

S.p.A.

DIREZIONE REGIONALE PER LA SICILIA

PA 12/09

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO - NORD EUROPA

ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA - A19

S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE"

AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001

Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19

VARIANTE TECNICA N°4

ai sensi dell'art. 176, comma 5, secondo periodo lettera "a" e lettera "b", del D.Lgs. N. 163/2006 e Art. 11 del CSA-NG

CONTRAENTE GENERALE



DIRETTORE DEI LAVORI

Ing. CARLO DAMIANI

OPERE D'ARTE MAGGIORI

GALLERIE NATURALI

GALLERIA NATURALE CALTANISSETTA

Imbocco lato A19

Relazione geotecnica interventi di consolidamento

imbocco lato A19

Empedocle 2 s.c.p.a.

Codice Unico Progetto (CUP) : F91B09000070001

3633-107

Codice Elaborato:

PA12\_09 - V 1 2 5 GN 2 0 4 GN 0 2 6 CL 0 0 8 A

Scala:

-----

F						
E						
D						
C						
B						
A	Aprile 2021	EMISSIONE	AK	AK	A. ANTONELLI	A.FINAMORE
REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	AUTORIZZATO

Il Progettista:



Il Consulente Specialista:



Il Geologo:



Il Coordinatore per la sicurezza:



Il Direttore dei Lavori:

Responsabile del procedimento: Ing. LUIGI MUPO





Contraente Generale:



Lavori di ammodernamento alla categoria B della S.S. n. 640 secondo le norme del DM 5.11.2001 dell'itinerario Agrigento-Caltanissetta-A19 dal km 44+000 allo svincolo con la A19

OPERE D'ARTE MAGGIORI  
GALLERIE NATURALI  
GALLERIA NATURALE CALTANISSETTA

Opere di imbocco lato A19

Paratie definitive – Aggiornamento verifiche geotecniche e strutturali a seguito del nuovo contesto stratigrafico e della variazione della configurazione dell'imbocco

Relazione di calcolo

R3420.01

Torino, 12/11/2020

## INDICE

<b>1.INTRODUZIONE</b> .....	<b>2</b>
1.1 Normativa di riferimento .....	3
1.2 Caratteristiche dei materiali.....	4
<b>2.ANALISI A RITROSO</b> .....	<b>5</b>
<b>3.PARAMETRI GEOTECNICI</b> .....	<b>7</b>
<b>4.CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO</b> .....	<b>8</b>
4.1 Tempo di ritorno .....	8
4.2 Categoria di sottosuolo.....	9
4.3 Accelerazione massima .....	9
4.4 Accelerazione massima al suolo e coefficienti sismici .....	10
<b>5.CRITERI DI VERIFICA</b> .....	<b>11</b>
5.1 Azioni e resistenze di progetto .....	11
<b>6.DESCRIZIONE DELL'OPERA</b> .....	<b>14</b>
<b>7.VERIFICA DELLE OPERE</b> .....	<b>15</b>
7.1 Metodo di calcolo .....	15
7.1.1 Condizioni al contorno.....	15
7.1.2 Legge di comportamento dei materiali .....	15
7.1.3 Elementi strutturali.....	15
7.1.3.1 Rigidezza equivalente delle paratie in pali .....	15
7.1.3.2 Ancoraggi .....	17
7.1.4 Azioni e carichi agenti .....	17
7.1.4.1 Sovraccarico accidentale.....	17
7.1.4.2 Azione sismica.....	17
7.1.5 Fasi di calcolo.....	17
7.1.6 Modello di calcolo.....	18
7.1.6.1 Sezione 1.....	18
7.1.6.2 Sezione 2.....	19
7.1.6.3 Sezione 3.....	20
7.1.6.4 Sezione 4.....	21
7.2 Metodo di analisi per le verifiche geotecniche.....	22
7.3 Verifiche strutturali e geotecniche .....	23
7.3.1 Verifica dei pali .....	23
7.3.2 Ancoraggi e travi ripartizione .....	23
7.3.2.1 Verifica di resistenza degli ancoraggi .....	23
7.3.2.2 Resistenza ultima allo sfilamento del bulbo.....	24
7.3.2.3 Resistenza adesione barra-malta cementizia.....	26
7.3.2.4 Lunghezza del tratto libero .....	26
7.3.2.5 Travi di ripartizione .....	27
7.4 Analisi tenso-deformativa della paratia: risultati e verifiche.....	27
7.4.1 Stato limite di esercizio (SLE) .....	27
7.4.2 Stato limite ultimo per le strutture (STR) .....	28
7.4.2.1 Verifiche dei pali .....	28
7.4.2.2 Verifiche degli ancoraggi .....	30
7.4.2.3 Verifiche della trave di ripartizione.....	30
7.4.3 Stato limite ultimo di tipo geotecnico (GEO).....	31
<b>8.CONCLUSIONI</b> .....	<b>35</b>

## 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, con la finalità di illustrare le verifiche relative alle paratie di tipo definitivo previste all'imbocco lato A19 della galleria Caltanissetta (tratta A1-A2-B).

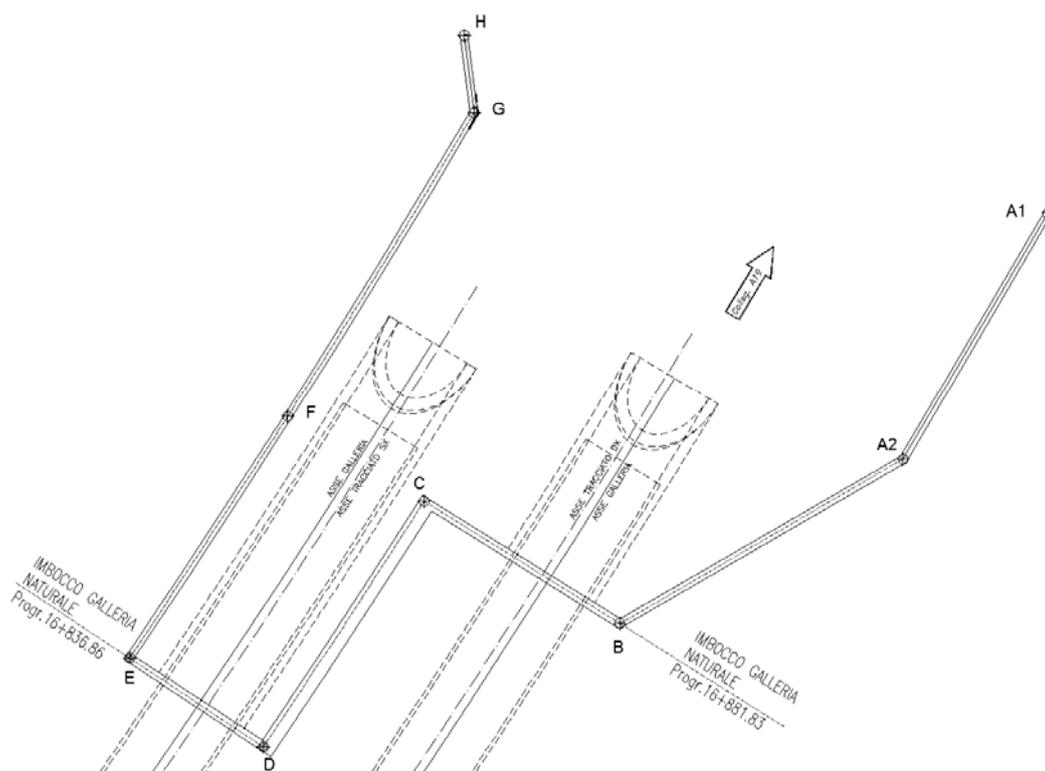


Figura 1.1: Planimetria delle paratie all'imbocco lato A19 della galleria Caltanissetta.

Il Progetto esecutivo (redatto da AK nel 2012) di tali opere è stato redatto sulla base di una estesa campagna di indagini geognostiche. Il dimensionamento delle opere di imbocco è stato eseguito tenendo conto dei parametri geotecnici definiti in fase di Progetto Esecutivo (PE) e della sequenza stratigrafica ricostruita nel ambito della stessa fase progettuale.

Contestualmente, è stato anche definito un piano di monitoraggio finalizzato a controllare se il comportamento reale dell'opera durante le fasi di costruzione, rispecchiasse quanto previsto in fase di calcolo.

A seguito dell'avvio delle lavorazioni, mediante una verifica costante dei dati di monitoraggio, si è osservato che il comportamento deformativo dell'opera era diverso da quello previsto in fase di PE. In particolare, gli spostamenti delle paratie misurati erano maggiori di quelle attese. Nei casi in cui i valori attesi sono stati superati, si è quindi proceduto alla rianalisi della paratia mediante analisi a ritroso finalizzate a valutare se l'opera fosse strutturalmente e geotecnicamente adeguata, prevedendo degli interventi integrativi, laddove vi fossero delle insufficienze strutturali o geotecniche (redatto da SGAI nel 2015).

Inoltre, in virtù di alcune criticità geologiche emerse nell'area d'interesse, si è reso necessario ridefinire il modello geologico e geomorfologico. Assistiti dai numerosi scavi per trincee eseguiti nell'area dell'imbocco, l'Università degli studi di Catania nel 2016 ha ridefinito il modello stratigrafico di tale zona. In particolare, lo studio geologico ha riscontrato una sostanziale coerenza rispetto a quanto determinato in fase di PE, individuando però un'area superficiale caratterizzata dalla presenza di un deposito di origine antropica con spessore fino a 5 m. Lo scavo ha messo in movimento lo strato superficiale di materiale incoerente causando un sovraccarico sulle opere di contenimento, come riportato nella *"Relazione Generale dei dissesti Idrogeologici"* dell'Università degli studi di Catania.

Il nuovo modello stratigrafico richiede una rivalutazione delle capacità geotecniche e strutturali delle paratie di tipo permanente dell'imbocco lato A19 della galleria Caltanissetta. Queste nuove analisi tengono conto dell'effettivo comportamento delle paratie così come registrato dal monitoraggio topografico nel corso degli scavi, dei tiranti installati (massimo 5 file contro le 6 del PE) ed infine della configurazione finale adottata per l'imbocco dove il piano di fondo scavo è a 510m contro i 507.50m slm del PE.

### **1.1 Normativa di riferimento**

Le verifiche statiche e la redazione della presente relazione sono state eseguite nel rispetto della Normativa in vigore in fase di progettazione esecutiva, 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 UNI EN 206-1

- CLASSE DI RESISTENZA : C12/15

### CLS PER OPERE STRUTTURALI UNI EN 206-1

- CLASSE DI RESISTENZA : C25/30
- CLASSE DI CONSISTENZA : S3
- CLASSE DI ESPOSIZIONE : XC2

### CALCESTRUZZO PROIETTATO

- DESTINAZIONE D'USO UNI 10834 : temporaneo strutturale
- CLASSE DI RESISTENZA : C15/20
- RESISTENZA MEDIA SU CAROTE H/Ø=1 A 48h : 15MPa

### MISCELE CEMENTIZIE PER INIEZIONE TIRANTI

- CLASSE DI RESISTENZA : C20/25
- RAPPORTO A/C : 0.5
- ADDITIVO FLUIDIFICANTE E ANTIRITIRO

### ACCIAIO PER ARMATURA CLS

BARRE Ø ≤ 40mm

ACCIAIO B450C

- TENSIONE CARATTERISTICA DI SNERVAMENTO ( $f_{yk}$ ) : 450MPa
  - TENSIONE CARATTERISTICA A ROTTURA ( $f_{tk}$ ) : 540MPa
- RETE ELETTRICALDATA
- TENSIONE CARATTERISTICA DI SNERVAMENTO ( $f_{yk}$ ) : 390MPa

### ACCIAIO ARMONICO STABILIZZATO PER TIRANTI DI ANCORAGGIO

- TENSIONE CARATT. A ROTTURA  $f_{ptk}$  : 1860MPa
- TENSIONE CARATT. ALL'1% DI DEFORMAZIONI TOTALI  $f_{p(1)k}$  : 1670MPa
- INIEZIONE AD ALTA PRESSIONE RIPETUTA

### PROFILATI METALLICI PER TRAVI DI RIPARTIZIONE E PIASTRE

- TENSIONE CARATTERISTICA DI SNERVAMENTO : S355MPa

### TUBI DI DRENAGGIO IN PVC Ø60/5mm

- LARGHEZZA FESSURE: : 1mm
- DISTANZA FESSURE MASSIMA : 10mm
- DIAMETRO DI PERFORAZIONE, Øperf. : ≥90mm
- RIVESTIMENTO IN TESSUTO NON TESSUTO : 400gr/mq

## 2. ANALISI A RITROSO

Al fine di tener conto del reale quadro deformativo delle opere, i modelli numerici utilizzati per le nuove analisi delle paratie permanenti sono stati tarati in funzione dei valori di spostamenti misurati dalle strumentazioni di monitoraggio installate, di cui se ne riporta l'ubicazione nelle figure seguenti. Considerando quindi la tratta d'interesse A1-A2-B, si è scelto di prendere come riferimento i dati riguardanti i punti di controllo PCN11 e dal PCN57-PCN62.

