

DIREZIONE CENTRALE PROGRAMMAZIONE PROGETTAZIONE

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

PROGETTO ESECUTIVO

Contraente Generale:



GALLERIE ARTIFICIALI
GALLERIA SAN CATALDO
RELAZIONE GEOTECNICA

Codice Unico Progetto (CUP) : F91B09000070001

Codice Elaborato:

PA12_09 - E 1 1 1 GA 2 0 3 GA 0 3 Z R G 0 0 3 C

Scala:

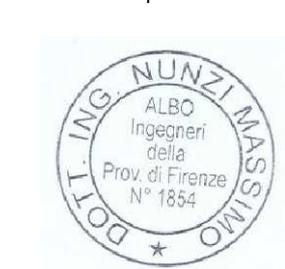
Table with 7 columns: F, E, D, C, B, A, REV. and 7 rows of project details including dates, descriptions, and roles.

Responsabile del procedimento: Ing. MAURIZIO ARAMINI

Il Progettista:



Il Consulente Specialista:



Il Geologo:



Il Coordinatore per la sicurezza in fase di progetto:



Il Direttore dei lavori:



**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**

PROGETTO ESECUTIVO

OPERE D'ARTE MAGGIORI
GALLERIE ARTIFICIALI
GALLERIA ARTIFICIALE SAN CATALDO
RELAZIONE GEOTECNICA

| | | |
|--|---|-----------------------|
| <i>Cod. elab.:</i> 111GA203GA03ZRG003A | <i>Titolo:</i> Galleria artificiale San Cataldo | <i>Data:</i> 21/01/11 |
| <i>Nome file:</i> 0 san cataldo_relazione geotecnica | Relazione Geotecnica | <i>Pagina</i> 1 di 17 |

Sommario

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Premessa | 3 |
| 2 | Descrizione dell'Opera nel Progetto esecutivo (PE) | 4 |
| 2.1 | Descrizione dell'opera nel progetto esecutivo | 4 |
| 3 | Normativa progetto | 6 |
| 3.1 | Normativa di progetto PE | 6 |
| 4 | Parametri Geotecnici | 7 |
| 5 | Categorie del Suolo e Condizioni Topografiche | 9 |
| 6 | Calcolo della Spinta delle terre..... | 10 |
| 6.1 | Calcolo della spinta del terreno..... | 10 |
| 6.2 | Spinta in presenza di sisma | 11 |
| 7 | verifiche di stabilità degli scavi | 12 |
| 7.1 | Criteri generali di verifica | 12 |
| 7.2 | Criteri generali di analisi..... | 12 |
| 7.2.1 | Fondamenti teorici del metodo di Bishop | 13 |
| 7.3 | Sezione analizzata..... | 14 |
| 7.3.1 | Combinazioni delle azioni (A2)..... | 15 |
| 7.3.2 | Parametri geotecnici nella combinazione M2 | 15 |
| 7.3.3 | Coefficiente di sicurezza R2..... | 16 |
| 7.4 | Risultati delle verifiche | 16 |

| | | |
|--|---|---------------------------|
| <i>Cod. elab.:</i> 111GA203GA03ZRG003C | <i>Titolo:</i> Galleria artificiale San Cataldo | <i>Data:</i> Ottobre 2011 |
| <i>Nome file:</i> 0 san cataldo_relazione geotecnica | Relazione Geotecnica | <i>Pagina</i> 2 di 17 |

1 PREMESSA

La presente relazione geotecnica illustrativa e di calcolo è relativa al progetto esecutivo delle opere per la realizzazione della galleria artificiale San Cataldo da realizzarsi nell'ambito dei lavori di ammodernamento e adeguamento alla cat. B del D.M. 05.11.2001, dal km 44+000 alla svincolo con l'A19 dell'Itinerario Agrigento - Caltanissetta – A19 S.S. N°640 "di Porto Empedocle".

| | | |
|--|---|---------------------------|
| <i>Cod. elab.:</i> 111GA203GA03ZRG003C | <i>Titolo:</i> Galleria artificiale San Cataldo | <i>Data:</i> Ottobre 2011 |
| <i>Nome file:</i> 0 san cataldo_relazione geotecnica | Relazione Geotecnica | <i>Pagina</i> 3 di 17 |

2 DESCRIZIONE DELL'OPERA NEL PROGETTO ESECUTIVO (PE)

2.1 Descrizione dell'opera nel progetto esecutivo

La galleria artificiale San Satldo è composta da due canne collegate in c.a. le quali si sviluppano dalla progressiva 11+575.001 alla progressiva 11+764.981 per la canna dx (lunghezza 189.98 m comprensivi del tratto di imbocco) e dalla 11+569.293 alla 11+759.146 (189.85 m comprensivi del tratto di imbocco) per la canna sx.

