# AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA
## PORTO DI VADO LIGURE

**PROJECT FINANCING PER:**

**PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA, ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE DEL PORTO DI VADO LIGURE E GESTIONE DELLA PARTE RELATIVA AL TERMINAL CONTENITORI**

SOCIETÀ DI PROGETTO: APM TERMINALS VADO LIGURE S.p.A.

MAERSK | CLF GRANDI LAVORI FINCOSIT

PROGETTAZIONE:

TECHNITAL S.p.A.

IL RESPONSABILE:

Dott. Ing. Guido Fiorini

# PERIZIA DI VARIANTE

ELABORATO N° :

TITOLO ELABORATO

## NUOVA DIGA FORANEA 1A FASE
## GEOTECNICA
## VERIFICHE GEOTECNICHE

MI0102-PV-D-G-R-001-00

| DATA | ELABORATO | CONTROLLATO | APPROVATO |
|---|---|---|---|
| Dicembre 2015 | F. CANEPARO | F. CARNEVALE | G. FIORINI |

| REVISIONE N° | DATA | DESCRIZIONE |
|---|---|---|
| 00 | Dicembre 2015 | EMISSIONE PER APPROVAZIONE |
| | | |
| | | |
| | | |

NOME FILE

MI0102-PV-D-G-R-001-00.docx

A TERMINE DI LEGGE CI RISERVIAMO LA PROPRIETA' DI QUESTO ELABORATO CON DIVIETO DI RIPRODURLO RENDENDOLO NOTO A TERZI ANCHE PARZIALMENTE SENZA NOSTRA AUTORIZZAZIONE

# AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA

## PORTO DI VADO LIGURE

## PROJECT FINANCING PER:

## PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA, ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE DEL PORTO DI VADO LIGURE E GESTIONE DELLA PARTE RELATIVA AL TERMINAL CONTENITORI

## PERIZIA DI VARIANTE

## NUOVA DIGA FORANEA 1A FASE
## VERIFICHE GEOTECNICHE

# INDICE

1. PREMESSA 7
2. DESCRIZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO 8
2.1. Opera di difesa composita con parete in cassoni cellulari 9
2.2. Opera di difesa composita con cassoni protetti da scogliera 12
3. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO 14
4. VERIFICHE NORMATIVE 15
4.1. Combinazione delle azioni 15
4.2. Coefficienti di sicurezza parziali 16
5. CARICHI AGENTI 18
5.1. Cassoni tipo A 18
5.2. Cassoni tipo B 19
5.3. Cassoni tipo C 20
5.4. Cassoni tipo D/E 20
5.5. Azione sismica 21
6. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA 25
7. ANALISI SVOLTE 27
7.1. Cassoni tipo A - risultati 29
7.1.1. Cedimenti 29
7.1.1. Stabilità 35
7.2. Cassone tipo B - Risultati 43
7.2.1. Stabilità 43
7.3. Cassoni tipo C - risultati 47
7.3.1. Cedimenti 47
7.3.2. Stabilità 52
7.4. Cassoni tipo E - risultati 57
7.4.1. Cedimenti 57
7.4.2. Stabilità 61
8. CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI 68

# ELENCO FIGURE

Fig. 2-1 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Planimetria delle opere 9
Fig. 2-2 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Sezione cassone tipo C 10
Fig. 2-3 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Sezione cassone tipo D 11
Fig. 2-4 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Sezione cassone tipo E 11
Fig. 2-5 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Sezione cassone tipo A 12
Fig. 2-6 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Sezione cassone tipo B 13
Fig. 7-1 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Geometria modello Plaxis 29
Fig. 7-2 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo A – Cedimento costruzione diga in tv 31
Fig. 7-3 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo A – Cedimento a lungo termine 31
Fig. 7-4 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo A – Cedimento lungo termine trasversale 32
Fig. 7-5 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo A – Spostamenti orizzontali per cavo e cresta d'onda 33
Fig. 7-6 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo A – Spostamenti orizzontali per cavo e cresta d'onda con muro paraonde 34
Fig. 7-7 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo A – Stabilità e Capacità portante posa cassone 36
Fig. 7-8 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo A – Stabilita' e capacita' portante in esercizio con cavo 37
Fig. 7-9 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo A – Stabilita' e capacita' portante in esercizio con cresta 38
Fig. 7-10 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo A – Stabilita' e capacita' portante in esercizio con cavo con muro 39
Fig. 7-11 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo A – Stabilita' e capacita' portante in esercizio con cresta con muro 40
Fig. 7-12 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo A – Stabilita' e capacita' portante in esercizio con sisma 41
Fig. 7-13 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo A – Stabilita' e capacita' portante in esercizio con sisma con muro 42
Fig. 7-14 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo B – Stabilita' e capacita' portante in esercizio con cavo 44
Fig. 7-15 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo B – Stabilita' e capacita' portante in esercizio con cresta 45

