

COMMITTENTE:



DIREZIONE INVESTIMENTI
DIREZIONE PROGRAMMI INVESTIMENTI
DIRETTRICE SUD - PROGETTO ADRIATICA

PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA
S.O. COORDINAMENTO TERRITORIALE SUD.

PROGETTO ESECUTIVO

RIASSETTO NODO DI BARI

TRATTA A SUD DI BARI: VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI C.LE E BARI TORRE A MARE

Opere oggetto di prescrizione della Delibera CIPE n. 1 del 28 gennaio 2015

Sottovia carrabile e ciclopedonale S. Anna

SCAVI E OPERE PROVVISORIALI

RELAZIONE DI CALCOLO SCAVI PROVVISORI

SCALA:

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

I A 1 U 0 4 E 7 8 C L N V 0 1 0 0 4 1 2 A

| Rev. | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato Data |
|------|---------------------|---------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|
| A | EMISSIONE ESECUTIVA | INTEGRA | GIUGNO 2021 | G. FICORELLA | GIUGNO 2021 | G. DIMAGGIO | GIUGNO 2021 | D. TIBERTI GIUGNO 2021 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

ITALFERR S.p.A.
Gruppo Ferrovie dello Stato
Direzione Investimenti
UO Infrastrutture Sud
Dott. Ing. Dante Tiberti
Ordine degli Ingegneri Prov. di Napoli n. 10876

File:IA1U04E78CLNV0100412A.DOC

n. Elab.:

INDICE

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUZIONE | 3 |
| 2 | NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO | 4 |
| 2.1 | NORMATIVE, RACCOMANDAZIONI, LINEE GUIDA | 4 |
| 2.2 | DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO | 4 |
| 3 | CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA GENERALE | 5 |
| 3.1 | SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO | 5 |
| 3.2 | FALDA | 6 |
| 4 | DESCRIZIONE DELLE SCELTE PROGETTUALI | 7 |
| 5 | ANALISI DI STABILITÀ | 8 |
| 5.1 | SEZIONI DI CALCOLO | 8 |
| 5.2 | SEZIONE AL KM 0+180..... | 8 |
| 5.2.1 | <i>Metodologia di calcolo.....</i> | 8 |
| 5.2.2 | <i>Parametri geotecnici di calcolo</i> | 10 |
| 5.2.3 | <i>Fasi di calcolo.....</i> | 10 |
| 5.2.4 | <i>Risultati</i> | 13 |
| 5.3 | SEZIONE AL KM 0+070..... | 15 |
| 5.3.1 | <i>Metodologia di calcolo.....</i> | 15 |
| 5.3.2 | <i>Parametri geotecnici di calcolo</i> | 15 |
| 5.3.3 | <i>Risultati</i> | 16 |

1 INTRODUZIONE

Nella presente relazione si riportano i dimensionamenti e le verifiche geotecniche delle scarpate di scavo provvisionali per la realizzazione del sottovia denominato S. Anna, relativo alla variante di tracciato tra Bari Centrale e Bari Torre a Mare (opera prescritta dalla Delibera CIPE del 28 gennaio 2015).

Lungo lo sviluppo dell'opera, in relazione alla tipologia di terreno, si prevedono sostanzialmente due sezioni tipo per gli scavi provvisionali:

- scarpate di scavo con pendenza 1 (verticale) / 1 (orizzontale) per altezze di scavo inferiore ai 6 m da inizio tracciato fino alla sezione 5 circa e dalla progressiva 0+290 circa (tra la sezione 15 e 16) fino a fine tracciato;
- scarpate di scavo a pendenza 3 (verticale) / 2 (orizzontale) a partire da fondo scavo per altezza di 6 m di scavo poi banca di larghezza pari ad 1 m e poi scavo con pendenza 1 (verticale) / 1 (orizzontale) per il tratto in prossimità del p.c.; tale profilo di scavo si prevede circa dalla sezione 6 alla progressiva 0+290 circa.

Nelle seguenti figure si sintetizzano le due sezioni tipologiche previste per gli scavi provvisionali.

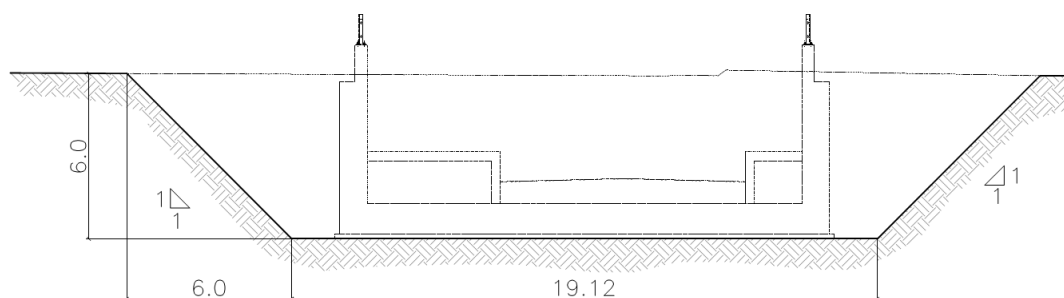


Figura 1 – Sezione Hscavo < 6 m - pendenza 1 (verticale) / 1 (orizzontale)

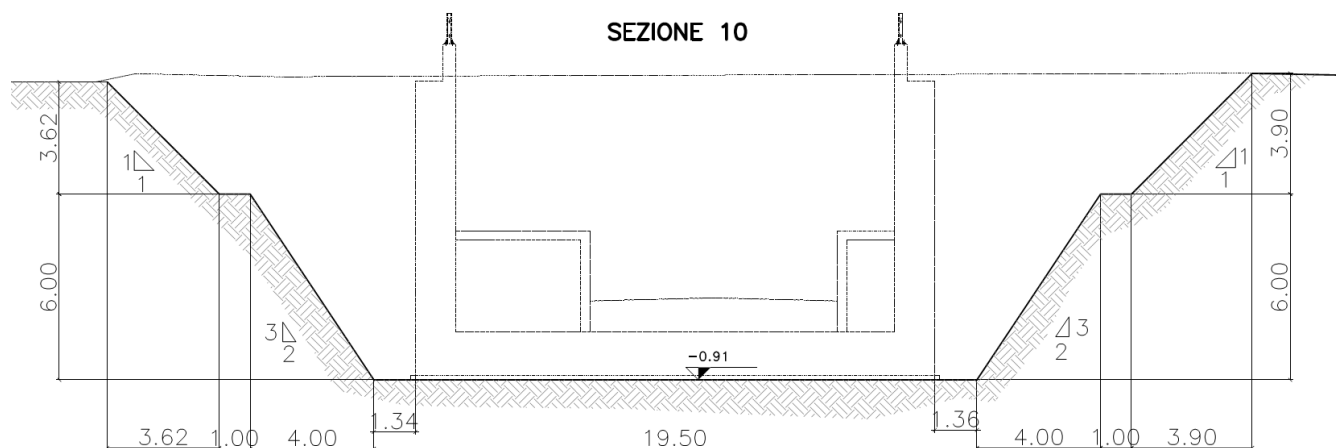


Figura 2 – Sezione Hscavo > 6 m - pendenza 3 (verticale) / 2 (orizzontale) + banca 1m +- pendenza 1 (verticale) / 1 (orizzontale)