La geometria della galleria risulta del tutto simile a quella prevista nel progetto definitivo, infatti la sezione trasversale di ciascuna carreggiata è del tipo policentrica, composta da un arco superiore, (volta e piedritti) di raggio $R=6.45$ m, angolo di apertura pari a circa $119,49^\circ$ e spessore pari a 110 cm.

La fondazione è costituita da un solettone a spessore costante pari a 150 cm.

Poiché le canne della galleria divergono il ritto centrale è a sezione variabile con un minimo di 124 cm e un massimo di 223 cm (nella sezione di inizio galleria sul lato Agrigento).

L'altezza massima interna, posta in corrispondenza dell'asse della galleria, è di 9.70 m, mentre la massima larghezza interna risulta di 12.90 m.

L'imbocco presenta, in senso longitudinale, una conformazione a becco di flauto, in senso trasversale la stessa geometria della sezione corrente. Al termine degli imbocchi sono presenti due muri di contenimento alti come la sezione di inizio del becco di flauto (4 m) in modo da raccordare il profilo del terreno al termine del muro con quello al termine della sezione di imbocco.

Più precisamente all'imbocco lato agrigento il muro è presente solo sul lato della carreggiata dx e ha una lunghezza di circa 15.10 m. All'imbocco Caltanissetta il muro è presente su entrambi i lati con una dimensione di circa 34.89 m.

Su lato destro della galleria, conformemente al progetto definitivo è prevista la stesatura del terreno in fase provvisoria di scavo con scarpate di altezza massima 5 m e pendenza a 45° , intervallate da banchine orizzontali di m. 2.0.

Il ricoprimento massimo della galleria nella configurazione finale del terreno è di 5.0 m.

La realizzazione della galleria avviene a cielo aperto con protezione dello scavo, su un lato, attraverso una paratia di pali.

La paratia di protezione è realizzata con pali di diametro 1.2 metri di lunghezza 19.00 m e multitirantata (2 ordini di tiranti) con una altezza dello scavo fino a 13.00 metri. La paratia parte da 6.23 m circa oltre la prog. 11+594.145 e finisce 5.99 m circa oltre la prog. 15+694.067 A quota -4.00 metri e -8.50 metri dall'intradosso del cordolo sono disposte due file di tiranti posti ad interasse $i = 2,8$ metri.

Per quanto riguarda le fasi realizzative si riporta le fsi costruttive.

- 1) Esecuzione prescavo fino a quota testa palo;
- 2) Realizzazione pali $\Phi 1200$ e micopali;
- 3) Realizzazione cordolo di collegamento superiore;
- 4) Scavo fino a quota - 1.0 metro dalla prima fila di tiranti;
- 5) Realizzazione prima fila di tiranti;
- 6) Posizionamento travi di ripartizione e tesatura dei tiranti;
- 7) Scavo fino a quota -1.0 metro dalla seconda fila di tiranti;
- 8) Realizzazione seconda fila di tiranti;
- 9) Posizionamento travi di ripartizione e tesatura dei tiranti;
- 10) Sbancamento fino alla quota di progetto;

| | | |
|---|--|--------------------|
| Cod. elab.: 111GA203GA03ZRG003C | Titolo: Galleria artificiale San Cataldo | Data: Ottobre 2011 |
| Nome file: 0 san cataldo_relazione geotecnica | Relazione Geotecnica | Pagina 4 di 17 |

3 **NORMATIVA PROGETTO**

3.1 **Normativa di progetto PE**

La progettazione degli elementi strutturali è stata condotta in conformità al quadro legislativo attualmente vigente in merito al dimensionamento delle strutture e per quanto riguarda la classificazione sismica del territorio nazionale. Le norme di riferimento adottate sono riportate nel seguito:

- [1] Legge nr. 1086 del 05/11/1971.
Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio, normale e precompresso ed a struttura metallica.
- [2] Legge nr. 64 del 02/02/1974.
Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche.
- [3] D.M. LL.PP. del 11/03/1988.
Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.
- [4] UNI EN 206-1:2006 « Calcestruzzo – Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità »;
- [5] UNI EN 1992-1-1:2005 « Eurocodice 2 Progettazione delle strutture di calcestruzzo ».
- [6] D.M. 14 Gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008 (di seguito richiamata DM 2008)
- [7] Circolare 617 del 02/02/2009
Istruzioni per l'applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008.

| | | |
|--|---|---------------------------|
| <i>Cod. elab.:</i> 111GA203GA03ZRG003C | <i>Titolo:</i> Galleria artificiale San Cataldo | <i>Data:</i> Ottobre 2011 |
| <i>Nome file:</i> 0 san cataldo_relazione geotecnica | Relazione Geotecnica | <i>Pagina</i> 6 di 17 |

4 PARAMETRI GEOTECNICI

Di seguito si riportano i parametri geotecnici di calcolo estratti da "15 – GA San Cataldo: da prog. 11+550 a prog. 12+183" forniti dal geologo di riferimento.

