



Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità
Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti



DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

II122F-A-STR-RT-001-00

RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO

Pag. 1 di 75

Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità
Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti

“PROGETTO PER L’AFFIDAMENTO DEI SERVIZI DI INGEGNERIA RELATIVI ALLO STUDIO DI RIVALUTAZIONE SISMICA DELLE OPERE STRUTTURALI DELL’IMPIANTO, ALLA PROGETTAZIONE ESECUTIVA DELLA MANUTENZIONE STRAORDINARIA DELLA STRADA DI COLLEGAMENTO CASA DI GUARDIA – POZZO PARATOIE, ALLO STUDIO INTERPRETATIVO E ALLA PROGETTAZIONE ESECUTIVA DEL RIEFFICIENTAMENTO DELLA STRUMENTAZIONE DI MONITORAGGIO E CONTROLLO”

DIGA GIBBESI

RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE

VASCA DI DISSIPAZIONE

**RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO**



DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

II122F-A-STR-RT-001-00

**RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO**

Pag. 2 di 75

INDICE

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | OGGETTO E SCOPO | 6 |
| 2. | PREMESSE | 7 |
| 3. | NORMATIVA DI RIFERIMENTO | 9 |
| 3.1. | Normative utilizzate in fase di progettazione esecutiva | 9 |
| 3.2. | Normativa di riferimento attuale | 9 |
| 3.3. | Documentazione di progetto e letteratura | 10 |
| 4. | DESCRIZIONE DELL'OPERA | 11 |
| 5. | STATO DI FATTO | 12 |
| 6. | CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL SITO | 15 |
| 6.1. | Caratterizzazione geotecnica del progetto esecutivo originale | 15 |
| 6.2. | Caratterizzazione geotecnica attuale | 15 |
| 7. | CARATTERISTICHE DEI MATERIALI | 19 |
| 7.1. | Caratteristiche dei materiali dal progetto originale | 19 |
| 7.2. | Indagini sui materiali e prove di laboratorio | 19 |
| 7.2.1. | Indagini DISMAT (febbraio 2016) | 19 |
| 7.2.2. | Indagini SIDERCEM (luglio 2016) | 22 |
| 7.2.3. | Indagini METROTEST (maggio 2021) | 24 |
| 8. | IPOSTESI DI CALCOLO | 27 |
| 8.1. | Materiali | 27 |
| 8.1.1. | Calcestruzzo | 27 |
| 8.1.2. | Acciaio | 29 |
| 8.2. | Parametri sismici | 30 |
| 9. | ANALISI DEI CARICHI | 31 |
| 9.1. | G ₁ – Carichi permanenti strutturali | 31 |
| 9.1.1. | Peso proprio della struttura | 31 |
| 9.1.2. | Spinta statica dell'acqua | 31 |
| 9.1.3. | Spinta statica del terreno | 31 |
| 9.2. | G ₂ – Carichi permanenti non strutturali | 31 |
| 9.3. | Carichi variabili | 31 |
| 9.4. | E – Azioni sismiche | 32 |
| 10. | COMBINAZIONI DI PROGETTO | 33 |
| 10.1. | Parametri caratteristici | 34 |
| 10.2. | Combinazioni di carico per gli stati limite ultimi – Verifiche SLU | 34 |
| 10.3. | Combinazioni di carico per gli stati limite di cedimento – Verifiche SLE | 35 |
| 10.4. | Combinazioni di carico per la verifica sismica SLV | 35 |



DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

II122F-A-STR-RT-001-00

**RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO**

Pag. 3 di 75

| | | |
|---------|---|----|
| 11. | METODO DI CALCOLO | 36 |
| 12. | SEZIONI DI VERIFICA | 37 |
| 13. | ANALISI STRUTTURALE DEL CONCIO 2 | 42 |
| 13.1. | Fasi di calcolo | 42 |
| 13.2. | Modello | 42 |
| 13.3. | Risultati dell'analisi strutturale | 43 |
| 13.3.1. | Risultati configurazione finale (fine costruzione) – Valori caratteristici | 44 |
| 13.3.2. | Risultati condizione con acqua interna – Valori caratteristici | 47 |
| 13.3.3. | Risultati con carichi variabili SLU - Valori di combinazione | 50 |
| 13.3.4. | Risultati combinazione SLV | 53 |
| 14. | VERIFICHE STRUTTURALI | 56 |
| 14.1. | Verifiche statiche (SLU) | 57 |
| 14.1.1. | Verifiche a flessione e a taglio | 59 |
| 14.2. | Verifiche sismiche (SLV) | 62 |
| 14.2.1. | Verifiche sismiche (SLV) a breve termine | 62 |
| 14.2.2. | Verifiche sismiche (SLV) a lungo termine | 66 |
| 14.2.3. | Verifiche di stabilità globale | 69 |
| 15. | PROPOSTA TECNICA DI ADEGUAMENTO SISMICO DELL'OPERA | 70 |
| 15.1. | Adeguamento sismico della vasca | 72 |
| 16. | STIMA ECONOMICA DELL'INTERVENTO PROPOSTO PER LA MESSA IN SICUREZZA SISMICA DELL'OPERA | 74 |



DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

II122F-A-STR-RT-001-00

**RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO**

Pag. 4 di 75

INDICE DELLE FIGURE

| | |
|--|----|
| Figura 2.1: Diga di Gibbesi – Vasca di dissipazione – Planimetria con ubicazione dei tratti interessati dal crollo dei muri | 7 |
| Figura 2.2: Diga di Gibbesi – Vasca di dissipazione – Crollo porzione di paramento verticale | 7 |
| Figura 4.1: Vasca di dissipazione – Vista in pianta | 11 |
| Figura 4.2: Vasca di dissipazione – Sezione tipologica paramento verticale della vasca | 11 |
| Figura 5.1: Vasca di dissipazione – Sbocco della galleria dello scarico di fondo – Porzioni di muro crollate e interrimento generalizzato della vasca | 12 |
| Figura 5.2: Vasca di dissipazione – Sbocco della galleria scarico di superficie sinistro – Porzioni di muro crollate | 13 |
| Figura 5.3: Vasca di dissipazione – Porzioni di muro crollate | 13 |
| Figura 5.4: Vasca di dissipazione – Degradato del calcestruzzo | 14 |
| Figura 5.5: Vasca di dissipazione – Degradato del calcestruzzo | 14 |
| Figura 5.6: Vasca di dissipazione – Degradato del calcestruzzo e muro crollato | 14 |
| Figura 6.1: Vasca di dissipazione – Ubicazione dei sondaggi effettuati in sede di Appalto Concorso (sinistra) e di quelli effettuati nel 2018 (destra) | 15 |
| Figura 6.2: Vasca di dissipazione – Rapporti opere-terreno – Sezione 6 | 16 |
| Figura 6.3: Vasca di dissipazione – Rapporti opere-terreno – Sezione 9 | 16 |
| Figura 7.1: Planimetria generale con ubicazione indagini eseguite il 13/04/2018 | 23 |
| Figura 7.2: Planimetria generale con ubicazione indagini eseguite il 23/05/2018 | 23 |
| Figura 8.1: Legame costitutivo del calcestruzzo Rck 300 e Rck 250 | 28 |
| Figura 8.2: Legame costitutivo dell'acciaio FeB 44 k e FeB 32 k | 29 |
| Figura 12.1: Vasca di dissipazione - Planimetria e sezione longitudinale con indicazione delle carpenterie dei diaframmi come da progetto in Variante del 1981 | 37 |
| Figura 12.2: Vasca di dissipazione – Situazione a maggio 2010 | 38 |
| Figura 12.3: Vasca di dissipazione – Iniziale perdita di allineamento tra le elevazioni – Febbraio 2012 | 38 |
| Figura 12.4: Vasca di dissipazione – Iniziale perdita di allineamento tra le elevazioni – Novembre 2012 | 38 |
| Figura 12.5: Vasca di dissipazione – Crollo muro andatore in destra idraulica – 14 marzo 2013 | 39 |
| Figura 12.6: Vasca di dissipazione – Situazione dopo i primi crolli del 2013 | 40 |
| Figura 12.7: Vasca di dissipazione – Situazione dopo i crolli del 2016 | 40 |
| Figura 12.8: Vasca di dissipazione – Situazione attuale dopo riprofilatura del terreno a monte dei muri e pulizia dai detriti | 40 |
| Figura 12.9: Vasca di dissipazione – Sezione trasversale delle sezioni iniziali e finali del concio 2 | 41 |

| | | |
|---------------|--|----|
| Figura 13.1: | Vasca di dissipazione – Geometria del modello della struttura con indicazione dei carichi applicati | 43 |
| Figura 13.2: | Momenti flettenti a fine costruzione | 44 |
| Figura 13.3: | Azioni di taglio a fine costruzione | 45 |
| Figura 13.4: | Azioni assiali a fine costruzione | 46 |
| Figura 13.5: | Azioni assiali nei tiranti a fine costruzione | 46 |
| Figura 13.6: | Momento flettente | 47 |
| Figura 13.7: | Azioni di taglio | 48 |
| Figura 13.8: | Azioni assiali | 49 |
| Figura 13.9: | Azioni assiali nei tiranti | 49 |
| Figura 13.10: | Momenti flettenti | 50 |
| Figura 13.11: | Azioni di taglio | 51 |
| Figura 13.12: | Azioni assiali | 52 |
| Figura 13.13: | Azioni assiali nel tirante fittizio | 52 |
| Figura 13.14: | Momenti flettenti in combinazione sismica (SLV) | 53 |
| Figura 13.15: | Azioni di taglio in combinazione sismica (SLV) | 54 |
| Figura 13.16: | Azioni assiali in combinazione sismica (SLV) | 55 |
| Figura 13.17: | Azioni assiali nel tirante fittizio in combinazione sismica (SLV) | 55 |
| Figura 14.1: | Vista in sezione del muro e del solettone | 57 |
| Figura 14.2: | Vista frontale e in sezione del muro e del diaframma frontale | 58 |
| Figura 14.3: | Indicazioni approssimate della velocità di corrosione al variare delle condizioni ambientali e del tipo di calcestruzzo secondo Pedferri | 66 |
| Figura 15-1: | Diga di Gibbesi - Vasca di dissipazione – Sezione tipo del muro perimetrale esistente fondato su diaframmi | 70 |
| Figura 15-2: | Diga di Gibbesi - Vasca di dissipazione – Intervento di messa in sicurezza sismica delle strutture perimetrali di contenimento delle terre fondate sui diaframmi | 71 |
| Figura 15-3: | Diga di Gibbesi - Vasca di dissipazione – Intervento di messa in sicurezza sismica delle strutture interne di contenimento delle terre | 71 |
| Figura 15-4: | Diga di Gibbesi - Vasca di dissipazione – Tirante tipo Dywidag | 73 |

| | | |
|--|---|--|
|  | <p>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p>DIGA GIBBESI</p> <p>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE VASCA DI DISSIPAZIONE</p> |  |
| <p>II122F-A-STR-RT-001-00</p> | <p>RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO</p> | <p>Pag. 6 di 75</p> |

1. OGGETTO E SCOPO

L'oggetto della presente relazione è la vasca di dissipazione della diga di Gibbesi.

Lo scopo della presente relazione è la determinazione della vulnerabilità sismica della vasca di dissipazione e lo studio di fattibilità tecnico economica degli interventi d'adeguamento strutturale. Oltre all'aspetto sismico, parallelamente, al fine di avere un quadro generale sul comportamento delle strutture costituenti la vasca, saranno condotte anche le verifiche di sicurezza statica.

Per i dati generali e i criteri di progetto si rimanda alla relazione "*Dati generali e criteri di progetto*" contenuta nel presente progetto, dove, alla luce delle normative vigenti, si riportano i dati generali e i criteri adottati nel progetto della rivalutazione sismica delle opere accessorie della diga di Gibbesi e dello studio legato alla valutazione tecnico-economica degli interventi per la loro messa in sicurezza sismica (studio di fattibilità tecnico-economica). L'adeguamento sismico proposto a livello di fattibilità tecnico-economica, se necessario, ha lo scopo di definire quegli interventi atti ad aumentare la sicurezza sismica strutturale preesistente, conseguendo i livelli di sicurezza richiesti dalla normativa vigente per le costruzioni nuove.

2. PREMESSE

La vasca di dissipazione della diga di Gibbesi ha subito importanti dissesti, con crollo di alcuni tratti di muro sia in destra che in sinistra idraulica, (si vedano Figura 2.1 e Figura 2.2). Nella presente relazione, oltre alle verifiche sismiche, secondo NTC 2018, delle strutture costituenti la vasca di dissipazione, si riporterà una proposta tecnica di adeguamento sismico, con relativa stima economica di tale adeguamento e del ripristino funzionale della vasca. La soluzione proposta è stata individuata tenendo conto, oltre all'aspetto sismico, delle ipotesi sulle possibili cause che hanno portato al crollo di alcuni tratti di muro perimetrale della vasca (dissesti avvenuti a partire dal 2013).

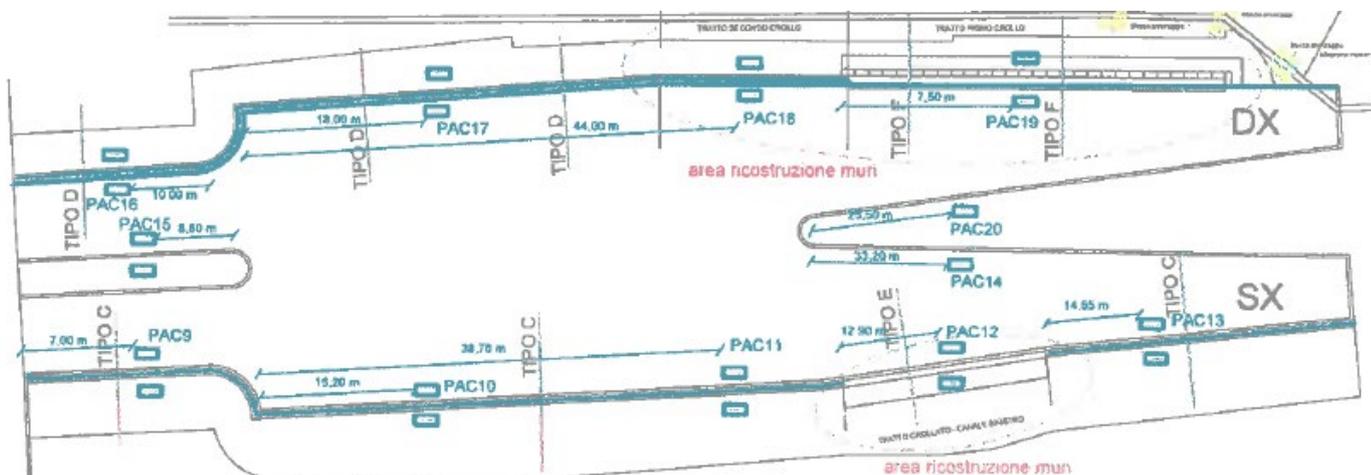


Figura 2.1: Diga di Gibbesi – Vasca di dissipazione – Planimetria con ubicazione dei tratti interessati dal crollo dei muri

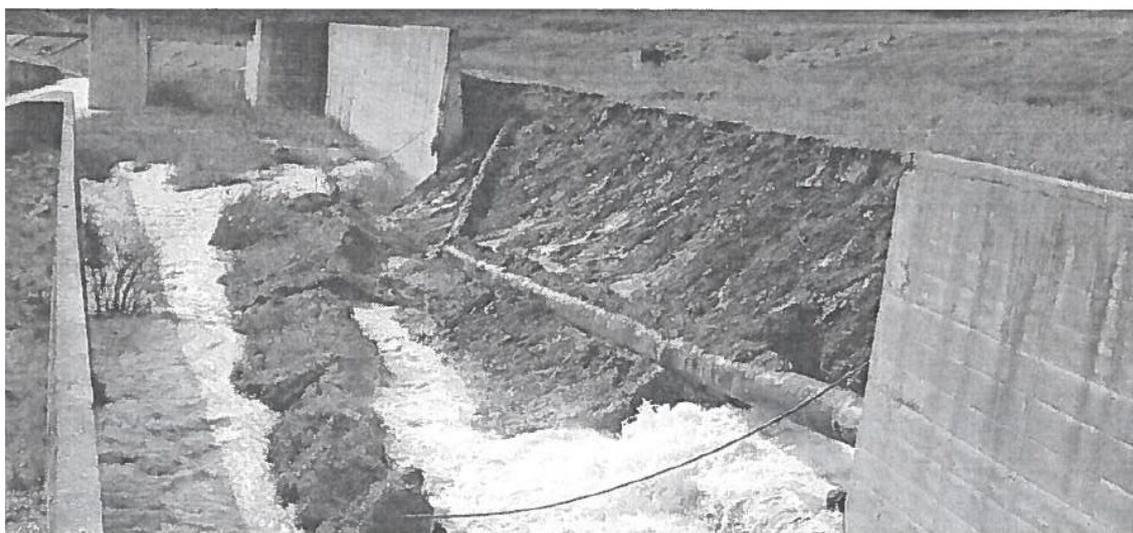


Figura 2.2: Diga di Gibbesi – Vasca di dissipazione – Crollo porzione di paramento verticale

| | | |
|--|--|--|
|  | <p><i>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</i></p> <p>DIGA GIBBESI</p> <p>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE VASCA DI DISSIPAZIONE</p> |  |
| <p>II122F-A-STR-RT-001-00</p> | <p>RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO</p> | <p>Pag. 8 di 75</p> |

Nello specifico si prevede di procedere con la seguente successione di analisi e verifiche:

1. analisi e verifica delle strutture esistenti nelle **condizioni di carico statico**, secondo normativa NTC 2018;
2. analisi e verifica delle strutture esistenti nelle **condizioni di carico sismico**, secondo normativa NTC 2018;
3. proposta di fattibilità tecnico-economica per l'adeguamento sismico della struttura secondo le norme attuali, tenendo conto delle ipotesi sull'origine dei dissesti avvenuti a partire dal 2013.

| | | |
|--|---|--|
|  | <p>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p>DIGA GIBBESI</p> <p>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE VASCA DI DISSIPAZIONE</p> |  |
| <p>II122F-A-STR-RT-001-00</p> | <p>RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO</p> | <p>Pag. 9 di 75</p> |

3. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

3.1. Normative utilizzate in fase di progettazione esecutiva

Il progetto esecutivo delle strutture della vasca di dissipazione risale al 1981 ed è stato ritrovato integralmente negli archivi della scrivente. Le strutture sono state progettate utilizzando una normativa che, ad oggi, risulta obsoleta; in particolare si ricordano le seguenti normative:

- L. 5 novembre 1971 n.1086 (G.U. 21 dicembre 1971 n.321): “Norme per la disciplina delle opere in c.a., normale e precompresso ed a struttura metallica”.
- Circolare 14 febbraio 1974 n. 11951: “Norme per la disciplina delle opere in c.a., normale e precompresso ed a struttura metallica”.
- D.M. 30 maggio 1974: “Norme tecniche per la esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per strutture metalliche”.
- D.M. 03 marzo 1975 n.40 (G.U. 08 aprile 1975 n.93): “Approvazione delle norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche”.
- D.M. 16 giugno 1976: “Norme per la disciplina delle opere in c.a., normale e precompresso ed a struttura metallica”.
- D.M. 03 ottobre 1978: “Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi”.
- Circolare 03 giugno 1981 n. 21597: “Norme tecniche per opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”.
- D.M. 03 giugno 1981 n.515: “Classificazione sismica del territorio e basati su uno studio del CNR”

3.2. Normativa di riferimento attuale

Per eseguire l'analisi e la verifica della struttura in oggetto per questa relazione si utilizzano le normative attuali:

- DM 17/01/2018: “Norme tecniche per le costruzioni”, abbreviate nel seguito con l'acronimo “NTC”;
- Circ. 21/01/2019, n. 7 C.S.LL.PP.: “Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni”;
- UNI 11104:2016: “Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità” – istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206.
- EC2_
- EC7_UNI EN 1997-1:1997: “Progettazione geotecnica – Parte 1: regole generali”;

| | | |
|--|---|--|
|  | <p>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p>DIGA GIBBESI</p> <p>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE VASCA DI DISSIPAZIONE</p> |  |
| <p>II122F-A-STR-RT-001-00</p> | <p>RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO</p> | <p>Pag. 10 di 75</p> |

- EC8_UNI EN 1998-5:2005: “Progettazione delle strutture per la resistenza sismica Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti di geotecnica”.
- D.M. 11 marzo 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 ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”;
- Circolare Min. LL. PP. del 24 Settembre 1988 n°30483 – L. 2 febbraio 1974, n. 64 – art. 1 D.M. 11 marzo 1988 – Istruzioni 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 ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.

3.3. Documentazione di progetto e letteratura

- [1] Progetto Esecutivo in Variante, 1981-1982
- [2] PLAXIS, Scientific Manual

4. DESCRIZIONE DELL'OPERA

La vasca di dissipazione è un'opera lunga 60 m e larga 42 m in cui vengono riversate le acque provenienti dalle gallerie di scarico di destra e sinistra. Il progetto esecutivo chiarisce che si tratta di una struttura formata da muri fondati su diaframmi a T, come mostrato in Figura 4.1 e Figura 4.2.

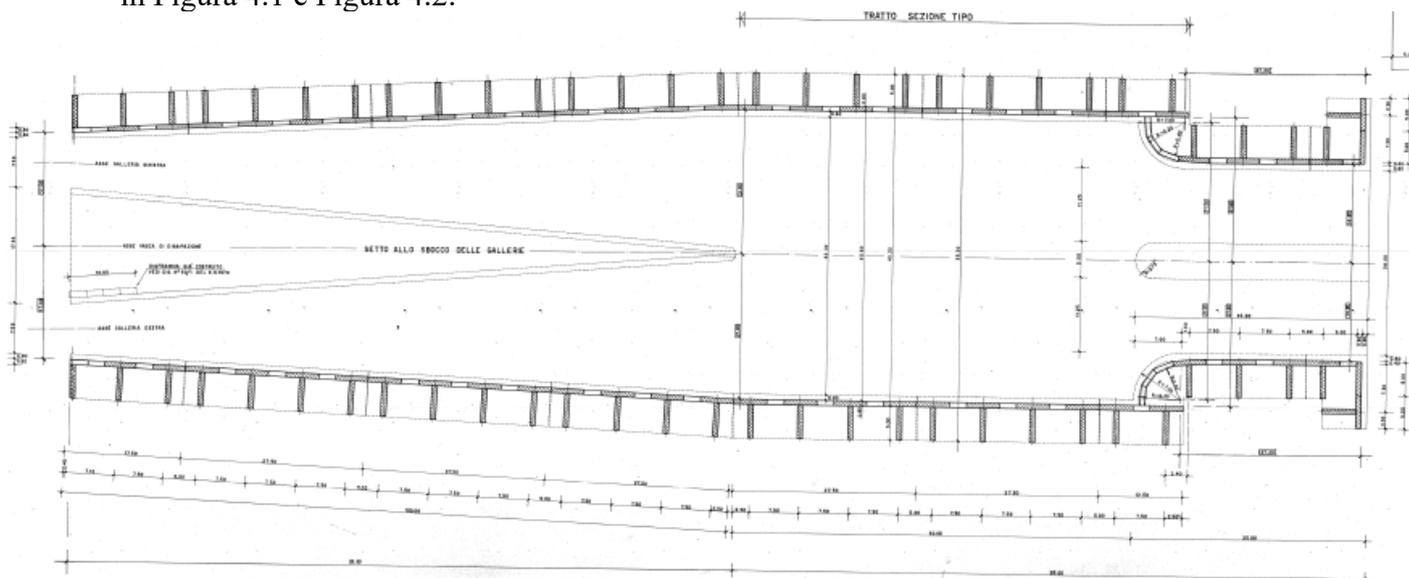


Figura 4.1: Vasca di dissipazione – Vista in pianta

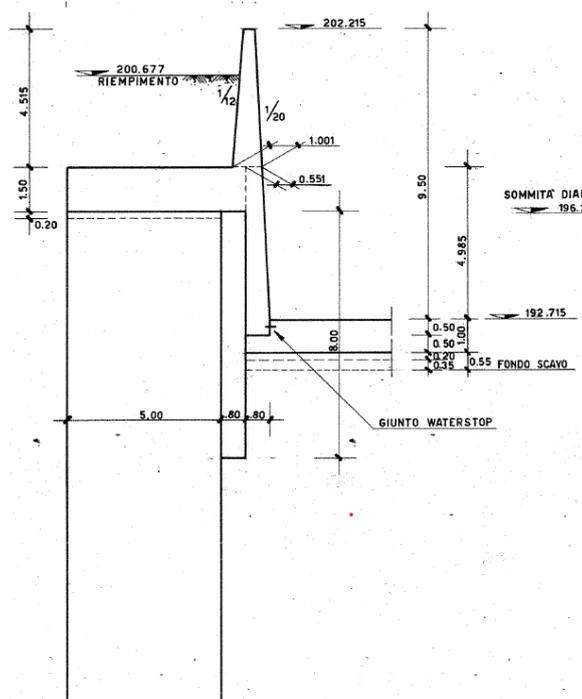


Figura 4.2: Vasca di dissipazione – Sezione tipologica paramento verticale della vasca

5. STATO DI FATTO

La vasca di dissipazione, come si è detto, ha subito importanti dissesti, nel 2013, in corrispondenza dei muri perimetrali sia in destra che in sinistra idraulica. Ciò ha causato il crollo di intere porzioni di questi muri che, ad oggi, sono stati temporaneamente rimpiazzati con gabbioni in acciaio riempiti di pietrame sciolto. Si osserva, inoltre, un forte degrado del calcestruzzo su tutte le superfici della struttura, che ha portato ad un sollevamento dello strato di copriferro, causato dall'ossidazione delle barre sottostanti, e, talvolta, al distacco dello stesso con conseguente messa a nudo delle armature.

Lungo buona parte della vasca si osserva, infine, un certo grado di interrimento, con conseguente crescita di vegetazione.

In Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6 si riportano delle fotografie dello stato di fatto della vasca di dissipazione.



Figura 5.1: Vasca di dissipazione – Sbocco della galleria dello scarico di fondo – Porzioni di muro crollate e interrimento generalizzato della vasca



DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

II122F-A-STR-RT-001-00

**RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO**

Pag. 13 di 75



Figura 5.2: Vasca di dissipazione – Sbocco della galleria scarico di superficie sinistro – Porzioni di muro crollate



Figura 5.3: Vasca di dissipazione – Porzioni di muro crollate



Figura 5.4: Vasca di dissipazione – Degrado del calcestruzzo



Figura 5.5: Vasca di dissipazione – Degrado del calcestruzzo



Figura 5.6: Vasca di dissipazione – Degrado del calcestruzzo e muro crollato

6. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL SITO

6.1. Caratterizzazione geotecnica del progetto esecutivo originale

Partendo dalla relazione di calcolo originale delle strutture, risalente al 1981, è possibile ricavare le caratteristiche del terreno utilizzate per il dimensionamento e la verifica della vasca.