RIASSETTO NODO DI BARI
PROGETTO ESECUTIVO TRATTA A SUD DI BARI
VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI C.LE E BARI TORRE A MARE

RELAZIONE DI CALCOLO SCAVI PROVVISORI

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|--------------|------|---------|
| IA1U | 04 | E 78 CL | NV 01 00 412 | A | 4 di 16 |

2 **NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

2.1 **Normative, raccomandazioni, linee guida**

- [N.1]. Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 14-01-08 (NTC-2008);
- [N.2]. DM 6/5/2008 – Integrazione al D.M. 14-01-2008 di approvazione delle nuove Norme tecniche per le costruzioni.
- [N.3]. Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 - Istruzioni per l'Applicazione Nuove Norme Tecniche Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008;
- [N.4]. Legge 05/11/1971 n.1086e Circ. 11951 del 14/02/1974. Norme per la disciplina delle opere in c.a., c.a.p. ed a struttura metallica e relative istruzioni.
- [N.5]. Legge 21/03/1974 n.64 Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche.
- [N.6]. Specifica RFI del 21/12/11 per la progettazione geotecnica delle opere civili ferroviarie.

2.2 **Documentazione di riferimento**

- [D1]. 2015 IA1T 03 D 69 RG GE0001 301 A – Tratta a sud di bari: variante di tracciato tra Bari centrale e Bari torre a mare. Opere oggetto di prescrizione della Delibera CIPE n. 1 del 28 gennaio. Progetto Definitivo. *Relazione geologica ed idrogeologica.*
- [D2]. IA4Y 00 D 78 GE GE0000 401 A – Tratta a sud di bari: variante di tracciato tra Bari centrale e Bari torre a mare Opere oggetto di prescrizione della Delibera CIPE n. 1 del 28 gennaio. Progetto Esecutivo – Sottovia carrabile e ciclopedonale Sant'Anna. Geotecnica – *Relazione geotecnica.*
- [D3]. IA4Y 00 D 78 F7 GE0000 401 A – Tratta a sud di bari: variante di tracciato tra Bari centrale e Bari torre a mare Opere oggetto di prescrizione della Delibera CIPE n. 1 del 28 gennaio. Progetto Esecutivo – Sottovia carrabile e ciclopedonale Sant'Anna. Geotecnica – *Profilo geotecnico.*
- [D4]. IA1U 04 E 78 CL NV0100 411 A - Tratta a sud di bari: variante di tracciato tra Bari centrale e Bari torre a mare Opere oggetto di prescrizione della Delibera CIPE n. 1 del 28 gennaio. – Sottovia carrabile e ciclopedonale S. Anna. Scavi e opere provvisionali – *Relazione di calcolo paratie 1 di 2.*
- [D5]. IA1U 04 E 78 CL NV0100 412 A - Tratta a sud di bari: variante di tracciato tra Bari centrale e Bari torre a mare Opere oggetto di prescrizione della Delibera CIPE n. 1 del 28 gennaio. – Sottovia carrabile e ciclopedonale S. Anna. Scavi e opere provvisionali – *Relazione di calcolo paratie 2 di 2.*

3 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA GENERALE

Lungo il tracciato sono state intercettate le seguenti unità geotecniche:

- **Unità TV – Terreno vegetale:** si tratta di terreno di colore marrone scuro presente fino a circa 60÷70 cm dal p.c., costituito da sabbia con resti vegetali e sparsi litici calcarei angolosi.
- **Unità S – Sabbia:** si tratta di terreno sabbioso, sabbioso limoso, con ciottoli calcarei e/o calcarenitici.
- **Unità CBA - Calcari di Bari:** si tratta di calcari dolomitici bianchi o grigio chiari. L'ammasso si presenta da fratturato a molto fratturato, duro, e caratterizzato talvolta dalla presenza di cavità generate da dissoluzione carsica, quasi sempre riempite da materiale residuale di colore rossastro, a granulometria limo – sabbiosa. All'interno di tale unità si intercetta una fascia di alterazione denominata **CBAalt**.

3.1 Sintesi dei parametri geotecnici di progetto

Nel seguito si sintetizzano i valori dei parametri geotecnici di progetto per le unità geotecniche intercettate.

Unità TV – Terreno vegetale

| | |
|---------------------------------------|---|
| $\gamma = 18\div 20.0 \text{ kN/m}^3$ | peso di volume naturale |
| $\varphi' = 30\div 33^\circ$ | angolo di resistenza al taglio |
| $c' = 0 \text{ kPa}$ | coesione drenata |
| $E_o = 50\div 200 \text{ MPa}$ | modulo di deformazione elastico iniziale (a piccole deformazioni) |

Unità S - Sabbia

| | |
|---------------------------------|---|
| $\gamma = 20.0 \text{ kN/m}^3$ | peso di volume naturale |
| $\varphi' = 35^\circ$ | angolo di resistenza al taglio |
| $c' = 0 \text{ kPa}$ | coesione drenata |
| $V_s = 170\div 300 \text{ m/s}$ | velocità delle onde di taglio |
| $E_o = 150\div 400 \text{ MPa}$ | modulo di deformazione elastico iniziale (a piccole deformazioni) |

Unità CBA - Calcari di Bari

| | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| $\gamma = 24.0 \text{ kN/m}^3$ | peso di volume naturale |
| $\varphi' = 44\div 45^\circ$ | angolo di resistenza al taglio |
| $c' = 57\div 125 \text{ kPa}$ | coesione drenata |
| $V_s = 700\div 1250 \text{ m/s}$ | velocità delle onde di taglio |
| $E = 700\div 2000 \text{ MPa}$ | modulo di deformazione |

Unità CBAalt - Calcarì di Bari alterati

| | |
|---------------------------------|--------------------------------|
| $\gamma = 24.0 \text{ kN/m}^3$ | peso di volume naturale |
| $\varphi' = 35\div 40^\circ$ | angolo di resistenza al taglio |
| $c' = 10\div 30 \text{ kPa}$ | coesione drenata |
| $V_s = 350\div 550 \text{ m/s}$ | velocità delle onde di taglio |
| $E = 280\div 600 \text{ MPa}$ | modulo di deformazione |

3.2 Falda

Per quanto riguarda la quota della falda freatica, i rilievi eseguiti nel corso dei sondaggi della campagna di indagine del 2015 segnalano la presenza di falda ad una quota media di circa $-0.5 \div -0.6 \text{ m s.l.m.}$.

