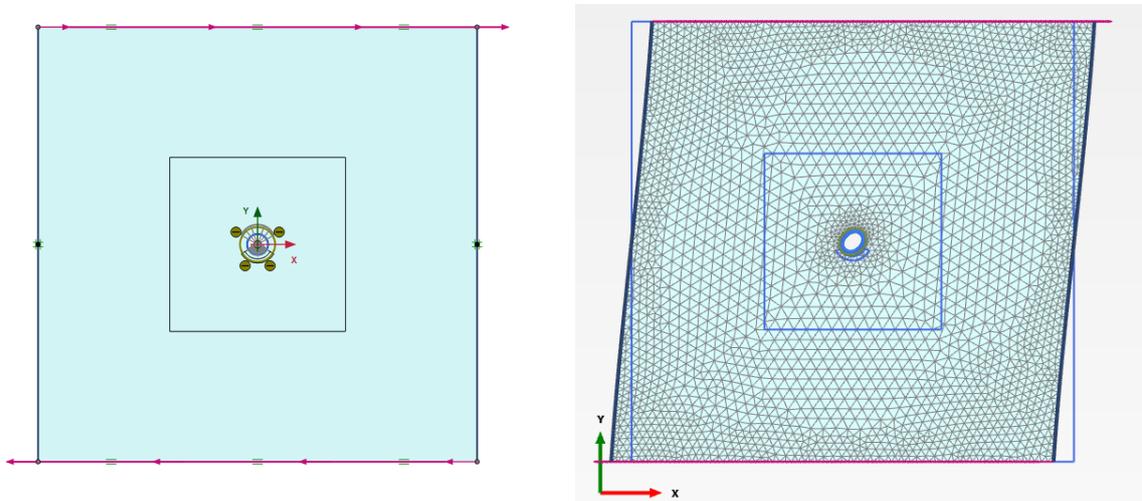


Fig. 7-10 : Modello a distorsione imposta per l'analisi degli effetti sismici sulla galleria

7.6 RISULTATI DELLE ANALISI FEM – ANELLO CORRENTE

Per motivi di sintesi, si riportano i risultati di sforzi e deformazioni del terreno più significativi di ogni sezione di calcolo. Le sollecitazioni nominali sul rivestimento sono riportate al fondo del paragrafo.

