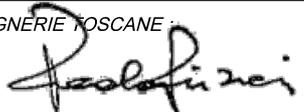


**INTERVENTI DI ADEGUAMENTO DELLA DIGA DI GIUDEA
A GELLO NEL COMUNE DI PISTOIA (PT)**



PROGETTO DEFINITIVO

| | | |
|-------------|---|------------|
| Elaborato | Nome Elaborato: | Scala: |
| ET11 | RELAZIONE VERIFICHE DI STABILITÀ FRONTI DI SCAVO | - |
| | | Data: |
| | | 27/12/2019 |

| | | | |
|---|--|---|--|
| Settore: | | Sede Firenze Via de Sanctis, 49 Cod. Fiscale e P.I. 06111950488 | |
|  | | <small>Organizzazione dotata di Sistema di Gestione Integrato certificato in conformità alla normativa ISO9001 - ISO14001 - OHSAS18001 - SA8000</small> | |
| PROGETTAZIONE : PROGETTISTA - PROJECT MANAGER : ING. GIOVANNI SIMONELLI | | COLLABORATORI : DOTT. GEOL. CARLO FERRI GEOM. MATTEO MASI | |
| GEOLOGO: DOTT. GEOL. FILIPPO LANDINI ESPROPRI: GEOM. ANDREA PATRIARCHI | |  | |
| CONSULENTI TECNICI :  ING. DAVID SETTESOLDI | |  DOTT. GEOL. SIMONE FIASCHI | |
|  ING. GIOVANNI CANNATA | | COMMESSA I.T. : INGT-TPLPD-PBAAC252 | |
| DIRETTORE TECNICO INGEGNERIE TOSCANES :  | | RESPONSABILE COMMITTENTE : ING. CRISTIANO AGOSTINI | |
| ING. PAOLO PIZZARI | | RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO : ING. LEONARDO ROSSI | |

| Rev. | Data | Descrizione / Motivo della revisione | Redatto | Controllato / Approvato |
|------|------------|--------------------------------------|---------|-------------------------|
| 01 | 27/12/2019 | Prima Emissione | Catella | Settesoldi |

INDICE

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | PREMESSA | 3 |
| 2 | NORMATIVA DI RIFERIMENTO | 4 |
| 3 | VERIFICHE DI STABILITÀ | 7 |
| 4 | PERICOLOSITÀ SISMICA..... | 8 |
| 4.1 | RISPOSTA SISMICA LOCALE | 8 |
| 4.1.1 | <i>Spettri di risposta in accelerazione</i> | <i>8</i> |
| 4.2 | COEFFICIENTI PARZIALI IN CONDIZIONI SISMICHE..... | 10 |
| 5 | PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI | 11 |
| 6 | DESCRIZIONE DEI METODI DI CALCOLO | 12 |
| 6.1 | METODO DI BISHOP | 12 |
| 7 | CONDIZIONI DI VERIFICA E SINTESI RISULTATI | 13 |

ELENCO FIGURE

| | |
|--|---|
| Figura 1-1 – Planimetria sezioni di verifica (scala 1:1'000)..... | 5 |
| Figura 1-2 – Profilo stratigrafico fronte di scavo sezione corpo diga CR_08. | 6 |
| Figura 1-3 – Profilo stratigrafico fronte di scavo sezione canale scolmatore SF012. | 6 |
| Figura 4-1 – Spettri di risposta in accelerazione SLD (Tr = 35 anni)..... | 9 |
| Figura 4-2 – Spettri di risposta in accelerazione SLV (Tr = 332 anni)..... | 9 |

ELENCO TABELLE

| | |
|--|----|
| Tabella 4-1 – Parametri sismici di base SLD e SLC. | 8 |
| Tabella 4-2 – Parametri dello spettro di risposta normalizzato ottenuto dalla risposta sismica locale..... | 8 |
| Tabella 5-1 – Parametri geotecnici caratteristici. | 11 |
| Tabella 7-1 – Verifiche di stabilità fronte di scavo diga condotte secondo N.T.C. 2018 per la sezione CR_08. | 13 |
| Tabella 7-2 – Verifiche di stabilità fronti di scavo scolmatore condotte secondo N.T.C. 2018 per la sezione SF012..... | 14 |

1 PREMESSA

La presente relazione espone i risultati delle verifiche di stabilità dei fronti di scavo del paramento di valle del corpo diga nel corso della realizzazione del dreno e dei versanti nel corso della realizzazione del canale scolmatore.