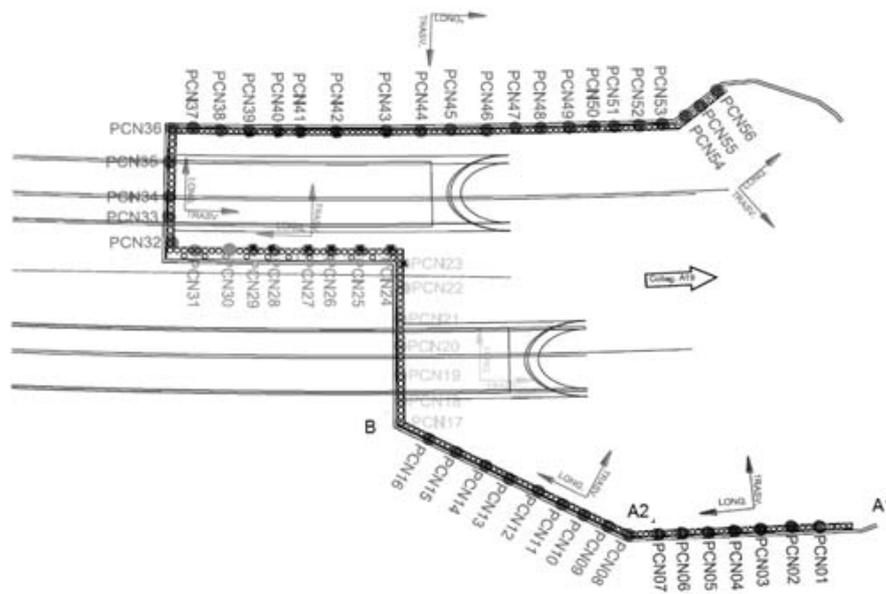


Figura 2.1: Planimetria delle paratie all'imbocco lato A19 della galleria Caltanissetta.

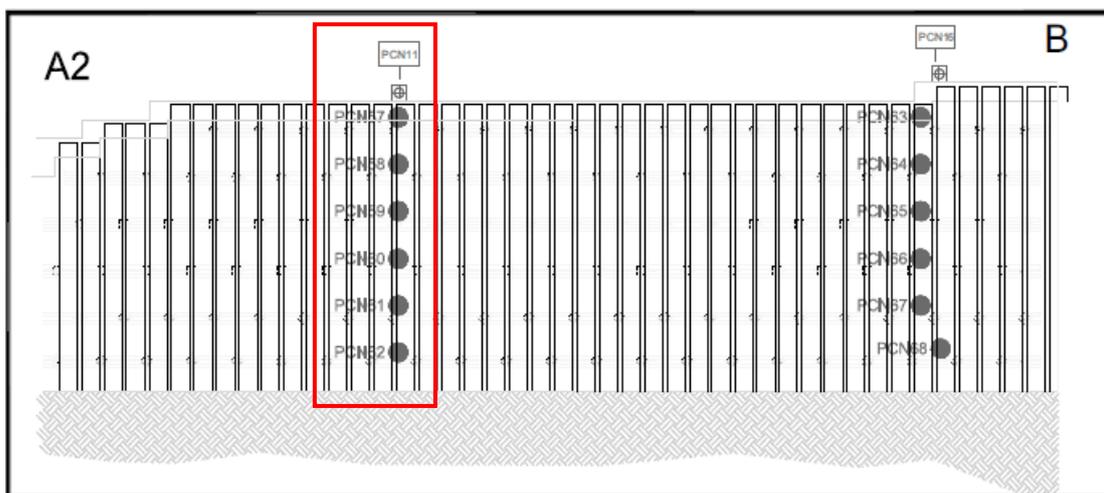


Figura 2.2: Ubicazione della strumentazione di monitoraggio lungo lo sviluppo della paratia.

È stata quindi implementata tramite il codice commerciale RS2 (Rocscience Inc., ver. 9.030 del 2019), l'analisi di una sezione nei pressi dei punti di controllo citati sopra (Sezione 4 di Figura 6.1) per la stratigrafia rivenuta dallo studio dell'università di Catania. In questo modo è stato possibile individuare i parametri geotecnici per le unità coinvolte, che comportano corrispondenza tra gli spostamenti valutati attraverso il modello di calcolo e quelli misurati durante gli scavi.

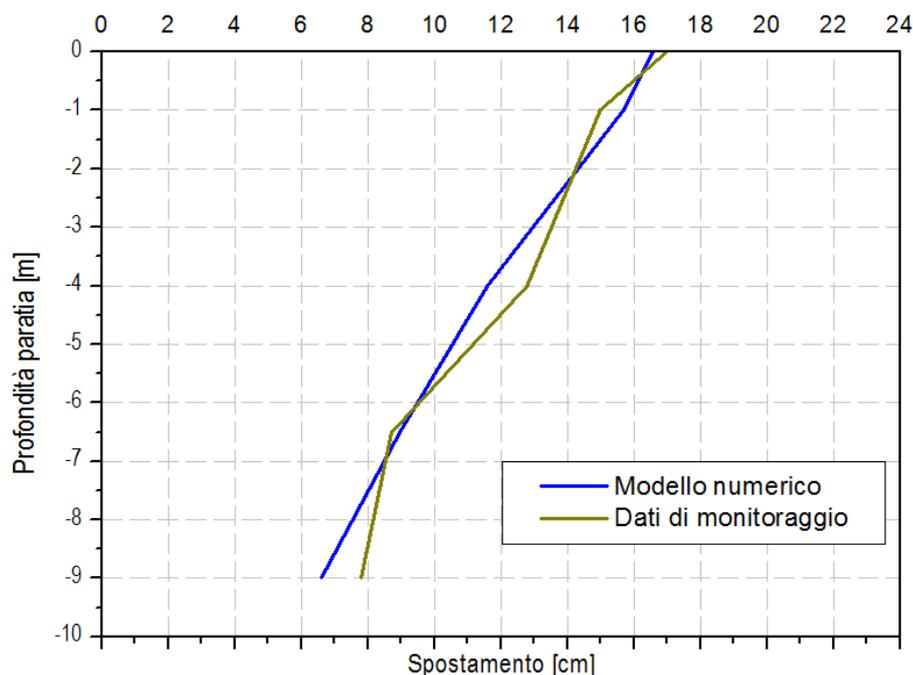


Figura 2.3: Confronto tra gli spostamenti valutati attraverso il modello di calcolo e quelli misurati durante gli scavi.

Per una ulteriore conferma della scelta dei parametri geotecnici definiti per la sezione 4, sono stati inoltre confrontati i valori di spostamento in testa alla paratia in corrispondenza di ulteriori sezioni (che sono state di seguito analizzate – si veda Figura 6.1). Come si evince dalla tabella seguente c'è un'ottima corrispondenza tra i valori misurati e i risultati delle analisi.

Tabella 2.1: Sezioni di verifica: massime deformazioni riscontrate e spostamenti definiti dal modello

Sezione di analisi	Punto di controllo	Spostamento in testa paratia [cm]	
		Monitoraggio	Modello di calcolo
Sezione 1	PCN06	6.0	5.2
Sezione 2	PCN08	8.7	8.7
Sezione 3	PCN09	11.2	11.3
Sezione 4	PCN11	17.0	16.6

### 3. PARAMETRI GEOTECNICI

In conformità a quanto descritto nei paragrafi precedenti, la stratigrafia e i parametri geotecnici che forniscono una buona corrispondenza tra monitoraggio e modellazione sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 3.1: Parametri geotecnici caratteristici, definiti sulla base di analisi a ritroso ed adottati per l'aggiornamento delle verifiche geotecniche e strutturali (in parentesi i valori del PE e delle relative varianti)

Litotipo	spessore strato [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c_k'$ [kPa]	$\phi_k'$ [°]	E [MPa]	$E_r$ [MPa]	$\nu$ [-]
Depositi superficiali	5.0	19	0	17	5	15	0.30
Marne argillose (TRVb) superficiali	6.0	19.0 (19.0)	10 (5)	20 (20)	30 (10)	90 (-)	0.35 (0.35)
Marne argillose (TRVb) profonde	-	19.0 (19.0)	20 (10)	22 (22)	45 (20)	135 (-)	0.30 (0.30)

dove:

- $\gamma$  : peso di volume naturale
- $\nu$  : rapporto di Poisson
- E : modulo di deformabilità
- $E_r$  : modulo di deformabilità residuo
- $\phi_k'$  : angolo di resistenza al taglio (valore caratteristico)
- $c_k'$  : coesione efficace (valore caratteristico)

Come individuato, quindi, sul nuovo modello geologico e geomorfologico a cura dell'Università degli studi di Catania, lo scavo della paratia interesserà uno strato superficiale di deposito di origine antropica, spesso fino a 5 m, ed un successivo strato di marne argillose appartenenti all'unità TRVb, suddivise in un primo livello superficiale più alterato costituito da argille e limo argilloso-sabbioso ed uno strato più profondo che presenta delle migliori caratteristiche geotecniche.

Rispetto ai valori del PE e delle relative varianti, le variazioni nei parametri geotecnici delle due sottunità della TRVb sono marginali e dovuti al fatto che le marne argillose, a seguito della ridefinizione del modello stratigrafico, sono ubicati ad una profondità maggiore e quindi meno soggette all'alterazione.

## 4. CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO

Come prescritto dal D.M. 14 gennaio 2008, le azioni sismiche di progetto si definiscono a partire dalla pericolosità sismica di base del sito di costruzione; essa, per il caso in oggetto, è definita in termini di accelerazione orizzontale attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale ed in considerazione di prefissate probabilità di eccedenza  $P_{VR}$  nel periodo di riferimento  $V_R$ .

### 4.1 Tempo di ritorno

Il valore di progetto dell'accelerazione  $a_g$  viene definito in funzione della probabilità di superamento" in un dato "tempo di ritorno". Queste due grandezze sono correlate tra loro secondo la seguente relazione:

$$T_R = -V_R / \ln(1 - P_{VR})$$

Dove:

$T_R$  è il tempo di ritorno,

$V_R$  è il periodo di riferimento dell'opera,

$P_{VR}$  è la probabilità di superamento nel periodo di riferimento.

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$ , per ciascuno degli stati limite considerati, sono riportate nella tabella seguente

Tabella 4.1: probabilità di superamento PVR al variare dello stato limite considerato.