7.6.1 FYR-c_75

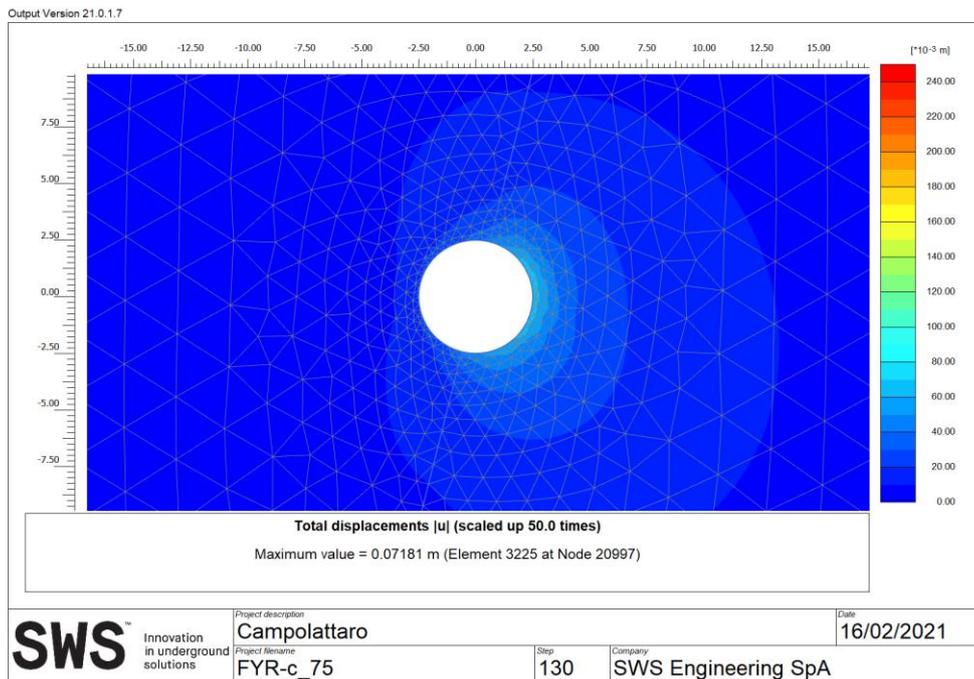


Fig. 7-11 : Convergenza del cavo – Fase di scavo – Sezione FYR-c_75

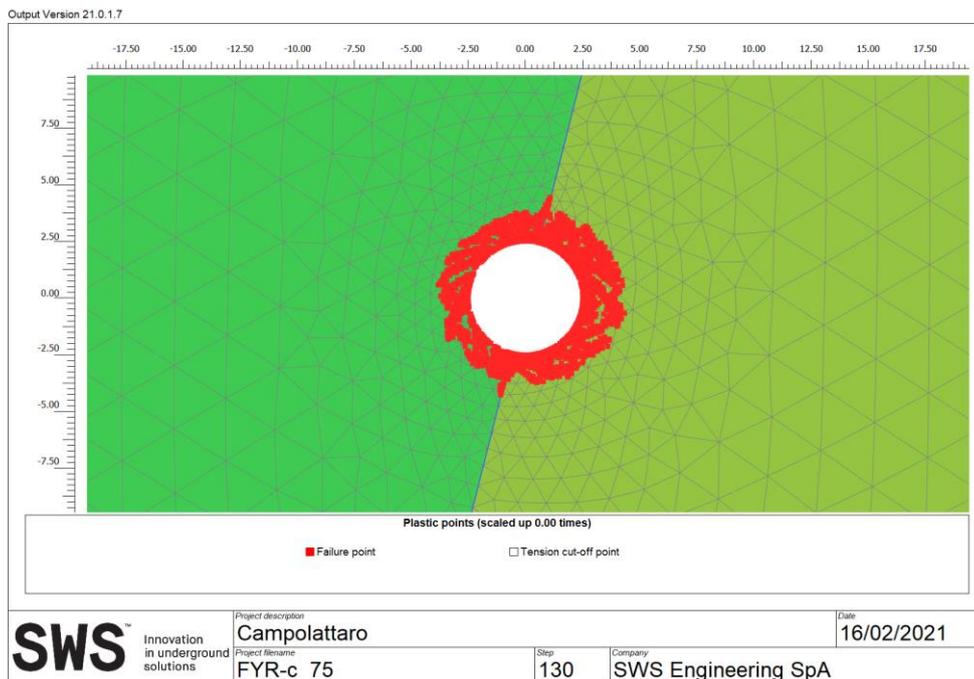


Fig. 7-12 : Zone di plasticizzazione – Fase di scavo – Sezione FYR-c_75

7.6.2 FYR-ag_125

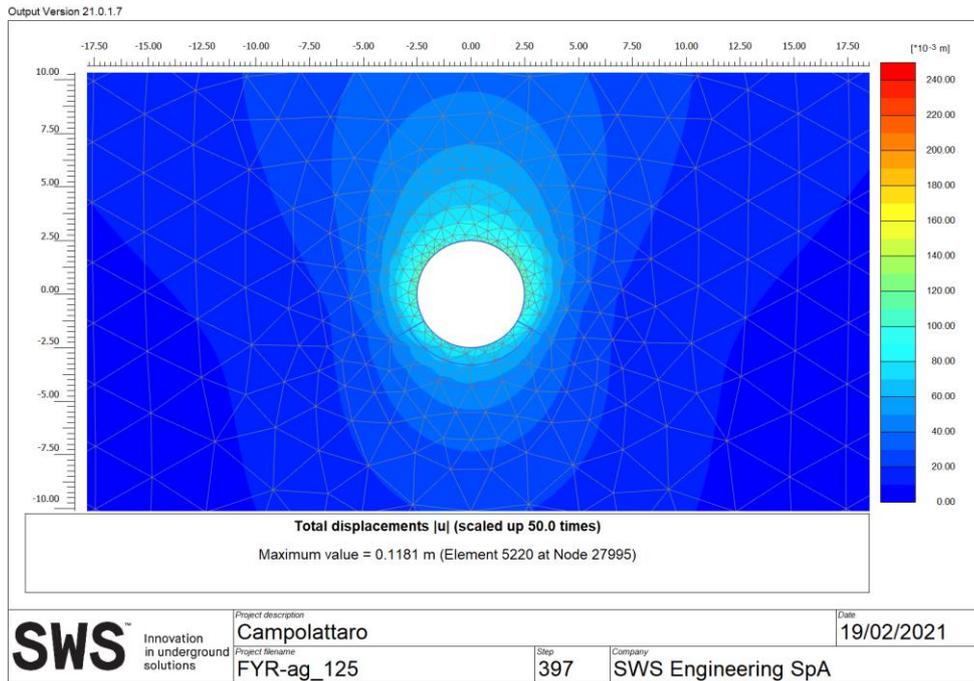


Fig. 7-13 : Convergenza del cavo – Fase di scavo – Sezione FYR-ag_125

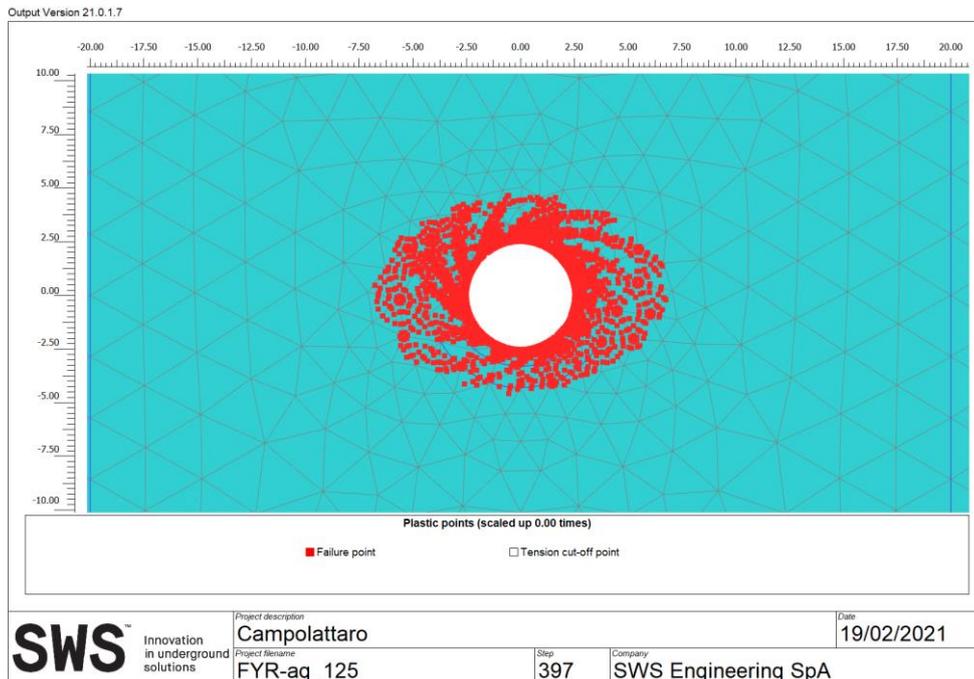


Fig. 7-14 : Zone di plasticizzazione – Fase di scavo – Sezione FYR-ag_125

7.6.3 CPA_150

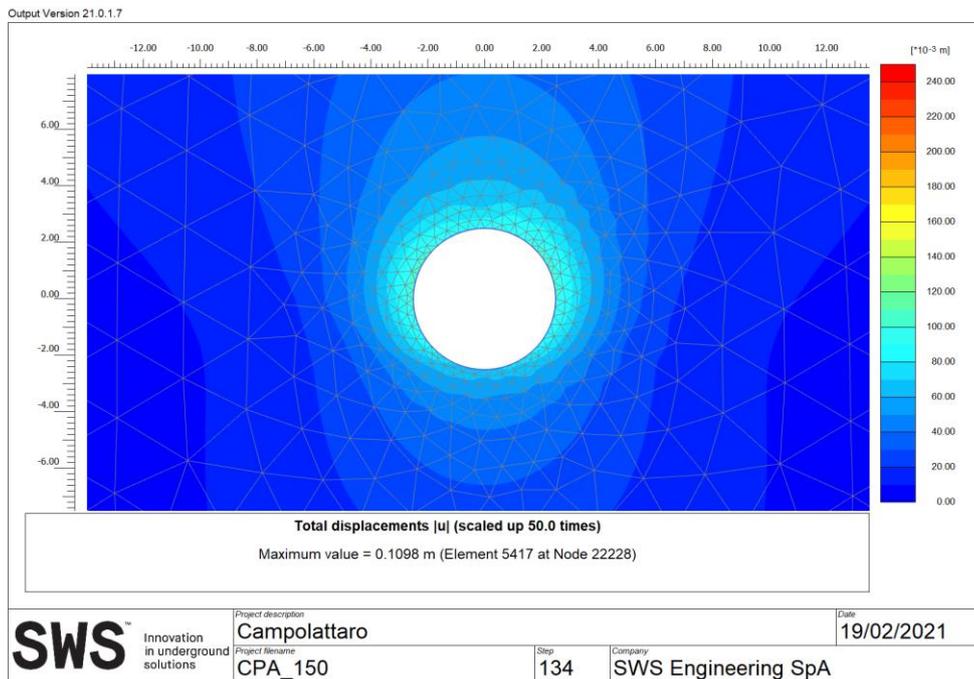


Fig. 7-15 : Convergenza del cavo – Fase di scavo – Sezione CPA_150

