

IMPIANTO DI CASTELNUOVO GARFAGNANA **DIGA DI PONTECOSI**

Servizi di Progettazione, direzione lavori e
sicurezza nel cantiere



RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

Maggio 2021

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

INDICE

| | | |
|------|--|----|
| 1. | INTRODUZIONE | 1 |
| 1.1. | GENERALE | 1 |
| 1.2. | CONTENUTO DEL PROGETTO PRELIMINARE | 3 |
| 2. | DOCUMENTI DI RIFERIMENTO | 5 |
| 3. | STATO DI FATTO | 6 |
| 3.1. | STORIA DELL'IMPIANTO | 6 |
| 3.2. | CARATTERISTICHE GENERALI | 7 |
| 3.3. | MATERIALI CORPO DIGA E FONDAZIONI | 10 |
| 3.4. | SOTTOPRESSIONI | 14 |
| 3.5. | VERIFICA SISMICA | 19 |
| 4. | INTERVENTI DI ADEGUAMENTO | 26 |
| 4.1. | INTRODUZIONE | 26 |
| 4.2. | INIEZIONI DI CONSOLIDAMENTO DEI CALCESTRUZZI | 26 |
| 4.3. | SISTEMA DI DRENAGGIO | 30 |
| 4.4. | RIEMPIMENTO CUNICOLO ESISTENTE E VANI PARATOIA | 31 |
| 4.5. | STRUTTURA DI CONTRASTO SULLO SFIORATORE | 32 |
| 4.6. | VERIFICHE SISMICHE IN CONDIZIONI FINALI | 33 |
| 5. | CONCLUSIONI | 41 |

LISTA delle FIGURE

| | |
|---|-----------|
| <i>Fig. 1-1: Foto aerea della diga, (SP, 2020, foto drone)</i> | <i>1</i> |
| <i>Fig. 3-1: Foto del serbatoio della diga (SP, 2020, foto drone).....</i> | <i>7</i> |
| <i>Fig. 3-2 : Diga di Pontecosi – sezione trasversale del tronco tracimabile.....</i> | <i>8</i> |
| <i>Fig. 3-3 : Diga di Pontecosi – sezione trasversale tipo di spalla.....</i> | <i>9</i> |
| <i>Fig. 3-4 : Planimetria della diga di Pontecosi.....</i> | <i>9</i> |
| <i>Fig. 3-5 : Prospetto da monte della diga di Pontecosi</i> | <i>10</i> |

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

| | |
|--|-----------|
| <i>Fig. 3-5: Calcestruzzo pila 6, Sondaggio S2, da 0 a 7 m, (Geotecnica Palazzi-Giomarelli srl, 2020)</i> | <i>11</i> |
| <i>Fig. 3-5: tomografie sismiche per i materiali nel corpo diga, le zone verdi indicano velocità delle onde sismiche piu' basse e quindi la presenza di difetti</i> | <i>12</i> |
| <i>Fig. 3-5: tomografia sismica per una sezione prossima a quella su cui insiste la diga, la tecnica MASW utilizza le onde di Rayleigh per determinare le velocità delle onde sismiche alle diverse profondità</i> | <i>13</i> |
| <i>Fig. 3-10 : Ubicazione dei piezometri</i> | <i>14</i> |
| <i>Fig. 3-11: Confronto retta condizioni senza drenaggio - dati misurati e ubicazione del piezometro PZ01</i> | <i>15</i> |
| <i>Fig. 3-12: Confronto retta condizioni senza drenaggio - dati misurati e ubicazione del piezometro PZ02</i> | <i>16</i> |
| <i>Fig. 3-13: Confronto retta condizioni senza drenaggio - dati misurati e ubicazione del piezometro PZ03 e PZ03BIS</i> | <i>18</i> |
| <i>Fig. 3-14: Confronto retta condizioni senza drenaggio - dati misurati e ubicazione del piezometro PZ04 e PZ04BIS</i> | <i>19</i> |
| <i>Fig. 3-15: Confronto retta condizioni senza drenaggio - dati misurati e ubicazione del piezometro PZ05</i> | <i>19</i> |
| <i>Fig. 2.35: Tomografia sismica sulla pila 2, (Georisorse, 2020)</i> | <i>27</i> |
| <i>Fig. 3-15: Calcestruzzo pila 6, Sondaggio S2, da 0 a 7 m, (Geotecnica Palazzi-Giomarelli srl, 2020)</i> | <i>27</i> |
| <i>Fig. 4-1 : Schema iniezioni di consolidamento - particolare vista dei contrafforti</i> | <i>28</i> |
| <i>Fig. 4-2 : Schema iniezioni di consolidamento - particolare vista della soglia</i> | <i>29</i> |
| <i>Fig. 4-2 : interventi di progetto - profilo</i> | <i>30</i> |
| <i>Fig. 4-2 : Interventi di progetto – Sezione su scarico di fondo</i> | <i>31</i> |
| <i>Fig. 4-2 : Interventi di progetto – profilo su sezione di spalla (spalla sx)</i> | <i>31</i> |
| <i>Fig. 4-2 : struttura metallica di contrasto sullo sfioratore – profilo (in blu)</i> | <i>33</i> |
| <i>Fig. 4-2 : struttura metallica di contrasto sullo sfioratore – pianta (in blu)</i> | <i>33</i> |
| <i>Fig. 4-2 : struttura metallica di contrasto sullo sfioratore – sezione (in blu)</i> | <i>33</i> |
| <i>Fig. 4-1 : Schema iniezioni di consolidamento - particolare vista dei contrafforti</i> | <i>42</i> |
| <i>Fig. 4-2 : Schermo di iniezione e sistema di drenaggio – Sezione su scarico di fondo</i> | <i>42</i> |
| <i>Fig. 4-2 : struttura metallica di contrasto sullo sfioratore – pianta (in blu)</i> | <i>43</i> |

LISTA delle TABELLE

| | |
|--|-----------|
| <i>Tab. 3-2: Risultati dal modello di Hoek & Brown</i> | <i>13</i> |
| <i>Tab. 3-3: Parametri geotecnici dell'ammasso in fondazione</i> | <i>13</i> |
| <i>Tab. 8-1 : Combinazioni delle azioni per le diverse condizioni di carico – STATO LIMITE ULTIMO</i> | <i>20</i> |
| <i>Tab. 8-2 : Combinazioni delle azioni per le diverse condizioni di carico – STATO LIMITE DI ESERCIZIO</i> | <i>20</i> |
| <i>Tab. 8-3 : Pila 2 - Fattori di sicurezza allo scorrimento per combinazioni statiche e sismiche</i> | <i>21</i> |
| <i>Tab. 8-4 : Sezione di Spalla - Fattori di sicurezza allo scorrimento per combinazioni statiche e sismiche</i> | <i>21</i> |
| <i>Tab. 8-5 : Pila 2 - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Fondamentale</i> | <i>22</i> |
| <i>Tab. 8-6 : Sezione di Spalla - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Fondamentale</i> | <i>22</i> |
| <i>Tab. 8-7 : Pila 2 - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Sismiche (3-6)</i> | <i>23</i> |
| <i>Tab. 8-8 : Sezione di Spalla - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Sismiche (3-6)</i> | <i>23</i> |
| <i>Tab. 8-9 : Pila 2 - Tensioni principali – Paramento di Valle – comb. Sismiche (3-6)</i> | <i>24</i> |
| <i>Tab. 8-10 : Sezione di Spalla - Tensioni principali – Paramento di Valle – comb. Sismiche (3-6)</i> | <i>24</i> |
| <i>Tab. 8-1 : Combinazioni delle azioni per le diverse condizioni di carico – STATO LIMITE ULTIMO</i> | <i>34</i> |

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

| | |
|--|-----------|
| <i>Tab. 8-2 : Combinazioni delle azioni per le diverse condizioni di carico – STATO LIMITE DI ESERCIZIO.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Tab. 8-3 : Pila 2 - Fattori di sicurezza allo scorrimento per combinazioni statiche e sismiche.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Tab. 8-4 : Sezione di Spalla - Fattori di sicurezza allo scorrimento per combinazioni statiche e sismiche</i> | <i>35</i> |
| <i>Tab. 8-5 : Pila 2 - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Fondamentale</i> | <i>36</i> |
| <i>Tab. 8-6 : Sezione di Spalla - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Fondamentale</i> | <i>36</i> |
| <i>Tab. 8-7 : Pila 2 - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Sismiche (3-6).....</i> | <i>37</i> |
| <i>Tab. 8-8 : Sezione di Spalla - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Sismiche (3-6).....</i> | <i>37</i> |
| <i>Tab. 8-9 : Pila 2 - Tensioni principali – Paramento di Valle – comb. Sismiche (3-6).....</i> | <i>38</i> |
| <i>Tab. 8-10 : Sezione di Spalla - Tensioni principali – Paramento di Valle – comb. Sismiche (3-6).....</i> | <i>38</i> |
| <i>Tab. 8-3 : Pila 2 - Fattori di sicurezza allo scorrimento per combinazioni statiche e sismiche.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Tab. 8-4 : Sezione di Spalla - Fattori di sicurezza allo scorrimento per combinazioni statiche e sismiche</i> | <i>43</i> |

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

1. INTRODUZIONE

1.1. GENERALE

Il presente rapporto, che costituisce parte del Progetto Preliminare per l'adeguamento sismico della diga di Pontecosi presenta lo stato attuale dell'opera e descrive gli interventi proposti per il suo adeguamento alle norme vigenti.

Vengono discussi i risultati dei rilievi e delle indagini, la caratterizzazione sismica del sito e i risultati delle analisi sismiche effettuate ai sensi del DM 26 Giugno 2014 "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)". Si presentano poi gli interventi volti a sanare le insufficienze evidenziate da tali studi.

La diga di Pontecosi, situata nel comune di Pieve Fosciara, provincia di Lucca, fu costruita tra il 1923 e il 1925. L'opera sbarrava il corso del fiume Serchio determinando un serbatoio con capacità originaria totale di invaso di circa 2.95 Mm³ e capacità utile di regolazione di 1.51 Mm³. Il serbatoio è utilizzato per la regolazione settimanale delle portate derivate dal fiume Serchio per la produzione di energia elettrica nella centrale di Castelnuovo Garfagnana.

Si tratta una diga a gravità in calcestruzzo con andamento planimetrico rettilineo alta 33 m e sviluppo del coronamento di 140 m. La diga è attraversata da sette luci di scarico di fondo e di sghiaimento, con uno scarico di superficie in sponda destra.

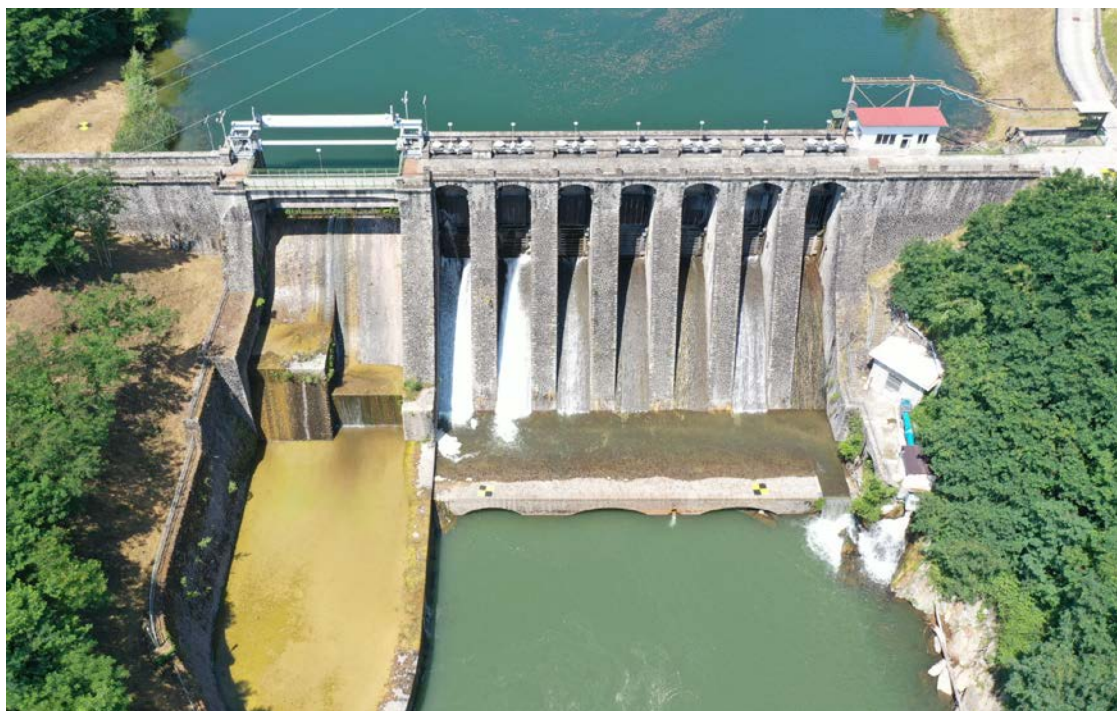


Fig. 1-1: Foto aerea della diga, (SP, 2020, foto drone)

Nella parte di valle, sia gli scarichi di fondo che lo sfioratore presentano un profilo idrodinamico con platea di protezione al piede. Sulle soglie poggiano sette paratoie di fondo, comprese fra robusti speroni di calcestruzzo

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

aventi un paramento di valle inclinato di 0.55 rispetto alla verticale, ed una paratoia di superficie. Le sette luci di scarico sono chiuse superiormente da diaframmi in calcestruzzo armato. Lo scarico di superficie è controllato da una paratoia radiale munita di ventola.

Il volume totale di calcestruzzo è pari a 25.000 m³, dosato con 300 kg/m³ per il paramento a monte e la relativa unghia (per uno strato dello spessore di 3 m circa) e 200 kg/m³, con l'aggiunta di blocchi di pietrame nella proporzione media del 13.5%, per il resto del corpo diga. La struttura non presenta giunti di contrazione.

I dati geometrici principali della diga sono:

| | | |
|---|--------|----------------|
| Quota piano coronamento | 314.00 | m s.l.m. |
| Altezza della diga (ai sensi del D.M. 24.03.82) | 33.00 | m |
| Altezza della diga (ai sensi della L. 584/94) | 24.00 | m |
| Altezza di massima ritenuta | 21.00 | m |
| Sviluppo del coronamento | 140.00 | m |
| Volume della diga | 25'000 | m ³ |

La diga è situata su un sito di marcata sismicità (ag per TR<475 anni =0.2g> 0.15g, pertanto secondo NTD2014 è stato richiesto studio sismo-tettonico).

La litologia prevalente per le fondazioni diga è composta dal Macigno, si tratta di bancate arenacee di spessore metrico, è una roccia compatta con discrete caratteristiche meccaniche e bassa permeabilità e quindi adeguata per le fondazioni di una diga a gravità.

Indagini effettuate sui calcestruzzi hanno evidenziato la presenza di alcune zone di calcestruzzo ciclopico povero di legante, permeabile, per le quali è opportuno prevedere degli interventi locali di ripristino delle condizioni originarie mediante iniezioni di consolidamento. Inoltre, le verifiche di vulnerabilità sismica per lo Stato Attuale hanno identificato delle insufficienze. Le verifiche per Stato Limite Ultimo di scorrimento, infatti, non sono soddisfatte per alcune condizioni sismiche. Le verifiche sulle tensioni nel corpo diga, per sisma monte valle hanno dato invece esito positivo. Tuttavia, verifiche in direzione destra sinistra hanno mostrato che senza un vincolo a livello di cresta (al momento non presente sullo scarico di superficie e quindi da fornire), le pile non soddisfano le verifiche a pressoflessione.

Per risolvere le carenze di cui sopra, sono stati previsti i seguenti interventi:

- Iniezioni e trattamenti per i calcestruzzi della diga, ottenendo al termine caratteristiche meccaniche sufficienti per soddisfare ai requisiti di sicurezza richiesti;
- Installazione di struttura di contrasto metallica in sponda destra, in corrispondenza dello scarico di superficie, per collegare le spalle massive alla parte a speroni e migliorare la prestazione sismica sotto azioni in direzione destra sinistra.
- Realizzazione di uno schermo di iniezioni e sistema di drenaggio efficace, con spaziatura e diametro secondo NTD2014, permettendo al termine di utilizzare per le verifiche le riduzioni sulle sottopressioni consentite dalla normativa;

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

Questa relazione illustrativa che descrive il Progetto Preliminare per la riabilitazione sismica della diga, è strutturata nei seguenti capitoli:

- Contenuto del Progetto preliminare: in questo capitolo sono elencati i documenti di cui si compone il Progetto Preliminare;
- Stato di fatto: viene descritto lo stato di fatto nelle sue condizioni attuali, sulla base dei disegni e dei rapporti resi disponibili dal Enel, oltre che sulla base delle indagini e delle verifiche analitiche svolte come parte del presente incarico;
- Interventi di adeguamento: in questo capitolo vengono descritti gli interventi di adeguamento, le motivazioni che hanno portato alla loro scelta, il modo in cui risolvono i problemi identificati;
- Conclusioni: commenta i risultati ottenuti ed presenta le conclusioni a cui si è arrivati.

1.2. CONTENUTO DEL PROGETTO PRELIMINARE

Il Progetto Preliminare degli interventi di adeguamento sismico per la diga di Pontecosi si compone della presente Relazione Illustrativa, delle relazioni specialistiche che sono state necessarie per la redazione del progetto e degli elaborati grafici che descrivono lo stato attuale e quello al termine del progetto di adeguamento dell'opera.

Il Progetto Preliminare si compone dei seguenti rapporti:

- 140 GEN R SP 001 Relazione Tecnica Illustrativa
- 112 GEO R SP 001 A – RELAZIONE GEOLOGICA
 - 112 GEO R SP 001 A - ANNESSO A - RELAZIONE GEOFISICA
 - 112 GEO R SP 001 A - ANNESSO B - TEST LAB ROCCE
- 111 MAT R SP 001 A - RELAZIONE MATERIALI
 - 111 MAT R SP 001 A - ANNESSO A - TEST LAB CLS
- 100 IND R SP 001A - RELAZIONE SULLE INDAGINI STRUTTURALI E GEOLOGICHE
- 113 GET R SP 001 A - RELAZIONE GEOTECNICA
- 120 SIT RSP 001 A - RELAZIONE SULLO STUDIO SISMOTETTONICO
- 130 STR R SP 002 A - VERIFICA STATICA E SISMICA - stato attuale
- 130 STR R SP 003 A - VERIFICA STATICA E SISMICA - stato di progetto

e dei seguenti disegni allegati:

- 110 TOP D SP 001 Planimetria generale, Rilievo Aerofotogrammetrico
- 110 TOP D SP 002 A Diga, Rilievo Aerofotogrammetrico
- 110 TOP D SP 003 A Diga, Planimetria di rilievo

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

- 110 TOP D SP 004 A Diga, Planimetria con rilievo aerofotogrammetrico diga
- 110 TOP D SP 005 A Diga, Profilo
- 110 TOP D SP 006 A Diga, Sezione trasversale
- 140 GEN D SP 001 A Progetto Preliminare – Consolidamento Corpo Diga
- 140 GEN D SP 002 A Progetto Preliminare – Interventi di Riabilitazione Profilo e Pianta
- 140 GEN D SP 003 A Progetto Preliminare – Interventi di Riabilitazione Sezioni Trasversali

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

I documenti di riferimento (normative, linee guida, studi precedenti) utilizzati per la redazione di questo studio sono:

NORMATIVE ITALIANE

- *MIT-DGD18. Istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26 giugno 2014 (NTD14) e del D.M. 17 gennaio 2018 (NTC18). Direzione generale per le dighe e infrastrutture idriche ed elettriche. Luglio 2018.*
- *NTC18. D.M. del 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni".*
- *Circolare applicativa NTC18. D.M. del 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni".*
- *MIT-DGD17. Note esplicative per le Verifiche Sismiche delle Grandi Dighe ai sensi del D.M. 26 giugno 2014 (NTD) e del D.M. 14 gennaio 2008 (NTC). Direzione generale per le dighe e infrastrutture idriche ed elettriche, Divisione 6 – Strutture e geotecnica. Marzo 2017.*
- *NTD14. D.M. del 26 giugno 2014. Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse).*

BIBLIOGRAFIA E STANDARD INTERNAZIONALI

- *Stone & Webster Engineering Corporation, "Uplift Pressures, Shear strength and Tensile Strengths for Stability Analysis of Concrete Gravity Dams", EPRI TR-100345, Project 2917-05, August 1992.*
- *Geotechnical Engineering of Dam, Taylor & Francis 2014.*
- *US Army Corps of Engineers 1995. Gravity dam design.*
- *United States Department of the Interior (bureau of reclamation) 1976. Design of gravity dams.*

DOCUMENTI DI PROGETTO ED INDAGINI – PONTECOSI

I documenti disponibili relativi al progetto sono i seguenti:

- [1] *1924, Progetto di derivazione dal fiume Serchio, da Pontecosi a Castelnuovo di Garfagnana – Disegni di costruzione*
- [2] *1980 – 2020, Enel, Serie Dati Storici (Perdite, Canne Drenanti, Collimazioni, Livellazioni, etc..)*
- [3] *1990, Ismes, Ispezione ai cunicoli di drenaggio*
- [4] *1999, Ing. G. Amedeo, Foglio di Condizioni per l'Esercizio e la Manutenzione – Diga di Pontecosi*
- [5] *2002, Enel, Installazione di piezometri nelle fondazione della diga di Pontecosi*
- [6] *2013, Enel, Caratterizzazione geotecnica materiali sedimentari a ridosso dello sbarramento*
- [7] *2015, Enel, Diga di Pontecosi – Rapporto tecnico conclusivo - Esecuzione di indagini geognostiche e geofisiche sul calcestruzzo e sulla roccia di fondazione della diga, installazione piezometri e perforazioni per iniezioni di impermeabilizzazione*
- [8] *2018, Enel, Rilievo batimetrico single beam (SBES) - Tav. 4 – Rilievo a ridosso delle opere*

Questa documentazione ci è stata trasmessa dal Cliente e Studio Ing. G. Pietrangeli S.r.l. non si assume alcuna responsabilità per perdite o danni subiti dal cliente o da terzi a causa di errori o inesattezze in tali dati.