Per quanto riguarda i diaframmi viene utilizzato un coefficiente di spinta attiva $K_A = 0.43$ ed un peso del terreno per unità di volume pari a $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, quindi, invertendo la relazione, è possibile calcolare l'angolo di attrito considerato, pari a $\varphi' = 23.5^\circ$. Per quanto riguarda l'elevazione del muro, invece, si era tenuto conto di un terreno con un angolo di attrito $\varphi' = 22^\circ$ e peso specifico per unità di volume di $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$.

6.2. Caratterizzazione geotecnica attuale

Per la ricostruzione dei rapporti opere-terreni sono stati utilizzati alcuni dei sondaggi eseguiti in sede di Appalto Concorso, le cui stratigrafie sono deducibili dalla tavola "EV-257-1 – Planimetria sondaggi e sezioni geologiche" e quelli presenti nell'elaborato "Indagini geognostiche ed accertamento stato di consistenza dei muri della vasca di dissipazione" redatto dal laboratorio SIDERCEM nel 2018. Si veda Figura 6.1.

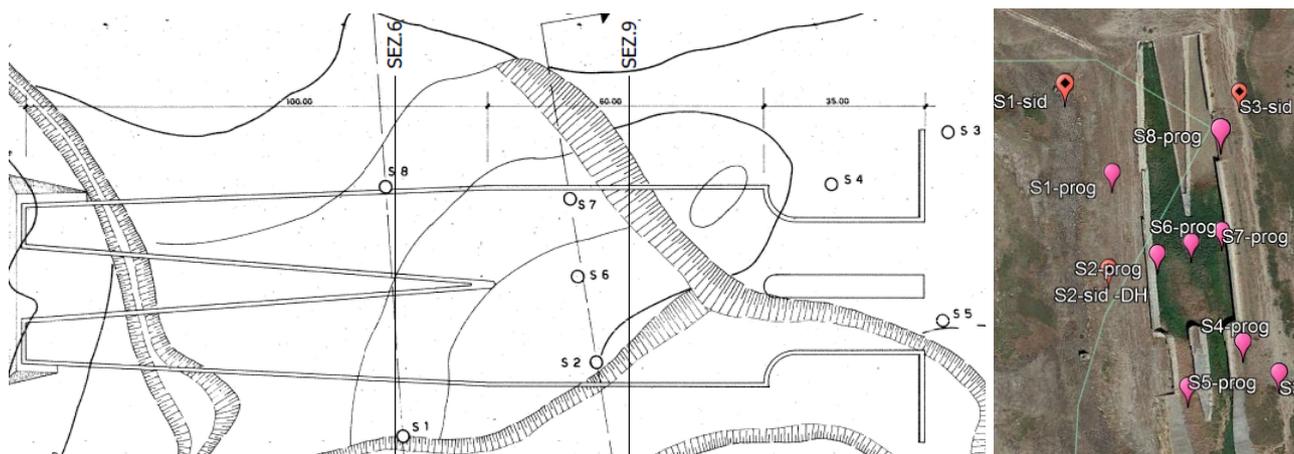


Figura 6.1: Vasca di dissipazione – Ubicazione dei sondaggi effettuati in sede di Appalto Concorso (sinistra) e di quelli effettuati nel 2018 (destra)

Dall'esame della documentazione risulta che la vasca è fondata su argille di colore grigio azzurro, talora scagliettate (sigla A), di età presumibilmente Tortoniano (Miocene), ricoperte da una coltre detritica limosa argillosa con inclusi lapidei di varia natura (terreni DT), di spessore pari a 4-5 m. I rapporti opere – terreni sono illustrati nelle sezioni riportate in Figura 6.2 e Figura 6.3.

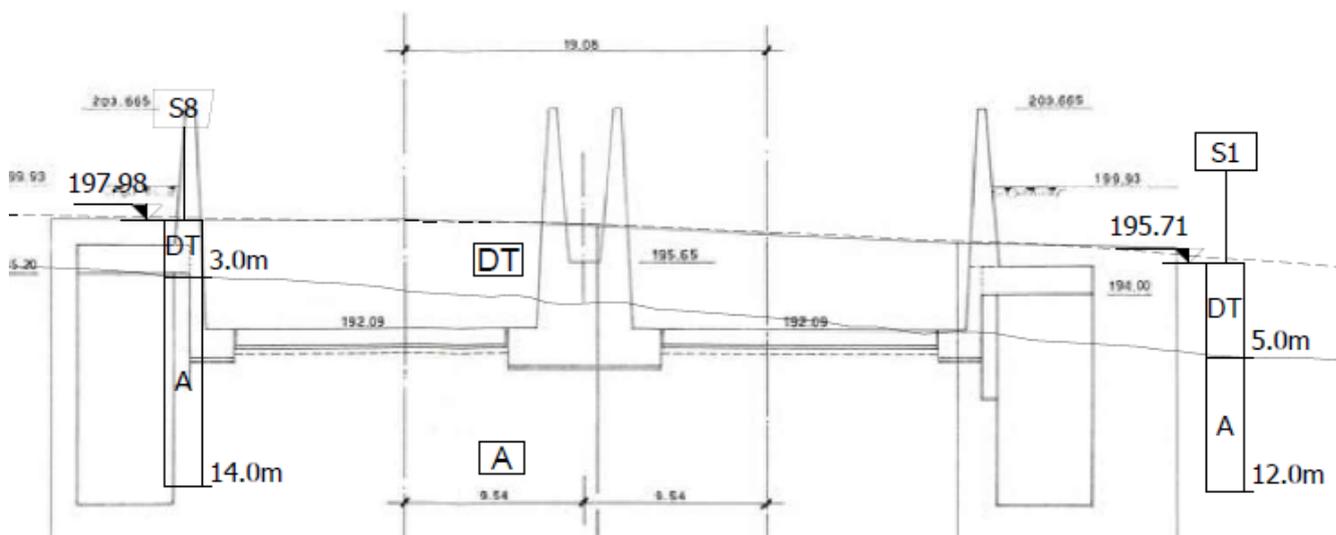


Figura 6.2: Vasca di dissipazione – Rapporti opere-terreno – Sezione 6

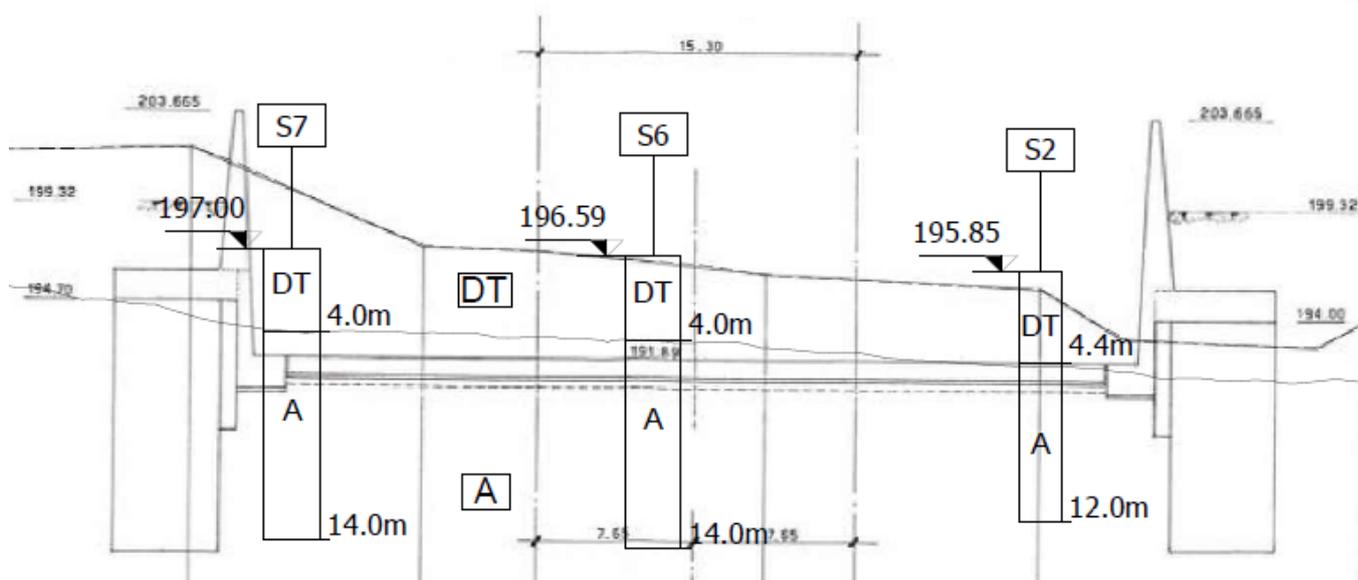


Figura 6.3: Vasca di dissipazione – Rapporti opere-terreno – Sezione 9

Le caratteristiche geotecniche dei diversi terreni sono riportate nel seguito.

| | | |
|--|---|--|
|  | <p>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p>DIGA GIBBESI</p> <p>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE VASCA DI DISSIPAZIONE</p> |  |
| <p>II122F-A-STR-RT-001-00</p> | <p>RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO</p> | <p>Pag. 17 di 75</p> |

Terreni DT

Per quanto riguarda i terreni detritici DT, gli unici dati geotecnici disponibili sono presenti nella "Relazione Geologica OI.09-C-502-2", in particolare:

- peso dell'unità di volume $\gamma = 18.50 \text{ kN/m}^3$
- coesione $c' = 0 \div 1 \text{ kPa}$
- angolo d'attrito $\varphi' = 10^\circ$
- coesione non drenata $c_u = 100 \text{ kPa}$
- modulo di Young $E = 3 \div 5 \text{ MPa}$

Terreni A

Per la caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni argillosi A in termini di pressioni effettive, si può fare riferimento ai risultati di due prove di compressione triassiale CIU eseguite in fase di progetto e di quattro prove di taglio dirette CD eseguite nel 2018:

- peso dell'unità di volume $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- coesione $c' = 15 \div 25 \text{ kPa}$
- angolo d'attrito $\varphi' = 22^\circ \div 26^\circ$
- coesione non drenata $c_u = 200 \div 300 \text{ kPa}$
- modulo di Young $E = 10 \div 30 \text{ MPa}$

Le prove triassiali forniscono valori dell'angolo d'attrito piuttosto dispersi, mentre la coesione si attesta sul valore di 60 kPa. Probabilmente i risultati di tali prove sono stati influenzati dalla difficoltà di confezionamento dei provini e dalla presenza delle scaglie.

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, i terreni di fondazione possono essere caratterizzati con categoria di suolo C, sulla base dei risultati della prova Down-Hole eseguita nel 2018 da SIDERCEM in corrispondenza del sondaggio S2sid, che ha fornito un valore di velocità equivalente delle onde di taglio V_{S30} pari a 302 m/s.

Per quanto riguarda gli spessori dei vari strati, essi sono variabili sia lungo la direzione monte-valle sia tra i muri in destra idraulica e quelli in sinistra: appare quindi opportuno, a favore di sicurezza e di semplicità, procedere assegnando al terreno interagente con i diaframmi le caratteristiche del terreno A, e a quello interagente con l'elevazione dei muri di sostegno le caratteristiche del terreno detritico superficiale DT.

| | | |
|--|--|--|
|  | <p style="text-align: center;"><i>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</i></p> <p style="text-align: center;">DIGA GIBBESI</p> <p style="text-align: center;">RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE VASCA DI DISSIPAZIONE</p> |  |
| <p>II122F-A-STR-RT-001-00</p> | <p style="text-align: center;">RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO</p> | <p style="text-align: right;">Pag. 18 di 75</p> |

Si nota, in particolare, la buona rispondenza della nuova caratterizzazione dei terreni di fondazione con quelli del progetto originale, ma un netto peggioramento delle caratteristiche dei terreni di tipo DT: sarà di conseguenza necessario indagare su come la nuova caratterizzazione influenzi le sollecitazioni sulle strutture.



7. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

7.1. Caratteristiche dei materiali dal progetto originale

Dagli elaborati grafici di progetto (PE 1981) si possono trovare le prescrizioni sui materiali da costruzione, calcestruzzo e acciaio, per le diverse parti della vasca di dissipazione.

| Elevazione dei muri | | | |
|---------------------|----------|------|--------------------|
| Calcestruzzo | R_{ck} | 300 | kg/cm ² |
| Acciaio FeB 44 k | f_{yk} | 4300 | kg/cm ² |
| Solettone di fondo | | | |
| Calcestruzzo | R_{ck} | 300 | kg/cm ² |
| Acciaio FeB 44 k | f_{yk} | 4300 | kg/cm ² |
| Diaframmi | | | |
| Calcestruzzo | R_{ck} | 250 | kg/cm ² |
| Acciaio FeB 32 k | f_{yk} | 3150 | kg/cm ² |

7.2. Indagini sui materiali e prove di laboratorio

La vasca di dissipazione è stata, negli anni, oggetto di numerose prove diagnostiche per stabilire le caratteristiche della struttura e dei materiali che la compongono.

Le campagne d'indagine sulla vasca sono state, ad oggi, tre:

- 1 febbraio 2016 – Esecuzione di prelievi di campioni ed indagini per la caratterizzazione meccanica dei calcestruzzi e dei ferri d'armatura della vasca di dissipazione (CIG Z6616DD474) – A cura del Laboratorio DISMAT di Canicattì (AG).
 - 4 luglio 2016 – Esecuzione di prelievi di campioni ed indagini per la caratterizzazione meccanica dei calcestruzzi e dei ferri di armatura delle opere strutturali in c.a. ad eccezione della vasca di dissipazione (CIG: Z8A19432B0) – A cura di CON.GEO s.r.l. di Palermo.
 - Maggio 2021 – Prove sui materiali – METROTEST s.r.l., per conto della scrivente
- Di seguito vengono esposti i risultati di tali campagne d'indagine.

7.2.1. Indagini DISMAT (febbraio 2016)

Il laboratorio DISMAT ha eseguito prove di compressione sulle carote in cls e prove di trazione e piega sulle barre d'armatura provenienti dalla vasca di dissipazione.



DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

II122F-A-STR-RT-001-00

**RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO**

Pag. 20 di 75

Prove di resistenza a compressione dei campioni di cls

Nella Tabella 7-1, Tabella 7-2 e Tabella 7-3 sono riportati i risultati delle prove su cilindri di calcestruzzo, tenendo presenti le seguenti indicazioni:

- data di prelievo della carota: 24/12/2015;
- ubicazione dei prelievi: muro di contenimento della vasca di dissipazione;
- rettifica: s = sì; n = conforme alla norma, non necessita di rettifica;
- tipi di rottura: A = anomala; N = normale.

Tabella 7-1: Certificato n°: 117400

| Provino | | Peso provino [g] | Dimensioni cilindri | | Rettifica e cappatura | Area compressa [mm ²] | Tipo di rottura | Carico di rottura [kN] | Tensione [N/mm ²] |
|---------|-------|---------------------|---------------------|-----------|--------------------------|---|--------------------|------------------------------|----------------------------------|
| N° | Sigla | | Ø [mm] | h [mm] | | | | | |
| 1 | C7-3 | 1913 | 104.0 | 104.1 | s | 8.495 | N | 327.4 | 38.5 |
| 2 | C8-1 | 1873.6 | 104.0 | 103.9 | s | 8.495 | N | 67.12 | 7.9 |
| 3 | C8-2 | 184935 | 104.0 | 103.7 | s | 8.495 | N | 274.03 | 32.3 |
| 4 | C8-3 | 1843.4 | 104.0 | 103.8 | s | 8.495 | N | 279.86 | 32.9 |
| 5 | C9-1 | 1928.8 | 104.0 | 104.2 | s | 8.495 | N | 222.17 | 26.2 |
| 6 | C9-2 | 1902.2 | 104.0 | 104.1 | s | 8.495 | N | 287.93 | 33.9 |
| 7 | C9-3 | 1831.3 | 104.0 | 103.6 | s | 8.495 | N | 320.39 | 37.7 |
| 8 | C10-1 | 1928.9 | 104.0 | 104.2 | s | 8.495 | N | 353.26 | 41.6 |
| 9 | C10-2 | 2047.1 | 104.0 | 104.5 | s | 8.495 | N | 282.16 | 33.2 |
| 10 | C10-3 | 1944.6 | 104.0 | 104.2 | s | 8.495 | N | 206.16 | 24.3 |

Tabella 7-2: Certificato n°: 117398

| Provino | | Peso provino [g] | Dimensioni cilindri | | Rettifica e cappatura | Area compressa [mm ²] | Tipo di rottura | Carico di rottura [kN] | Tensione [N/mm ²] |
|---------|-------|---------------------|---------------------|-----------|--------------------------|---|--------------------|------------------------------|----------------------------------|
| N° | Sigla | | Ø [mm] | h [mm] | | | | | |
| 1 | C1-1 | 1876.0 | 104.0 | 104.0 | s | 8495 | N | 219.06 | 25.8 |
| 2 | C1-2 | 1873.0 | 104.0 | 104.0 | s | 8495 | N | 165.22 | 19.4 |
| 3 | C1-3 | 1877.6 | 104.0 | 103.9 | s | 8495 | N | 193.44 | 22.8 |
| 4 | C2-1 | 1920.8 | 104.0 | 104.3 | s | 8495 | N | 400.83 | 47.2 |
| 5 | C2-2 | 1953.9 | 104.0 | 104.0 | s | 8495 | N | 363.61 | 42.8 |
| 6 | C2-3 | 1897.5 | 104.0 | 104.2 | s | 8495 | N | 190.32 | 22.4 |
| 7 | C3-1 | 1896.7 | 104.0 | 104.1 | s | 8495 | N | 304.36 | 35.8 |
| 8 | C3-2 | 1880.0 | 104.0 | 103.9 | s | 8495 | N | 362.82 | 42.7 |
| 9 | C3-3 | 1875.0 | 104.0 | 103.9 | s | 8495 | N | 365.25 | 43.0 |
| 10 | C4-1 | 1917.3 | 104.0 | 104.3 | s | 8495 | N | 286.57 | 33.7 |

Tabella 7-3: Certificato n°: 117399

| N° | Sigla | Peso provino [g] | Dimensioni cilindri | | Rettifica e cappatura | Area compressa [mm ²] | Tipo di rottura | Carico di rottura [kN] | Tensione [N/mm ²] |
|----|-------|------------------|---------------------|--------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------|------------------------|-------------------------------|
| | | | Ø [mm] | h [mm] | | | | | |
| 1 | C1-1 | C4-2 | 104.0 | 104.0 | s | 8495 | N | 333.93 | 39.3 |
| 2 | C1-2 | C4-3 | 104.0 | 104.2 | s | 8495 | N | 322.65 | 38.0 |
| 3 | C1-3 | C5-1 | 104.0 | 104.3 | s | 8495 | N | 336.61 | 39.6 |
| 4 | C2-1 | C5-2 | 104.0 | 103.8 | s | 8495 | N | 346.79 | 40.8 |
| 5 | C2-2 | C5-3 | 104.0 | 103.9 | s | 8495 | N | 247.24 | 29.1 |
| 6 | C2-3 | C6-1 | 104.0 | 104.4 | s | 8495 | N | 192.13 | 22.6 |
| 7 | C3-1 | C6-2 | 104.0 | 104.0 | s | 8495 | N | 329.59 | 38.8 |
| 8 | C3-2 | C6-3 | 104.0 | 104.2 | s | 8495 | N | 308.95 | 36.4 |
| 9 | C3-3 | C7-1 | 104.0 | 104.4 | s | 8495 | N | 287.66 | 33.9 |
| 10 | C4-1 | C7-2 | 104.0 | 104.1 | s | 8495 | N | 325.52 | 38.3 |

Prove di trazione sulle barre d'armatura prelevate

Nella seguente Tabella 7-4 e Tabella 7-5 sono riportati i risultati delle prove sulle barre d'armatura prelevate, tenendo presenti le seguenti indicazioni:

- Data di prelievo della carota: 24/12/2015
- Ubicazione dei prelievi: muro di contenimento della vasca di dissipazione
- f_y = tensione di snervamento
- f_t = tensione di rottura

Tabella 7-4: Certificato n°: 117473

| Barra | Sigla provino | Diametro commerciale | Diametro effettivo | Massa [mm] | Sezione effettiva | f_y | f_t | f_y/f_{yk} | f_t/f_y | Allungamento a 5% | Marchio di produzione |
|-------|---------------|----------------------|--------------------|------------|--------------------|--------|--------|--------------|-----------|-------------------|--|
| | | [mm] | [mm] | | [mm ²] | | | | | | |
| 1 | A | 8 | 8.08 | 0.40 | 51.210 | 551.77 | 777.24 | = | 1.41 | 22 | Acciaierie di Sicilia S.p.A. (Catania) |
| | B | 8 | 8.12 | 0.41 | 51.720 | 471.44 | 657.41 | = | 1.39 | 20 | |
| 2 | A | 10 | 10.01 | 0.62 | 78.730 | 458.95 | 671.87 | = | 1.46 | 14 | Non identificato |
| 3 | A | 12 | 11.77 | 0.85 | 108.790 | 419.88 | 687.44 | = | 1.64 | 16 | Acciaierie di Sicilia S.p.A. (Catania) |
| | B | 12 | 11.66 | 0.84 | 106.750 | 445.57 | 637.23 | = | 1.43 | 14 | |

Tabella 7-5: Certificato n°: 117474

| Barra | Sigla provino | Diametro commerciale | Diametro effettivo | Massa | Sezione effettiva | f _y | f _t | f _y /f _{yk} | f _t /f _y | Allungamento a 5% | Marchio di produzione |
|-------|---------------|----------------------|--------------------|-------|--------------------|----------------|----------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|--|
| | | [mm] | [mm] | [mm] | [mm ²] | | | | | | |
| 1 | A | 16 | 16.00 | 1.58 | 201.020 | 523.83 | 818.17 | = | 1.56 | 19 | Acciaierie di Sicilia S.p.A. (Catania) |
| | B | 16 | 16.07 | 1.59 | 202.800 | 514.29 | 664.29 | = | 1.29 | 14 | |
| | C | 16 | 16.02 | 1.58 | 201.530 | 507.58 | 636.52 | = | 1.25 | 14 | |
| 2 | A | 16 | 15.98 | 1.57 | 200.510 | 492.87 | 580.86 | = | 1.18 | 13 | Non identificato |
| | B | 16 | 16.10 | 1.60 | 203.570 | 502.16 | 594.77 | = | 1.18 | 12 | |

7.2.2. Indagini SIDERCEM (luglio 2016)

Nei giorni 13 aprile e 23 maggio 2018, su incarico dell'Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità - Dipartimento Regionale dell'Acqua e dei Rifiuti, nell'ambito dei lavori di "Ripristino della funzionalità idraulica della vasca di dissipazione mediante adeguamento sismico dei muri perimetrali crollati della Diga Gibbesi nei comuni di Sommatino (CL) e Naro (AG)", la SIDERCEM S.r.l ha effettuato un'indagine magnetometrica con Pacometro [BS 1881-204:1998] sui muri perimetrali della vasca di dissipazione.

Su alcuni elementi strutturali si è effettuato il rilievo della disposizione delle armature (diametro tondino, distanza tra le barre longitudinali, passo staffe e spessore del copri-ferro).

Il rilievo è stato eseguito con il pacometro (*Hilti ferroskan PS200S*) costituito da una sonda emittente un campo magnetico collegata ad un'unità d'elaborazione digitale ed acustica, il cui funzionamento è basato sul controllo degli effetti delle eddy current (correnti parassite) indotte in una barra di armatura.

L'ubicazione delle prove pacometriche effettuate è riportata nella Figura 7.1 e Figura 7.2.

DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO

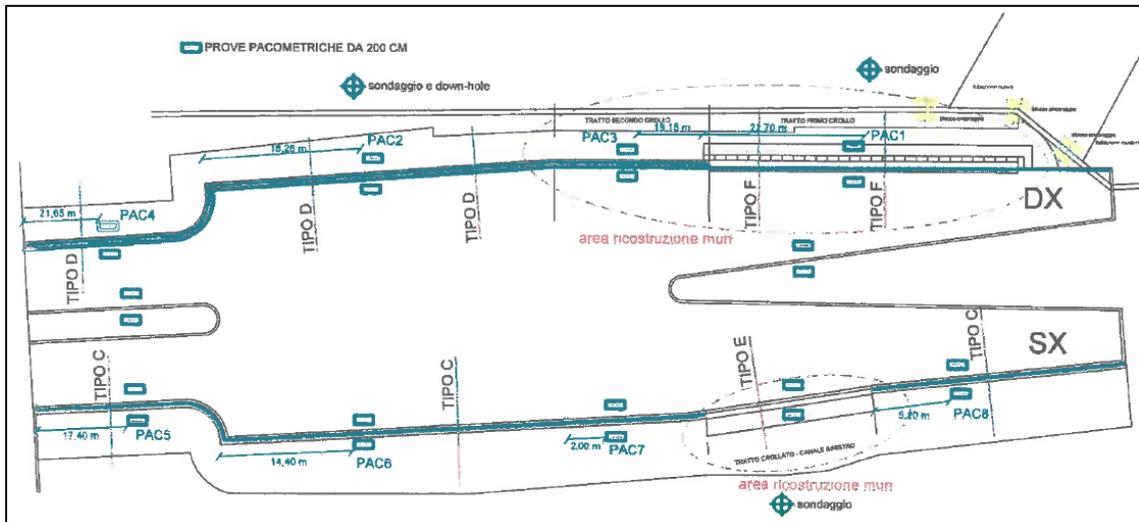


Figura 7.1: Planimetria generale con ubicazione indagini eseguite il 13/04/2018

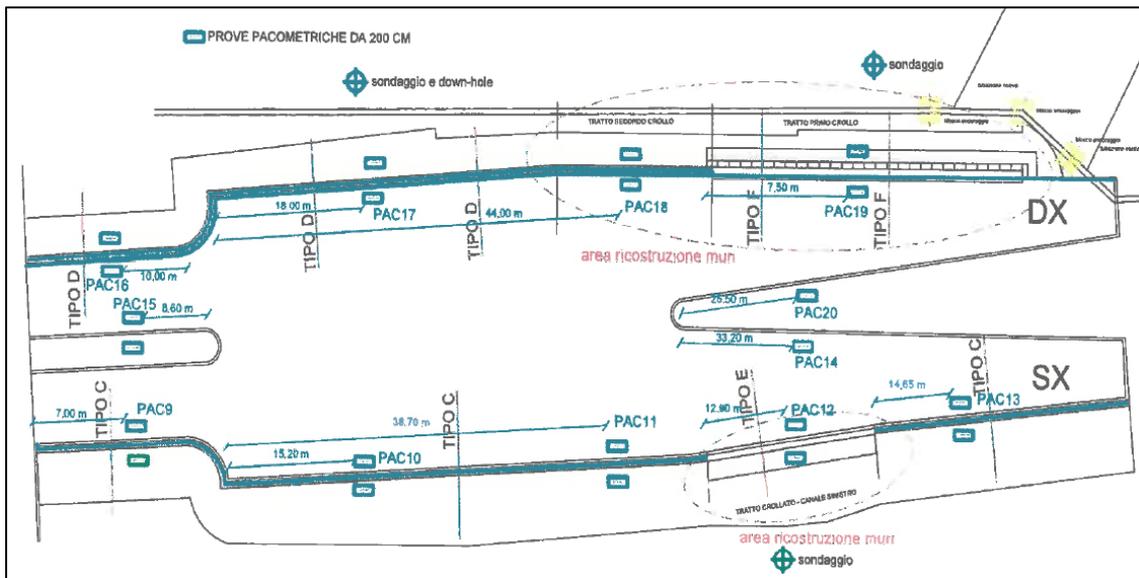


Figura 7.2: Planimetria generale con ubicazione indagini eseguite il 23/05/2018

Per i dettagli sulle singole prove pacometriche effettuate si rimanda al relativo documento SIDERCEM.

| | | |
|--|---|--|
|  | <p>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p>DIGA GIBBESI</p> <p>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE VASCA DI DISSIPAZIONE</p> |  |
| <p>II122F-A-STR-RT-001-00</p> | <p>RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO</p> | <p>Pag. 24 di 75</p> |

7.2.3. Indagini METROTEST (maggio 2021)

METROTEST ha eseguito le seguenti prove sulla vasca di dissipazione:

- N° 1 prove di profondità di carbonatazione sui campioni prelevati di calcestruzzo;
- N° 1 prove di resistenza a compressione sui campioni prelevati di calcestruzzo;

Si riportano, nei seguenti paragrafi, l'ubicazione e una sintesi dei risultati ottenuti da tali indagini.