Le verifiche sono condotte per le seguenti sezioni:

- sezione CR_08 per il corpo diga;
- sezione SF012 per il canale scolmatore.

Le verifiche di stabilità sono state condotte con il programma Stap Terreni 14.0 della Aztec.

La planimetria delle sezioni di verifica è riportata nella Figura 1-1.

Nella Figura 1-2 è rappresentato il profilo della sezione di scavo in corrispondenza del corpo diga (sezione CR_08) con le stratigrafie dei terreni costituenti lo sbarramento e la fondazione.

Nella Figura 1-3 è riprodotto il profilo della sezione di scavo del canale scolmatore (sezione SF012) con le stratigrafie del terreno ed i profili dello stato attuale e di progetto.

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Tutte le verifiche sono condotte nel rispetto della normativa vigente:

- **Legge n. 64 del 02/02/1974**
Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche.
- **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.
- **D.M. 16 Gennaio 1996**
Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche.
- **Circolare Ministero LL.PP. 15 Ottobre 1996 N. 252 AA.GG./S.T.C.**
Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche di cui al D.M. 9 Gennaio 1996.
- **Circolare Ministero LL.PP. 10 Aprile 1997 N. 65/AA.GG.**
Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche di cui al D.M. 16 Gennaio 1996.
- **Norme Tecniche per le Costruzioni 2008 (D.M. 14 Gennaio 2008)**
- **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.
- **Norme Tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (D.M. 26 Giugno 2014)**
- **Norme tecniche per le costruzioni (D.M. 17 Gennaio 2018)**
- **Istruzioni MIT DG Dighe Luglio 2019**
Istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26 Giugno 2014 e al D.M. 17 Gennaio 2018 in merito alle verifiche sismiche delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere accessorie.
- **Procedura MIT DG Dighe Marzo 2019**
Procedura per la rivalutazione sismica delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere accessorie.
- **Circolare n. 7 del 21/01/2019**
Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17 gennaio 2018.