Indagini dirette di riferimento:

| Sondaggio 2006 | Tipologia | Prof. (m) | Progr. Km | Campioni | | |
|----------------|---------------------|-----------|-----------|----------|-------|----------------|
| | | | | N° | Sigla | Profondità (m) |
| S46 | Carotaggio continuo | 30,00 | 11+580 | 1 | S46C1 | 16,00-16,50 |
| | | | | 2 | S46C2 | 21,00-21,50 |
| S23 | Carotaggio continuo | 25,00 | 11+750 | 1 | S23C1 | 20,70-21,20 |
| | | | | 2 | S23C2 | 24,00-24,50 |

| Sondaggio 2010 Fase 1 | Tipologia | Prof. (m) | Progr. Km | Campioni | | |
|-----------------------|---------------------|-----------|-----------|----------|-------|----------------|
| | | | | N° | Sigla | Profondità (m) |
| S06 | Carotaggio continuo | 25,00 | 11+660 | 1 | C1 | 5,00-5,50 |
| | | | | 2 | C2 | 20,00-20,5 |
| | | | | 3 | C3 | 24,50-25,00 |

| Penetrometriche dinamiche 2010 | Dimensione | Progr. Km |
|--------------------------------|---------------|-----------|
| PD28 | Prof.= 9,60 m | 12+115 |

Indagini indirette di riferimento:

| Sismica a rifrazione 2006 | Dimensione | Progr. Km |
|---------------------------|------------|-----------|
| SS06 | L= 78,00 m | 11+750 |

| SABBIE e SABBIE ARGILLOSE - SLN | | | | |
|---------------------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| Campione | γ | c' | Cu | ϕ |
| | KN/mc | KN/mq | KN/mq | (°) |
| S6C1 | 20,84 | 15,00 | | 19,70 |
| S46C1 | 24,40 | 31,70 | 182,80 | 21,20 |
| Valori medi | 22,62 | 23,35 | 182,80 | 20,45 |
| Valori minimi | 20,84 | 15,00 | 182,80 | 19,70 |
| Valori massimi | 24,40 | 31,70 | 182,80 | 21,20 |

| ARGILLE MARNOSE GER | | | | |
|---------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| Campione | γ | c' | Cu | ϕ |
| | KN/mc | KN/mq | KN/mq | (°) |
| S46C2 | 20,07 | 54,60 | | 22,30 |
| S23C1 | 20,26 | 42,10 | 267,72 | 24,30 |
| S23C2 | 20,27 | 23,00 | 237,19 | 26,50 |
| S6C2 | 20,32 | | 193,50 | |
| S6C3 | 21,18 | 29,20 | 297,30 | 24,10 |
| Valori medi | 20,42 | 37,23 | 248,93 | 24,30 |
| Valori minimi | 20,07 | 23,00 | 193,50 | 22,30 |
| Valori massimi | 21,18 | 54,60 | 297,30 | 26,50 |

| | | |
|---|--|--------------------|
| Cod. elab.: 111GA203GA03ZRG003C | Titolo: Galleria artificiale San Cataldo | Data: Ottobre 2011 |
| Nome file: 0 san cataldo_relazione geotecnica | Relazione Geotecnica | Pagina 7 di 17 |

PROGETTO ESECUTIVO

| Profondità (m) | Litotipo | Parametri Geotecnici |
|------------------|--|------------------------------|
| 0.00 ÷ 18.00 | Sabbie e Sabbie argillose - SLN: Sabbie giallastre con livelli costituiti da calcareniti e quarzareniti e intercalazioni di argille sabbiose con gusci fossili. | $\gamma = 2.26 \text{ T/mc}$ |
| | | $C_u = 1.82 \text{ Kg/cmq}$ |
| | | $c' = 0.23 \text{ Kg/cmq}$ |
| | | $\phi' = 20.45^\circ$ |
| 18.00 ÷ in prof. | Argille marnose - GER : argille marnose, talora siltose, dalla tipica colorazione grigio-azzurra con intercalazioni di sottili livelli siltosi . | $\gamma = 2.04 \text{ T/mc}$ |
| | | $C_u = 2.49 \text{ Kg/cmq}$ |
| | | $c' = 0.37 \text{ Kg/cmq}$ |
| | | $\phi' = 24.3^\circ$ |

| | | |
|------------------------------|------|------|
| Numero di verticali indagate | 3 | |
| ξ_3 | 1,60 | 1,70 |
| ξ_4 | 1,48 | 1,65 |

La prima colonna dei coefficienti di correlazione si riferisce ai pali mentre la seconda colonna si riferisce ai tiranti.

dove:

γ = peso di volume

c' = coesione

ϕ = angolo d'attrito

C_u = coesione non drenata

Non vi è presenza di falda.

| | | |
|---|--|--------------------|
| Cod. elab.: 111GA203GA03ZRG003C | Titolo: Galleria artificiale San Cataldo | Data: Ottobre 2011 |
| Nome file: 0 san cataldo_relazione geotecnica | Relazione Geotecnica | Pagina 8 di 17 |

5 CATEGORIE DEL SUOLO E CONDIZIONI TOPOGRAFICHE

Per il sito in questione si assume, sulla base dei dati delle indagini eseguite, che il sottosuolo sia identificato dalla categoria **C**: “*depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti*”.

