

INDICE

1.INTRODUZIONE.....	2
1.1 Normativa di riferimento.....	2
1.2 Caratteristiche dei materiali	2
2.PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO.....	4
3.LA SEZIONE TIPO BYPASS PEDONALE	5
4.CRITERI DI VERIFICA.....	11
4.1 Azioni e resistenze di progetto.....	11
5.METODO DI CALCOLO	13
5.1 Condizioni al contorno e iniziali.....	13
5.2 Legge di comportamento dei materiali	13
5.2.1 Ammasso roccioso.....	13
5.2.2 Sostegno di prima fase	13
5.2.3 Rivestimento definitivo	14
5.2.4 Consolidamenti in avanzamento	14
5.3 Simulazioni delle fasi esecutive	15
6.RISULTATI	16
6.1 Sezione tipo Bypass pedonale – sezione corrente.....	16
6.2 Sezione tipo Bypass pedonale – sezione allargata	19
7.VERIFICHE DEL RIVESTIMENTO DI PRIMA FASE	22
7.1 Verifiche strutturali.....	23
7.2 Sollecitazioni e verifiche per la sezione tipo Bypass pedonale_ sezione corrente.....	24
7.3 Sollecitazioni e verifiche per la sezione tipo Bypass pedonale_ sezione allargata	25
8.VERIFICHE DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO.....	26
8.1 Criteri di verifica ed azioni di calcolo	26
8.2 Resistenze di calcolo	26
8.3 Verifiche strutturali.....	27
8.4 Sollecitazioni agenti.....	28
8.5 Verifiche strutturali.....	33
9.STABILITA' DEL FRONTE DI SCAVO.....	40
10. MONITORAGGIO.....	41

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo by-pass pedonali Rev.A.doc		Pagina 1 di 41

1. INTRODUZIONE

Il presente documento è redatto nell'ambito dei lavori di adeguamento alla categoria B della S.S. 640 secondo le norme del DM 5.11.2001 dell'itinerario Agrigento-Caltanissetta-A19 dal km 44+000 allo svincolo con la A19.

La presente relazione illustra il dimensionamento geotecnico e strutturale delle sezioni tipo di scavo previste per la realizzazione dei bypass pedonali alla luce del comportamento geotecnico del terreno emerso a seguito dello scavo delle due canne della galleria Caltanissetta.

1.1 Normativa di riferimento

Le verifiche statiche e la redazione della presente relazione sono state eseguite nel rispetto della Normativa in vigore e di alcune raccomandazioni, in particolare:

- **DM Infrastrutture del 14 gennaio 2008** – Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni – ed in particolare il capitolo 6 – Progettazione Geotecnica.
- **“Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni”** n°617 del 2 febbraio 2009.

1.2 Caratteristiche dei materiali

I materiali impiegati sono:

CALCESTRUZZO

MAGRO E DI RIEMPIMENTO UNI EN 206-1 (2006)

- CLASSE DI RESISTENZA: C12/15

CLS PER OPERE STRUTTURALI UNI EN 206-1 (2006) UNI 11104 (2004)

- CLASSE DI RESISTENZA: C32/40
- CLASSE DI CONSISTENZA: S4 – S5
- CLASSE DI ESPOSIZIONE: XC2

CLS PROIETTATO ARMATO CON FIBRE SINTETICHE O CON RETE ELETTROSALDATA

- RESISTENZA MEDIA SU CAROTE $h/\varnothing=1$ (a 48h) $\geq 15\text{MPa}$
- RESISTENZA MEDIA SU CAROTE $h/\varnothing=1$ (a 28gg) $\geq 30\text{MPa}$

ACCIAIO

ACCIAIO PER ARMATURA CLS E CATENE

BARRE $\varnothing \leq 40\text{mm}$

ACCIAIO B450C

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 2 di 41

VARIANTE TECNICA N.4

- TENSIONE CARATTERISTICA DI SNERVAMENTO (f_{yk}) : 450MPa
- TENSIONE CARATTERISTICA A ROTTURA (f_{tk}): 540MPa

RETE ELETTROSALDATA

- TENSIONE CARATTERISTICA DI SNERVAMENTO (f_{yk}): 390MPa

PROFILATI METALLICI PER CENTINE, PIASTRE E CATENE (S275)

- TENSIONE CARATTERISTICA DI SNERVAMENTO: 275MPa

TUBI IN VETRORESINA 60/40 AD ADERENZA MIGLIORATA

- DIAMETRO INTERNO: 40mm
- DIAMETRO ESTERNO: 60mm
- AREA RESISTENTE: 1570mm²
- PROFONDITA' ADERENZA MIGLIORATA: ≥ 1
- DENSITA': $\geq 1.8\text{Kg/dm}^3$
- MODULO ELASTICO A TRAZIONE: $\geq 15000\text{MPa}$
- DIAMETRO DI PERFORAZIONE, $\varnothing_{\text{perf}}$: $\geq 110\text{mm}$

MISCELE CEMENTIZIE PER CEMENTAZIONE VTR

- CEMENTO: 42.5R
- CLASSE DI RESISTENZA: C20/25
- RAPPORTO A/C: 0.5/0.7
- ADDITIVO FLUIDIFICANTE (percentuale di peso sul cemento): 1-2%

FIBRE SINTETICHE PER CLS PROIETTATO

- FIBRE DI POLIPROPILENE IBRIDE STRUTTURALE
- RESISTENZA A TRAZIONE: $\geq 620\text{MPa}$
- DOSAGGIO: $\geq 2.6\text{kg/mc}$

TNT

- STRATO DI TESSUTO NON TESSUTO DI 500gr/mq A FILO CONTINUO

IMPERMEABILIZZAZIONE IN PVC

- TELI PER IMPERMEABILIZZAZIONE: SP. = 2 mm. $\pm 0.5\%$, $\gamma \geq 1.3\text{g/cm}^2$

DRENAGGI (EVENTUALI)

- TUBI MICROFESSURATI IN PVC AD ALTA RESISTENZA (4.5MPa ALLA TRAZIONE), DIAMETRO ESTERNO $\varnothing 60\text{mm}$, SP.: 5mm, PREFORO $\varnothing 91\text{mm}$, RIVESTITI CON TNT
- I PRIMI 10m DA BOCCA FORO DOVRANNO ESSERE CIECHI.

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo by-pass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 3 di 41

2. PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO

Sulla base delle analisi condotte a ritroso, al fine di simulare il reale comportamento misurato in sito, sono stati determinati i parametri deformativi del terreno. Per maggiori dettagli in merito si rimanda alla relazione giustificativa della variante, mentre nella tabella seguente se ne riporta una sintesi.

Tabella 2.1: Parametri geotecnici definiti a ritroso

Litotipo	γ [kN/m ³]	cu [kPa]	c_k' [kPa]	ϕ_k' [°]	E [MPa]	ν [-]
Sabbie di Lannari (SLN)	20	-	5	20	30	0.30
Argille marnose del Geracello (GER)	23	50	30	24	70	0.30
Trubi pliocenici (TRB) indisturbati ad alta copertura	23	200	30	24	70	0.30
Argille brecciate plioceniche (TRVb) indisturbate	23	300	23	24	80	0.30
Fasce cataclasate e zone di sovrascorrimento a bassa copertura	23	300	12	20	80	0.30

dove:

- γ : peso di volume naturale
- ν : rapporto di Poisson
- E : modulo di deformabilità
- ϕ_k' : angolo di resistenza al taglio (valore caratteristico)
- c_k' : coesione efficace (valore caratteristico)
- cu : coesione non drenata valore caratteristico

Ai fini delle verifiche, sono state assunte le condizioni drenate considerando che le verifiche strutturali e geotecniche sono effettuate a lungo termine. Per quanto attiene invece le verifiche a breve termine relative al fronte di scavo, sono stati utilizzati i parametri in condizioni non drenate.

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc		Pagina 4 di 41

3. LA SEZIONE TIPO BYPASS PEDONALE

Lo stato tensionale e deformativo rilevato durante le costruzioni della galleria Caltanissetta, superiore alle aspettative progettuali, imputabile ad un imprevisto comportamento geotecnico del materiale interessato dallo scavo, ha fatto sì che fossero rivalutati i parametri geotecnici sulla base delle osservazioni condotte.

In questa fase progettuale pertanto, sono state proposte delle sezioni tipo di scavo per i bypass pedonali tali da adattarsi al nuovo set di parametri geotecnici che rappresentano il reale comportamento osservato. Si precisa inoltre che la stratigrafia è la medesima del Progetto Esecutivo, confermata per lo più dai rilievi condotti in fase di scavo.

In sintesi la proposta progettuale per la sezione tipo bypass pedonale prevede:

- consolidamento del fronte mediante n°17 ±10% elementi strutturali in VTR, sovrapposizione 8m, cementati in foro con miscele cementizie.
- Consolidamento al contorno con n°22 ±10% elementi strutturali in VTR, cementati in foro con miscele cementizie.
- Sostegno di prima fase costituito da centine singole HEB220, passo 80cm±20% e arco puntone. Il cls proiettato fibrorinforzato avrà spessore di 30cm. In alternativa, è possibile utilizzare centine HEB160 a passo 40cm±20% e cls proiettato fibrorinforzato di spessore 30cm.
- Rivestimento definitivo in c.a. dello spessore di 50cm in calotta e 60cm in arco rovescio.
- Il rivestimento definitivo prevede un'impermeabilizzazione full-round al contorno di esso.

Rispetto alla sezione tipo di Progetto Esecutivo, la nuova proposta prevede un sostegno di prima fase più rigido al fine di limitare i cedimenti imputabili allo scavo della sezione. Inoltre il sostegno di prima fase e il rivestimento definitivo sono stati adeguati ai nuovi carichi geotecnici derivanti dal fatto che il terreno è stato simulato mediante parametri determinati a ritroso dall'analisi dei cedimenti osservati per lo scavo della galleria principale.