Controllo della profondità di carbonatazione dei provini di calcestruzzo

I prelievi sono stati eseguiti secondo la normativa UNI EN 12504-1:2019 utilizzando una carotatrice HILTI munita di corona diamantata di diametro 100 mm. Prima dell'effettuazione dei prelievi è stata individuata la posizione delle barre di armatura mediante indagine pacometrica.

Presso la sede del laboratorio i campioni prelevati sono stati fotografati ed analizzati per misurarne la lunghezza L ed evidenziare la presenza di anomalie, quali, ad esempio, barre di armatura, vuoti, nidi di ghiaia.

Per ogni provino è stato effettuato il controllo della profondità di carbonatazione mediante l'applicazione di una soluzione acquosa di fenoltaleina all'1% in alcool etilico al 70%. Tale soluzione vira al rosso-violetto a contatto con materiali aventi un pH superiore a 9.2, mentre rimane incolore per valori inferiori.

La carbonatazione è un particolare processo chimico per il quale l'anidride carbonica presente nell'aria viene assorbita dal calcestruzzo trasformando l'idrossido di calcio (fortemente basico) in carbonato di calcio. Tale reazione determina un abbassamento del pH del calcestruzzo da valori prossimi a 12 a valori inferiori a 9 con la conseguente eliminazione della naturale barriera alcalina protettiva per le armature formata da uno strato passivante di ossido di ferro insolubile che protegge i ferri dai fenomeni ossidativi. Pertanto, nel momento in cui la carbonatazione raggiunge l'armatura, interviene un pericolo di corrosione.

Il controllo della carbonatazione è stato eseguito in sito sui campioni cilindrici di calcestruzzo prelevati.

Nella Tabella 7-6 si riportano i risultati delle prove per determinare la profondità di carbonatazione. Per ogni prelievo vengono forniti i seguenti dati:

- sigla prelievo;
- \varnothing = diametro provino;
- L = lunghezza provino;
- H_{terra} = altezza da terra;
- Direzione prelievo, che può essere:
 - o H = orizzontale;
 - o V = verticale.

Tabella 7-6: Diga di Gibbesi– Vasca di dissipazione – Risultati delle prove di profondità di carbonatazione

| Sigla prelievo | Data di prelievo | \varnothing | L | H_{terra} | Direzione prelievo | Profondità di carbonatazione |
|----------------|--|---------------|------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| | | [mm] | [mm] | [m] | | |
| C3 | 10/04/2021 | 94 | 150 | 1.70 | H | 20 |
| | Calcestruzzo omogeneo con presenza di alcuni vacuoli dal diametro d_{max} circa 4 mm. Inerti a spigoli vivi arrotondati d_{max} circa 28 mm. | | | | | |

Prove di resistenza a compressione dei calcestruzzi

I prelievi sono stati eseguiti secondo la normativa UNI EN 12504-1:2019, utilizzando una carotatrice HILTI munita di corona diamantata di diametro 100 mm. Prima dell'effettuazione dei prelievi è stata individuata la posizione delle barre di armatura mediante indagine pacometrica.

Presso la sede del laboratorio i campioni prelevati sono stati fotografati ed analizzati per misurarne la lunghezza L ed evidenziare la presenza di anomalie, quali, ad esempio, barre di armatura, vuoti, nidi di ghiaia, che ne potessero pregiudicare l'utilizzo ai fini delle prove di compressione. Successivamente, si è provveduto a ricavare i provini da sottoporre a prove meccaniche, mediante taglio con sega circolare e rettifica delle basi con spianatrice elettrica. I provini sono stati confezionati rispettando le dimensioni geometriche richieste dalla UNI EN 12390/1-12; in particolare, sono stati sagomati con un rapporto tra altezza h e diametro d pari a 1.

Le prove di compressione sono state eseguite utilizzando una macchina universale SUNS, scala 200 kN, matricola n. 1012001, classe 1. La verifica di taratura esterna è stata eseguita il 07/10/2019.

Le prove sono state effettuate in accordo con quanto previsto dalla Normativa UNI EN 12504/1-19, applicando con gradualità il carico con gradiente di 0.5 ± 0.2 N/mm²/s, fino alla completa rottura. Al termine della prova si è rilevato lo schema di rottura.

In tabella si possono trovare i risultati delle prove di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo. Per ciascun provino si riportano:

- m = massa del provino;
- Ø = diametro del provino;
- h = altezza del provino;
- in_{max} = dimensione massima degli inerti del provino;
- A_c = sezione compressa;
- m_v = massa volumica;
- F = carico massimo;
- f_c = resistenza a rottura, espressa con l'approssimazione di 0.1 N/mm²;

Tabella 7-7: Diga di Gibbesi – Vasca di dissipazione – Risultati delle prove di resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo

| Sigla | Data | | m | Ø | h | in _{max} | A _c | m _v | F | f _c |
|-------|----------|----------|---------|----|----|-------------------|----------------|----------------|---------|----------------|
| | Prelievo | Prova | | | | | | | | |
| C3 | 10/04/21 | 12/04/21 | 1514.07 | 94 | 96 | 28 | 6940 | 2270 | 214.414 | 30.9 |



DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

II122F-A-STR-RT-001-00

**RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO**

Pag. 27 di 75

8. IPOTESI DI CALCOLO

8.1. Materiali

Considerando l'abbondanza di documentazione storica di progetto, nonché di indagini svolte sui materiali, si può considerare un livello di conoscenza LC3, sia per il calcestruzzo che per l'acciaio, con fattore di confidenza $F_C = 1.00$.

8.1.1. Calcestruzzo

| Caratteristiche del calcestruzzo Rck 300 | | | |
|---|-----------------|-------|-----|
| Resistenza caratteristica cubica a compressione | R_{ck} | 30.00 | MPa |
| Resistenza caratteristica cilindrica a compressione | f_{ck} | 24.90 | MPa |
| Coefficiente di sicurezza | g_e | 1.50 | - |
| Fattore di confidenza | F_C | 1.00 | - |
| Resistenza di progetto a compressione | f_{cd} | 14.11 | MPa |
| Modulo elastico | E_c | 31447 | MPa |
| Resistenza media a trazione | f_{ctm} | 2.56 | MPa |
| Resistenza caratteristica a trazione | $f_{ctk,0,95}$ | 3.33 | MPa |
| Resistenza caratteristica a trazione | $f_{ctk,0,05}$ | 1.79 | MPa |
| Resistenza di progetto a trazione | f_{ctd} | 1.19 | MPa |
| | | | |
| Deformazione di progetto | ϵ_{c2} | 2.00 | % |
| Deformazione di progetto | ϵ_{c3} | 1.75 | % |
| Deformazione di progetto | ϵ_{c4} | 0.70 | % |
| Deformazione ultima di progetto | ϵ_{cu} | 3.50 | % |

| Caratteristiche del calcestruzzo Rck 250 | | | |
|---|-----------------|-------|-----|
| Resistenza caratteristica cubica a compressione | R_{ck} | 25.00 | MPa |
| Resistenza caratteristica cilindrica a compressione | f_{ck} | 20.75 | MPa |
| Coefficiente di sicurezza | g_c | 1.50 | - |
| Fattore di confidenza | F_c | 1.00 | - |
| Resistenza di progetto a compressione | f_{cd} | 11.76 | MPa |
| Modulo elastico | E_c | 30200 | MPa |
| Resistenza media a trazione | f_{ctm} | 2.27 | MPa |
| Resistenza caratteristica a trazione | $f_{ctk,0,95}$ | 2.94 | MPa |
| Resistenza caratteristica a trazione | $f_{ctk,0,05}$ | 1.59 | MPa |
| Resistenza di progetto a trazione | f_{ctd} | 1.06 | MPa |
| | | | |
| Deformazione di progetto | ϵ_{c2} | 2.00 | ‰ |
| Deformazione di progetto | ϵ_{c3} | 1.75 | ‰ |
| Deformazione di progetto | ϵ_{c4} | 0.70 | ‰ |
| Deformazione ultima di progetto | ϵ_{cu} | 3.50 | ‰ |

In Figura 8.1 si riporta il legame costitutivo del calcestruzzo.

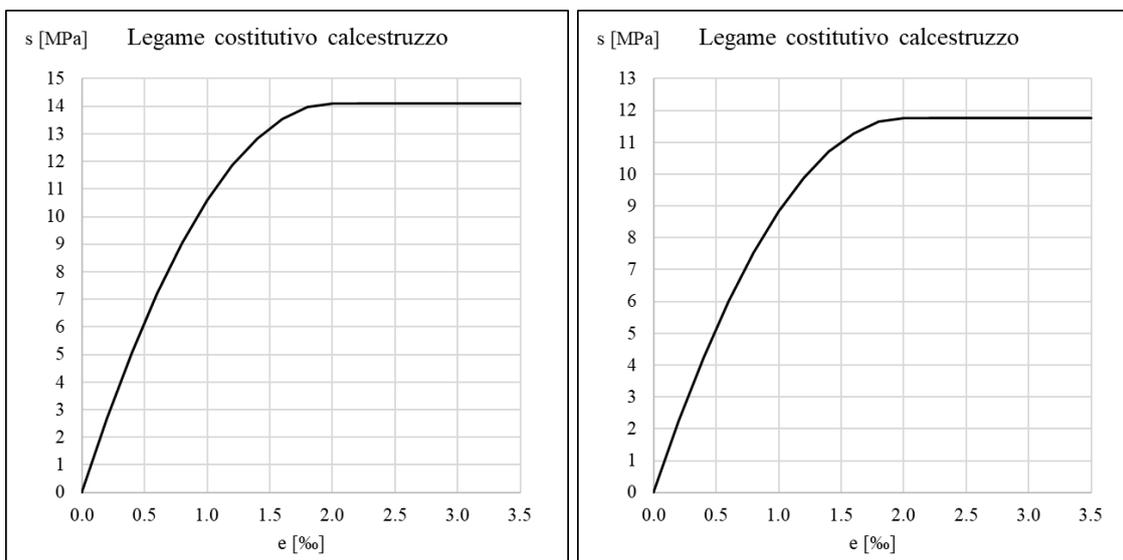


Figura 8.1: Legame costitutivo del calcestruzzo Rck 300 e Rck 250

8.1.2. Acciaio

| Acciaio FeB 44 k | | | |
|---|-----------|--------|-----|
| Tipo di acciaio | Fe B 38 k | | |
| Resistenza caratteristica a snervamento | f_{yk} | 375 | MPa |
| Resistenza caratteristica a rottura | f_{tk} | 450 | MPa |
| Coefficiente di sicurezza | g_s | 1.15 | - |
| Fattore di confidenza | F_c | 1.00 | - |
| Resistenza di progetto a trazione | f_{yd} | 326 | MPa |
| Modulo elastico | E_s | 206000 | MPa |
| | | | |
| Deformazione a snervamento | e_{yd} | 1.58 | %o |
| Deformazione ultima | e_{ud} | 10.00 | %o |
| Acciaio FeB 32 k | | | |
| Tipo di acciaio | Fe B 32 k | | |
| Resistenza caratteristica a snervamento | f_{yk} | 315 | MPa |
| Resistenza caratteristica a rottura | f_{tk} | 490 | MPa |
| Coefficiente di sicurezza | g_s | 1.15 | - |
| Fattore di confidenza | F_c | 1.00 | - |
| Resistenza di progetto a trazione | f_{yd} | 273.91 | MPa |
| Modulo elastico | E_s | 206000 | MPa |
| | | | |
| Deformazione a snervamento | e_{yd} | 1.33 | %o |
| Deformazione ultima | e_{ud} | 10.00 | %o |

In Figura 8.2 si riporta il legame costitutivo del calcestruzzo.

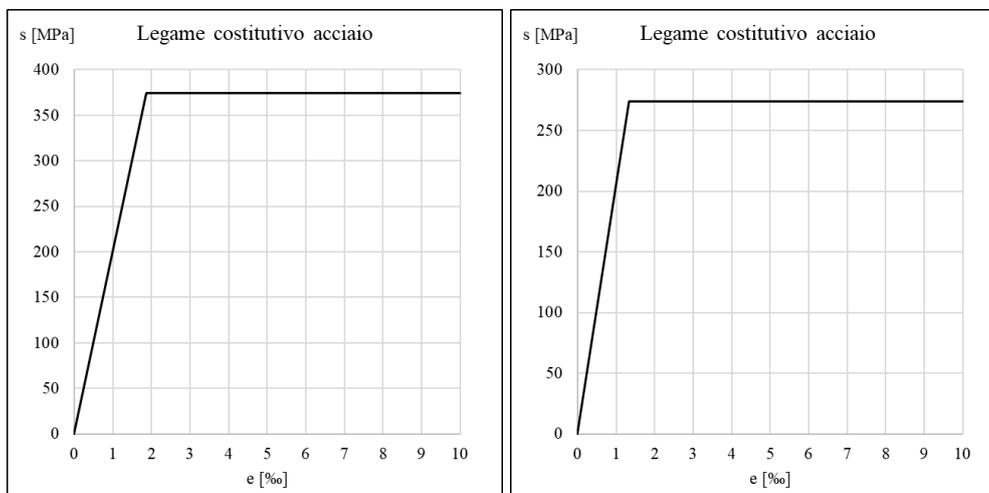


Figura 8.2: Legame costitutivo dell'acciaio FeB 44 k e FeB 32 k

8.2. Parametri sismici

I dati per la definizione dell'azione sismica da considerare nei calcoli di verifica sono i seguenti:

- Longitudine 13.984139 °
- Latitudine 37.315170 °
- Vita nominale V_N 50 anni
- Coefficiente C_U 1.5
- Periodo di riferimento $V_R = V_N \cdot C_U = 50 \cdot 1.5 = 75$ anni

Si considera un coefficiente C_U pari a 1.5, ovvero una classe d'uso III, in quanto la diga Gibbesi, con i suoi 45 m d'altezza, 1,700,000 m³ d'invaso e il fatto che invasi acqua a fini irrigui, è classificabile come una "grande diga" di tipo B ("diga rilevante").

In generale l'azione sismica è definita sul sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione di tre parametri:

- a_g : accelerazione orizzontale massima al sito;
- F_0 : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_C^* : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Tali valori sono calcolati come media pesata dei valori assunti nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento che contiene il punto caratterizzante la posizione dell'opera, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici.

Per il calcolo dei parametri sismici è stato utilizzato il foglio di calcolo "Spettri di Risposta" ver. 1.0.3 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Si riportano i valori di accelerazione sismica che verranno utilizzati nel seguito, sempre nel caso di Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV).

| Spettro di risposta orizzontale | | |
|---------------------------------|-------|---|
| a_g | 0.073 | g |
| S_S | 1.500 | - |
| S_T | 1.000 | - |
| Spettro di risposta verticale | | |
| a_g | 0.027 | g |
| S_S | 1.000 | - |
| S_T | 1.000 | - |

| | | |
|--|---|--|
|  | <p>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p>DIGA GIBBESI</p> <p>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE VASCA DI DISSIPAZIONE</p> |  |
| <p>II122F-A-STR-RT-001-00</p> | <p>RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO</p> | <p>Pag. 31 di 75</p> |

9. ANALISI DEI CARICHI

9.1. G_1 – Carichi permanenti strutturali

Fanno parte di questa categoria i seguenti carichi:

- il peso proprio della struttura;
- la spinta statica dell'acqua;
- la spinta statica dei terreni.

9.1.1. Peso proprio della struttura

Per il peso proprio della struttura si considera il peso specifico del c.a., pari a 25.00 kN/m³.

9.1.2. Spinta statica dell'acqua

La falda si considera presente alla quota di fondo della vasca in tutte le fasi costruttive; in fase di esercizio si considera, identicamente a quanto effettuato nel progetto originale, si considera il caso cui la quota idrica interna alla vasca è pari ad un metro meno della quota di testa muro e si considera il caso in cui la vasca è vuota.

9.1.3. Spinta statica del terreno

Il peso dei terreni utilizzati sono quelli definiti al §6.2, ovvero quelli determinati dalla campagna geognostica più recente.

9.2. G_2 – Carichi permanenti non strutturali

Non viene considerato alcun tipo di carico permanente non strutturale.

9.3. Carichi variabili

Dalle foto aeree storiche presentate al successivo paragrafo si può vedere come fosse stata predisposta, proprio a ridosso dei muri, una pista non pavimentata, sulla quale non è noto quali carichi siano transitati. Si assume che si tratti di una pista per il transito di mezzi di manutenzione e quindi si considera una striscia di 3 m di carico distribuito, a ridosso dei muri, di 10 kN/m².

| | | |
|--|---|--|
|  | <p>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p>DIGA GIBBESI</p> <p>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE VASCA DI DISSIPAZIONE</p> |  |
| <p>II122F-A-STR-RT-001-00</p> | <p>RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO</p> | <p>Pag. 32 di 75</p> |

9.4. E – Azioni sismiche

Nel progetto originale del 1981-1982, le verifiche sismiche sono state svolte secondo le normative dell'epoca, in accordo ad un grado di sismicità $S = 6$.

Nella presente relazione si eseguono le verifiche in accordo alle attuali normative, considerando il sito con la sua accelerazione su suolo rigido, al fine di ricavare coefficienti sismici orizzontali e verticali da utilizzare in una analisi pseudo-statica.

Le attuali norme NTC 2018 indicano come metodo di analisi delle condizioni sismiche di un'opera di sostegno il metodo pseudo-statico. L'azione sismica si modella come un'azione statica equivalente attraverso il coefficiente sismico orizzontale k_h e verticale k_v . Per determinare tali valori si procede come indicato nel seguito.

Come già detto in precedenza, i parametri sismici dell'area sono i seguenti:

- Vita nominale $V_N = 50$ anni
- Coefficiente $C_U = 1.5$
- Periodo di riferimento $V_R = V_N \cdot C_U = 50 \cdot 1.5 = 75$ anni
- Probabilità di superamento dell'azione sismica di riferimento per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) $P_{V_R} = 10\%$
- Tempo di ritorno del sisma $T_R = \frac{V_R}{\ln(1-P_{V_R})} = 475$ anni

Quindi, l'accelerazione orizzontale massima al sito è $a_g = 0.073$ [g]

Considerando i risultati delle prove geognostiche è stato possibile determinare il coefficiente di amplificazione stratigrafica (S_S) e quello di amplificazione topografica (S_T):

- $S_S = 1.500$
- $S_T = 1.000$

Si può calcolare, infine, l'accelerazione massima attesa al sito:

$$a_{MAX} = S_S \cdot S_T \cdot a_g = 1.5 \cdot 1.0 \cdot 0.073 \text{ [g]} = 0.1095 \text{ [g]}$$

I valori dei coefficienti α e β per la struttura n oggetto si assumono pari a:

- $\alpha = 0.8$
- $\beta = 1.0$

Il valore del coefficiente sismico orizzontale k_h e verticale k_v associato ai valori sopra citati sono pari a:

- $k_h = \alpha \cdot \beta \cdot a_{MAX} = 0.8 \cdot 1.0 \cdot 0.1095 \text{ [g]} = 0.0876 \text{ [g]}$
- $k_v = \pm 0.5 \cdot k_h = \pm 0.0438 \text{ [g]}$



DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

II122F-A-STR-RT-001-00

**RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO**

Pag. 33 di 75

10. COMBINAZIONI DI PROGETTO

Si applicano le indicazioni di progetto contenute nelle NTC 2018 per le opere di sostegno.

Per questa struttura vengono eseguite due verifiche allo Stato Limite Ultimo (SLU): statica e sismica. Esse sono definite dalle NTC18 come:

- Combinazione fondamentale statica SLU:
 $\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$
- Combinazione sismica SLV:
 $E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$

Nelle combinazioni in questione la presollecitazione P non è presente.

I valori dei coefficienti γ sono definiti in Tabella 10-1.

Tabella 10-1: Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU (Tab. 2.6.I, NTC18)

| | | Coefficiente γ_F | EQU | A1 | A2 |
|---|-------------|----------------------------|-----|-----|-----|
| Carichi permanenti G_1 | Favorevoli | γ_{G1} | 0,9 | 1,0 | 1,0 |
| | Sfavorevoli | | 1,1 | 1,3 | 1,0 |
| Carichi permanenti non strutturali G_2 ⁽¹⁾ | Favorevoli | γ_{G2} | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| | Sfavorevoli | | 1,5 | 1,5 | 1,3 |
| Azioni variabili Q | Favorevoli | γ_Q | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Sfavorevoli | | 1,5 | 1,5 | 1,3 |

⁽¹⁾ Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. carichi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.

I valori dei coefficienti di combinazione ψ sono riportati in Tabella 10-2.

Tabella 10-2: Valori dei coefficienti di combinazione (Tab. 2.5.I, NTC18)

| Categoria/Azione variabile | ψ_{0j} | ψ_{1j} | ψ_{2j} |
|---|----------------------------|-------------|-------------|
| Categoria A - Ambienti ad uso residenziale | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
| Categoria B - Uffici | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
| Categoria C - Ambienti suscettibili di affollamento | 0,7 | 0,7 | 0,6 |
| Categoria D - Ambienti ad uso commerciale | 0,7 | 0,7 | 0,6 |
| Categoria E – Aree per immagazzinamento, uso commerciale e uso industriale, biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale | 1,0 | 0,9 | 0,8 |
| Categoria F - Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN) | 0,7 | 0,7 | 0,6 |
| Categoria G – Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso > 30 kN) | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
| Categoria H - Coperture accessibili per sola manutenzione | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Categoria I – Coperture praticabili | da valutarsi caso per caso | | |
| Categoria K – Coperture per usi speciali (impianti, eliporti, ...) | | | |
| Vento | 0,6 | 0,2 | 0,0 |
| Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.) | 0,5 | 0,2 | 0,0 |
| Neve (a quota > 1000 m s.l.m.) | 0,7 | 0,5 | 0,2 |
| Variazioni termiche | 0,6 | 0,5 | 0,0 |

10.1. Parametri caratteristici

Si determinano le condizioni di esercizio dell'opera utilizzando, nelle analisi, i valori caratteristici di resistenza e deformabilità dei terreni interagenti con l'opera in progetto. In questo modo si determina lo stato deformativo, gli spostamenti e le sollecitazioni sviluppati dell'opera nelle condizioni di lavoro ordinarie, definiti valori caratteristici.

10.2. Combinazioni di carico per gli stati limite ultimi – Verifiche SLU

Le verifiche agli stati limite ultimi per le opere di sostegno si eseguono applicando i coefficienti parziali attraverso diverse combinazioni di carico:

- Combinazione 1: si utilizzano i coefficienti appartenenti ai gruppi A1+M1+R1;
- Combinazione 2: si utilizzano i coefficienti appartenenti ai gruppi A2+M2+R1;

Nella **combinazione 1** si considerano i valori caratteristici dei parametri di resistenza del terreno e si amplificano le azioni sulla struttura attraverso i coefficienti parziali del gruppo A1 ovvero $\gamma_G = 1.3$ per i carichi permanenti $\gamma_Q = 1.5$ per i carichi variabili. Nel caso in

| | | |
|--|---|--|
|  | <p>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p>DIGA GIBBESI</p> <p>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE VASCA DI DISSIPAZIONE</p> |  |
| <p>II122F-A-STR-RT-001-00</p> | <p>RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO</p> | <p>Pag. 35 di 75</p> |

esame i carichi permanenti sono rappresentati dal terreno interagente e quelli variabili dall'azione della spinta idrostatica.

Nella **combinazione 2** si riducono i parametri di resistenza del terreno attraverso i coefficienti parziali del gruppo M2 ovvero $\gamma_{\tan \varphi'} = 1.25$ per l'attrito interno del terreno, $\gamma_{c'} = 1.25$ per la coesione efficace. Si amplificano del 30% i carichi variabili prima definiti attraverso il coefficiente parziale $\gamma_Q = 1.3$.

Si evidenzia che, per il calcolo delle sollecitazioni nelle strutture, l'amplificazione della spinta idrostatica non ha senso fisico: significherebbe infatti assumere la quota dell'acqua superiore di 4-5 m rispetto alla quota di testa dei muri: si tratta chiaramente di una condizione non realizzabile. In ogni caso si terrà conto di un'amplificazione delle sollecitazioni derivanti dalle spinte terreno con un coefficiente 1.3.

10.3. Combinazioni di carico per gli stati limite di cedimento – Verifiche SLE

Tale combinazione si utilizza per la previsione dei cedimenti orizzontali della testa dei muri. Si fa riferimento ai valori caratteristici dei parametri di resistenza e dei carichi, considerando conservativamente la somma di carico accidentale e carico dovuto al dislivello idrico senza l'utilizzo di coefficienti di combinazione.

10.4. Combinazioni di carico per la verifica sismica SLV

Nella Circolare esplicativa delle NTC (C7.11.6.2 e C 7.11.6.3) è esplicitato che, sia nel caso di muri di sostegno sia in quello di paratie, le verifiche sismiche si eseguono “*utilizzando valori unitari dei coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici*” e rispettando i fattori di sicurezza indicati nella stessa NTC. Per mezzo di tale combinazione di carico sono determinate le azioni da considerare applicate alle strutture.

Si considera poi un fattore di sicurezza γ_R nei confronti dell'instabilità globale del complesso opera-terreno pari ad 1.1, come indicato al § 6.5.3.1.2 per le paratie in caso di utilizzo di metodi pseudo-statici.

| | | |
|--|---|--|
|  | <p>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p>DIGA GIBBESI</p> <p>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE VASCA DI DISSIPAZIONE</p> |  |
| <p>II122F-A-STR-RT-001-00</p> | <p>RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO</p> | <p>Pag. 36 di 75</p> |

11. METODO DI CALCOLO

L'analisi strutturale viene condotta con il seguente programma agli elementi finiti: PLAXIS 2D AE. "Plaxis – Finite Element Code for Soil and Rock Analyses". Professional Vers. 2014. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherland.