Le condizioni topografiche del sito possono essere rappresentate dalla descrizione della categoria **T1**: “*Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$* ”.

| | | |
|--|---|---------------------------|
| <i>Cod. elab.: 111GA203GA03ZRG003C</i> | <i>Titolo: Galleria artificiale San Cataldo</i> | <i>Data: Ottobre 2011</i> |
| <i>Nome file: 0 san cataldo_relazione geotecnica</i> | Relazione Geotecnica | <i>Pagina 9 di 17</i> |

6 CALCOLO DELLA SPINTA DELLE TERRE

6.1 Calcolo della spinta del terreno

I parametri che identificano il tipo di legge costitutiva possono essere distinti in due sottoclassi: parametri di spinta e parametri di deformabilità del terreno.

I parametri di spinta sono il coefficiente di spinta a riposo K_0 , il coefficiente di spinta attiva K_A e il coefficiente di spinta passiva K_P .

Il coefficiente di spinta a riposo fornisce lo stato tensionale presente in sito prima delle operazioni di scavo. Esso lega la tensione orizzontale efficace σ'_h a quella verticale σ'_v attraverso la relazione:

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v$$

K_0 dipende dalla resistenza del terreno, attraverso il suo angolo di attrito efficace ϕ' e dalla sua storia geologica. Si può assumere che:

$$K_0 = K_0^{NC} (OCR)^m \text{ dove } K_0^{NC} = 1 - \sin \phi'$$

è il coefficiente di spinta a riposo per un terreno normalconsolidato ($OCR=1$). OCR è il grado di sovraconsolidazione e m è un parametro empirico, di solito compreso tra 0.4 e 0.7. Ladd et al. (1977), Jamiolkowski et al. (1979) forniscono valori di m per argille italiane.

Il coefficiente di spinta attiva e passiva sono dati secondo Rankine per una parete liscia, da:

$$K_A = \tan^2(45 - \phi'/2) \quad K_P = \tan^2(45 + \phi'/2)$$

Attraverso valori opportuni di K_A e K_P si può tener conto dell'angolo di attrito δ tra paratia e terreno e della pendenza del terreno a monte ed entro la luce di scavo; si possono usare a questo scopo i valori desunti da NAVFAC (1986) o quelle elaborate da Caquot e Kerisel (1948)

Il valore limite della tensione orizzontale sarà dato da:

$$\sigma'_h = K_A \sigma'_v - 2c' \sqrt{K_A} \quad \sigma'_h = K_P \sigma'_v + 2c' \sqrt{K_P}$$

a seconda che il collasso avvenga in spinta attiva o passiva rispettivamente. c' è la coesione drenata del terreno.

I parametri di deformabilità del terreno compaiono nella definizione della rigidità delle molle. Per un letto di molle distribuite la rigidità di ciascuna di esse, k , è data da:

$$k = E / L$$

ove E è un modulo di rigidità del terreno mentre L è una grandezza geometrica caratteristica. Poiché nel programma PARATIE le molle sono posizionate a distanze finite Δ , la rigidità di ogni molla è

$$K = E \Delta / L$$

Il valore di Δ è fornito dalla schematizzazione ad elementi finiti. Il valore di L è fissato automaticamente dal programma. Esso rappresenta una grandezza caratteristica che è diversa a valle e a monte della paratia perché diversa è la zona di terreno coinvolta dal movimento in zona attiva e passiva. Si è scelto, in zona attiva (uphill):

$$L_A = \frac{2}{3} \lambda_A \tan(45 - \phi'/2)$$

e in zona passiva (downhill):

$$L_P = \frac{2}{3} \lambda_P \tan(45 + \phi'/2)$$

$$\text{dove: } \lambda_A = \min\{l; 2H\} \quad \lambda_P = \min\{l - H; H\}$$

e dove l = altezza totale della paratia e H = altezza corrente dello scavo. La logica di questa scelta è illustrata nella pubblicazione di Becci e Nova (1987).

Si assume in ogni caso un valore di H non minore di 1/10 dell'altezza totale della parete.