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 5 di 41

VARIANTE TECNICA N.4

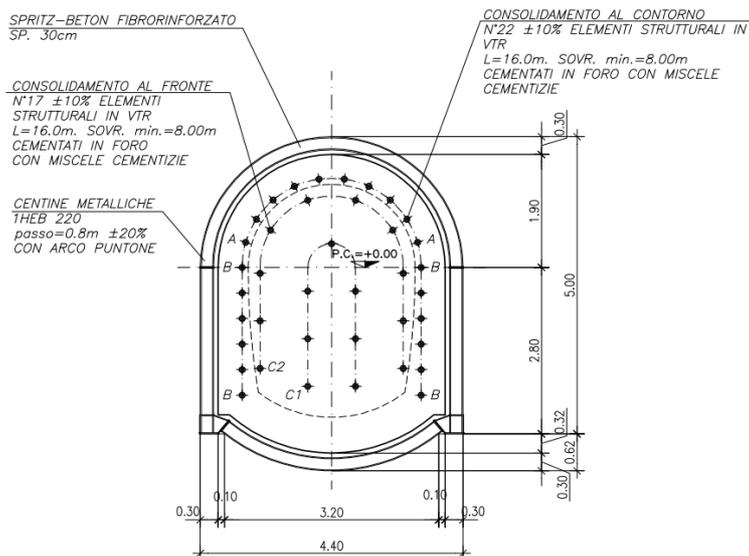


Figura 3.1: sezione tipo bypass pedonale – sezione corrente – scavo e consolidamento

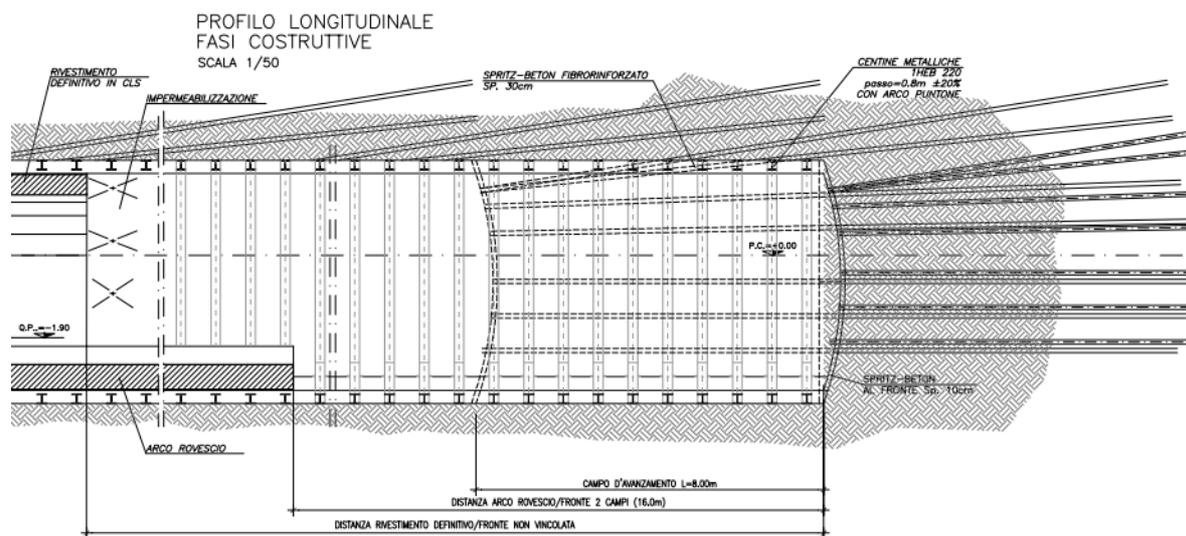


Figura 3.2: sezione tipo bypass pedonale – sezione corrente longitudinale – scavo e consolidamento

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo by-pass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 6 di 41

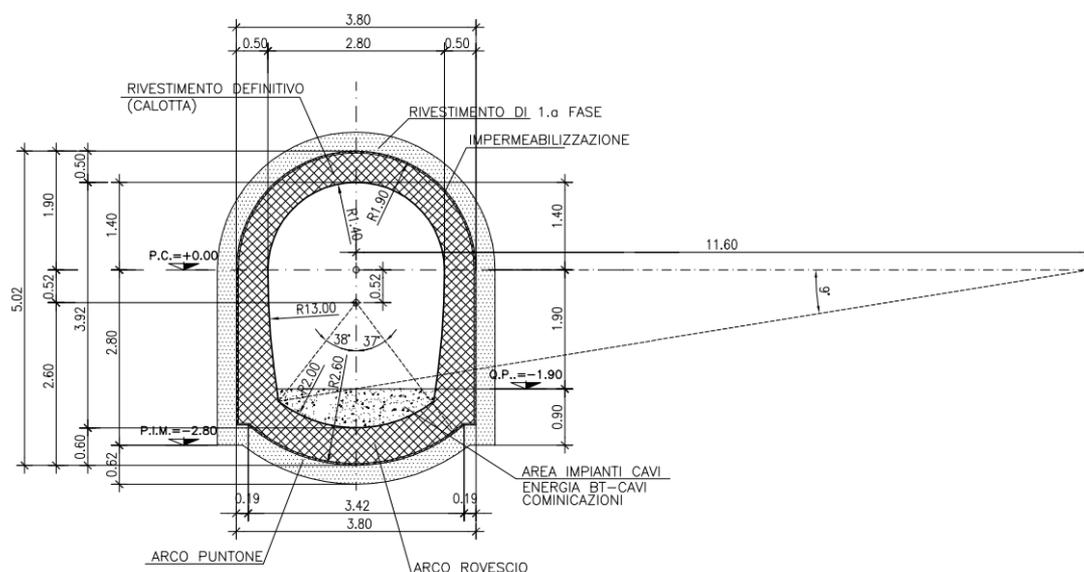


Figura 3.3: sezione tipo bypass pedonale – sezione corrente – carpenteria rivestimento definitivo

Il collegamento tra la galleria principale di linea e il bypass pedonale sezione corrente avverrà mediante un allargò, ossia una sezione simile a quella della sezione corrente con dimensione di scavo maggiore. Le dimensioni di scavo di questa sezione sono definite a partire dalla posizione della struttura metallica esterna e dalle dimensioni e posizioni specifiche dei conci esistenti della canna SX della galleria Caltanissetta.

Questa sezione è costituita da:

- consolidamento dalla galleria Caltanissetta mediante n°55 elementi strutturali in VTR, di lunghezza variabile da 9m a 27m, cementati in foro con miscele cementizie. In funzione della distanza tra le due canne, sono previsti 3 schemi di consolidamento.
- Sostegno di prima fase costituito da centine HEB240, passo 80cm±20% e arco puntone. Il cls proiettato fibrorinforzato avrà spessore di 30cm.
- Rivestimento definitivo in c.a. dello spessore di 235cm in calotta e 160cm in arco rovescio.
- Il rivestimento definitivo prevede un impermeabilizzazione full-round al contorno di esso.

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 7 di 41

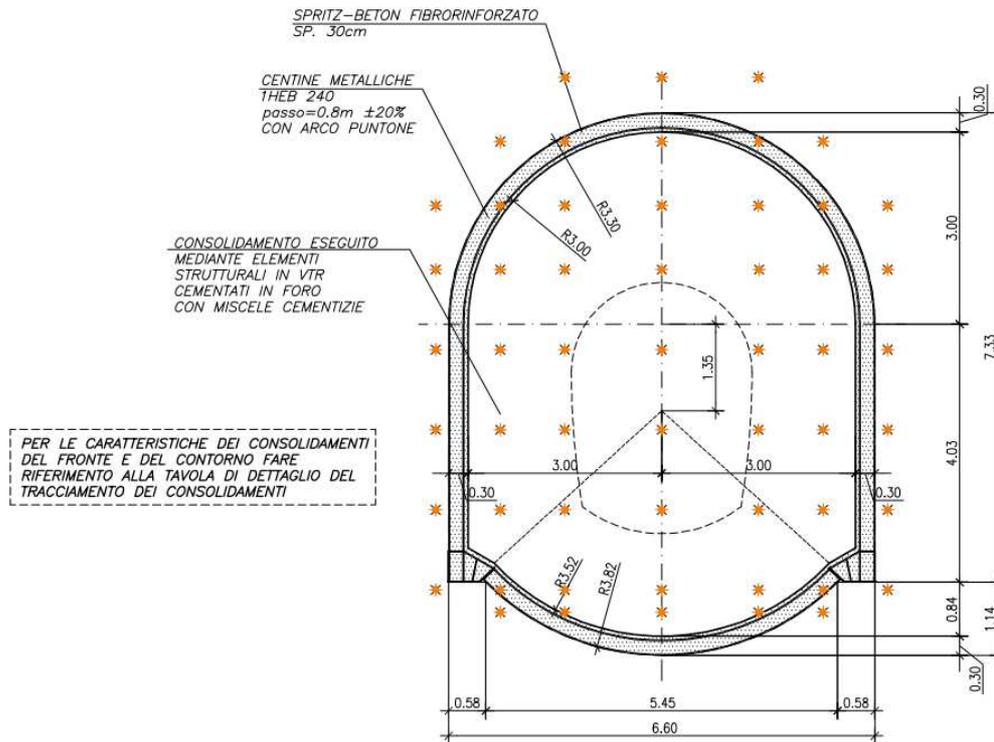


Figura 3.4: sezione tipo bypass pedonale – sezione di allargò – scavo e consolidamento

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 8 di 41

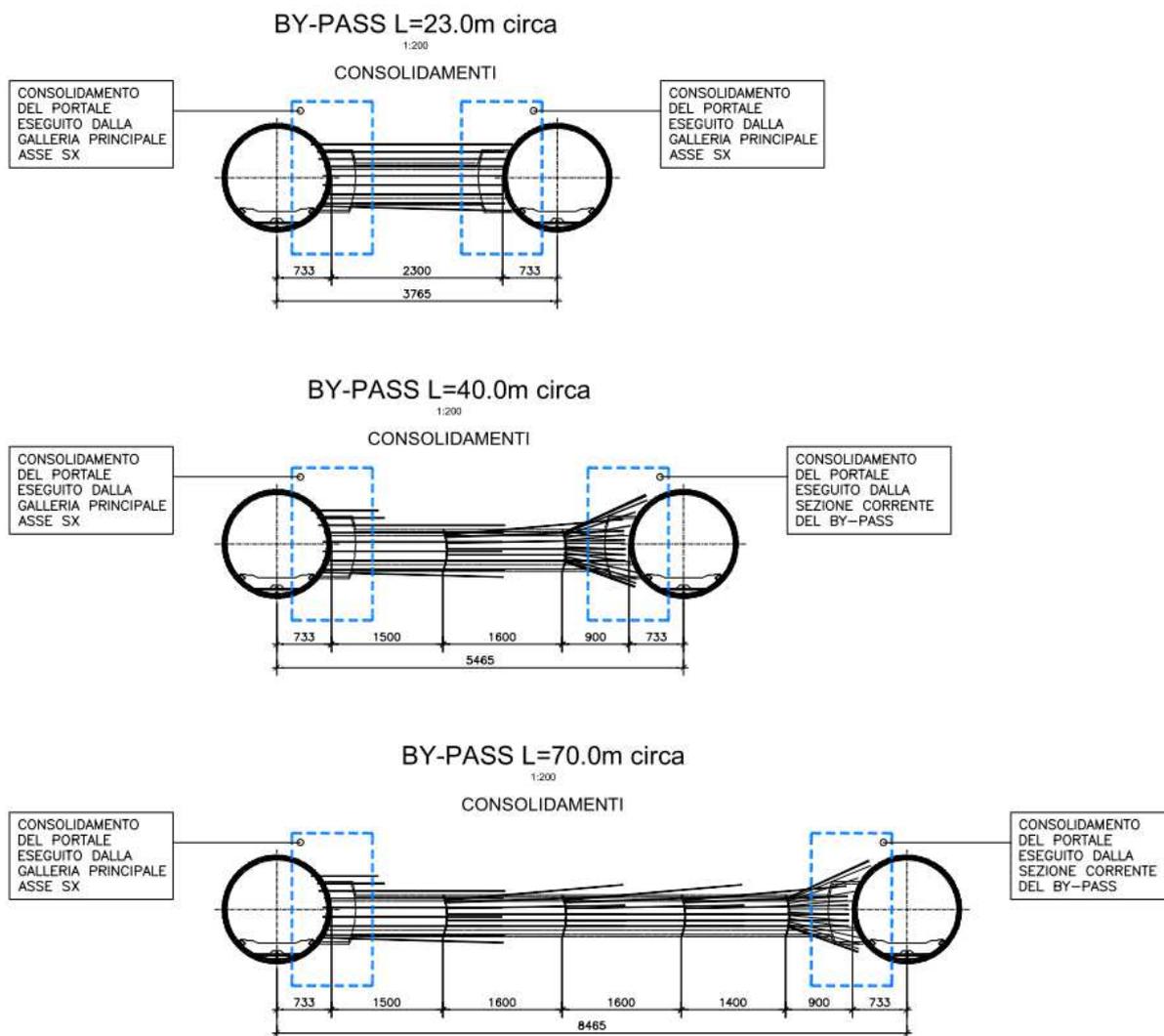


Figura 3.5: sezione tipo bypass pedonale – sezione longitudinale di allargo – schemi tipologici per i consolidamenti in funzione della distanza tra le canne