Tale strumento ha il vantaggio di modellare accuratamente l'interazione terreno struttura utilizzando materiali non lineari con vari modelli di rottura in un dominio bidimensionale in stato piano di deformazione. I terreni sono stati in questa sede modellati tramite il modello di rottura Mohr-Coulomb. Gli elementi adottati sono triangolari a 15 nodi, con 15 punti di integrazione, i quali offrono vantaggi sull'accuratezza dei risultati (in senso conservativo) specialmente in condizioni prossime al collasso.

La scelta di utilizzare il codice di calcolo Plaxis è motivata:

- dalla necessità di verificare il comportamento dell'intera struttura, piuttosto articolata;
- dalla necessità di prevedere con accuratezza i cedimenti orizzontali e verticali nelle sezioni con presenza strutture da conservare;
- dalla possibilità di seguire in modo più accurato la storia di carico della struttura (operazione che influenza le sollecitazioni finali).

Le analisi numeriche sono condotte conservativamente in condizioni drenate.

Il programma inserisce le condizioni di falda nei terreni assumendo automaticamente i pesi immersi in corrispondenza della quota di falda importata e introducendo, sempre in modo automatico, la spinta idrostatica corrispondente alla condizione di progetto (in questo caso il dislivello idrico costituirebbe una condizione transitoria ma, a favore di semplicità e sicurezza, le pressioni idriche sono assunte ipotizzando condizioni di moto stazionarie).

È stata naturalmente considerata anche la condizione con acqua interna alla vasca, già calcolata e verificata nel progetto esecutivo originale.

Per il caso sismico il programma stesso applica le accelerazioni orizzontali e verticali all'intero dominio (analisi pseudostatica: l'accelerazione imposta è pari al coefficiente sismico orizzontale/verticale).

12. SEZIONI DI VERIFICA

Nella Figura 12.1 è rappresentata la carpenteria della vasca di dissipazione, come da progetto originale (PE 1981), mentre nella Figura 12.2, Figura 12.3, Figura 12.5, Figura 12.6, Figura 12.7 e Figura 12.8 si riportano le fotografie dei dissesti avvenuti a partire dal 2013.

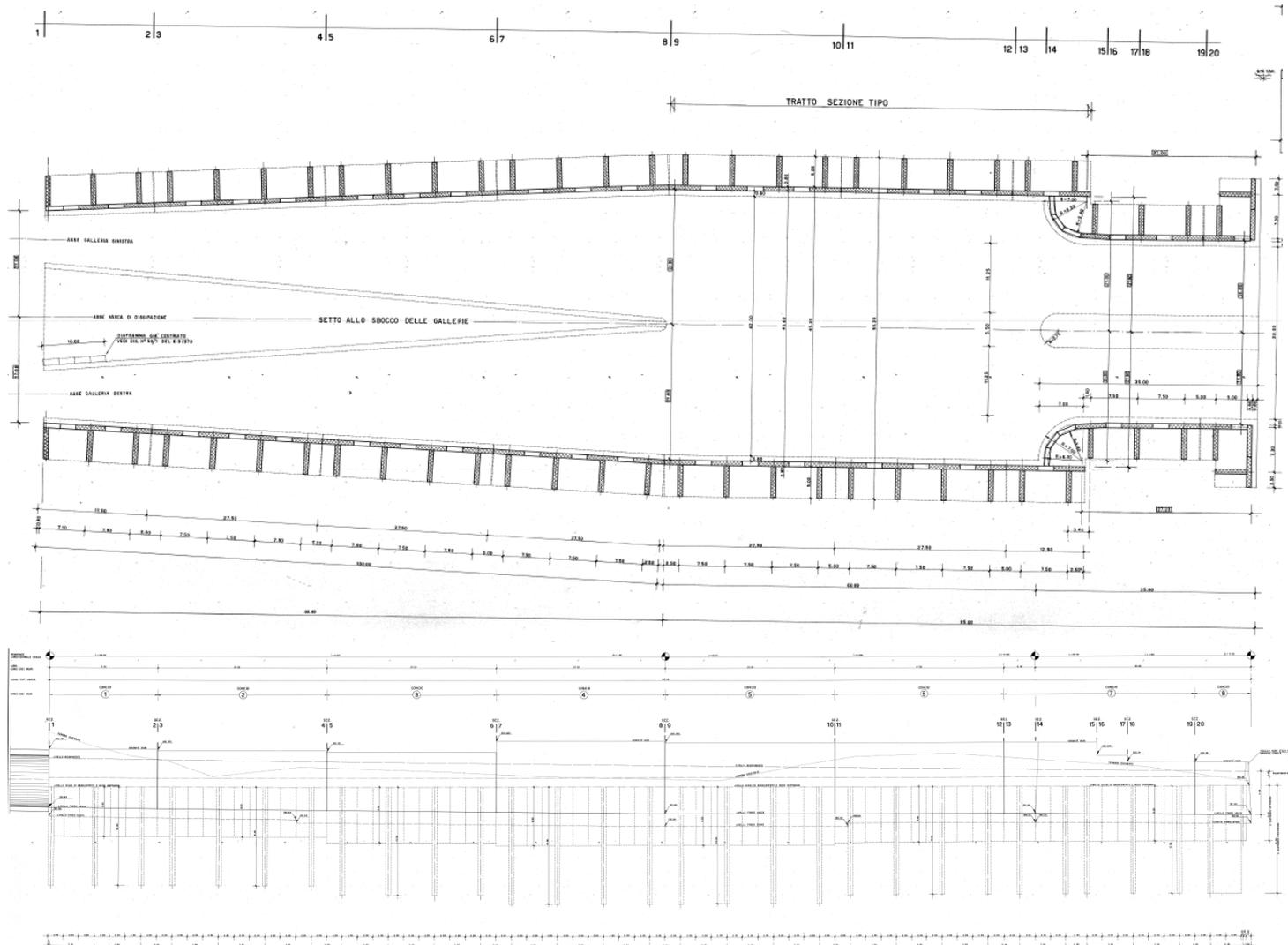


Figura 12.1: Vasca di dissipazione - Planimetria e sezione longitudinale con indicazione delle carpenterie dei diaframmi come da progetto in Variante del 1981



Figura 12.2: Vasca di dissipazione – Situazione a maggio 2010



Figura 12.3: Vasca di dissipazione – Iniziale perdita di allineamento tra le elevazioni – Febbraio 2012



Figura 12.4: Vasca di dissipazione – Iniziale perdita di allineamento tra le elevazioni – Novembre 2012



DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

II122F-A-STR-RT-001-00

**RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO**

Pag. 39 di 75



Figura 12.5: Vasca di dissipazione – Crollo muro andatore in destra idraulica – 14 marzo 2013

DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

II122F-A-STR-RT-001-00

**RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO**

Pag. 40 di 75



Figura 12.6: Vasca di dissipazione – Situazione dopo i primi crolli del 2013



Figura 12.7: Vasca di dissipazione – Situazione dopo i crolli del 2016



Figura 12.8: Vasca di dissipazione – Situazione attuale dopo riprofilatura del terreno a monte dei muri e pulizia dai detriti

Dal raffronto delle immagini si può dedurre che i crolli hanno riguardato l'elevazione dei muri dei conci 2, 3 e 4 sia a monte che a valle; il concio 4, in particolare, coincide con la sezione di maggiore altezza dell'elevazione dei muri e dei diaframmi.

Le verifiche sismiche con le NTC 2018 si concentreranno, quindi, su questi conci ed in particolare saranno verificati il concio 2 (mentre il concio 3, avendo stessa altezza di scavo e diaframmi più lunghi, risulterebbe automaticamente verificato in caso di esito positivo della verifica sul concio 2) ed il concio 4.

Il concio 2, si veda Figura 12.9, presenta una lunghezza totale di m 27.50, è fondato su quattro diaframmi trasversali distanti 7.50 m tra loro e ha altezza di 13 m.

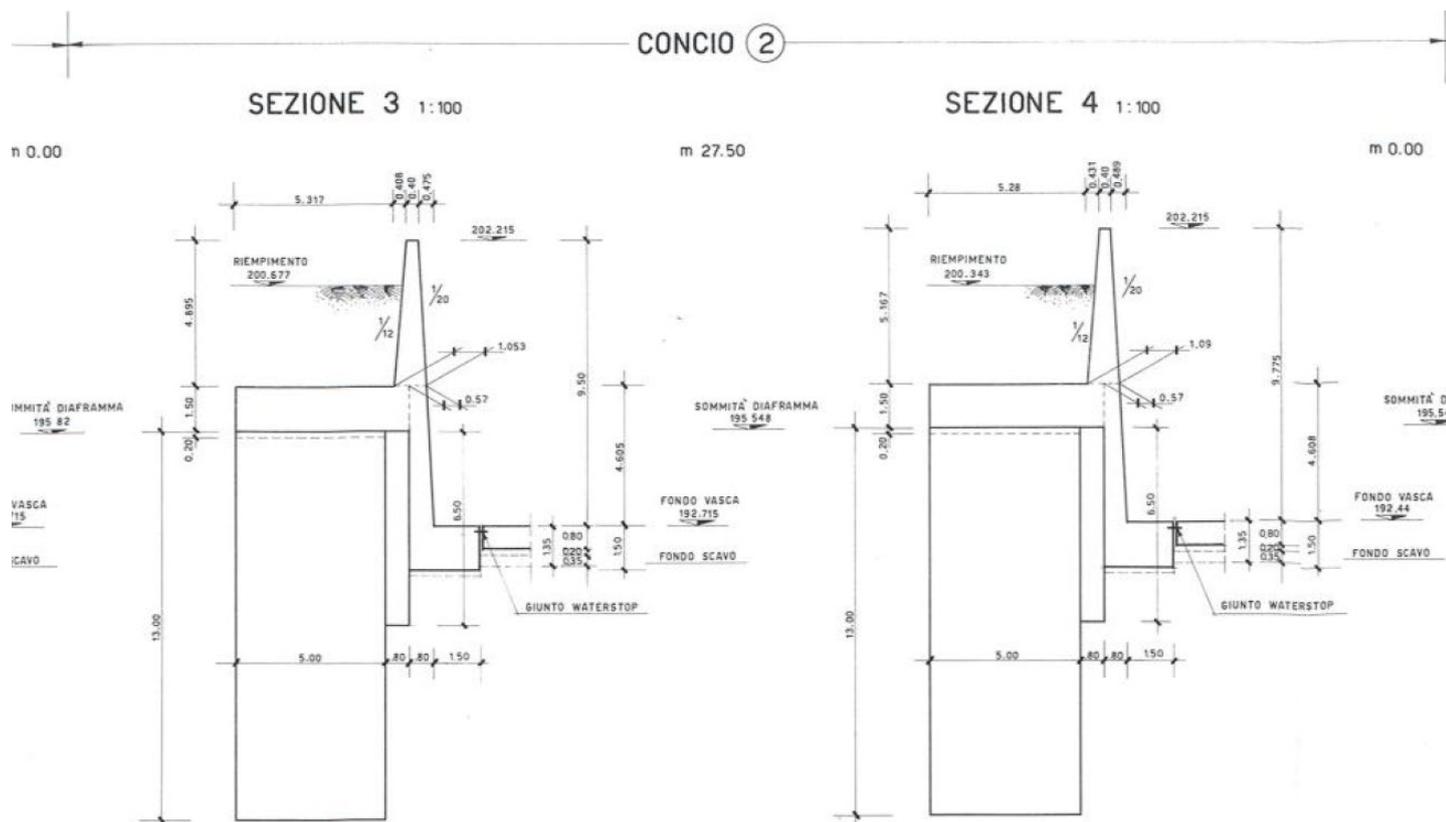


Figura 12.9: Vasca di dissipazione – Sezione trasversale delle sezioni iniziali e finali del concio 2

| | | |
|--|---|--|
|  | <p>Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità Dipartimento Regionale Dell'Acqua e dei Rifiuti</p> <p>DIGA GIBBESI</p> <p>RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE VASCA DI DISSIPAZIONE</p> |  |
| <p>II122F-A-STR-RT-001-00</p> | <p>RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO</p> | <p>Pag. 42 di 75</p> |

13. ANALISI STRUTTURALE DEL CONCIO 2

Il concio 2, si veda Figura 12.9, presenta una lunghezza totale di m 27.50, è fondato su quattro diaframmi trasversali distanti 7.50 m tra loro e ha altezza di 13 m.

13.1. Fasi di calcolo

Poiché il modello di calcolo utilizza legami sforzi-deformazioni non lineari, è necessario implementare in esso esattamente (anche se in modo semplificato) le fasi costruttive. Di conseguenza, nel modello saranno inserite e calcolate le seguenti fasi:

1. fase geostatica;
2. pre-scavo;
3. realizzazione diaframmi;
4. scavo interno alla vasca;
5. realizzazione muro;
6. applicazione del dislivello idrico interno, considerato stazionario e in condizioni drenate;
7. applicazione dei carichi variabili a tergo del muro, non contemporanei al dislivello idrico;
8. combinazione sismica SLV.

13.2. Modello

In Figura 13.1 è rappresentato il modello adottato per la schematizzazione dei vari elementi strutturali; come già illustrato al capitolo 11, si tratta di una modellazione in stato piano di deformazione e dunque tutte le strutture continue in senso longitudinale al muro sono schematizzate con un elemento “plate” le cui caratteristiche geometriche ed inerziali corrispondono a quelle della loro sezione trasversale.

Le nuove versioni del programma “Plaxis” consentono altresì l'utilizzo di un nuovo elemento, chiamato “*embedded beam row*”, che simula un palo ad interasse longitudinale costante (opportune funzioni di forma gestiscono l'effetto dell'irrigidimento dovuto a questo elemento sulla mesh di calcolo: si rimanda al manuale scientifico del programma per la sua descrizione completa). Tale elemento, già testato dalla scrivente in altre occasioni, è stato utilizzato per la schematizzazione del diaframma trasversale, ad interasse 7.50 m.



DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

II122F-A-STR-RT-001-00

RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO

Pag. 43 di 75

Poiché però l'elemento è unifilare, si è reso necessario schematizzare il diaframma, di lunghezza 5 m, tramite una semplice struttura reticolare composta da due di questi pali (considerati di sezione $0.8 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ciascuno) collegati da un elemento tirante/puntone di area $0.8 \times 1.0 \text{ m}$. In tal modo viene garantita la rigidezza geometrica della struttura in c.a. (come si può stimare anche qualitativamente dalle deformate delle varie combinazioni di carico, lo spostamento avviene sempre per rotazione al piede o per traslazione rigida, e non per taglio/flessione).

Le sollecitazioni di verifica sul diaframma trasversale saranno quindi ottenute per composizione delle flessioni, delle forze normali e dei tagli agenti sui singoli elementi.

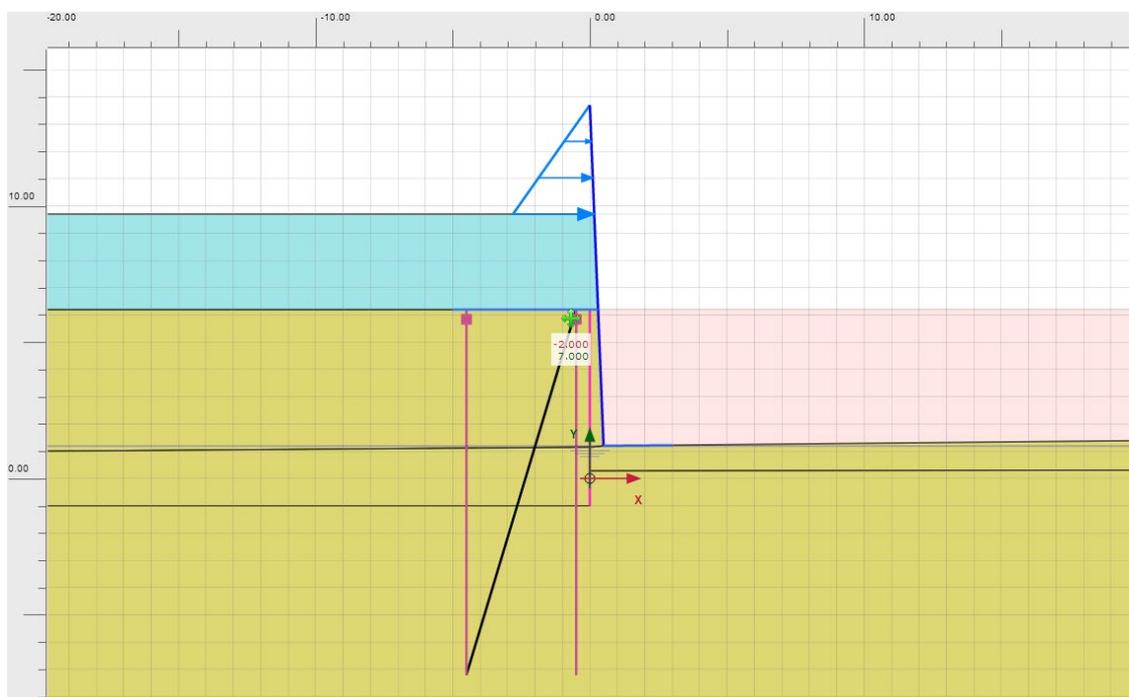


Figura 13.1: Vasca di dissipazione – Geometria del modello della struttura con indicazione dei carichi applicati

13.3. Risultati dell'analisi strutturale

Nel seguito si riportano i risultati della sezione esaminata nel calcolo. Si determinano le condizioni di esercizio dell'opera utilizzando nelle analisi i valori caratteristici di resistenza e deformabilità dei terreni interagenti con l'opera in progetto. In questo modo si determina lo stato deformativo, gli spostamenti e le sollecitazioni sviluppati dell'opera nelle condizioni di lavoro ordinarie, definiti valori caratteristici.

13.3.1. Risultati configurazione finale (fine costruzione) – Valori caratteristici

Nella Figura 13.2, Figura 13.3, Figura 13.4 e Figura 13.5 si riportano i risultati, in termini di sforzi e deformazioni, nella fase di fine costruzione (valori caratteristici).

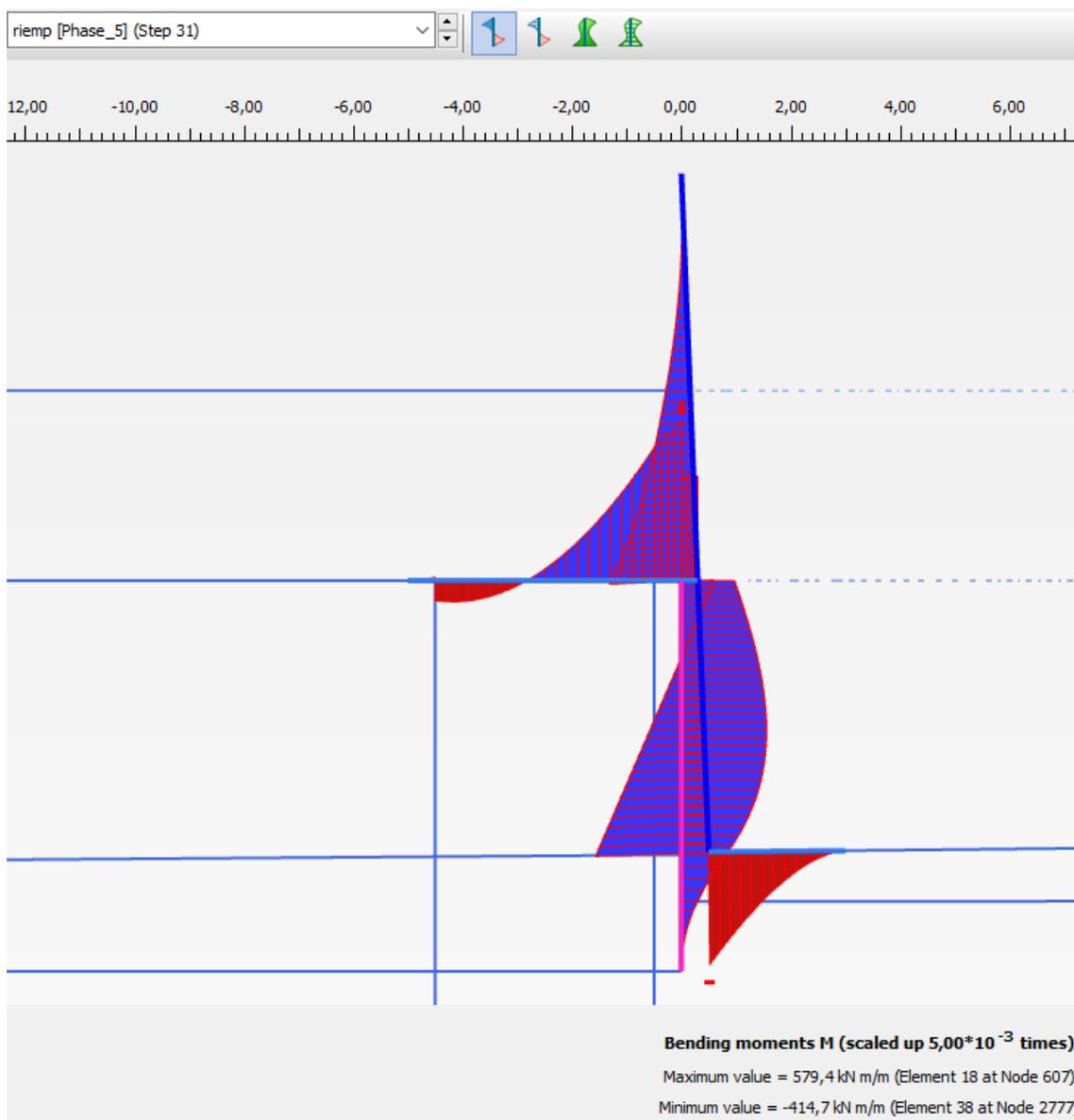


Figura 13.2: Momenti flettenti a fine costruzione

- Base muro: $M = 236 \text{ kNm/m}$ $N = -142 \text{ kN/m}$ $T = -82 \text{ kN/m}$
- Solettone: $M = 225 \text{ kNm/m}$ $N = 0 \text{ kN/m}$ $T = 267 \text{ kN/m}$
- Diaframma frontale: $M = 284 \text{ kN/m}$ $N = -276 \text{ kN/m}$ $T = -142 \text{ kN}$ (al centro)

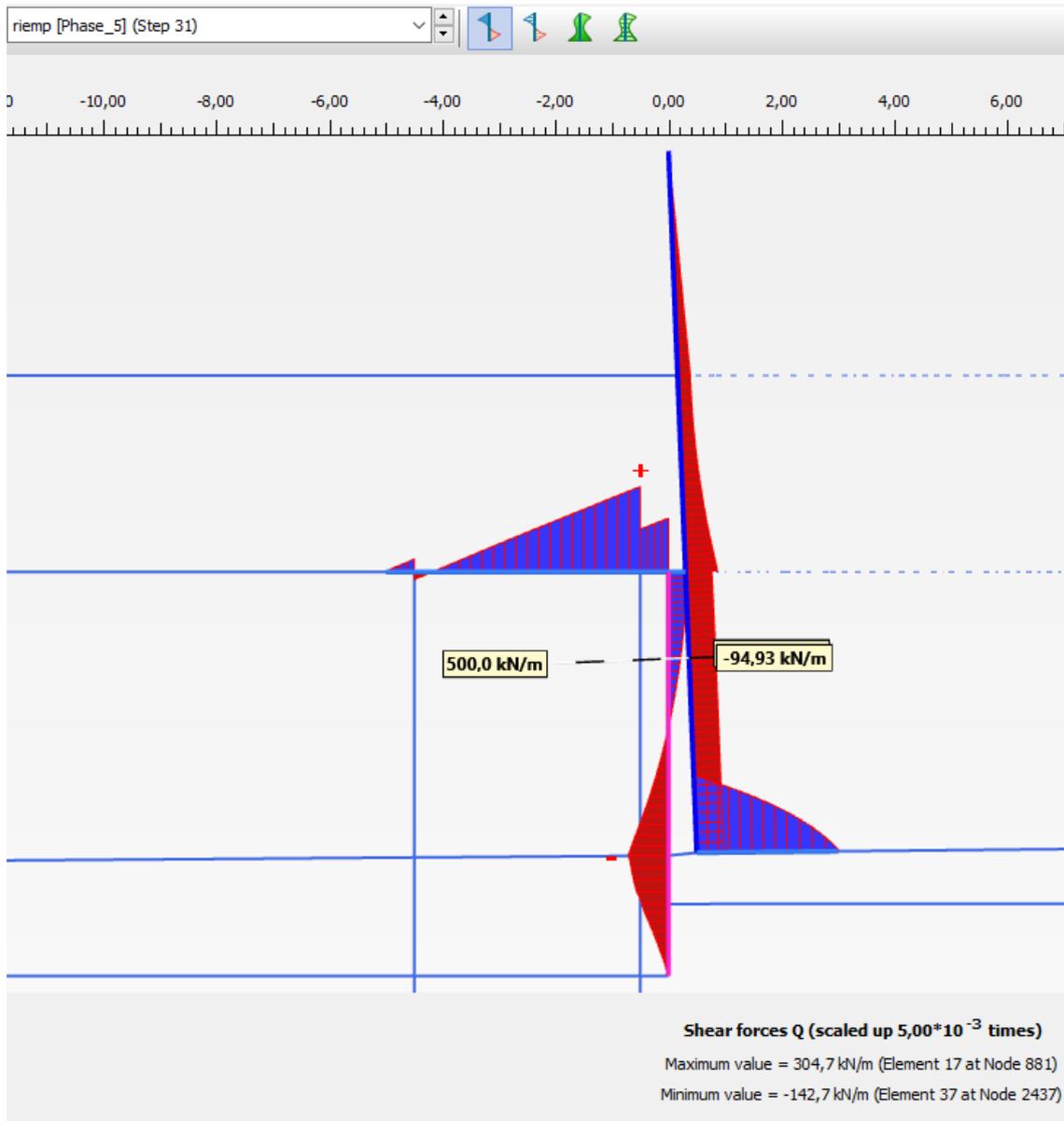


Figura 13.3: Azioni di taglio a fine costruzione

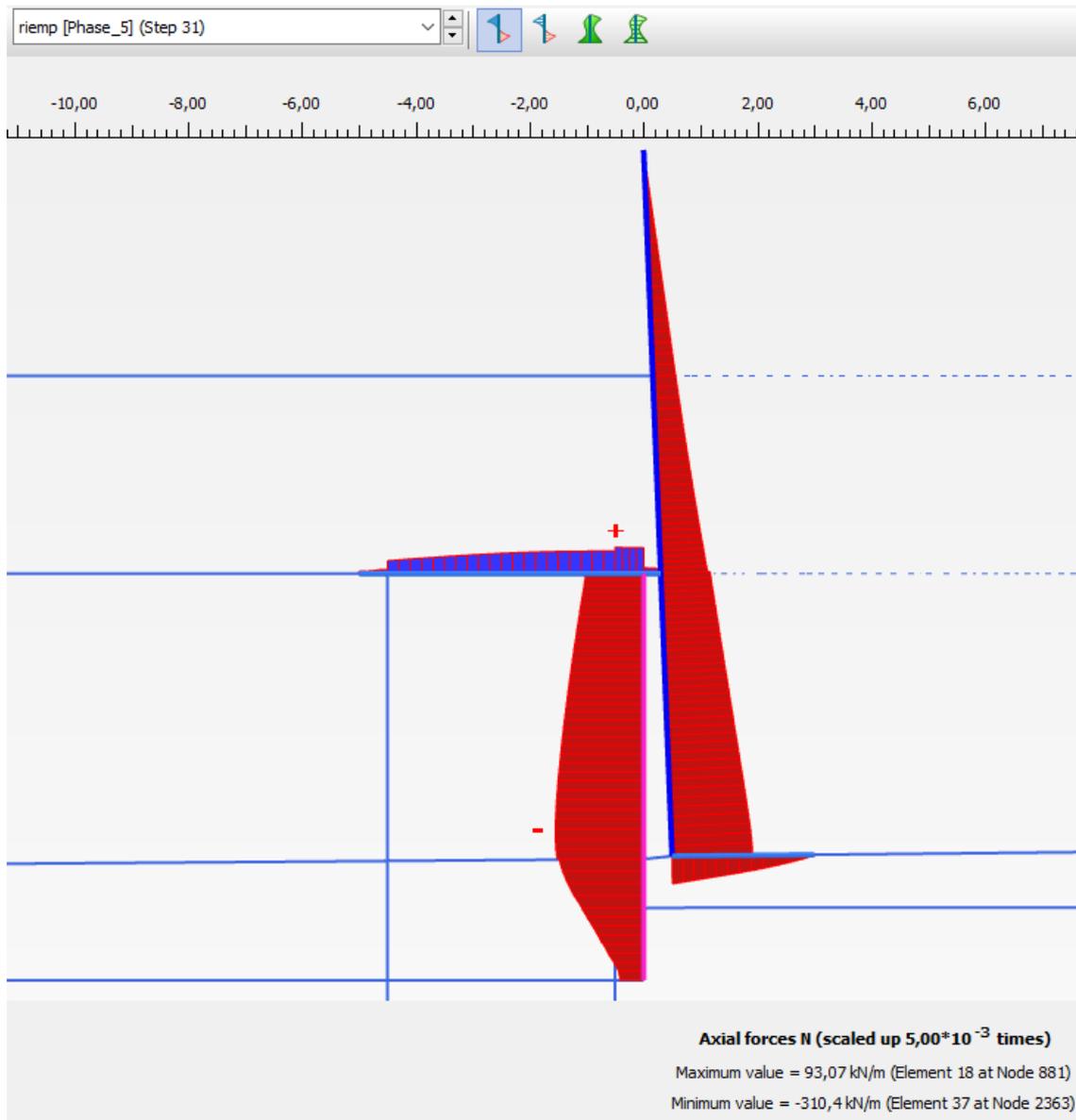
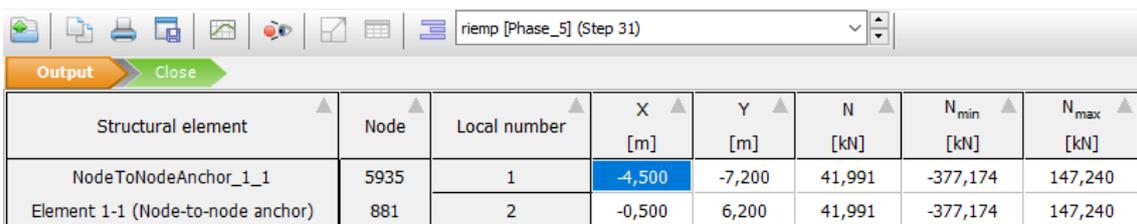