Tuttavia, data la vicinanza del mare, nel progetto delle opere definitive si considererà la quota della falda di progetto in condizioni di lungo termine pari a $+0.50 \text{ m s.l.m.}$, al fine di tener conto della massima oscillazione possibile. Le quote rilevate nei piezometri possono infatti risentire di oscillazioni stagionali nell'intorno del livello della quota del mare, che si trova a distanze inferiori a 500 m rispetto alle aree interessate dal tracciato.

Per il progetto delle opere provvisorie si considera invece un livello di falda pari a quella del livello medio del mare.

Nel profilo stratigrafico longitudinale sono riportati i livelli di falda rilevati ed i livelli di progetto.



RIASSETTO NODO DI BARI
PROGETTO ESECUTIVO TRATTA A SUD DI BARI
**VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI C.LE E BARI TORRE A
MARE**

RELAZIONE DI CALCOLO SCAVI PROVVISORI

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|--------------|------|---------|
| IA1U | 04 | E 78 CL | NV 01 00 412 | A | 7 di 16 |

4 DESCRIZIONE DELLE SCELTE PROGETTUALI

Come si evince dal profilo stratigrafico longitudinale, dove sono riportate tutte le indagini in sito, l'interpretazione stratigrafica e la falda, gli scavi interessano oltre alla coltre vegetale, sia terreni superficiali sabbiosi (unità S) per uno spessore massimo di 2 m, sia la formazione del calcare di Bari (unità CBA), che si presenta localmente alterato in superficie (unità CBAalt), con spessore ed estensione variabile. In particolare si osserva verso nord (lato mare), nel sondaggio S2, una maggiore alterazione del calcare, particolarmente fratturato con presenza di cavità riempite con terreno residuale. Poi procedendo verso sud si ha il sondaggio S1 e le prove sismiche MASW X5 e X4, che mostrano un substrato calcareo di discrete caratteristiche meccaniche già da pochi metri dal p.c.. Infine nei sondaggi S3 e S4 si denota un'alterazione del calcare nei primi 5÷7 m circa da p.c., confermata anche dalle prove sismiche X2, X1.

Cautelativamente per la verifica delle scarpate di scavo, data la variabilità stratigrafica lungo lo sviluppo dell'opera, si è considerata la seguente successione stratigrafica:

- da 0.0 (p.c.) a 2.0 m da p.c.: unità S (sabbia);
- da 2.0 m alla massima profondità di interesse progettuale: unità CBAalt (calcare di Bari alterato).

I parametri geotecnici di riferimento per ciascuna unità sono dettagliatamente discussi nella relazione geotecnica generale a cui si rimanda e vengono comunque sintetizzati nel successivo capitolo.

In corrispondenza del sottopasso e dove si hanno le altezze di scavo maggiori, si assumono pendenze di scavo più accentuate: 3/2 (verticale/orizzontale) da fondo scavo per altezza di 6 m, poi banca di larghezza pari ad 1 m e poi scavo con pendenza 1 (verticale)/1 (orizzontale) in prossimità del p.c..

Cautelativamente per il tratto iniziale (lato mare, in prossimità di S2) e per il tratto finale, dove le altezze di scavo sono comunque inferiori ai 6.0 m, per gli scavi provvisori, si assumono pendenze 1 (verticale)/1 (orizzontale). Questa scelta è stata dettata principalmente dalla stratigrafia del sondaggio S2, che effettivamente ha mostrato una marcata alterazione della formazione litoide fino a 15 m dal p.c.: sia dalla documentazione fotografica, sia dai valori di RQD con la profondità, si evidenzia in effetti una situazione geomeccanica sicuramente più scadente di tutti gli altri sondaggi, anche con riferimento ai primi metri da p.c. dei sondaggi S3, S4.

Per le fasi provvisorie di scavo, il livello di falda di riferimento è +0.0 m s.l.m., quindi dalla progressiva 0+050 a 0+192 la falda interferisce con gli scavi provvisori. Al fine di ridurre la quantità di acqua di falda da aggottare, con particolare riferimento agli scavi più profondi, in vicinanza della ferrovia in esercizio, si prevede la realizzazione di un intervento di iniezioni con miscele cementizie per la creazione di un tampone finalizzato alla riduzione della permeabilità dell'ammasso roccioso fratturato. Il progetto di tali iniezioni sarà oggetto di apposito elaborato, a cui si rimanda. Tutte le verifiche geotecniche degli scavi, sono state cautelativamente svolte in assenza di trattamento.



RIASSETTO NODO DI BARI
PROGETTO ESECUTIVO TRATTA A SUD DI BARI
VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI C.LE E BARI TORRE A MARE

RELAZIONE DI CALCOLO SCAVI PROVVISORI

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|--------------|------|---------|
| IA1U | 04 | E 78 CL | NV 01 00 412 | A | 8 di 16 |

5 ANALISI DI STABILITÀ

5.1 Sezioni di calcolo

Sono state prese a riferimento due sezioni ritenute rappresentative delle condizioni peggiori sia dal punto di vista stratigrafico, che per le massime altezze di scavo:

- sezione di scavo al km 0+180 circa – altezza massima di scavo 9.9 m: scarpata di scavo con pendenza 3 (verticale) /2 (orizzontale) per i primi 6.0 m di altezza da fondo scavo, poi banca di larghezza 1.0 m ed ultimo tratto con pendenza 1 (verticale) /1 (orizzontale) in prossimità del p.c.; per tale sezione inoltre la falda è a circa 1.0 m sopra il fondo scavo e quindi è necessario provvedere ad emungimento per mantenere lo scavo asciutto.
- sezione di scavo al km 0+070 circa – altezza di scavo 6.0 m: scarpata di scavo a pendenza 1 (verticale) /1 (orizzontale); per tale sezione la falda è a circa 1.0 m sopra fondo scavo e quindi è necessario provvedere ad emungimento per mantenere lo scavo asciutto.

Nel seguito si riportano le analisi di stabilità per le due sezioni; per la sezione di scavo di massima altezza è stata eseguita un'analisi più dettagliata con il codice Plaxis, in quanto il modello verrà richiamato poi nella relazione tecnica dell'intervento di consolidamento e finalizzata alla stima delle portate da emungere con riferimento ad un battente di 1 m circa.