	Stati limite	$P_{VR}$
Stati limite di servizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Per l'opera in oggetto le verifiche in condizioni sismiche saranno condotte principalmente facendo riferimento allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV).

Nella tabella seguente si riportano i valori della probabilità di superamento e del rispettivo tempo di ritorno relativo alla vita utile dell'opera.

Tabella 4.2: probabilità di superamento PVR al variare dello stato limite considerato.

Tipo di opera	$V_N$ (anni)	$C_u$	$V_R$	$P_{VR}$	$T_R$
4	100	2.0	200	10%	1898

## 4.2 Categoria di sottosuolo

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi, come indicato delle NTC-08. In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica, si può fare riferimento ad un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento. La categoria di sottosuolo del sito in esame è la "C"

Tabella 4.3: categoria di sottosuolo di riferimento

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360m/s e 800m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180m/s e 360m/s.
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30m.

## 4.3 Accelerazione massima

I parametri necessari per la determinazione dell'azione sismica di progetto sono calcolati direttamente per il sito in esame (Allegato B del DM 14/01/2008) . Nella tabella seguente si riportano i valori dell'accelerazione massima su suolo roccioso ( $a_g$ ) e dei parametri spettrali ( $F_0$ ,  $T^*c$ ) per lo SLV ed il rispettivo tempo di ritorno relativi al sito in esame.

Tabella 4.4: Accelerazione massima al suolo e parametri spettrali del sito

Stato limite	Località	Opera	Probabilità di superamento	$T_r$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$ (-)	$T^*c$ (sec)
SLV	Caltanissetta	Tipo 4	10%	1898	0.111	2.736	0.538

#### 4.4 Accelerazione massima al suolo e coefficienti sismici

Gli effetti di amplificazione locale dovuti alla stratigrafia ed alla conformazione topografica vengono considerati mediante i parametri  $S_S$  ed  $S_T$ .

La categoria di sottosuolo del sito in esame è la C; pertanto, in considerazione dei parametri  $a_g$  ed  $F_0$ , si ottiene  $S_S=1.50$ .

Per tener conto delle condizioni topografiche si utilizzano i valori del coefficiente topografico  $S_T$ , che per il caso in esame si assume  $S_T=1$  (categoria T1).

L'accelerazione massima orizzontale al sito ( $a_{max}$ ) è dunque calcolata come prodotto dell'accelerazione su suolo roccioso e dei fattori di amplificazione secondo la seguente relazione:

$$a_{max}=a_g \cdot S_T \cdot S_S$$

L'accelerazione massima orizzontale relativa al sito in oggetto, per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) derivante da questo calcolo, è dunque riportata nella successiva:

Tabella 4.5: Accelerazione massima e coefficienti sismici

Stato limite	$a_g$ (g)	$S_S$ (-)	$S_T$ (-)	$a_{max}$ (m/s <sup>2</sup> )
SLV	0.111	1.2	1.2	1.634

Nei modelli di calcolo l'evento sismico è simulato mediante analisi pseudo statiche, nelle quali l'azione sismica è definita mediante un'accelerazione equivalente costante nello spazio e nel tempo. Per le paratie, l'accelerazione  $a_h$  può essere legata all'accelerazione di picco  $a_{max}$  attesa nel volume di terreno significativo per l'opera mediante la relazione:

$$a_h = k_h \cdot g = \alpha \cdot \beta \cdot a_{max}$$

dove:

$\alpha$  è un coefficiente che tiene conto della deformabilità dei terreni interagenti con l'opera. Esso può essere valutato in funzione dell'altezza di scavo della paratia e della categoria di sottosuolo.

Per il caso in esame si assume  $\alpha = 1$ .

$\beta$  è un coefficiente funzione della capacità dell'opera di subire spostamenti senza cadute di resistenza

Si ottiene quindi un coefficiente sismico orizzontale pari a  $k_h=0.048$ .

## 5. CRITERI DI VERIFICA

Nel presente capitolo sono descritti i metodi, le assunzioni di calcolo ed i parametri di progetto adottati per le verifiche geotecniche della paratia.

Le verifiche allo stato limite prevedono un approccio di tipo semiprobabilistico in base alla 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,

$\Psi$ : indica un fattore  $\leq 1.0$  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:

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

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

### 5.1 Azioni e resistenze di progetto

I coefficienti parziali  $\gamma_F$  che si riferiscono alle azioni sono indicati nella tabella seguente.

Tabella 5.1: coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni.

Carichi	Effetto	Coefficiente parziale $\gamma_F(\gamma_E)$	(A1)	(A2)
Permanenti	Favorevole	$\gamma_G$	1.0	1.0
	Sfavorevole		1.3	1.0
Variabili	Favorevole	$\gamma_Q$	0	0
	Sfavorevole		1.5	1.3

Dove risulta impossibile applicare i coefficienti parziali alle azioni (spinta delle terre) gli stessi coefficienti possono essere applicati agli effetti delle azioni (sollecitazioni). In questo caso, in presenza di soli carichi permanenti  $\gamma_F=1.3$ ; mentre in presenza di carichi

permanenti e variabili (o dove non si possa fare distinzione fra i due)  $\gamma_F=1.4$  ( $\gamma_F=1.35$  se è prevalente il carico permanente).

I coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 5.2: coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno.

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale $\gamma_M$	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan\phi_k'$	$\gamma_{\phi'}$	1.0	1.25
Coesione efficace	$c_k'$	$\gamma_{c'}$	1.0	1.25
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1.0	1.4
Peso dell'unità di volume	$\gamma$	$\gamma_\gamma$	1.0	1.0

Con riferimento ai coefficienti parziali definiti in Tabella 5.2, i parametri geotecnici di calcolo per i due approcci considerati risultano i seguenti:

Tabella 5.3: Parametri geotecnici di calcolo

Litotipo	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'$ (M1) [kPa]	$\phi'$ (M1) [°]	E [MPa]	$E_r$ [MPa]	$\nu$ [-]	$c'$ (M2) [kPa]	$\phi'$ (M2) [°]
Depositi superficiali	19.0	0	17	5	15	0.30	0	13.7
Marne argillose superficiali	19.0	10	20	30	90	0.35	8	16.2
Marne argillose profonde	19.0	20	22	45	135	0.30	16	17.9

In conformità a quanto descritto nel capitolo 6.5.3.1.2 del DM 14/01/2008 di seguito si riporta una tabella riepilogativa delle corrispondenti analisi da eseguire per le varie verifiche statiche e geotecniche delle paratie.

Tabella 5.4: Verifiche geotecniche e strutturali delle paratie

INDICE VERIFICA	VERIFICHE GEOETCNICHE /	VERIFICHE DI RESISTENZA / CAPACITA'	ALTRO
SLE		fessurazione e limitazione delle tensioni per i pali	deformata della paratia
SLU/STR (A1+M1+R1)		resistenza strutturale della paratia, resistenza dei tiranti e delle travi di ripartizione (R1=1, vedi tabella 6.5.1)	
SLU/GEO	- Stabilità globale (A2+M2+R2, dove R2=1.1) - infissione (% della mobilitazione della	sfilamento ancoraggi	

Lavori di ammodernamento alla categoria B della S.S. n. 640 secondo le norme del DM 5.11.2001 dell'itinerario Agrigento-Caltanissetta-A19 dal km 44+000 allo svincolo con la A19

Galleria Caltanissetta – Opere di imbocco lato A19

Paratie definitive – Aggiornamento verifiche geotecniche e strutturali a seguito del nuovo contesto stratigrafico e della variazione della configurazione dell'imbocco

INDICE VERIFICA	VERIFICHE GEOETCNICHE /	VERIFICHE DI RESISTENZA / CAPACITA'	ALTRO
	spinta passiva) (A2+M2+R1, dove R1=1.0)		
SISMA (STR)		resistenza strutturale della paratia, resistenza dei tiranti e delle travi di ripartizione (R1=1.0,)	
SISMA (GEO)	- Stabilità globale (A2+M2+R2, dove R2=1.1) - infissione (% della mobilitazione della spinta passiva) (A2+M2+R1, dove R1=1.0)	sfilamento ancoraggi	

## 6. DESCRIZIONE DELL'OPERA

Le opere di presidio previste all'imbocco lato A19 della galleria Caltanissetta, sono costituite da paratie di pali multi ancorate.

Le paratie laterali comprese nel tratto A1-A2-B, sono costituite da pali di diametro  $\varnothing 1000\text{mm}$ , disposti ad interasse 1.25m. L'ancoraggio della paratia è garantito dall'installazione di un numero massimo di 5 ordini di tiranti costituiti da un minimo di 4 a un massimo di 6 trefoli installati contestualmente alla progressione degli scavi.

I pali sono collegati in testa da un cordolo in calcestruzzo armato di sezione 1.3x1m (bxh).

Di seguito si riporta la sviluppata della paratia con l'ubicazione delle quattro sezioni di calcolo.

paratia tratta A1-A2-B

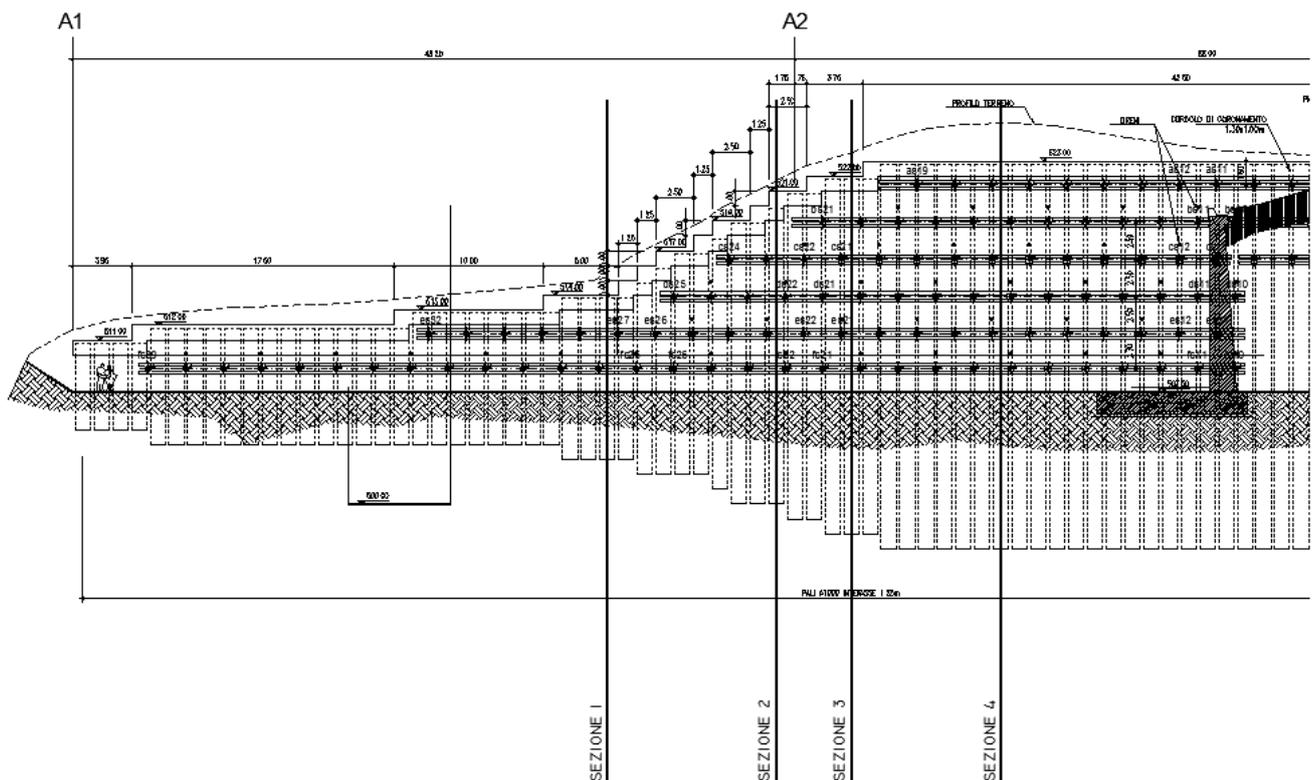


Figura 6.1: Sviluppata della paratia con indicazione delle sezioni di analisi.