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo by-pass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 9 di 41

VARIANTE TECNICA N.4

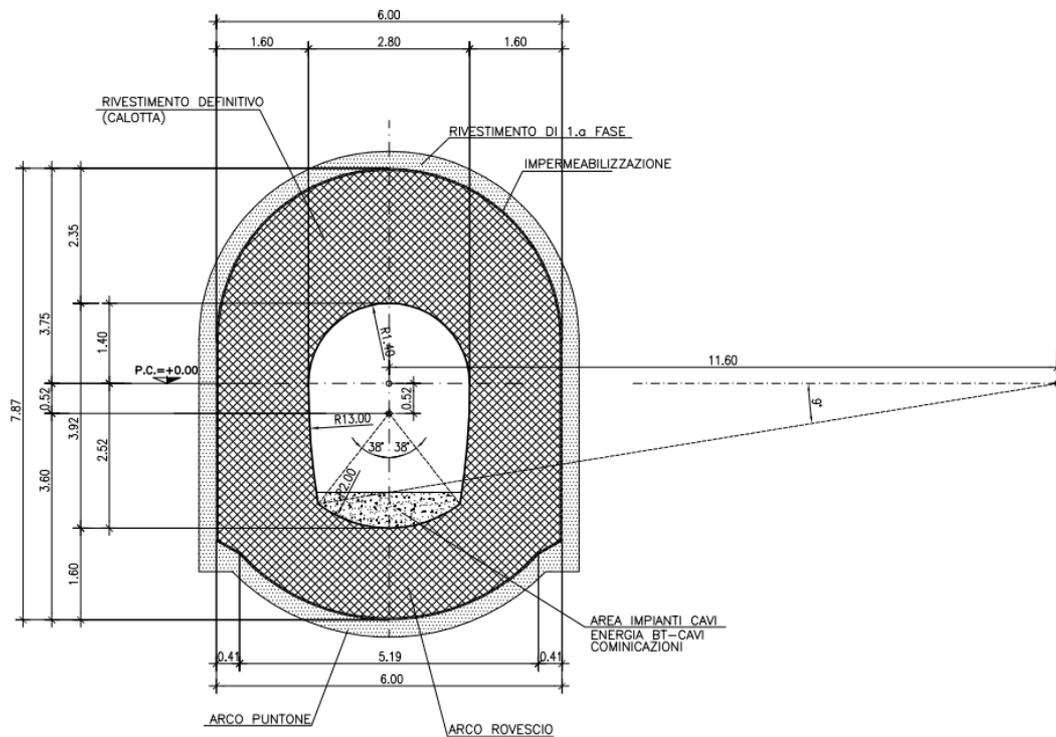


Figura 3.6: sezione tipo bypass pedonale – sezione di allargò – carpenteria rivestimento definitivo

La sezione allargata, denominata sezione portale, si estende solo per 2.68m oltre alla galleria principale in direzione perpendicolare allo sviluppo della galleria Caltanissetta.

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 10 di 41

4. CRITERI DI VERIFICA

Nel presente capitolo sono descritti i metodi, le assunzioni di calcolo ed i parametri di progetto adottati per le verifiche geotecniche e strutturali delle opere in oggetto.

Le verifiche allo stato limite prevedono un approccio di tipo semiprobabilistico in base al quale le azioni e le resistenze di progetto sono definite sulla base dei valori caratteristici, applicando i coefficienti parziali di seguito definiti:

Azioni: $F_d = (F_k \times \Psi) \times \gamma_F$

Proprietà del terreno: $X_d = X_k / \gamma_M$

Resistenza del terreno: $R_d = R_k / \gamma_R$

Dove:

F: indica genericamente un'azione,

Ψ : indica un fattore ≤ 1.0 che è definito nell'ambito della combinazione di carico;

X: indica genericamente un parametro di resistenza del terreno;

R: indica genericamente la resistenza limite calcolata;

$\gamma_F, \gamma_M, \gamma_R$: indicano i coefficienti parziali.

Una volta definiti i parametri di progetto si verifica che valga la relazione:

$$E_d \leq R_d$$

Dove:

$E_d = F_k \times \Psi \times \gamma_F$ [effetti delle azioni],

$R_d = 1 / \gamma_R \times R_k$ ($F_k \times \Psi \times \gamma_F, X_k / \gamma_M$) [resistenza del terreno].

4.1 Azioni e resistenze di progetto

I coefficienti parziali γ_F che si riferiscono alle azioni sono indicati nella tabella seguente.

Tabella 4.1: Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

Carichi	Effetto	Coefficiente parziale γ_F (o γ_E)	(A1)
Permanenti	Favorevole		1.0
	Sfavorevole	γ_{G1}	1.3
Permanenti non strutturali	Favorevole		0
	Sfavorevole	γ_{G2}	1.5
Variabili	Favorevole		0.0
	Sfavorevole	γ_{Qi}	1.5

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo by-pass pedonali Rev.A.doc		Pagina 11 di 41

Dove risulta impossibile applicare i coefficienti parziali alle azioni (ad es. spinta dell'acqua e/o delle terre) gli stessi coefficienti possono essere applicati agli effetti delle azioni (sollecitazioni). In questo caso si ha la presenza di soli carichi permanenti, pertanto risulta:

$$\gamma_F=1.3.$$

<i>Cod. elab.:</i> 15GN204GN02ZRH470A	<i>Titolo:</i> Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	<i>Data redazione:</i> Dicembre 2018
<i>Nome file:</i> V_3578-22 Relazione di calcolo by-pass pedonali Rev.A.doc		Pagina 12 di 41

5. METODO DI CALCOLO

Il metodo di calcolo impiegato è quello degli elementi finiti (FEM) implementato tramite il codice commerciale RS2, ver.9.020, prodotto dalla Rocscience Inc®.

RS2 è un programma agli elementi finiti che consente di svolgere analisi bi-dimensionali (e assial-simmetriche) in campo elasto-plastico per la valutazione dello stato di sforzo e di spostamento al contorno di opere in sotterraneo e di analizzare la risposta tenso-deformativa dei sostegni installati a supporto degli scavi.

5.1 Condizioni al contorno e iniziali

Il modello numerico è realizzato tramite una maglia d'elementi triangolari i cui confini sono stati collocati ad una distanza dalla sezione della galleria tale da non risentire degli effetti di bordo; il bordo superiore del modello coincide con il profilo topografico del terreno.

Lo stato tensionale iniziale è stato supposto litostatico ed è stato riprodotto nel modello tramite la fase 1, applicando un campo di sforzo di tipo gravitazionale.

5.2 Legge di comportamento dei materiali

5.2.1 Ammasso roccioso

La legge di comportamento (criterio di rottura di Mohr-Coulomb) degli elementi che simulano il terreno è stata assunta di tipo elasto-plastico ideale (valori di picco coincidenti con i valori residui).

5.2.2 Sostegno di prima fase

Il sostegno di prima fase è stato simulato con elementi beams aventi comportamento elastico adottando la formulazione di Bernoulli. Gli elementi beams, nel modello matematico, sono stati simulati con un materiale di rigidità equivalente.

I valori dello spessore (s_{eq}) e del modulo elastico (E_{eq}) equivalente sono ricavati dalla risoluzione del seguente sistema lineare:

$$(E_s/E_c-1)*E_c*A_s/i + E_c*A_c = E_{eq}*s_{eq}$$

$$(E_s/E_c-1)*E_c*J_s/i + E_c*J_c = E_{eq}*s_{eq}^3/12$$

Dove:

E_s = modulo elastico dell'acciaio

A_s, J_s = area e momento d'inerzia delle centine a metro lineare

i = interasse centine

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo by-pass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 13 di 41

E_c = modulo elastico del cls proiettato

A_c, J_c = area e momento d'inerzia del cls proiettato per metro lineare

Cautelativamente si è ipotizzato che a lungo termine il sostegno di prima fase non sia più attivo e che tutti i carichi siano trasferiti al rivestimento definitivo.

5.2.3 Rivestimento definitivo

Il rivestimento definitivo è simulato tramite elementi triangolari. La legge di comportamento degli elementi del rivestimento è stata assunta di tipo elastica. Gli elementi che simulano il rivestimento definitivo sono stati introdotti in presenza del sostegno di prima fase.

5.2.4 Consolidamenti in avanzamento

All'interno del modello di calcolo, l'effetto prodotto dal consolidamento radiale è stato tenuto in conto incrementando le caratteristiche di resistenza e deformabilità del materiale consolidato. La fascia di terreno consolidata considerata nel modello è pari allo spessore minimo previsto.

Al fine di valutare il contributo di resistenza offerto dai consolidamenti, è stata calcolata una coesione equivalente mediante le formulazioni proposte da Bischoff e Smart (1977), secondo le quali l'incremento di pressione di confinamento $\Delta\sigma_3$ può essere espressa in termini di geometria e di proprietà di resistenza degli elementi di rinforzo ed è funzione del numero di elementi resistenti, della loro capacità e dell'area della sezione di scavo.

Per il criterio di Coulomb il contributo migliorativo si esprime:

$$\tau = c + (\sigma + \Delta\sigma_3) \cdot \tan\phi$$

dove:

c e ϕ sono la coesione e l'angolo di resistenza al taglio dell'ammasso;

σ è la tensione normale agente lungo il piano di rottura;

τ è la resistenza al taglio lungo il piano di rottura;

$\Delta\sigma_3$ è l'incremento di pressione indotto dal consolidamento del terreno.

Quest'ultimo parametro è stato determinato a partire dalla forza resistente di ciascun elemento di vetroresina, il cui valore corrisponde al minimo della resistenza ottenibile per le due seguenti situazioni:

- rottura per trazione della barra:

$$F_1 = f_{yk} \cdot A_{barra}$$

dove:

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo by-pass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 14 di 41

f_{yk} è la tensione di snervamento della vetroresina;
 A_{barra} è l'area della sezione della barra di vetroresina.