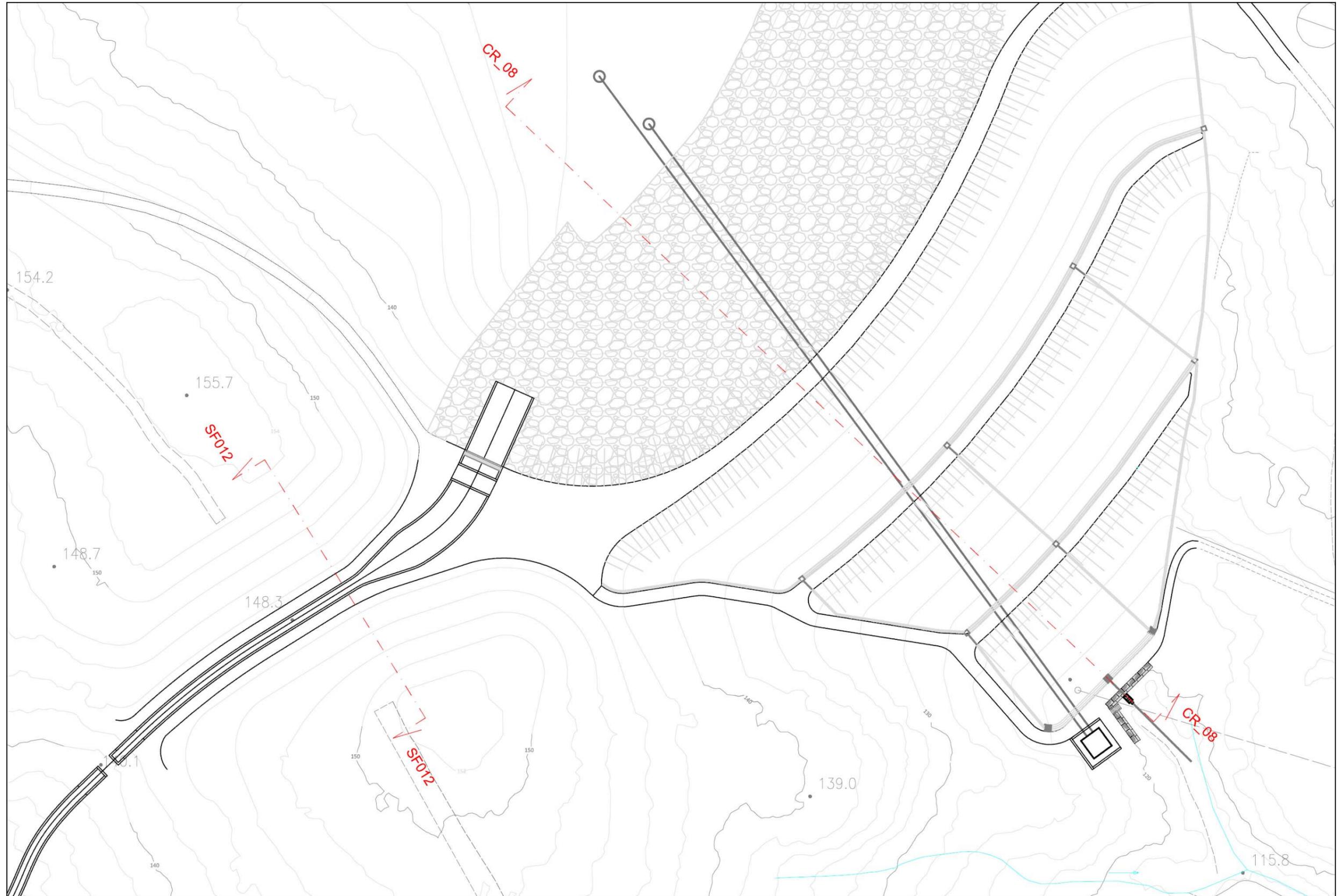


Figura 1-1 – Planimetria sezioni di verifica (scala 1:1'000).

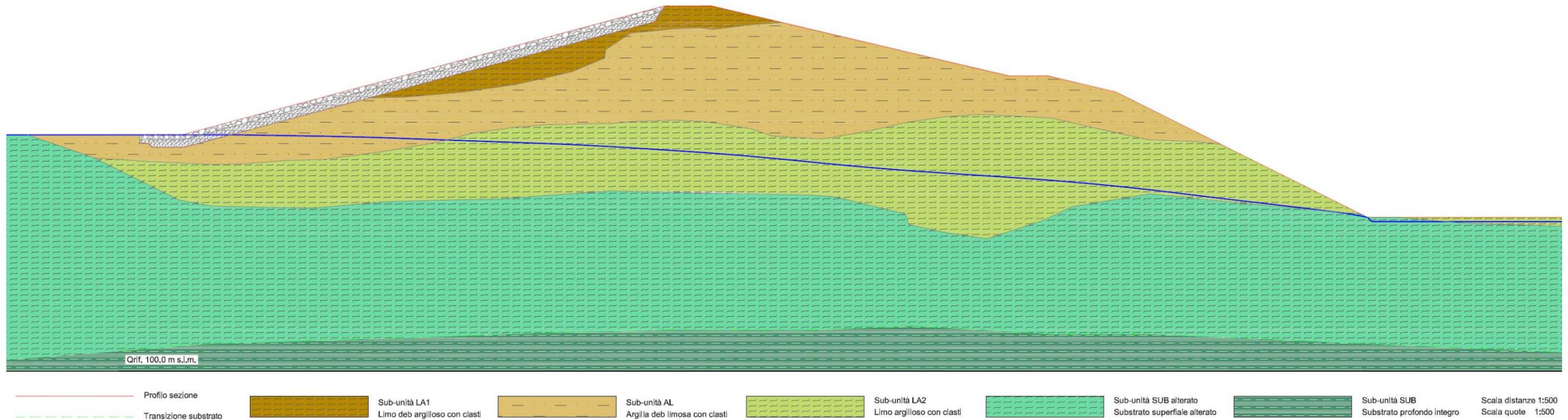


Figura 1-2 – Profilo stratigrafico fronte di scavo sezione corpo diga CR_08.