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

3. STATO DI FATTO

3.1. STORIA DELL'IMPIANTO

Il progetto esecutivo dell'impianto risale all' Aprile 1921 ed è stato realizzato sulla base del disciplinare di concessione n.1698 del 19/07/1927 e n.2292 del 05/06/1930, approvato dal Cons. Superiore dei LL.PP. con nota n.844 del 14/04/1926 e n. 2470 del 15/10/1926.

La diga è stata costruita tra il 1923 e il 1925. Gli invasi sperimentali sono iniziati nel Giugno del 1925.

Il certificato di collaudo è stato redatto nel 1926 e la data di esercizio normale risale a Luglio del 1925.

Nel 1968, nel 1993 e nel 2015 sono state effettuate delle campagne di indagini sulla diga e le sue pertinenze, sia per la determinazione delle condizioni e delle caratteristiche dei materiali di costruzione e delle fondazioni, sia per la determinazione della permeabilità nel corpo diga. Inoltre, si è provveduto al prelievo di campioni su cui sono state poi effettuate prove di laboratorio.

Nel 1987 la paratoia a settore originale dello sfioro posto in destra è stata sostituita con una nuova paratoia a settore con ventola sovrapposta in quanto il suo funzionamento è risultato difettoso a causa dell'attrito sui perni e dell'inflessione della paratoia.

Tra il 1989 e il 1990 sono state eseguite delle ispezioni ai cunicoli di drenaggio presenti nella fondazione della diga allo scopo di verificare lo stato di conservazione del calcestruzzo e di localizzare i tratti con venute d'acqua ed eventuali fratture interessanti i cunicoli.

Nel 2002 sono state eseguite 4 perforazioni sul coronamento diga e 1 sulla spalla sinistra per l'installazione di 5 piezometri nelle fondazioni dello sbarramento. I fori eseguiti sono stati attrezzati con tubi piezometrici in PVC, fessurati per un tratto di 1.50 m, in modo da poter monitorare eventuali presenze d'acqua e i relativi movimenti.

Nel 2015 i piezometri PZ3 e PZ4 sono stati raddoppiati a seguito di un sospetto malfunzionamento degli stessi con l'installazione di due nuovi piezometri a tubo aperto denominati PZ3bis e PZ4bis.

Nel 2007 e nel 2018 sono stati effettuati dei rilievi batimetrici del lago di Pontecosi. Le indagini hanno interessato sia la zona della diga sia l'intero bacino per la verifica dello stato di interrimento del lago.

Nel 2012 l'Ufficio Tecnico per le dighe di Firenze ha prescritto l'esecuzione della caratterizzazione geotecnica dei materiali sedimentari accumulatisi a ridosso dello sbarramento, approfittando della condizione di svasso del medesimo. Sono stati eseguiti, quindi, due sondaggi a rotazione a carotaggio continuo a ridosso del piede di monte della diga e sui campioni estratti sono state effettuare le prove di laboratorio per la determinazione del peso di volume, del contenuto d'acqua, del peso specifico dei granuli. Inoltre, è stata eseguita l'analisi granulometrica completa e alcune prove di taglio diretto consolidato drenato.

Tra la fine del 2015 e l'inizio del 2016 sono state eseguite delle iniezioni sulla porzione della diga in destra dello scarico di superficie al fine di ridurre o eliminare le numerose perdite che sono state riscontrate negli

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

anni precedenti. Le perforazioni sono state praticate lungo n. 2 allineamenti paralleli al coronamento della diga, sfalsati di 50 cm l'uno dall'altro.

Lungo l'allineamento di monte, in fori di passo 0,50 m, sono state iniettate resine bicomponenti poliuretaniche espandenti, allo scopo di realizzare uno 'schermo' che, oltre a migliorare le caratteristiche di impermeabilità della struttura, evitasse colature e conseguenti dispersioni nell'invaso della boiacca iniettata nella fase successiva. Lungo l'allineamento di valle, in fori di passo 1 m, è stata quindi iniettata boiacca cementizia. L'intervento, purtroppo, è stato di limitata efficacia non avendo avuto effetti significativi sulle venute d'acqua sul paramento di valle.

In anni recenti la galleria di derivazione principale è stata dotata di una derivazione che alimenta una centralina subito a valle dello sbarramento. La centralina sfrutta il rilascio della portata ecologica.

3.2. CARATTERISTICHE GENERALI

Il serbatoio di Pontecosi sbarrà il corso del fiume Serchio ed è utilizzato per la regolazione settimanale delle portate derivate dal fiume per la produzione di energia elettrica nella centrale di Castelnuovo Garfagnana.

Le quote principali del serbatoio sono:

- 311 m s.l.m. massimo invaso
- 311 m s.l.m. massima regolazione
- 306 m s.l.m. minima regolazione



Fig. 3-1: Foto del serbatoio della diga (SP, 2020, foto drone)

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

La diga di Pontecosi è una diga a gravità in calcestruzzo con andamento planimetrico rettilineo alta 33 m e sviluppo del coronamento di 140 m. Essa è attraversata da sette luci di scarico di fondo e di sghiaiamiento, con scarico di superficie in sponda destra.

Nella parte di valle, sia gli scarichi di fondo che lo sfioratore presentano un profilo idrodinamico con platea di protezione al piede. Sulle soglie poggiano sette paratoie di fondo, comprese fra robusti speroni di calcestruzzo aventi un paramento di valle inclinato di 0.55 rispetto alla verticale, ed una paratoia di superficie. Le sette luci di scarico sono chiuse superiormente da diaframmi in calcestruzzo armato. Lo scarico di superficie è controllato da una paratoia radiale munita di ventola.

Le sette luci di scarico sono chiuse superiormente da diaframmi in calcestruzzo armato. Le parti laterali estreme della struttura sono a gravità massiccia.

Tutte le superfici sono rivestite con bognini di pietra arenaria.

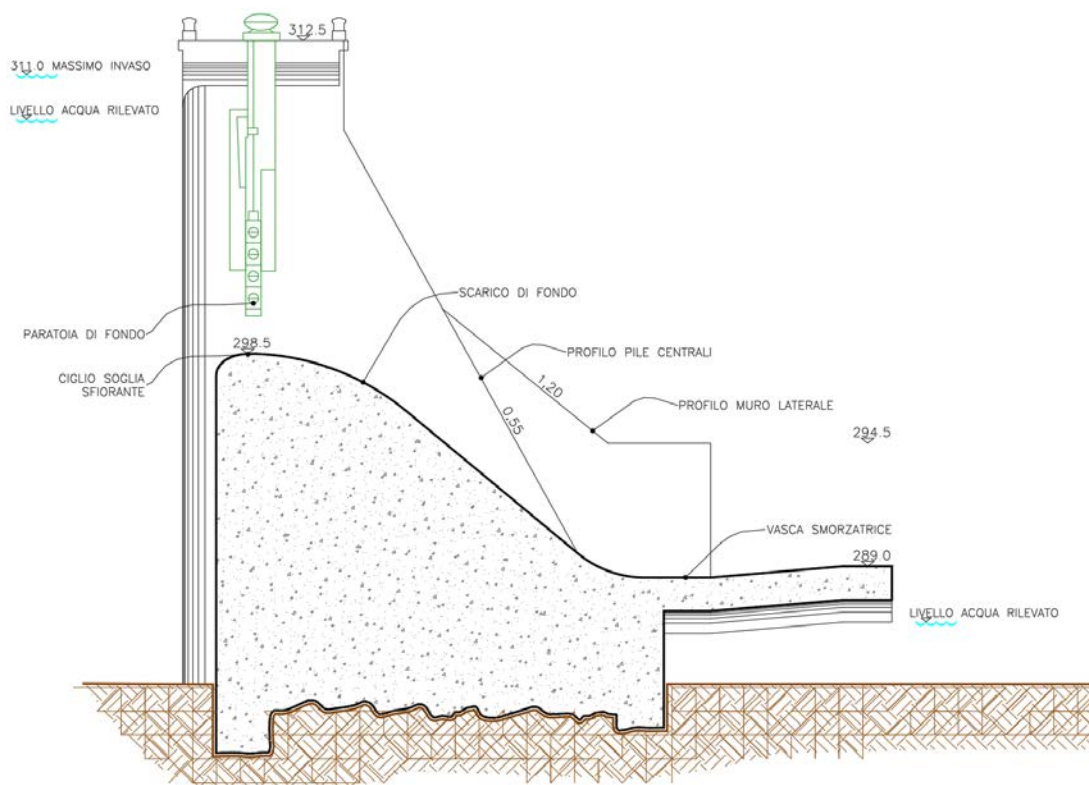


Fig. 3-2 : Diga di Pontecosi – sezione trasversale del tronco trascinabile

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

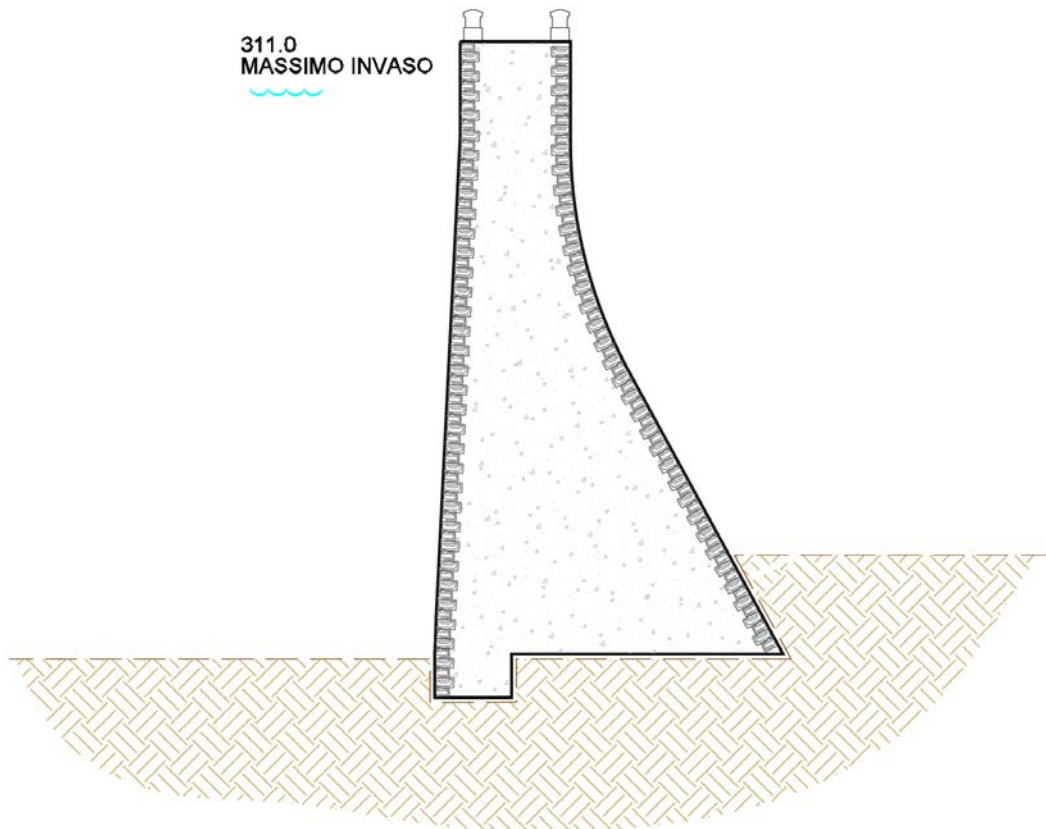


Fig. 3-3 : Diga di Pontecosi – sezione trasversale tipo di spalla

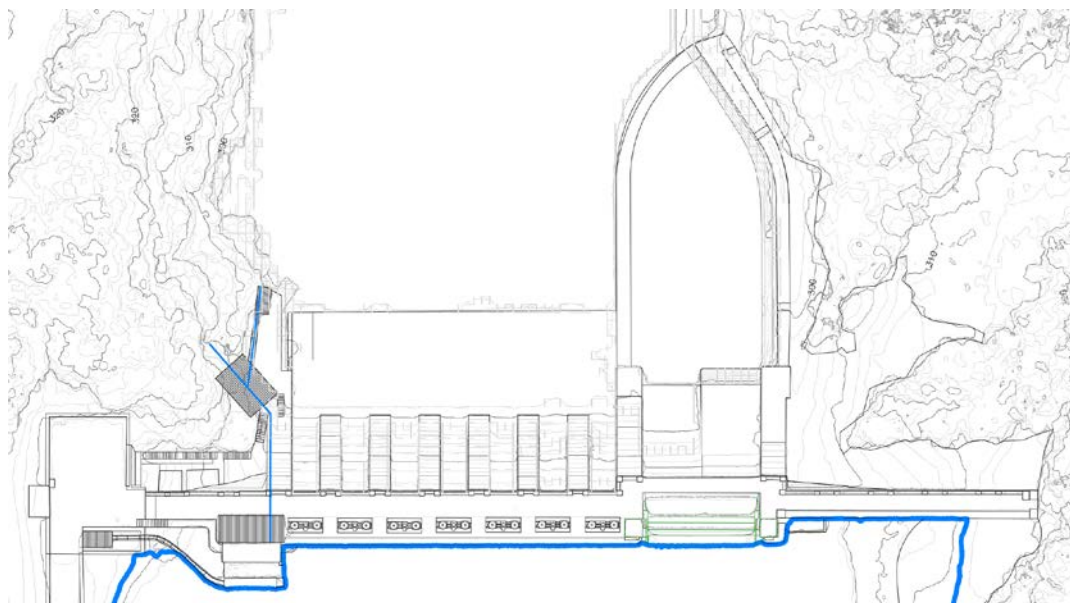


Fig. 3-4 : Planimetria della diga di Pontecosi

Il corpo diga è dotato delle seguenti opere di scarico:

- Scarico di superficie, è costituito da una luce in sponda destra con soglia a quota 306.50 m s.l.m chiusa da una paratoia a settore di 16.00x4.50 m manovrabile mediante trasmissione meccanica (catene) azionata da servomotore oleodinamico rotativo. La parte superiore della paratoia è costituita da una ventola di 14.48x1.96 m, ad apertura automatica idraulica autolivellante e volontaria con pistoni oleodinamici.

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

- Scarico di fondo, è costituito da sette luci collocate nella parte centrale dello sbarramento, con soglia a quota 300 m s.l.m. chiuse da paratoie piane di 4.00x4.00 m manovrabili con trasmissione meccanica (madrevite e vitone) mossa da servomotore oleodinamico rotativo.

La diga non dispone di un sistema di drenaggio.

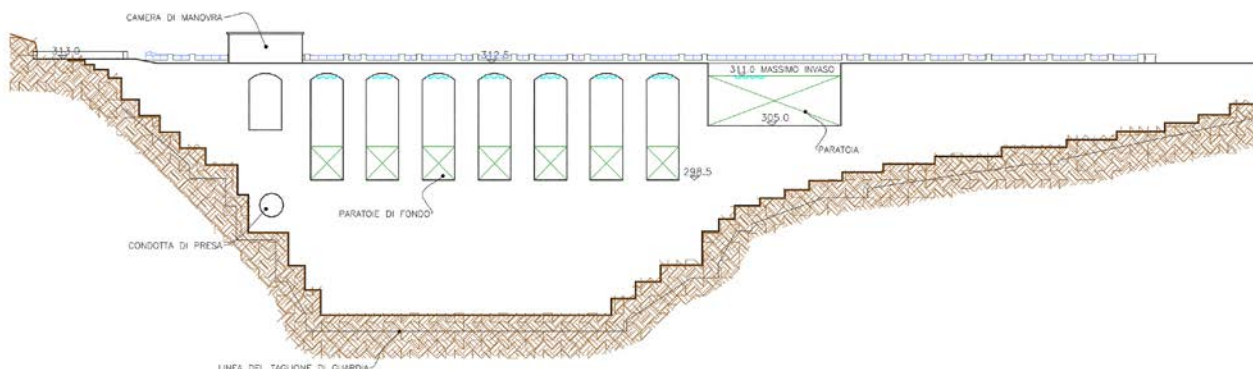


Fig. 3-5 : Prospetto da monte della diga di Pontecosi

La diga di Pontecosi è situata su un sito di marcata sismicità (ag per $TR < 475$ anni $= 0.2g > 0.15g$, pertanto secondo NTD2014 è stato richiesto studio sismo-tettonico). L'analisi della risposta sismica locale, condotta in tale studio ha evidenziato che lo spettro di rischio uniforme (UHS) da utilizzare per la verifica della diga è ben al di sopra di quello di base delle norme NTC per lo stesso sito, mostrando che il rischio sismico della zona è più elevato di quanto indicato nella mappatura INGV, soprattutto per il range frequenze di vibrazione proprie della diga.

La litologia prevalente per le fondazioni diga è composta dal Macigno, si tratta di bancate arenacee di spessore metrico, è una roccia compatta con discrete caratteristiche meccaniche e bassa permeabilità e quindi adeguata per le fondazioni di una diga a gravità.

3.3. MATERIALI CORPO DIGA E FONDAZIONI

Nel corso degli anni diverse campagne indagini hanno interessato i materiali del corpo diga e della fondazione della diga di Pontecosi. Dalla costruzione ad oggi le campagne sono state N. 5 e sono:

- Indagine sul calcestruzzo e sulla fondazione, 1968
 - No. 7 sondaggi
 - Prove idrauliche
- Indagini nei calcestruzzi e nelle rocce di fondazione, 1993
 - No. 4 sondaggi
 - Indagini geofisiche
 - Prove idrauliche
 - Prove di laboratorio
- Installazione di piezometri nelle fondazioni, 2002
 - No. 4 sondaggi

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

- Prove idrauliche
- Indagini geognostiche e geofisiche sul calcestruzzo e sulla roccia, 2015
 - No. 4 sondaggi
 - Prove idrauliche
 - Indagini geofisiche
 - Prove di laboratorio
- Indagini geognostiche coronamento diga di Pontecosi, 2020
 - No. 2 sondaggi
 - Indagini geofisiche
 - Prove di laboratorio

Nella campagna di indagine del 2020 effettuata da SP sono stati effettuati No. 2 sondaggi a carotaggio continuo denominati S1 (spalla sinistra) e S2 (pila 6).