Il parametro E dipende dalla storia tensionale del sito nonché dall'incremento locale dello stato tensionale come illustrato in Becci e Nova (1987).

| | | |
|---|--|--------------------|
| Cod. elab.: 111GA203GA03ZRG003C | Titolo: Galleria artificiale San Cataldo | Data: Ottobre 2011 |
| Nome file: 0 san cataldo_relazione geotecnica | Relazione Geotecnica | Pagina 10 di 17 |

6.2 Spinta in presenza di sisma

Per la valutazione dell'effetto che il sisma induce nella spinta trasmessa dal terreno alle paratie, il software fa ricorso ad una metodologia di analisi pseudo-statica secondo cui l'azione sismica viene definita mediante un'accelerazione equivalente costante nello spazio e nel tempo. Le componenti orizzontale e verticale a_h e a_v dell'accelerazione equivalente vengono ricavate in funzione delle proprietà del moto sismico atteso nel volume di terreno significativo per l'opera. In particolare nel caso delle paratie è possibile trascurare l'accelerazione verticale assumendo $a_v = 0$, mentre l'accelerazione orizzontale può essere valutata mediante la relazione:

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

dove:

- a_h componente orizzontale dell'accelerazione sismica
- k_h coefficiente sismico orizzontale
- g costante gravitazionale
- α coefficiente ricavabile in funzione dell'altezza complessiva della paratia e della categoria del sottosuolo tramite il diagramma riportato nella figura 7.11.2 delle NTC 2008
- β coefficiente funzione del massimo spostamento u_s che l'opera può tollerare senza riduzioni di resistenza, ricavabile dal diagramma riportato nella figura 7.11.3 delle NTC 2008. Per $u_s = 0$ si assume $\beta = 1$. Deve in ogni caso aversi $u_s \leq 0.005 \cdot H$. Inoltre se $\alpha \cdot \beta \leq 0.2$ si assume $k_h = 0.2 \cdot a_{max} / g$
- a_{max} accelerazione di picco valutata mediante analisi della risposta sismica locale mediante la relazione: $a_{max} = S_S \cdot S_T \cdot a_g$; essendo S_S ed S_T i coefficienti di amplificazione prima definiti e a_g l'accelerazione massima attesa su sito di riferimento rigido.

Di conseguenza per l'analisi strutturale della paratie sotto l'effetto del sisma si sono considerate complessivamente le seguenti azioni:

- $f_{h_{par}}$ forze sismiche orizzontali dovute alla massa delle paratie che emergono dal terreno,
- $\Delta\sigma_h$ incremento della spinta del terreno per effetto del sisma calcolato come differenza tra la spinta attiva sismica calcolata mediante il metodo di Mononobe-Okabe e la spinta statica. +

| | | |
|---|--|--------------------|
| Cod. elab.: 111GA203GA03ZRG003C | Titolo: Galleria artificiale San Cataldo | Data: Ottobre 2011 |
| Nome file: 0 san cataldo_relazione geotecnica | Relazione Geotecnica | Pagina 11 di 17 |

7 VERIFICHE DI STABILITÀ DEGLI SCAVI

Nel presente capitolo si riportano le verifiche di stabilità dei pendii in corrispondenza degli imbocchi della galleria. Per una descrizione più dettagliata delle caratteristiche del terreno di fondazione in corrispondenza della sezione in esame, si rimanda alla relazione geotecnica.

7.1 Criteri generali di verifica

Le verifiche di sicurezza devono essere effettuate con metodi che tengano conto della forma e posizione della superficie di scorrimento, dell'assetto strutturale, dei parametri geotecnici e del regime delle pressioni interstiziali.

Nel caso di pendii in frana le verifiche di sicurezza devono essere eseguite lungo le superfici di scorrimento che meglio approssimano quella/e riconosciuta/e con le indagini.

Negli altri casi, la verifica di sicurezza deve essere eseguita lungo superfici di scorrimento cinematicamente possibili, in numero sufficiente per ricercare la superficie critica alla quale corrisponde il grado di sicurezza più basso.

Quando sussistano condizioni tali da non consentire una agevole valutazione delle pressioni interstiziali, le verifiche di sicurezza devono essere eseguite assumendo le condizioni più sfavorevoli che ragionevolmente si possono prevedere.

Il livello di sicurezza è espresso, in generale, come rapporto tra resistenza al taglio disponibile, presa con il suo valore caratteristico, e sforzo di taglio mobilitato lungo la superficie di scorrimento effettiva o potenziale.

Il grado di sicurezza ritenuto accettabile dal progettista deve essere giustificato sulla base del livello di conoscenze raggiunto, dell'affidabilità dei dati disponibili e del modello di calcolo adottato in relazione alla complessità geologica e geotecnica, nonché sulla base delle conseguenze di un'eventuale frana.

La sicurezza strutturale è stata valutata nei confronti dei seguenti stati limite:

stati limite ultimi (SLU): capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e dissesti gravi, totali o parziali, che possano compromettere l'incolumità delle persone ovvero comportare la perdita di beni, ovvero provocare gravi danni ambientali e sociali, ovvero mettere fuori servizio l'opera;

In particolare, nel caso in esame, la stabilità dei pendii viene verificata nel rispetto del rispettivo stato limite ultimo di tipo geotecnico (GEO). In particolare, viene utilizzata la combinazione A2+M2+R2 in conformità a quanto previsto dal D.M. 14 Gennaio 2008.