- rottura per sfilamento dal terreno della barra lungo la superficie di ancoraggio (al di là della superficie di scorrimento):

$$F_2 = \tau \cdot \alpha \cdot A_{scorr} = \tau_{\alpha} \cdot \alpha \cdot D \cdot \pi \cdot l_0$$

dove:

τ è la resistenza al taglio che si sviluppa lungo la superficie di contatto tra la malta iniettata ed il terreno;

α è il coefficiente di sbulbamento

D è il diametro del foro;

l_0 è la lunghezza minima della barra.

Considerando che, i bypass esaminati si sviluppano principalmente all'interno della formazione TRVb, nella seguente tabella vengono riportati i valori della tensione di aderenza e del coefficiente di sbulbamento, utilizzati nelle analisi.

Tabella 5.1: tensione di aderenza adottata per l'unità geotecnica GER

Unità geotecnica	Tensione di aderenza τ [kPa]	Coefficiente di sbulbamento α
TRVb	100	1.10 (miscele cementizie)

Considerando il valore minimo si ricava l'incremento di tensione normale nel modo seguente:

$$\Delta\sigma_3 = F n / A$$

dove:

n è il numero medio di barre in vetroresina installate;

A è l'area su cui è stato eseguito il consolidamento.

La coesione equivalente è così determinata:

$$c_g = c + \Delta\sigma_3 \cdot \tan\phi$$

5.3 Simulazioni delle fasi esecutive

Le fasi esecutive e l'effetto del passaggio del fronte di scavo attraverso la generica sezione di calcolo, sono simulate facendo decadere la pressione fittizia interna alla sezione di scavo.

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 15 di 41

6. RISULTATI

6.1 Sezione tipo Bypass pedonale – sezione corrente

Di seguito si riportano le fasi esecutive impiegate nel modello in oggetto. E' stata considerata una copertura massima pari a circa 120m corrispondente alla copertura massima prevista.

Tabella 6.1: Simulazione delle fasi di scavo

Fase	Descrizione	Elementi attivi			p_i [% p_0]
		consolidamento radiale	cls proiet.-centine	Rivestimento definitivo	
1	Geostatico	-	-	-	-
2	Applicazione della pressione interna fittizia	-	-	-	100
3	Decadimento della pressione interna alla sezione di scavo	-	-	-	90
4	Simulazione del consolidamento radiale	✓	-	-	80
5	Decadimento della pressione interna alla sezione di scavo	✓	-	-	70
6	Situazione al fronte di scavo	✓	-	-	60
7	Installazione del sostegno di prima fase	✓	✓	-	50
8-12	Ulteriore decadimento della pressione interna	✓	✓	-	40-10
13	Situazione lontano dal fronte di scavo	✓	✓	-	0
14	Getto del rivestimento definitivo	✓	✓	✓	0
15	Disattivazione dei sostegni di prima fase	-	-	✓	0
16	Situazione a lungo termine	-	-	✓	0

Si riportano di seguito i risultati delle analisi numeriche in termini di deformazioni al contorno del cavo.

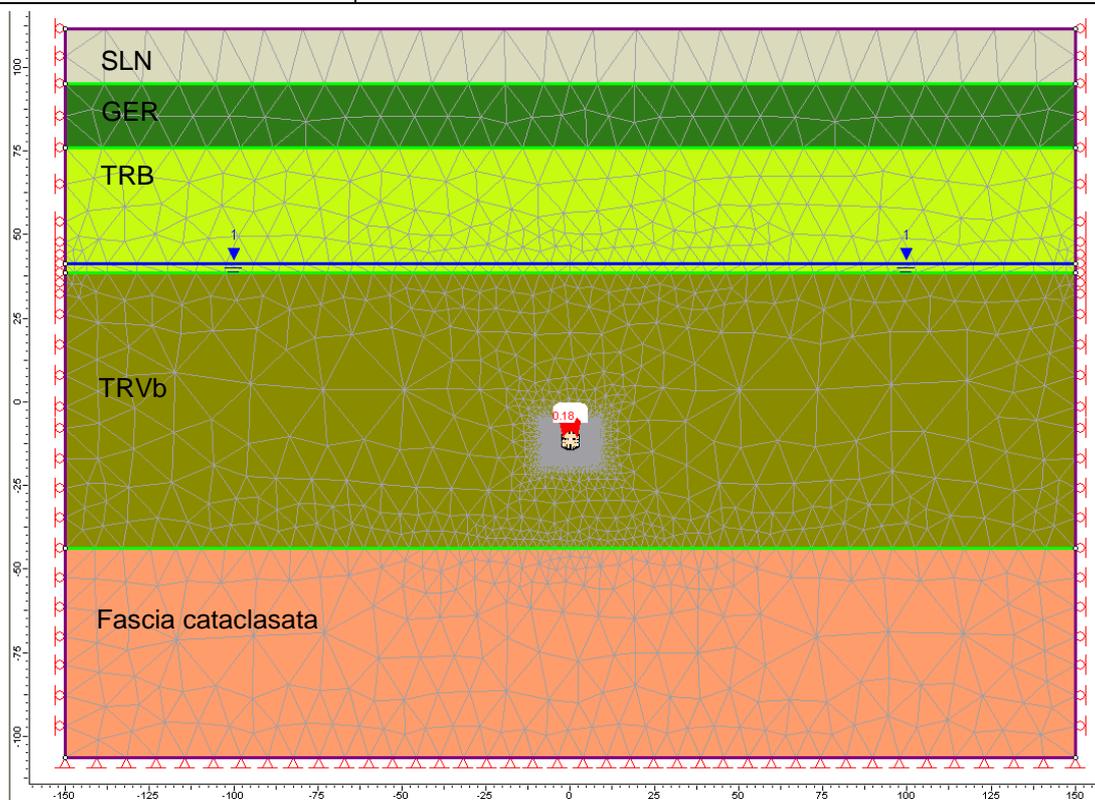
Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc		Pagina 16 di 41

Tabella 6.2: Modello di calcolo adottato – Sezione tipo Bypass_pedonale – sezione corrente

ANALISI:

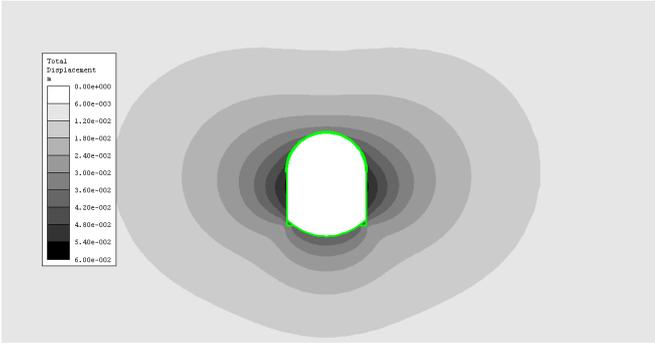
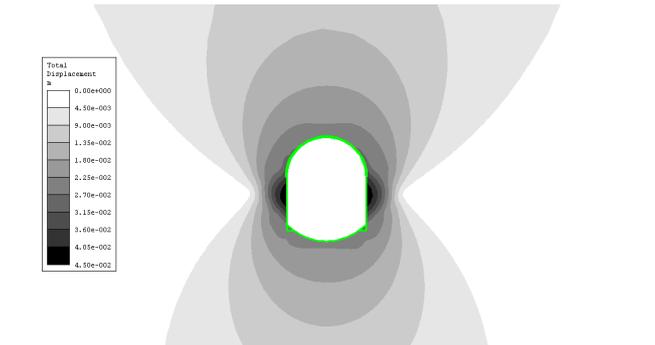
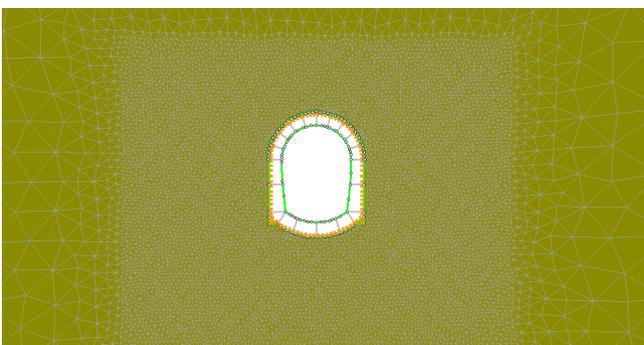
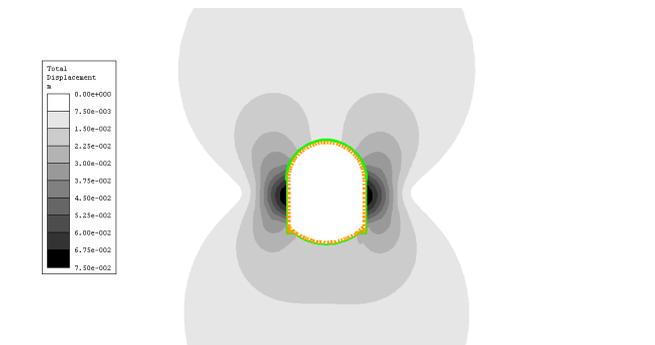
Gruppo geotecnico principale: TRV_b

Parametri geotecnici:	Angolo di attrito, ϕ'	24°
	Coesione, c	23kPa
	Modulo di deformabilità, E	80MPa
	Peso specifico, γ	23kN/m ³
Numero di fasi costruttive simulate	16, software: RS2 Versione 9.02 (Rocscience Inc [®])	



Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc		Pagina 17 di 41

Tabella 6.3: risultati delle analisi in termini di spostamenti.

FASE DI ANALISI	RISULTATI - ISOLINEE DI DEFORMAZIONE
Fase 6	<u>Situazione al fronte di scavo:</u> massimi spostamenti in corrispondenza dei piedritti di circa 6cm.
	
Fase 7	<u>Istallazione sostegno di prima fase.</u> Spostamenti massimi riferiti alla fase 6, sono pari a circa 4.5cm.
	
Fase 13	<u>Situazione lontano dal fronte di scavo.</u> Spostamenti massimi, riferiti alla fase 6, nella zona di calotta sono di circa 7.5cm.
	

6.2 Sezione tipo Bypass pedonale – sezione allargata

Di seguito si riportano le fasi esecutive impiegate nel modello in oggetto. E' stata considerata una copertura massima pari a circa 120m corrispondente alla copertura massima prevista.

Tabella 6.4: Simulazione delle fasi di scavo

Fase	Descrizione	Elementi attivi		p _i [%p ₀]
		cls proiet.-centine	Rivestimento definitivo	
1	Geostatico	-	-	-
2	Applicazione della pressione interna fittizia alla sezione di scavo	-	-	100
3-9	Decadimento della pressione interna alla sezione di scavo	-	-	80-30
10	Situazione al fronte di scavo	-	-	20
11	Installazione del sostegno di prima fase e dell'arco puntone	✓	-	15
12	Ulteriore decadimento della pressione interna e installazione dell'arco puntone	✓	-	10
13	Situazione lontano dal fronte di scavo	✓	-	0
14	Getto del rivestimento definitivo	✓	✓	0
15	Disattivazione dei sostegni di prima fase	-	✓	0
16	Situazione a lungo termine	-	✓	0

Si riportano di seguito i risultati delle analisi numeriche in termini di deformazioni al contorno del cavo.