5.2 Sezione al km 0+180

5.2.1 Metodologia di calcolo

L'analisi è stata effettuata per mezzo del codice numerico Plaxis v.2015, un codice di calcolo agli elementi finiti utilizzabile per eseguire analisi di stabilità e di deformazione nell'ambito di molteplici applicazioni geotecniche e di interazione terreno-struttura. Il programma permette di simulare situazioni riconducibili a condizioni di deformazione piane (plain strain).

Il terreno è generalmente discretizzato tramite elementi triangolari a 15 nodi, disposti a generare una mesh di calcolo opportunamente infittita nelle zone di massimo gradiente tensionale.

Presenta una vasta libreria di legami costitutivi attribuibili ai terreni. Sono disponibili inoltre elementi strutturali di vario tipo che consentono di simulare diaframmi, pali, ancoraggi ecc.

Plaxis generalmente viene utilizzato per analisi in tensioni efficaci quindi, nei problemi che coinvolgono la determinazione delle pressioni neutre, le stesse possono essere generate attraverso l'analisi del moto di filtrazione in regime stazionario; quest'ultimo richiede l'introduzione delle condizioni al contorno per la quota piezometrica e per le condizioni di flusso (superfici impermeabili, punti di emungimento, sorgenti etc.).

Per modellare la risposta meccanica dello scheletro solido, sono stati impiegati legami costitutivi elasto-plastici che permettono di cogliere le deformazioni irreversibili che si sviluppano nel volume al contorno dello scavo. L'esistenza di deformazioni plastiche implica la necessità di considerare, nell'analisi, l'andamento dei carichi con il proseguire dell'esecuzione delle opere; infatti, la soluzione del problema, a differenza del caso elastico, dipende anche dal percorso tensionale seguito.

Pertanto, l'analisi è stata sviluppata in fasi successive per riprodurre tutte le principali lavorazioni previste per la sezione esaminata: le condizioni finali di ciascuna fase saranno le condizioni iniziali per la fase successiva. Per la definizione delle fasi modellate si fa riferimento a quanto riportato nel paragrafo 5.2.3.

La determinazione del coefficiente di sicurezza avviene mediante un algoritmo iterativo ($\phi' - c'$ reduction method, Dawson, Roth and Drescher, 1999) che, sulla base dei dati di partenza (c' e $\tan \phi'$), determina successive condizioni di equilibrio del sistema eseguendo, ad ogni ciclo, una progressiva riduzione delle resistenze fino al raggiungimento del collasso (condizione di non equilibrio del sistema):

$$c'_{\text{prova}} = c' / FS_{\text{prova}}$$

$$\phi'_{\text{prova}} = \arctan(\tan \phi' / FS_{\text{prova}})$$

In Figura 3 la progressiva riduzione delle resistenze è rappresentata nel piano di Mohr-Coulomb per il singolo elemento di terreno. Si osserva che i parametri di deformabilità non influenzano in maniera apprezzabile i risultati del calcolo e, pertanto, possono essere considerati senza particolari affinamenti.

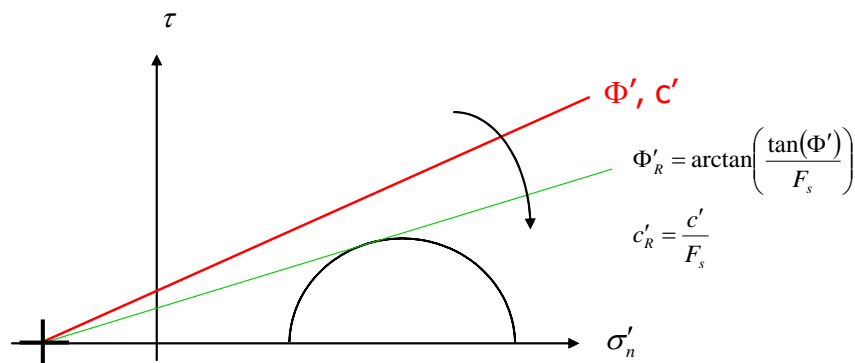


Figura 3 – Phi-c reduction method

Rispetto ai classici metodi dell'equilibrio limite, presenta numerosi vantaggi (e.g. Dawson and Roth, 1999, and Cala and Flisiak, 2001):

- le superfici di rottura si propagano in maniera “naturale”; quindi non occorre specificare preventivamente i cinematici e le potenziali superfici di rottura su cui ricercare il coefficiente di sicurezza minimo;
- non richiede la definizione di ipotesi di calcolo “artificiali” (es. ipotesi sulle forze di interfaccia);
- la metodologia non implica limitazioni sulla forma e la modalità di propagazione delle potenziali superfici di rottura (anche multiple e/o con propagazioni complesse delle zone di snervamento) in funzione delle esigenze del sistema;
- l'interazione con eventuali elementi strutturali vengono modellate in maniera realistica con una mobilitazione delle resistenze in funzione della deformazione relativa rispetto al terreno circostante e non semplicemente mediante forze equivalenti.
- la soluzione converge in un meccanismo che è cinematicamente ammissibile (si noti che i metodi classici dell'equilibrio limite prescindono dalla valutazione degli spostamenti e non richiedono pertanto la conoscenza dei legami tensioni-deformazioni ma del solo criterio di resistenza dei terreni interessati).

Tale analisi di stabilità è generalmente svolta a partire dalla configurazione di progetto maggiormente cautelativa che risulta essere la fase finale in cui viene raggiunto il fondo scavo; trattandosi di scavi provvisori, l'analisi sismica non è necessaria.

Tale analisi equivale alla verifica SLU (GEO) prevista dalla normativa vigente: Approccio 1 Combinazione 2 (A2+M2+R2), in base alla quale la stabilità geotecnica deve essere verificata con i parametri di resistenza del

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-------------|---------------------|---------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | RIASSETTO NODO DI BARI PROGETTO ESECUTIVO TRATTA A SUD DI BARI VARIANTE DI TRACCIATO TRA BARI C.LE E BARI TORRE A MARE | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCAVI PROVVISORI | COMMESSA IA1U | LOTTO 04 | CODIFICA E 78 CL | DOCUMENTO NV 01 00 412 | REV. A |

terreno ridotti tramite i coefficienti parziali del gruppo M2 ($\gamma_M = 1.25$ sia per la coesione sia per la resistenza al taglio, $\gamma_R = 1.1$).

Pertanto, per ottemperare alla verifica geotecnica richiesta dalla normativa occorre avere $FS > 1.25 \cdot 1.1 = 1.375$.

5.2.2 Parametri geotecnici di calcolo

Cautelativamente per le analisi di stabilità si considera una stratigrafia uniforme con 2 m di terreno ed a seguire CBAalt.