Fig. 7-16 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo B – Stabilita' e capacita' portante in esercizio con sisma 46
Fig. 7-17 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo C – Cedimento costruzione rilevato e a lungo termine 48
Fig. 7-18 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo C – Cedimento muro paraonde 49
Fig. 7-19 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo C – Cedimento a lungo termine trasversale 50
Fig. 7-20 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo C – Spostamenti orizzontali per cavo e cresta d'onda 51
Fig. 7-21 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo C – Stabilita' e Capacità portante posa cassone 53
Fig. 7-22 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo C – Stabilita' e capacita' portante in esercizio con cavo 54
Fig. 7-23 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo C – Stabilita' e capacita' portante in esercizio con cresta 55
Fig. 7-24 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo C – Stabilita' e capacita' portante in esercizio con sisma 56
Fig. 7-25 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo E – Cedimento costruzione diga in tv 58
Fig. 7-26 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo E – Cedimento a lungo termine 59
Fig. 7-27 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo E – Cedimento muro paraonde 59
Fig. 7-28 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo E – Spostamenti orizzontali per cavo e cresta d'onda 60
Fig. 7-29 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo E – Cedimento lungo termine trasversale 61
Fig. 7-30 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo E – Stabilità fase temporanea 62
Fig. 7-31 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo E – Stabilita' posa cassone 63
Fig. 7-32 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo E – Stabilita' e capacita' portante in esercizio con cavo 64
Fig. 7-33 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo E – Stabilita' e capacita' portante in esercizio con cresta 65
Fig. 7-34 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassone tipo E – Stabilità e capacità portante in esercizio con sisma 66

# ELENCO TABELLE

Tab. 4-1 - Vado Ligure – Nuova Diga Foranea - Coefficienti di sicurezza parziale lato parametri del terreno 16
Tab. 4-2 - Vado Ligure - Nuova Diga Foranea – Coefficienti di sicurezza parziale lato azioni 17
Tab. 4-3 - Vado Ligure - Nuova Diga Foranea - Coefficienti di sicurezza parziali lato resistenze - caso opere di sostegno 17
Tab. 5-1 – Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassoni tipo A – analisi dei carichi 18
Tab. 5-2 – Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassoni tipo B – analisi dei carichi 19
Tab. 5-3 – Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassoni tipo C – analisi dei carichi 20
Tab. 5-4 – Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Cassoni tipo D/E – analisi dei carichi 20
Tab. 6-1 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Stratigrafia media 25
Tab. 6-2 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Caratterizzazione geotecnica 26
Tab. 7-1 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Sintesi fattori di sicurezza – Cassone A 43
Tab. 7-2 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Sintesi fattori di sicurezza – Cassone B 47
Tab. 7-3 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Sintesi fattori di sicurezza – Cassone C 57
Tab. 7-4 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Sintesi fattori di sicurezza – Cassone E 67
Tab. 8-1 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Sintesi cedimenti 68
Tab. 8-2 Vado Ligure – Nuova Diga Foranea – Sintesi fattori di sicurezza 70

# 1. PREMESSA

Nell'ambito del progetto della Nuova Piattaforma Multifunzionale, è prevista la realizzazione della Nuova Diga Foranea, che si innesterà a partire da quella esistente, che verrà in parte smantellata.

La Nuova Diga è costituita da un rilevato in tout-venant che rappresenterà l'imbasamento per i cassoni cellulari.

La presente relazione presenta le analisi geotecniche relative alla Diga, ossia verifiche di stabilità globale, capacità portante, nonché i cedimenti. Questo sia durante le fasi costruttive che di esercizio della diga.