7.2 Criteri generali di analisi

Nel presente paragrafo si riportano i risultati ottenuti nelle verifiche di stabilità del versante mediante l'ausilio del programma "Winstable" realizzato presso l'Università del Wisconsin – Madison. Tale programma è l'interfaccia grafica del programma risolutore STABL, scritto in Fortran elaborando il metodo di Bishop per la stabilità dei pendii.

La procedura che consente la ricerca della superficie critica si è dimostrata, in base a numerose applicazioni sia professionali che di ricerca particolarmente efficiente e flessibile. Infatti, oltre a consentire la schematizzazione di qualsiasi superficie topografica, permette di assegnare condizioni stratigrafiche particolarmente complesse, consente di simulare la presenza di orizzonti freatici comunque disposti ovvero di carichi esterni di qualsiasi intensità e comunque inclinati.

La particolarità di questo codice di calcolo automatico risiede soprattutto nella tecnica con cui vengono generate le superfici di prova tra le quali viene ricercata la superficie critica. La possibilità di schematizzare situazioni stratigrafiche, geometriche ed idrauliche molto complesse conferisce al programma di calcolo una grande flessibilità di applicazione.

| | | |
|---|--|--------------------|
| Cod. elab.: 111GA203GA03ZRG003C | Titolo: Galleria artificiale San Cataldo | Data: Ottobre 2011 |
| Nome file: 0 san cataldo_relazione geotecnica | Relazione Geotecnica | Pagina 12 di 17 |

Tra i vari metodi con cui può essere condotto il calcolo del coefficiente di sicurezza, è stato utilizzato il metodo di Bishop dal momento che è lecito ritenere che la superficie critica abbia forma sufficientemente prossima a quella circolare.

Le verifiche sono state condotte in ottemperanza a quanto previsto dal D.M. 14/1/2008 Norme Tecniche per le Costruzioni.

7.2.1 Fondamenti teorici del metodo di Bishop

Il metodo si basa sulla suddivisione della massa interessata dallo scivolamento in conci, su ognuno dei quali vengono applicate le equazioni di equilibrio della statica, dalle quali risulta:

Momento delle forze stabilizzanti:

$$M_s = r \sum_{i=1}^n (c \cdot l_i + N_i' \cdot \text{tg} \Phi)$$

(r = raggio della superficie di scivolamento)

Momento delle forze ribaltanti:

$$M_r = r \sum_{i=1}^n W_i \text{sen} \alpha_i$$

Il coefficiente di sicurezza è dato da: $F = \frac{M_s}{M_r}$

Il metodo di Bishop oltre a supporre la superficie circolare, fa l'ipotesi che la risultante in direzione verticale delle forze agenti sulle facce di ogni concio sia nulla, ossia:

$$X_i - X_{i-1} = 0$$

e la risultante $N' = N \cdot u$ è valutata facendo l'equilibrio in direzione verticale e scrivendo la relazione:

$$N_i' = \frac{W_i - u_i b_i - (1/F) c b_i \text{tg} \alpha_i}{\cos \alpha_i \left(1 + \frac{\text{tg} \alpha_i \text{tg} \Phi'}{F} \right)}$$

per cui si ottiene:

$$F = \frac{M_s}{M_r} = \frac{\sum_{i=1}^n [c b_i + (W_i - u_i b_i) \text{tg} \Phi'] \frac{1}{m_{\alpha}}}{\sum_{i=1}^n W_i \text{sen} \alpha_i}$$

con
$$m_{\alpha} = \cos \alpha \left(1 + \frac{\text{tg} \alpha \cdot \text{tg} \Phi'}{F} \right)$$

Il coefficiente di sicurezza F compare in tutte e due le parti della relazione e quindi la soluzione può essere raggiunta per approssimazioni successive, supponendo varie superfici di scivolamento ricavando la soluzione con il valore minimo di F .

Il numero di superfici generate sono maggiori di 500.

| | | |
|---|--|--------------------|
| Cod. elab.: 111GA203GA03ZRG003C | Titolo: Galleria artificiale San Cataldo | Data: Ottobre 2011 |
| Nome file: 0 san cataldo_relazione geotecnica | Relazione Geotecnica | Pagina 13 di 17 |