## **7. VERIFICA DELLE OPERE**

### **7.1 Metodo di calcolo**

Il metodo di calcolo impiegato è il metodo degli elementi finiti (FEM) implementato tramite il codice commerciale RS2, (Rocscience Inc., ver. 9.030 del 2019). RS2 è un programma agli elementi finiti che consente di svolgere analisi bi-dimensionali (e assialsimmetriche) in campo elasto-plastico per la valutazione dello stato di sforzo e di spostamento al contorno di scavi e opere geotecniche.

Per le verifiche di stabilità globale è stato utilizzato il codice all'equilibrio limite SLIDE (Rocscience, Inc<sup>®</sup>., versione 7.01), che permette di inserire oltre alle caratteristiche topografiche e geotecniche del terreno, anche le strutture di sostegno ed analizzare superfici di scivolamento circolari e non.

#### **7.1.1 Condizioni al contorno**

Il modello numerico è realizzato tramite una maglia d'elementi triangolari i cui confini sono stati collocati ad una distanza dalla sezione della paratia tale da non risentire degli effetti di bordo.

Lo stato tensionale iniziale è stato supposto litostatico con un coefficiente tra pressione orizzontale e verticale pari a  $1 - \sin\phi$ . Lo stato tensionale iniziale è stato riprodotto nel modello tramite la fase 1, applicando un campo di sforzo di tipo gravitazionale.

#### **7.1.2 Legge di comportamento dei materiali**

La legge di comportamento (criterio di rottura di Mohr-Coulomb) degli elementi che simulano il terreno è stata assunta di tipo elasto-plastica ideale.

I pali sono stati simulati tramite elementi di tipo "beam" mentre i tiranti tramite elementi di tipo "tieback" con legge di comportamento di tipo elastico.

#### **7.1.3 Elementi strutturali**

##### **7.1.3.1 Rigidezza equivalente delle paratie in pali**

Nel modello di calcolo i pali verticali sono stati schematizzati con elementi beam aventi rigidezza equivalente.

La rigidezza flessionale ed il modulo resistente caratteristico della paratia di pali prevista dal progetto sono stati valutati riconducendosi ad una sezione equivalente rettangolare larga 1m, in calcestruzzo di classe C25/30.

Con riferimento alla figura seguente si ha:

$$J_{\text{palo}} = \pi \frac{d_p^4}{64} \quad A_{\text{palo}} = \pi \frac{d_p^2}{4}$$

dove:

$J_{\text{palo}}$  = momento d'inerzia del palo in calcestruzzo;

$A_{\text{palo}}$  = area del palo in calcestruzzo;

$d_p$  = diametro esterno del palo.

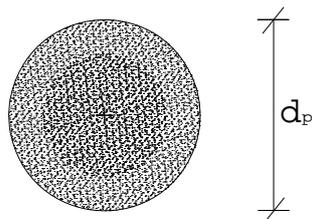


Figura 7.1: schema per la valutazione della rigidezza equivalente delle paratie in pali

La rigidezza equivalente è data da:

$$J_{\text{eq}} = (E_{\text{palo}} \cdot J_{\text{palo}}) / E_c \cdot i$$

dove:

$J_{\text{eq}}$  = momento d'inerzia equivalente di calcolo dei pali per unità di lunghezza, riferito al modulo elastico del calcestruzzo;

$J_{\text{palo}}$  = momento d'inerzia del palo in c.a.;

$E_{\text{palo}}$  = modulo elastico del calcestruzzo dei pali;

$E_c$  = modulo elastico del calcestruzzo di riferimento;

$i$  = interasse tra i pali.

Nota la  $J_{\text{eq}}$  è quindi possibile calcolare lo spessore equivalente della paratia, schematizzata come struttura a sezione rettangolare di larghezza unitaria, secondo la relazione:

$$s = \sqrt[3]{12 \cdot J_{\text{eq}}}$$

dove:

$s$  = spessore equivalente;

$J_{\text{eq}}$  = momento d'inerzia equivalente della paratia per unità di lunghezza.

Nella tabella seguente si riportano i dati di input utilizzati per il calcolo dell'altezza equivalente della paratia.

Tabella 7.1: Dati di input della paratia di pali

Diametro pali, $D_p$ [m]	1.0
Interasse pali, $i$ [m]	1.25
Modulo elastico del calcestruzzo, $E_{\text{mcem}}$ [MPa]	30000
Modulo elastico equivalente, $E_{\text{eq}}$ [MPa]	30000

### **7.1.3.2 Ancoraggi**

Nei modelli di calcolo i tiranti di ancoraggio sono stati schematizzati con elementi *tieback* aventi un'inclinazione  $\alpha$  rispetto all'orizzontale e un diametro equivalente calcolato mediante la seguente relazione:

$$D_{eq} = (4 \cdot n \cdot A / \pi)^{0.5}$$

dove:

A :area del singolo trefolo pari a 139 mm<sup>2</sup>;

n :numero di trefoli;

### **7.1.4 Azioni e carichi agenti**

#### **7.1.4.1 Sovraccarico accidentale**

A tergo della paratia è stato considerato un sovraccarico accidentale pari a 20kPa.

#### **7.1.4.2 Azione sismica**

Per le strutture in oggetto è stata eseguita un'analisi sismica pseudostatica. Il coefficiente sismico orizzontale utilizzato, è pari a:

$$k_h = 0.048$$

#### **7.1.5 Fasi di calcolo**

Le analisi effettuate con il codice RS2 sono state condotte in considerazione delle fasi seguenti:

Fase 1: condizione iniziale

Fase 2: scavo di sbancamento e riprofilatura del terreno fino alla quota del cordolo di testa;

Fase 3: realizzazione dei pali;

Fase 4: scavo di ribasso fino a 0.5m al di sotto della quota della prima fila di tiranti;

Fase 5: installazione della prima fila di tiranti;

Fase 6-n: scavo di ribasso e installazione dei tiranti per le file successive;

Fase n+1: scavo di ribasso sino al piano di fondo;

Fase n+2: carico accidentale pari a 20kPa;

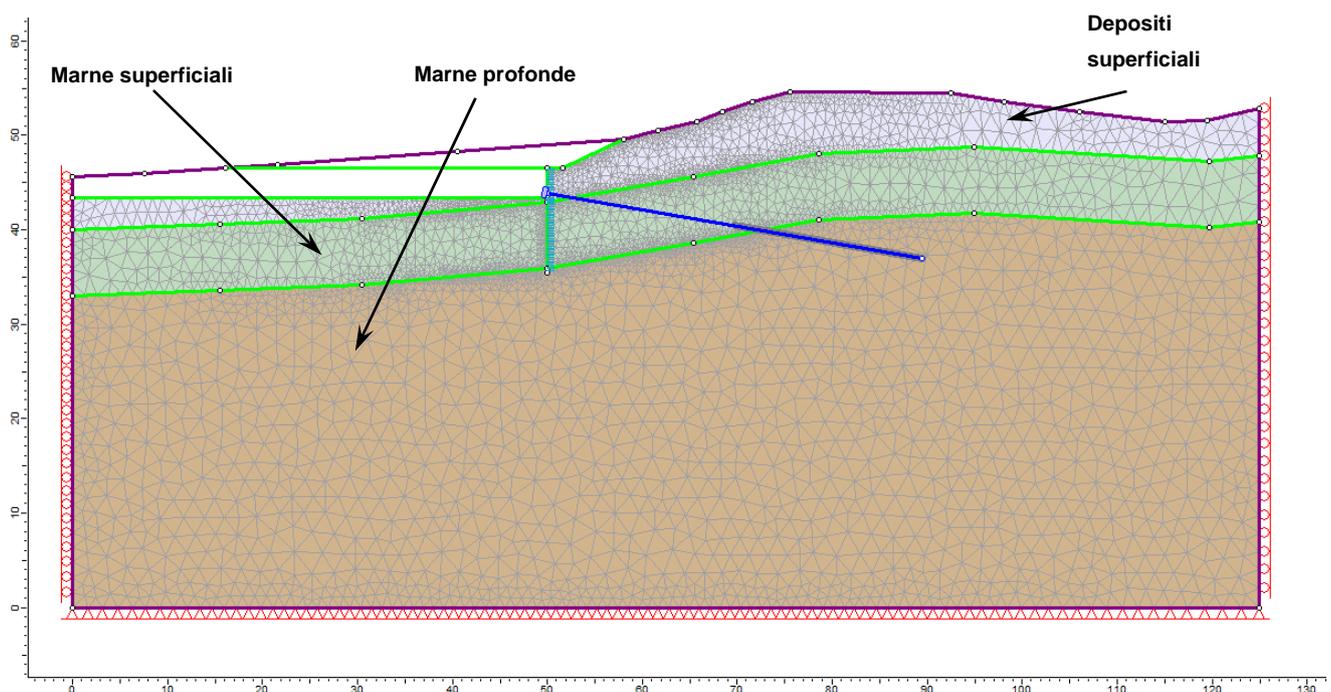
Fase n+3: simulazione condizione sismica (analisi pseudostatica).

## 7.1.6 Modello di calcolo

### 7.1.6.1 Sezione 1

Tabella 7.2: modello di calcolo – Sezione 1.

Unità geotecnica 1	Depositi superficiali	
Parametri geotecnici:	Angolo di resistenza al taglio, $\phi'$	17°
	Coazione, $c'$	0kPa
	Modulo di deformabilità, $E_d$	5MPa
	Modulo di deformabilità residuo $E_r$	15 MPa
	Peso specifico, $\gamma$	19kN/m <sup>3</sup>
Unità geotecnica 2	Marne argillose - strati superficiali (TRVb)	
Parametri geotecnici:	Angolo di resistenza al taglio, $\phi'$	20°
	Coazione, $c'$	10kPa
	Modulo di deformabilità, $E_d$	30MPa
	Modulo di deformabilità residuo $E_r$	90 MPa
	Peso specifico, $\gamma$	19kN/m <sup>3</sup>
Unità geotecnica 3	Marne argillose - strati profonde (TRVb)	
Parametri geotecnici:	Angolo di resistenza al taglio, $\phi'$	22°
	Coazione, $c'$	20kPa
	Modulo di deformabilità, $E_d$	45 MPa
	Modulo di deformabilità residuo $E_r$	135 MPa
	Peso specifico, $\gamma$	19kN/m <sup>3</sup>
Stato tensionale	$\sigma_h/\sigma_v = 1 - \text{sen}\phi'$	