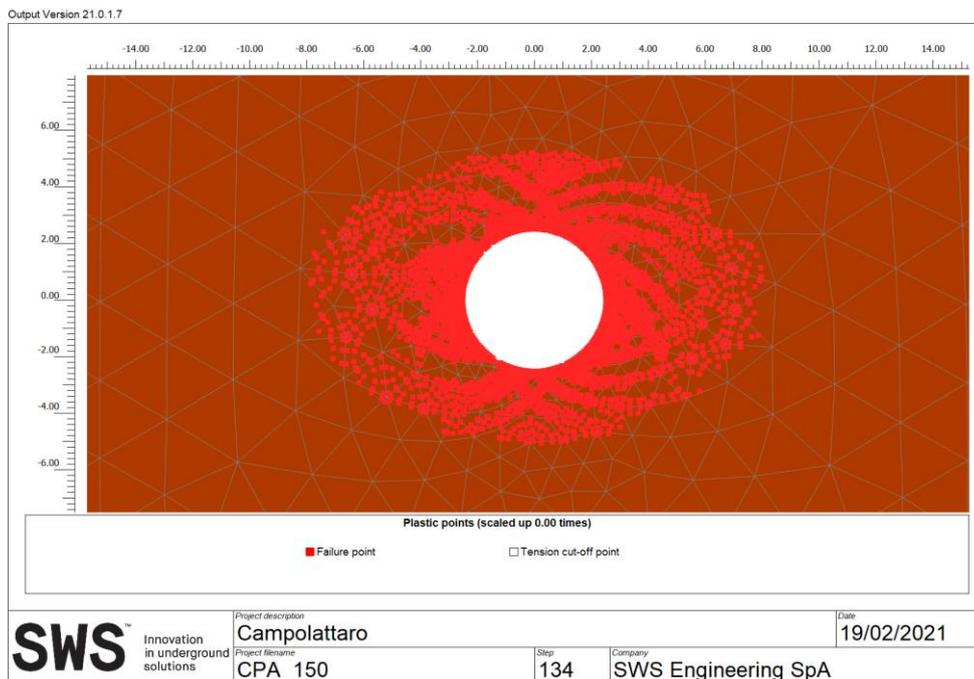


Fig. 7-16 : Zone di plasticizzazione – Fase di scavo – Sezione CPA_150

7.6.4 UFM_200

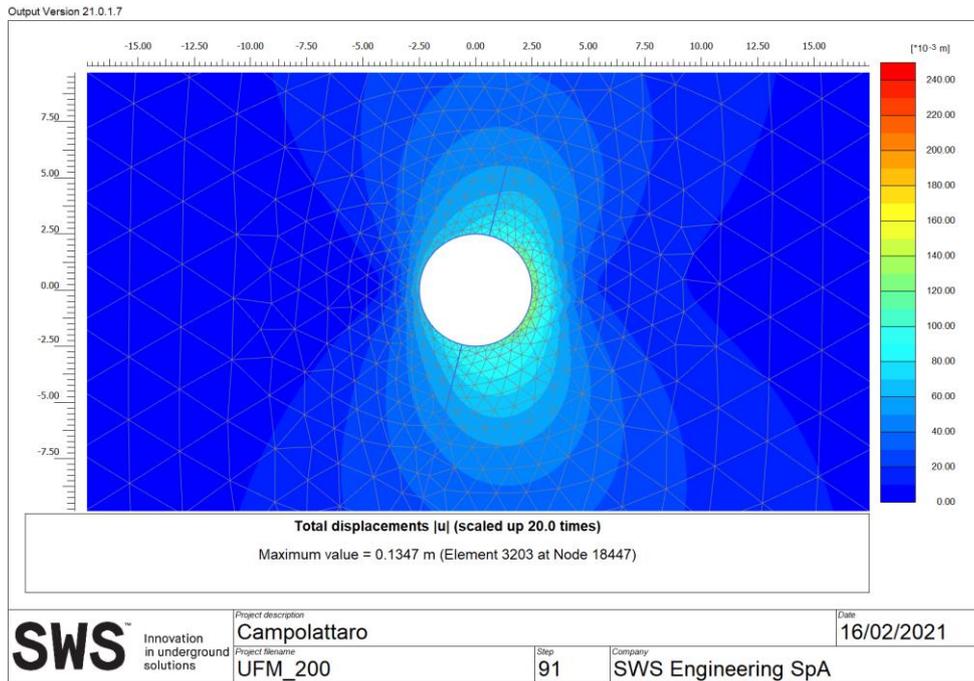


Fig. 7-17 : Convergenza del cavo – Fase di scavo – Sezione UFM_200

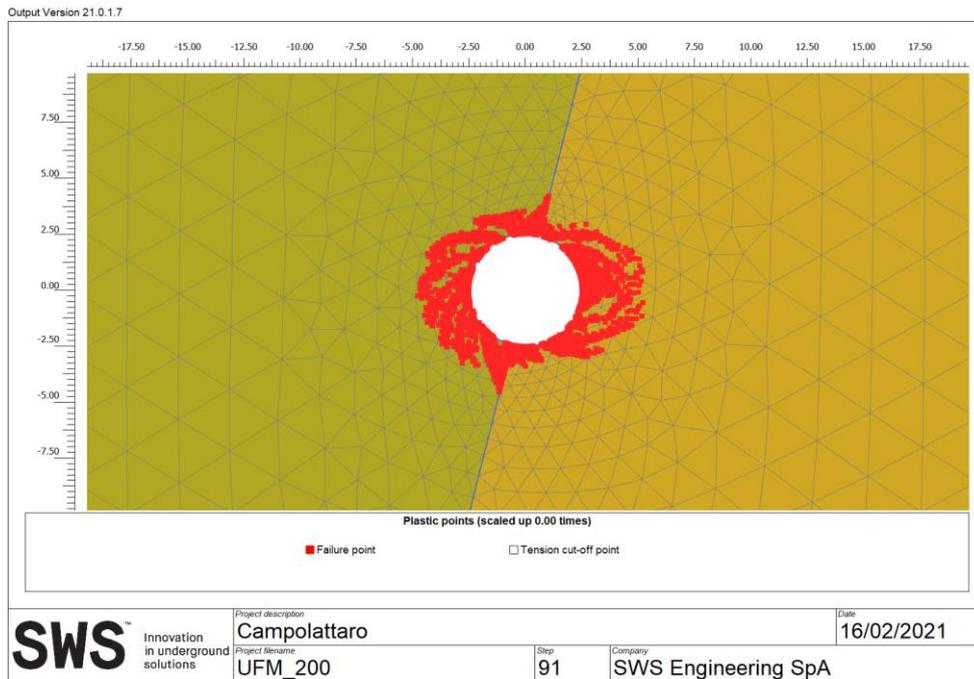
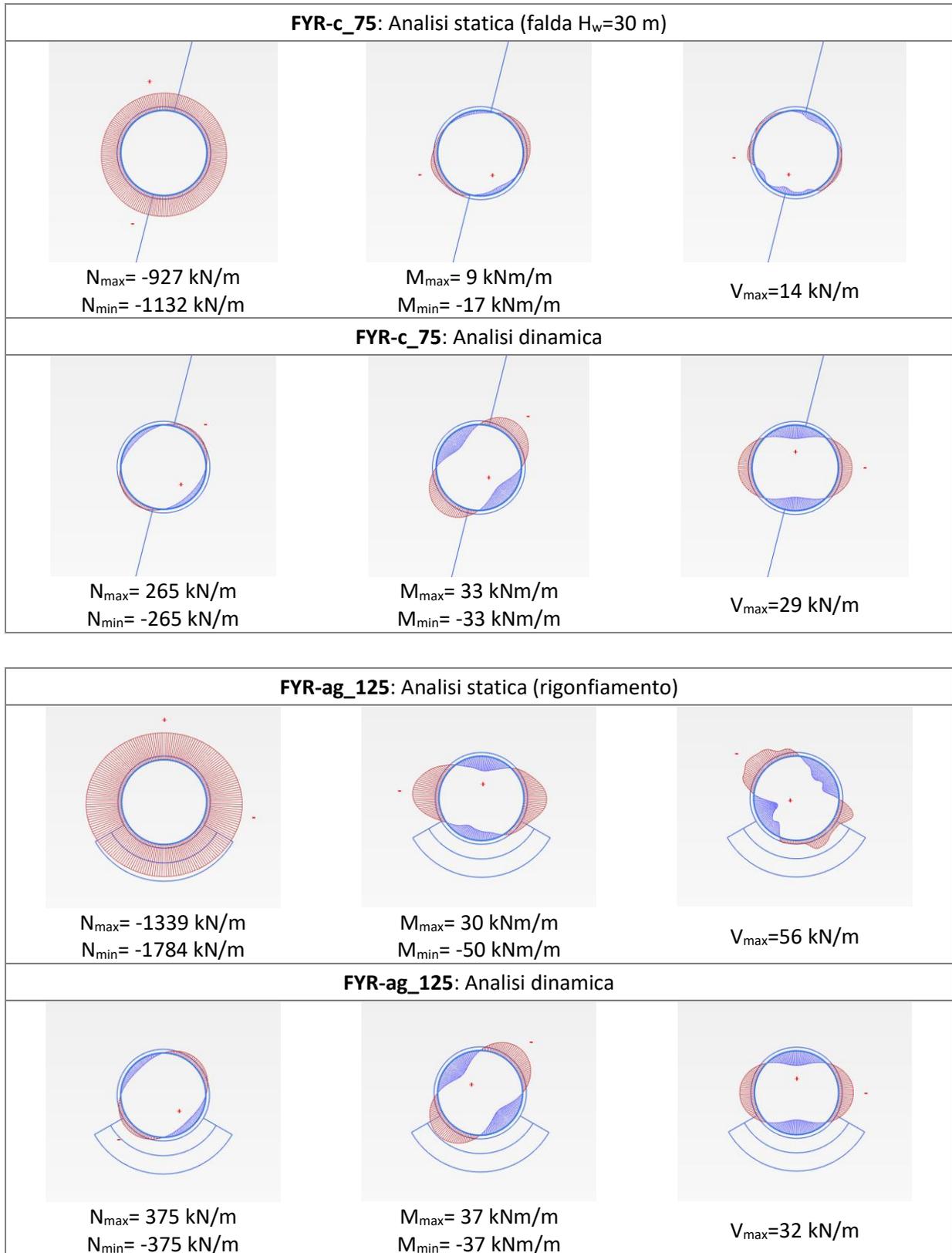
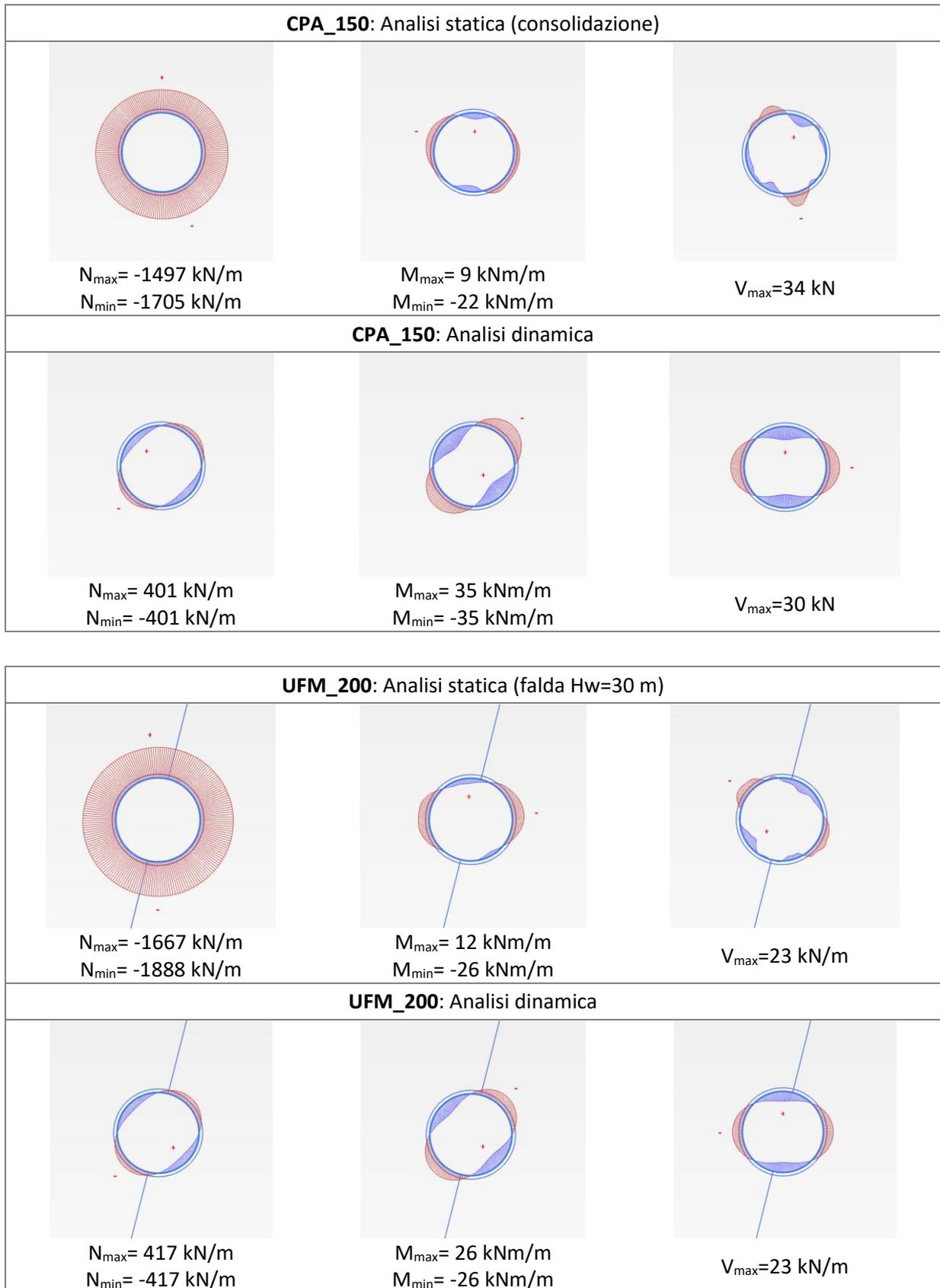


Fig. 7-18 : Zone di plasticizzazione – Fase di scavo – Sezione UFM_200

7.6.5 Riassunto delle sollecitazioni nell'anello corrente





7.7 RISULTATI DELLE ANALISI FEM – ANELLO RINFORZATO

Le sollecitazioni nominali sul rivestimento sono riportate al fondo del paragrafo.