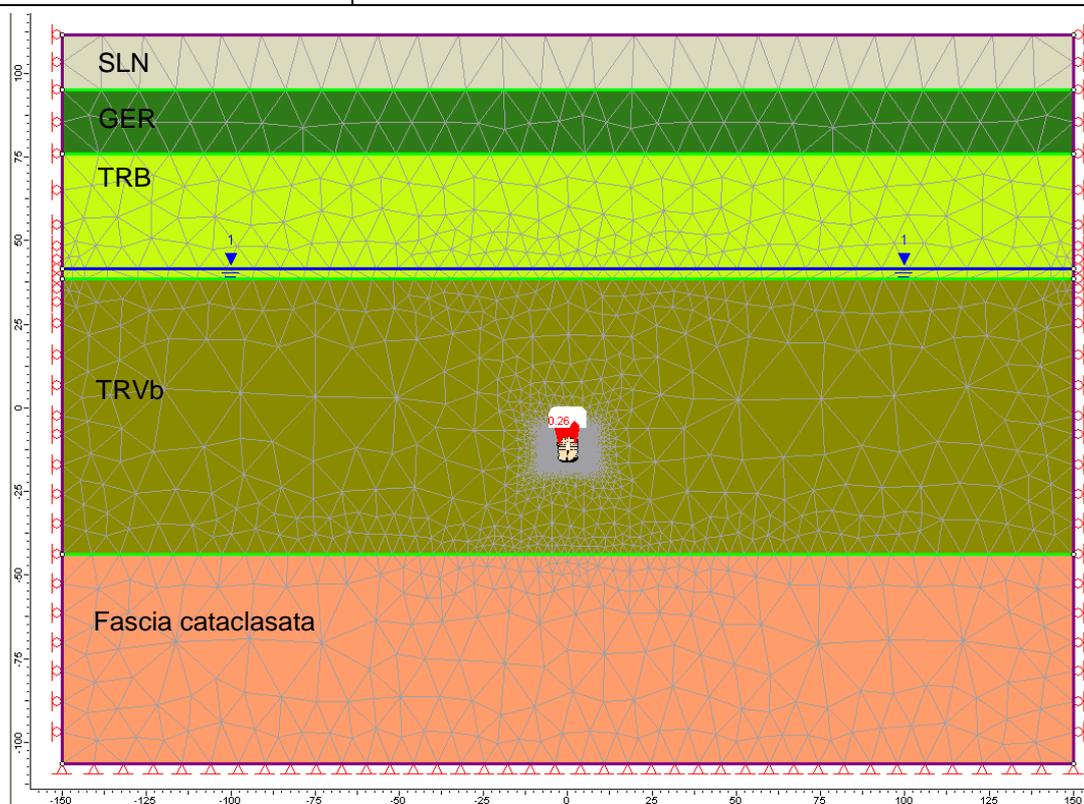
Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc		Pagina 19 di 41

Tabella 6.5: Modello di calcolo adottato – Sezione tipo Bypass_pedonale – sezione allargata

ANALISI:

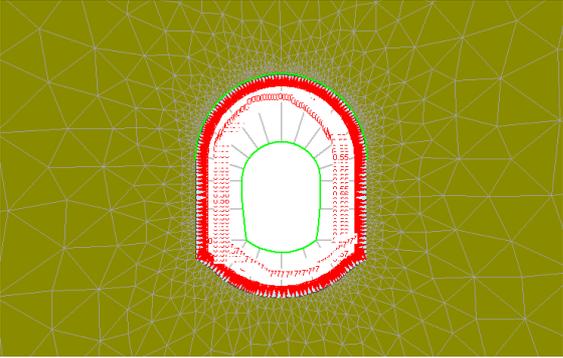
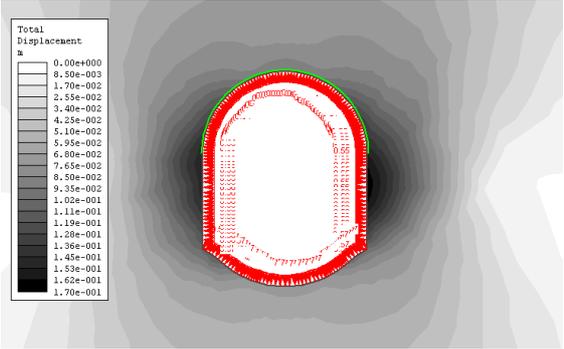
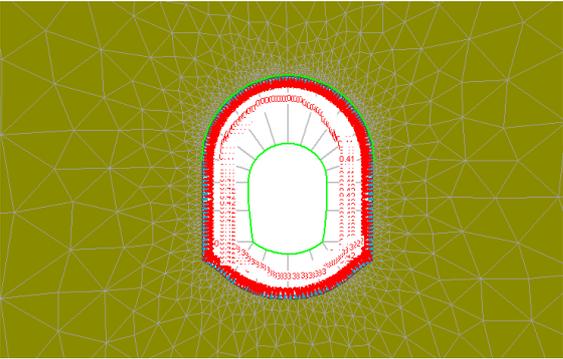
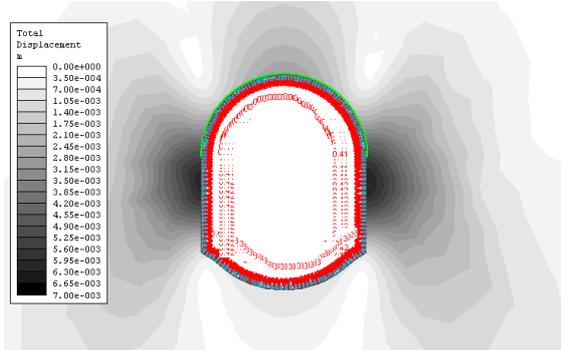
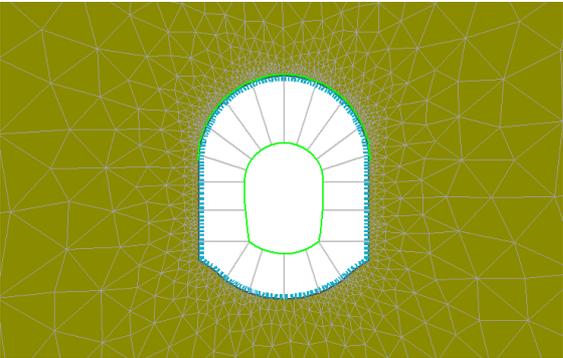
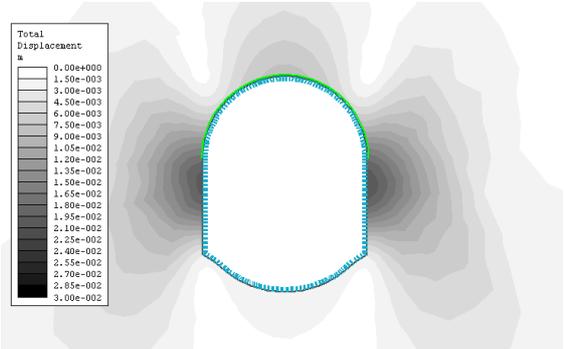
Gruppo geotecnico principale: TRV_b

Parametri geotecnici:	Angolo di attrito, ϕ'	24°
	Coesione, c	23kPa
	Modulo di deformabilità, E	80MPa
	Peso specifico, γ	23kN/m ³
Numero di fasi costruttive simulate	16, software: RS2 Versione 9.02 (Rocscience Inc [®])	



Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc		Pagina 20 di 41

Tabella 6.6: risultati delle analisi in termini di spostamenti.

FASE DI ANALISI	RISULTATI - ISOLINEE DI DEFORMAZIONE
Fase 10	<p><u>Situazione al fronte di scavo.</u> Spostamenti massimi in corrispondenza dei piedritti pari a circa 17cm.</p>
	
Fase 11	<p><u>Istallazione sostegno di prima fase.</u> Spostamenti massimi riferiti alla fase 10, pari a circa 6.3mm</p>
	
Fase 13	<p><u>Situazione lontano dal fronte di scavo.</u> Spostamenti massimi riferiti alla fase 11, nella zona dei piedritti, pari a circa 2.10cm.</p>
	

7. VERIFICHE DEL RIVESTIMENTO DI PRIMA FASE

Nel presente paragrafo si illustrano i criteri generali di verifica dei rivestimenti di prima fase. Le verifiche sono state eseguite allo stato limite ultimo (SLU).

Le azioni permanenti utilizzate, sono riferite ai valori caratteristici ottenuti dal modello di Phase2, per cui le successive verifiche sono rapportate al valore del coefficiente parziale di sicurezza delle azioni permanenti $\gamma_G = 1.30$. I valori di calcolo delle resistenze dei materiali si ricavano dividendo ciascun valore caratteristico per il fattore di sicurezza parziale γ_M specifico del materiale considerato (si veda la tabella seguente).

Tabella 7.1: fattore di sicurezza parziale dei materiali

Stato limite	Acciaio Carpenteria γ_A	Calcestruzzo γ_C
SLU	1.05	1.50

Di seguito si riportano i valori delle resistenze di calcolo, ottenute come rapporto tra la resistenza caratteristica ed il coefficiente γ_M : $f_d = f_k/\gamma_M$

Tabella 7.2: tensione di snervamento di calcolo centine

Acciaio	f_{yk} [MPa]	f_{yd} [MPa]
S275	275	261.9

Tabella 7.3: resistenze di calcolo calcestruzzo

Cls proiettato - Classe	f_{cd} [MPa]
C25/30*	16.7

*resistenza media su carote ($h/\phi = 1$) a 28 gg ≥ 30 MPa

dove:

f_{cd} resistenza a compressione cilindrica di calcolo

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo by-pass pedonali Rev.A.doc		Pagina 22 di 41

7.1 Verifiche strutturali

Le verifiche sono state condotte, sulla base dell'involuppo delle sollecitazioni, secondo il metodo semiprobabilistico agli stati limite. Vengono effettuate le seguenti verifiche in condizioni statiche (verifiche temporanee strutturali del sostegno in calcestruzzo proiettato e delle centine):

- Verifica a S.L.U. a pressoflessione;
- Verifica a S.L.U. a taglio;

Nella valutazione delle f_{cd} , considerato la transitorietà del pririvestimento, si trascura la riduzione per effetto dei carichi di lunga durata ($=0.85 \cdot f_{cd}$).

Si precisa che, se non è possibile applicare i coefficienti parziali (γ_F) alle azioni, essi sono applicati direttamente agli effetti delle azioni.