## 2. DESCRIZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO

La seguente Fig. 2-1 riporta la planimetria dell'opera in oggetto. La nuova Diga Foranea andrà ad innestarsi lungo il lato mare della Diga Foranea esistente.
Questa sarà costituita da un rilevato in tout-venant realizzato direttamente su un fondale compreso tra circa -40 m e -47 m m.l.m.
Il rilevato costituirà l'imbasamento per i cassoni della diga, che risultano suddivisi in 5 categorie, da A ad E, per un totale di 15 cassoni. In particolare si hanno:

- 3 cassoni tipo A
- 1 cassone tipo B
- 8 cassoni tipo D
- 2 cassoni tipo C
- 1 cassone tipo E

Le quote di imbasamento dei diversi cassoni variano tra -15.5 m e -25.5 m l.m.m., pertanto lo spessore della diga in terra potrà variare tra circa 20 m e 30 m.
Lungo la diga si possono individuare due diverse tipologie di sezione:

- Cassoni A e B
- Cassoni C, D ed E.

Per i primi l'opera di difesa è infatti costituita da cassoni protetti totalmente o in parte da scogliera, mentre nel secondo caso invece sarà costituita da una parete di cassoni cellulari.
In aggiunta, saranno presenti delle serraglie in cls, come raccordo tra i cassoni A e B e tra il primo cassone A ed il cassone della diga esistente.