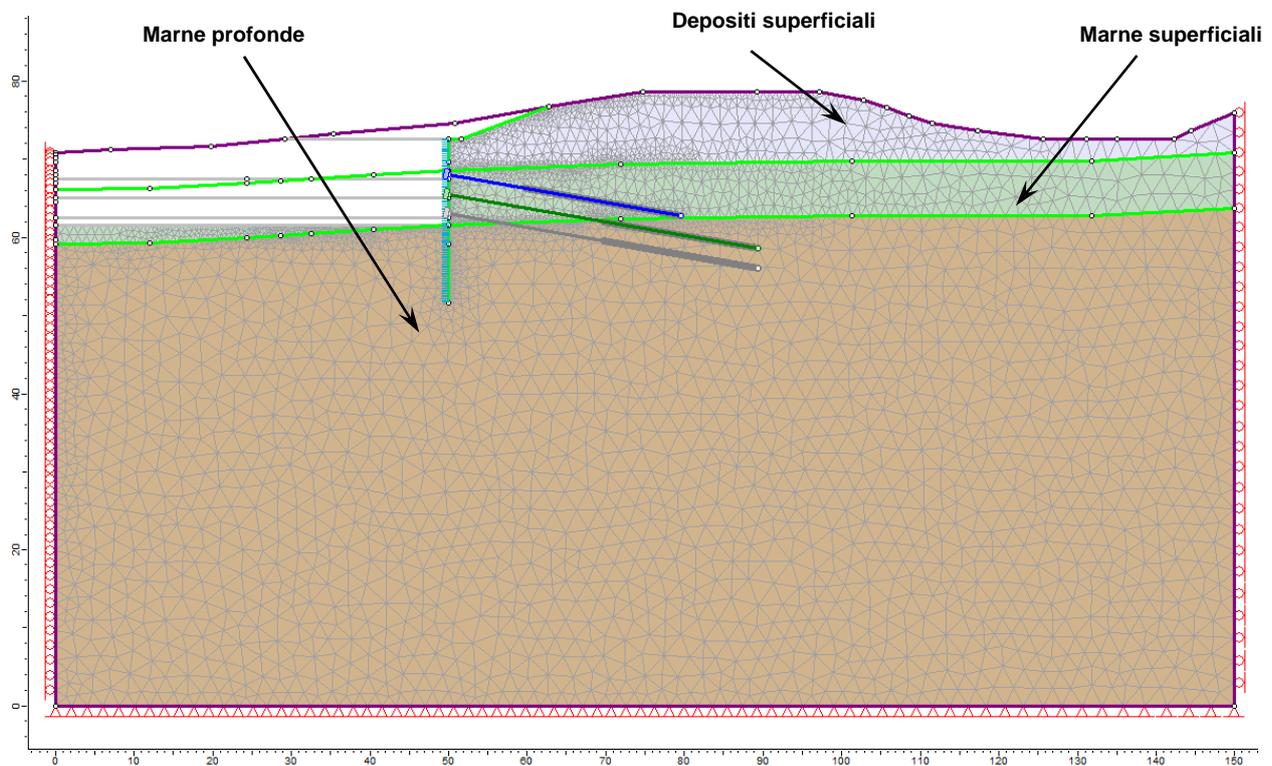


Lavori di ammodernamento alla categoria B della S.S. n. 640 secondo le norme del DM 5.11.2001 dell'itinerario Agrigento-Caltanissetta-A19 dal km 44+000 allo svincolo con la A19  
 Galleria Caltanissetta – Opere di imbocco lato A19  
 Paratie definitive – Aggiornamento verifiche geotecniche e strutturali a seguito del nuovo contesto stratigrafico e della variazione della configurazione dell'imbocco

### 7.1.6.2 Sezione 2

Tabella 7.3: modello di calcolo – Sezione 2.

Unità geotecnica 1	Depositi superficiali	
Parametri geotecnici:	Angolo di resistenza al taglio, $\phi'$	17°
	Coazione, $c'$	0kPa
	Modulo di deformabilità, $E_d$	5MPa
	Modulo di deformabilità residuo $E_r$	15 MPa
	Peso specifico, $\gamma$	19kN/m <sup>3</sup>
Unità geotecnica 2	Marne argillose - strati superficiali (TRVb)	
Parametri geotecnici:	Angolo di resistenza al taglio, $\phi'$	20°
	Coazione, $c'$	10kPa
	Modulo di deformabilità, $E_d$	30MPa
	Modulo di deformabilità residuo $E_r$	90 MPa
	Peso specifico, $\gamma$	19kN/m <sup>3</sup>
Unità geotecnica 3	Marne argillose - strati profonde (TRVb)	
Parametri geotecnici:	Angolo di resistenza al taglio, $\phi'$	22°
	Coazione, $c'$	20kPa
	Modulo di deformabilità, $E_d$	45 MPa
	Modulo di deformabilità residuo $E_r$	135 MPa
	Peso specifico, $\gamma$	19kN/m <sup>3</sup>
Stato tensionale	$\sigma_h/\sigma_v = 1 - \text{sen}\phi'$	



Lavori di ammodernamento alla categoria B della S.S. n. 640 secondo le norme del DM 5.11.2001 dell'itinerario Agrigento-Caltanissetta-A19 dal km 44+000 allo svincolo con la A19

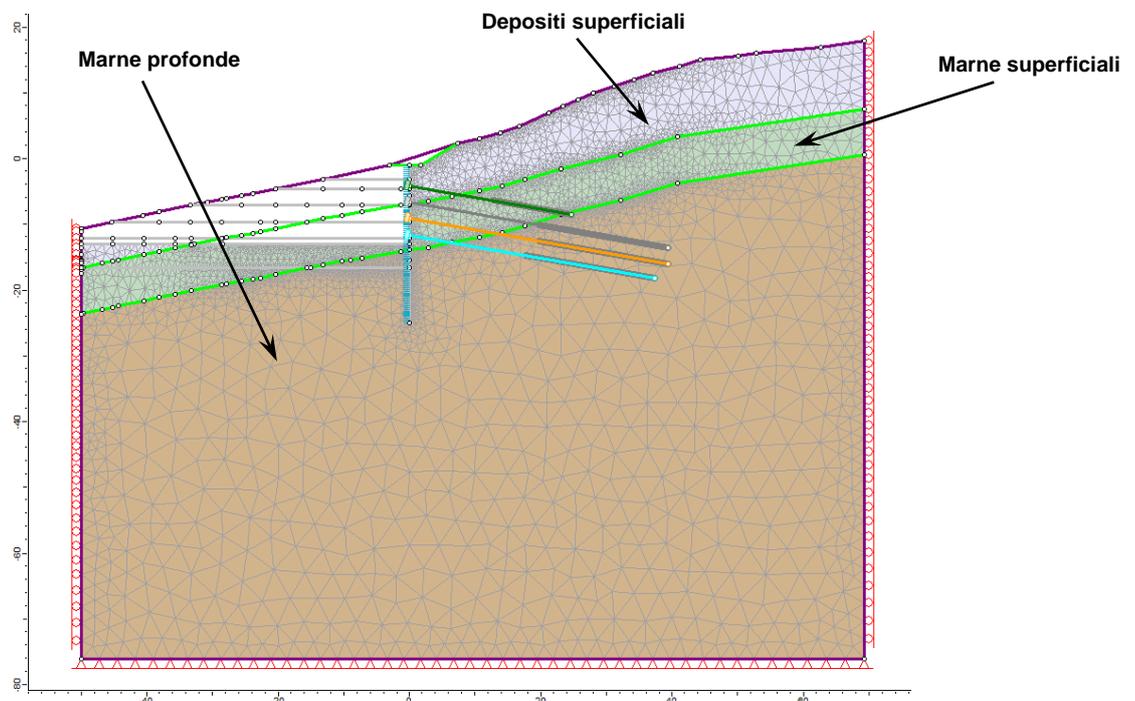
Galleria Caltanissetta – Opere di imbocco lato A19

Paratie definitive – Aggiornamento verifiche geotecniche e strutturali a seguito del nuovo contesto stratigrafico e della variazione della configurazione dell'imbocco

### 7.1.6.3 Sezione 3

Tabella 7.4: modello di calcolo – Sezione 3.

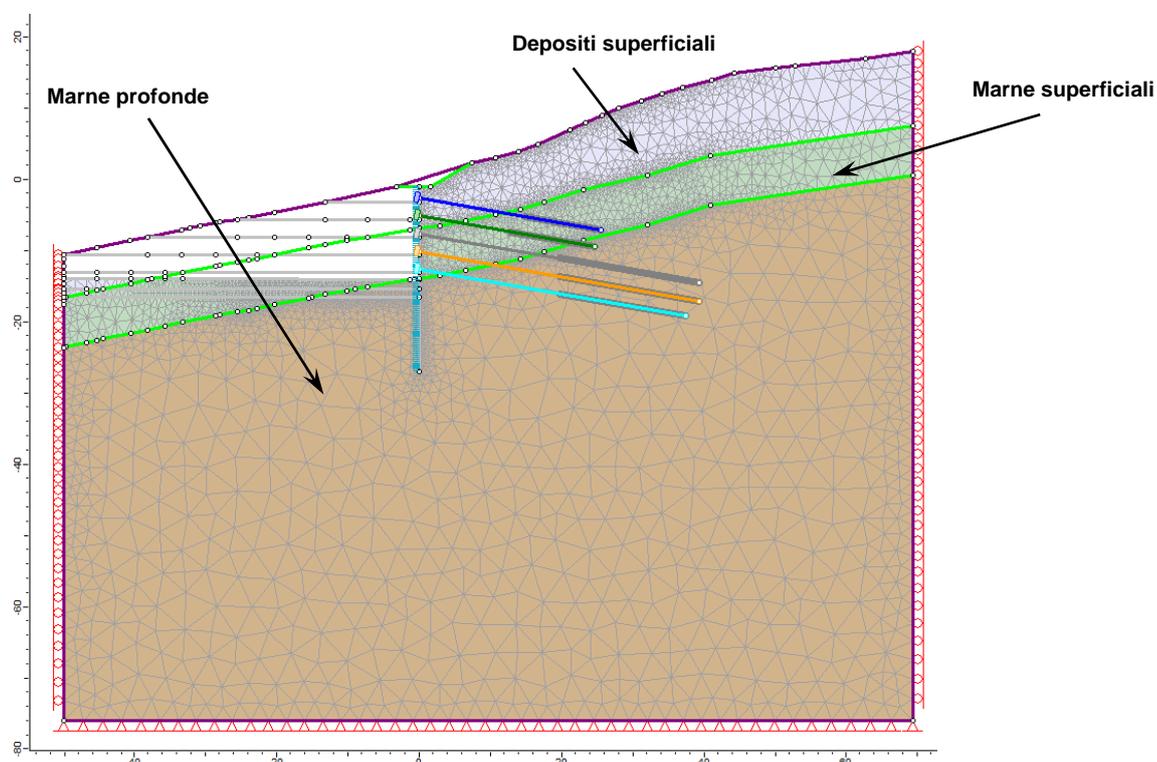
Unità geotecnica 1	Depositi superficiali	
Parametri geotecnici:	Angolo di resistenza al taglio, $\phi'$	17°
	Coazione, $c'$	0kPa
	Modulo di deformabilità, $E_d$	5MPa
	Modulo di deformabilità residuo $E_r$	15 MPa
	Peso specifico, $\gamma$	19kN/m <sup>3</sup>
Unità geotecnica 2	Marne argillose - strati superficiali (TRVb)	
Parametri geotecnici:	Angolo di resistenza al taglio, $\phi'$	20°
	Coazione, $c'$	10kPa
	Modulo di deformabilità, $E_d$	30MPa
	Modulo di deformabilità residuo $E_r$	90 MPa
	Peso specifico, $\gamma$	19kN/m <sup>3</sup>
Unità geotecnica 3	Marne argillose - strati profonde (TRVb)	
Parametri geotecnici:	Angolo di resistenza al taglio, $\phi'$	22°
	Coazione, $c'$	20kPa
	Modulo di deformabilità, $E_d$	45 MPa
	Modulo di deformabilità residuo $E_r$	135 MPa
	Peso specifico, $\gamma$	19kN/m <sup>3</sup>
Stato tensionale	$\sigma_h/\sigma_v = 1-\text{sen}\phi'$	



### 7.1.6.4 Sezione 4

Tabella 7.5: modello di calcolo – Sezione 4.