7.7.1 FYR-c_15

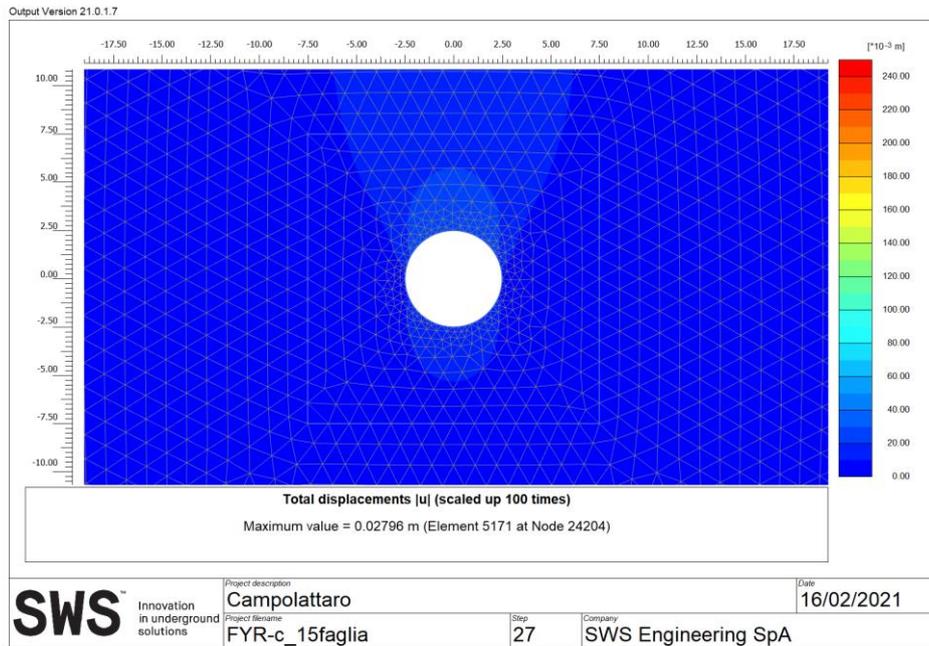


Fig. 7-19 : Convergenza del cavo – Fase di scavo – Sezione FYR-c_15

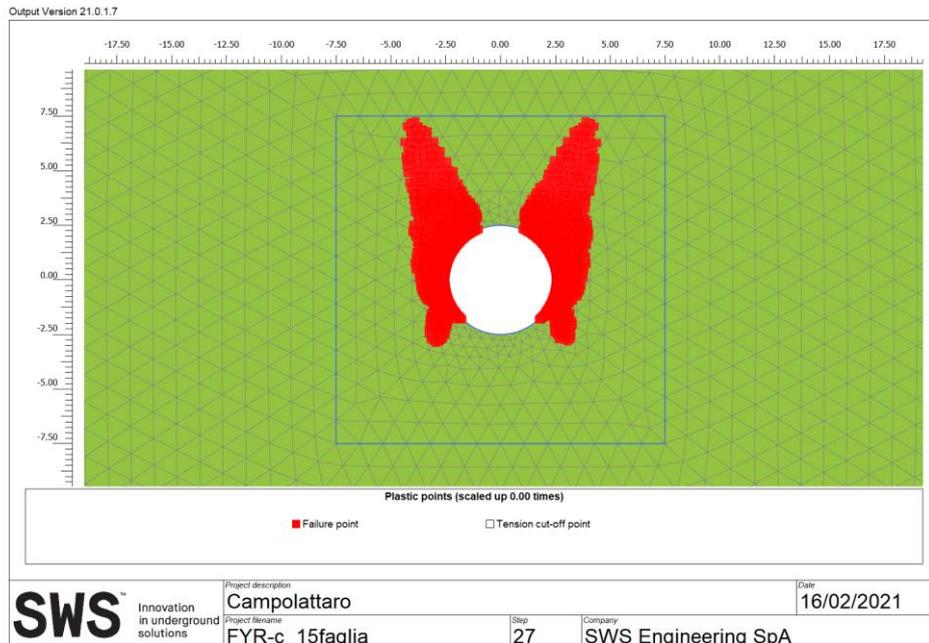


Fig. 7-20 : Zone di plasticizzazione – Fase di scavo – Sezione FYR-c_15

7.7.2 AV_100

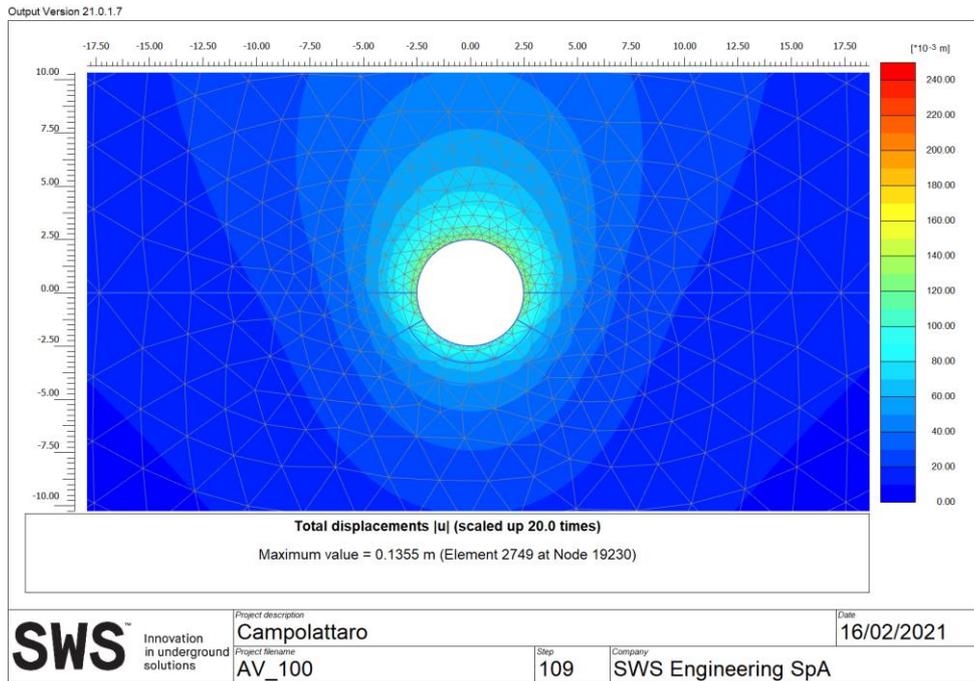


Fig. 7-21 : Convergenza del cavo – Fase di scavo – Sezione AV_100

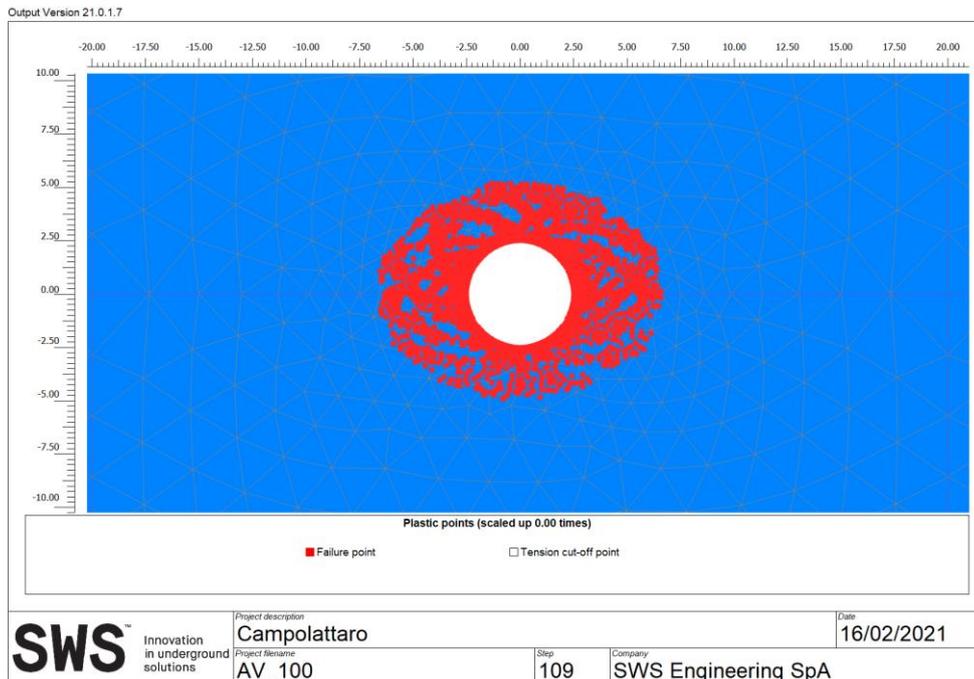


Fig. 7-22 : Zone di plasticizzazione – Fase di scavo – Sezione AV_100

7.7.3 CPA-AV_200

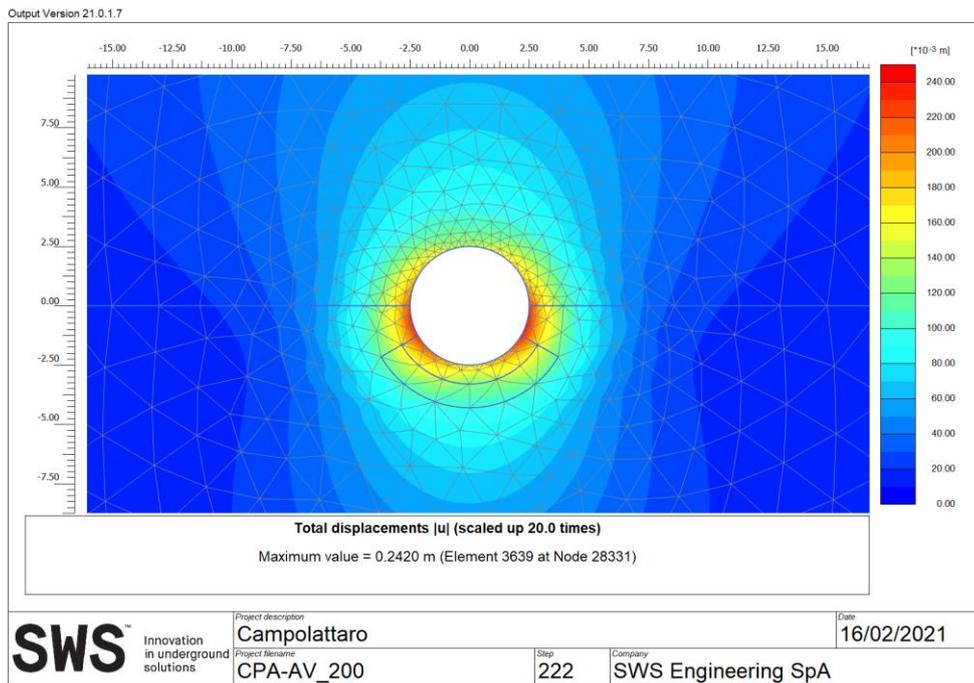


Fig. 7-23 : Convergenza del cavo – Fase di scavo – Sezione CPA-AV_200

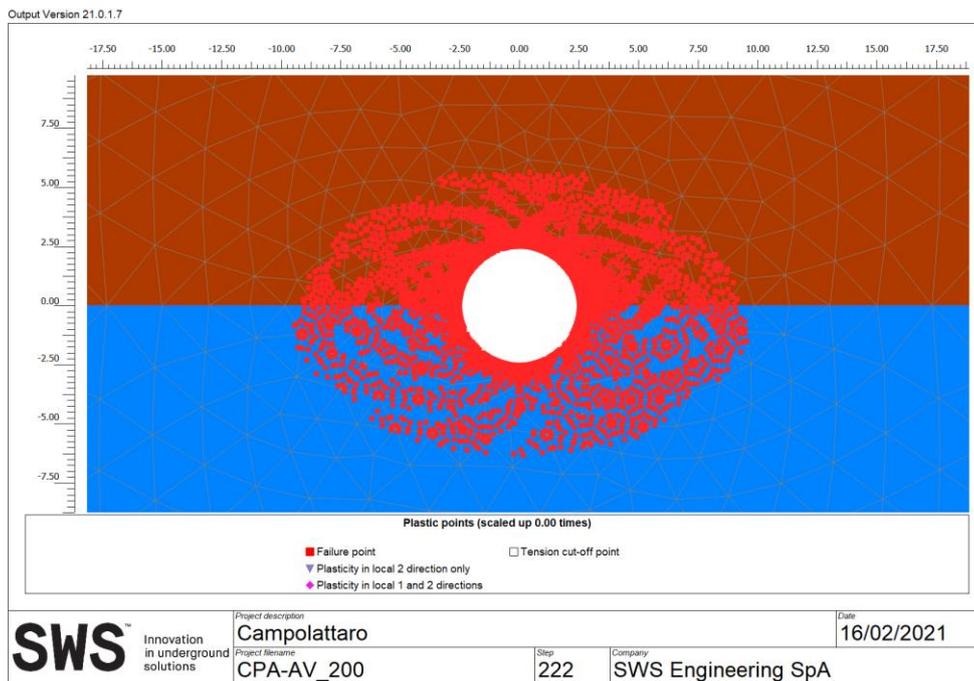


Fig. 7-24 : Zone di plasticizzazione – Fase di scavo – Sezione CPA-AV_200

7.7.4 UFM-AV_200

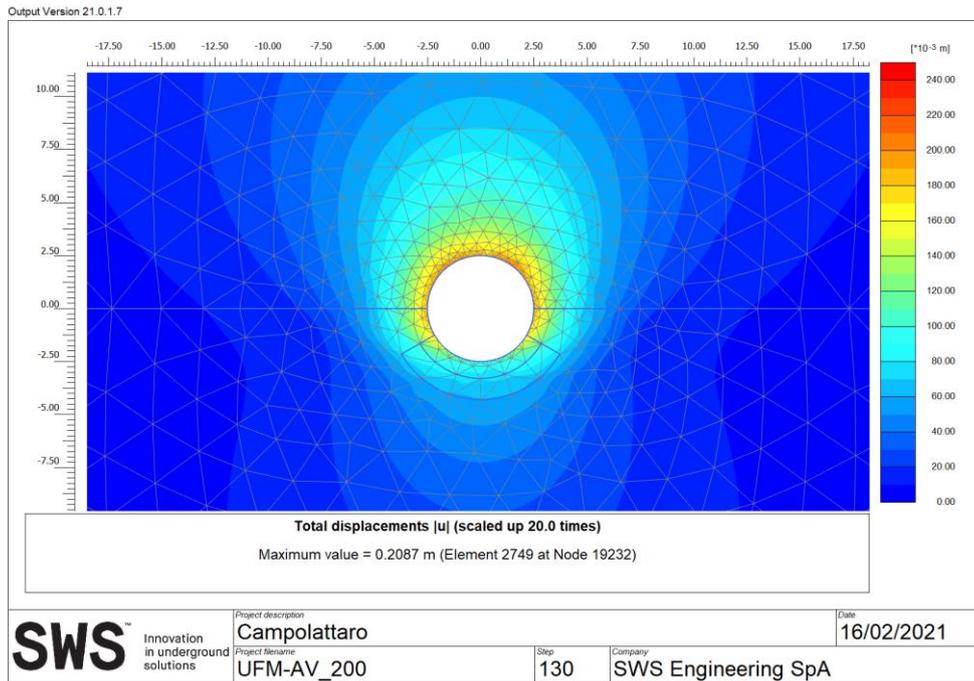


Fig. 7-25 : Converggenza del cavo – Fase di scavo – Sezione UFM-AV_200

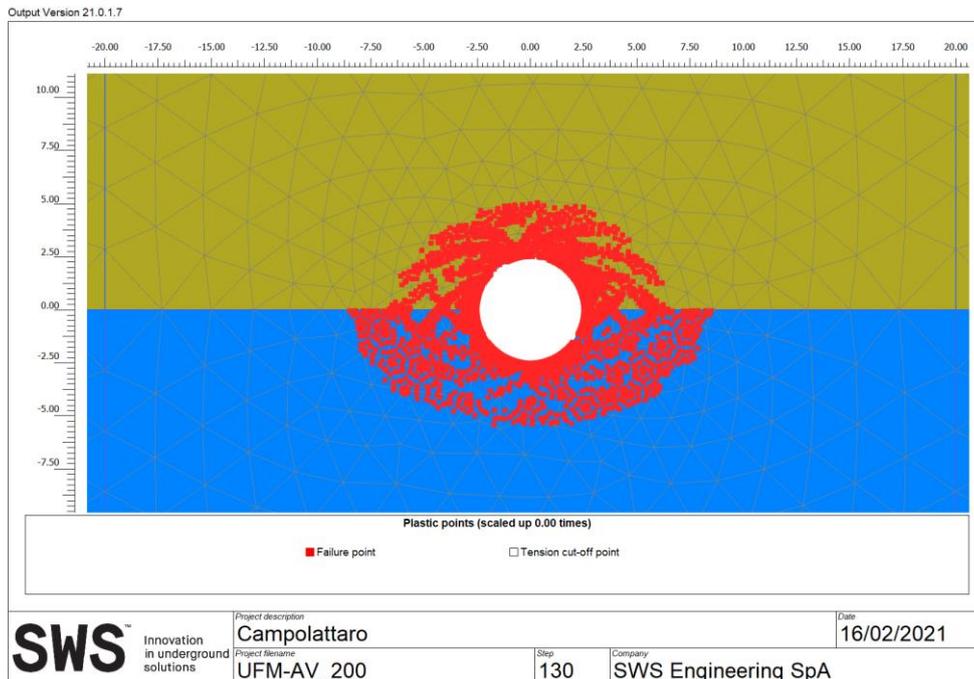
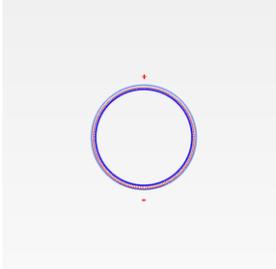
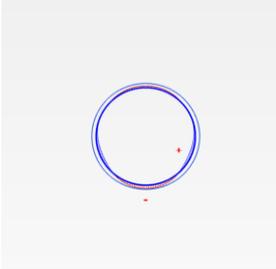
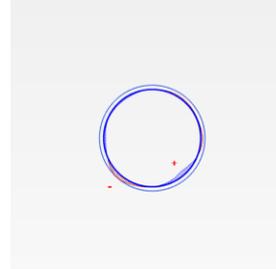
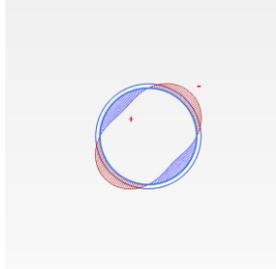
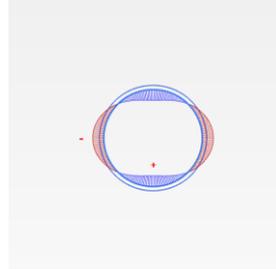
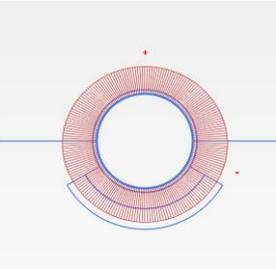
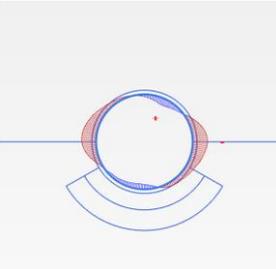
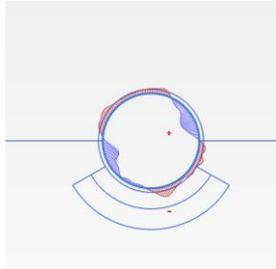
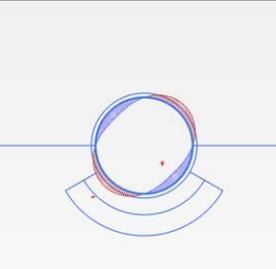