Inoltre, a favore di sicurezza, ai fini delle verifiche a taglio si considerano come elementi resistenti le sole centine metalliche del sostegno di prima fase. In tali sezioni si esegue la verifica a taglio, confrontando il taglio massimo agente con la resistenza a taglio di calcolo $V_{c,Rd}$, che è data dalla seguente espressione:

$$V_{c,Rd} = \frac{A_v \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

Dove:

A_v è l'area resistente a taglio che per profilati ad I, caricati nel piano delle ali, vale:

$$A_v = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f$$

essendo:

A: area della sezione;

b: larghezza delle ali dei profilati;

r: raggio di raccordo tra anima e ala;

t_f : spessore delle ali;

t_w : spessore dell'anima.

La verifica è soddisfatta quando l'azione tagliante di calcolo $V_{Ed} > V_{c,Rd}$.

Le verifiche riportate nel seguito sono state effettuate considerando i valori massimi delle sollecitazioni, agenti in una sezione avente spessore pari a quello equivalente: s_{eq} .

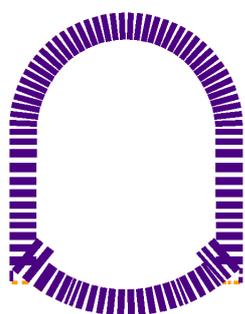
Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo by-pass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 23 di 41

7.2 Sollecitazioni e verifiche per la sezione tipo Bypass pedonale_sezione corrente

Gli schemi seguenti mostrano l'andamento dello sforzo normale, del momento flettente e dello sforzo di taglio agenti nel sostegno di prima fase della sezione in oggetto.

Il sostegno di prima fase è costituito da centine HEB220 a passo 0.8m, con cls proiettato di spessore 30cm.

Tabella 7.4: Sollecitazioni sul sostegno di prima fase, situazione lontano dal fronte (Fase 13). ($M > 0$, trazione in intradosso)



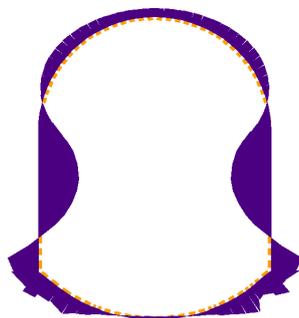
$$N_{k,max} = 3488 \text{ kN}$$

$$M_k = -189 \text{ kNm}$$

$$N_u = 4722.6 \text{ kN}$$

$$M_u = -255.9 \text{ kNm}$$

$$FS_{min} = 1.35 > 1.3$$



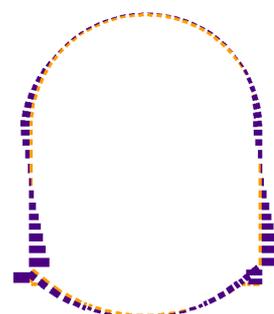
$$N_k = 2005 \text{ kN}$$

$$M_{k,max} = 342 \text{ kNm}$$

$$N_u = 2659.6 \text{ kN}$$

$$M_u = 453.7 \text{ kNm}$$

$$FS_{min} = 1.33 > 1.3$$



$$T_{k,max} = 322 \text{ kN}$$

$$T_{R,max} = 528 \text{ kN}$$

$$F_S = 1.64 > 1.3$$

Per la verifica a taglio si considera reagente la sola sezione del profilato in acciaio.

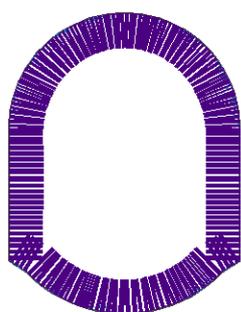
Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc		Pagina 24 di 41

7.3 Sollecitazioni e verifiche per la sezione tipo Bypass pedonale _sezione allargata

Gli schemi seguenti mostrano l'andamento dello sforzo normale, del momento flettente e dello sforzo di taglio agenti nel sostegno di prima fase della sezione in oggetto.

Il sostegno di prima fase è costituito da centine HEB240 a passo 0.8m, con cls proiettato di spessore 30cm.

Tabella 7.5: Sollecitazioni sul sostegno di prima fase, situazione lontano dal fronte (Fase 13). ($M > 0$, trazione in intradosso)



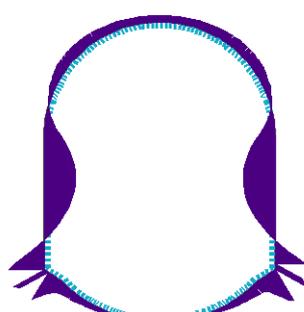
$$N_{k,max} = 2255 \text{ kN}$$

$$M_k = -163 \text{ kNm}$$

$$N_u = 4545.8 \text{ kN}$$

$$M_u = -328.6 \text{ kNm}$$

$$FS_{min} = 2.0 > 1.3$$



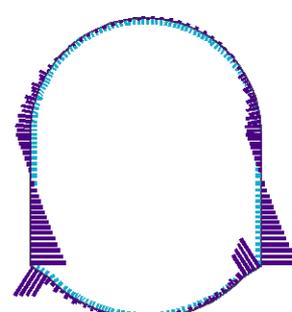
$$N_k = 2141 \text{ kN}$$

$$M_{k,max} = 381 \text{ kNm}$$

$$N_u = 2797.6 \text{ kN}$$

$$M_u = 497.8 \text{ kNm}$$

$$FS_{min} = 1.31 > 1.3$$



$$T_{k,max} = 385 \text{ kN}$$

$$T_{R,max} = 628 \text{ kN}$$

$$F_S = 1.63 > 1.3$$

Per la verifica a taglio si considera reagente la sola sezione del profilato in acciaio.

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 25 di 41

8. VERIFICHE DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO

8.1 Criteri di verifica ed azioni di calcolo

Nel presente paragrafo si illustrano i criteri generali di verifica del rivestimento definitivo delle sezioni tipo esaminate. Le verifiche sono state eseguite allo stato limite ultimo (SLU) ed allo SLE. Nei successivi capitoli verranno sintetizzate tramite tabelle esplicative.

8.2 Resistenze di calcolo

I valori di calcolo delle resistenze dei materiali si ricavano dividendo ciascun valore caratteristico per il fattore di sicurezza parziale γ_m specifico del materiale considerato (vedi tabella seguente).

Tabella 8.1: fattore di sicurezza parziale dei materiali

Stato limite	Acciaio γ_s	Calcestruzzo γ_c
SLU	1.15	1.50

Di seguito si riportano i valori delle resistenze di calcolo, ottenute come rapporto tra la resistenza caratteristica ed il coefficiente γ_m : $f_d = f_k/\gamma_m$

Tabella 8.2: tensione di snervamento di calcolo

Acciaio	f_{yd} [MPa]
B450C	391

Tabella 8.3: resistenze di calcolo calcestruzzo

Classe calcestruzzo	f_{cd} [MPa]
C32/40	18.1

dove:

f_{cd} = resistenza a compressione cilindrica di calcolo,

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo by-pass pedonali Rev.A.doc		Pagina 26 di 41

8.3 Verifiche strutturali

Le verifiche sono state condotte, sulla base dell'inviluppo delle sollecitazioni, secondo il metodo semiprobabilistico degli stati limite.

Vengono effettuate le seguenti verifiche:

- in condizioni statiche (condizioni di normale esercizio):
 - Verifica a S.L.U. per flessione;
 - Verifica a S.L.U. per taglio;
 - Verifica a S.L.E delle tensioni indotte nel calcestruzzo e nell'armatura metallica: conformemente alla normativa di riferimento, i valori limite sono pari a:
 - calcestruzzo: $\sigma_{c \max} = 0.45f_{ck}$
 - acciaio: $\sigma_{s \max} = 0.8f_{yk}$
 - Verifica a S.L.E per fessurazione.

Si precisa che, se non è possibile applicare i coefficienti parziali alle azioni, essi sono applicati direttamente agli effetti delle azioni. Il coefficiente parziale γ_F viene applicato come coefficiente globale sugli effetti delle azioni.

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo by-pass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 27 di 41

8.4 Sollecitazioni agenti

Nella tabella seguente si riportano, per le condizioni più gravose, le sollecitazioni sul rivestimento definitivo del bypass pedonale, nelle sezioni corrente e allargata.

Tabella 8.4: sezioni di verifica e sollecitazioni sul rivestimento definitivo per la sezione tipo bypass pedonale – sezione corrente

SEZIONE	Altezza sezione [cm]	CONDIZIONE DI CARICO	N [kN/m]	M [kNm/m]	T [kN/m]
1	50	Lungo termine	2602	131	41
2	50	Lungo termine	2620	-151	116
3	50	Lungo termine	2874	-171	136
4	50	Lungo termine	3270	-179	50
5	50	Lungo termine	3388	-43	319
6	50	Lungo termine	3217	182	374
7	54	Lungo termine	3138	359	318
8	67	Lungo termine	2997	-176	344
9	60	Lungo termine	2737	-327	458
10	60	Lungo termine	2899	-293	236
11	60	Lungo termine	2862	-209	14
12	60	Lungo termine	2960	-315	247
13	60	Lungo termine	3046	-320	322
14	67	Lungo termine	3105	-207	498
15	54	Lungo termine	3086	395	346
16	50	Lungo termine	3440	204	384
17	50	Lungo termine	3389	-52	316
18	50	Lungo termine	3125	-167	47
19	50	Lungo termine	2914	-178	134
20	50	Lungo termine	2620	-166	124

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc		Pagina 28 di 41

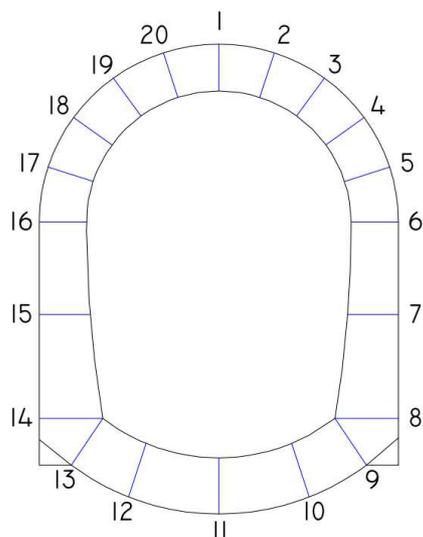


Figura 8.1: sezioni di verifica lungo il rivestimento definitivo della sezione tipo bypass pedonale_sezione corrente

Tabella 8.5: sezioni di verifica e sollecitazioni sul rivestimento definitivo per la sezione tipo bypass pedonale – sezione allargata

SEZIONE	Altezza sezione [cm]	CONDIZIONE DI CARICO	N [kN/m]	M [kNm/m]	T [kN/m]
1	235	Lungo termine	3903.8	-1174.7	22.1
2	230	Lungo termine	4030.5	-1096.0	338.2
3	217	Lungo termine	4490.1	-923.4	614.1
4	198	Lungo termine	4849.2	-825.0	565.2
5	175	Lungo termine	4952.4	-438.5	373.1
6	160	Lungo termine	4926.9	251.5	771.4
7	164	Lungo termine	4913.8	623.4	201.6
8	179	Lungo termine	4650.6	77.0	1280.2
9	160	Lungo termine	3621.9	-547.7	915.2
10	160	Lungo termine	3206.4	-501.0	599.9
11	160	Lungo termine	2930.5	-462.9	27.1
12	160	Lungo termine	3237.6	-530.7	639.6
13	160	Lungo termine	3748.1	-699.3	1002.0
14	179	Lungo termine	4858.5	-21.8	1385.5
15	164	Lungo termine	5038.2	638.1	214.0