Unità geotecnica 1	Depositi superficiali	
Parametri geotecnici:	Angolo di resistenza al taglio, $\phi'$	17°
	Coazione, $c'$	0kPa
	Modulo di deformabilità, $E_d$	5MPa
	Modulo di deformabilità residuo $E_r$	15 MPa
	Peso specifico, $\gamma$	19kN/m <sup>3</sup>
Unità geotecnica 2	Marne argillose - strati superficiali (TRVb)	
Parametri geotecnici:	Angolo di resistenza al taglio, $\phi'$	20°
	Coazione, $c'$	10kPa
	Modulo di deformabilità, $E_d$	30MPa
	Modulo di deformabilità residuo $E_r$	90 MPa
	Peso specifico, $\gamma$	19kN/m <sup>3</sup>
Unità geotecnica 3	Marne argillose - strati profonde (TRVb)	
Parametri geotecnici:	Angolo di resistenza al taglio, $\phi'$	22°
	Coazione, $c'$	20kPa
	Modulo di deformabilità, $E_d$	45 MPa
	Modulo di deformabilità residuo $E_r$	135 MPa
Parametri geotecnici:	Peso specifico, $\gamma$	19kN/m <sup>3</sup>
	Stato tensionale	$\sigma_h/\sigma_v = 1 - \text{sen}\phi'$



---

## 7.2 Metodo di analisi per le verifiche geotecniche

Il calcolo tenso-deformativo delle paratie finalizzato alle verifiche geotecniche (infissione paratia) è effettuato tramite un modello che simula l'interazione tra terreno e struttura di sostegno, implementato con il codice di calcolo Paratie (Ce.A.S. s.r.l. Milano). Il codice di calcolo permette di valutare l'evoluzione tensio-deformativa delle varie fasi di realizzazione dell'opera e si basa sulle seguenti ipotesi:

- stato di deformazioni piane (paratia di lunghezza infinita);
- terreno modellato come una serie di molle con legame costitutivo elastico-perfettamente plastico con criterio di rottura Mohr-Coulomb;
- struttura discretizzata in elementi perfettamente elastici;
- ancoraggi modellati per mezzo di molle di opportuna rigidità;
- eventuali sovraccarichi a monte e a valle della paratia trasformati in spinte sul paramento in accordo a quanto previsto dalla teoria di elasticità.

I coefficienti di spinta attiva e passiva,  $k_a$  e  $k_p$  rispettivamente, dipendono dall'angolo di resistenza al taglio, dall'angolo di attrito  $\delta$  fra terreno e struttura nonché dall'inclinazione del terreno a monte e a valle dell'opera. Il programma impiega le formule di Coulomb per il calcolo del  $k_a$  e un algoritmo riportato nell' Eurocodice 7 che fornisce valori paragonabili a quelli di Caquot e Kerisel per il calcolo del  $k_p$ .

Nella valutazione dei coefficienti di spinta attiva e passiva, l'angolo d'attrito considerato tra paratia e terreno è assunto pari a  $0.67\phi'$ . Il codice di calcolo Paratie fornisce la percentuale di spinta passiva mobilitata al fine di effettuare la verifica geotecnica d'infissione delle paratie.

Le analisi effettuate con il codice Paratie sono state condotte in considerazione delle fasi seguenti:

- Fase 1: condizione iniziale
- Fase 2: realizzazione dei pali;
- Fase 3: scavo di ribasso fino a 0.5m al di sotto della quota della prima fila di tiranti;
- Fase 4: installazione della prima fila di tiranti;
- Fase 5-n: scavo di ribasso e installazione dei tiranti per le file successive;
- Fase n+1: condizione sismica

Per le verifiche di stabilità globale, eseguite secondo le indicazioni fornite da normativa, è stato utilizzato il codice all'equilibrio limite SLIDE (Rocscience, Inc<sup>®</sup>., versione 7.01), che permette di inserire oltre alle caratteristiche topografiche e geotecniche del terreno, anche le strutture di sostegno ed analizzare superfici di scivolamento circolari e non.

### **7.3 Verifiche strutturali e geotecniche**

Le verifiche sono state condotte in assenza di falda e sulla base dell'involuppo delle sollecitazioni, secondo il metodo semiprobabilistico allo stato limite ultimo.

#### **7.3.1 Verifica dei pali**

Per i pali in calcestruzzo armato, vengono effettuate le seguenti verifiche:

- in condizioni statiche:
  - 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:  $\sigma_{c \max} = 0.45f_{ck} = 11.25\text{MPa}$
    - acciaio:  $\sigma_{s \max} = 0.8f_{yk} = 360\text{MPa}$
  - verifica a fessurazione;
- in condizioni sismiche:
  - Verifica a S.L.U. per flessione;
  - Verifica a S.L.U. per taglio.

#### **7.3.2 Ancoraggi e travi ripartizione**

##### **7.3.2.1 Verifica di resistenza degli ancoraggi**

Nel caso di ancoraggi in trefoli la tensione normale  $\sigma_s$  deve rispettare la condizione seguente:

$$\sigma_s \leq 0.8 f_{p(1)k}$$

### 7.3.2.2 Resistenza ultima allo sfilamento del bulbo

Per il calcolo della resistenza ultima allo sfilamento del bulbo si ricorre a quanto indicato da Bustamante e Doix (1985, riportati da Tanzini 2004) sulla base di una serie di prove sperimentali. In questo caso la resistenza ultima calcolata ( $R_{ak}$ ) può essere definita sulla base dei grafici forniti dagli autori in relazione alle caratteristiche geotecniche dei materiali interessati e al tipo di iniezione (semplice o multipla):

$$R_{ac} = \pi \times D_b \times L_b \times q_a$$

Dove:

$D_b$  : diametro medio del bulbo:  $D_b = \alpha \times D_p$

$D_p$  : diametro di perforazione,

$L_b$  : lunghezza del bulbo,

$a$  : fattore di sbulbamento,

$q_a$  : aderenza limite bulbo-terreno.

Sulla base di quanto descritto nella normativa ed in assenza di prove dirette (caso a) il calcolo del valore di resistenza caratteristica  $R_{ak}$  deriva dalla seguente espressione:

$$R_{ak} = \min[ R_{ac \text{ medio}} / \xi_{a3} ; R_{ac \text{ min}} / \xi_{a4} ]$$

$R_{ac \text{ medio}}$  e  $R_{a,c \text{ min}}$  sono i valori medio e minimo della resistenza  $R_{ac}$  ottenuta dal calcolo, mentre  $\xi_a$  sono i fattori di correlazione che dipendono dalla conoscenza del modello geotecnico di riferimento, funzione del numero dei profili di indagine eseguiti (vedi tabella seguente).

Tabella 7.6: Fattori di correlazione per derivare la resistenza caratteristica dalle prove geotecniche, in funzione del numero  $n$  di profili di indagine

Numero di profili d'indagine	1	2	3	4	$\geq 5$
$\xi_{a3}$	1.80	1.75	1.70	1.65	1.60
$\xi_{a4}$	1.80	1.70	1.65	1.60	1.55

La resistenza di calcolo,  $R_{a,d}$  viene definita mediante la relazione:

$$R_{ad} = R_{ak} / \gamma_R$$

con  $\gamma_R$  assunto pari a 1 nel caso delle paratie provvisorie e pari a 1.2 nel caso delle paratie permanenti.

Di seguito si riportano i valori caratteristici per l'aderenza limite e il fattore di sbulbamento in funzione della tipologia d'iniezione e del tipo di terreno (Bustamante e Doix).

Tabella 7.7: Valori dell'aderenza limite (1985, riportati da Tanzini 2004)

Descrizione dei terreni-roccie	Valori tipo della resistenza al taglio lungo la superficie laterale al contatto tra la miscela cementizia ed il terreno [kPa]			
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
Limo e argilla (con sabbia) tenera medio plastica	35-70	35-95	50-120	50-145
Limo e argilla (con sabbia) dura, da densa a molto densa	50-120	70-190	95-190	95-190
Sabbia (con limo) fine, da poco a mediamente addensata	70-145	70-190	95-190	95-240

Tipo A – gettati a gravità  
 Tipo B – iniettati a pressione attraverso il rivestimento provvisorio quando viene sollevato  
 Tipo C – iniezione primaria a gravità e iniezione secondaria globale unica in pressione  
 Tipo D – iniezione primaria a gravità e una o più fasi d'iniezione secondaria in pressione "globale" (iniezione ripetuta selettiva)

Tabella 7.8: Valori del fattore di sbulbamento (Tanzini, 2004)

Tipo di terreno	Coefficiente $\alpha$	
	IRS*	IGU**
Sabbia limosa	1.4 - 1.5	1.1 - 1.2
Limo	1.4 - 1.6	1.1 - 1.2
Argilla	1.8 - 2	1.2
Marna	1.8	1.1 - 1.2
Marna calcarea	1.8	1.1 - 1.2

IRS: Iniezione ripetuta selettiva  
 IGU: Iniezione globale unica

I valori scelti per la paratia oggetto di queste verifiche sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 7.9: Valori di progetto per le verifiche allo sfilamento

DESCRIZIONE DEI TERRENI/ROCCIA	PARAMETRO				
	diametro perforazione, $D_p$ [mm]	fattore di sbulbamento, $\alpha$ [-]	Aderenza limite bulbo-terreno, $q_a$ [kPa]	fattore $\xi_{a3}$ [-] *	coefficiente parziale $\gamma_R$ [-]
Riporti	190	1.5	100	1.8	1.2
Marne superficiali	190	1.5	100	1.8	1.2
Marne profonde	190	1.5	110	1.8	1.2

### 7.3.2.3 Resistenza adesione barra-malta cementizia

La tensione limite di ancoraggio,  $R_{ak,c}$  viene valutata con la seguente formula :

$$R_{ak,c} = \pi \times d_{eq} \times f_{bd} \times L_b$$

dove:

$d_{eq}$  : diametro equivalente tirante  
 $L_b$  : Lunghezza bulbo  
 $f_{bd}$  :  $2.25 \times n \times f_{ctk 0.05} / \gamma_c$  (paragrafo 4.1.2.1.1.4)

in cui:

$\gamma_c$  : 1.5  
 $n$  : 1.0 ( $n=1$ , per  $\phi \leq 32\text{mm}$ ;  $n=(132-\phi)/100$  per  $\phi > 32\text{mm}$ )  
 $f_{ctk 0.05}$  :  $0.7 \times 0.30 \times f_{ck}^{2/3}$

Anche su questo valore si applica il coefficiente  $\gamma_R$  per definire la resistenza di calcolo  $R_{ad,c}$ .

### 7.3.2.4 Lunghezza del tratto libero

La lunghezza della tratta libera teorica per ciascuna fila di tiranti è determinata in base ad una superficie di rottura teorica del terreno a tergo della paratia data da un angolo pari a  $45-\phi/2$ , aumentata di  $0.2H$  (dove  $H$  è l'altezza fuori terra della paratia) come riportato nella figura seguente.