La foto seguente mostra, come esempio rappresentativo del calcestruzzo della diga, una cassetta di alcuni metri del sondaggio S2, classificato in fase di indagine come *“calcestruzzo ... scarsamente cementato con presenza di clasti arenaceo/calcarenitici eterometrici anche di grandi dimensioni (10/15 cm) con livelli di materiale molto povero di malta”*.

Una descrizione completa dei dati e dei risultati delle indagini è riportata nella “111 MAT R SP 001 Relazione sui Materiali” che costituisce parte del presente Progetto Preliminare.



Fig. 3-6: Calcestruzzo pila 6, Sondaggio S2, da 0 a 7 m, (Geotecnica Palazzi-Giomarelli srl, 2020)

In questa sede si richiama che i calcestruzzi di alcune delle pile mostrano difetti. Le indagini geofisiche ed i carotaggi effettuati in corpo diga hanno infatti evidenziato difetti dei calcestruzzi sulle riprese di getto ed al contatto con la roccia. Sono state inoltre identificate e mappate zone affette da nidi di ghiaia e vuoti. I carotaggi

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

hanno permesso di identificare zone in cui il calcestruzzo risulta povero di legante e fenomeni di dilavamento della parte fine. Quanto sopra è testimoniato anche dalla diffusa presenza di filtrazioni all' interno del corpo diga che nel tempo che vanno interrotte, anche per fermare il dilavamento.

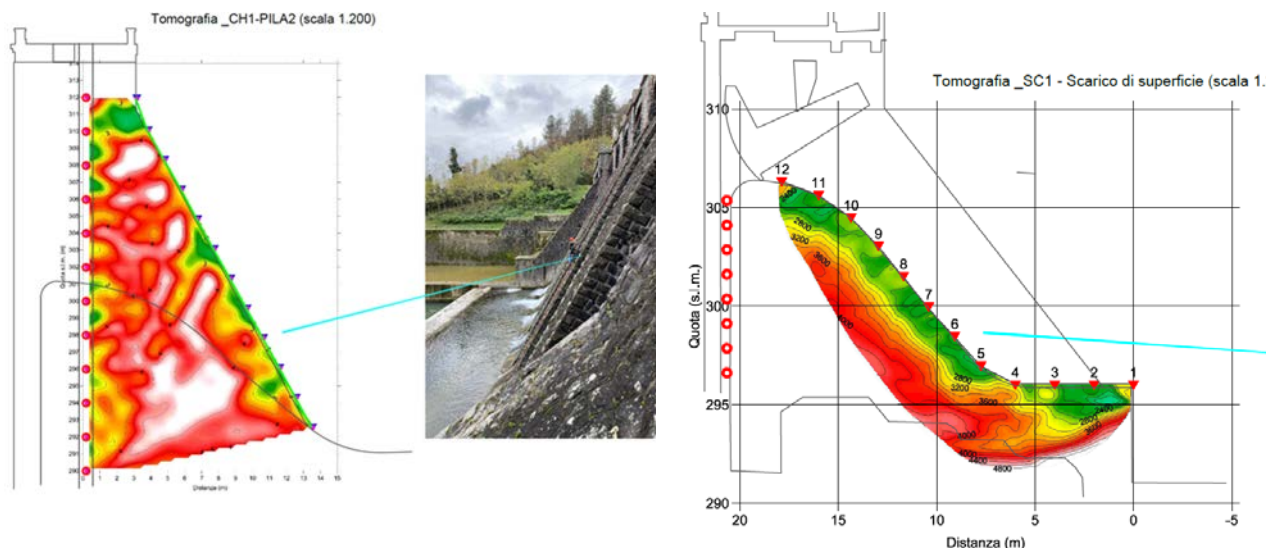


Fig. 3-7: tomografie sismiche per i materiali nel corpo diga, le zone verdi indicano velocità delle onde sismiche più basse e quindi la presenza di difetti

Le condizioni di difettosità e degrado riscontrate condizionano negativamente la performance statica e sismica della diga e ne minano la durabilità. Il degrado generato dalle filtrazioni, come detto, all' interno del corpo diga è infatti progressivo nel tempo ed è necessario che venga arrestato. Questo verrà chiarito in maggior dettaglio nel capitolo sugli interventi in cui si discute il consolidamento dei calcestruzzi inquadrando le motivazioni che lo richiedono e le modalità per eseguirlo.

Per quanto riguarda la roccia di fondazione, l'area direttamente interessata dall'imposta della diga è caratterizzata dalla presenza in affioramento della Formazione del Macigno (termine superiore della Falda Toscana), costituita da una successione torbiditica a prevalente componente arenacea, affiorante in strati e banchi di spessore metrico, a cui si intercalano sottili strati di arenarie fini, siltiti e argilliti siltose. Si tratta di roccia relativamente competente, adatta come fondazione di una diga di questo tipo. Le indagini geofisiche hanno permesso di indagarne eventuali debolezze e caratterizzare l'ammasso.

La caratterizzazione dei materiali di fondazione è stata effettuata sia sulla base degli studi precedenti che della nuova campagna indagini, opportunamente mirata, che ha fatto luce sugli aspetti ancora non completamente chiari. E' stato quindi possibile, integrando le informazioni già esistenti, costruire un modello geotecnico di tutta l'area di imposta della diga. La descrizione dettagliata della geologia e della geotecnica della fondazione sono trattate nei rapporti che sono parte del presente Progetto Preliminare:

- 112 GEO R SP 001 A – RELAZIONE GEOLOGICA
- 113 GET R SP 001 A - RELAZIONE GEOTECNICA

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

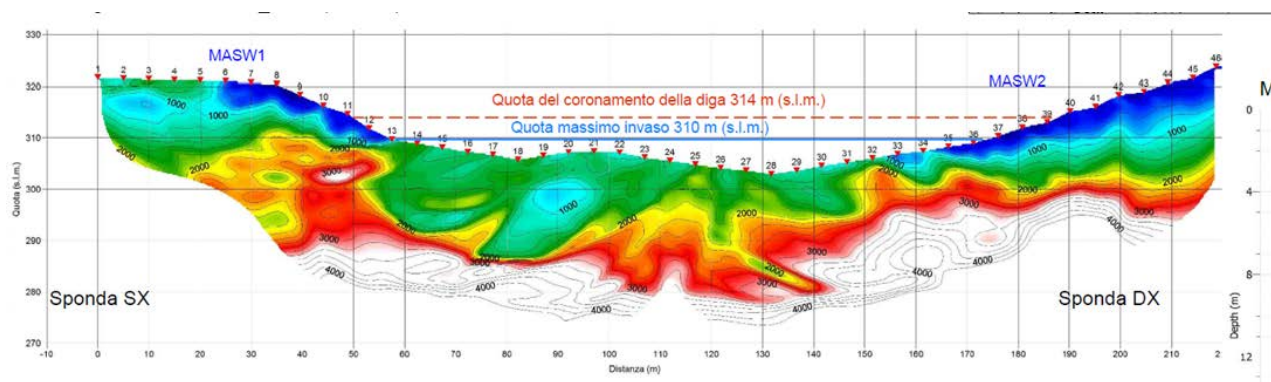


Fig. 3-8: tomografia sismica per una sezione prossima a quella su cui insiste la diga, la tecnica MASW utilizza le onde di Rayleigh per determinare le velocità delle onde sismiche alle diverse profondità

La figura soprariportata mostra una tomografia sismica effettuata in una sezione molto prossima a quella di imposta della diga. La mappatura mostra come varia la qualità della roccia con la profondità e da destra a sinistra.

I parametri della roccia di fondazione sono ben idonei per portare la diga, sia in condizioni statiche che in condizioni sismiche. Si riportano per convenienza del lettore i parametri geotecnici scelti per le verifiche.

| | | |
|-------|-------|---------------|
| UCS | (MPa) | 128 |
| GSI | (-) | 45 |
| mi | (-) | 17 |
| D | (-) | 0 |
| Ei | (GPa) | 35.2 (MR=275) |
| mb | (-) | 2.384 |
| s | (-) | 0.002 |
| a | (-) | 0.508 |
| sigt | (MPa) | -0.119 |
| sigc | (MPa) | 5.74 |
| sigcm | (MPa) | 25.94 |
| Erm | (GPa) | 7.87 |

Tab. 3-1: Risultati dal modello di Hoek & Brown

| | | |
|---|-------|-------|
| c | (MPa) | 0.64 |
| f | (°) | 63.67 |

Tab. 3-2: Parametri geotecnici dell'ammasso in fondazione

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

3.4. SOTTOPRESSIONI

SOTTOPRESSIONI

La diga di Pontecosi non è dotata di un sistema di drenaggio per l'abbattimento delle sottopressioni. Le sottopressioni vengono comunque monitorate costantemente. Attualmente sono operativi N° 7 piezometri a tubo aperto, (PZ01, PZ02, PZ03, PZ03BIS, PZ04, PZ04BIS e PZ05), nel 2002 furono installati No. 5 piezometri, tuttavia sospetti malfunzionamenti di PZ03 e PZ04 hanno consigliato il loro rifacimento, attuato alla fine del 2015 con i PZ03BIS e PZ04BIS.

Le misure sul piano di fondazione sono effettuate con frequenza bisettimanale (giornaliera per i piezometri 3, 4, 3bis, 4bis) per mezzo di freatimetro.

La figura seguente mostra la posizione dei piezometri.

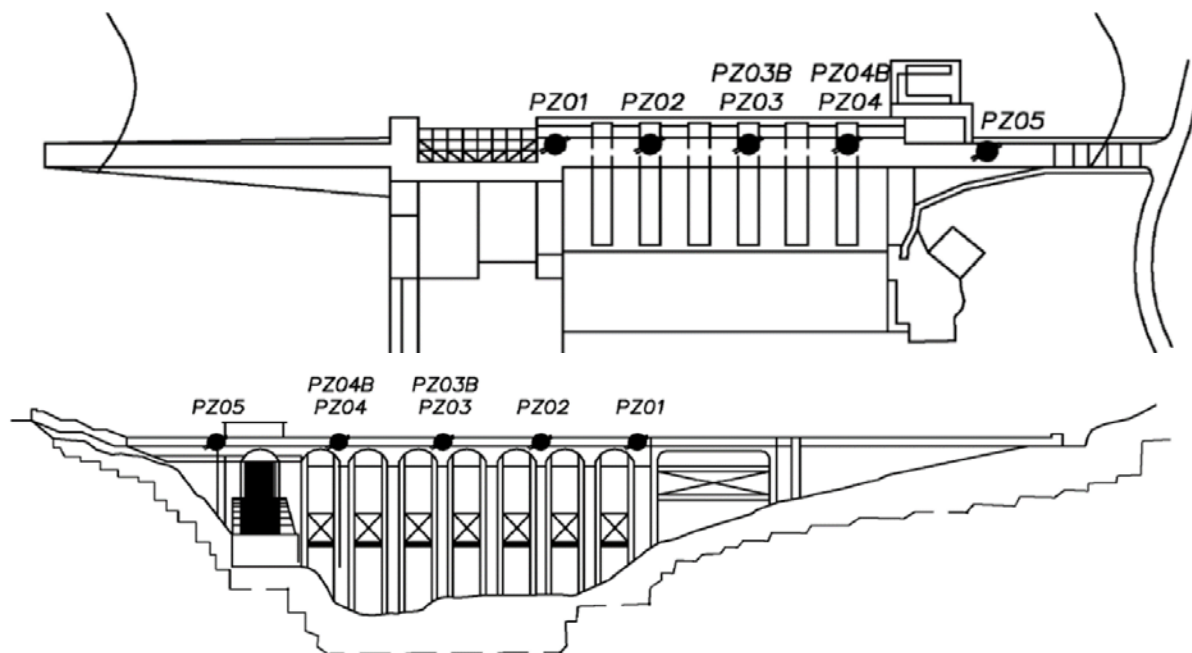


Fig. 3-9 : Ubicazione dei piezometri

I valori rilevati in tutti i piezometri dal 2002 al 2019 sono illustrati nei grafici seguenti, a titolo di confronto, con il valore delle sottopressioni calcolate (n.d.r. senza drenaggio) considerando il livello d'invaso al piede di monte della diga ed un livello fisso al piede di valle della diga. In particolare, l'ipotesi utilizzata per il livello di valle è che sia pari a 288 m s.l.m. per i piezometri posti nella zona centrale, mentre per i due piezometri PZ01 e PZ05, che si trovano ad una quota di fondazione maggiore di 288 m s.l.m., si considera un livello uguale alla quota di fondazione. La retta mostra l'andamento delle sottopressioni calcolate al variare delle quote di invasore.

Il confronto tra la retta e i dati misurati mostra che per tutti i piezometri, durante i diciassette anni di misura osservati, le sottopressioni sono sempre inferiori a quelle ipotizzate (condizioni senza drenaggio).

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

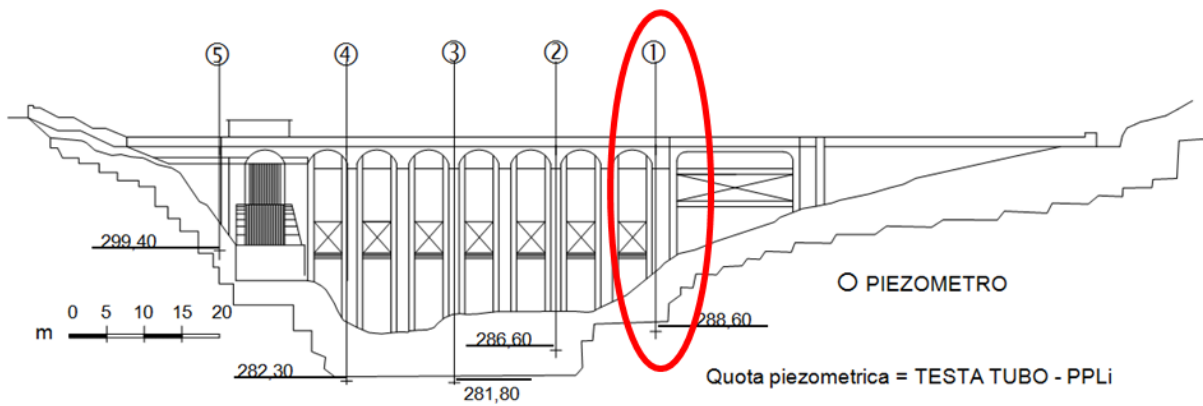
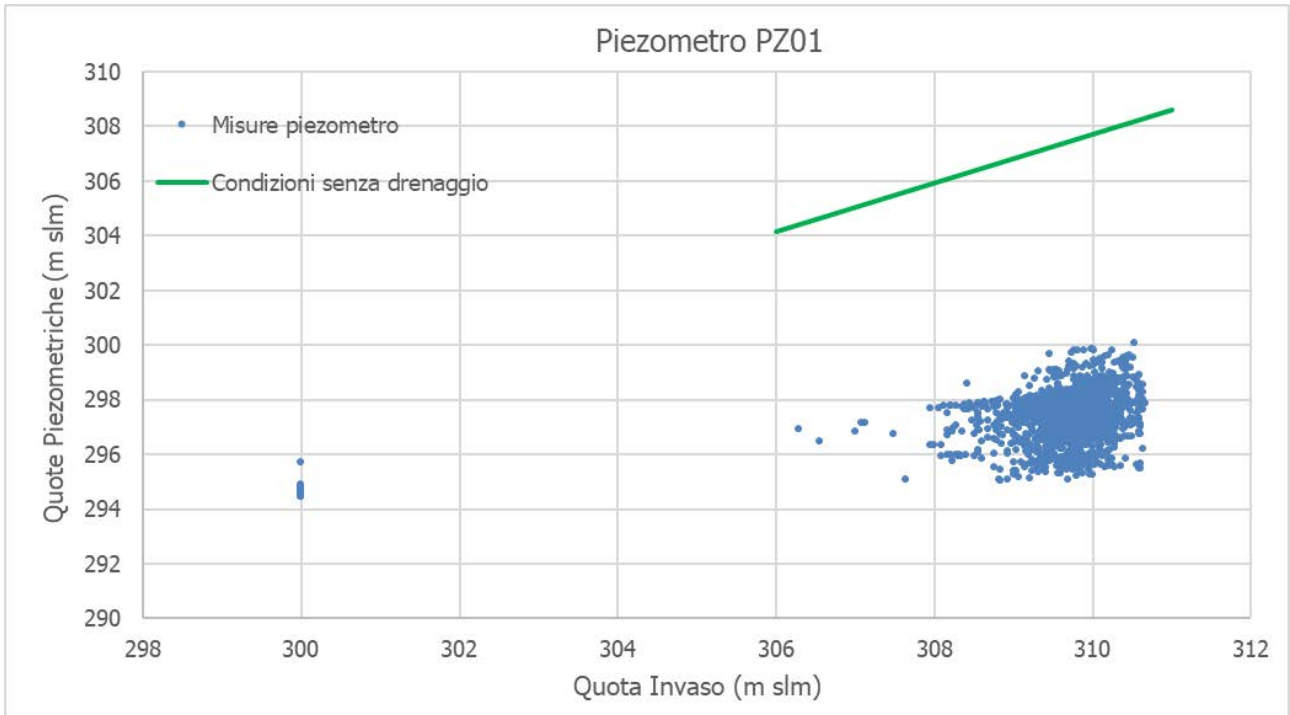


Fig. 3-10: Confronto retta condizioni senza drenaggio - dati misurati e ubicazione del piezometro PZ01