Figura 13.4: Azioni assiali a fine costruzione



| Structural element | Node | Local number | X [m] | Y [m] | N [kN] | N _{min} [kN] | N _{max} [kN] |
|-----------------------------------|------|--------------|--------|--------|--------|-----------------------|-----------------------|
| NodeToNodeAnchor_1_1 | 5935 | 1 | -4,500 | -7,200 | 41,991 | -377,174 | 147,240 |
| Element 1-1 (Node-to-node anchor) | 881 | 2 | -0,500 | 6,200 | 41,991 | -377,174 | 147,240 |

Figura 13.5: Azioni assiali nei tiranti a fine costruzione

13.3.2. Risultati condizione con acqua interna – Valori caratteristici

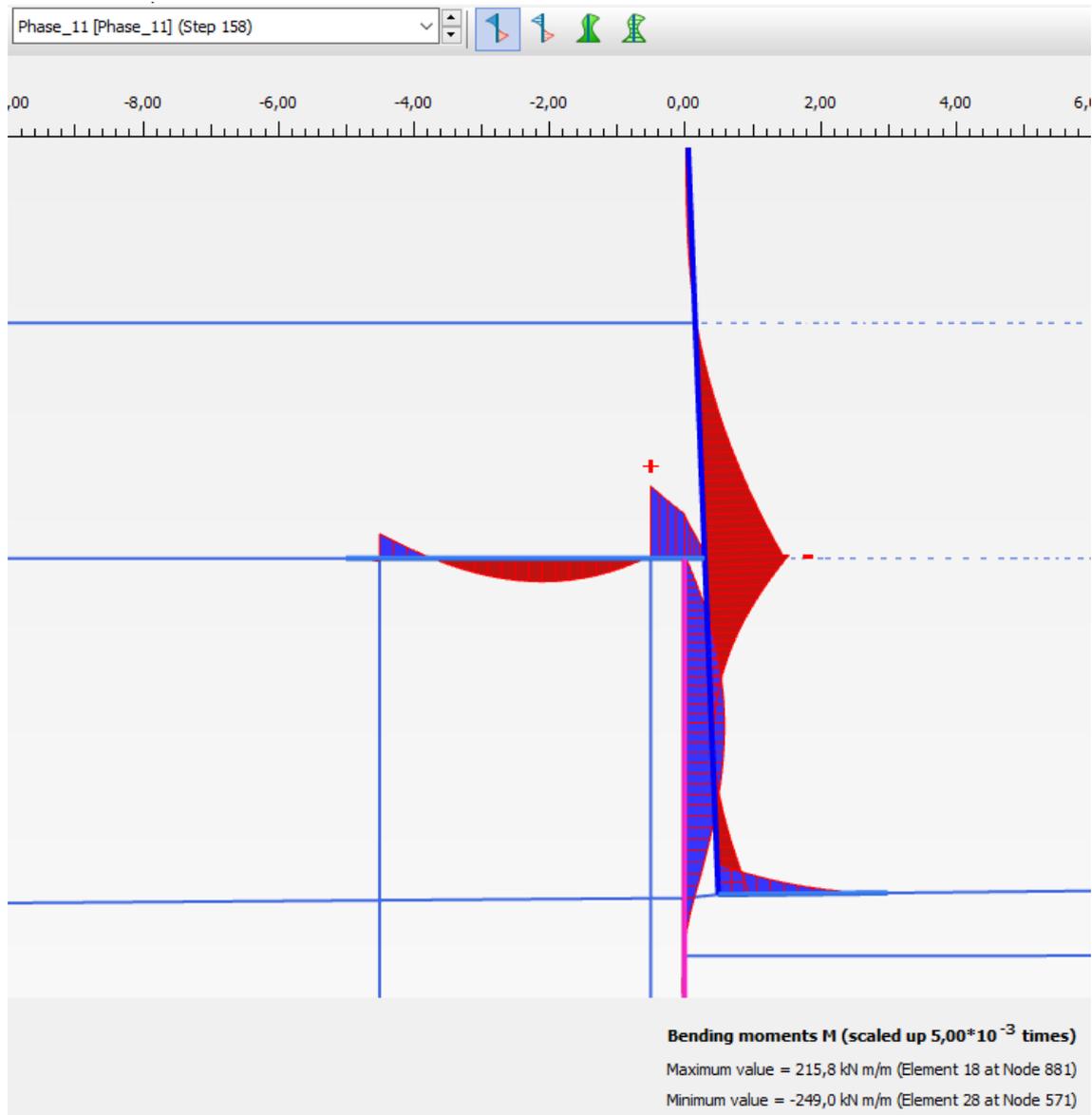


Figura 13.6: Momento flettente

- Base muro: $M = -160$ kNm/m $N = -140$ kN/m $T = 88$ kN/m
- Solettone: $M = 215$ kNm/m $N = 0$ kN/m $T = -290$ kN/m
- Diaframma frontale: $M = 142$ kNm/m $N = -240$ kN/m $T = -65$ kN (al centro)

DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

II122F-A-STR-RT-001-00

RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO

Pag. 48 di 75

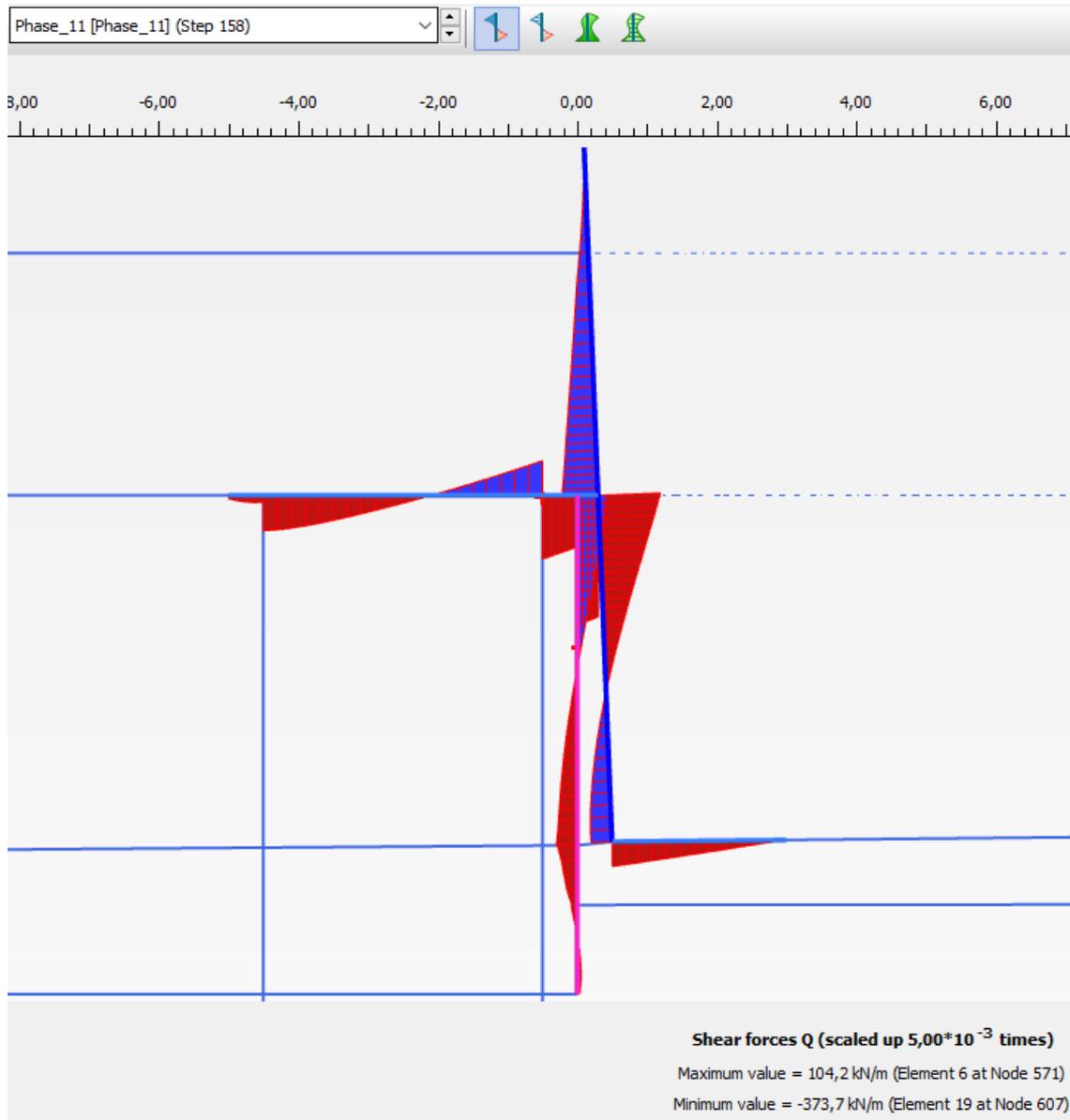


Figura 13.7: Azioni di taglio

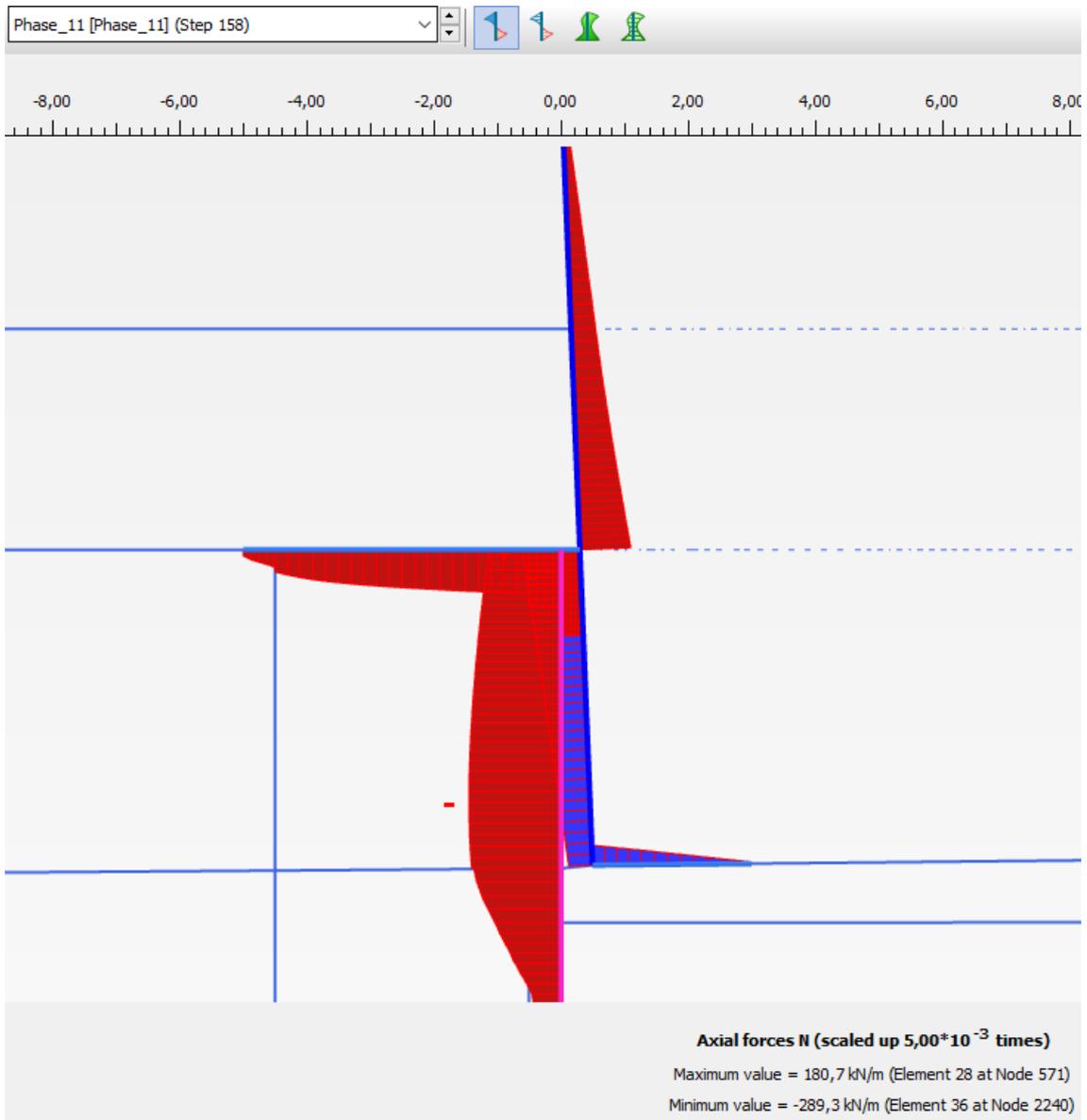
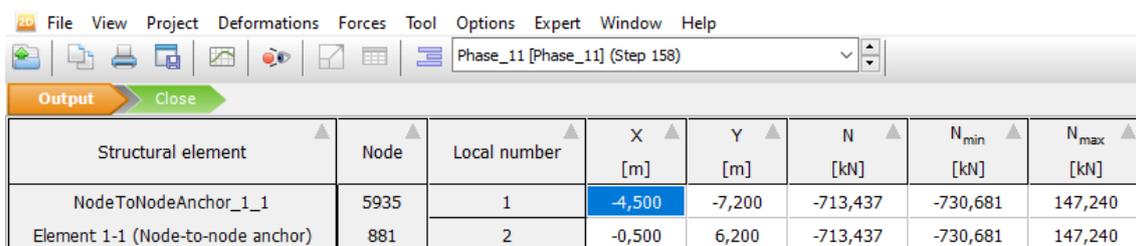


Figura 13.8: Azioni assiali



| Structural element | Node | Local number | X [m] | Y [m] | N [kN] | N _{min} [kN] | N _{max} [kN] |
|-----------------------------------|------|--------------|--------|--------|----------|-----------------------|-----------------------|
| NodeToNodeAnchor_1_1 | 5935 | 1 | -4,500 | -7,200 | -713,437 | -730,681 | 147,240 |
| Element 1-1 (Node-to-node anchor) | 881 | 2 | -0,500 | 6,200 | -713,437 | -730,681 | 147,240 |

Figura 13.9: Azioni assiali nei tiranti

13.3.3. Risultati con carichi variabili SLU - Valori di combinazione

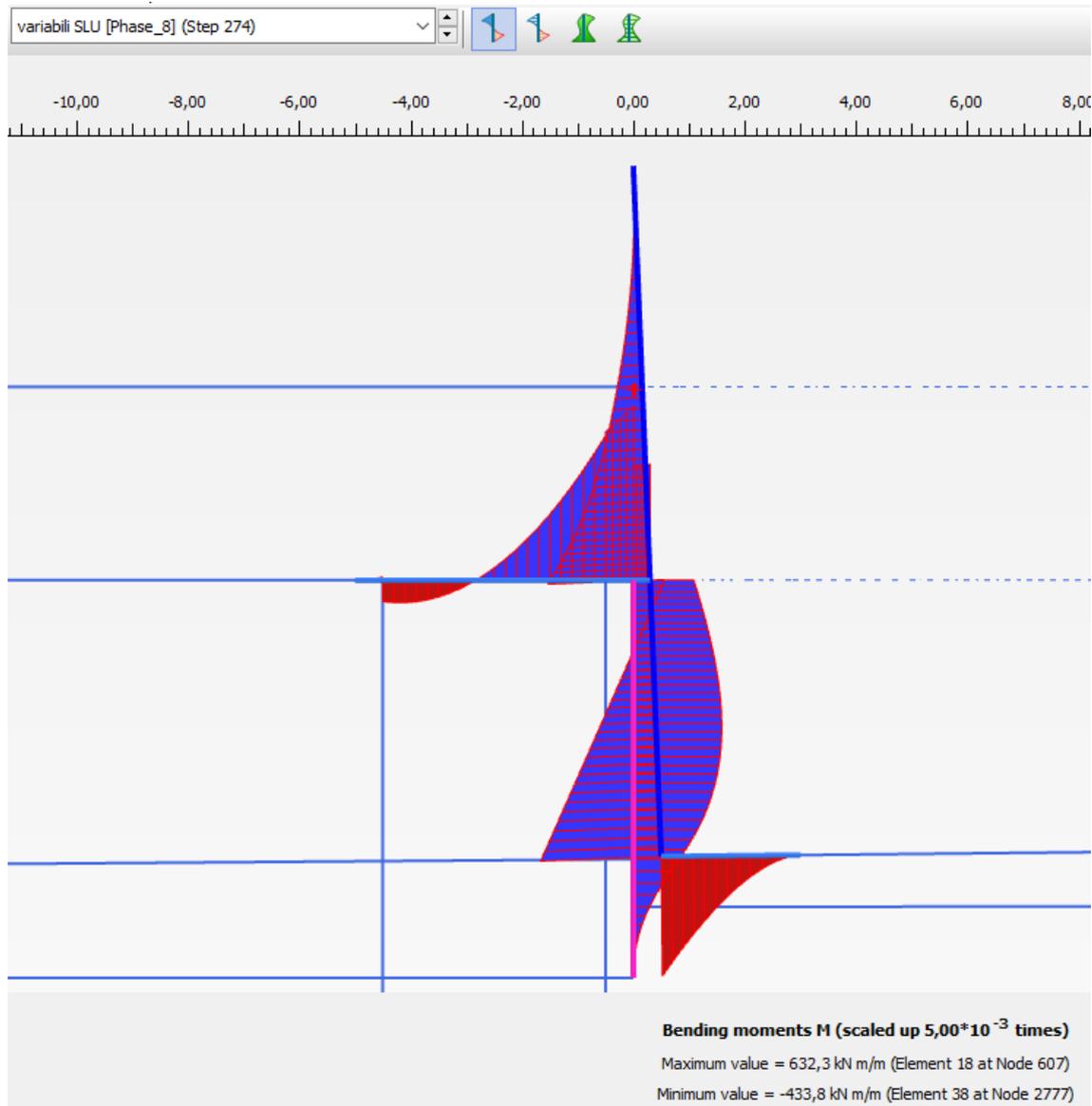


Figura 13.10: Momenti flettenti

- Base muro: $M = 266 \text{ kNm/m}$ $N = -141 \text{ kN/m}$ $T = -102 \text{ kN/m}$
- Solettone: $M = 359 \text{ kNm/m}$ $N = 0 \text{ kN/m}$ $T = 241 \text{ kN/m}$
- Diaframma frontale: $M = 317 \text{ kNm/m}$ $N = -145 \text{ kN/m}$ $T = -143 \text{ kN}$ (al centro)

DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

II122F-A-STR-RT-001-00

RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO

Pag. 51 di 75

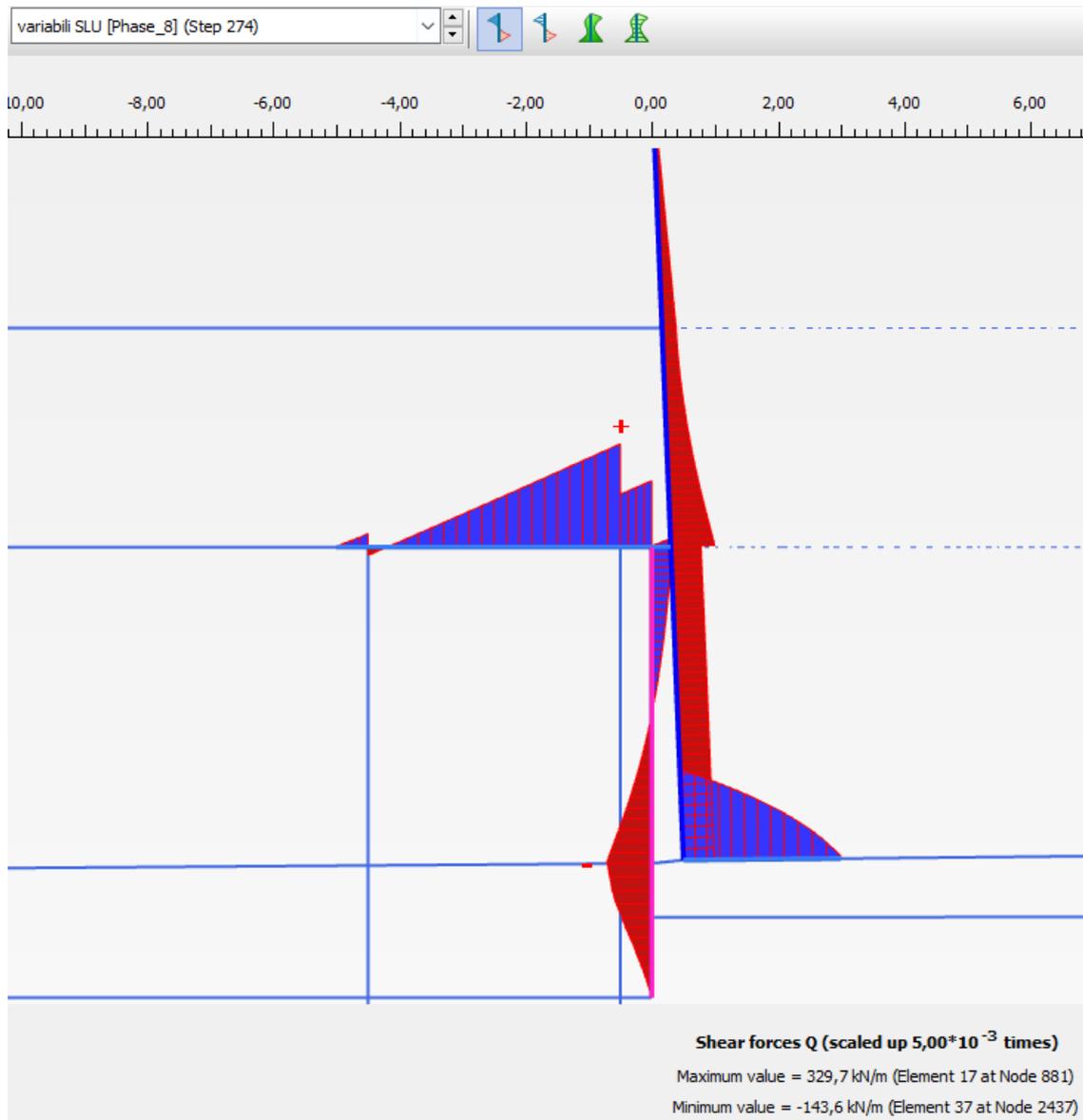


Figura 13.11: Azioni di taglio

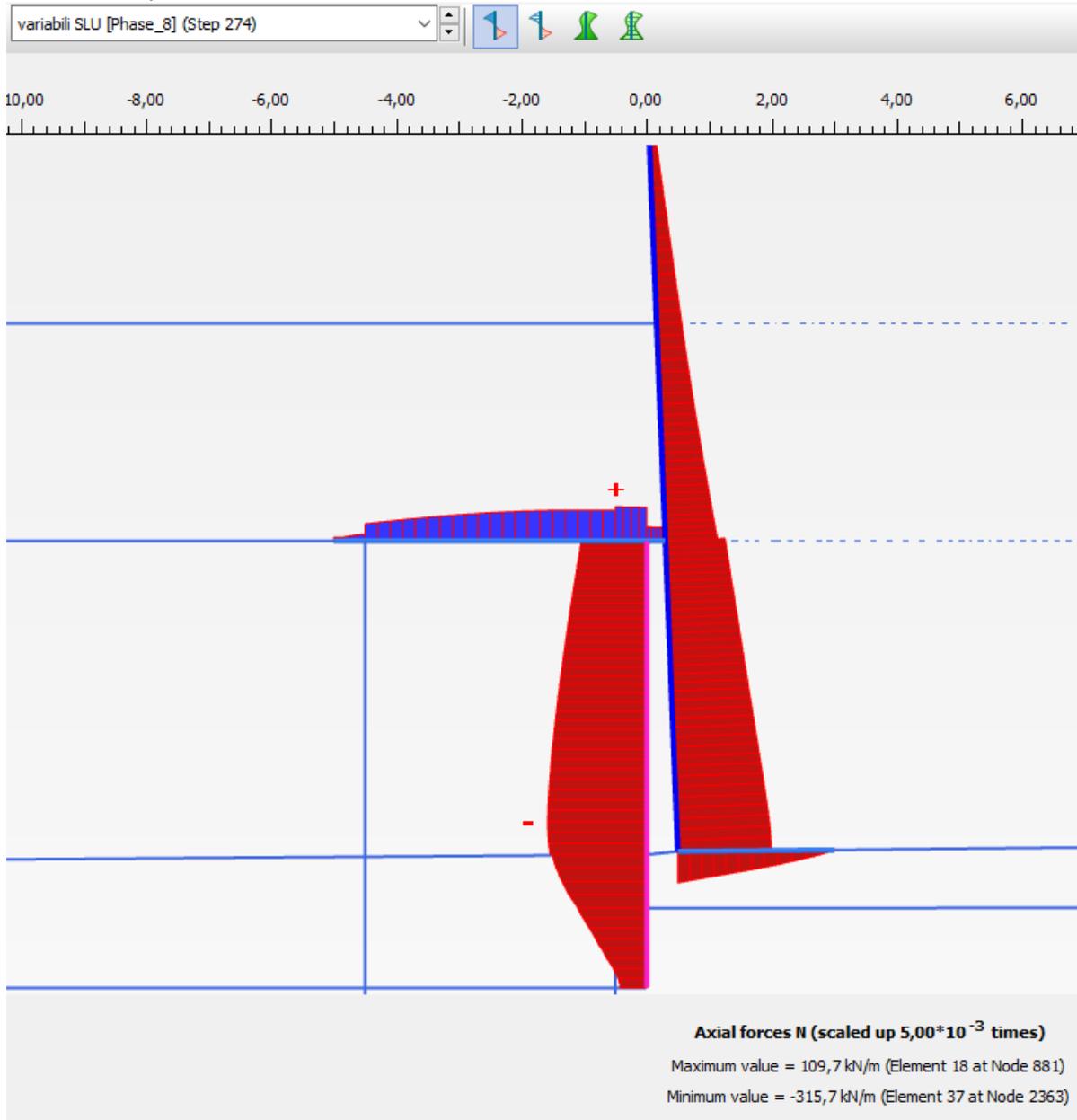
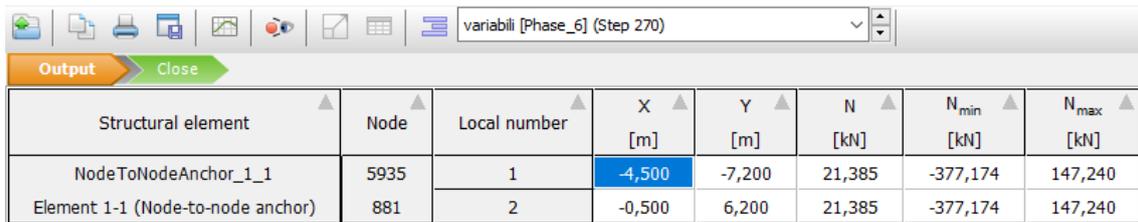