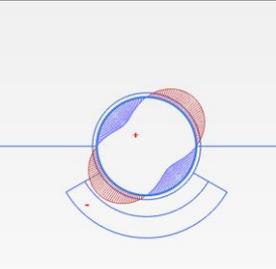
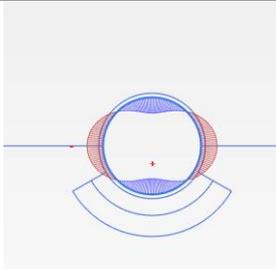
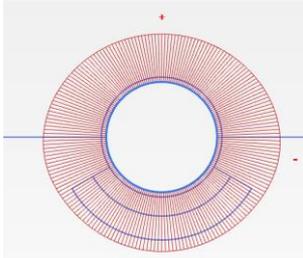
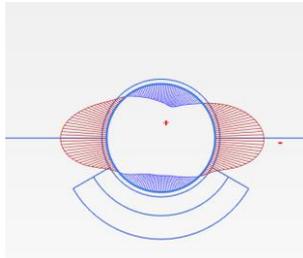
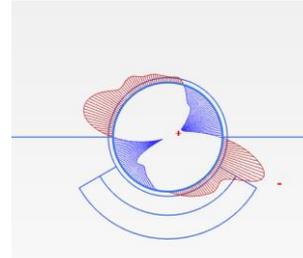
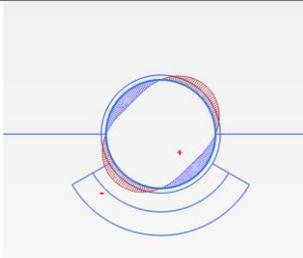
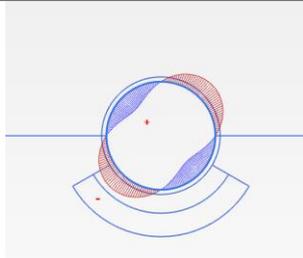
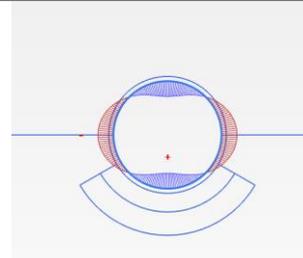
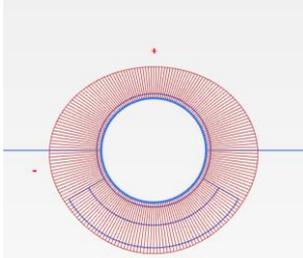
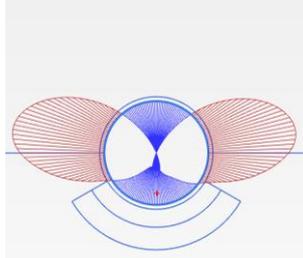
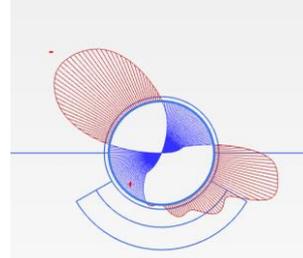
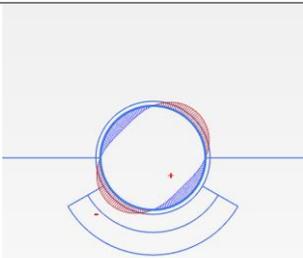
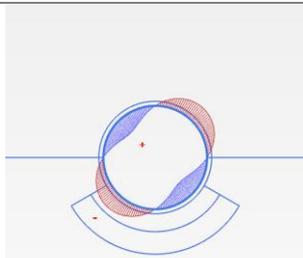
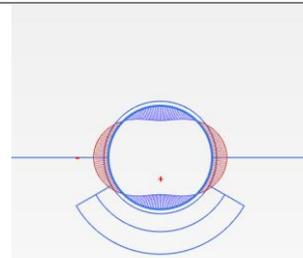


Fig. 7-26 : Zone di plasticizzazione – Fase di scavo – Sezione UFM-AV_200

7.7.5 Riassunto delle sollecitazioni nell'anello rinforzato

FYR-c_15: Analisi statica (senza falda)		
		
$N_{max} = -89 \text{ kN/m}$ $N_{min} = -161 \text{ kN/m}$	$M_{max} = 5 \text{ kNm/m}$ $M_{min} = -6 \text{ kNm/m}$	$V_{max} = 8 \text{ kN/m}$
FYR-c_15: Analisi dinamica		
		
$N_{max} = 153 \text{ kN/m}$ $N_{min} = -153 \text{ kN/m}$	$M_{max} = 24 \text{ kNm/m}$ $M_{min} = -24 \text{ kNm/m}$	$V_{max} = 21 \text{ kN/m}$
AV_100: Analisi statica (rigonfiamento)		
		
$N_{max} = -1326 \text{ kN/m}$ $N_{min} = -1685 \text{ kN/m}$	$M_{max} = 13 \text{ kNm/m}$ $M_{min} = -28 \text{ kNm/m}$	$V_{max} = 27 \text{ kN/m}$