Le unità stratigrafiche coinvolte sono state modellate con elementi finiti bidimensionali caratterizzati da un legame costitutivo elasto-plastico alla Mohr-Coulomb.

Di seguito si riportano i parametri geotecnici di calcolo:

Unità S - Sabbia

| | |
|--------------------------------|---|
| $\gamma = 20.0 \text{ kN/m}^3$ | peso di volume naturale |
| $\varphi' = 35^\circ$ | angolo di resistenza al taglio |
| $c' = 0 \text{ kPa}$ | coesione drenata |
| $E' = 30 \text{ MPa}$ | modulo di deformazione elastico operativo |

Unità CBAalt - Calcarì di Bari alterati

| | |
|--------------------------------|---|
| $\gamma = 24.0 \text{ kN/m}^3$ | peso di volume naturale |
| $\varphi' = 35^\circ$ | angolo di resistenza al taglio |
| $c' = 30 \text{ kPa}$ | coesione drenata |
| $E' = 200 \text{ MPa}$ | modulo di deformazione elastico operativo |

Falda: +0.0 m s.l.m. (circa 1 m sopra il fondo scavo, quindi si prevede agottamento acqua per tenere lo scavo asciutto).

5.2.3 Fasi di calcolo

La procedura di calcolo è stata sviluppata in diversi steps di calcolo successivi:

- inizializzazione geostatica;
- scavi successivi in corrispondenza delle scarpate;
- raggiungimento del fondo scavo finale con agottamento falda a fondo scavo con battente di circa 1 m;
- analisi di stabilità globale.

Le fasi di calcolo considerate sono illustrate nelle figure seguenti mentre i risultati delle analisi saranno riportati nel paragrafo 5.2.4.