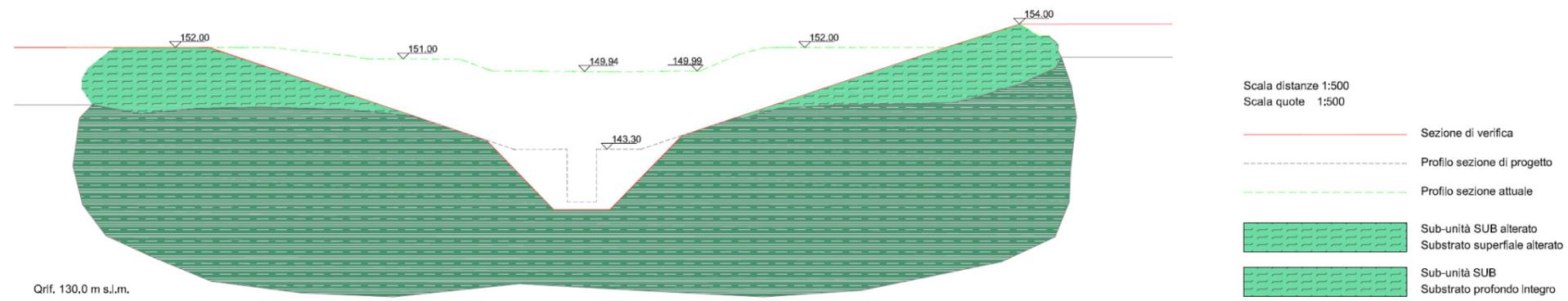


Figura 1-3 – Profilo stratigrafico fronte di scavo sezione canale scolmatore SF012.

3 VERIFICHE DI STABILITÀ

Le verifiche di stabilità devono essere effettuate seguendo il seguente approccio:

- **Approccio 1: (A2+M2+R2)**

I coefficienti parziali γ_F relativi alle azioni sono indicati nella Tabella 6.2.I, mentre i coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno sono riportati nella Tabella 6.2.II.

Le resistenze di progetto γ_R sono definite nella Tabella 6.8.I.

| Carichi | Effetto | Coefficiente parziale γ_F (o γ_E) | EQU | (A1) STR | (A2) GEO |
|--------------------------------|-------------|--|-----|-------------|-------------|
| Permanenti | Favorevole | γ_{G1} | 0,9 | 1,0 | 1,0 |
| | Sfavorevole | | 1,1 | 1,3 | 1,0 |
| Permanenti non strutturali (1) | Favorevole | γ_{G2} | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| | Sfavorevole | | 1,5 | 1,5 | 1,3 |
| Variabili | Favorevole | γ_{Qi} | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Sfavorevole | | 1,5 | 1,5 | 1,3 |

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

Tabella 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni.

| Parametro | Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale | Coefficiente parziale γ_M | M1 | M2 |
|--|---|----------------------------------|-------------|------|
| Tangente dell'angolo di resistenza al taglio | $\tan \varphi'_k$ | $\gamma_{\varphi'}$ | 1,00 | 1,25 |
| Coesione efficace | c'_k | $\gamma_{c'}$ | 1,00 | 1,25 |
| Resistenza non drenata | c_{uk} | γ_{cu} | 1,00 | 1,40 |
| Peso dell'unità di volume | γ | γ_γ | 1,00 | 1,00 |

Tabella 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

| Verifica | Coefficiente parziale (R2) |
|-------------|------------------------------------|
| Scorrimento | $\gamma_R = 1,1$ |

Tabella 6.8.I - Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo.

4 PERICOLOSITÀ SISMICA

I parametri sismici del sito sono calcolati secondo le N.T.C. 2008 in base a quanto indicato al punto C2.4.3 della Circolare n. 7 del 21/01/2019.

Per la definizione della azioni sismiche, l'invaso di Gello è considerato come una **diga strategica** in quanto a prevalente utilizzazione potabile.

Per i fronti di scavo la **vita nominale** V_N è assunta pari a **10 anni** e il coefficiente d'uso C_U pari a 2, di conseguenza la **vita di riferimento** V_R è pari a **35 anni** in coerenza con la tabella C2.4.I della succitata Circolare.

I parametri sismici di base a_g , F_0 e T_c^* , riportati nella Tabella 4-1, sono ricavati per le seguenti coordinate:

- Longitudine FI: 43.960117 (ED50)
- Latitudine LA: 10.883661 (ED50)

| Stato limite | P_{Vr} [%] | T_r [anni] | a_g [g] | a_g [m/s ²] | F_0 | T_c^* [s] |
|--------------|-----------------|-----------------|--------------|------------------------------|-------|----------------|
| SLD | 63 | 35 | 0.059 | 0.579 | 2.476 | 0.253 |
| SLV | 10 | 332 | 0.152 | 1.491 | 2.407 | 0.283 |

Tabella 4-1 – Parametri sismici di base SLD e SLC.