AV_100: Analisi dinamica		
		
$N_{max} = 401 \text{ kN/m}$ $N_{min} = -401 \text{ kN/m}$	$M_{max} = 35 \text{ kNm/m}$ $M_{min} = -35 \text{ kNm/m}$	$V_{max} = 30 \text{ kN/m}$

CPA-AV_200: Analisi statica (rigonfiamento)			
			
$N_{max} = -1997 \text{ kN/m}$ $N_{min} = -2632 \text{ kN/m}$	$M_{max} = 36 \text{ kNm/m}$ $M_{min} = -82 \text{ kNm/m}$	$V_{max} = 83 \text{ kN/m}$	
CPA-AV_200: Analisi dinamica			
			
$N_{max} = 487 \text{ kN/m}$ $N_{min} = -487 \text{ kN/m}$	$M_{max} = 30 \text{ kNm/m}$ $M_{min} = -30 \text{ kNm/m}$	$V_{max} = 26 \text{ kN/m}$	
UFM-AV_200: Analisi statica (rigonfiamento)			
			
$N_{max} = -1573 \text{ kN/m}$ $N_{min} = -2503 \text{ kN/m}$	$M_{max} = 138 \text{ kNm/m}$ $M_{min} = -168 \text{ kNm/m}$	$V_{max} = 145 \text{ kN/m}$	
UFM-AV_200: Analisi dinamica			
			
$N_{max} = 487 \text{ kN/m}$ $N_{min} = -487 \text{ kN/m}$	$M_{max} = 30 \text{ kNm/m}$ $M_{min} = -30 \text{ kNm/m}$	$V_{max} = 27 \text{ kN/m}$	

8. VERIFICHE STRUTTURALI

Come descritto nel capitolo precedente, nelle analisi di interazione terreno struttura gli anelli di conci sono modellati utilizzando il metodo di Muir-Wood, che assegna una rigidità flessionale ridotta al rivestimento omogeneizzato, tenendo conto della presenza dei giunti.