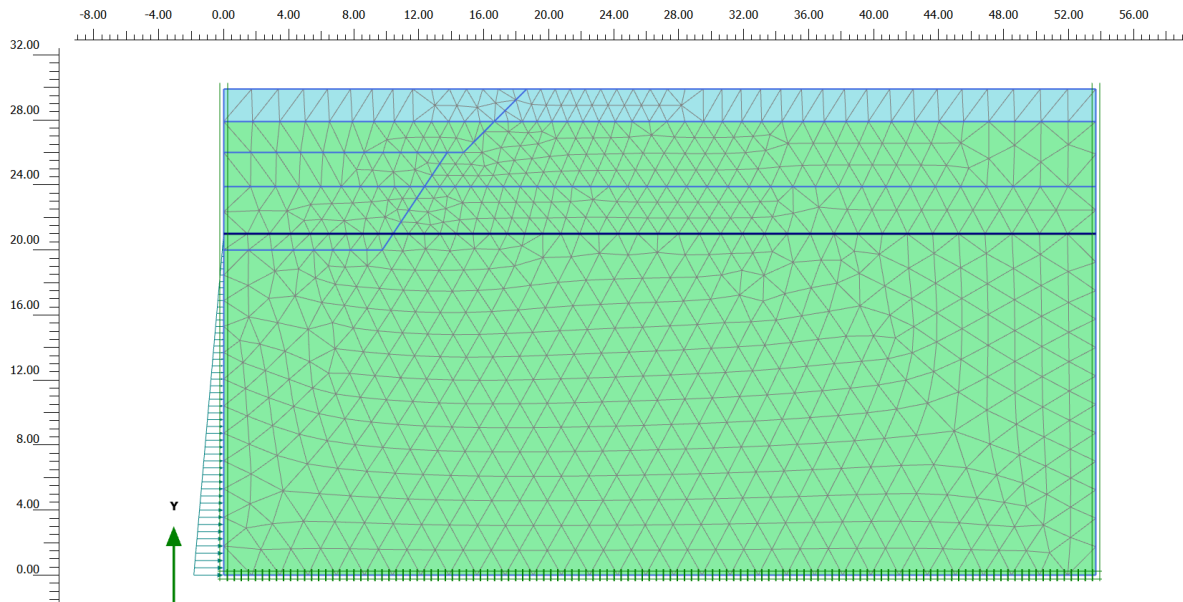


Figura 4 – Inizializzazione

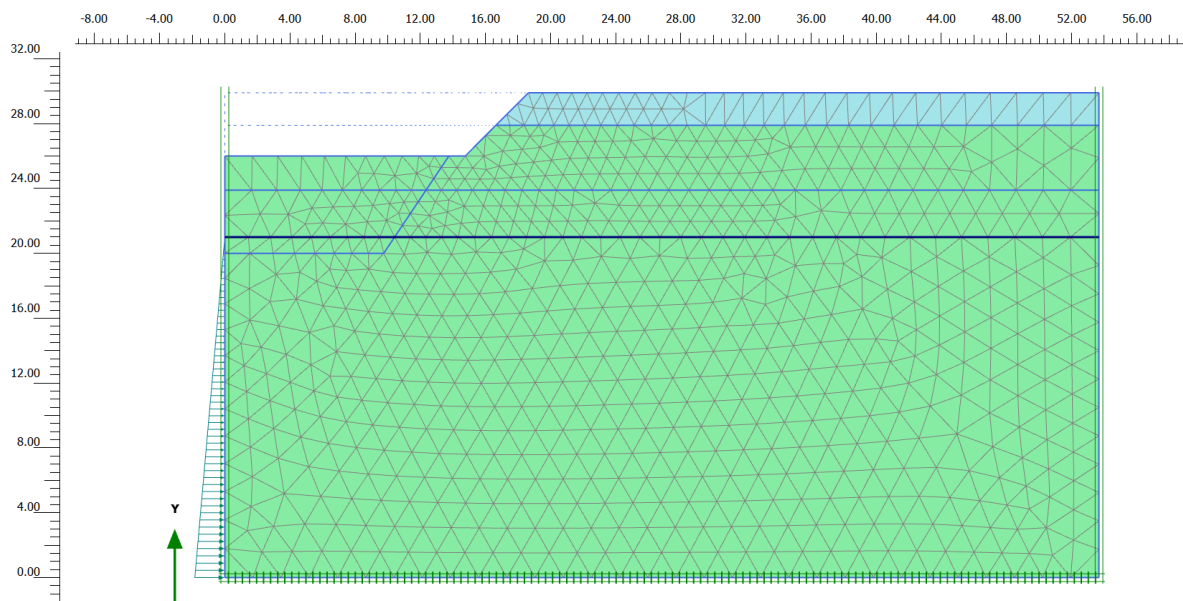


Figura 5 – Scavo 1

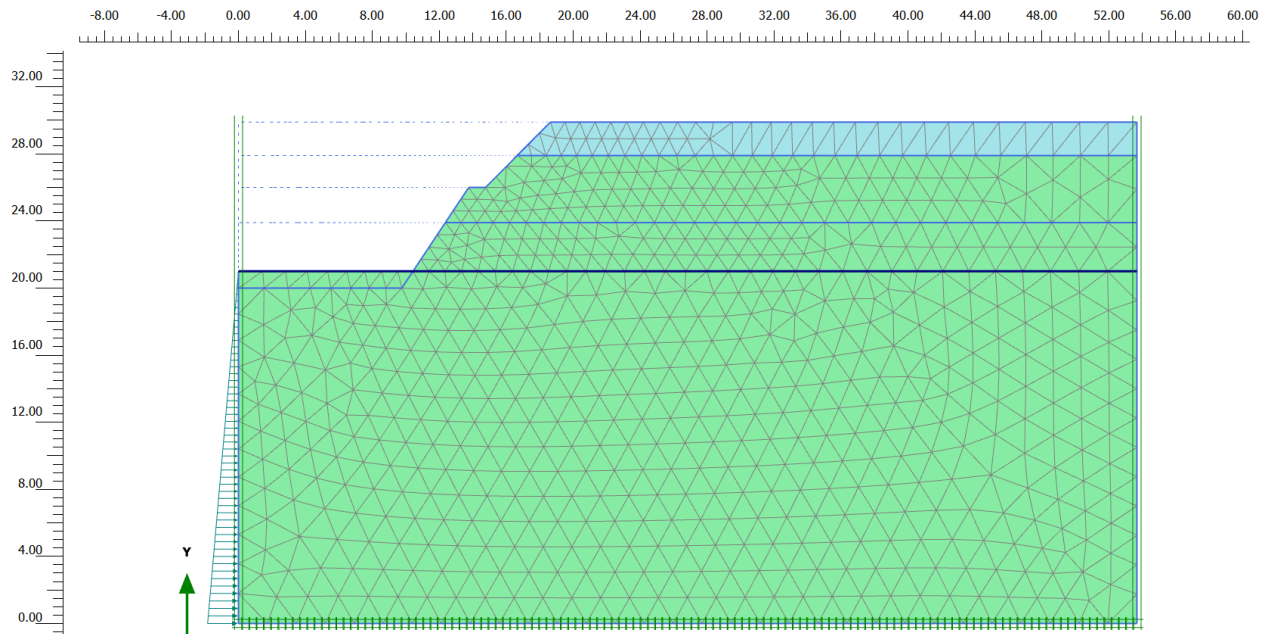


Figura 6 – Scavo 2

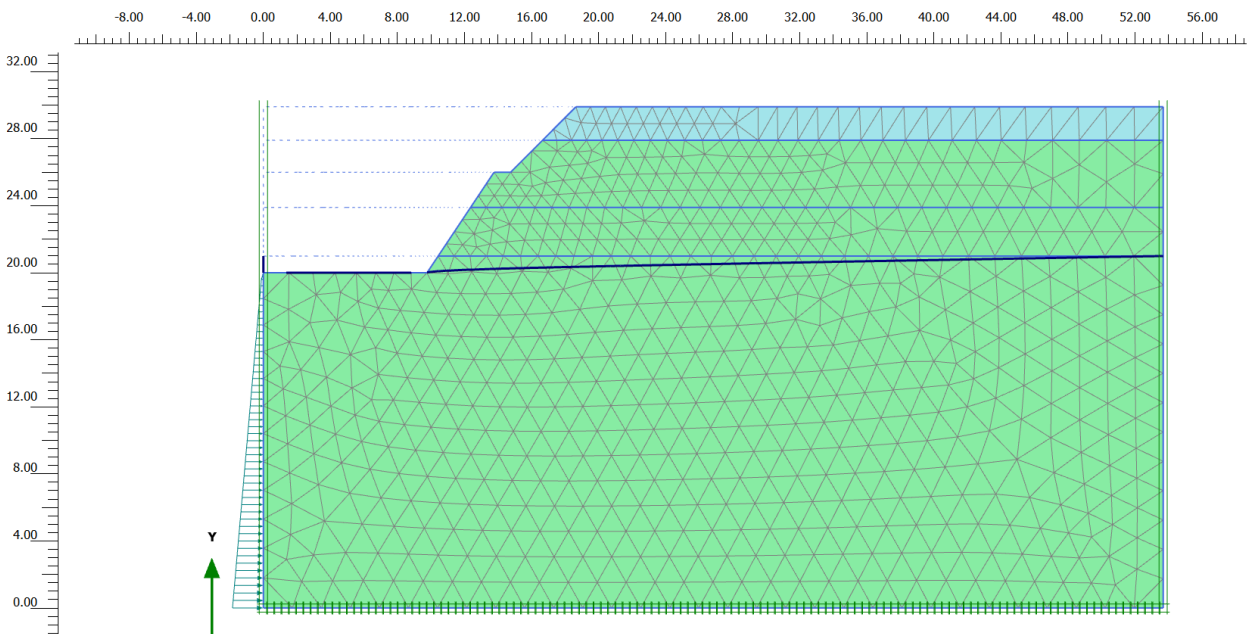


Figura 7 – Fase finale (raggiungimento del fondo scavo)

5.2.4 Risultati

I risultati delle analisi FEM 2D svolte sono descritti nel seguito e illustrati attraverso i grafici ritenuti più rappresentativi.

Nelle seguenti immagini è riportato il campo di spostamenti al raggiungimento del fondo scavo.