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

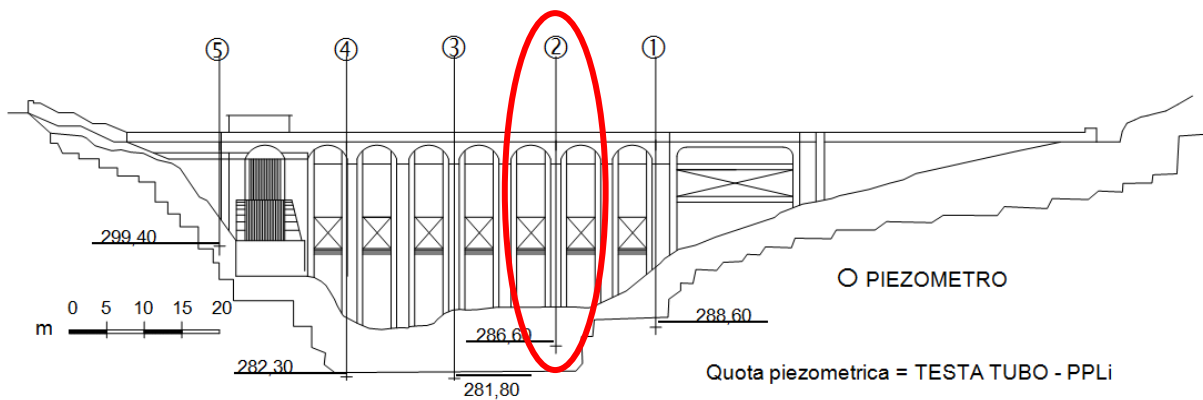
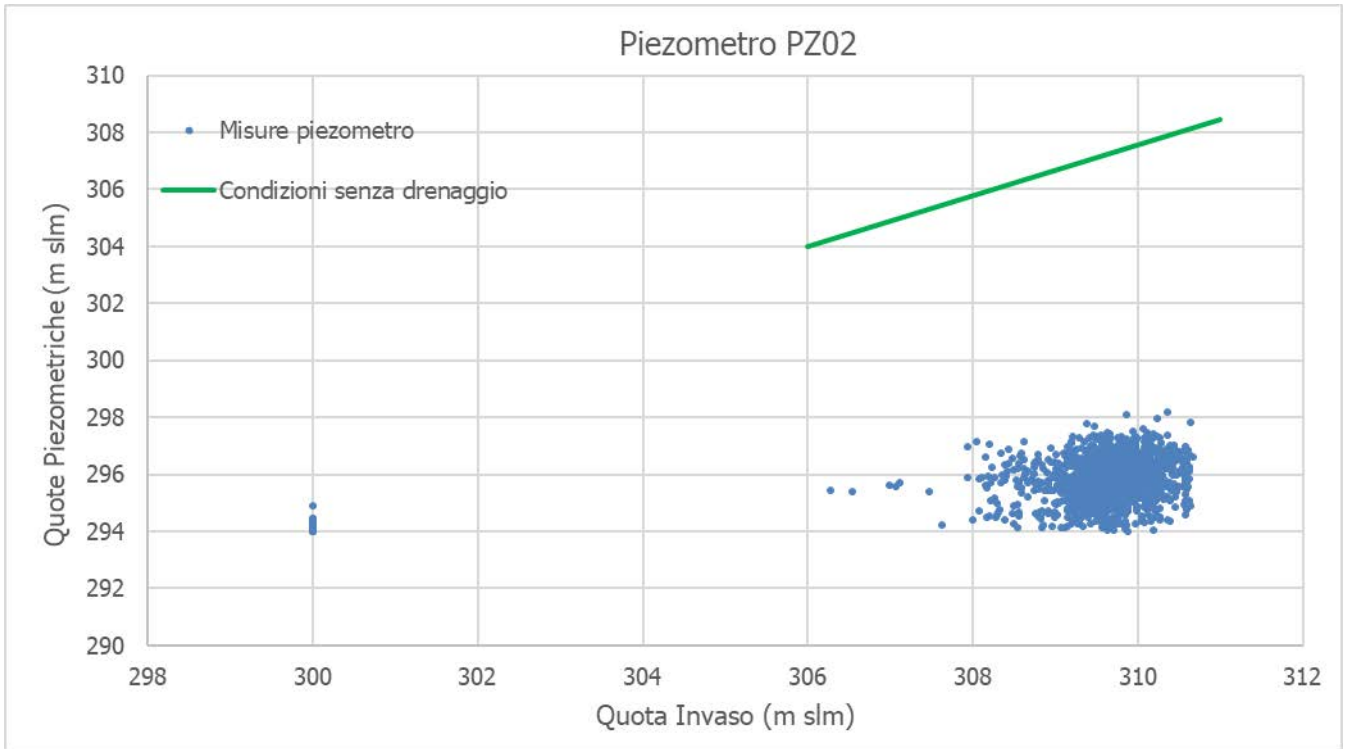
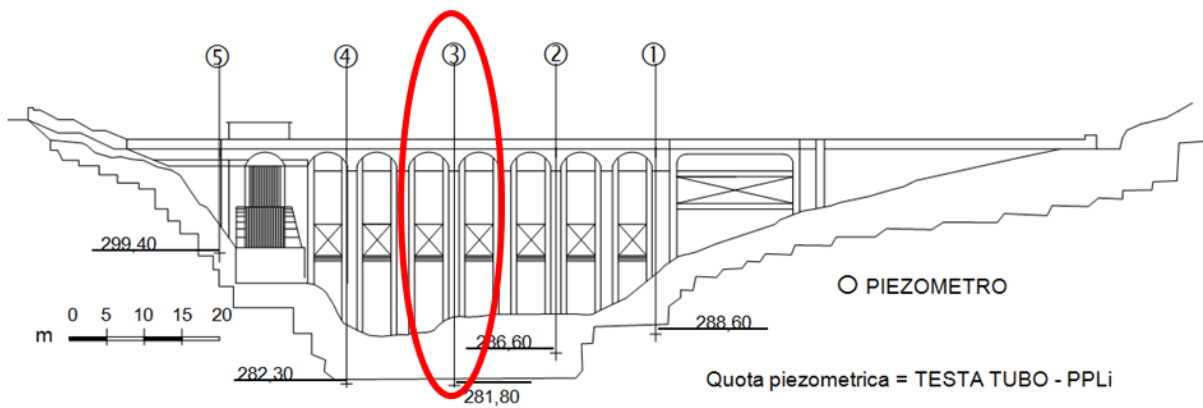
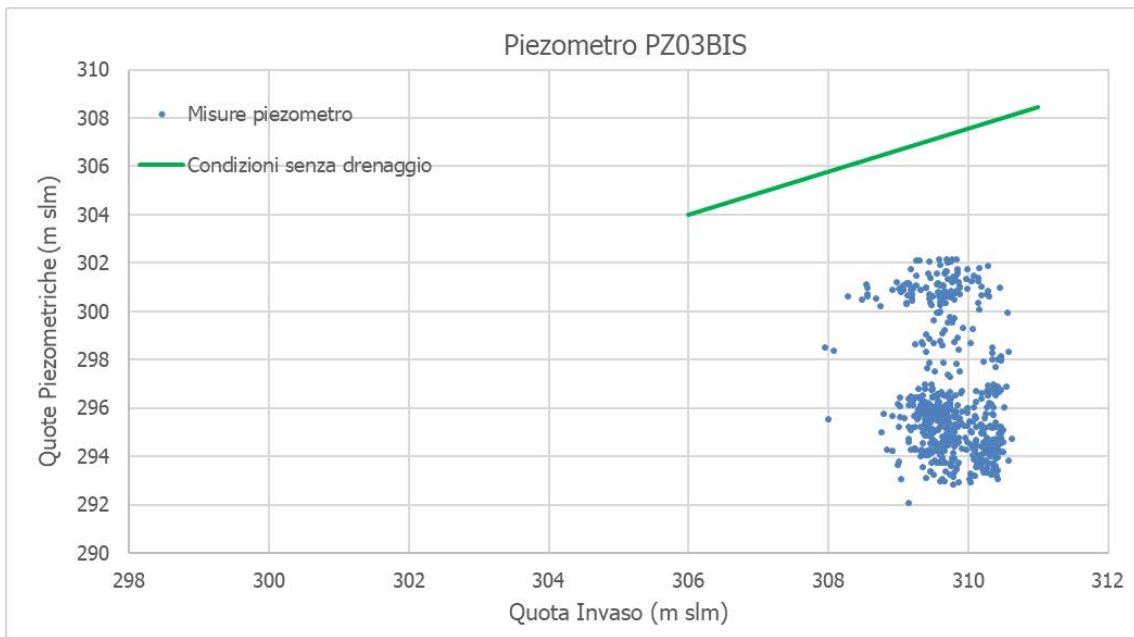
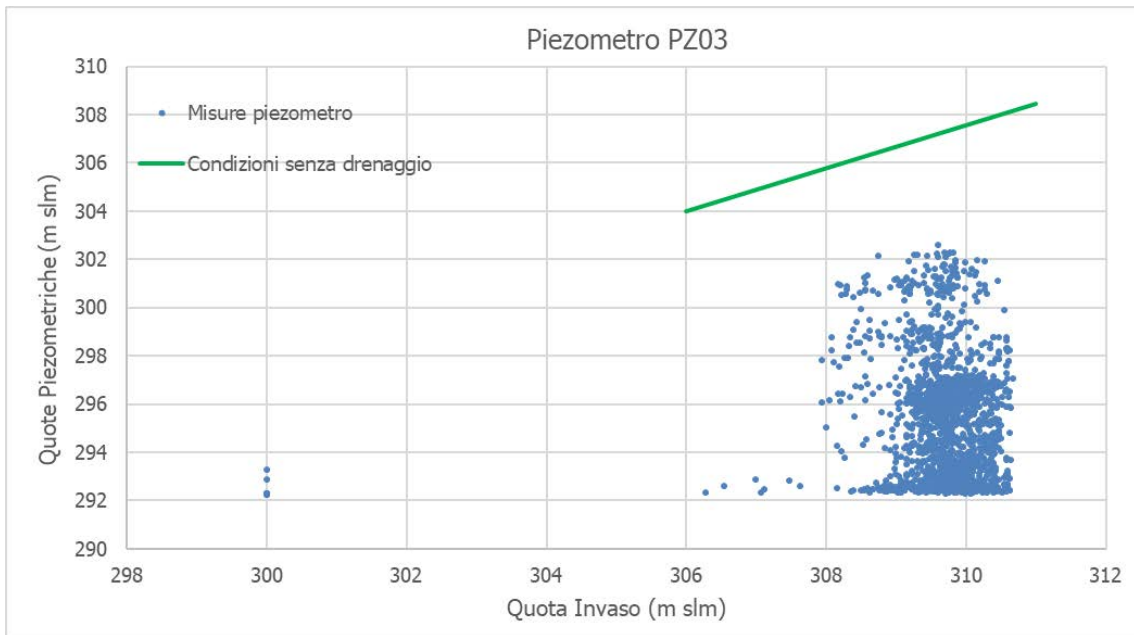


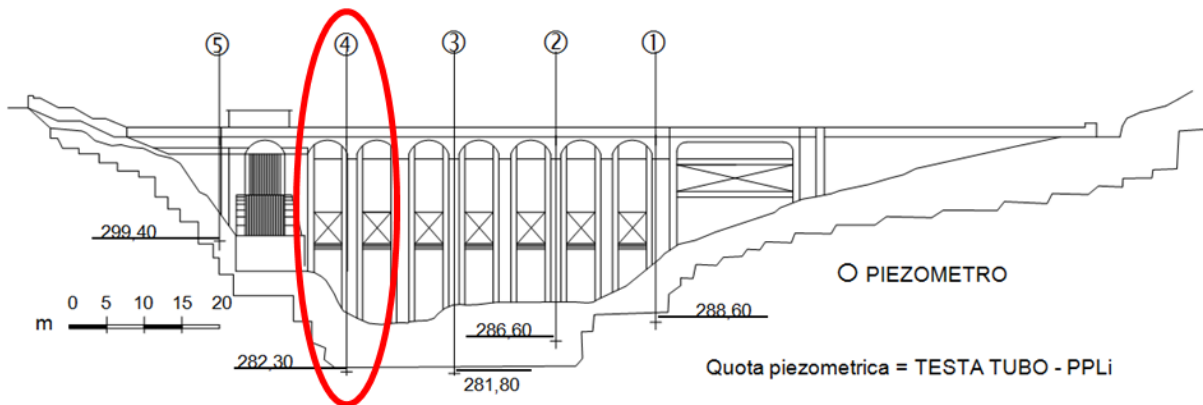
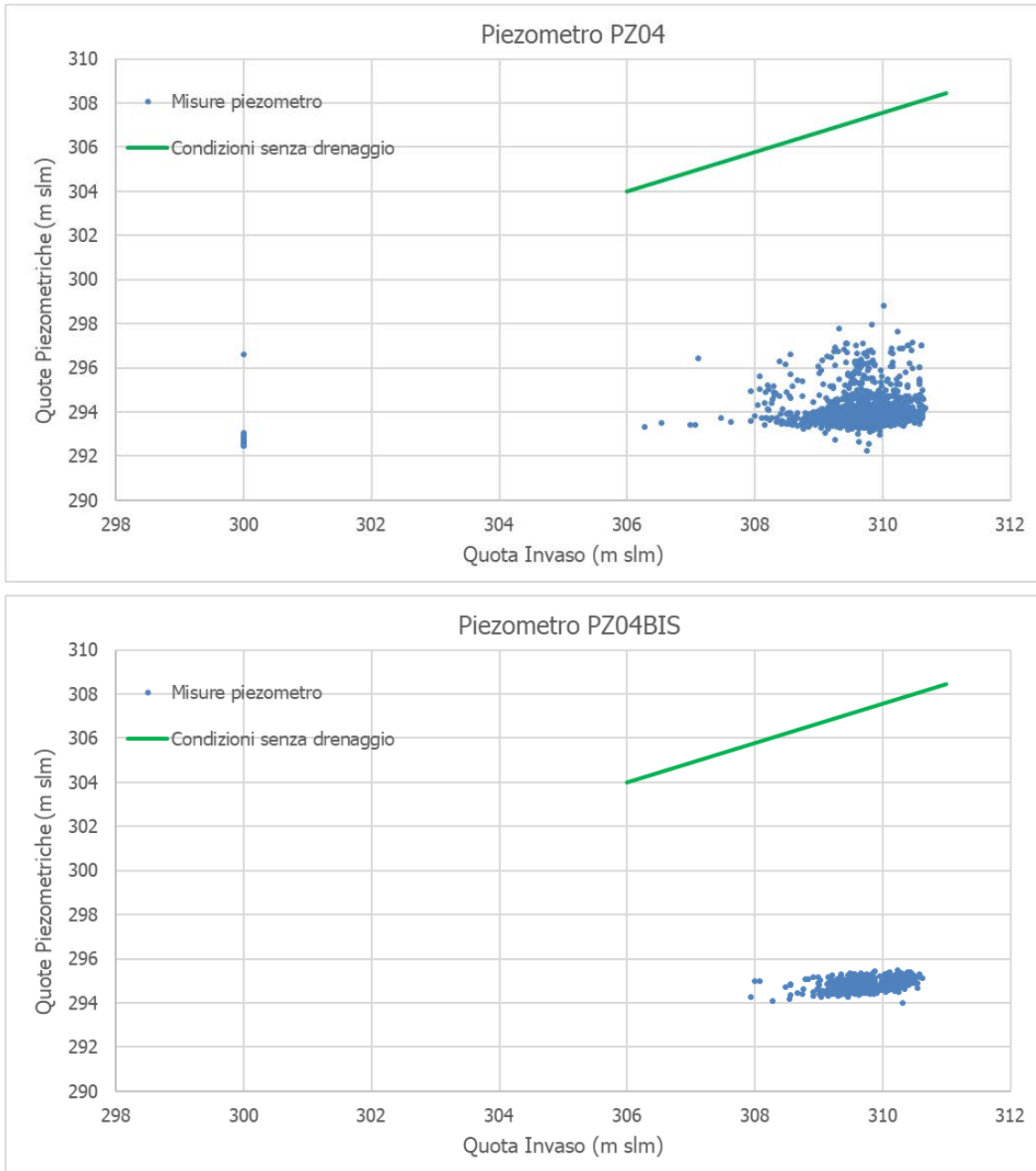
Fig. 3-11: Confronto retta condizioni senza drenaggio - dati misurati e ubicazione del piezometro PZ02

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA



RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

Fig. 3-12: Confronto retta condizioni senza drenaggio - dati misurati e ubicazione del piezometro PZ03 e PZ03BIS



RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

Fig. 3-13: Confronto retta condizioni senza drenaggio - dati misurati e ubicazione del piezometro PZ04 e PZ04BIS

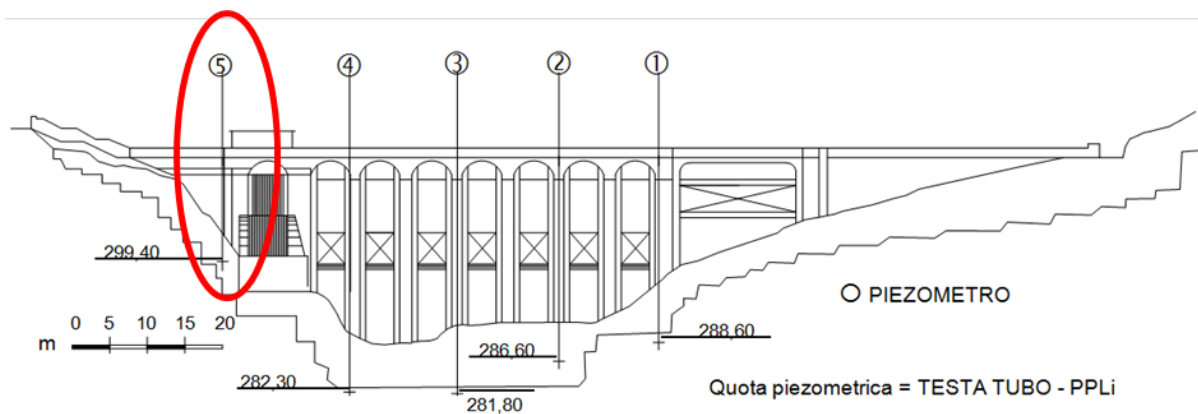
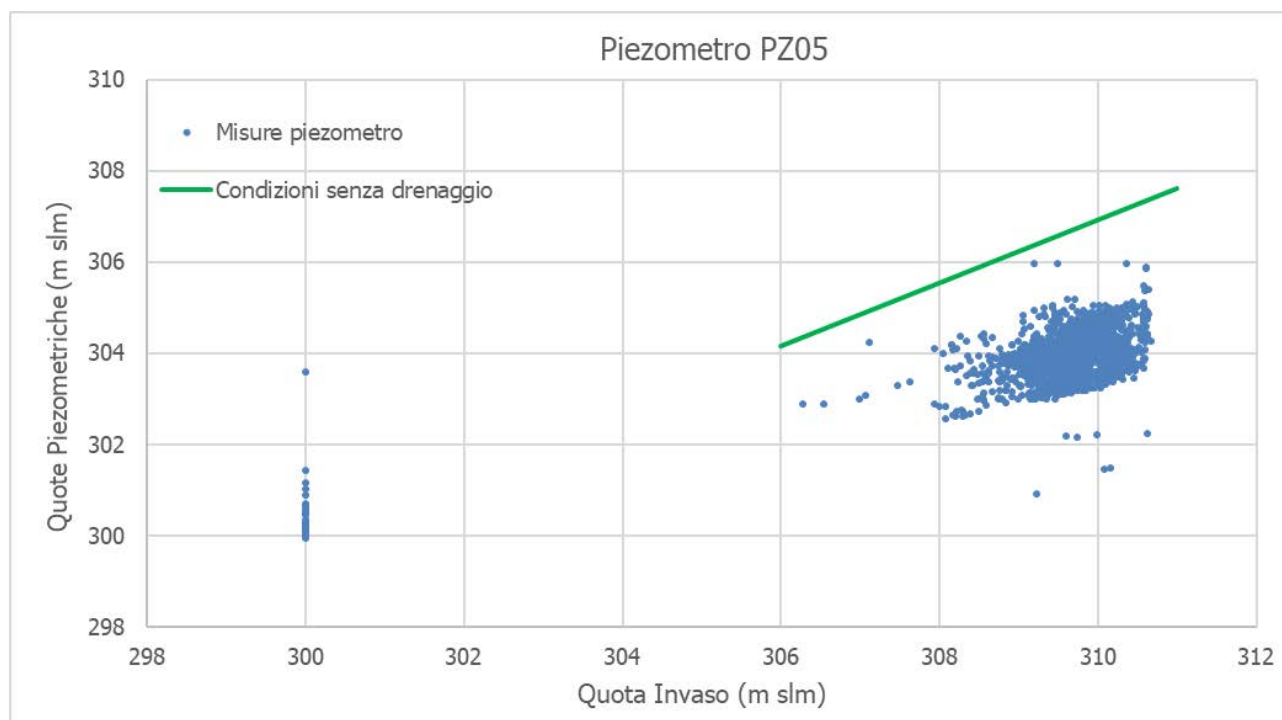


Fig. 3-14: Confronto retta condizioni senza drenaggio - dati misurati e ubicazione del piezometro PZ05

3.5. VERIFICA SISMICA

Le verifiche di vulnerabilità sismica per lo stato attuale sono state effettuate mediante Analisi agli Elementi Finiti. Le condizioni sismiche sono state analizzate con analisi Modale con Spettro di Risposta.

Le verifiche sono state effettuate per due sezioni rappresentative della diga:

- adottando le combinazioni di carico previste dalla normativa
- considerando sia gli stati limite ultimo (SLU) che di esercizio (SLE)

Le sezioni rappresentative sono quelle corrispondenti alla Pila 2 e quella di spalla sinistra di massima altezza.