Per le verifiche strutturali è necessario verificare i conci ed i giunti separatamente. Per questo motivo, si introduce il rapporto ζ per rappresentare la redistribuzione del momento flettente M in accordo alla teoria di Muir-Wood. Facendo l'ipotesi che $\zeta=0.3$ i momenti si ripartiscono nella seguente maniera:

- ✓ Momento flettente sui conci: $M_s = M \cdot (1 + \zeta)$
- ✓ Momento flettente a livello dei giunti: $M_j = M \cdot (1 - \zeta)$

Si riportano di seguito le verifiche strutturali in fase di esercizio:

- ✓ Verifica dei conci in c.a (STR),
- ✓ Verifica dei giunti longitudinali (STR).

Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.
UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO
E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA
PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

8.1 VERIFICA DEI CONCI – ANELLO CORRENTE

CALCESTRUZZO				ARMATURA IN ACCIAIO					
<i>Sezione resistente in cls</i>				<i>Armatura</i>					
Larghezza	B	1.5	[m]	Barre longitudinali	N°	∅	d	A _s	
Altezza	H	0.4	[m]		[-]	[mm]	[mm]	[mm ²]	
Copriferro	c	60	[mm]	Barre compresse	12	10	60	942	
Sezione in cls	A _c	0.6	[m ²]	Barre tese	12	10	340	942	
Momento di inerzia	J _c	0.0080	[m ⁴]	Arm. A	N _{legs}	S _{spacing}	∅	tilt	A _{sw}
<i>Caratteristiche del cls</i>				taglio	[-]	[cm]	[mm]	[°]	[mm ²]
Res. a compres. (cilindrica)	f _{ck}	40	[MPa]	1° strato	8	40	10	90	2356
Res. media a compres.	f _{cm}	48	[MPa]	2° strato	0	20	10	90	0
Res. media a trazione	f _{ctm}	3.5	[MPa]	Altezza utile			d _{eff}	0.345	[m]
Res. caratteristica a trazione	f _{ctk,0.05}	2.5	[MPa]	Percentuale geom. di armatura t			ρ _{eff}	0.0018	[-]
Modulo elastico	E _c	35	[GPa]	Inclinazione bielle compresse (1<			ctgθ	2.1	[°]
<i>Valori di progetto</i>				<i>Valori di progetto</i>					
Fattore di sicurezza SLU	γ _c	1.5	[-]	Res. allo snervamento car.		f _{yk}	450	[MPa]	
Coeff. riduttivo res. (lunga dur.)	α _{cc}	0.85	[-]	Modulo elastico		E _s	200	[GPa]	
Res. A compressione SLU	f _{cd}	22.7	[MPa]	Fattore di sicurezza SLU		γ _s	1.15	[-]	
Res. a trazione SLU	f _{ctd}	1.6	[MPa]	Res. allo snervamento SLU		f _{yd}	391.3	[MPa]	
Lim. delle tensioni SLE	γ _{R/QP}	0.45	[-]	Lim. delle tensioni SLE		γ _{R/QP}	0.8	[-]	
Compressione limite SLE	σ _c	18	[MPa]	Trazione limite SLE		σ _s	360	[MPa]	
VERIFICHE SLU DELLA SEZIONE IN CEMENTO ARMATO									
<i>Sollecitazioni di taglio SLU</i>				<i>Verifica a pressoflessione SLU - SLV</i>					
Taglio SLU	V _{sd}	98	[kN]						
Sforzo normale per Vmax	N _{sd}	2577	[kN]						
Sforzi di compressione di progetto	σ _{cp}	4294	[kPa]						
<i>Resistenza a taglio in assenza di armatura specifica</i>									
Resistenza a taglio SLU	V _{rdu}	601	[kN]						
Fattore di sicurezza SLU	SF _{rdu}	6.1	[-]						
<i>Resistenza dell'armatura a taglio</i>									
Res. delle bielle compres. SLU	V _{Rcd}	2491	[kN]						
Res. dell'armatura a taglio SLU	V _{Rcd}	392	[kN]						
Fattore di sicurezza SLU	SF _{Rcd}	4.0	[-]						
VERIFICHE SLE DELLA SEZIONE IN CEMENTO ARMATO									
<i>Sollecitazione SLE</i>				<i>Limitazione delle tensioni</i>					
Momento flettente SLE	M _{sd}	84	[kNm]	Sfrozio di compr. nel cls SLE	σ _c	6.2	[MPa]		
Sforzo normale per max M _{sd}	N _{sd}	2628	[kN]	Compressione limite SLE	σ _{c,lim}	18	[MPa]		
Eccentricità	e _{sd}	-3.2	[cm]	Sfrozio di traz. nell'acciaio SLE	σ _s	-42.0	[MPa]		
Altezza di applicazione di N _{sd}	d _{Nsd}	0.168	[m]	Trazione limite SLE	σ _{s,lim}	360	[MPa]		
<i>Omogeneizzazione</i>				<i>Limitazione dell'apertura delle fessure</i>					
Coeff. viscosità a LT	η _{LT}	1.6	[-]	Altezza di cls tesoro	h _{eff}	0.13333	[m]		
Modulo elastico a LT	E _{LT}	13	[GPa]	Rapporto di armatura nella zona	ρ _{eff}	0.0047	[-]		
Coeff. di omogeneizzazione	α _e	15	[-]	Coeff. LT	k _t	0.4	[-]		
Centro di gravità - zona compres.	d _{G,sup}	0.20	[m]	Coeff. aderenza barre	k ₁	0.8	[-]		
Centro di gravità - zona tesa	d _{G,inf}	0.20	[m]	Coeff. distrib. delle tensioni	k ₂	1.9	[-]		
Mom. inerzia arm. - Stadio I	I ₁	0.0086	[m ⁴]	Coeff. copriferro	k ₃	3.4	[-]		
Mom. inerzia arm. - Stadio II	I ₂	0.0086	[m ⁴]	Coeff. limitazione della res.	k ₄	0.425	[-]		
R. sup. nocciolo centr. d'inerzia	e _{sup}	0.07	[m]	Dist. max tra	σ < σ _{lim}	Δ _{s,max}	1.60	[m]	
R. inf. nocciolo centr. d'inerzia	e _{inf}	-0.07	[m]	fessure	σ > σ _{lim}	Δ _{s,max}	0.52	[m]	
Profondità asse neutro	x	0.E+00	[m]	Stato di fessurazione non fessurato					
Mom di inerzia - alta ecc.	I _{2e}	0.0017	[m ⁴]	Ampiezza fessure	w _d	0.0	[mm]		
Mom. Statico - alta ecc.	S	0.0057	[m ³]	Ampiezza limite fessure	w _{lim}	0.2	[mm]		
RIFERIMENTO: NTC 2018									

Regione Campania – Acqua Campania S.p.a.
UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO
E POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA
PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