4.1 RISPOSTA SISMICA LOCALE

Al fine di aumentare il grado di accuratezza nella previsione dei fenomeni di amplificazione, le azioni sismiche considerate nella presente progettazione sono determinate mediante un'analisi di risposta sismica locale.

Come riportato negli elaborati ET.04, la risposta sismica locale ha permesso di definire le modifiche che il segnale sismico subisce, a causa delle caratteristiche topografiche e stratigrafiche del sito in oggetto, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

4.1.1 SPETTRI DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE

Nella Tabella 4-2 sono riportati, per ciascuno stato limite, il coefficiente amplificativo S , il periodo T_b e il periodo T_c dello spettro di risposta normalizzato ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale

| Stato limite | S | T_b [s] | T_c [s] |
|--------------|-------|--------------|--------------|
| SLD | 1.630 | 0.112 | 0.279 |
| SLV | 1.940 | 0.117 | 0.186 |

Tabella 4-2 – Parametri dello spettro di risposta normalizzato ottenuto dalla risposta sismica locale.

Nelle figure seguenti sono riportati i confronti tra lo spettro di risposta in accelerazione derivante dalla media degli spettri ottenuti dai n. 7 accelerogrammi utilizzati come input e gli spettri di normativa per le categorie di sottosuolo B e C, nonché lo spettro di risposta ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale normalizzato.

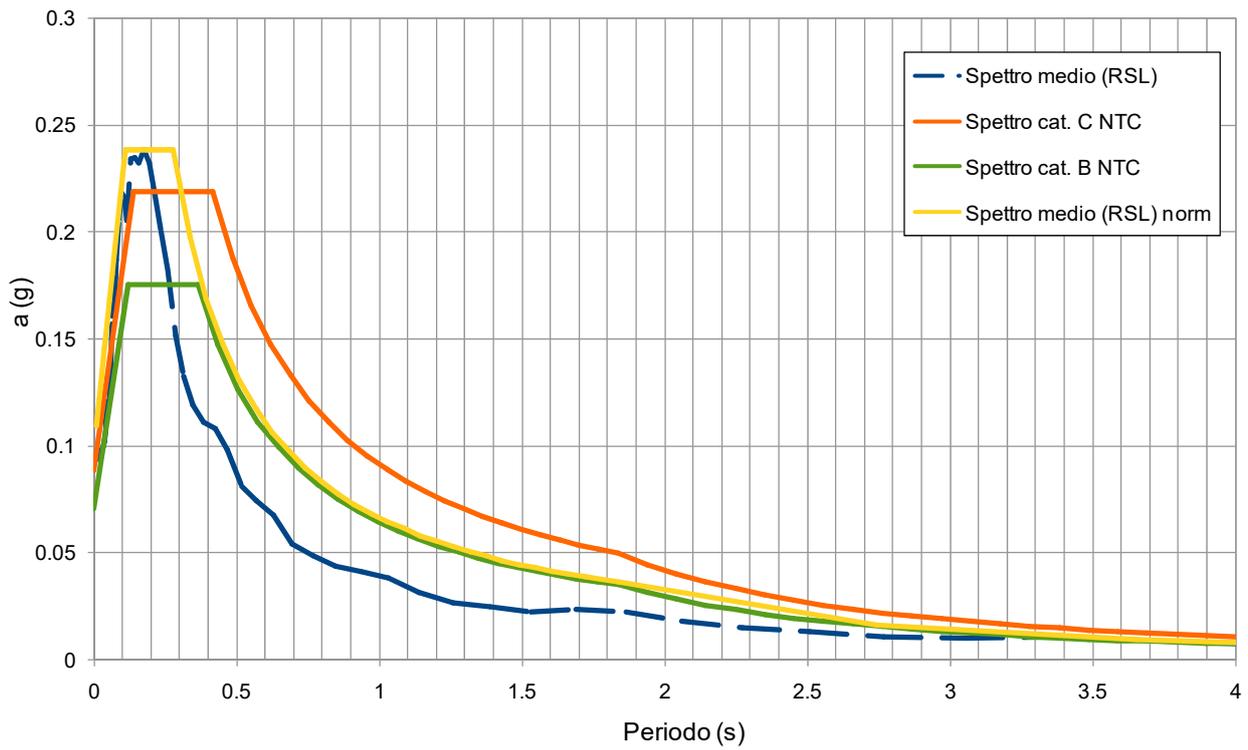


Figura 4-1 – Spettri di risposta in accelerazione SLD (Tr = 35 anni).