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc		Pagina 29 di 41

VARIANTE TECNICA N.4

SEZIONE	Altezza sezione [cm]	CONDIZIONE DI CARICO	N [kN/m]	M [kNm/m]	T [kN/m]
16	160	Lungo termine	5045.7	311.6	758.0
17	175	Lungo termine	5078.4	-396.0	403.2
18	198	Lungo termine	4930.9	-775.7	586.7
19	217	Lungo termine	4565.6	-854.8	654.4
20	230	Lungo termine	4090.4	-1047.5	360.7

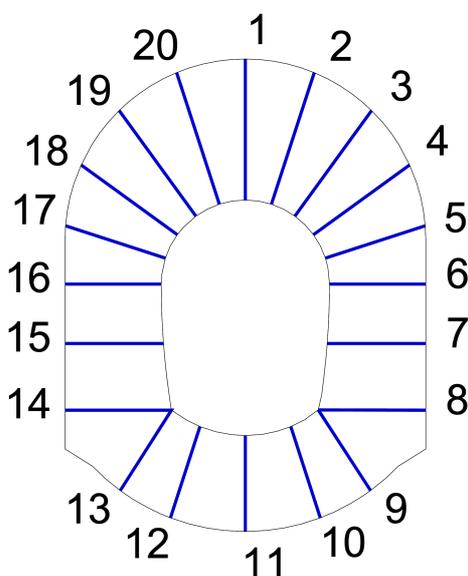


Figura 8.2: sezioni di verifica lungo il rivestimento definitivo della sezione tipo bypass pedonale_sezione allargata

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc		Pagina 30 di 41

Tabella 8.6: sezione tipo bypass pedonale_sezione corrente – Armatura.

Sezione	Altezza sezione [cm]	Armatura intradosso	Armatura estradosso	Classe cls
1	50	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
2	50	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
3	50	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
4	50	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
5	50	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
6	50	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
7	54	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
8	67	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
9	60	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
10	60	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
11	60	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
12	60	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
13	60	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
14	67	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
15	54	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
16	50	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
17	50	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
18	50	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
19	50	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
20	50	5φ16/m	5φ16/m	C32/40

Tabella 8.7: sezione tipo bypass pedonale_sezione allargata – Armatura.

Sezione	Altezza sezione [cm]	Armatura intradosso	Armatura estradosso	Classe cls
1	235	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
2	230	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
3	217	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
4	198	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
5	175	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
6	160	5φ16/m	5φ16/m	C32/40

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc		Pagina 31 di 41

VARIANTE TECNICA N.4

Sezione	Altezza sezione [cm]	Armatura intradosso	Armatura estradosso	Classe cls
7	164	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
8	179	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
9	160	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
10	160	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
11	160	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
12	160	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
13	160	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
14	179	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
15	164	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
16	160	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
17	175	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
18	198	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
19	217	5φ16/m	5φ16/m	C32/40
20	230	5φ16/m	5φ16/m	C32/40

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo by-pass pedonali Rev.A.doc		Pagina 32 di 41

8.5 Verifiche strutturali

Per le verifiche allo stato limite ultimo si verifica che il fattore di sicurezza F_{Su} , definito come M_u/M , sia maggiore di 1.30.

Tabella 8.8: verifica S.L.U. pressoflessione per bypass pedonale_sezione corrente (N+ compressione; M+ fibre tese intradosso)

Sezione	Altezza sezione [cm]	Condizione di carico	N [kN/m]	M [kNm/m]	M_u [kNm/m]	F_{Su}
1	50	Lungo termine	2602	131	398	3.04
2	50	Lungo termine	2620	-151	-389	2.58
3	50	Lungo termine	2874	-171	-398	2.33
4	50	Lungo termine	3270	-179	-375	2.09
5	50	Lungo termine	3388	-43	-107	2.49
6	50	Lungo termine	3217	182	384	2.11
7	54	Lungo termine	3138	359	642	1.79
8	67	Lungo termine	2997	-176	-558	3.17
9	60	Lungo termine	2737	-327	-754	2.31
10	60	Lungo termine	2899	-293	-706	2.41
11	60	Lungo termine	2862	-209	-576	2.76
12	60	Lungo termine	2960	-315	-726	2.30
13	60	Lungo termine	3046	-320	-721	2.25
14	67	Lungo termine	3105	-207	-616	2.98
15	54	Lungo termine	3086	395	669	1.69
16	50	Lungo termine	3440	204	397	1.95
17	50	Lungo termine	3389	-52	-128	2.46
18	50	Lungo termine	3125	-167	-368	2.20
19	50	Lungo termine	2914	-178	-405	2.28
20	50	Lungo termine	2620	-166	-416	2.51

dove:

N = sforzo normale da modello di calcolo (positivo di compressione)

M = momento flettente da modello di calcolo (positivo tende le fibre in intradosso)

M_u = momento ultimo di rottura

Dalla tabella precedente si nota il soddisfacimento del requisito minimo per la sicurezza.

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 33 di 41

Tabella 8.9: verifica S.L.U. pressoflessione per bypass pedonale_sezione allargata (N+ compressione; M+ fibre tese intradosso)

Sezione	Altezza sezione [cm]	Condizione di carico	N [kN/m]	M [kNm/m]	M _u [kNm/m]	F _{Su}
1	235	Lungo termine	3903.8	-1174.7	-4952.0	4.21
2	230	Lungo termine	4030.5	-1096.0	-4958.1	4.52
3	217	Lungo termine	4490.1	-923.4	-5054.0	>5.0
4	198	Lungo termine	4849.2	-825.0	-4839.5	>5.0
5	175	Lungo termine	4952.4	-438.5	-2631.1	>5.0
6	160	Lungo termine	4926.9	251.5	1457.1	>5.0
7	164	Lungo termine	4913.8	623.4	3313.6	>5.0
8	179	Lungo termine	4650.6	77.0	558.3	>5.0
9	160	Lungo termine	3621.9	-547.7	-3076.0	>5.0
10	160	Lungo termine	3206.4	-501.0	-2816.0	>5.0
11	160	Lungo termine	2930.5	-462.9	-2639.2	>5.0
12	160	Lungo termine	3237.6	-530.7	-2835.8	>5.0
13	160	Lungo termine	3748.1	-699.3	-3153.5	4.51
14	179	Lungo termine	4858.5	-21.8	-153.8	>5.0
15	164	Lungo termine	5038.2	638.1	3309.0	>5.0
16	160	Lungo termine	5045.7	311.6	1733.1	>5.0
17	175	Lungo termine	5078.4	-396.0	-2352.5	>5.0
18	198	Lungo termine	4930.9	-775.7	-4900.4	>5.0
19	217	Lungo termine	4565.6	-854.8	-5118.5	>5.0
20	230	Lungo termine	4090.4	-1047.5	-5014.3	4.78

dove:

N = sforzo normale da modello di calcolo (positivo di compressione)

M = momento flettente da modello di calcolo (positivo tende le fibre in intradosso)

M_u = momento ultimo di rottura

Dalla tabella precedente si nota il soddisfacimento del requisito minimo per la sicurezza.

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc		Pagina 34 di 41

Le verifiche allo S.L.E. risultano soddisfatte quando l'ampiezza delle fessure $w < 0.3\text{mm}^1$, la tensione massima nel calcestruzzo $\sigma_{c\text{ max}} \leq 0.45f_{ck}$ e la tensione massima nell'acciaio $\sigma_{s\text{ max}} \leq 0.8f_{yk}$.

Tabella 8.10: verifiche S.L.E per bypass pedonale_sezione corrente (N+ compressione; M+ fibre tese intradosso).

Sezione	Altezza sezione [cm]	Condizione di carico	N [kN/m]	M [kNm/m]	$\sigma_{c\text{ max}}$ [N/mm ²]	$\sigma_{s\text{ max}}$ [N/mm ²]	M _{fess} [kNm/m]	w [mm]
1	50	Lungo termine	2602	131	7.8	45.2	-	-
2	50	Lungo termine	2620	-151	8.3	41.4	-	-
3	50	Lungo termine	2874	-171	9.2	44.2	-	-
4	50	Lungo termine	3270	-179	10.2	53.7	-	-
5	50	Lungo termine	3388	-43	7.4	86.5	-	-
6	50	Lungo termine	3217	182	10.1	51.6	-	-
7	54	Lungo termine	3138	359	12.5	8.9	-	-
8	67	Lungo termine	2997	-176	6.5	39.9	-	-
9	60	Lungo termine	2737	-327	9.5	9.9	-	-
10	60	Lungo termine	2899	-293	9.1	20.9	-	-
11	60	Lungo termine	2862	-209	7.8	33.8	-	-
12	60	Lungo termine	2960	-315	9.6	18.6	-	-
13	60	Lungo termine	3046	-320	9.8	19.9	-	-
14	67	Lungo termine	3105	-207	7.0	38.0	-	-
15	54	Lungo termine	3086	395	13.4	-6.8	-	-
16	50	Lungo termine	3440	204	11.0	53.1	-	-
17	50	Lungo termine	3389	-52	7.6	84.6	-	-
18	50	Lungo termine	3125	-167	9.6	52.2	-	-
19	50	Lungo termine	2914	-178	9.5	43.8	-	-
20	50	Lungo termine	2620	-166	8.6	38.1	-	-

dove:

$\sigma_{c\text{ max}}$ = tensione massima nel calcestruzzo (positivo di compressione)

$\sigma_{s\text{ max}}$ = tensione di compressione o trazione massima nell'acciaio (positivo di compressione)

N = sforzo normale da modello di calcolo (positivo di compressione)

M = momento flettente da modello di calcolo (positivo tende le fibre in intradosso)

w = ampiezza delle fessure

¹ Nel caso specifico le condizioni ambientali risultano ordinarie, con armature poco sensibili. A favore di sicurezza l'apertura massima di riferimento è presa pari a 0.3mm (tab. 4.1.IV delle NTC2008) a fronte dell'equivalenza tra le combinazioni delle azioni (rif. paragrafo 2.5.3 delle NTC2008)

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 35 di 41

M_{fess} = momento di prima fessurazione

Le verifiche in esercizio risultano soddisfatte.

Tabella 8.11: verifiche S.L.E per bypass pedonale_ sezione allargata (N+ compressione; M+ fibre tese intradosso).