Figura 13.12: Azioni assiali



| Structural element | Node | Local number | X [m] | Y [m] | N [kN] | N _{min} [kN] | N _{max} [kN] |
|-----------------------------------|------|--------------|--------|--------|--------|-----------------------|-----------------------|
| NodeToNodeAnchor_1_1 | 5935 | 1 | -4,500 | -7,200 | 21,385 | -377,174 | 147,240 |
| Element 1-1 (Node-to-node anchor) | 881 | 2 | -0,500 | 6,200 | 21,385 | -377,174 | 147,240 |

Figura 13.13: Azioni assiali nel tirante fittizio

13.3.4. Risultati combinazione SLV

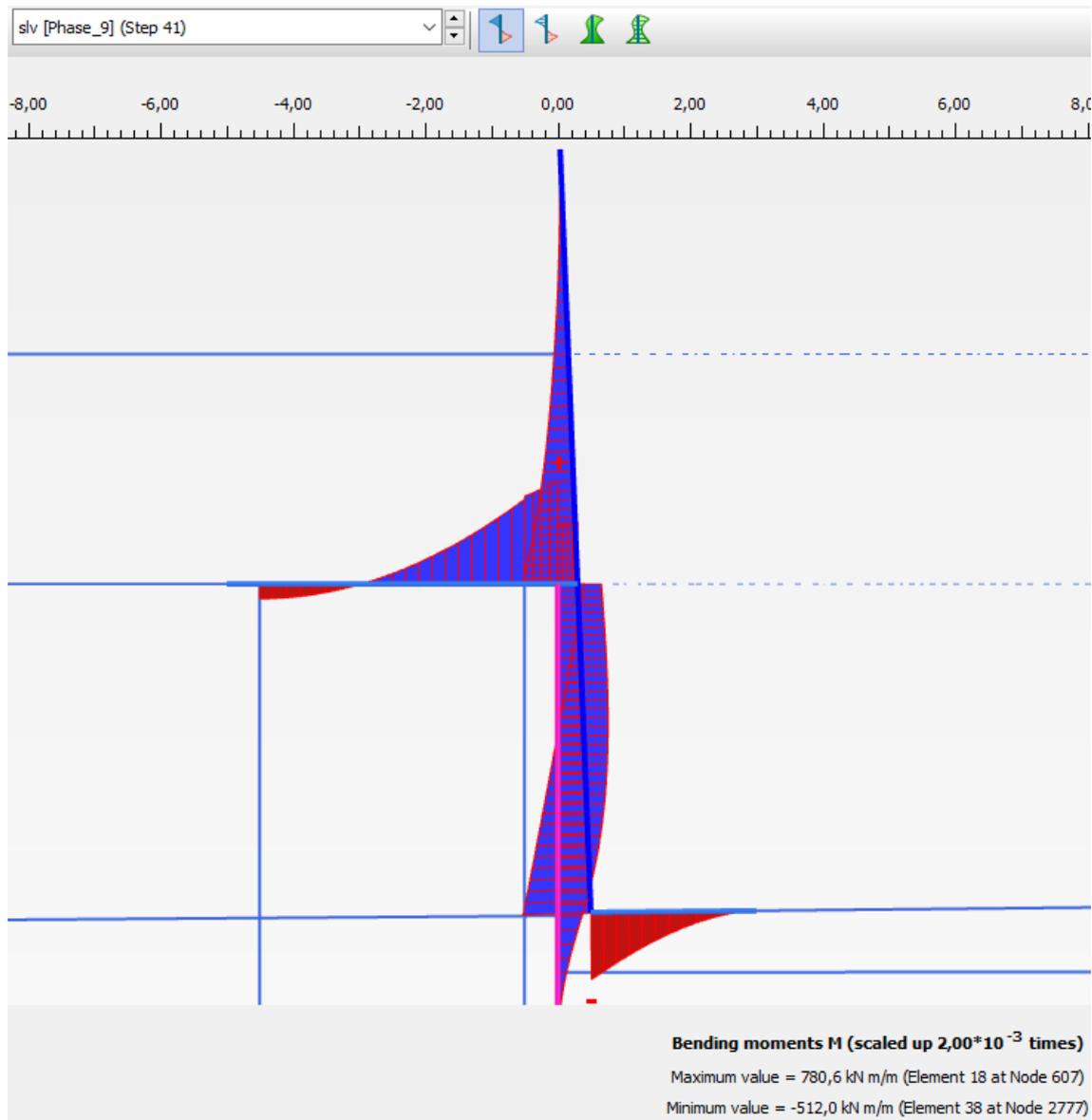


Figura 13.14: Momenti flettenti in combinazione sismica (SLV)

- Base muro: $M = 309 \text{ kNm/m}$ $N = -144 \text{ kN/m}$ $T = -112 \text{ kN/m}$
- Solettone: $M = 460 \text{ kNm/m}$ $N = 0 \text{ kN/m}$ $T = 331 \text{ kN/m}$
- Diaframma frontale: $M = 379 \text{ kN/m}$ $N = -310 \text{ kN/m}$ $T = -153 \text{ kN}$ (al centro)

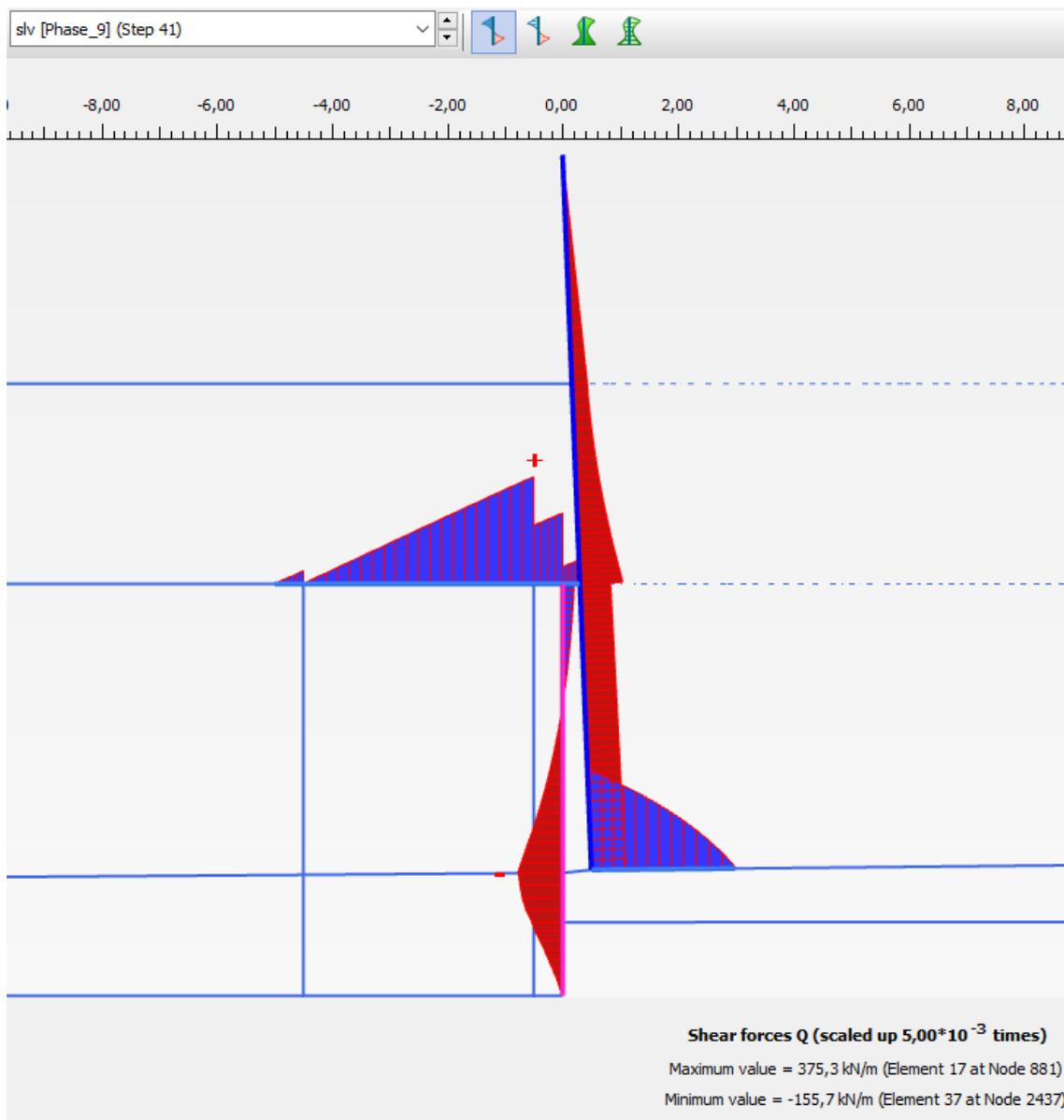


Figura 13.15: Azioni di taglio in combinazione sismica (SLV)

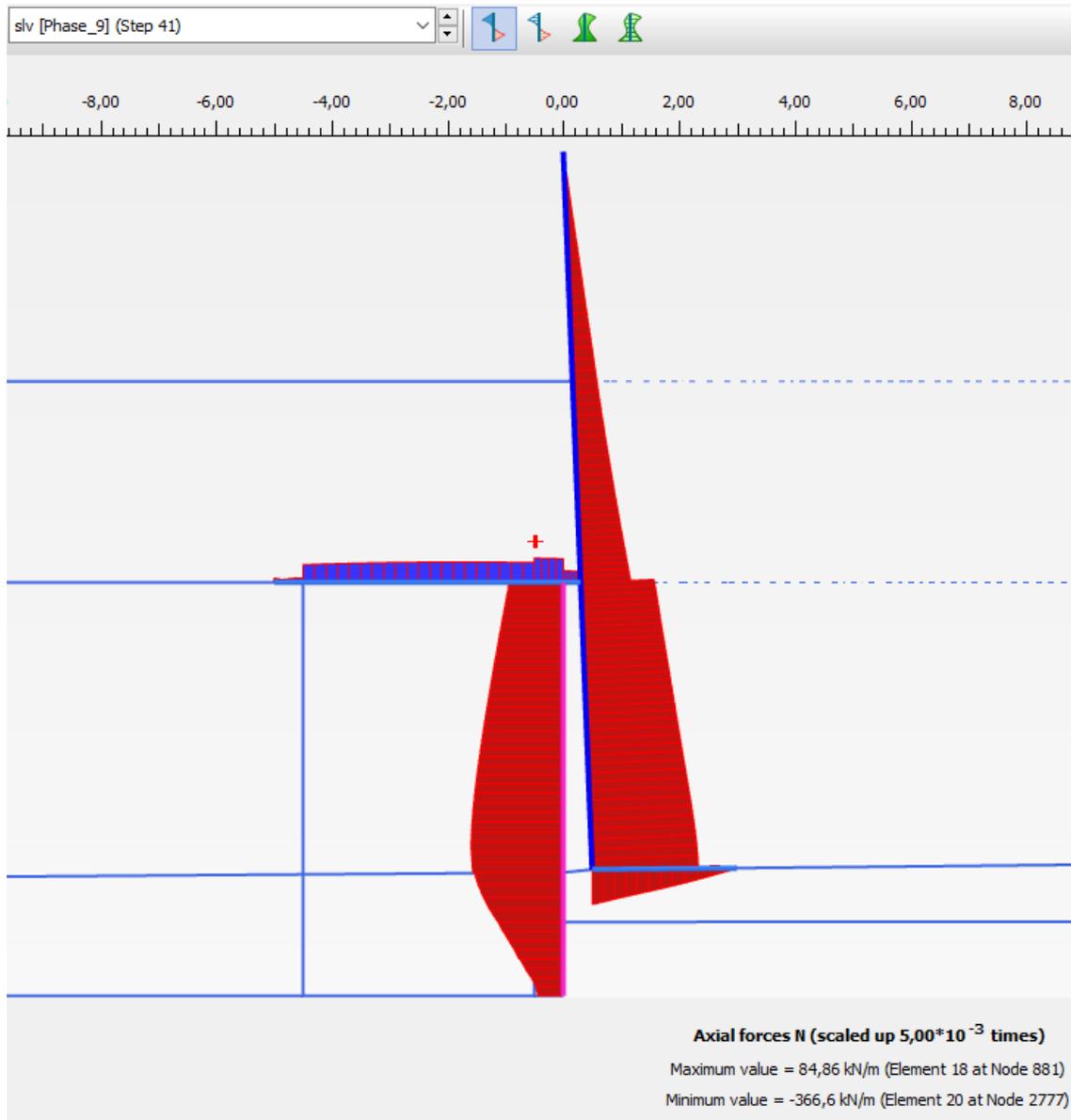
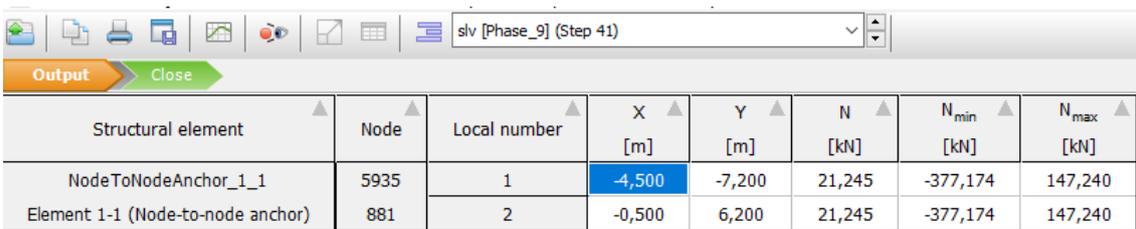


Figura 13.16: Azioni assiali in combinazione sismica (SLV)



| Structural element | Node | Local number | X [m] | Y [m] | N [kN] | N _{min} [kN] | N _{max} [kN] |
|-----------------------------------|------|--------------|--------|--------|--------|-----------------------|-----------------------|
| NodeToNodeAnchor_1_1 | 5935 | 1 | -4,500 | -7,200 | 21,245 | -377,174 | 147,240 |
| Element 1-1 (Node-to-node anchor) | 881 | 2 | -0,500 | 6,200 | 21,245 | -377,174 | 147,240 |

Figura 13.17: Azioni assiali nel tirante fittizio in combinazione sismica (SLV)



DIGA GIBBESI

**RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE**



II122F-A-STR-RT-001-00

**RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO**

Pag. 56 di 75

14. VERIFICHE STRUTTURALI

Nel seguito si riassumono le sollecitazioni sulle varie sezioni strutturali in calcestruzzo armato, a seconda della condizione di carico e della stratigrafia.

Si eseguono in questa fase soltanto verifiche di resistenza in condizioni SLU – SLV, ipotizzando che in opera le caratteristiche dei materiali siano quelle previste dal progetto originale e riassunte al §8.1.

| BASE MURO | | Valori caratteristici | | | Combinazione A1 M1 | | |
|--------------|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|
| | | M | N | T | M | N | T |
| Stratigrafia | Condizione di carico | [kNm/m] | [kN/m] | [kN/m] | [kN/m] | [kN/m] | [kN/m] |
| attuale | fine costruzione | 236.0 | -142.0 | -82.0 | 306.8 | -184.6 | -106.6 |
| attuale | acqua interna | -160.0 | -140.0 | 88.0 | -89.2 | -182.6 | 63.4 |
| attuale | carichi variabili SLU | 266.0 | -141.0 | -102.0 | 336.8 | -183.6 | -126.6 |
| attuale | SLV | 309.0 | -144.0 | -112.0 | 309.0 | -144.0 | -112.0 |

| SOLETTONE | | Valori caratteristici | | | Combinazione A1 M1 | | |
|--------------|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|
| | | M | N | T | M | N | T |
| Stratigrafia | Condizione di carico | [kN/m] | [kN/m] | [kN/m] | [kN/m] | [kN/m] | [kN/m] |
| attuale | fine costruzione | 225.0 | 91.0 | 267.0 | 292.5 | 118.3 | 347.1 |
| attuale | acqua interna | 215.0 | -140.0 | -290.0 | 282.5 | -112.7 | -209.9 |
| attuale | carichi variabili SLU | 359.0 | 98.0 | 241.0 | 426.5 | 125.3 | 321.1 |
| attuale | SLV | 460.0 | 70.0 | 331.0 | 460.0 | 70.0 | 331.0 |

| DIAFRAMMA FRONTALE | | Valori caratteristici | | | Combinazione A1 M1 | | |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|
| | | M | N | T | M | N | T |
| Stratigrafia | Condizione di carico | [kNm/m] | [kN/m] | [kN/m] | [kN/m] | [kN/m] | [kN/m] |
| attuale | fine costruzione | 284.0 | -276.0 | -142.0 | 369.2 | -358.8 | -184.6 |
| attuale | acqua interna | 142.0 | -240.0 | -65.0 | 227.2 | -322.8 | -107.6 |
| attuale | carichi variabili SLU | 317.0 | -145.0 | -143.3 | 402.2 | -227.8 | -185.9 |
| attuale | SLV | 379.0 | -310.0 | -153.0 | 379.0 | -310.0 | -153.0 |

Per quanto riguarda il diaframma trasversale, le sue sollecitazioni si ricavano per composizione delle sollecitazioni dei tre elementi fittizi che lo compongono. Si ottengono sollecitazioni dell'ordine dei 1000-1200 kNm/m, nettamente inferiori alle capacità resistenti della sezione. Il diaframma trasversale dunque non presenta criticità.

14.1. Verifiche statiche (SLU)

Le verifiche statiche sono effettuate considerando le barre d'armatura col loro diametro nominale rilevato in situ durante la campagna di indagine strutturale ed indicato sulle tavole del progetto esecutivo originale.

Le sezioni da verificare sono le seguenti:

1. Base del muro:

Le carpenterie e armature sono riportate in Figura 14.1.

La sezione, 100 × 130 cm, è armata con 4.5Ø16/m al lembo esterno e con 3Ø16/m al lembo interno.

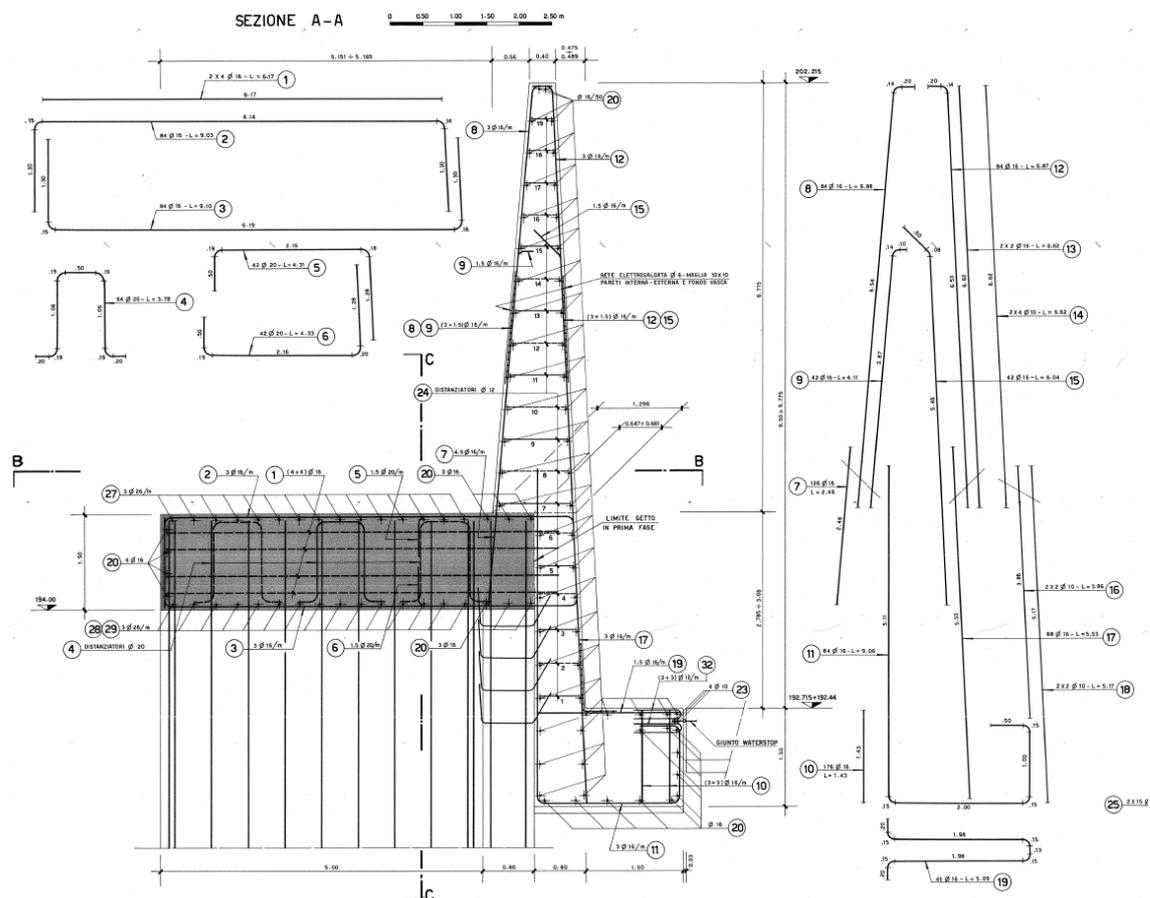


Figura 14.1: Vista in sezione del muro e del solettone

2. Solettone:

Le carpenterie e armature sono riportate in Figura 14.1.

La sezione, 100×150 cm, è armata con $3\text{Ø}16/\text{m}$ ad entrambi i lembi.

3. Diaframma frontale:

Le carpenterie e armature sono riportate in .

La sezione, 100×80 cm, è armata con $2.5\text{Ø}20/\text{m}$ ad entrambi i lembi.

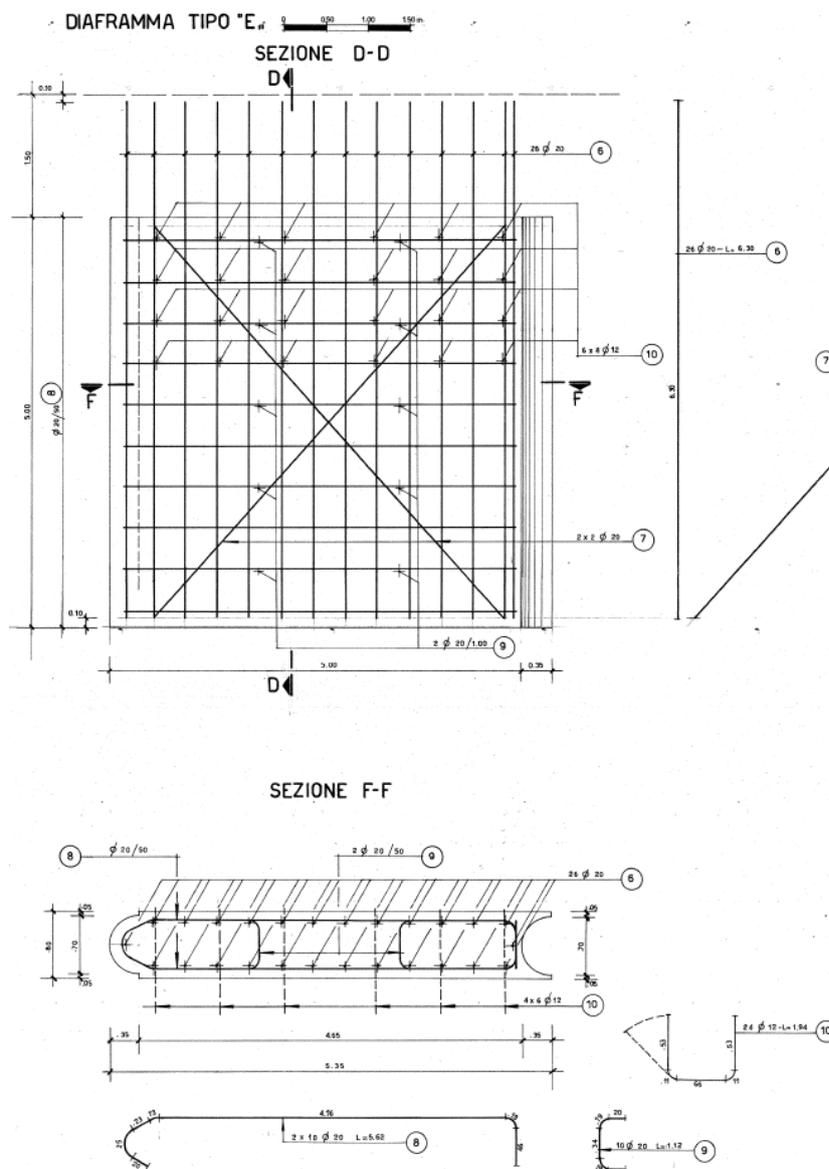


Figura 14.2: Vista frontale e in sezione del muro e del diaframma frontale

14.1.1. Verifiche a flessione e a taglio

Le verifiche a flessione e taglio delle sezioni sono condotte con il software ENG-PRELIM di SigmaC Software.