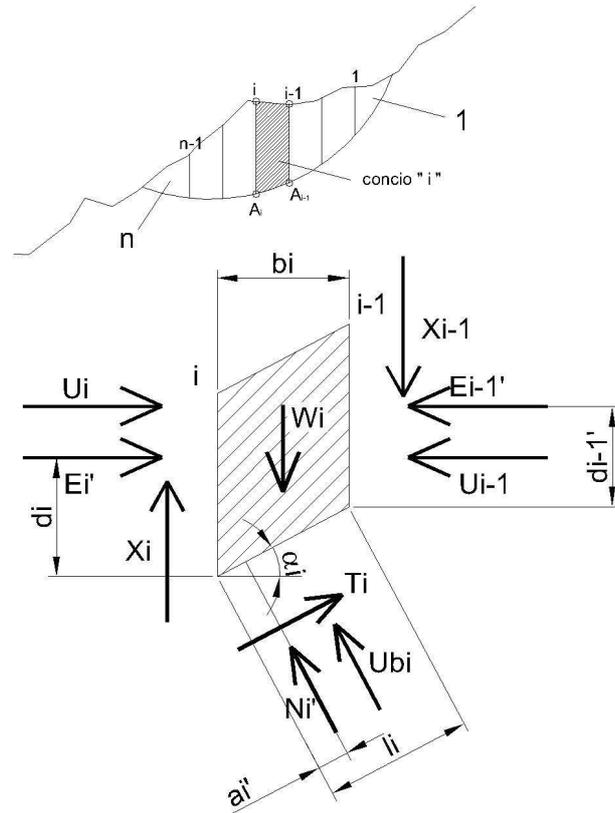


Figura 3 – Schema di Equilibrio del concio

7.3 Sezione analizzata

Si riporta la verifica della sezione più critica situata in corrispondenza della progressiva 11+570. Lo schema della sezione è riportato in Figura 4.

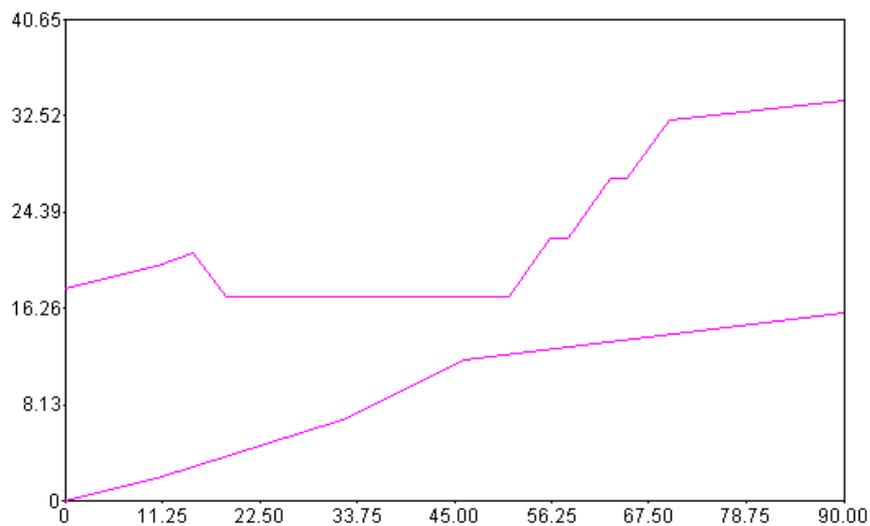


Figura 4- Sezione di verifica. Nel modello sono riportati i profili degli strati di terreno riportati nella relazione geotecnica.

Ai sensi del D.M. 14 Gennaio 2008 la verifica di stabilità viene condotta nella condizione A2+M2+R2. Inoltre, dal momento che le verifiche si riferiscono ad una situazione transitoria (a breve termine), la verifica di stabilità verrà condotta in condizioni non drenate e senza sisma.

7.3.1 Combinazioni delle azioni (A2)

Le verifiche vengono condotte allo stato limite ultimo, pertanto si utilizza la rispettiva combinazione di calcolo prevista dalla normativa vigente, ossia

$$\bullet \gamma_{G1}G_1 + \gamma_{G2}G_2 + \gamma_P P + \gamma_{Q1}Q_{k1} + \gamma_{Q2}\Psi_{02}Q_{k2} + \gamma_{Q3}\Psi_{03}Q_{k3} + \dots$$

I valori dei coefficienti γ nella combinazione A2 sono riportati in Tabella 7-1.

Tabella 7-1: Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

| | | γ_F | EQU | A1 STR | A2 GEO |
|---|-------------|---------------|-----|-----------|-----------|
| Carichi permanenti | favorevoli | γ_{G1} | 0.9 | 1.0 | 1.0 |
| | sfavorevoli | | 1.1 | 1.3 | 1.0 |
| Carichi permanenti non strutturali ¹ | favorevoli | γ_{G2} | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | sfavorevoli | | 1.5 | 1.5 | 1.3 |
| Carichi variabili | favorevoli | γ_{Qi} | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | sfavorevoli | | 1.5 | 1.5 | 1.3 |

¹Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti si potranno adottare per essi gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

Nel caso specifico sono presenti solo carichi permanenti pertanto $\gamma=1$.

7.3.2 Parametri geotecnici nella combinazione M2

I coefficienti da applicare ai parametri geotecnici nella condizione M2 sono riportati in Tabella 7-2. I valori di progetto dei parametri geotecnici sono riportati nella Tabella 7-3.