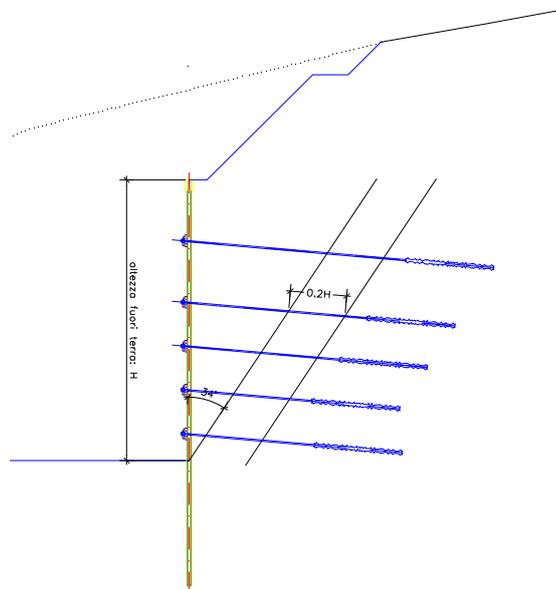


Figura 7.2: Determinazione lunghezza libera

Detta  $L_s$  la lunghezza libera dell'ancoraggio in condizioni statiche, la corrispondente lunghezza libera in condizioni sismiche,  $L_e$  si ottiene mediante la seguente relazione:

$$L_e = L_s \times (1 + 1.5 \times a_{\max} / g)$$

Dove

$a_{\max}$  :l'accelerazione orizzontale massima attesa al sito.

### 7.3.2.5 Travi di ripartizione

La verifica di questo elemento strutturale è eseguita come una trave continua su più appoggi, con luce pari all'interasse dei tiranti, sottoposta ad un carico ripartito. La sezione risulta verificata se vale:

$$M_{Sd} < M_{Rd}$$

dove:

$M_{Sd}$  :momento di calcolo pari a:  $M_{Sd} = T_d \times i / 10$

$T_d$  :tiro nei tiranti (SLU/STR;)

$i$  :interasse orizzontale tra i tiranti

$M_{Rd}$  :momento resistente della sezione  $M_{Rd} = W \times f_{yk} / \gamma_{M,0}$

$W$  :modulo di resistenza della sezione

$f_{yk}$  :tensione caratteristica di snervamento

$\gamma_{M,0}$  :coefficiente di sicurezza (1.05).

## 7.4 Analisi tenso-deformativa della paratia: risultati e verifiche

Nella tabella seguente si riportano le caratteristiche geometriche delle sezioni analizzate.

Tabella 7.10: Caratteristiche geometriche delle sezioni analizzate

Analisi	Altezza fuori terra [m]	Infissione [m]	Numero file di ancoraggi [-]
Sezione 1	4	7	1
Sezione 2	11	10	3
Sezione 3	12	12	4
Sezione 4	13	13	5

### 7.4.1 Stato limite di esercizio (SLE)

Di seguito si riporta la massima deformazione in condizioni statiche per tutte le sezioni di calcolo.

Tabella 7.11: Caratteristiche della sezione analizzata e massime deformazioni

Analisi	Pali [mm]	Interasse pali [m]	Altezza fuori terra [m]	Massima deformazione [cm] in condizioni statiche
Sezione 1	Ø1000	1.25	4	5.2
Sezione 2	Ø1000	1.25	11	8.7
Sezione 3	Ø1000	1.25	12	11.3
Sezione 4	Ø1000	1.25	13	16.6

### 7.4.2 Stato limite ultimo per le strutture (STR)

Di seguito si riportano le verifiche strutturali della paratia e dei tiranti per la peggiore tra lo stato limite ultimo in condizioni statiche e quello in condizioni sismiche. Oltre alle verifiche strutturali dei pali e di resistenza dei tiranti, nelle tabelle seguenti si riportano anche le verifiche delle travi di ripartizione.

#### 7.4.2.1 Verifiche dei pali

Nelle tabelle seguenti si riportano le verifiche agli SLU e SLE per i pali armati con barre in acciaio.

Tabella 7.12: tipologie di armature previste per i pali

Analisi di riferimento	Armatura flettente	Armatura a taglio	Tipologia di palo
Sezione 1	24Ø24	spirale Ø12/25	Permanente
Sezione 2	24Ø24	spirale Ø12/25	Permanente
Sezione 3	24Ø24	spirale Ø12/25	Permanente
Sezione 4	24Ø24	spirale Ø12/25	Permanente

Tabella 7.13: SLU/STR - Valori delle sollecitazioni massime e verifiche strutturali allo SLU per flessione dei pali

Analisi	Fase	M <sub>k</sub> [kNm/m]	M <sub>d</sub> [kNm/palo]	A <sub>s</sub> [-]	M <sub>rd</sub> [kNm]	FS
Sezione 1	scavo	100.2	169.1	24Ø24	1494.7	>5
	sisma	130	162.5		1494.7	>5
Sezione 2	scavo	476.7	804.4	24Ø24	1494.7	1.85
	sisma	566.2	707.8		1494.7	2.1
Sezione 3	scavo	520	877.5	24Ø24	1494.7	1.7
	sisma	726	907.5		1494.7	1.65
Sezione 4	scavo	521.5	880	24Ø24	1494.7	1.7
	sisma	669.2	836.5		1494.7	1.8

dove:

M<sub>k</sub> = momento sollecitante caratteristico;

A<sub>s</sub> = armatura;

M<sub>rd</sub> = momento resistente ultimo;

Tabella 7.14: SLE/STR - Valori delle sollecitazioni massime e verifiche strutturali allo SLE per flessione dei pali

Analisi	Fase	$N_k$ [kN/m]	$M_k$ [kNm/m]	$N_d$ [kN/palo]	$M_d$ [kNm/palo]	$\sigma_C$ max [MPa]	$\sigma_S$ max [MPa]	w [mm]
Sezione 1	scavo	61.9	100.2	77.4	125.3	1.7	-37.7	0
Sezione 2	scavo	405	476.7	506.3	595.9	8.0	-165.8	0.294
Sezione 3	scavo	570.1	520	712.6	650	8.7	-165.5	0.293
Sezione 4	scavo	646.7	521.5	808.4	651.9	8.7	-157.3	0.295

dove:

$\sigma_C$  max = tensione massima nel calcestruzzo (+ compressione);

$\sigma_S$  max = tensione massima nell'acciaio (- trazione);

w = apertura delle fessure;

Le verifiche allo SLE dei pali per flessione risultano soddisfatte in quanto le tensioni che si sviluppano sono inferiori ai limiti imposti dalla Normativa. La verifica a fessurazione si considera soddisfatta poiché il valore di apertura delle fessure è minore di quello richiesto da normativa  $w_2 = 0.3$  mm.

Tabella 7.15: SLU/STR - Valori delle sollecitazioni massime e verifiche strutturali allo SLU per taglio dei pali

Analisi	Fase	$T_k$ [kN/m]	$T_d$ [kN/palo]	$A_{sw}$ [-]	$V_{Rsd}$ [kN]	$V_{Rcd}$ [kN]
Sezione 1	scavo	88	148.5	spirale	1661	682
	sisma	109	136.3	Ø12/25	1661	682
Sezione 2	scavo	165.6	279.5	spirale	1661	682
	sisma	158	197.5	Ø12/25	1661	682
Sezione 3	scavo	196	330.8	spirale	1661	682
	sisma	239	298.8	Ø12/25	1661	682
Sezione 4	scavo	205	345.9	spirale	1661	682
	sisma	206	257.5	Ø12/25	1661	682

Come si osserva il taglio resistente (valore minimo tra  $V_{Rsd}$  e  $V_{Rcd}$ ) risulta maggiore del taglio agente ( $T_d$ ).

### 7.4.2.2 Verifiche degli ancoraggi

Di seguito si riportano le verifiche strutturali degli ancoraggi.

Tabella 7.16: SLU/STR - Valori delle azioni massime negli ancoraggi

Analisi	Fila tiranti	Interasse [m]	N° trefoli	Inclinazione [°]	Pretensione [kN]	$N_{anc}$ [kN/m]	$N_{anc} \times \gamma_F$ [kN]	$\sigma_N$ [MPa]	$0.8 f_{p(1)k}$ [MPa]
Sezione 1	FILA 1	2.5	4	10	400	400	520	935	1272
	FILA 1	2.5	4	10	300	451.8	587	1056	1272
Sezione 2	FILA 2	2.5	4	10	300	336.5	437	787	1272
	FILA 3	2.5	5	10	500	508	660	950	1272
Sezione 3	FILA 1	2.5	4	10	400	480	480	863	1272
	FILA 2	2.5	4	10	400	670	871	1253	1272
	FILA 3	2.5	5	10	600	653.6	850	1223	1272
	FILA 4	2.5	5	10	600	616.9	802	962	1272
Sezione 4	FILA 1	2.5	4	10	400	429	429	704	1272
	FILA 2	2.5	4	10	400	321	321	484	1272
	FILA 3	2.5	5	10	600	670	871	1253	1272
	FILA 4	2.5	5	10	600	646	840	1208	1272
	FILA 5	2.5	6	10	600	615.1	800	959	1272

dove:

$N_{anc}$  sforzo assiale per metro nell'ancoraggio

$\sigma_N$  tensione assiale agente nell'armatura dell'ancoraggio

Come è possibile osservare dalla tabella precedente, i valori sono inferiori alla tensione limite pari a 1272MPa.

### 7.4.2.3 Verifiche della trave di ripartizione

Di seguito si riportano le verifiche per le travi di ripartizione.

Tabella 7.17: SLU/STR - sollecitazioni massime nelle travi di ripartizione

Analisi	Fila di tiranti	Travi di ripartizione	Interasse [m]	$N_{anc} \times \gamma_F$ [kN]	$M_x$ [kNm]	$M_y$ [kNm]	$T_x$ [kN]	$T_y$ [kN]	$\sigma_{ideale}$ [MPa]	$f_{yk} / \gamma_{MO}$
Sezione 1	FILA 1	HEB180	2.5	520	128	22.6	206.9	36.5	195	338
	FILA 1	HEB180	2.5	587	144.5	25.5	233.5	41.2	220	338
Sezione 2	FILA 2	HEB180	2.5	437	107.6	18.9	173.9	30.7	164	338
	FILA 3	HEB180	2.5	660	162.5	28.7	262.6	46.3	247.6	338

Lavori di ammodernamento alla categoria B della S.S. n. 640 secondo le norme del DM 5.11.2001 dell'itinerario Agrigento-Caltanissetta-A19 dal km 44+000 allo svincolo con la A19

Galleria Caltanissetta – Opere di imbocco lato A19

Paratie definitive – Aggiornamento verifiche geotecniche e strutturali a seguito del nuovo contesto stratigrafico e della variazione della configurazione dell'imbocco

Sezione 3	FILA 1	HEB180	2.5	480	118.2	20.8	190.9	33.7	180	338
	FILA 2	HEB200	2.5	871	214.4	37.8	346.5	61.1	256	338
	FILA 3	HEB200	2.5	850	209.3	36.9	338.2	59.6	250	338
	FILA 4	HEB200	2.5	802	197.5	34.8	319.1	56.3	236	338
Sezione 4	FILA 1	HEB180	2.5	429	105.6	18.6	170.7	30.1	161	338
	FILA 2	HEB180	2.5	321	79.1	13.9	127.7	22.5	120	338
	FILA 3	HEB200	2.5	871	214.4	37.8	346.5	61.1	256	338
	FILA 4	HEB200	2.5	840	206.8	36.5	334.2	58.9	247	338
	FILA 5	HEB200	2.2	800	196.9	34.7	318.3	56.1	235	338

Dove:

$M_x$  e  $M_y$  momenti flettenti di calcolo agenti intorno agli assi della trave

$T_x$  sforzo di taglio agente in direzione parallela all'anima delle travi

Come è possibile osservare dalla tabella precedente, le tensioni ideali sono inferiori alla tensione di snervamento di calcolo.

### 7.4.3 Stato limite ultimo di tipo geotecnico (GEO)

Nella tabella seguente si riportano i risultati in termini di percentuale massima di spinta passiva mobilitata e dei fattori di stabilità globale in presenza del sisma (metodo di Bishop semplificato).