8.2 VERIFICA DEI CONCI – ANELLO RINFORZATO

CALCESTRUZZO				ARMATURA IN ACCIAIO					
<i>Sezione resistente in cls</i>				<i>Armatura</i>					
Larghezza	B	1.5	[m]	Barre longitudinali	N°	∅	d	A _s	
Altezza	H	0.4	[m]		[-]	[mm]	[mm]	[mm ²]	
Copriferro	c	60	[mm]	Barre compresse	12	14	60	1847	
Sezione in cls	A _c	0.6	[m ²]	Barre tese	12	14	340	1847	
Momento di inerzia	J _c	0.0080	[m ⁴]	Arm. A	N _{legs}	s _{spacing}	∅	tilt	A _{sw}
<i>Caratteristiche del cls</i>				taglio	[-]	[cm]	[mm]	[°]	[mm ²]
Res. a compres. (cilindrica)	f _{ck}	40	[MPa]	1° strato	8	40	10	90	2356
Res. media a compres.	f _{cm}	48	[MPa]	2° strato	0	20	10	90	0
Res. media a trazione	f _{ctm}	3.5	[MPa]	Altezza utile		d _{eff}	0.347	[m]	
Res. caratteristica a trazione	f _{ctk,0.05}	2.5	[MPa]	Percentuale geom. di armatura t		ρ _{eff}	0.0035	[-]	
Modulo elastico	E _c	35	[GPa]	Inclinazione bielle compresse (1<		ctgθ	2.1	[°]	
<i>Valori di progetto</i>				<i>Valori di progetto</i>					
Fattore di sicurezza SLU	γ _c	1.5	[-]	Res. allo snervamento car.		f _{yk}	450	[MPa]	
Coeff. riduttivo res. (lunga dur.)	α _{cc}	0.85	[-]	Modulo elastico		E _s	200	[GPa]	
Res. A compressione SLU	f _{cd}	22.7	[MPa]	Fattore di sicurezza SLU		γ _s	1.15	[-]	
Res. a trazione SLU	f _{ctd}	1.6	[MPa]	Res. allo snervamento SLU		f _{yd}	391.3	[MPa]	
Lim. delle tensioni SLE	γ _{R/QP}	0.45	[-]	Lim. delle tensioni SLE		γ _{R/QP}	0.8	[-]	
Compressione limite SLE	σ _c	18	[MPa]	Trazione limite SLE		σ _s	360	[MPa]	
VERIFICHE SLU DELLA SEZIONE IN CEMENTO ARMATO									
<i>Sollecitazioni di taglio SLU</i>				<i>Verifica a pressoflessione SLU - SLV</i>					
Taglio SLU	V _{sd}	329	[kN]						
Sforzo normale per Vmax	N _{sd}	3659	[kN]						
Sforzi di compressione di progett	σ _{cp}	6099	[kPa]						
<i>Resistenza a taglio in assenza di armatura specifica</i>									
Resistenza a taglio SLU	V _{rdu}	745	[kN]						
Fattore di sicurezza SLU	SF _{rdu}	2.3	[-]						
<i>Resistenza dell'armatura a taglio</i>									
Res. delle bielle compres. SLU	V _{Rcd}	2633	[kN]						
Res. dell'armatura a taglio SLU	V _{Rcd}	394	[kN]						
Fattore di sicurezza SLU	SF _{Rcd}	1.2	[-]						
VERIFICHE SLE DELLA SEZIONE IN CEMENTO ARMATO									
<i>Sollecitazione SLE</i>				<i>Limitazione delle tensioni</i>					
Momento flettente SLE	M _{sd}	218	[kNm]	Sfrozio di compr. nel cls SLE		σ _c	9.2	[MPa]	
Sforzo normale per max M _{sd}	N _{sd}	2864	[kN]	Compressione limite SLE		σ _{c,lim}	18	[MPa]	
Eccentricità	e _{sd}	-7.6	[cm]	Sfrozio di traz. nell'acciaio SLE		σ _s	-14.8	[MPa]	
Altezza di applicazione di N _{sd}	d _{Nsd}	0.124	[m]	Trazione limite SLE		σ _{s,lim}	360	[MPa]	
<i>Omogeneizzazione</i>				<i>Limitazione dell'apertura delle fessure</i>					
Coeff. viscosità a LT	η _{LT}	1.6	[-]	Altezza di cls teso		h _{eff}	0.00639	[m]	
Modulo elastico a LT	E _{LT}	13	[GPa]	Rapporto di armatura nella zona		ρ _{eff}	0.1926	[-]	
Coeff. di omogeneizzazione	α _e	15	[-]	Coeff. LT		k _t	0.4	[-]	
Centro di gravità - zona compres.	d _{G,sup}	0.20	[m]	Coeff. aderenza barre		k ₁	0.8	[-]	
Centro di gravità - zona tesa	d _{G,inf}	0.20	[m]	Coeff. distrib. delle tensioni		k ₂	0.5	[-]	
Mom. inerzia arm. - Stadio I	I ₁	0.0091	[m ⁴]	Coeff. copriferro		k ₃	3.4	[-]	
Mom. inerzia arm. - Stadio II	I ₂	0.0091	[m ⁴]	Coeff. limitazione della res.		k ₄	0.425	[-]	
R. sup. nocciolo centr. d'inerzia	e _{sup}	0.07	[m]	Dist. max tra	σ < σ _{lim}	Δ _{s,max}	0.22	[m]	
R. inf. nocciolo centr. d'inerzia	e _{inf}	-0.07	[m]	fessure	σ > σ _{lim}	Δ _{s,max}	0.02493	[m]	
Profondità asse neutro	x	4.E-01	[m]	Stato di fessurazione			non fessurato		
Mom di inerzia - alta ecc.	I _{2e}	0.0305	[m ⁴]	Ampiezza fessure		w _d	0.0	[mm]	
Mom. Statico - alta ecc.	S	-0.1188	[m ³]	Ampiezza limite fessure		w _{lim}	0.2	[mm]	
RIFERIMENTO: NTC 2018									

8.3 VERIFICA DEI GIUNTI – ANELLO CORRENTE

Caratteristiche dei materiali e fattori di sicurezza			
f_{yk}	450	[MPa]	Tensione di snervamento caratteristica dell'acciaio
f_{ck}	40.0	[MPa]	Resistenza alla compressione caratteristica del cls (cil)
$\gamma_{m,concrete}$	1.5	-	Coeff. parziale di sicurezza cls
$\gamma_{m,steel}$	1.15	-	Coeff. parziale di sicurezza acciaio
Sollecitazioni di progetto dimensionanti			
N_d	3416	[kN]	Sfrego normale
M_d	77	[kNm]	Momento flettente
e_n	22	[mm]	Eccentricità del carico (positiva verso l'intradosso)
Geometria del giunto			
d	400	[mm]	Spessore totale
L	1500	[mm]	Lunghezza caricata (in direzione longitudinale)
s_i	60	[mm]	Larghezza dello smusso all'intradosso
s_e	80	[mm]	Larghezza dello smusso all'estradosso
d_k	260	[mm]	Larghezza della zona di contatto del giunto
e_G	190	[mm]	Posizione dell'asse della zona di contatto (dall'intradosso)
e_k	10	[mm]	Eccentricità dell'asse concio-giunto (positivo verso l'intr.)
e'	178	[mm]	Posizione dell'asse dlla zona caricata (dall'intr.)
d_1	235	[mm]	Larghezza equivalente della zona caricata
d_s	355	[mm]	Altezza della zona compressa
A	0.35	[m ²]	Superficie equivalente caricata
b_2	0.36	[m]	Larghezza della zona di distribuzione del carico
d_2	1.5	[m]	Lunghhezza della zona di distribuzione del carico
A'	0.53	[m ²]	Superficie di distribuzione del carico
m	0.09		Rapporto di eccentricità

Verifica delle sollecitazioni radiali di bursting			
T	289	[kN]	
A_s	942	[mm ²]	Sezione in acciaio resistente
F_{ad}	369	[kN]	Resistenza di progetto allo snervamento
T / F_{ad}	0.78		VERIFICATO

Vérification à la compression du béton			
h	1.23		Per Leonhardt $(A/A')^{1/2}$
f'_{ad}	32.8	[Mpa]	Resistenza alla compressione di progetto del cls
s_R	14.1	[Mpa]	
s_R / f'_{ad}	0.43		VERIFICATO

8.4 VERIFICA DEI GIUNTI– ANELLO RINFORZATO

Caratteristiche dei materiali e fattori di sicurezza			
f_{yk}	450	[MPa]	Tensione di snervamento caratteristica dell'acciaio
f_{ck}	40.0	[MPa]	Resistenza alla compressione caratteristica del cls (cil)
$\gamma_{m,concrete}$	1.5	-	Coeff. parziale di sicurezza cls
$\gamma_{m,steel}$	1.15	-	Coeff. parziale di sicurezza acciaio
Sollecitazioni di progetto dimensionanti			
N_d	5079	[kN]	Sfrozio normale
M_d	111	[kNm]	Momento flettente
e_n	22	[mm]	Eccentricità del carico (positiva verso l'intradosso)
Geometria del giunto			
d	400	[mm]	Spessore totale
L	1500	[mm]	Lunghezza caricata (in direzione longitudinale)
s_i	60	[mm]	Larghezza dello smusso all'intradosso
s_e	80	[mm]	Larghezza dello smusso all'estradosso
d_k	260	[mm]	Larghezza della zona di contatto del giunto
e_g	190	[mm]	Posizione dell'asse della zona di contatto (dall'intradosso)
e_k	10	[mm]	Eccentricità dell'asse concio-giunto (positivo verso l'intr.)
e'	178	[mm]	Posizione dell'asse della zona caricata (dall'intr.)
d_1	236	[mm]	Larghezza equivalente della zona caricata
d_s	356	[mm]	Altezza della zona compressa
A	0.35	[m ²]	Superficie equivalente caricata
b_2	0.36	[m]	Larghezza della zona di distribuzione del carico
d_2	1.5	[m]	Lunghezza della zona di distribuzione del carico
A'	0.53	[m ²]	Superficie di distribuzione del carico
m	0.08		Rapporto di eccentricità

Verifica delle sollecitazioni radiali di bursting			
T	427	[kN]	
A_s	1357	[mm ²]	Sezione in acciaio resistente
F_{ad}	531	[kN]	Resistenza di progetto allo snervamento
T/F_{ad}	0.80		VERIFICATO

Vérification à la compression du béton			
h	1.23		Per Leonhardt $(A/A')^{1/2}$
f'_{ad}	32.7	[Mpa]	Resistenza alla compressione di progetto del cls
s_R	20.9	[Mpa]	
s_R/f'_{ad}	0.64		VERIFICATO