La legge costitutiva di acciaio e calcestruzzo considerata per le verifiche statiche è quella riportata al §8.1. In Figura 14.3, 14.2 e 14.3 sono riportati i risultati delle verifiche a presso-flessione.

Base del muro

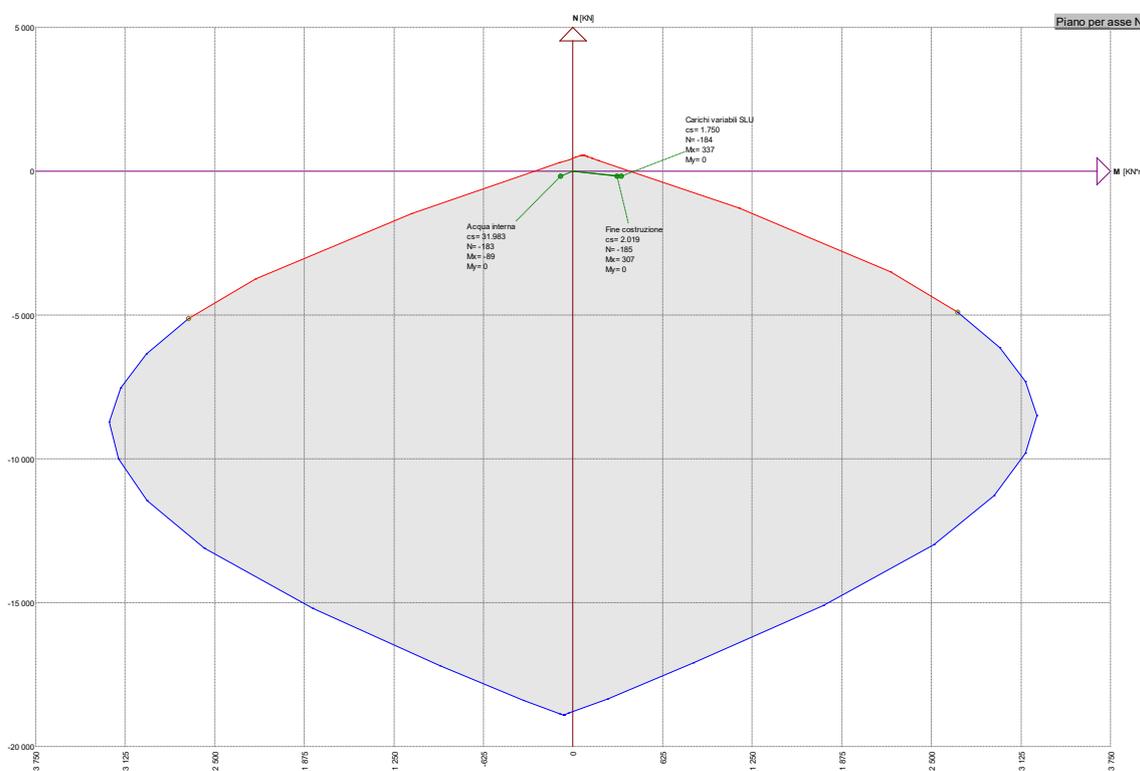


Figure 14-1: Dominio di rottura M-N della sezione alla base del muro d'elevazione

Le verifiche a flessione della base del muro sono soddisfatte in tutte le combinazioni statiche con un coefficiente di sicurezza minimo pari a $CS = 1.75$.

La sezione ha una resistenza a taglio pari a $V_{Rd} = 388$ kN, senza contare eventuale armatura a taglio, quindi anche le verifiche a taglio sono soddisfatte con un coefficiente di sicurezza minimo pari a $CS = 3.05$.

Solettone

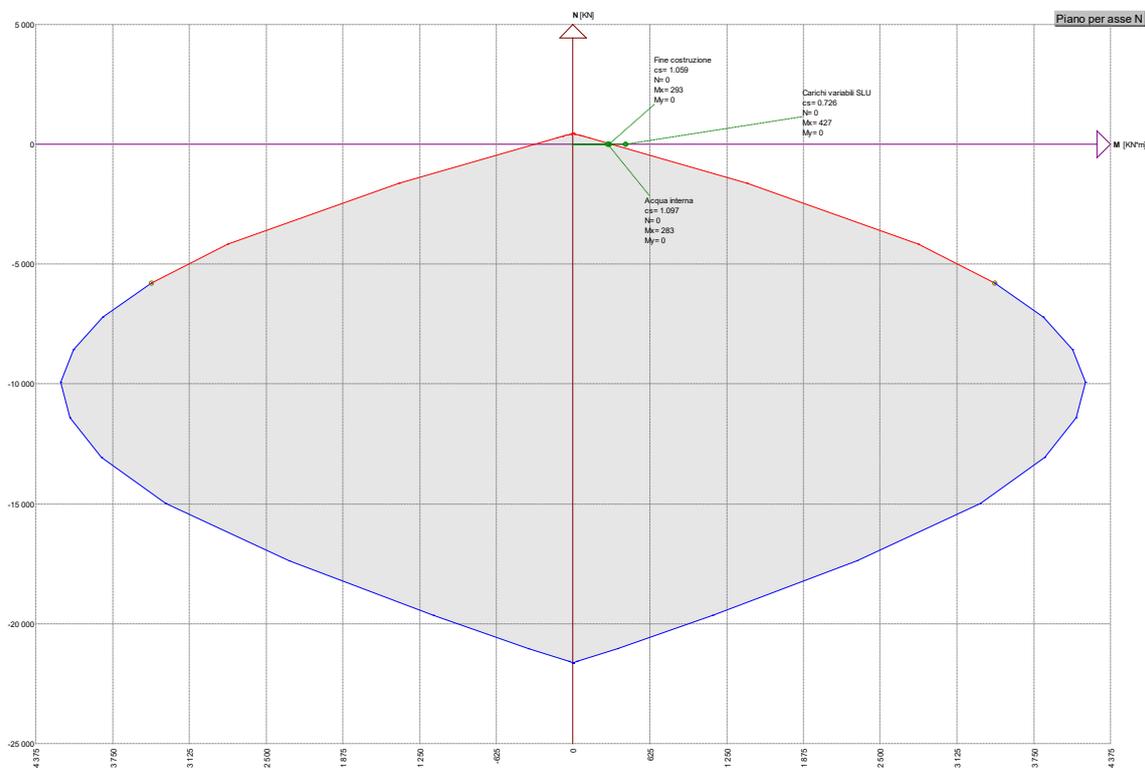


Figure 14-2: Dominio di rottura M-N della sezione del solettone

Le verifiche a flessione del solettone hanno i seguenti risultati:

- Fine costruzione: verificata con $CS = 1.06$
- Acqua interna: verificata con $CS = 1.10$
- Carichi variabili SLU: non verificata con $CS = 0.73$

La sezione ha una resistenza a taglio pari a $V_{Rd} = 407$ kN, senza contare eventuale armatura a taglio, quindi le verifiche a taglio sono soddisfatte con un coefficiente di sicurezza minimo pari a $CS = 1.17$.

Diaframma frontale

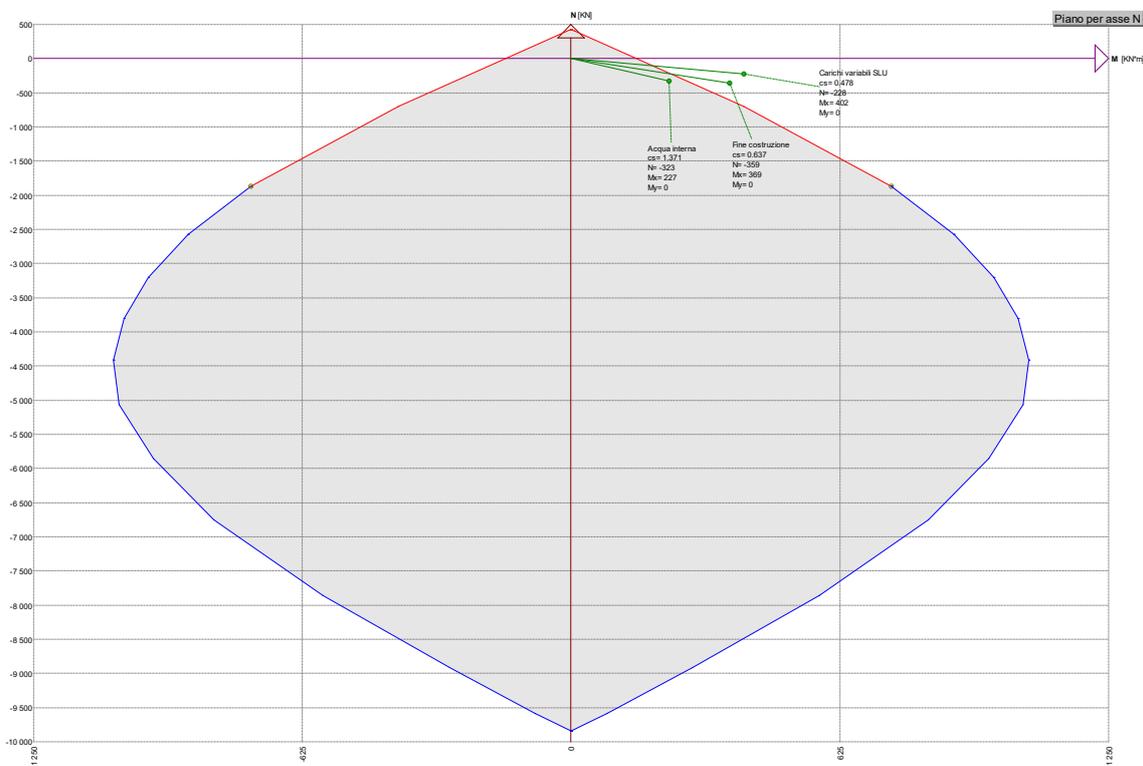


Figure 14-3: Dominio di rottura M-N della sezione del diaframma frontale

Le verifiche a flessione del diaframma frontale hanno i seguenti risultati:

- Fine costruzione: non verificata con $CS = 0.64$
- Acqua interna: verificata con $CS = 1.37$
- Carichi variabili SLU: non verificata con $CS = 0.48$

La sezione ha una resistenza a taglio minima pari a $V_{Rd} = 255$ kN, senza contare eventuale armatura a taglio, quindi le verifiche a taglio sono soddisfatte con un coefficiente di sicurezza minimo pari a $CS = 1.37$.

14.2. Verifiche sismiche (SLV)

Le verifiche sismiche vengono svolte in due condizioni: a breve termine e a lungo termine. Le prime vengono effettuate sulle sezioni così come da progetto, ovvero allo stato di fatto, mentre le seconde, a lungo termine, devono necessariamente tener conto della corrosione delle barre di calcestruzzo, che può avvenire durante la vita utile della struttura (50 anni) a causa della carbonatazione.

Si è considerata la struttura come a comportamento non dissipativo (ND): non è quindi necessario effettuare alcuna verifica di duttilità. Tali verifiche, però, sono sostituite dalla verifica che in tutte le sezioni il momento di progetto M_{Rd} non superi mai M'_{yd} , ovvero il momento resistente massimo della sezione in campo sostanzialmente elastico (come specificato dalle NTC18 al §7.4.1 e §4.1.2.3.4.2).

È possibile effettuare questa verifica imponendo che la deformazione massima raggiungibile dalle barre d'armatura sia pari a:

$$\varepsilon_s = \frac{f_{yd}}{E}$$

Dove:

- Barre FeB 44 k: $f_{yd} = 373.91 \text{ MPa}$ = resistenza di progetto dell'acciaio;
- Barre FeB 32 k: $f_{yd} = 273.91 \text{ MPa}$ = resistenza di progetto dell'acciaio;
- $E = 200\,000 \text{ MPa}$ = modulo elastico dell'acciaio.

Quindi:

- Barre FeB 44 k: $\varepsilon_s = 1.87 \cdot 10^{-3}$
- Barre FeB 32 k: $\varepsilon_s = 1.37 \cdot 10^{-3}$

In pratica, queste verifiche non tengono conto del ramo plastico dell'acciaio poiché esso deve rimanere in campo “sostanzialmente elastico”.

14.2.1. Verifiche sismiche (SLV) a breve termine

Le verifiche sismiche a breve termine, come si è detto, vengono svolte col fine di verificare le sezioni “allo stato di fatto”. Quindi, si utilizzano le sezioni già descritte al §14.1 per le verifiche statiche (SLU) della struttura.

Verifiche a flessione e a taglio

Le verifiche a flessione e taglio delle sezioni sono condotte con il software ENG-PRELIM di SigmaC Software. Si veda Figura 14.4, Figura 14.5 e Figura 14.6.

Base del muro

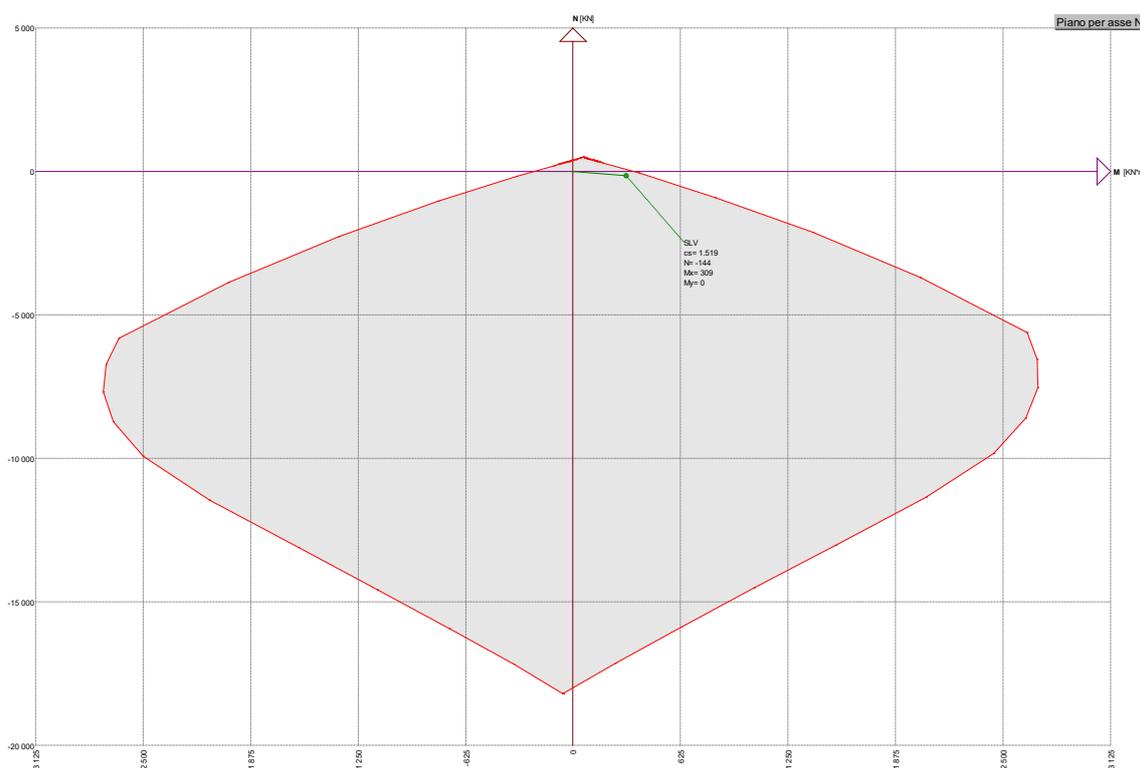


Figure 14-4: Dominio di rottura M-N della sezione alla base del muro d'elevazione

La verifica a flessione della base del muro risulta soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a $CS = 1.52$.

La sezione ha una resistenza a taglio pari a $V_{Rd} = 382$ kN, senza contare eventuale armatura a taglio, quindi anche la verifica a taglio è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a $CS = 3.41$.

Solettone

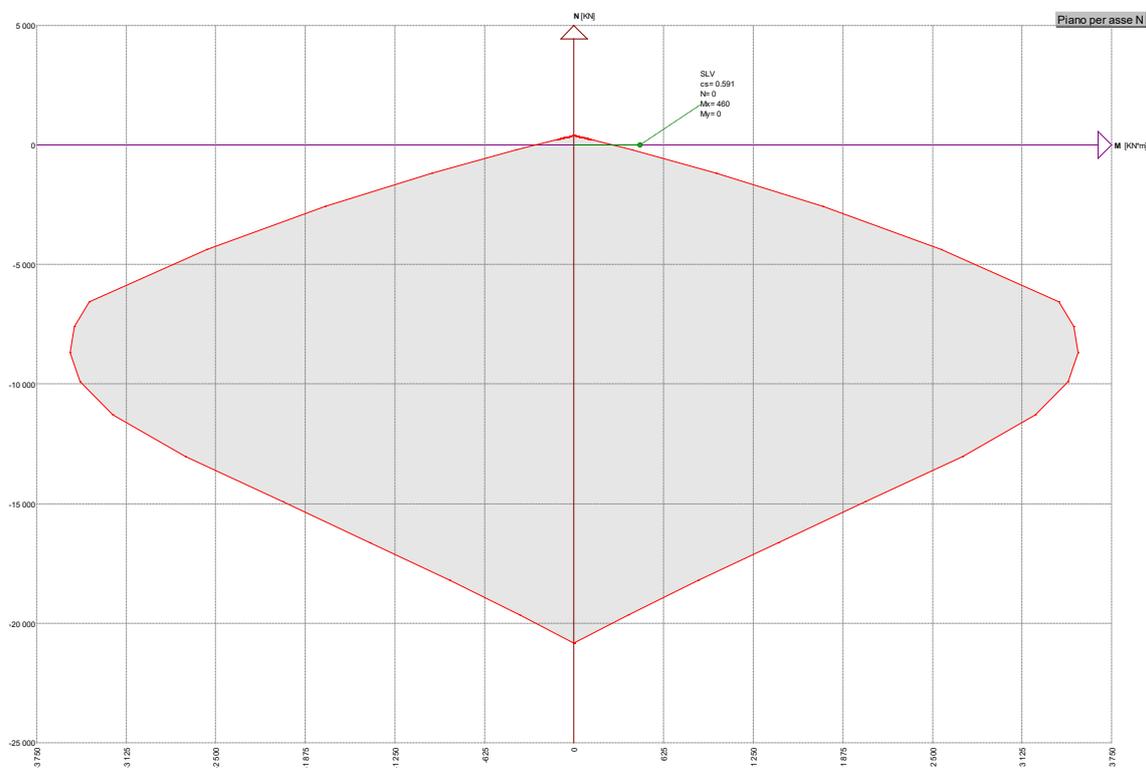


Figure 14-5: Dominio di rottura M-N della sezione del solettone

La verifica a flessione del solettone risulta non soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a $CS = 0.59$.

La sezione ha una resistenza a taglio pari a $V_{Rd} = 407$ kN, senza contare eventuale armatura a taglio, quindi anche la verifica a taglio è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a $CS = 1.22$.

Diaframma frontale

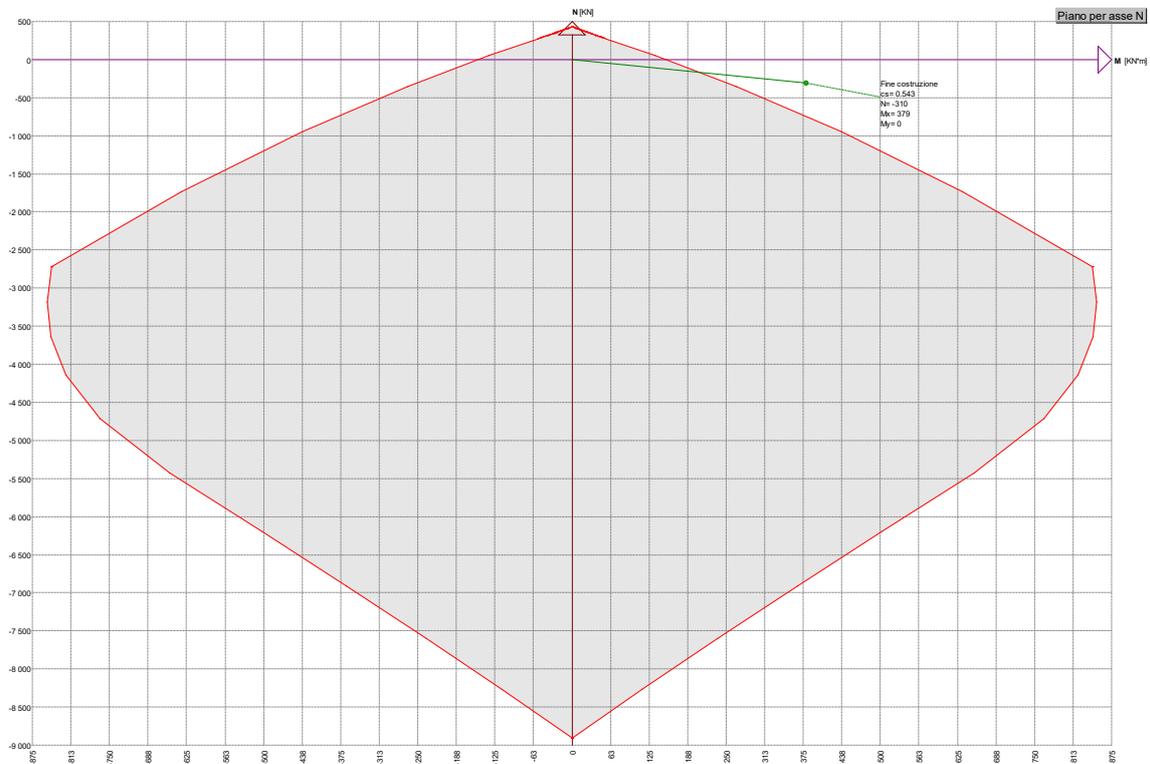


Figure 14-6: Dominio di rottura M-N della sezione del diaframma frontale

La verifica a flessione del diaframma frontale risulta non soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a $CS = 0.54$.

La sezione ha una resistenza a taglio pari a $V_{Rd} = 267$ kN, senza contare eventuale armatura a taglio, quindi anche la verifica a taglio è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a $CS = 1.74$.

14.2.2. Verifiche sismiche (SLV) a lungo termine

Le verifiche sismiche a lungo termine devono tener conto della corrosione delle barre di calcestruzzo che può avvenire durante la vita utile della struttura (50 anni) a causa della carbonatazione.

La velocità di corrosione delle barre si può stimare attraverso il grafico riportato di seguito (P. Pedferri, L. Bertolini, *La durabilità del calcestruzzo armato*, ISBN 88 386 0845-Ed. Mc Graw-Hill, 2000).

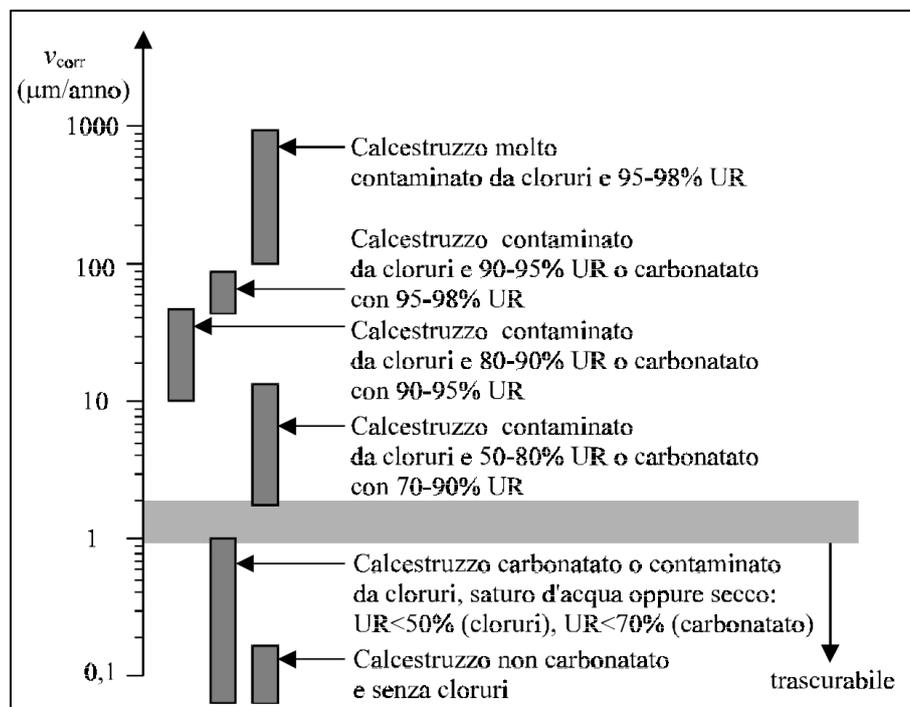


Figura 14.3: Indicazioni approssimate della velocità di corrosione al variare delle condizioni ambientali e del tipo di calcestruzzo secondo Pedferri

Per la struttura in oggetto si può stimare una riduzione del diametro delle barre di circa 2 mm a 50 anni.

Verifiche a flessione e a taglio

Le verifiche a flessione e taglio delle sezioni sono condotte con il software ENG-PRELIM nelle stesse condizioni esposte per le verifiche sismiche a breve termine.

Di seguito sono riportati i risultati delle verifiche a flessione effettuate sulle sezioni considerate.