Sezione	Altezza sezione [cm]	Condizione di carico	N [kN/m]	M [kNm/m]	$\sigma_{c \max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{s \max}$ [N/mm ²]	M_{fess} [kNm/m]	w [mm]
1	235	Lungo termine	3903.8	-1174.7	2.87	Compress.	-	-
2	230	Lungo termine	4030.5	-1096.0	2.93	Compress.	-	-
3	217	Lungo termine	4490.1	-923.4	3.18	Compress.	-	-
4	198	Lungo termine	4849.2	-825.0	3.63	Compress.	-	-
5	175	Lungo termine	4952.4	-438.5	3.61	Compress.	-	-
6	160	Lungo termine	4926.9	251.5	3.59	Compress.	-	-
7	164	Lungo termine	4913.8	623.4	4.27	Compress.	-	-
8	179	Lungo termine	4650.6	77.0	2.69	Compress.	-	-
9	160	Lungo termine	3621.9	-547.7	3.45	Compress.	-	-
10	160	Lungo termine	3206.4	-501.0	3.09	Compress.	-	-
11	160	Lungo termine	2930.5	-462.9	2.83	Compress.	-	-
12	160	Lungo termine	3237.6	-530.7	3.17	Compress.	-	-
13	160	Lungo termine	3748.1	-699.3	3.87	Compress.	-	-
14	179	Lungo termine	4858.5	-21.8	2.71	Compress.	-	-
15	164	Lungo termine	5038.2	638.1	4.38	Compress.	-	-
16	160	Lungo termine	5045.7	311.6	3.79	Compress.	-	-
17	175	Lungo termine	5078.4	-396.0	3.60	Compress.	-	-
18	198	Lungo termine	4930.9	-775.7	3.60	Compress.	-	-
19	217	Lungo termine	4565.6	-854.8	3.13	Compress.	-	-
20	230	Lungo termine	4090.4	-1047.5	2.90	Compress.	-	-

dove:

- $\sigma_{c \max}$ = tensione massima nel calcestruzzo (positivo di compressione)
- $\sigma_{s \max}$ = tensione di compressione o trazione massima nell'acciaio (positivo di compressione)
- N = sforzo normale da modello di calcolo (positivo di compressione)
- M = momento flettente da modello di calcolo (positivo tende le fibre in intradosso)
- w = ampiezza delle fessure
- M_{fess} = momento di prima fessurazione

Le verifiche in esercizio risultano soddisfatte.

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc		Pagina 36 di 41

Nel caso di elementi strutturali dotati di armature trasversali a taglio occorre verificare che il taglio di progetto (V_{Ed}) sia minore di V_{Rd} .

$$V_{Rd} = \min(V_{Rsd}, V_{Rcd})$$

V_{Rsd} è la resistenza di calcolo a "taglio trazione" dell'armatura trasversale;

$$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot (A_{sw}/s) \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha;$$

V_{Rcd} è la resistenza di calcolo a "taglio compressione" del calcestruzzo;

$$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta).$$

Per il significato delle diverse entità si rimanda al paragrafo 4.1.2.1.3.1 del NTC2008.

Dalle tabelle successive si evince il soddisfacimento alla verifica a taglio essendo $V_{Ed} \leq V_{Rd}$.

La verifica al taglio è stata svolta prendendo in esame le condizioni più sfavorevoli.

Tabella 8.12: verifica S.L.U. taglio per bypass pedonale_sezione corrente

Sezione	Altezza sezione [cm]	A_{sw} (bracci)	Condizione di carico	V_k [kN/m]	V_d [kN/m]	V_{Rsd} [kN/m]	V_{Rcd} [kN/m]	V_{Rd} [kN/m]
1	50	1Ø14/50/20	lungo termine	41	53.3	539	1120	539
2	50	1Ø14/50/20	lungo termine	116	150.8	539	1120	539
3	50	1Ø14/50/20	lungo termine	136	176.8	539	1120	539
4	50	1Ø14/50/20	lungo termine	50	65	539	1120	539
5	50	1Ø14/50/20	lungo termine	319	414.7	539	1120	539
6	50	1Ø14/50/20	lungo termine	374	486.2	539	1120	539
7	54	1Ø14/50/20	lungo termine	318	413.4	594	1232	594
8	67	1Ø14/50/20	lungo termine	344	447.2	770	1598	770
9	60	1Ø14/50/20	lungo termine	458	595.4	675	1401	675
10	60	1Ø14/50/20	lungo termine	236	306.8	675	1401	675
11	60	1Ø14/50/20	lungo termine	14	18.2	675	1401	675
12	60	1Ø14/50/20	lungo termine	247	321.1	675	1401	675
13	60	1Ø14/50/20	lungo termine	322	418.6	675	1401	675
14	67	1Ø14/50/20	lungo termine	498	647.4	770	1598	770
15	54	1Ø14/50/20	lungo termine	346	449.8	594	1232	594

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc		Pagina 37 di 41

VARIANTE TECNICA N.4

Sezione	Altezza sezione [cm]	A _{sw} (bracci)	Condizione di carico	V _k [kN/m]	V _d [kN/m]	V _{Rsd} [kN/m]	V _{Rcd} [kN/m]	V _{Rd} [kN/m]
16	50	1Ø14/50/20	lungo termine	384	499.2	539	1120	539
17	50	1Ø14/50/20	lungo termine	316	410.8	539	1120	539
18	50	1Ø14/50/20	lungo termine	47	61.1	539	1120	539
19	50	1Ø14/50/20	lungo termine	134	174.2	539	1120	539
20	50	1Ø14/50/20	lungo termine	124	161.2	539	1120	539

dove:

V_d = taglio di calcolo sollecitante ultimo;
 A_{sw} = armatura specifica a taglio;

Tabella 8.13: verifica S.L.U. taglio per bypass pedonale_sezione allargata

Sezione	Altezza sezione [cm]	A _{sw} (bracci)	Condizione di carico	V _k [kN/m]	V _d [kN/m]	V _{Rsd} [kN/m]	V _{Rcd} [kN/m]	V _{Rd} [kN/m]
1	235	1Ø14/50/20	lungo termine	22.1	28.8	3047	6325	3047
2	230	1Ø14/50/20	lungo termine	338.2	439.6	2979	6185	2979
3	217	1Ø14/50/20	lungo termine	614.1	798.3	2803	5819	2803
4	198	1Ø14/50/20	lungo termine	565.2	734.8	2545	5284	2545
5	175	1Ø14/50/20	lungo termine	373.1	485.0	2234	4637	2234
6	160	1Ø14/50/20	lungo termine	771.4	1002.9	2030	4215	2030
7	164	1Ø14/50/20	lungo termine	201.6	262.0	2084	4328	2084
8	179	1Ø14/50/20	lungo termine	1280.2	1664.3	2288	4750	2288
9	160	1Ø14/50/20	lungo termine	915.2	1189.7	2030	4215	2030
10	160	1Ø14/50/20	lungo termine	599.9	779.8	2030	4215	2030
11	160	1Ø14/50/20	lungo termine	27.1	35.3	2030	4215	2030
12	160	1Ø14/50/20	lungo termine	639.6	831.5	2030	4215	2030
13	160	1Ø14/50/20	lungo termine	1002.0	1302.6	2030	4215	2030
14	179	1Ø14/50/20	lungo termine	1385.5	1801.1	2288	4750	2288
15	164	1Ø14/50/20	lungo termine	214.0	278.3	2084	4328	2084

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc		Pagina 38 di 41

VARIANTE TECNICA N.4

Sezione	Altezza sezione [cm]	A _{sw} (bracci)	Condizione di carico	V _k [kN/m]	V _d [kN/m]	V _{Rsd} [kN/m]	V _{Rcd} [kN/m]	V _{Rd} [kN/m]
16	160	1Ø14/50/20	lungo termine	758.0	985.3	2030	4215	2030
17	175	1Ø14/50/20	lungo termine	403.2	524.2	2234	4637	2234
18	198	1Ø14/50/20	lungo termine	586.7	762.7	2545	5284	2545
19	217	1Ø14/50/20	lungo termine	654.4	850.7	2803	5819	2803
20	230	1Ø14/50/20	lungo termine	360.7	468.9	2979	6185	2979

dove:

V_d = taglio di calcolo sollecitante ultimo;
 A_{sw} = armatura specifica a taglio;

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo bypass pedonali Rev.A.doc		Pagina 39 di 41

9. STABILITA' DEL FRONTE DI SCAVO

La verifica di stabilità del fronte di scavo è stata condotta in condizioni non drenate. Il metodo utilizzato è quello di Broms e Bennermark (1969) in cui viene definito il rapporto di stabilità N_s secondo la seguente relazione:

$$N_s = \frac{\sigma_s + \gamma(C + D/2) - \sigma_t}{c_u}$$

Dove:

C è la copertura in chiave di calotta

D è il diametro equivalente della galleria

σ_s è la pressione agente in superficie per la presenza di eventuali sovraccarichi

σ_t è la pressione stabilizzante agente a livello della galleria. Tale pressione fittizia è stata valutata a partire dalla resistenza a sfilamento dei VTR presenti al fronte

c_u è la coesione non drenata

Sulla base delle risultanze di diversi casi esaminati dagli Autori, le condizioni di collasso si verificano per valori di $N_s=6$.

Sempre dalla Letteratura tecnica, sulla base dei diversi valori ottenuti dal rapporto di stabilità, si identificano le condizioni del fronte.

N_s	Deformazioni
<1	trascurabili
1 – 2	elastiche
2 – 4	elasto-plastiche
4 – 6	plastiche
>6	collasso

Applicando i valori al caso specifico, e considerando che la copertura non è quella totale, ma quella valutata a partire dalla relazione di Terzaghi (parametro B della relazione di Terzaghi),

$$B = b + 2 \cdot h \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right): \text{dimensione caratteristica della galleria}$$

si ottiene un valore del rapporto di stabilità di: $N_s=0.90$, pertanto il fronte risulta stabile (<6) e al fronte si svilupperanno deformazioni elastiche.

Cod. elab.: 15GN204GN02ZRH470A	Titolo: Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Data redazione: Dicembre 2018
Nome file: V_3578-22 Relazione di calcolo by-pass pedonali Rev.A.doc		Pagina 40 di 41

10. MONITORAGGIO

In conformità a quanto previsto dalla normativa vigente, il monitoraggio geotecnico degli scavi costituisce parte integrante del progetto geotecnico e strutturale delle opere di sostegno degli scavi.

In particolare, si prevede di monitorare gli spostamenti radiali della galleria mediante l'installazione di n°5 mire ottiche disposte sul contorno dello scavo. Per una accurata definizione degli spostamenti attesi, è necessario che l'installazione delle mire avvenga contemporaneamente alla posa in opera del sostegno di prima fase.

I valori attesi dello spostamento radiale sono quelli indicati nelle Tabella 6.3 seconda della tratta in cui ricade la sezione di monitoraggio.

Nel caso di anomalie nell'andamento delle deformazioni, con valori misurati superiori ai valori attesi, è necessario che ne venga data immediata comunicazione alla Direzione Lavori e al Progettista al fine di valutare in accordo le misure da attuarsi.

<i>Cod. elab.:</i> 15GN204GN02ZRH470A	<i>Titolo:</i> Opere D'Arte Maggiori – GN Caltanissetta	<i>Data redazione:</i> Dicembre 2018
<i>Nome file:</i> V_3578-22 Relazione di calcolo by-pass pedonali Rev.A.doc	Relazione di calcolo dei bypass pedonali.	Pagina 41 di 41