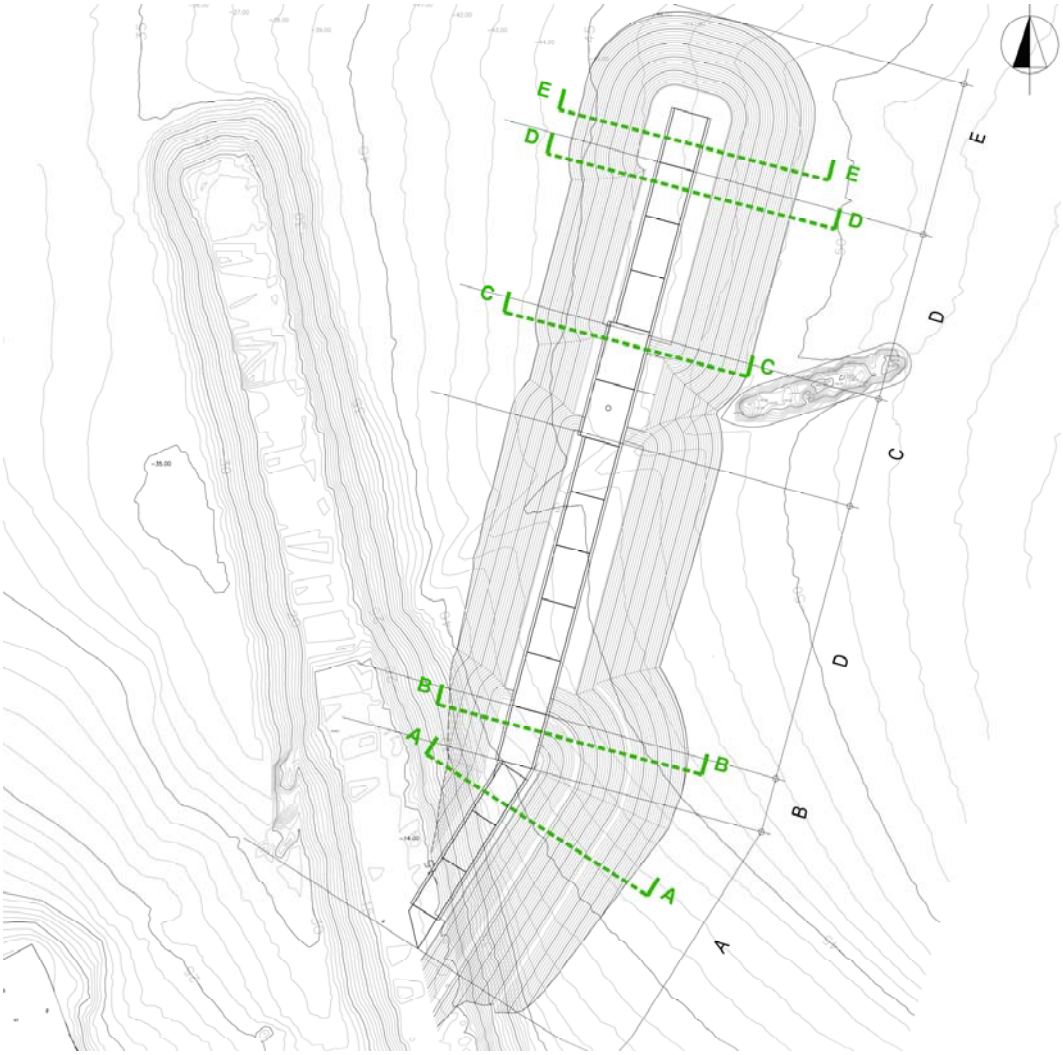



FIG. 2-1 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – PLANIMETRIA DELLE OPERE

## 2.1. Opera di difesa composita con parete in cassoni cellulari

Fanno parte di questa tipologia i cassoni tipo C, D, E e parte del cassone tipo B. Quest'ultimo in fase temporanea sarà infatti interessato per parte della sua lunghezza dalla scogliera, salpata completamente invece nel lungo termine. Nelle seguenti Fig. 2-2, Fig. 2-3 e Fig. 2-4, si riporta la sezione tipo di ciascuna tipologia di cassoni.

Si osserva pertanto che il cassone tipo C risulta essere quello imbasato alla profondità maggiore, -25.5 m l.m.m., avendo dimensioni in pianta di 25 x 32 m. Esso è pertanto il cassone che scarica il peso maggiore in fondazione.

Il cassone tipo D risulta imbasato alla -19.5 m l.m.m. con dimensioni in pianta 22 x 30.2 m.

Infine il cassone tipo E, che risulta il cassone frontale, sul fondale più profondo, è anch'esso imbasato alla quota -19.5 m l.m.m., con dimensioni in pianta di 22 x 30.2 m.

Questo cassone risulta essere quello su fondali maggiori e quindi potenzialmente più critico per la stabilità, assieme al cassone tipo C.

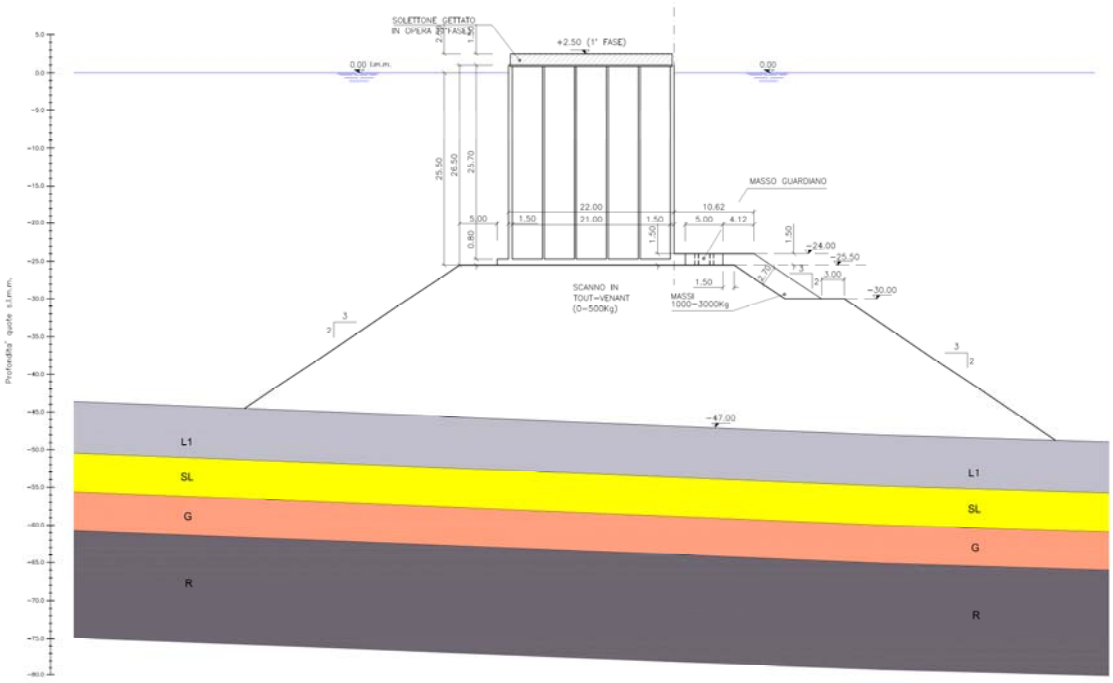



FIG. 2-2 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – SEZIONE CASSONE TIPO C