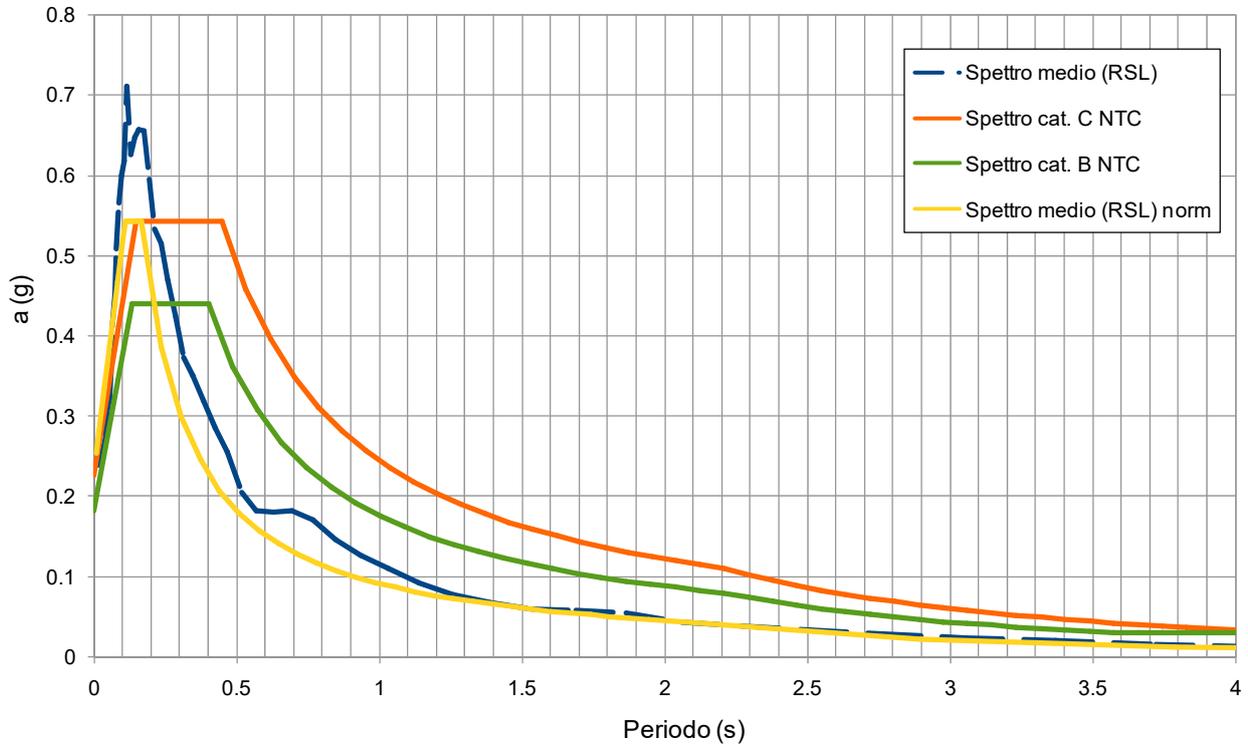


Figura 4-2 – Spettri di risposta in accelerazione SLV (Tr = 332 anni).

4.2 COEFFICIENTI PARZIALI IN CONDIZIONI SISMICHE

Il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima β_s attesa al sito è assunto pari a **0.38** nelle verifiche dello stato limite ultimo (SLV) e pari a **0.47** in quelle dello stato limite di esercizio (SLD) secondo quanto riportato al punto 7.11.4 delle N.T.C. 2018.

In condizioni sismiche sono applicati i coefficienti parziali per le azioni e per i parametri geotecnici definiti dalle N.T.C. 2018 come indicato al punto 7.11.1 per cui le verifiche agli stati limite ultimi devono essere effettuate ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale $\gamma_R = 1.2$.

5 PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI

Come riportato nell'elaborato ET.06, la caratterizzazione parametrica dei materiali delle singole sub-unità è basata sulle risultanze delle indagini geognostiche in sito e di laboratorio appositamente eseguite per l'intervento in oggetto.