Tabella 7-2- Coefficienti da applicare ai parametri geotecnici nella combinazione M2

COEFFICIENTI DA APPLICARE NELLA COMBINAZIONE M2

| | γ_M |
|---|------------|
| Tangente dell'angolo di resistenza al taglio $\tan(\varphi')$ | M_2 1.25 |
| Coesione efficace, c' | M_2 1.25 |
| Coesione non drenata c_u | M_2 1.40 |
| Peso dell'unità di volume γ | M_2 1.00 |

Tabella 7-3 - Caratteristiche meccaniche del terreno di progetto

PARAMETRI GEOTECNICI NELLA COMBINAZIONE M2

| Strato 1: | | | | |
|---|----------|--------|--|-----------------|
| <i>peso proprio:</i> | γ | 22.60 | | kN/m^3 |
| <i>resistenza a taglio non drenata:</i> | c_u | 130.00 | | kN/m^2 |
| <i>coesione:</i> | c' | 18.40 | | kN/m^2 |
| <i>angolo d'attrito:</i> | ϕ' | 16.61 | | gradi |
| Strato 2: | | | | |
| <i>peso proprio:</i> | γ | 20.40 | | kN/m^3 |
| <i>resistenza a taglio non drenata:</i> | c_u | 177.86 | | kN/m^2 |
| <i>coesione:</i> | c' | 29.60 | | kN/m^2 |
| <i>angolo d'attrito:</i> | ϕ' | 19.86 | | gradi |

7.3.3 Coefficiente di sicurezza R2

Ai sensi del D.M. 14 Gennaio 2008, le verifiche di stabilità sono soddisfatte nel caso in cui il rapporto tra il momento stabilizzante e quello ribaltante sia maggiore di 1.1 ($R2=1.1$). Per maggiori dettagli sul calcolo del coefficiente di sicurezza si veda il § 7.2.1.

7.4 Risultati delle verifiche

Come si evince dalla Figura 5 il minore fattore di sicurezza è $2.25 > 1.1$. Pertanto, la verifica di stabilità del pendio è soddisfatta.

| | | |
|---|--|--------------------|
| Cod. elab.: 111GA203GA03ZRG003C | Titolo: Galleria artificiale San Cataldo | Data: Ottobre 2011 |
| Nome file: 0 san cataldo_relazione geotecnica | Relazione Geotecnica | Pagina 16 di 17 |

PROGETTO ESECUTIVO

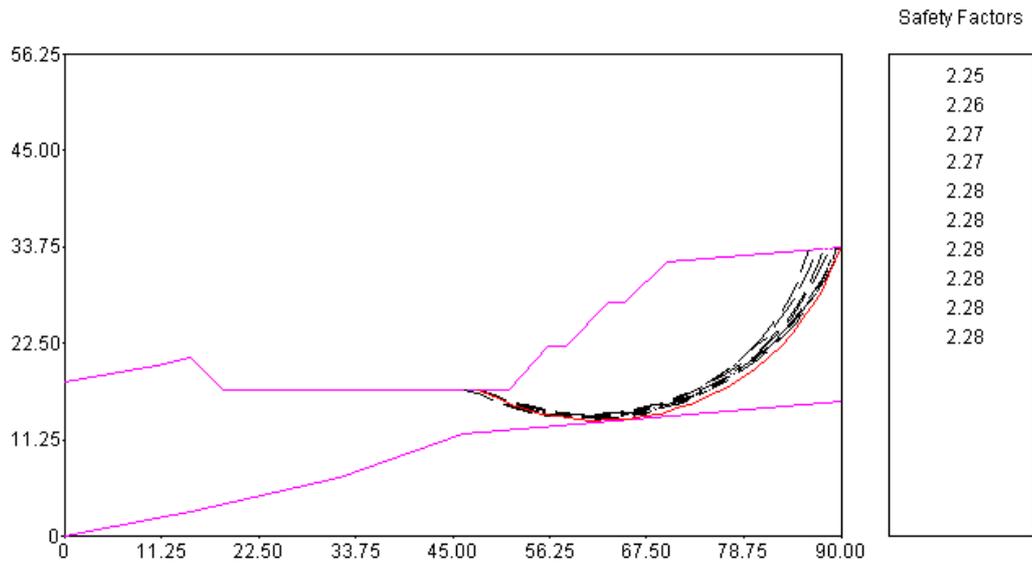


Figura 5- Primi dieci fattori di sicurezza e rispettive superfici di rottura. La superficie cui corrisponde il minor fattore di sicurezza è rappresentata in rosso (linea continua)

| | | |
|---|--|--------------------|
| Cod. elab.: 111GA203GA03ZRG003C | Titolo: Galleria artificiale San Cataldo | Data: Ottobre 2011 |
| Nome file: 0 san cataldo_relazione geotecnica | Relazione Geotecnica | Pagina 17 di 17 |