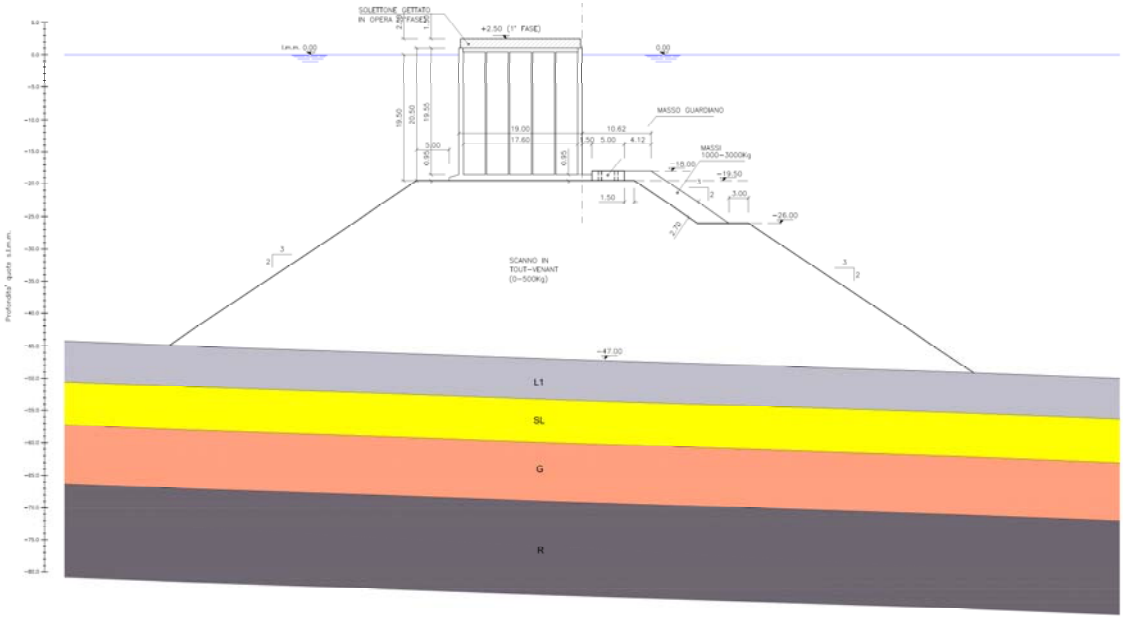



FIG. 2-3 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – SEZIONE CASSONE TIPO D