Tabella 7.18: SLU/GEO – Verifiche geotecniche

SEZIONE	Percentuale di spinta passiva mobilitata [%]	Stabilità globale:
Sezione 1	60	-
Sezione 2	94	-
Sezione 3	93	1.2
Sezione 4	95	1.2

Per le sezioni di calcolo 1 e 2 non sono state riscontrate superfici di scivolamento.

Lavori di ammodernamento alla categoria B della S.S. n. 640 secondo le norme del DM 5.11.2001 dell'itinerario Agrigento-Caltanissetta-A19 dal km 44+000 allo svincolo con la A19  
Galleria Caltanissetta – Opere di imbocco lato A19  
Paratie definitive – Aggiornamento verifiche geotecniche e strutturali a seguito del nuovo contesto stratigrafico e della variazione della configurazione dell'imbocco

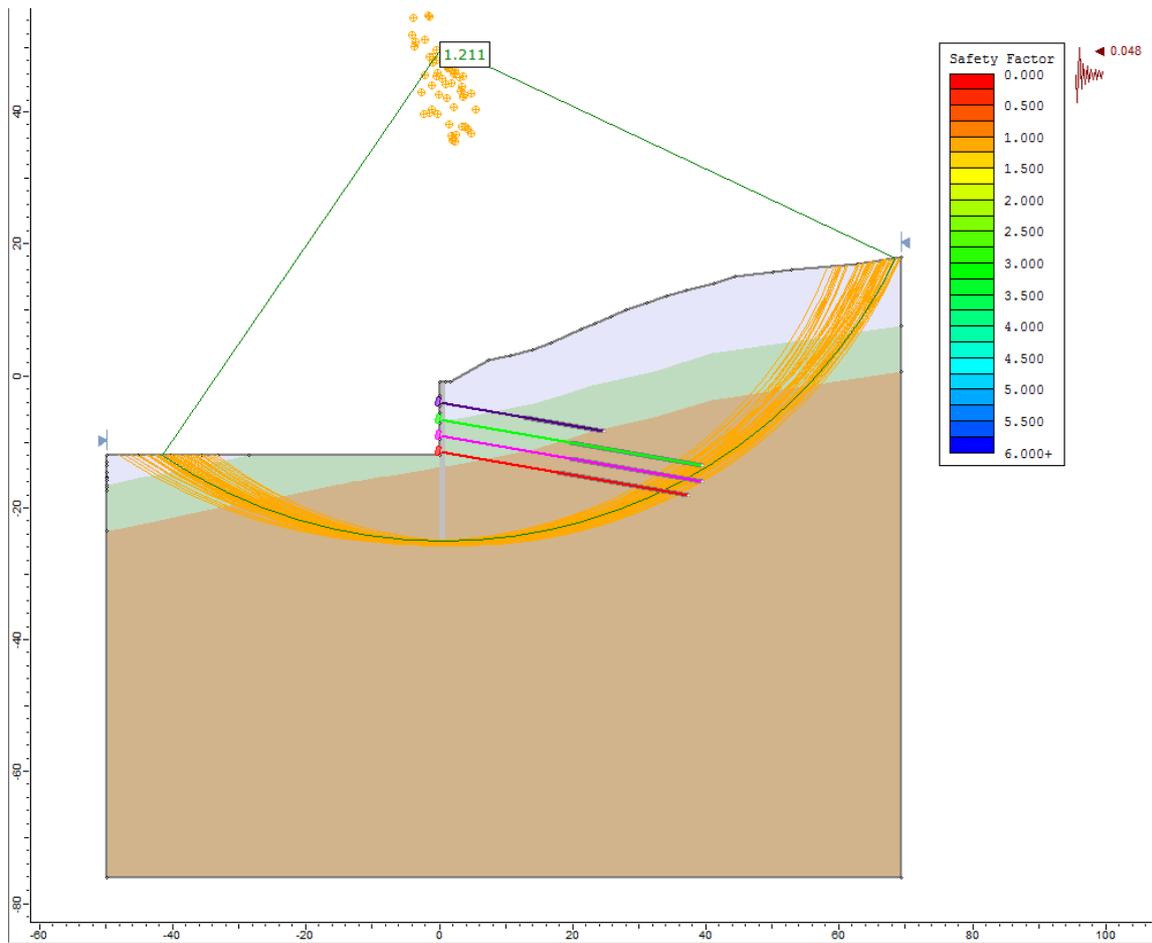


Figura 7.3: SLU/GEO - Verifiche di stabilità globale - Sezione 3

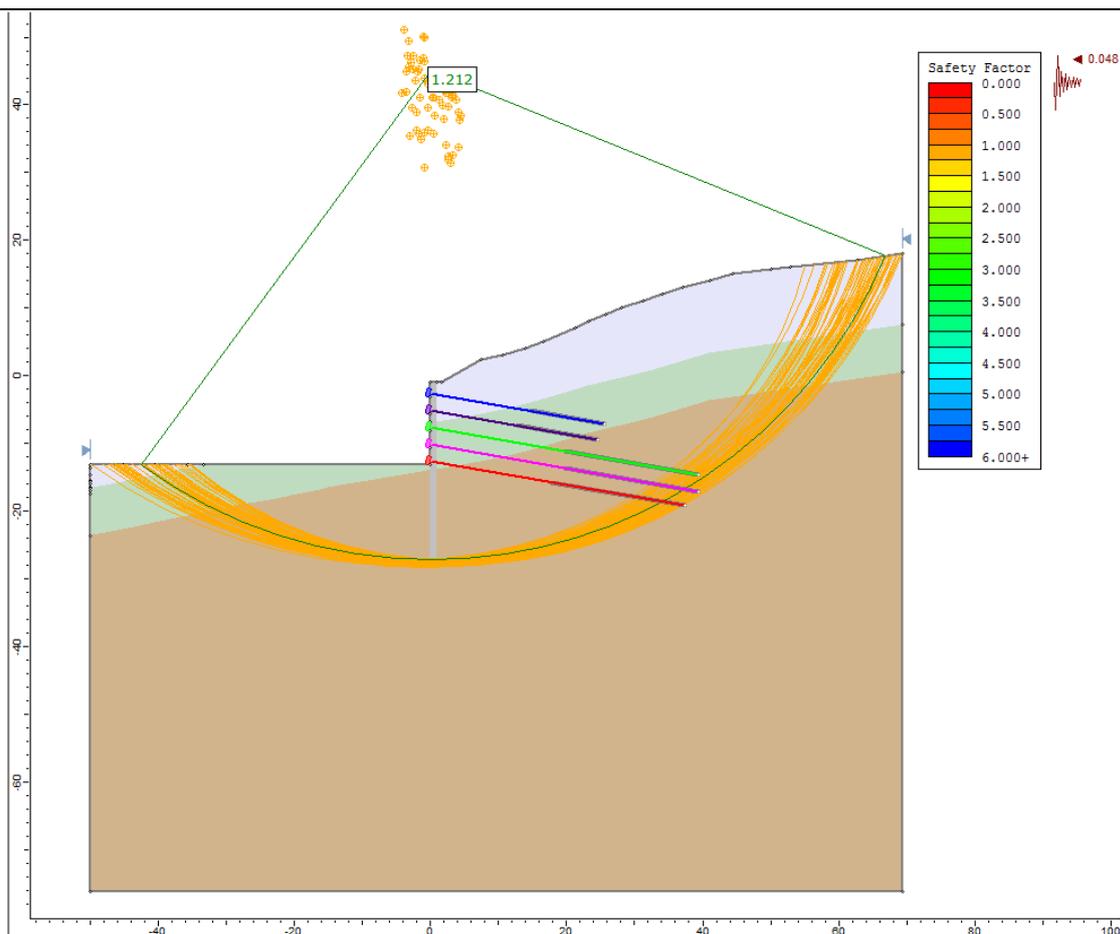


Figura 7.4: SLU/GEO - Verifiche di stabilità globale - Sezione 4

Nelle tabelle seguenti si riportano le verifiche geotecniche dei tiranti in termini di resistenza allo sfilamento e lunghezza libera.

Tabella 7.19: SLU/GEO – Verifica dei tiranti allo sfilamento

Analisi	Fila di tiranti	$N_{anc} \times \gamma_F$ [kN]	Lunghezza bulbo $L_b$ [m]	$R_{ad}$ [kN] (aderenza terreno-bulbo)	$R_{ad,c}$ [kN] (aderenza malta-acciaio)	T tirante $\leq$ [ $R_{ad}$ , $R_{ad,c}$ ]
Sezione 1	Fila 1	520	20	829	2311	verificato
	Fila 1	587	20	829	2311	verificato
Sezione 2	Fila 2	437	20	829	2311	verificato
	Fila 3	660	20	829	2311	verificato
Sezione 3	Fila 1	480	12	497.5	1386.7	verificato
	Fila 2	871	20	911.9	2584	verificato
	Fila 3	850	20	911.9	2584	verificato
	Fila 4	802	18	820.7	2548	verificato

Lavori di ammodernamento alla categoria B della S.S. n. 640 secondo le norme del DM 5.11.2001 dell'itinerario Agrigento-Caltanissetta-A19 dal km 44+000 allo svincolo con la A19

Galleria Caltanissetta – Opere di imbocco lato A19

Paratie definitive – Aggiornamento verifiche geotecniche e strutturali a seguito del nuovo contesto stratigrafico e della variazione della configurazione dell'imbocco

Analisi	Fila di tiranti	$N_{anc} \times \gamma_F$ [kN]	Lunghezza bulbo $L_b$ [m]	$R_{ad}$ [kN] (aderenza terreno-bulbo)	$R_{ad,c}$ [kN] (aderenza malta-acciaio)	T tirante $\leq$ [ $R_{ad}$ , $R_{ad,c}$ ]
Sezione 4	Fila 1	429	11	456	1271	verificato
	Fila 2	321	12	497.5	1387	verificato
	Fila 3	871	20	912	2584	verificato
	Fila 4	840	20	912	2584	verificato
	Fila 5	800	18	820.7	2548	verificato

Tabella 7.20: SLU/GEO – Verifica della lunghezza libera

Analisi	Fila di tiranti	Lunghezza libera (statica) $L_s$ [m]	Lunghezza libera (sisma) $L_e$ [m]	Lunghezza libera effettiva $L$ [m]	Verifica
Sezione 1	Fila 1	1.7	2.2	20	verificato
Sezione 2	Fila 1	6.5	8.1	10	verificato
	Fila 2	4.8	6.0	20	verificato
	Fila 3	3.1	3.9	20	verificato
Sezione 3	Fila 1	8.3	10.4	13	verificato
	Fila 2	6.7	8.3	20	verificato
	Fila 3	5	6.2	20	verificato
	Fila 4	3.3	4.2	18	verificato
Sezione 4	Fila 1	10.2	12.7	15	verificato
	Fila 2	8.5	10.6	13	verificato
	Fila 3	6.9	8.6	20	verificato
	Fila 4	5.2	6.5	20	verificato
	Fila 5	3.5	4.4	18	verificato

## **8. CONCLUSIONI**

Questa nota di calcolo fornisce l'aggiornamento delle verifiche geotecniche e statiche delle paratie di tipo permanente, ubicate sul lato Est dell'imbocco in direzione A19 della galleria Caltanissetta. Rispetto alle analisi eseguite nella fase del PE l'aggiornamento consiste in:

- Adozione del nuovo modello stratigrafico così come definito dall'università di Catania (2016) dove nei primi 5m è stato individuato uno strato di depositi di origine antropica;
- La definizione dei parametri geotecnici a partire da analisi a ritroso dei dati di monitoraggio topografico;
- Le effettive caratteristiche dei tiranti installati e la quota fondo scavo, più alta di 2.5m rispetto alla quota del PE.

Le analisi dimostrano che la paratia definitiva rispetta i requisiti normativi. Tutte le verifiche (geotecniche e statiche) sono soddisfatte.