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

Le due tabelle seguenti sintetizzano tutte le verifiche effettuate con le relative condizioni di carico adottate nelle combinazioni di:

- Stato Limite Ultimo
- Stato Limite di Esercizio

| | FONDAMENTALE | ECCEZIONALE | SISMICA | | | |
|--------------------------|-------------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Esercizio Normale | Massima Piena | SLC/ Pieno → ↑ | SLC/ Pieno → ↓ | SLC/ Pieno ← ↑ | SLC/ Pieno ← ↓ |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Peso proprio | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta idrostatica monte | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta idrostatica valle | SI | NO | SI | SI | SI | SI |
| Sottospinta | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta del ghiaccio | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| Spinta dell'interrimento | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta idrodinamica | NO | NO | SI | SI | SI | SI |
| Azione sismica orizz. | NO | NO | SI | SI | SI | SI |
| Azione sismica verticale | NO | NO | SI | SI | SI | SI |

Tab. 3-3 : Combinazioni delle azioni per le diverse condizioni di carico – STATO LIMITE ULTIMO

| | FONDAMENTALE | ECCEZIONALE | SISMICA | | | |
|--------------------------|-------------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Esercizio Normale | Massima Piena | SLD/ Pieno → ↑ | SLD/ Pieno → ↓ | SLD/ Pieno ← ↑ | SLD/ Pieno ← ↓ |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Peso proprio | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta idrostatica monte | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta idrostatica valle | SI | NO | SI | SI | SI | SI |
| Sottospinta | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta del ghiaccio | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| Spinta dell'interrimento | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta idrodinamica | NO | NO | SI | SI | SI | SI |
| Azione sismica orizz. | NO | NO | SI | SI | SI | SI |
| Azione sismica verticale | NO | NO | SI | SI | SI | SI |

Tab. 3-4 : Combinazioni delle azioni per le diverse condizioni di carico – STATO LIMITE DI ESERCIZIO

Le verifiche allo scorrimento sulla Pila 2 e sulla sezione di Spalla della diga sono state effettuate per le combinazioni statiche (in condizioni di esercizio normale e di massima piena) nonché per le quattro condizioni dinamiche più sfavorevoli cioè quelle con serbatoio pieno (variando la direzione del sisma orizzontale, verso monte e verso valle, e del sisma verticale, verso l'alto e verso il basso).

Le tabelle seguenti sintetizzano i risultati di tutte le verifiche allo scorrimento:

- in corpo diga e sul piano di fondazione
- per le due diverse sezioni di verifica
- per ciascuna combinazione di carico

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

Il risultato è presentato come fattore di sicurezza allo scorrimento, rapporto tra resistenze e le azioni (R_d/E_d), che viene calcolato per ogni combinazione di carico in ogni sezione e quota rappresentativa.

Si rammenta che tale valore deve risultare superiore ad 1.15 perché la verifica sia soddisfatta.

| Sezioni di calcolo | | | Fattore di sicurezza SCORRIMENTO | | | | | |
|--------------------|------------------|-------------|----------------------------------|---------------|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | | FONDAMENTALE | ECCEZIONALE | SISMICA con INTERRIMENTO | | | |
| | | | Esercizio Normale | Massima Piena | SLC/ Pieno → ↑ | SLC/ Pieno → ↓ | SLC/ Pieno ← ↑ | SLC/ Pieno ← ↓ |
| ID | Elev. (m slm) | posizione | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 300.0 | Corpo Diga | 9.4 | 9.4 | 1.60 | 1.57 | 3.46 | 3.85 |
| 2 | 284.0 | Piano fond. | 2.78 | 2.70 | 0.88 | 1.07 | 36.00 | 43.91 |

Tab. 3-5 : Pila 2 - Fattori di sicurezza allo scorrimento per combinazioni statiche e sismiche

| Sezioni di calcolo | | | Fattore di sicurezza SCORRIMENTO | | | | | |
|--------------------|------------------|-------------|----------------------------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | | FONDAMENTALE | ECCEZIONALE | SISMICA | | | |
| | | | Esercizio Normale | Massima Piena | SLC/ Pieno → ↑ | SLC/ Pieno → ↓ | SLC/ Pieno ← ↑ | SLC/ Pieno ← ↓ |
| ID | Elev. (m slm) | posizione | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 298.0 | Corpo Diga | 9.7 | 9.7 | 3.26 | 3.42 | 14.68 | 22.66 |
| 2 | 294.6 | Piano fond. | 3.67 | 3.99 | 1.12 | 1.25 | 12.57 | 25.96 |

Tab. 3-6 : Sezione di Spalla - Fattori di sicurezza allo scorrimento per combinazioni statiche e sismiche

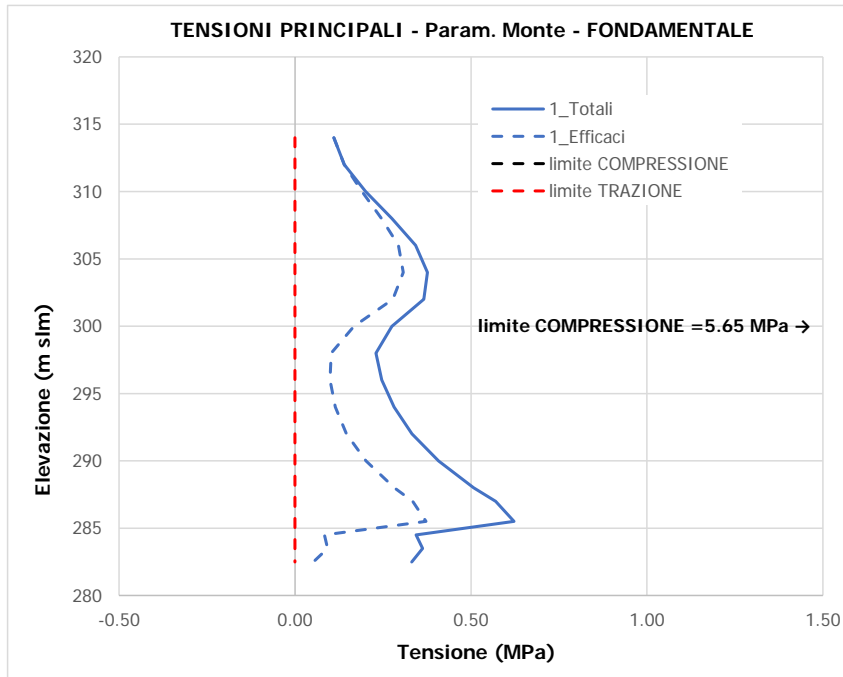
Le tabelle mostrano che le verifiche statiche danno esito positivo ma quelle sismiche sul piano di fondazione sono negative.

I margini di sicurezza in condizioni statiche sono ampi ($2.70 > 1.15$) mentre in condizioni sismiche siamo significativamente al di sotto del limite ($0.88 < 1.15$) in Pila 2 ed al di sotto del limite anche nella sezione di spalla ($1.12 < 1.15$). I fattori di sicurezza più bassi si registrano in combinazione 3 sia per la pila che per la spalla. Questa è infatti la condizione di carico più negativa.

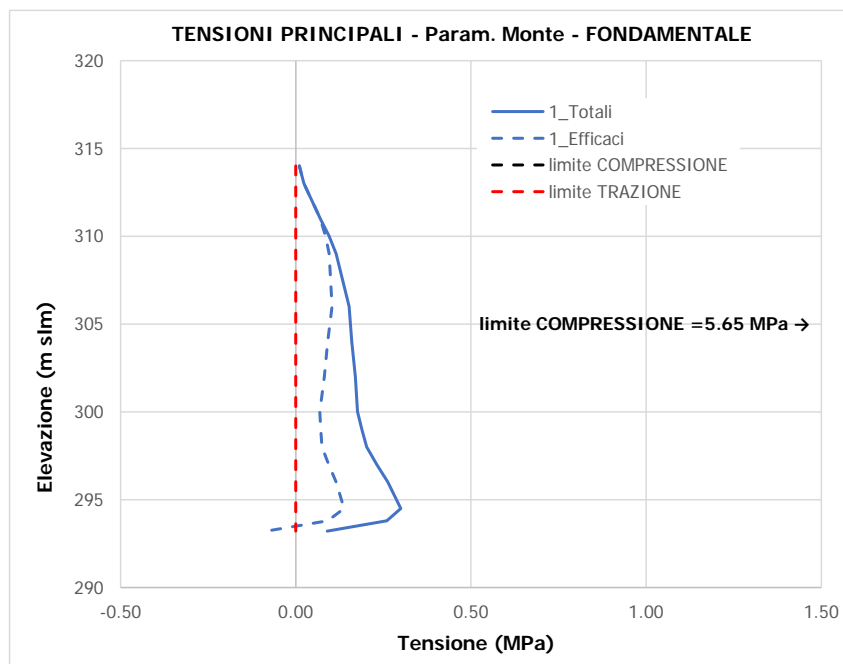
Le verifiche delle tensioni sulla Pila 2 e sulla sezione di Spalla della diga sono state effettuate per la combinazione statica fondamentale nonché per le quattro condizioni dinamiche richiamate precedentemente (SLD).

Il risultato è presentato in termini di tensioni principali totali ed efficaci, sul paramento di monte e di valle. Le tensioni sono nei limiti per ogni combinazione di carico e ad ogni quota. I grafici seguenti mostrano le condizioni di carico più critiche, con le massime trazioni sul paramento di monte e compressioni sul paramento di valle.

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

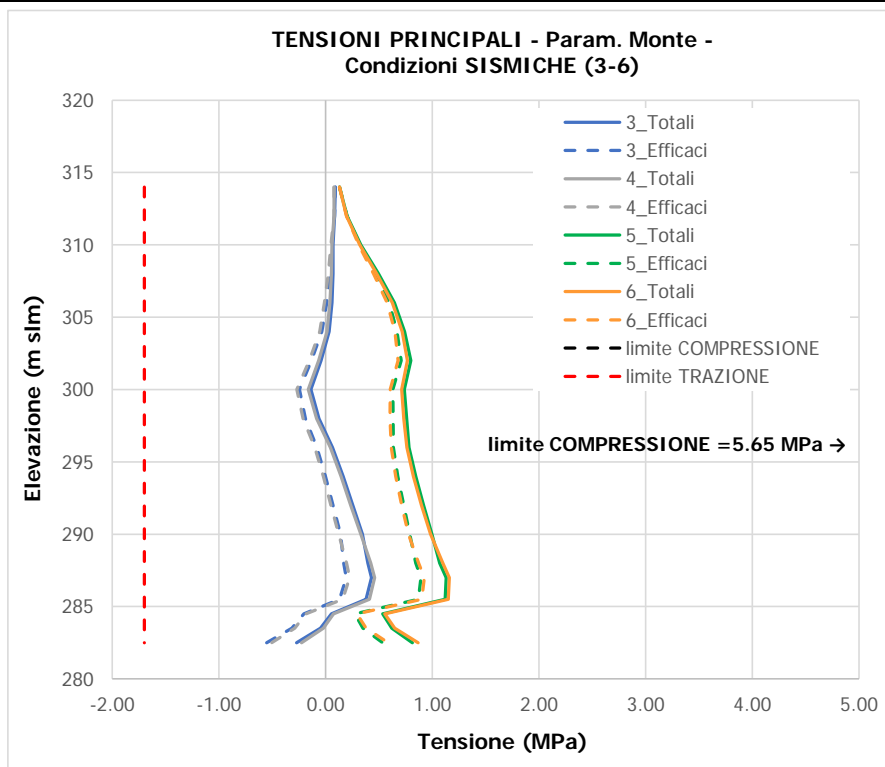


Tab. 3-7 : Pila 2 - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Fondamentale

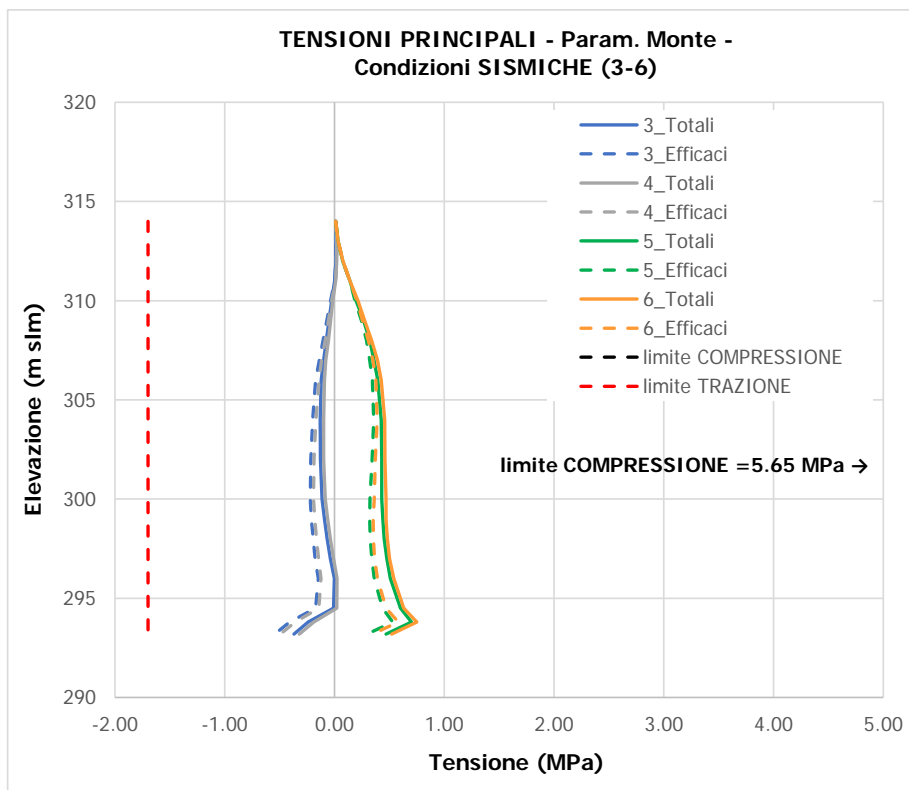


Tab. 3-8 : Sezione di Spalla - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Fondamentale

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

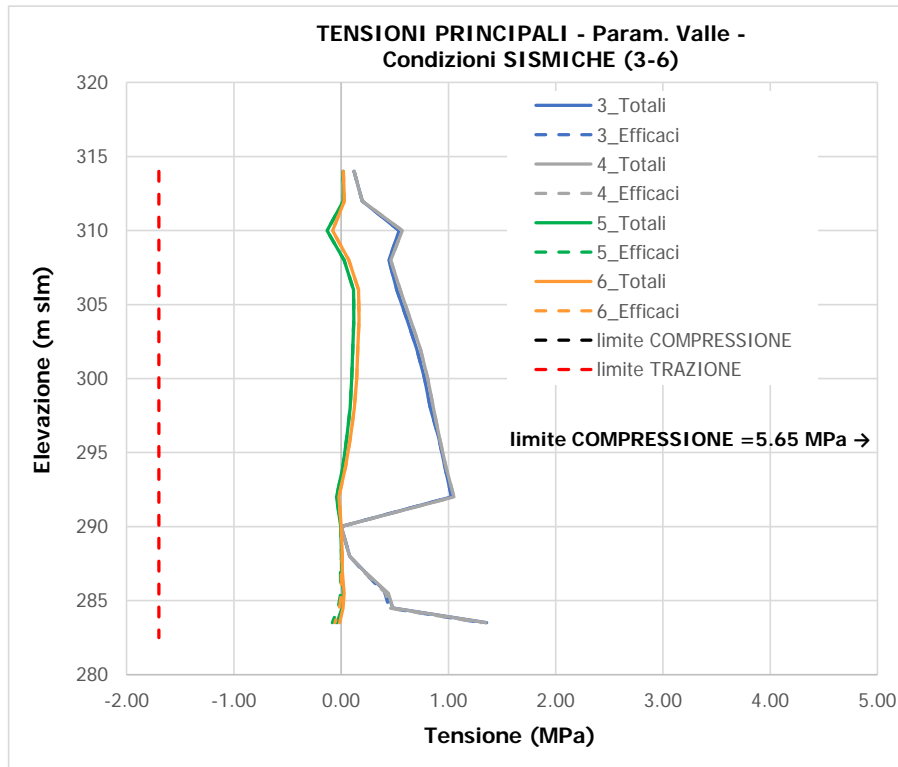


Tab. 3-9 : Pila 2 - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Sismiche (3-6)

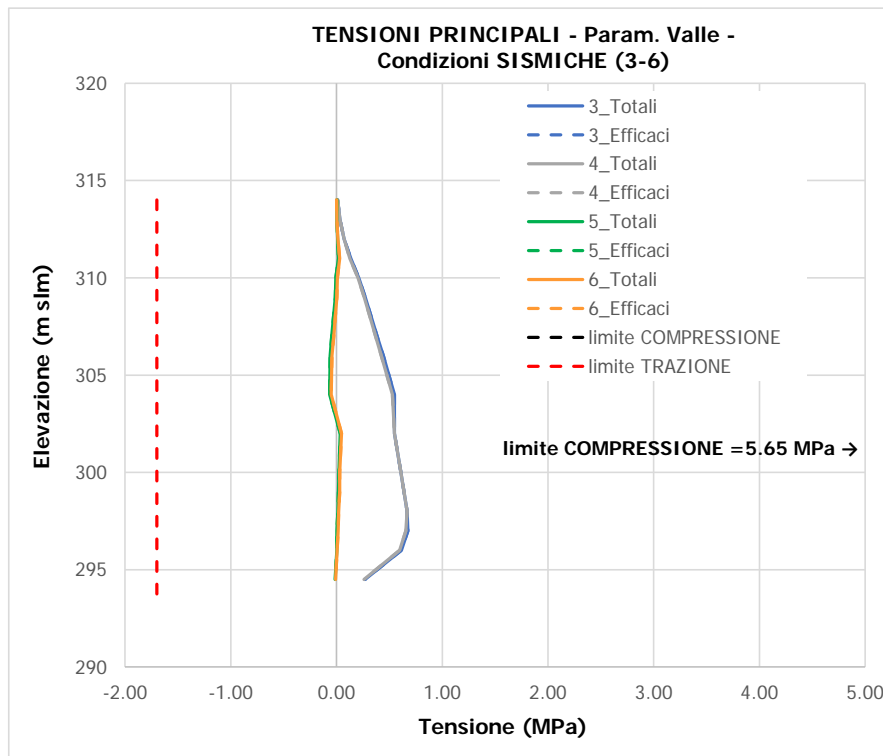


Tab. 3-10 : Sezione di Spalla - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Sismiche (3-6)

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA



Tab. 3-11 : Pila 2 - Tensioni principali – Paramento di Valle – comb. Sismiche (3-6)



Tab. 3-12 : Sezione di Spalla - Tensioni principali – Paramento di Valle – comb. Sismiche (3-6)

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

Le tensioni di compressione nella pila 2, come atteso, sono ben al di sotto dei limiti ammissibili. Il valore massimo registrato (1.36 MPa) in combinazione sismica 3 è molto inferiore al limite di normativa (<5.77 MPa). Le tensioni di compressione nella spalla sono anch'esse ben al di sotto dei limiti ammissibili. Il valore massimo registrato (0.67 MPa) in combinazione sismica 4 è molto inferiore al limite di normativa (<5.77 MPa).

Si evince che le compressioni nel calcestruzzo non pongono criticità sulla sicurezza della diga essendo la resistenza del materiale ampiamente oltre i minimi richiesti.

In condizioni statiche sul paramento di monte della pila non risultano sforzi di trazione quindi le disposizioni previste dal criterio D.2.2.2 della NTD 2014 sono rispettate. Sulla spalla si osservano lievi tensioni di trazione al piede del paramento di monte (>-0.08 MPa) che si possono considerare certamente inferiori alla resistenza a trazione del calcestruzzo e, in generale, di modesta importanza per la struttura.

Per la pila 2, in condizioni sismiche si hanno delle modeste trazioni sul paramento di monte in combinazione 3 e 4 (serbatoio pieno e sisma orizzontale verso valle). La verifica dà comunque esito positivo in quanto queste sono sempre al di sotto dei limiti di normativa. Il valore massimo misurato in corrispondenza del piede di monte (-0.55 MPa) è ampiamente inferiore ai limiti di normativa (-1.70 MPa).

Per la spalla si hanno delle modeste trazioni sul paramento di monte in combinazione 3 e 4 (serbatoio pieno e sisma orizzontale verso valle). La verifica dà comunque esito positivo in quanto queste sono sempre al di sotto dei limiti di normativa. Il valore massimo misurato in corrispondenza del piede di monte (-0.54 MPa) è ampiamente inferiore ai limiti di normativa (-1.70 MPa).