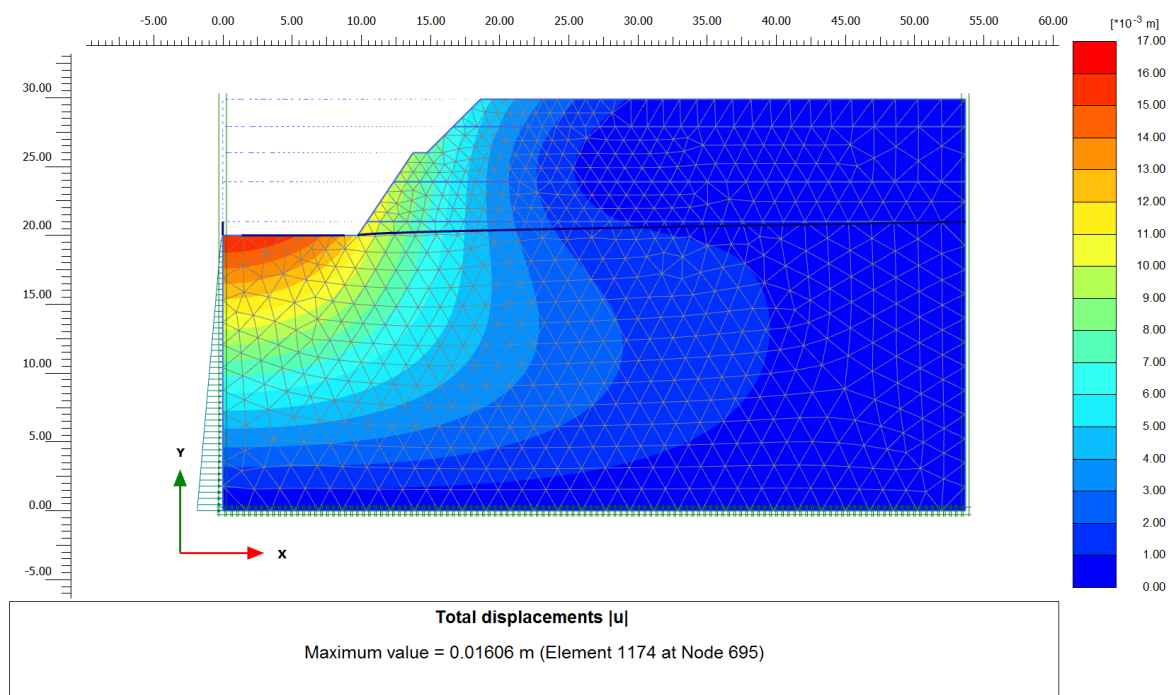
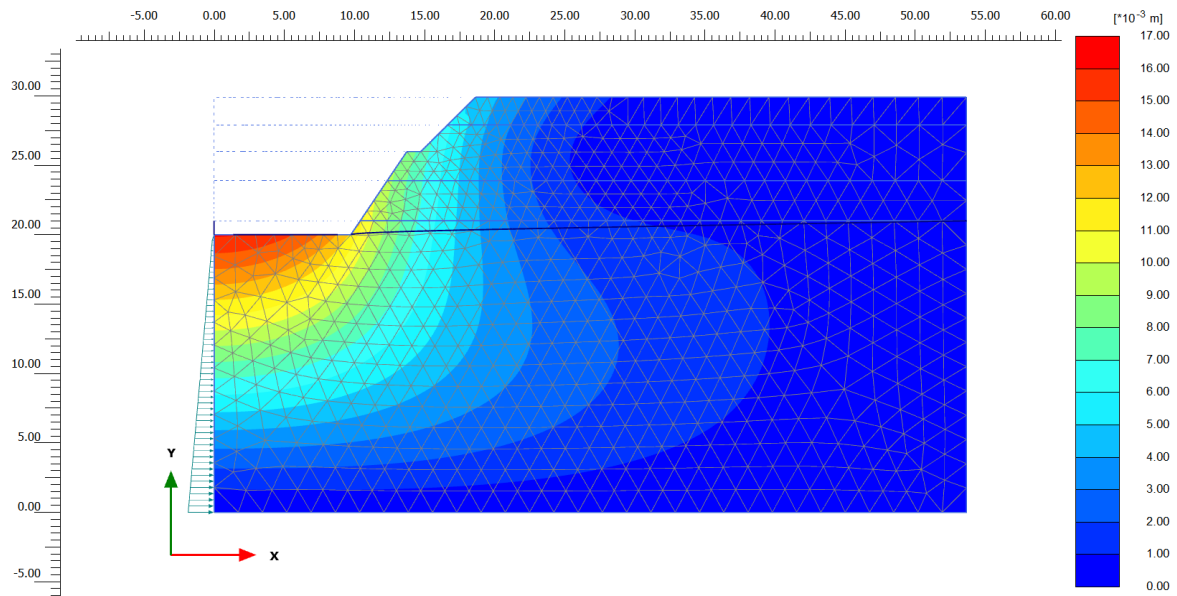


Figura 8 – Campo di spostamenti al raggiungimento del fondo scavo

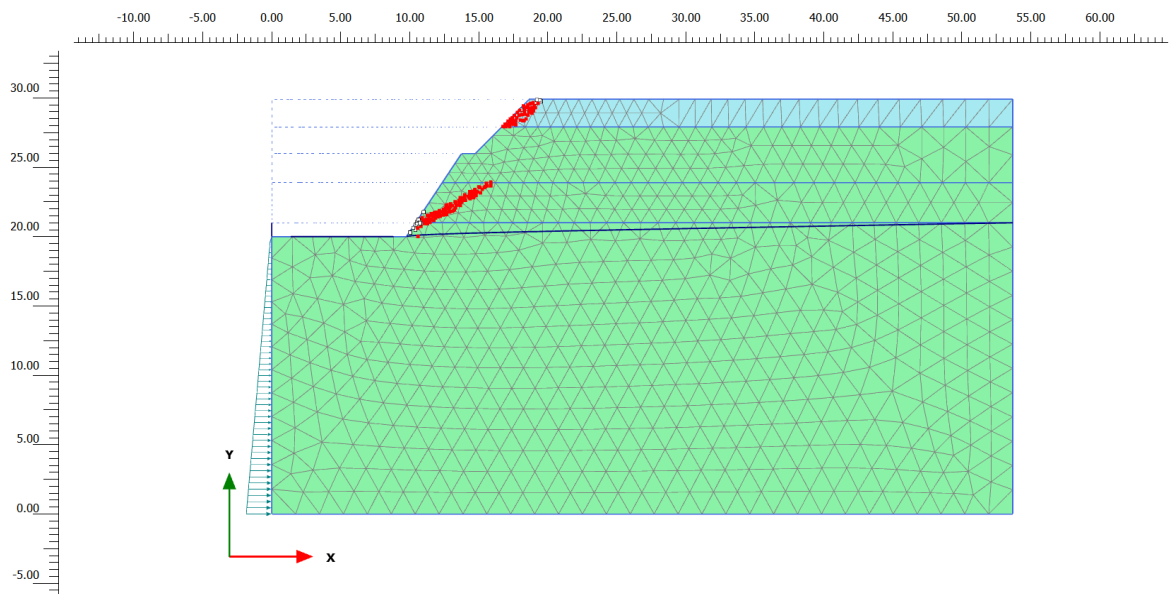
Nelle seguenti immagini si espongono, nell'ordine, il campo di spostamenti e i punti di plasticizzazione relativamente all'analisi di stabilità globale con FS=1.40. Il fattore di sicurezza alla stabilità globale ottenuto è superiore al minimo imposto dalla normativa, pari a 1.375 (cfr.5.2.1).