I parametri dei materiali adottati nel corso della presente progettazione definitiva sono rappresentati dai valori medi (V_m), avendo assunto che i parametri caratteristici (V_k) siano prossimi ai parametri nominali medi ($V_m \approx V_k$) per ciascuna sub-unità geotecnica.

Dal punto di vista geotecnico lo sbarramento della diga nello stato di progetto e lo scolmatore sono suddivisi nelle seguenti sub-unità (vedere Figura 1-2 e Figura 1-3):

- sub-unità LA1: corpo diga costituito da limi debolmente argillosi con clasti;
- sub-unità AL: corpo diga formato da argille debolmente limose con clasti;
- sub-unità LA2: corpo diga composto da limi argillosi con clasti;
- sub-unità SUB¹: substrato corpo diga caratterizzato dalla presenza di argillite con livello marnoso.

I parametri geotecnici caratteristici impiegati nelle verifiche di stabilità sono riassunti nella Tabella 5-1.

| Parametri geotecnici | Unità di misura | Sub-unità LA1 | Sub-unità AL | Sub-unità LA2 | Sub-unità SUB |
|-----------------------|-------------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| Peso di volume | kg/m ³ | 2045 | 1936 | 2109 | 2169 |
| Peso di volume saturo | kg/m ³ | 2045 | 1936 | 2109 | 2169 |
| ϕ' | ° | 21.6 | 24.2 | 23.4 | 23.6 |
| c' | kPa | 24.0 | 23.0 | 22.0 | 24.0 |
| ϕ_u | ° | – | – | – | – |
| c_u | kPa | 74.0 | 76.0 | 73.0 | 146.0 |

Tabella 5-1 – Parametri geotecnici caratteristici.

¹ Nelle verifiche di stabilità dei fronti di scavo del canale scolmatore è introdotta, al solo scopo di rappresentare la suddivisione tra la parte di substrato alterata e quella non alterata, una ulteriore sub-unità SUB2 con caratteristiche analoghe a quella della sub-unità SUB.

6 DESCRIZIONE DEI METODI DI CALCOLO

Le verifiche di stabilità sono condotte con il programma STAP 14.0 prodotto dalla Aztec Informatica.

Le verifiche di stabilità sono eseguite con il metodo di *Bishop*.

Viene usata la tecnica della suddivisione a strisce della superficie di scorrimento da analizzare.

In particolare il programma esamina un numero di superfici che dipende dalle impostazioni fornite e che sono riportate nella corrispondente sezione. Il processo iterativo permette di determinare il coefficiente di sicurezza di tutte le superfici analizzate.

Nella descrizione dei metodi di calcolo si adatterà la seguente simbologia:

| | |
|------------|--|
| l | lunghezza della base della striscia |
| α | angolo della base della striscia rispetto all'orizzontale |
| b | larghezza della striscia $b = l \times \cos(\alpha)$ |
| ϕ | angolo di attrito lungo la base della striscia |
| c | coesione lungo la base della striscia |
| γ | peso di volume del terreno |
| u | pressione neutra |
| W | peso della striscia |
| N | sforzo normale alla base della striscia |
| T | sforzo di taglio alla base della striscia |
| E_s, E_d | forze normali di interstriscia a sinistra e a destra |
| X_s, X_d | forze tangenziali di interstriscia a sinistra e a destra |
| E_a, E_b | forze normali di interstriscia alla base ed alla sommità del pendio |
| ΔX | variazione delle forze tangenziali sulla striscia $\Delta X = X_d - X_s$ |
| ΔE | variazione delle forze normali sulla striscia $\Delta E = E_d - E_s$ |

6.1 METODO DI BISHOP

Il coefficiente di sicurezza nel metodo di *Bishop* semplificato è espresso secondo la seguente formula:

$$F = \frac{\sum_i \left[\frac{c_i b_i + (N_i / \cos(\alpha_i) - u_i b_i) \tan(\phi_i)}{m} \right]}{\sum_i W_i \sin(\alpha_i)}$$

dove il termine m è espresso da:

$$m = \left(1 + \frac{\tan(\phi_i) \cdot \tan(\alpha_i)}{F} \right) \cos(\alpha_i)$$

in cui n è il numero delle strisce considerate, b_i e α_i sono la larghezza e l'inclinazione della base della striscia i -esima rispetto all'orizzontale, W_i è il peso della striscia i -esima, c_i e ϕ_i sono le caratteristiche del terreno (coesione ed angolo di attrito) lungo la base della striscia e u_i è la pressione neutra lungo la base della striscia.