Sono state inoltre eseguite verifiche in direzione destra sinistra su un modello agli elementi finiti tridimensionale. Queste hanno mostrato che senza un vincolo a livello di cresta, le pile non soddisfano le verifiche a pressoflessione per sisma destra sinistra. Tale vincolo potrebbe essere facilmente fornito dalla passerella di cresta se questa fosse collegata ad entrambe le spalle. Al momento questo collegamento esiste solo per la pila in spalla sinistra poiché la sezione sfiorante (adiacente alla spalla destra) è attraversata da una passerella di tipo diverso e su appoggi scorrevoli. Il collegamento da un solo lato non è efficace in quanto richiederebbe alla connessione tra passerella e spalla di poter agire come vincolo bilatero, cosa che non può fare (non può offrire resistenza a trazione). Come verrà spiegato nel capitolo sugli interventi sarà quindi necessario inserire una nuova struttura di contrasto che permetta di fornire alle pile il vincolo di cui hanno bisogno.

Sulla base delle insufficienze di cui sopra emerge quindi la necessità di intervenire per risanare i materiali in corpo diga, abbattere le sottopressioni (con questi due interventi si risolvono i problemi di scorrimento monte valle) e vincolare in testa le pile, per azioni in direzione destra sinistra. Questi interventi verranno discussi in dettaglio nel prossimo capitolo.

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

4. INTERVENTI DI ADEGUAMENTO

4.1. INTRODUZIONE

Le indagini effettuate sui calcestruzzi hanno evidenziato la presenza di alcune zone di calcestruzzo povero di legante, permeabile, per le quali è opportuno prevedere degli interventi locali di ripristino delle condizioni originarie mediante iniezioni di consolidamento.

Inoltre, le verifiche di vulnerabilità sismica per lo Stato Attuale hanno identificato delle insufficienze. Le verifiche per Stato Limite Ultimo di scorrimento, infatti, non sono soddisfatte per alcune condizioni sismiche.

Infine, mentre le verifiche sulle tensioni nel corpo diga per sisma monte-valle hanno dato esito positivo, verifiche in direzione destra sinistra hanno mostrato che senza un vincolo a livello di cresta, le pile non soddisfano le verifiche a pressoflessione.

Per risolvere le carenze di cui sopra, sono stati previsti i seguenti interventi illustrati in questo capitolo:

- Iniezioni e trattamenti per i calcestruzzi della diga, ottenendo al termine caratteristiche meccaniche sufficienti per soddisfare ai requisiti di sicurezza richiesti;
- Realizzazione di uno schermo di iniezioni e sistema di drenaggio efficace, con spaziatura e diametro secondo NTD2014, permettendo al termine di utilizzare per le verifiche le riduzioni sulle sottopressioni consentite dalla normativa;
- Riempimento cunicolo esistente e vani ex-galleggianti paratoia di superficie
- Installazione di struttura di contrasto metallica in sponda destra, in corrispondenza dello scarico di superficie, per collegare le spalle massive alla parte a speroni e migliorare la prestazione sismica sotto azioni in direzione destra sinistra.

4.2. INIEZIONI DI CONSOLIDAMENTO DEI CALCESTRUZZI

I risultati delle prove geofisiche, dei sondaggi e delle prove di laboratorio effettuate sulle pile e sulle soglie della diga hanno evidenziato la variabilità delle proprietà meccaniche dei calcestruzzi.

All'interno di ampie zone con proprietà meccaniche in linea con quanto si può attendere per un calcestruzzo dell'epoca, sono visibili zone sensibilmente degradate, povere di legante cementizio, ed in alcuni casi anche dei vuoti.

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

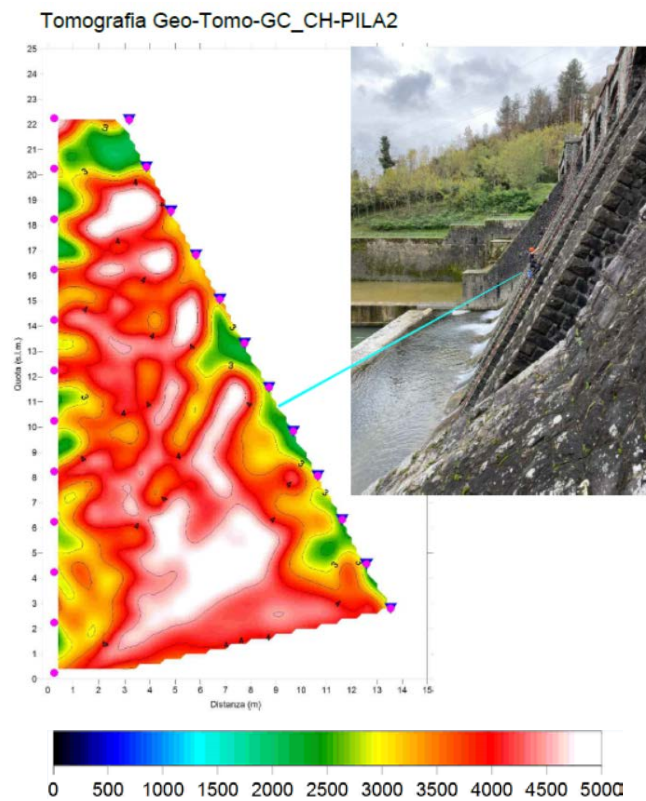


Fig. 4.1: Tomografia sismica sulla pila 2, (Georisorse, 2020)



Fig. 4-2: Calcestruzzo pila 6, Sondaggio S2, da 0 a 7 m, (Geotecnica Palazzi-Giomarelli srl, 2020)

Tale tipologia di degrado, a cui ovviamente si associano filtrazioni, ha un andamento progressivo nel tempo. Il dilavamento progredisce con le filtrazioni e con la rimozione della calce libera. Tale azione continua quindi ad aumentare gli spazi vuoti nella matrice cementizia, favorendo l'ulteriore infiltrazione d'acqua, aumentando il fenomeno del degrado e quindi l'indebolimento della massa.

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

L'intervento proposto prevede quindi di consolidare il calcestruzzo degradato, ripristinandone la continuità mediante l'esecuzione di iniezioni.

Gli obiettivi essenziali di questa tecnica di consolidamento di calcestruzzi antichi sono:

- migliorare la coesione interna, elevare le capacità deformative e di resistenza degli elementi strutturali;
- riempimento degli spazi vuoti e interstiziali;
- collegamento degli inerti o degli elementi sciolti;
- risanamento delle lesioni;
- miglioramento del contatto calcestruzzo-roccia;
- protezione dal degrado fisico.

Data la natura abbastanza avanzata dello stato del degrado, saranno previste iniezioni da effettuare con diverse fasi, iniziando ad iniettare fluidi più densi (come malte cementizie o tissotropiche) e continuando con resine epossidiche più fluide.

Alla fine del processo di consolidamento verranno effettuate delle prove di permeabilità su fori verticali per valutare la perfetta riuscita del procedimento.

Nelle immagini seguenti è indicato, qualitativamente, lo schema delle iniezioni che dovranno essere eseguite sulla soglia e sui contrafforti. Più nello specifico:

- **CONTRAFFORTI**, verranno effettuati fori sub-orizzontali da entrambi i lati dei contrafforti. La spaziatura tra i fori verrà valutata a seconda dello stato di degrado della porzione di calcestruzzo da consolidare.
- **SOGLIA**, verranno effettuati fori sub-verticali sola dalla parte superiore della superficie. Come nel caso del consolidamento dei contrafforti, la spaziatura verrà valutata in funzione dello stato di degrado del calcestruzzo nella zona da consolidare.

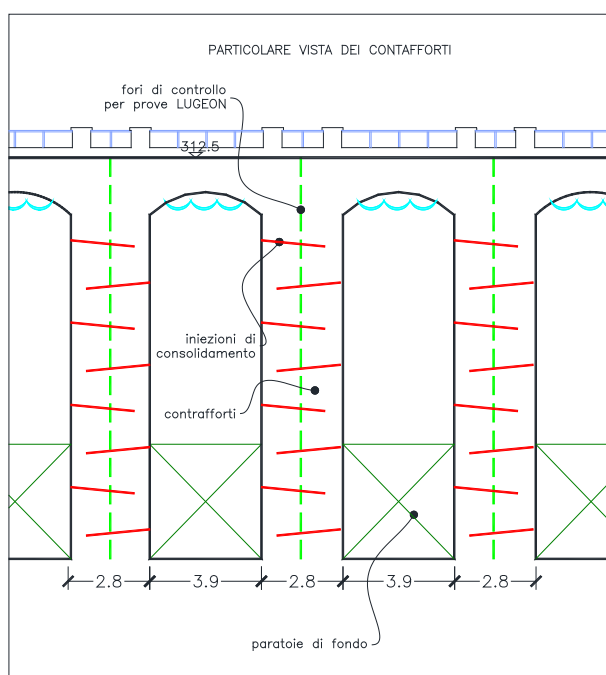


Fig. 4-3 : Schema iniezioni di consolidamento - particolare vista dei contrafforti

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

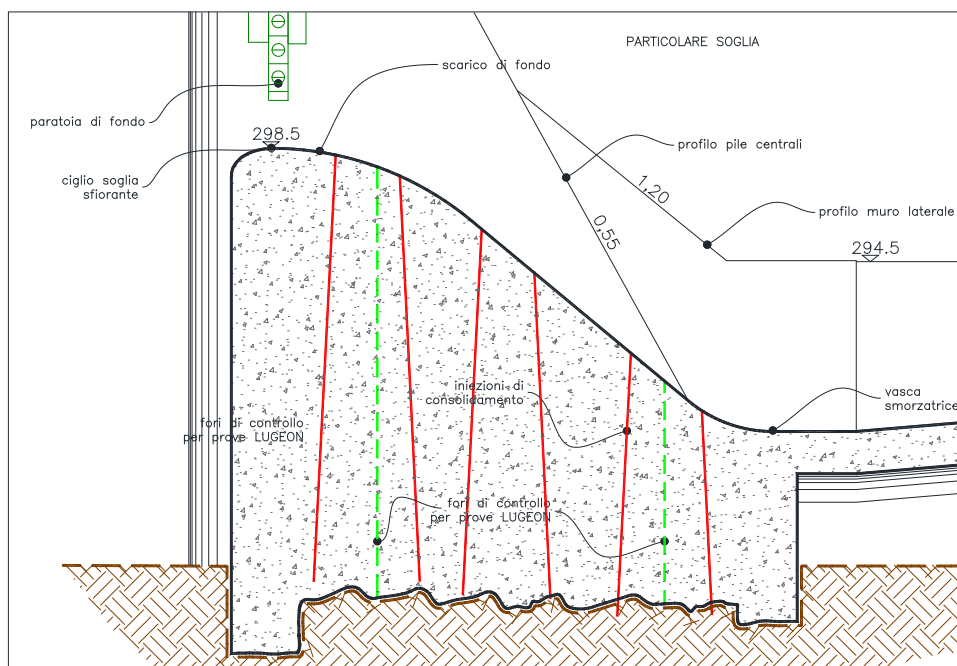


Fig. 4-4 : Schema iniezioni di consolidamento - particolare vista della soglia

Le fasi di lavorazione per eseguire le iniezioni sono sintetizzate di seguito:

1. la porzione di calcestruzzo da trattare deve essere pulita e liberata da parti friabili ed eventuale vegetazione, quindi procedere alla stuccatura e sigillatura, di tutte le fessure, sconnessioni, piccole fratture e dei giunti di malta.
2. esecuzione delle perforazioni sulla parete o superficie da trattare, quindi pulizia mediante scovolino o aria compressa di tutti i fori;
3. posizionamento e fissaggio di cannuce di emissione e di scarico lungo la superficie e in corrispondenza di fori o cavità;
4. iniezioni dentro le cannuce precedentemente applicate per la totale saturazione di tutti gli spazi vuoti all'interno del calcestruzzo e fino al reintegro del legante evidentemente perduto, l'operazione di iniezione dovrà avvenire successivamente all'iniezione di acqua dentro le cannuce fino ad assicurarsi che l'interno sia ben bagnato.

Le iniezioni nei contrafforti verranno eseguite dal basso verso l'alto e solo dopo aver eseguito quelle sulle soglie.

Considerando la dimensione e gli spessori dei getti di calcestruzzo e lo stato di degrado, occorrerà fare una serie di cicli di iniezioni, partendo dalle malte meno fluide e finendo con resine epossidiche di tipo fluido o superfluido, fino al ripristino completo della massa strutturale.

E' infine previsto, al termine delle opere di consolidamento del calcestruzzo, la verifica dell'efficacia degli interventi attraverso prove di permeabilità nei fori di sondaggio, immettendo acqua in pressione (prove Lugeon).

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

4.3. SISTEMA DI DRENAGGIO

Il progetto di adeguamento prevede anche la realizzazione di uno sistema di drenaggio, con lo scopo di controllare le sottopressioni e favorire le verifiche di resistenza allo scorrimento. Lo schema di realizzazione differisce nella sezione diga sugli scarichi di fondo e sulle spalle.

Per la sezione sugli scarichi di fondo, è stato introdotto un nuovo cunicolo da cui partono le canne di drenaggio. Il cunicolo è stato posizionato alla quota 295.5 m.s.l.m, ed ha dimensioni di 2m di larghezza e 2.5m di altezza in modo da essere ispezionabile, anche con macchinari per la manutenzione dei drenaggi. La quota è stata scelta sia per facilitarne la realizzazione che per garantire una quota di scarico superiore ai massimi livelli d'acqua previsti a valle. Lo scarico delle acque, raccolte nella pila centrale, funzionerà quindi sempre a gravità e terminerà con un discendente da montare sul dorso della pila o una sistemazione locale a scivolo del dorso pila.

Il cunicolo è da realizzarsi dopo i lavori di consolidamento e verrà ricavato in parte formando una trincea nelle soglie, che verranno poi ricostruite, ed in parte formato per scavo attraverso i contrafforti.

Il lavoro di perforazione delle canne drenanti avverrà quindi in condizioni di cielo aperto, facilitandone l'esecuzione. A monte delle canne drenanti sono previste delle iniezioni di tenuta (passo 2.5 m e profonde circa 10 m nella roccia) per completare il sistema di abbattimento delle sottopressioni. Le iniezioni di tenuta devono precedere la realizzazione delle canne drenanti.

Una soluzione diversa è stata pensata per la sezione di spalla. Per questa, sia il drenaggio che lo schermo verranno realizzati effettuando delle perforazioni inclinate operando dal paramento di valle. In questo modo si evita di creare disturbo al corpo diga introducendo un cunicolo con tecniche di scavo.

Gli interventi sugli scarichi di fondo sono quindi illustrati nelle due figure che seguono (oltre che sugli elaborati grafici di progetto)

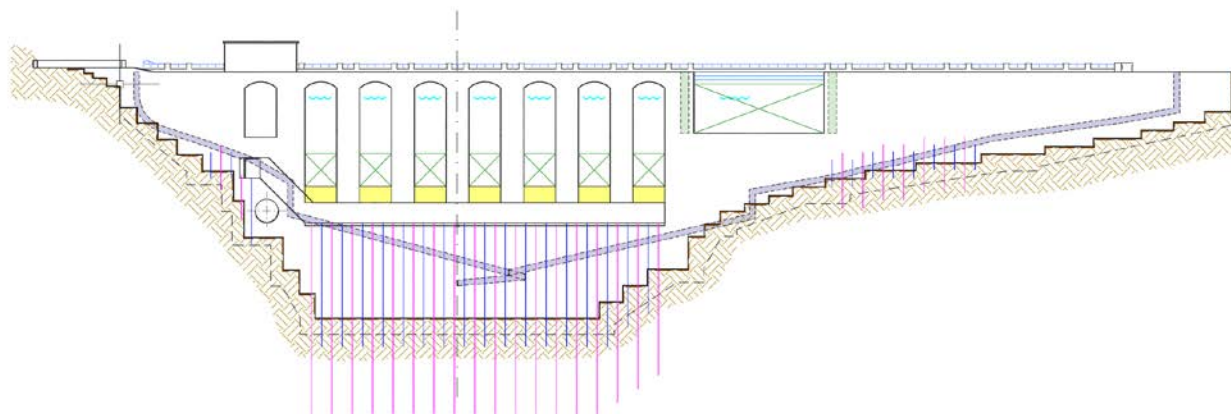


Fig. 4-5 : interventi di progetto - profilo

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

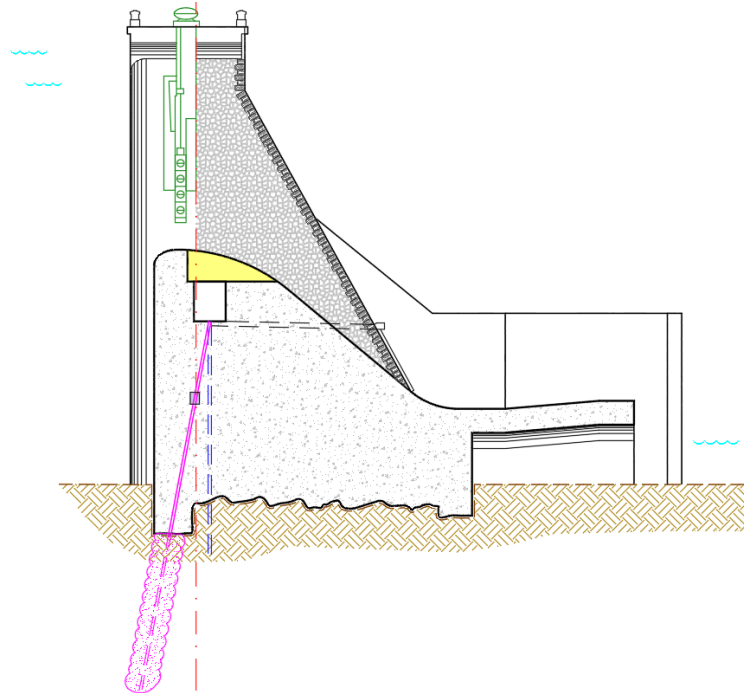


Fig. 4-6 : Interventi di progetto – Sezione su scarico di fondo

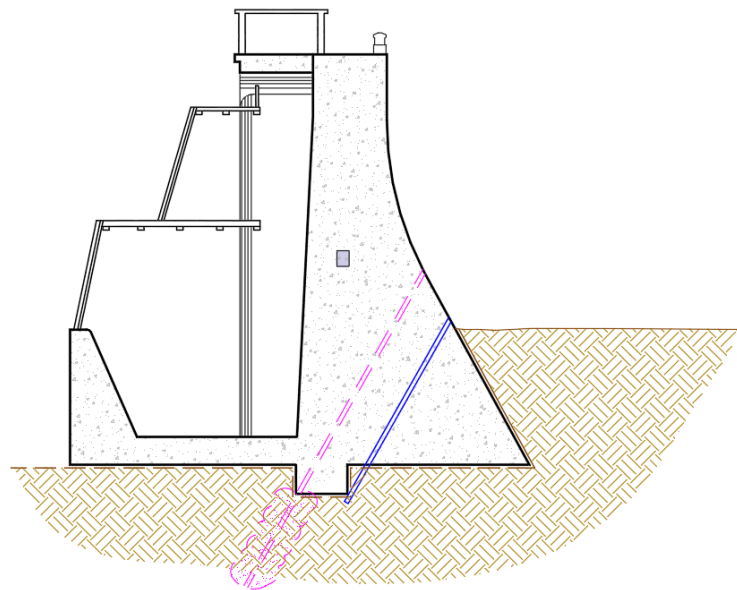


Fig. 4-7 : Interventi di progetto – profilo su sezione di spalla (spalla sx)

4.4. RIEMPIMENTO CUNICOLO ESISTENTE E VANI PARATOIA

Tra i lavori previsti ci sono i riempimenti dei vani galleggianti della vecchia paratoia radiale, posti in destra e sinistra della sezione sfiorante, ed il riempimento del cunicolo esistente.

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

I vani dei galleggianti erano funzionali per la paratoia radiale originale, sostituita con una nuova paratoia munita di ventola nel 1987. La nuova paratoia non ne necessita ma le camere sono state lasciate com'erano inclusi i galleggianti al loro interno. Questi verranno rimossi e le camere riempite con calcestruzzo.