Base del muro

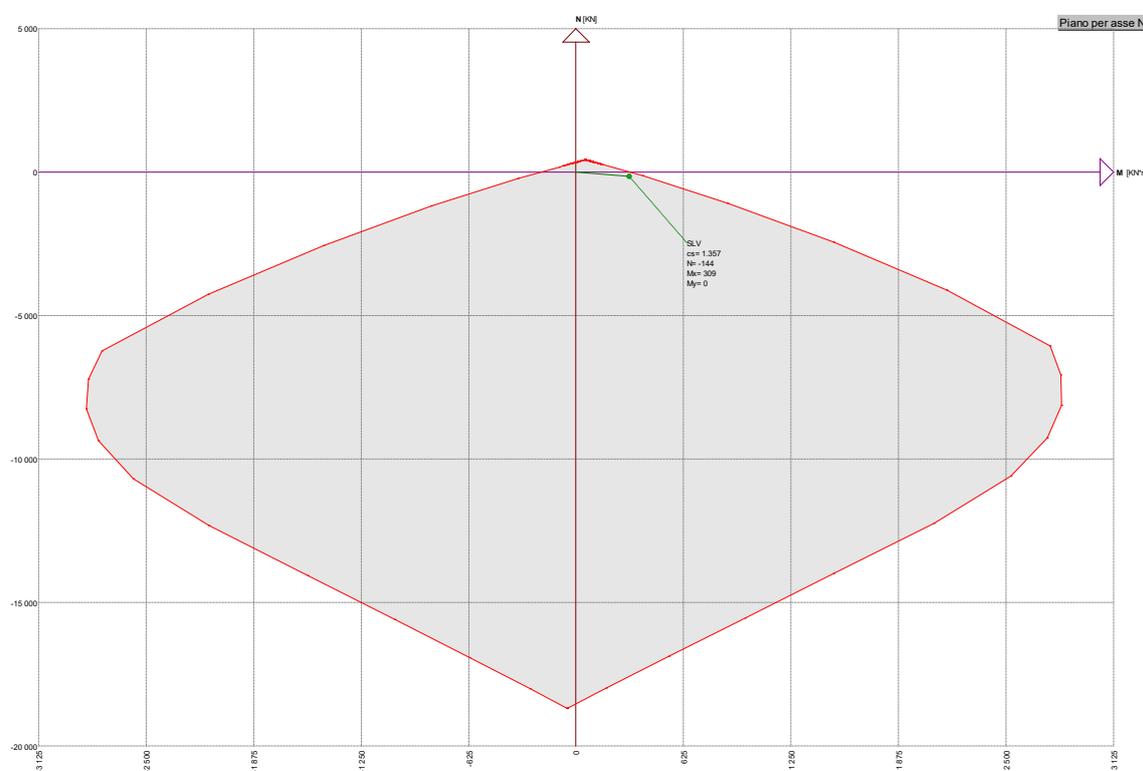


Figure 14-7: Dominio di rottura M-N della sezione alla base del muro d'elevazione

La verifica a flessione della base del muro risulta soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a $CS = 1.36$.

La sezione ha una resistenza a taglio pari a $V_{Rd} = 382$ kN, senza contare eventuale armatura a taglio, quindi anche la verifica a taglio è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a $CS = 3.41$.

Solettone

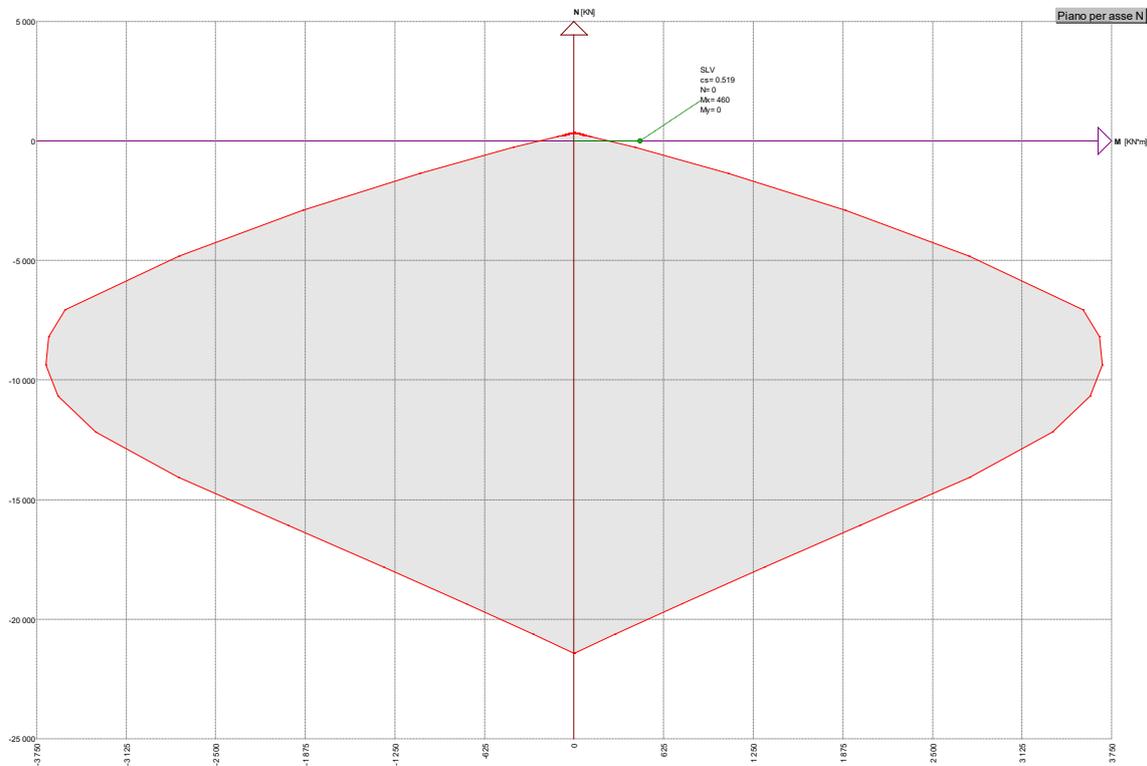


Figure 14-8: Dominio di rottura M-N della sezione del solettone

La verifica a flessione del solettone risulta non soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a $CS = 0.52$.

La sezione ha una resistenza a taglio pari a $V_{Rd} = 407$ kN, senza contare eventuale armatura a taglio, quindi anche la verifica a taglio è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a $CS = 1.23$.

Diaframma frontale

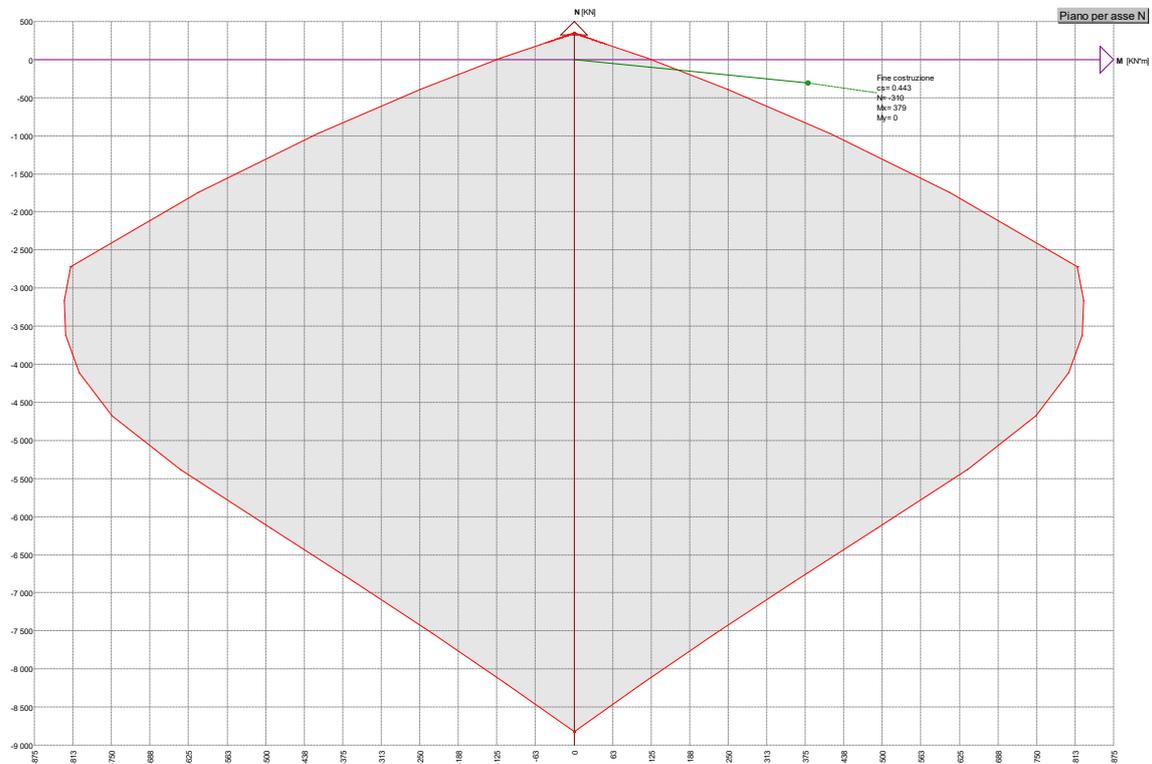


Figure 14-9: Dominio di rottura M-N della sezione del diaframma frontale

La verifica a flessione del diaframma frontale risulta non soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a $CS = 0.44$.

La sezione ha una resistenza a taglio pari a $V_{Rd} = 267$ kN, senza contare eventuale armatura a taglio, quindi anche la verifica a taglio è soddisfatta con un coefficiente di sicurezza pari a $CS = 1.74$.

14.2.3. Verifiche di stabilità globale

Il coefficiente di sicurezza sui parametri geotecnici riscontrato in fase sismica (SLV) è pari a $FS = 1.41 > 1.10$.

15. PROPOSTA TECNICA DI ADEGUAMENTO SISMICO DELL'OPERA

Dalle verifiche sismiche condotte con le norme NTC 2018 e riportate nei capitoli precedenti del presente documento, si evince che le strutture attuali della vasca di dissipazione non risultano adeguate. Nello specifico non risultano soddisfatte le verifiche strutturali dei diaframmi frontali e del solettone di collegamento posto in testa ai diaframmi.

Nel presente capitolo si propone una soluzione tecnica preliminare d'adeguamento sismico dell'intera struttura, che tenga anche in considerazione delle possibili cause sull'origine dei dissesti avvenuti a partire dal 2013 e che hanno portato al crollo di porzioni del muro in elevazione. La soluzione d'adeguamento sismico non può prescindere dalle cause che hanno determinato i crolli di porzioni di muro della vasca, perché tali crolli non sono avvenuti in occasione di eventi sismici che sarebbero stati, infatti, regolarmente registrati in quei giorni.

In Figura 15-1 si riporta la sezione tipo esistente del muro perimetrale fondato su diaframmi della vasca, con indicazione dei vari elementi strutturali.

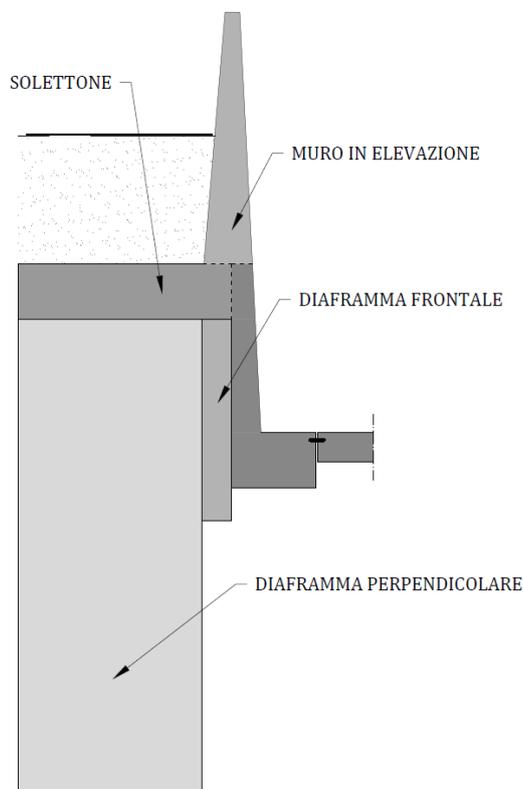


Figura 15-1: Diga di Gibbesi - Vasca di dissipazione – Sezione tipo del muro perimetrale esistente fondato su diaframmi

Le soluzioni d'adeguamento proposte sono riportate in Figura 15-2 e Figura 15-3.

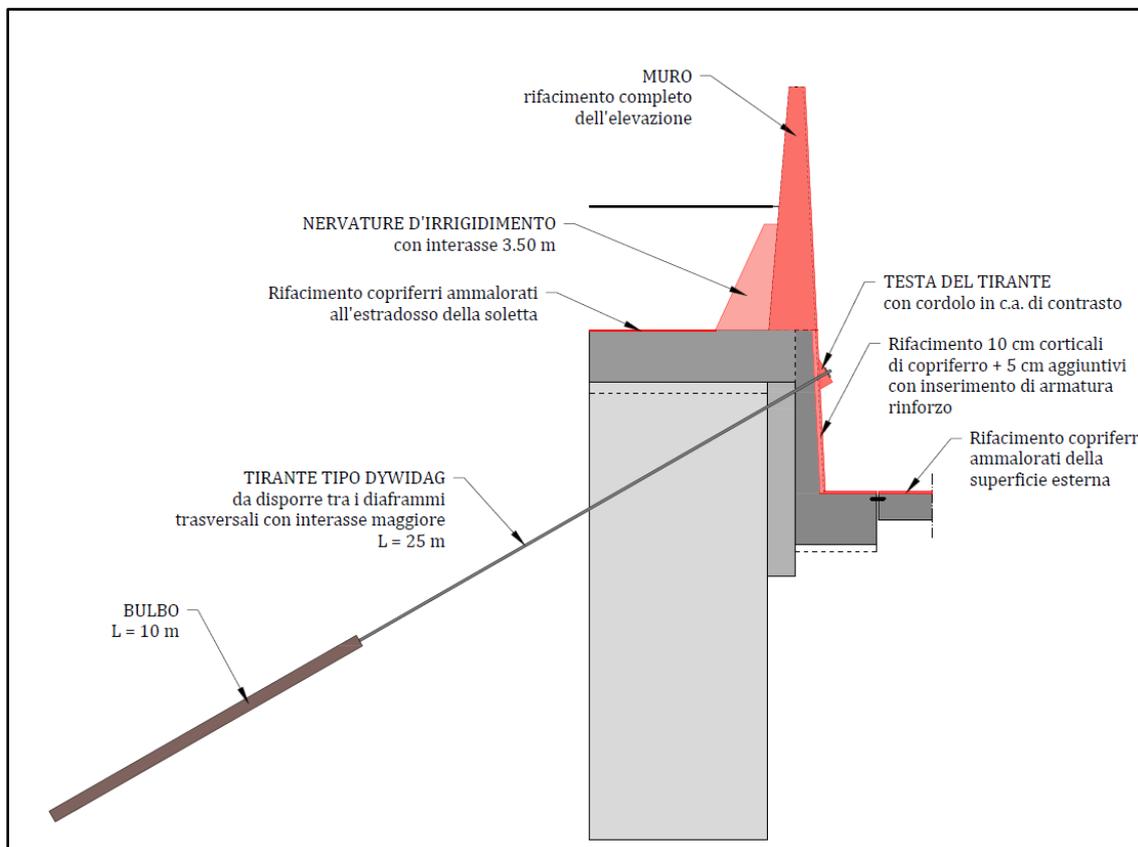


Figura 15-2: Diga di Gibbesi - Vasca di dissipazione – Intervento di messa in sicurezza sismica delle strutture perimetrali di contenimento delle terre fondate sui diaframmi

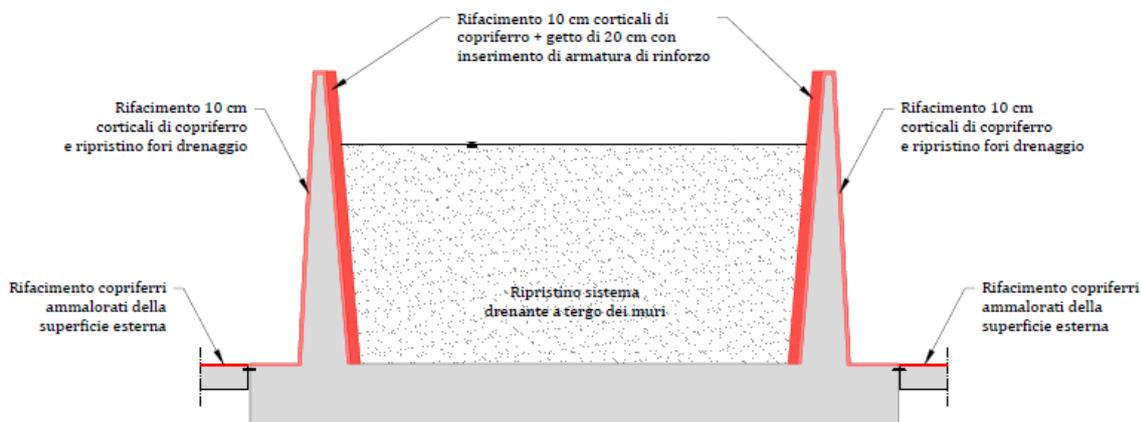


Figura 15-3: Diga di Gibbesi - Vasca di dissipazione – Intervento di messa in sicurezza sismica delle strutture interne di contenimento delle terre

Per la messa in sicurezza sismica del solettone posto in testa ai diaframmi e ai diaframmi frontali, si propone di ancorare la struttura con un sistema di tiranti tipo Dywidag. Per la tipologia di tirante previsto si veda Figura 15-4.

Per quanto riguarda il muro di contenimento sommitale non si sono riscontrati problemi di vulnerabilità sismica, ma si propone il suo rifacimento, perché sussiste notevole incertezza sul reale grado d'incastro tra lo stesso e il solettone orizzontale posta in testa ai diaframmi di fondazione. L'indeterminazione legata al collegamento tra muro in elevazione e solettone orizzontale è legata all'impossibilità di determinarne, con assoluta certezza, la causa che ha provocato il crollo avvenuto a partire dal 2013 e che ha coinvolto alcune porzioni di paramento verticale dei muri di sostegno. Le possibili cause possono essere, infatti, legate ad eventi naturali, (eventi atmosferici imprevedibili), o alle fasi costruttive (dettagli costruttivi non realizzati a regola d'arte) ma anche ad entrambe.

Tra le cause naturali che possono aver portato al crollo di porzioni di muro esistente, possono esserci eventi atmosferici imprevedibili, che hanno indotto carichi eccezionali sulle strutture. Ad esempio, un improvviso carico idraulico a tergo del muro, tra la quota del terreno e la quota della testa muro, come se si fosse creato un canale naturale di scarico di precipitazioni eccezionali.

Tra le possibili cause legate alle fasi costruttive che possono aver portato al crollo di porzioni di muro esistenti possono esserci scarse lunghezze di sovrapposizione tra le barre d'armature in corrispondenza delle riprese di getto tra soletta orizzontale ed elevazione.

15.1. Adeguamento sismico della vasca

Per l'adeguamento sismico delle strutture esterne lato terra della vasca, quelle fondate su diaframmi, si veda Figura 15-2 e Figura 15-3, come intervento d'adeguamento sismico e come intervento di ripristino strutturale, si propone:

- rifacimento del muro in elevazione fondato sul solettone orizzontale, che dovrà prevedere, lato terra, l'aggiunta di nervature costituite da setti in c.a. poste a interasse di 3.5 m;
- getto di 10+5 cm di calcestruzzo armato sul lato interno della vasca per protezione armature esistenti e per rinforzo strutturale, da realizzarsi tra la quota d'estradosso del solettone e la quota di fondo vasca (10 cm corticali di copriferro della struttura esistente + 5 cm aggiuntivi);

- realizzazione di tiranti per la messa in sicurezza strutturale dei diaframmi anteriori e del solettone, (si veda Figura 15-4). Si prevedono tiranti, inclinati di 30° sull'orizzontale, da applicare sulle pareti interne della vasca. Si prevede la realizzazione una fila orizzontale di tiranti, costituiti da barre tipo Dywidag da 32 mm, con almeno un tirante da disporsi tra due diaframmi trasversali adiacenti (indicativamente solo tra diaframmi trasversali posti ad interasse maggiore di 5.00 m). I tiranti dovranno avere lunghezze totali di 25 m, con bulbo da 10 m;
- rifacimento dei copriferri nelle zone ammalorate della superficie d'estradosso del solettone posto in testa ai diaframmi e della superficie d'estradosso della soletta del fondo vasca.

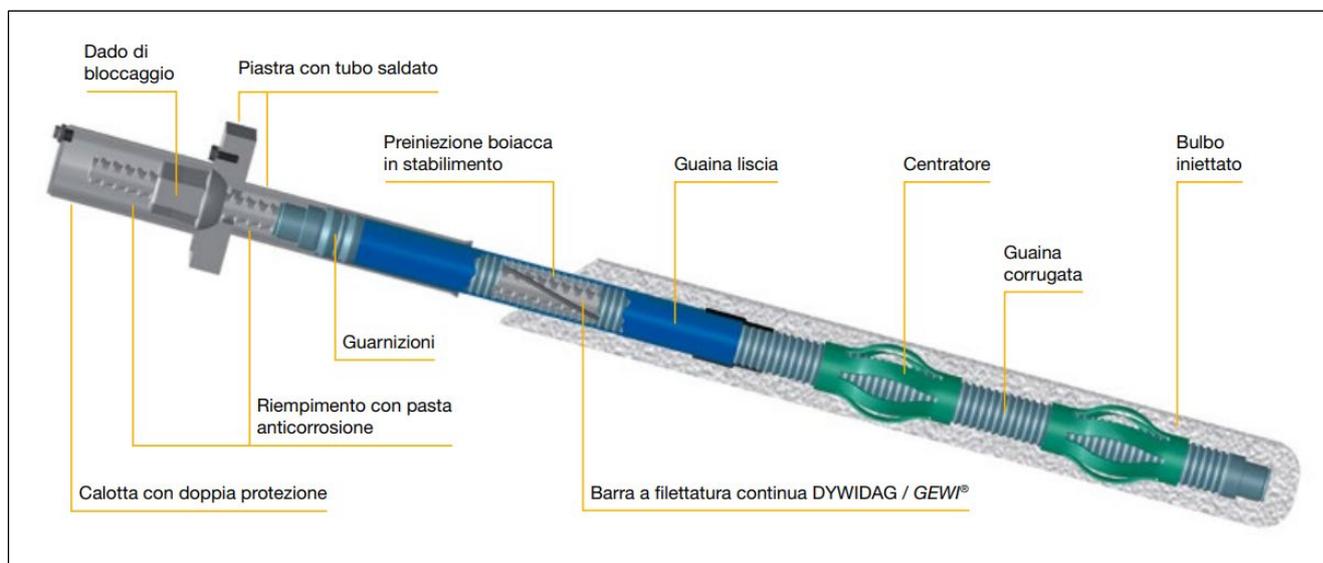


Figura 15-4: Diga di Gibbesi - Vasca di dissipazione – Tirante tipo Dywidag

Per l'adeguamento sismico delle pareti interne della vasca, si veda Figura 15-3, come intervento d'adeguamento sismico si propone:

- getto di 10+20 cm di calcestruzzo armato per protezione armature esistenti e per rinforzo strutturale, da realizzarsi per il paramento lato terra del muro in elevazione (10 cm corticali di copriferro della struttura esistente + 20 cm aggiuntivi);
- rifacimento dei copriferri nelle zone ammalorate della superficie del paramento lato vasca del muro in elevazione.



DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

II122F-A-STR-RT-001-00

**RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO**

Pag. 74 di 75

16. STIMA ECONOMICA DELL'INTERVENTO PROPOSTO PER LA MESSA IN SICUREZZA SISMICA DELL'OPERA

Si riporta, di seguito, la stima economica dell'intervento proposto e descritto riportato nel precedente capitolo, per la messa in sicurezza sismica della vasca di dissipazione della diga di Gibbesi.

A) Rifacimento muro in elevazione in c.a. dell'opera di contenimento perimetrale della vasca (opera costituita da muri fondati su diaframmi)

- Scavo per rimozione del terreno a tergo del muro esistente
- Demolizione muro esistente e conferimento a discarica con relativi oneri
- Inghisaggio barre di collegamento tra nuovo muro in c.a. e solettone esistente
- Noleggio ponteggi
- Realizzazione nuovo muro in c.a.
- Ripristino quota terreno con rinterro a tergo del nuovo muro in c.a.

Totale A) € 2,050,000.00

B) Rimozione del terreno depositatosi nella vasca di dissipazione

- Scavo per rimozione degli interrimenti nella vasca
- Conferimento a discarica materiali depositatisi in vasca con relativi oneri

Totale A) € 100,000.00

Nota: La stima fornita per la rimozione del terreno depositatosi nella vasca di dissipazione è da considerare di prima approssimazione, perché solo a valle della corretta analisi sul quantitativo effettivo di materiale di interrimento presente, in vasca e sullo stato di qualità chimico-fisica del materiale di interrimento, sarà possibile esprimere un importo economico attendibile.

C) Rinforzo della parte corticale della parete in c.a. disposta tra la base del muro d'elevazione e il fondo della vasca dell'opera di contenimento perimetrale della vasca (opera costituita da muri fondati su diaframmi)

- Demolizione parte corticale per rifacimento copriferrì e rinforzo strutturale
- Inghisaggio barre di collegamento tra nuova struttura corticale ed esistente
- Noleggio ponteggi
- Realizzazione nuova struttura corticale in c.a.

Totale B) € 300,000.00

D) Tiranti di rinforzo/ancoraggio sismico della opera in c.a. di contenimento perimetrale della vasca (opera costituita da muri fondati su diaframmi)



DIGA GIBBESI
RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE OPERE ACCESSORIE
VASCA DI DISSIPAZIONE

II122F-A-STR-RT-001-00

**RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE E STUDIO DI FATTIBILITA'
TECNICO-ECONOMICA DEGLI INTERVENTI D'ADEGUAMENTO**

Pag. 75 di 75

- Cordoli di ripartizione tiranti
- Realizzazione tiranti

Totale C) € 600,000.00

E) Ripristino copriferro ammalorato per le superfici d'estradosso della soletta orizzontale in c.a. interna della vasca e del solettone in c.a. esterno posto in testa ai diaframmi (opera costituita da muri fondati su diaframmi)

- Demolizione parte corticale per rifacimento copriferri
- Conferimento a discarica delle demolizioni
- Oneri di conferimento
- Ripristino del copriferro per le parti ammalorate

Totale B) € 250,000.00

F) Rinforzo della parte corticale della parete in c.a. costituente i muri in elevazione in c.a. nella parte centrale a inizio vasca

- Scavo per rimozione del terreno tra i muri
- Demolizione parte corticale per rifacimento copriferri e rinforzo strutturale
- Noleggio ponteggi
- Inghisaggio barre di collegamento tra nuova struttura corticale ed esistente
- Realizzazione nuova struttura corticale in c.a.
- Ripristino rinterro tra i muri

Totale A) € 1,400,000.00

G) Ripristino copriferro ammalorato per le superfici delle pareti in c.a. costituente i muri in elevazione in c.a. nella parte centrale a fine vasca

- Demolizione parte corticale per rifacimento dei copriferri
- Conferimento a discarica delle demolizioni
- Oneri di conferimento
- Ripristino del copriferro per le parti ammalorate

Totale A) € 180,000.00

TOTALE STIMA € 4,880,000.00

(Totale stima: euro QUATTROMILIONIOTTOCENTOTTANTAMILA/00)