L'espressione del coefficiente di sicurezza di *Bishop* semplificato contiene al secondo membro il termine m che è funzione di F .

Quindi, essa viene risolta per successive approssimazioni assumendo un valore iniziale per F da inserire nell'espressione di m ed iterare fin quando il valore calcolato coincide con il valore assunto.

7 CONDIZIONI DI VERIFICA E SINTESI RISULTATI

Le verifiche di stabilità sono condotte per il fronte di scavo sul paramento di valle dello sbarramento e per entrambi i fronti di scavo destro e sinistro del canale scolmatore in corrispondenza delle sezioni riportate nella planimetria di Figura 1-1 –.

Per il fronte di scavo del corpo diga sono individuate n. 3 verifiche:

- **Verifica 01:** verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico 2000 kg/m² sul coronamento; senza sisma; serbatoio vuoto.
- **Verifica 02:** verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m² sul coronamento; con sisma SLD; serbatoio vuoto.
- **Verifica 03:** verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico coronamento 2000 kg/m² sul coronamento; con sisma SLV; serbatoio vuoto.

Per i fronti di scavo del canale scolmatore sono individuate n. 6 verifiche:

- **Verifica 01:** verifica sponda destra, verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico 2000 kg/m² sulla sommità dello scavo; senza sisma; con falda a 128.0 m s.l.m..
- **Verifica 02:** verifica sponda destra, verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico 2000 kg/m² sulla sommità dello scavo; con sisma SLD; con falda a 128.0 m s.l.m..
- **Verifica 03:** verifica sponda destra, verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico 2000 kg/m² sulla sommità dello scavo; con sisma SLV; con falda a 128.0 m s.l.m..
- **Verifica 04:** verifica sponda sinistra, verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico 2000 kg/m² sulla sommità dello scavo; senza sisma; con falda a 128.0 m s.l.m..
- **Verifica 05:** verifica sponda sinistra, verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico 2000 kg/m² sulla sommità dello scavo; con sisma SLD; con falda a 128.0 m s.l.m..
- **Verifica 06:** verifica sponda sinistra, verifica a breve termine tensioni totali; sovraccarico 2000 kg/m² sulla sommità dello scavo; con sisma SLV; con falda a 128.0 m s.l.m..

I risultati delle verifiche sono sintetizzati nella Tabella 7-1 per il fronte di scavo al piede del paramento di valle del corpo diga nella sezione CR_08 e nella Tabella 7-2 per entrambe le sponde del canale scolmatore in corrispondenza dello scavo della sezione SF012.

Tutte le verifiche sono state condotte nel rispetto della normativa vigente ed eseguite con il metodo di *Bishop*.

| n. [#] | Paramento | Cond. idrauliche | Sisma | Condizioni | F _s <i>Bishop</i> | NTC 2018 |
|-----------|-----------|---------------------|-------|-------------|---------------------------------|----------------|
| | | | | | | γ _R |
| 01 | Valle | Invaso vuoto | Senza | Non drenate | 1.342 | 1.1 |
| 02 | Valle | Invaso vuoto | SLD | Non drenate | 1.566 | 1.2 |
| 03 | Valle | Invaso vuoto | SLV | Non drenate | 1.221 | 1.2 |

Tabella 7-1 – Verifiche di stabilità fronte di scavo diga condotte secondo N.T.C. 2018 per la sezione CR_08.

| n. [#] | Sponda | Cond. idrauliche | Sisma | Condizioni | F_s <i>Bishop</i> | NTC 2018 |
|-----------|----------|---------------------|-------|-------------|------------------------|------------|
| | | | | | | γ_R |
| 01 | Destra | Falda | Senza | Non drenate | 2.053 | 1.1 |
| 02 | Destra | Falda | SLD | Non drenate | 2.450 | 1.2 |
| 03 | Destra | Falda | SLV | Non drenate | 1.972 | 1.2 |
| 04 | Sinistra | Falda | Senza | Non drenate | 2.304 | 1.1 |
| 05 | Sinistra | Falda | SLD | Non drenate | 2.772 | 1.2 |
| 06 | Sinistra | Falda | SLV | Non drenate | 2.335 | 1.2 |

Tabella 7-2 – Verifiche di stabilità fronti di scavo scolmatore condotte secondo N.T.C. 2018 per la sezione SF012.