Questo intervento ha diverse finalità: sostenere meglio la nuova struttura di contrasto, di cui si parlerà nel paragrafo a seguire; aggiungere peso utile nei confronti dello scorrimento; completare per l'intero corpo diga l'intervento di consolidamento effettuato con i lavori di iniezione. Per ovvie ragioni, i galleggianti inoltre è opportuno che siano rimossi.

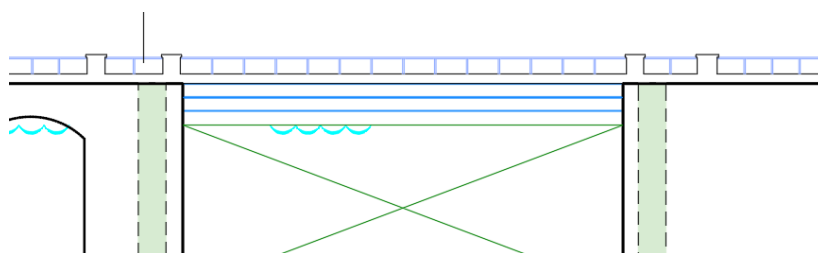
Per quanto riguarda il cunicolo esistente, non più ispezionabile (neanche con ROV) da tempo sia per le dimensioni ridotte ma anche per le concrezioni che vi si sono formate, si prevede che esso venga riempito con calcestruzzo autolivellante. Questo intervento è anch'esso necessario per completare il consolidamento del corpo diga, rimuovendo un vuoto che potenzialmente potrebbe causare filtrazioni e dilavamento.

4.5. STRUTTURA DI CONTRASTO SULLO SFIORATORE

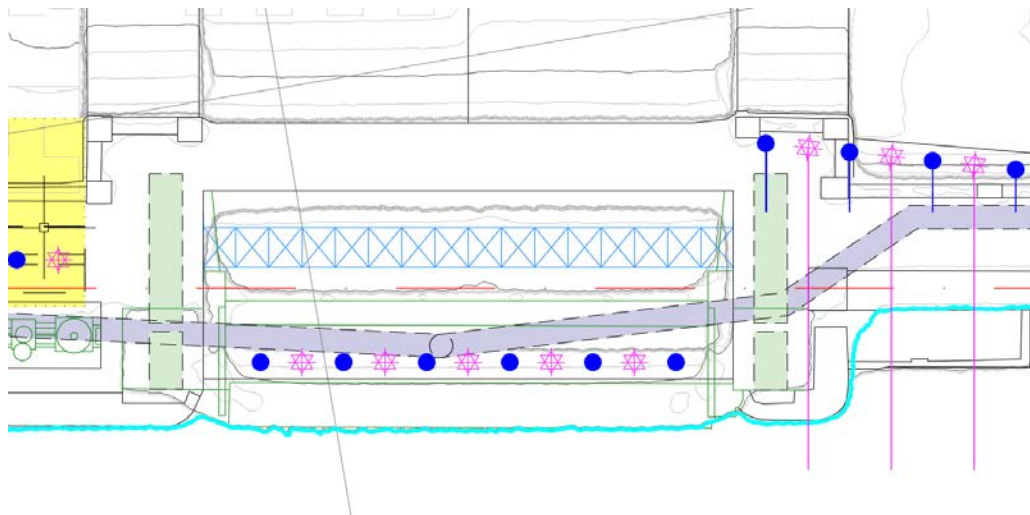
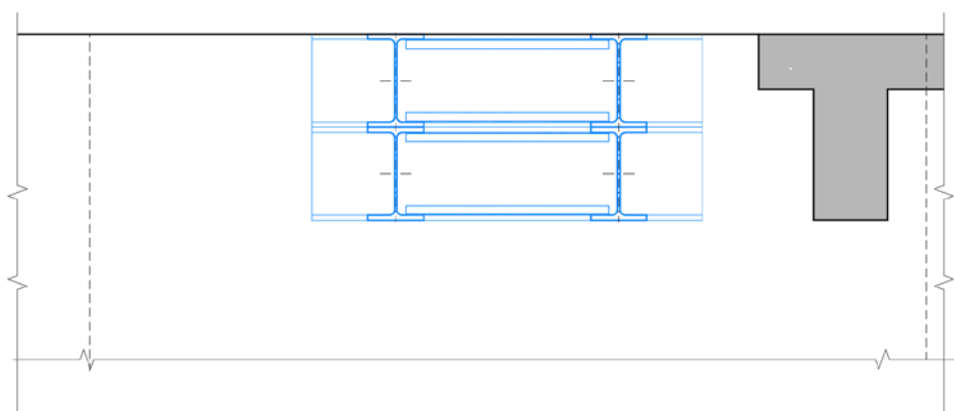
L'ultimo intervento riguarda la struttura di contrasto sullo sfioratore. Come illustrato in precedenza questa struttura permette di garantire una continuità da spalla a spalla del vincolo di testa delle pile.

Tale vincolo potrebbe essere fornito, in alternativa, dalla passerella di cresta ove fosse collegata ad entrambe le spalle. Al momento questo collegamento esiste solo per la pila in spalla sinistra poiché la sezione sfiorante (adiacente alla spalla destra) è attraversata da una passerella di tipo diverso e su appoggi scorrevoli. Il collegamento da un solo lato non è efficace in quanto richiederebbe alla connessione tra passerella e spalla di poter agire come vincolo bilatero, cosa che non può fare (non può offrire resistenza a trazione). E' quindi necessario inserire una nuova struttura di contrasto che permetta di fornire alle pile il vincolo di cui hanno bisogno.

Si tratta di un grosso puntone metallico formato con profili HEB500 connessi tra loro con una controventatura che ne limiti la snellezza, connessi alle due pile attraverso dei profilati di ripartizione di testa che verranno ancorati nel calcestruzzo esistente. Alla struttura sono affidate solo forze di compressione (così come alla passerella esistente dal lato opposto). L'allineamento e la configurazione sono stati scelti in modo da non interferire con la manovra della paratoia ed in modo da garantire sufficiente allineamento con la passerella, con cui è antagonista, sugli scarichi di fondo. L'allineamento è necessario per evitare che nascano torsioni in testa alle pile e che questa debbano ricentrare l'eccentricità mobilitando resistenza a taglio nel piano orizzontale. Come spiegato sopra il trasferimento degli sforzi è facilitato dal riempimento dei vani galleggianti. L'intervento è illustrato nelle figure che seguono e sugli elaborati grafici di progetto.



RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

Fig. 4-8 : struttura metallica di contrasto sullo sfioratore – profilo (in blu)*Fig. 4-9 : struttura metallica di contrasto sullo sfioratore – pianta (in blu)**Fig. 4-10 : struttura metallica di contrasto sullo sfioratore – sezione (in blu)*

Le due figure di sopra mostrano il traliccio in pianta e la sua configurazione in sezione (nella seconda figura). In figura si vede anche la trave di ripartizione di testa ed il posizionamento su più livelli dei controventi. Si tratta comunque di uno schema preliminare che andrà rifinito nei successivi approfondimenti progettuali.

4.6. VERIFICHE SISMICHE IN CONDIZIONI FINALI

Le verifiche di vulnerabilità sismica sono state quindi effettuate per lo stato finale (di progetto) e sono riportate nella relazione dedicata:

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

- 130 STR R SP 003 Verifica Sismica – Stato di Progetto

che è parte integrante di questo Progetto Preliminare.

Le verifiche dimostrano, come verrà detto anche qui di seguito, che gli interventi previsti sono risolutivi per l'adeguamento sismico della diga.

Come per lo stato attuale, Le condizioni sismiche sono state analizzate con analisi Modale con Spettro di Risposta. Le verifiche sono state effettuate per due sezioni rappresentative della diga:

- adottando le combinazioni di carico previste dalla normativa
- considerando sia gli stati limite ultimo (SLU) che di esercizio (SLE)

Le sezioni rappresentative sono quelle corrispondenti alla Pila 2 e quella di spalla sinistra di massima altezza.

Le due tabelle seguenti sintetizzano tutte le verifiche effettuate con le relative condizioni di carico adottate nelle combinazioni di:

- Stato Limite Ultimo
- Stato Limite di Esercizio

| | FONDAMENTALE | ECCEZIONALE | SISMICA | | | |
|--------------------------|-------------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Esercizio Normale | Massima Piena | SLC/ Pieno → ↑ | SLC/ Pieno → ↓ | SLC/ Pieno ← ↑ | SLC/ Pieno ← ↓ |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Peso proprio | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta idrostatica monte | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta idrostatica valle | SI | NO | SI | SI | SI | SI |
| Sottospinta | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta del ghiaccio | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| Spinta dell'interrimento | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta idrodinamica | NO | NO | SI | SI | SI | SI |
| Azione sismica orizz. | NO | NO | SI | SI | SI | SI |
| Azione sismica verticale | NO | NO | SI | SI | SI | SI |

Tab. 4-1 : Combinazioni delle azioni per le diverse condizioni di carico – STATO LIMITE ULTIMO

| | FONDAMENTALE | ECCEZIONALE | SISMICA | | | |
|--------------------------|-------------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Esercizio Normale | Massima Piena | SLD/ Pieno → ↑ | SLD/ Pieno → ↓ | SLD/ Pieno ← ↑ | SLD/ Pieno ← ↓ |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Peso proprio | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta idrostatica monte | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta idrostatica valle | SI | NO | SI | SI | SI | SI |
| Sottospinta | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta del ghiaccio | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| Spinta dell'interrimento | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| Spinta idrodinamica | NO | NO | SI | SI | SI | SI |
| Azione sismica orizz. | NO | NO | SI | SI | SI | SI |
| Azione sismica verticale | NO | NO | SI | SI | SI | SI |

Tab. 4-2 : Combinazioni delle azioni per le diverse condizioni di carico – STATO LIMITE DI ESERCIZIO

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

Le verifiche allo scorrimento sulla Pila 2 e sulla sezione di Spalla della diga sono state effettuate per le combinazioni statiche (in condizioni di esercizio normale e di massima piena) nonché per le quattro condizioni dinamiche più sfavorevoli cioè quelle con serbatoio pieno (variando la direzione del sisma orizzontale, verso monte e verso valle, e del sisma verticale, verso l'alto e verso il basso).

Le tabelle seguenti sintetizzano i risultati di tutte le verifiche allo scorrimento:

- in corpo diga e sul piano di fondazione
- per le due diverse sezioni di verifica
- per ciascuna combinazione di carico

Il risultato è presentato come fattore di sicurezza allo scorrimento, rapporto tra resistenze e le azioni (R_d/E_d), che viene calcolato per ogni combinazione di carico in ogni sezione e quota rappresentativa.

Si rammenta che tale valore deve risultare superiore ad 1.15 perché la verifica sia soddisfatta.

| Sezioni di calcolo | | | Fattore di sicurezza SCORRIMENTO | | | | | |
|--------------------|------------------|-------------|----------------------------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | | FONDAMENTALE | ECCEZIONALE | SISMICA | | | |
| | | | Esercizio Normale | Massima Piena | SLC/ Pieno → ↑ | SLC/ Pieno → ↓ | SLC/ Pieno ← ↑ | SLC/ Pieno ← ↓ |
| ID | Elev. (m slm) | posizione | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 300.0 | Corpo Diga | 12.0 | 12.0 | 2.12 | 2.09 | 4.31 | 4.76 |
| 2 | 284.0 | Piano fond. | 3.73 | 3.70 | 1.27 | 1.46 | 47.85 | 56.43 |

Tab. 4-3 : Pila 2 - Fattori di sicurezza allo scorrimento per combinazioni statiche e sismiche

| Sezioni di calcolo | | | Fattore di sicurezza SCORRIMENTO | | | | | |
|--------------------|------------------|-------------|----------------------------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | | FONDAMENTALE | ECCEZIONALE | SISMICA | | | |
| | | | Esercizio Normale | Massima Piena | SLC/ Pieno → ↑ | SLC/ Pieno → ↓ | SLC/ Pieno ← ↑ | SLC/ Pieno ← ↓ |
| ID | Elev. (m slm) | posizione | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 298.0 | Corpo Diga | 12.7 | 12.8 | 4.46 | 4.54 | 19.18 | 28.93 |
| 2 | 294.6 | Piano fond. | 4.98 | 5.03 | 1.72 | 1.85 | 16.94 | 33.64 |

Tab. 4-4 : Sezione di Spalla - Fattori di sicurezza allo scorrimento per combinazioni statiche e sismiche

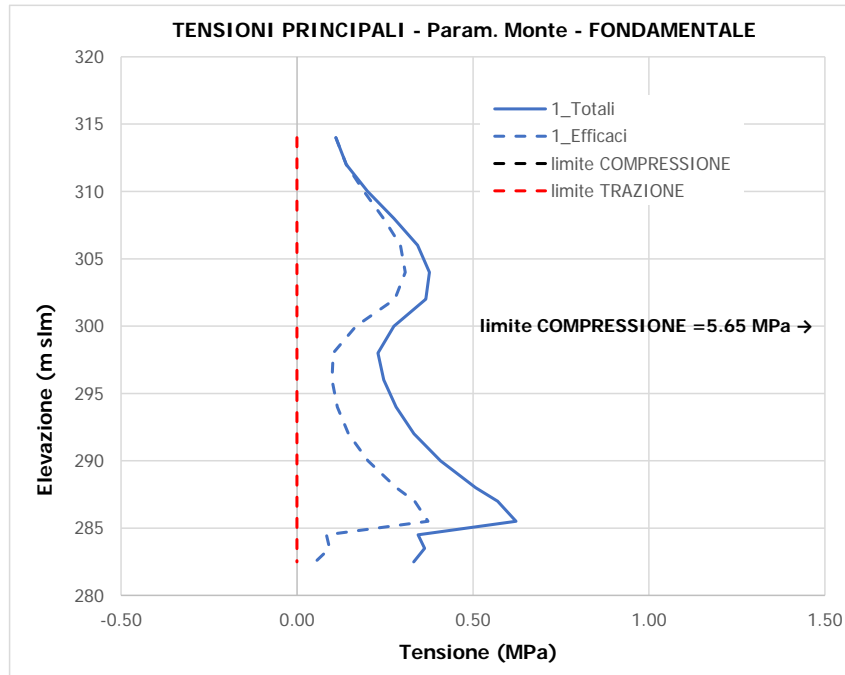
Le tabelle mostrano che le verifiche danno tutte esito positivo.

I margini di sicurezza in condizioni statiche sono ampi ($3.70 \gg 1.15$) ed in condizioni sismiche siamo al di sopra del limite minimo ($1.27 > 1.15$). I fattori di sicurezza più bassi si registrano in combinazione 3 sia per la pila che per la spalla. Questa è infatti la condizione di carico più negativa.

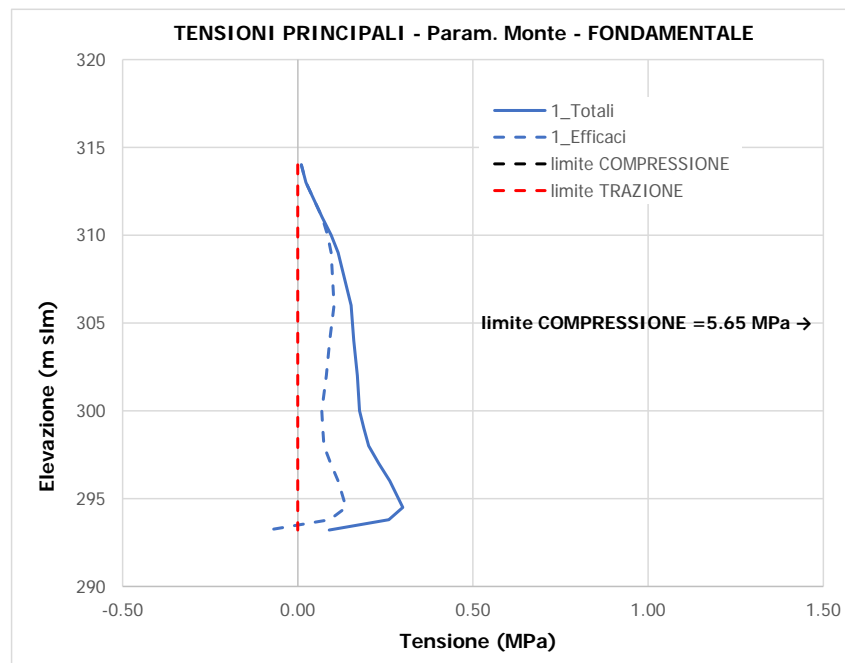
Le verifiche delle tensioni sulla Pila 2 e sulla sezione di Spalla della diga sono state effettuate per la combinazione statica fondamentale nonché per le quattro condizioni dinamiche richiamate precedentemente (SLD).

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

Il risultato è presentato in termini di tensioni principali totali ed efficaci, sul paramento di monte e di valle. Le tensioni sono nei limiti per ogni combinazione di carico e ad ogni quota. I grafici seguenti mostrano le condizioni di carico più critiche, con le massime trazioni sul paramento di monte e compressioni sul paramento di valle.

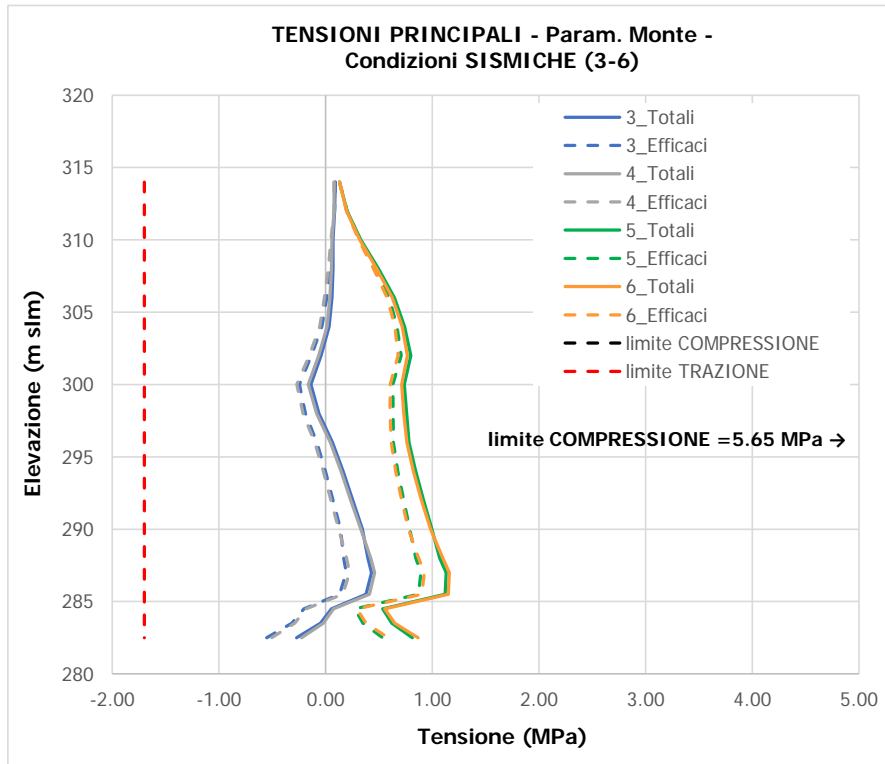


Tab. 4-5 : Pila 2 - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Fondamentale