Total displacements [u]

Maximum value = 0.01613 m (Element 1174 at Node 695)

Figura 9 – Campo di spostamenti. Analisi di stabilità globale (FS = 1.40)



Plastic points

■ Failure point □ Tension cut-off point

Figura 10 – Punti di plasticizzazione. Analisi di stabilità globale (FS = 1.40)

5.3 Sezione al km 0+070

5.3.1 Metodologia di calcolo

L'esame delle condizioni di stabilità è stato condotto utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite. Per la valutazione dei fattori di sicurezza alla stabilità globale si è impiegato un codice di calcolo denominato SLIDE v.6007 della Rocscience in cui la ricerca delle superfici critiche viene svolta attraverso la generazione automatica di un elevato numero di superfici di potenziale scivolamento. Sono state cautelativamente considerate ipotesi di deformazione piana. In particolare, in questa sede si fa riferimento al metodo di Bishop modificato che prevede l'utilizzo di superfici di scorrimento circolari.

Nelle analisi sono state ovviamente tralasciate le superfici più corticali in quanto poco significative e per le quali non risulta idonea una analisi convenzionale all'equilibrio limite.

Il coefficiente di sicurezza FS a rottura lungo la superficie di scorrimento viene definito come rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie S e quella effettivamente mobilitata lungo la stessa superficie:

$$FS = \frac{\int_S \tau_{disp}}{\int_S \tau_{mob}}$$

In accordo alla normativa vigente per rilevati in materiali sciolti e fronti di scavo, le analisi di stabilità vengono condotte secondo la combinazione (A2+M2+R2).

Secondo la normativa quindi i parametri di resistenza del terreno devono essere abbattuti a mezzo dei coefficienti parziali di seguito riportati.

$$\begin{aligned} \gamma_{\varphi} &= 1.25 && \text{coefficiente parziale per l'angolo di resistenza al taglio} \\ \gamma_c &= 1.25 && \text{coefficiente parziale per la coesione drenata} \end{aligned}$$

L'analisi viene quindi condotta con i seguenti parametri geotecnici di calcolo:

$$\begin{aligned} \tan(\varphi'_k) &= \tan(\varphi'_k) / \gamma_{\varphi} && \text{angolo di resistenza al taglio} \\ c'_k &= c'_k / \gamma_c && \text{coesione drenata} \end{aligned}$$

Il coefficiente di sicurezza minimo per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e fronti di scavo è pari ad 1.1 (γ_R).

Pertanto il fattore di sicurezza alla stabilità da verificare $FS \geq 1.1$.

5.3.2 Parametri geotecnici di calcolo

Cautelativamente per le analisi di stabilità si considera una stratigrafia uniforme con 2 m di terreno ed a seguire CBAalt. Inoltre, essendo questa sezione rappresentativa del tratto più a nord (lato mare), caratterizzato da condizioni geomeccaniche peggiori (vedasi sondaggio S2), si considera cautelativamente una coesione minima pari a 10 kPa.

Di seguito si riportano i parametri geotecnici di calcolo:

Unità S - Sabbia

| | |
|--------------------------------|---|
| $\gamma = 20.0 \text{ kN/m}^3$ | peso di volume naturale |
| $\varphi' = 35^\circ$ | angolo di resistenza al taglio |
| $c' = 0 \text{ kPa}$ | coesione drenata |
| $E' = 30 \text{ MPa}$ | modulo di deformazione elastico operativo |

Unità CBAalt - Calcarei di Bari alterati

| | |
|--------------------------------|---|
| $\gamma = 24.0 \text{ kN/m}^3$ | peso di volume naturale |
| $\varphi' = 35^\circ$ | angolo di resistenza al taglio |
| $c' = 10 \text{ kPa}$ | coesione drenata |
| $E' = 200 \text{ MPa}$ | modulo di deformazione elastico operativo |

Falda: +0.0 m s.l.m. (circa 1 m sopra il fondo scavo, quindi si prevede agottamento acqua per tenere lo scavo asciutto).

5.3.3 Risultati

Come si evince dalla seguente figura, il fattore di sicurezza minimo ottenuto è pari a $FS = 1.292$, maggiore del valore minimo prescritto da normativa ($FS \geq 1.1$), pertanto la verifica di stabilità è soddisfatta.

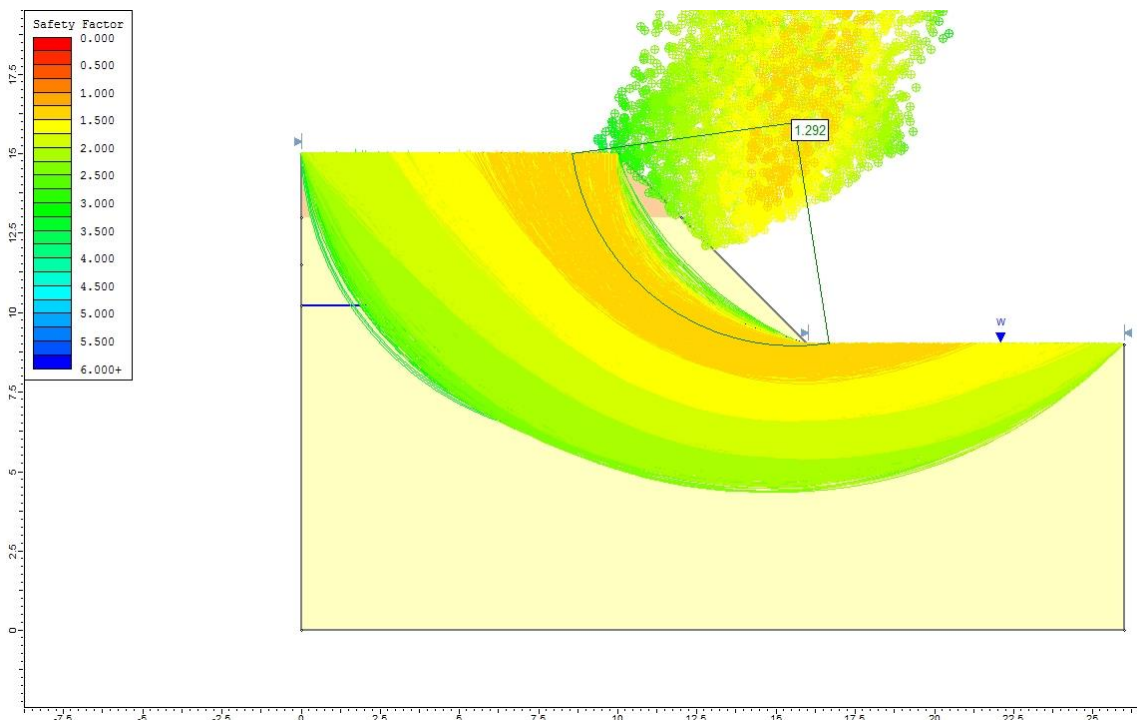


Figura 11 – Analisi di stabilità in condizioni statiche – H=6.0 m pendenza scarpata 1/1