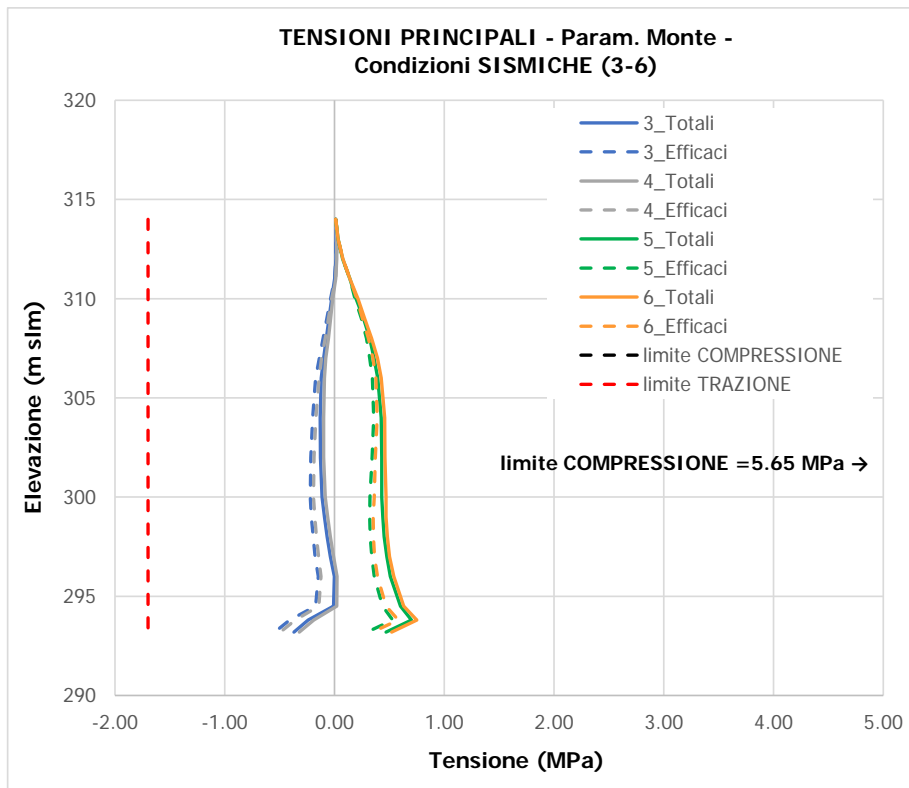


Tab. 4-6 : Sezione di Spalla - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Fondamentale

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

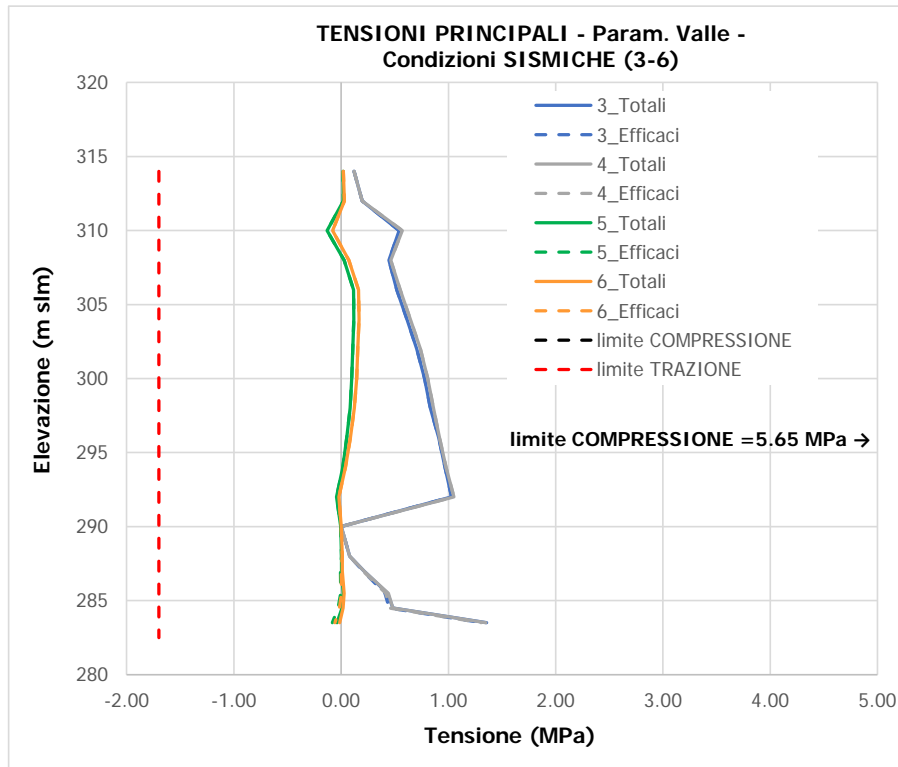


Tab. 4-7 : Pila 2 - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Sismiche (3-6)

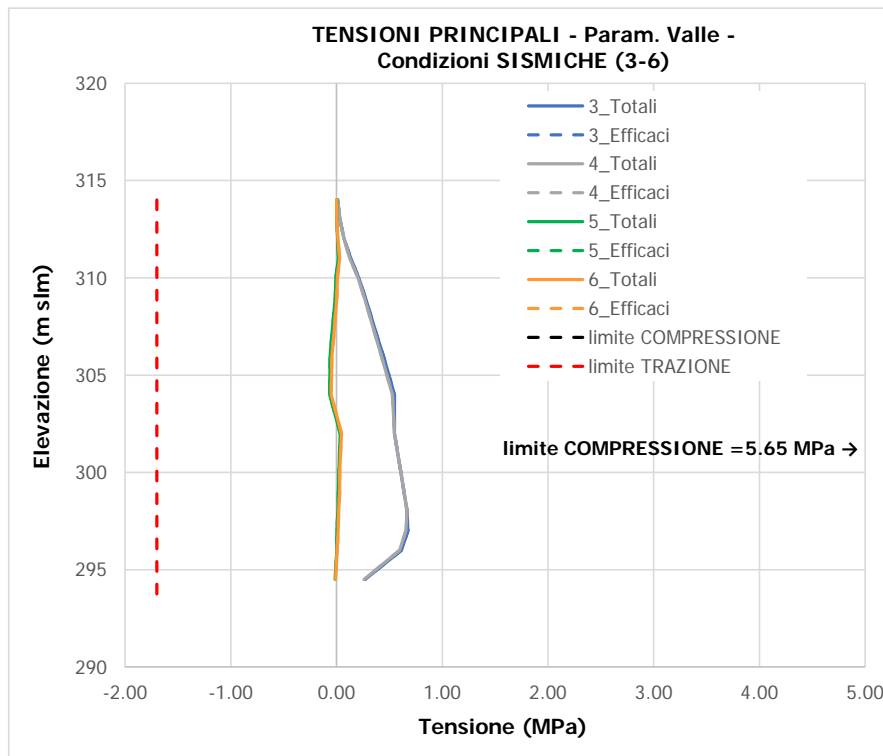


Tab. 4-8 : Sezione di Spalla - Tensioni principali – Paramento di Monte – comb. Sismiche (3-6)

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA



Tab. 4-9 : Pila 2 - Tensioni principali – Paramento di Valle – comb. Sismiche (3-6)



Tab. 4-10 : Sezione di Spalla - Tensioni principali – Paramento di Valle – comb. Sismiche (3-6)

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

Le tensioni di compressione nella pila 2, come atteso, sono ben al di sotto dei limiti ammissibili. Il valore massimo registrato (1.36 MPa) in combinazione sismica 3 è molto inferiore al limite di normativa (<5.77 MPa). Le tensioni di compressione nella spalla sono anch'esse ben al di sotto dei limiti ammissibili. Il valore massimo registrato (0.67 MPa) in combinazione sismica 4 è molto inferiore al limite di normativa (<5.77 MPa).

Si evince che le compressioni nel calcestruzzo non pongono criticità sulla sicurezza della diga essendo la resistenza del materiale ampiamente oltre i minimi richiesti.

In condizioni statiche sul paramento di monte della pila non risultano sforzi di trazione quindi le disposizioni previste dal criterio D.2.2.2 della NTD 2014 sono rispettate. Sulla spalla si osservano lievi tensioni di trazione al piede del paramento di monte (>-0.08 MPa) che si possono considerare certamente inferiori alla resistenza a trazione del calcestruzzo e, in generale, di modesta importanza per la struttura.

Per la pila 2, in condizioni sismiche si hanno delle modeste trazioni sul paramento di monte in combinazione 3 e 4 (serbatoio pieno e sisma orizzontale verso valle). La verifica dà comunque esito positivo in quanto queste sono sempre al di sotto dei limiti di normativa. Il valore massimo misurato in corrispondenza del piede di monte (-0.55 MPa) è ampiamente inferiore ai limiti di normativa (-1.70 MPa).

Per la spalla si hanno delle modeste trazioni sul paramento di monte in combinazione 3 e 4 (serbatoio pieno e sisma orizzontale verso valle). La verifica dà comunque esito positivo in quanto queste sono sempre al di sotto dei limiti di normativa. Il valore massimo misurato in corrispondenza del piede di monte (-0.54 MPa) è ampiamente inferiore ai limiti di normativa (-1.70 MPa).

Sono state poi eseguite le verifiche a presso-flessione deviata effettuate sulla sezione di base della pila sotto sisma in direzione destra-sinistra.

Il calcolo è stato effettuato mediante un'analisi tridimensionale agli elementi finiti in cui sono stati usati elementi solidi tetraedrici per modellare un modulo rappresentativo della diga costituita da 3 pile con i rispettivi scivoli di scarico, 2 diaframmi in calcestruzzo collocati nella parte superiore delle luci di scarico e la passerella pedonale in fregio alla diga. La struttura è considerata incastrata alla base ed è vincolata alla traslazione in direzione destra-sinistra in corrispondenza delle 2 facce laterali degli scivoli. È stato considerato anche il vincolo fornito dalla passerella che si innesta sulle spalle. L'analisi svolta è di tipo elastico lineare dinamica con spettro di risposta.

Le verifiche allo Stato Limite Ultimo e allo Stato Limite di Esercizio sono stata condotte per le combinazioni dinamiche più sfavorevoli cioè, rispettivamente, quella con sisma allo SLC a serbatoio pieno e con sisma allo SLD, sempre a serbatoio pieno.

Per entrambi gli Stati Limite si è tenuto conto della combinazione tra azioni dinamiche nella direzione monte valle (indicata con X), destra-sinistra (indicata con Y) e verticale, per le quali sono stati utilizzati i fattori di concomitanza di 1 e 0.3 così come previsto dalla norma.

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

Tutte le verifiche hanno dato esito positivo (vedere relazione di calcolo).

Infine, si è proceduto al dimensionamento e verifica della struttura di contrasto prevista in corrispondenza dello scarico di superficie collocato in sponda destra costituita da 2 strutture scatolari posizionate una sopra l'altra formate ognuna da 2 profili HEB500, aventi la funzione di puntoni, e da 2 strutture tralicciate di controventamento che collegano i profili impedendone l'instabilità.

Per la combinazione dinamica agli SLU più sfavorevole, il massimo carico assiale agente su ogni puntone risulta pari a 3500 kN.

La verifica, condotta secondo le procedure per la pressoflessione delle membrature strutturali presenti nell'EN 1993-1-1:2005 Design of Steel Structures, risulta soddisfatta in quanto il fattore di utilizzazione, pari a 0.73, è inferiore al valore limite pari a 1.

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

5. CONCLUSIONI

Questa relazione descrive lo stato attuale e gli interventi previsti nel Progetto Preliminare di adeguamento della diga di Pontecosi.

L'esame dello stato attuale ha portato ad identificare delle criticità che andranno superate mediante opportuni interventi di adeguamento sismico. Lo studio si è avvalso di documenti ed indagini precedenti ma anche di informazioni raccolte mediante sopralluoghi ed indagini geofisiche e di laboratorio integrative svolti come parte del presente incarico.

In primo luogo, i documenti e le indagini di cui sopra hanno evidenziato porzioni di calcestruzzo degradato, con carenze di legante in alcune zone e localmente presenza di vuoti. Tale tipologia di degrado compromette la durabilità del materiale, permettendo filtrazioni che provocano un decadimento progressivo delle caratteristiche prestazionali del calcestruzzo.

Il presente progetto prevede quindi di consolidare il calcestruzzo degradato, ripristinandone la continuità, mediante l'esecuzione di iniezioni in corpo diga.

Le verifiche di vulnerabilità sismica per lo Stato Attuale hanno inoltre identificato delle insufficienze.

Le verifiche statiche allo scorrimento danno esito positivo, con margini di sicurezza buoni ($2.70 > 1.15$), mentre quelle sismiche sul piano di fondazione sono negative, specialmente in pila 2 ($0.88 < 1.15$) e, anche se di poco, nella sezione di spalla ($1.12 < 1.15$). I fattori di sicurezza più bassi si registrano in combinazione 3 sia per la pila che per la spalla. Questa è infatti la condizione di carico più critica.

Le verifiche sulle tensioni nel corpo diga, per sisma monte valle hanno invece dato esito positivo. Tuttavia, verifiche in direzione destra sinistra hanno mostrato che senza un vincolo a livello di cresta, le pile non soddisfano le verifiche a pressoflessione.

Sulla base delle insufficienze di cui sopra emerge quindi la necessità di intervenire, oltre che per risanare i materiali in corpo diga, anche abbattere le sottopressioni (con questi due interventi si risolvono i problemi di scorrimento monte valle) e vincolare in testa le pile, per azioni in direzione destra sinistra.

Per la sezione sugli scarichi di fondo, è stato pertanto introdotto un nuovo cunicolo di drenaggio da cui realizzare uno schermo di iniezioni in roccia e canne di drenaggio. Per la sezione di spalla, sia il drenaggio che lo schermo verranno realizzati effettuando operando dal paramento di valle.

Questi due interventi sono illustrati, sinteticamente, nelle figure che seguono.

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

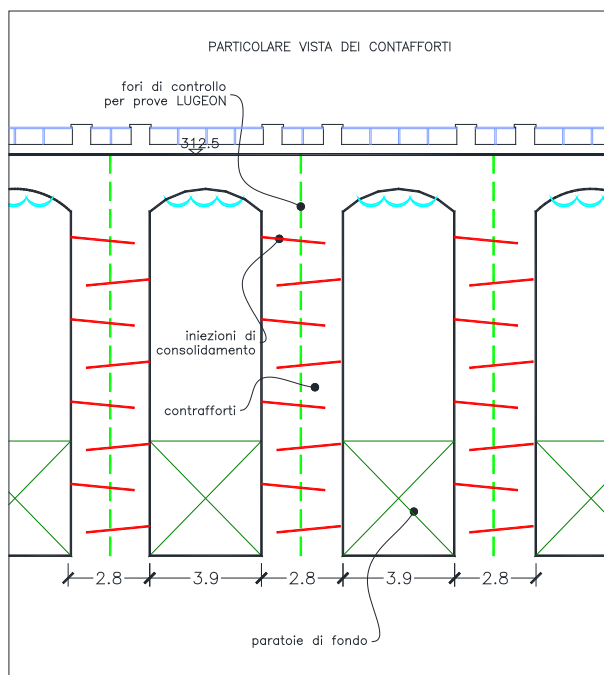


Fig. 5-1 : Schema iniezioni di consolidamento - particolare vista dei contrafforti

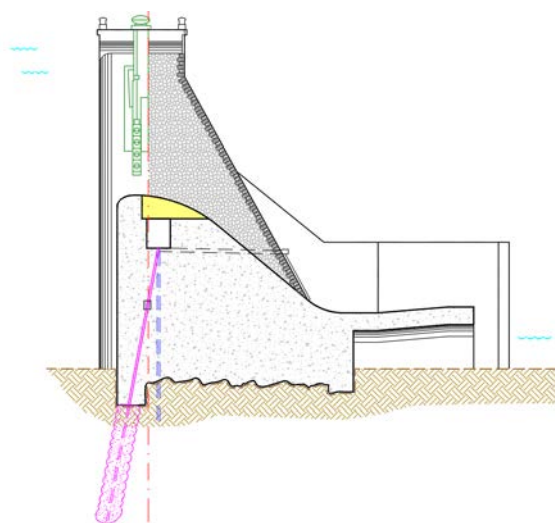


Fig. 5-2 : Schermo di iniezione e sistema di drenaggio – Sezione su scarico di fondo

Tra i lavori previsti ci sono i riempimenti dei vani galleggianti della vecchia paratoia radiale, posti in destra e sinistra della sezione sfiorante, ed il riempimento del cunicolo esistente.

L'ultimo intervento riguarda la struttura di contrasto sullo sfioratore, necessaria per garantire una continuità da spalla a spalla del vincolo di testa delle pile. Si tratta di un puntone metallico formato con profili HEB500 connessi tra loro con una controventatura, connessi alle due pile attraverso dei profilati di ripartizione di testa che verranno ancorati nel calcestruzzo esistente

RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA

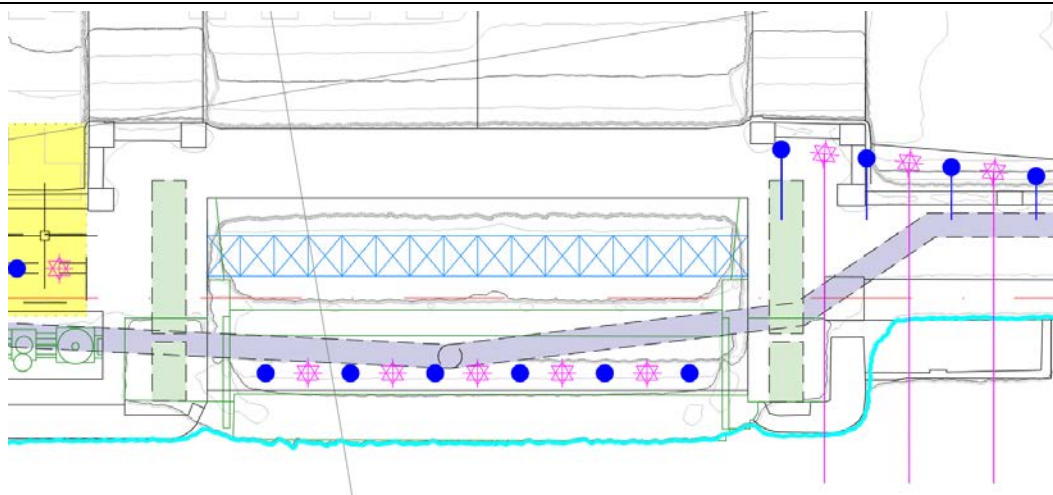


Fig. 5-3 : struttura metallica di contrasto sullo sfioratore – pianta (in blu)

Le verifiche effettuate considerando lo stato finale (di progetto) danno tutte esito positivo.

In particolare, le verifiche a scorrimento, il cui esito è riportato nelle tabelle sottostanti, sono tutte soddisfatte.

| Sezioni di calcolo | | | Fattore di sicurezza SCORRIMENTO | | | | | |
|--------------------|---------------|-------------|----------------------------------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | | FONDAMENTALE | ECCEZIONALE | SISMICA | | | |
| | | | Esercizio Normale | Massima Piena | SLC/ Pieno → ↑ | SLC/ Pieno → ↓ | SLC/ Pieno ← ↑ | SLC/ Pieno ← ↓ |
| ID | Elev. (m slm) | posizione | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 300.0 | Corpo Diga | 12.0 | 12.0 | 2.12 | 2.09 | 4.31 | 4.76 |
| 2 | 284.0 | Piano fond. | 3.73 | 3.70 | 1.27 | 1.46 | 47.85 | 56.43 |

Tab. 5-1 : Pila 2 - Fattori di sicurezza allo scorrimento per combinazioni statiche e sismiche

| Sezioni di calcolo | | | Fattore di sicurezza SCORRIMENTO | | | | | |
|--------------------|---------------|-------------|----------------------------------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | | FONDAMENTALE | ECCEZIONALE | SISMICA | | | |
| | | | Esercizio Normale | Massima Piena | SLC/ Pieno → ↑ | SLC/ Pieno → ↓ | SLC/ Pieno ← ↑ | SLC/ Pieno ← ↓ |
| ID | Elev. (m slm) | posizione | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 298.0 | Corpo Diga | 12.7 | 12.8 | 4.46 | 4.54 | 19.18 | 28.93 |
| 2 | 294.6 | Piano fond. | 4.98 | 5.03 | 1.72 | 1.85 | 16.94 | 33.64 |

Tab. 5-2 : Sezione di Spalla - Fattori di sicurezza allo scorrimento per combinazioni statiche e sismiche

I margini di sicurezza in condizioni statiche sono ampi ($3.70 \gg 1.15$) ed in condizioni sismiche siamo al di sopra del limite minimo ($1.27 > 1.15$). I fattori di sicurezza più bassi si registrano in combinazione 3 sia per la pila che per la spalla. Questa è infatti la condizione di carico più negativa. Anche le verifiche per sisma in direzione destra sinistra danno esito positivo, nella configurazione di progetto che include la nuova struttura di contrasto metallica.