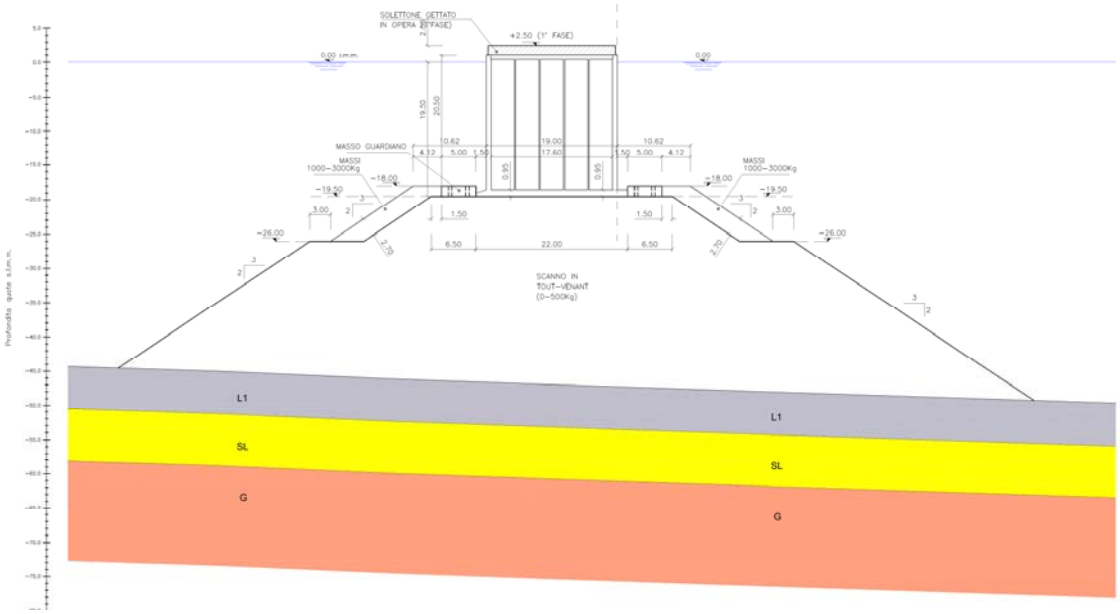



FIG. 2-4 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – SEZIONE CASSONE TIPO E

## 2.2. Opera di difesa composita con cassoni protetti da scogliera

Fanno parte di questa tipologia i cassoni tipo A e parte del cassone tipo B, Fig. 2-5 e Fig. 2-6. Questi cassoni sono entrambi imbasati alla -15.5 m l.m.m., ma differiscono come dimensioni. Il cassone tipo A è infatti più stretto, con dimensioni in pianta 18.2 x 30 m, mentre il cassone tipo B ha dimensioni 22 x 30.2 m. Il cassone tipo B, come riscontrabile dagli elaborati grafici di progetto, non è protetto dalla scogliera per tutta la sua larghezza (30.2 m), tuttavia ai fini delle analisi dei cedimenti a favore di sicurezza si considera come sezione di calcolo quella in Fig. 2-6, ossia comprensiva di scogliera. Nel lungo termine per il cassone tipo B invece la scogliera sarà salpata pertanto le verifiche di stabilità di esercizio si riferiranno a questa condizione.

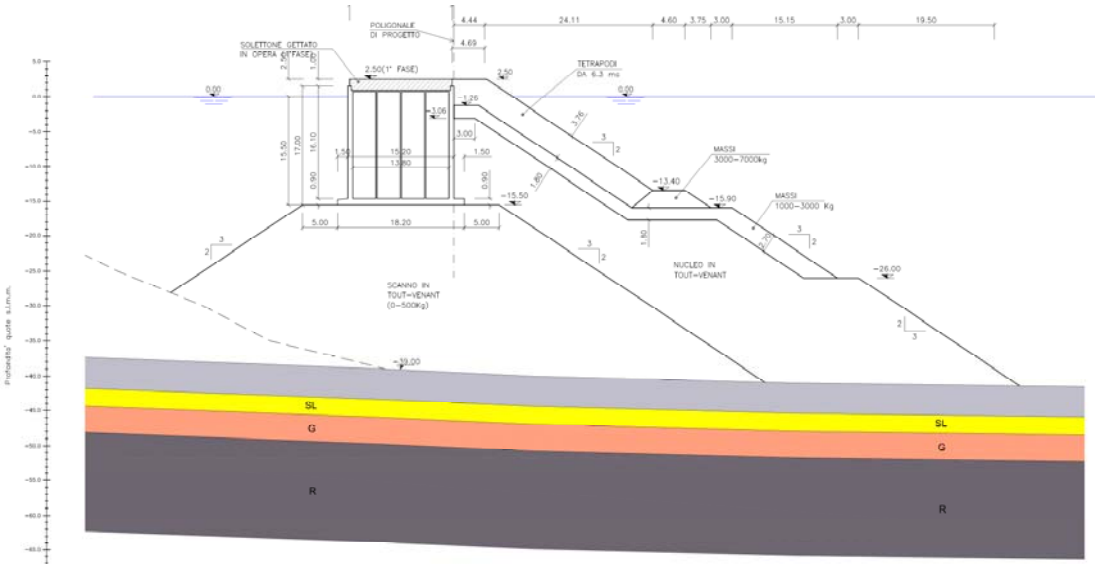



FIG. 2-5 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – SEZIONE CASSONE TIPO A

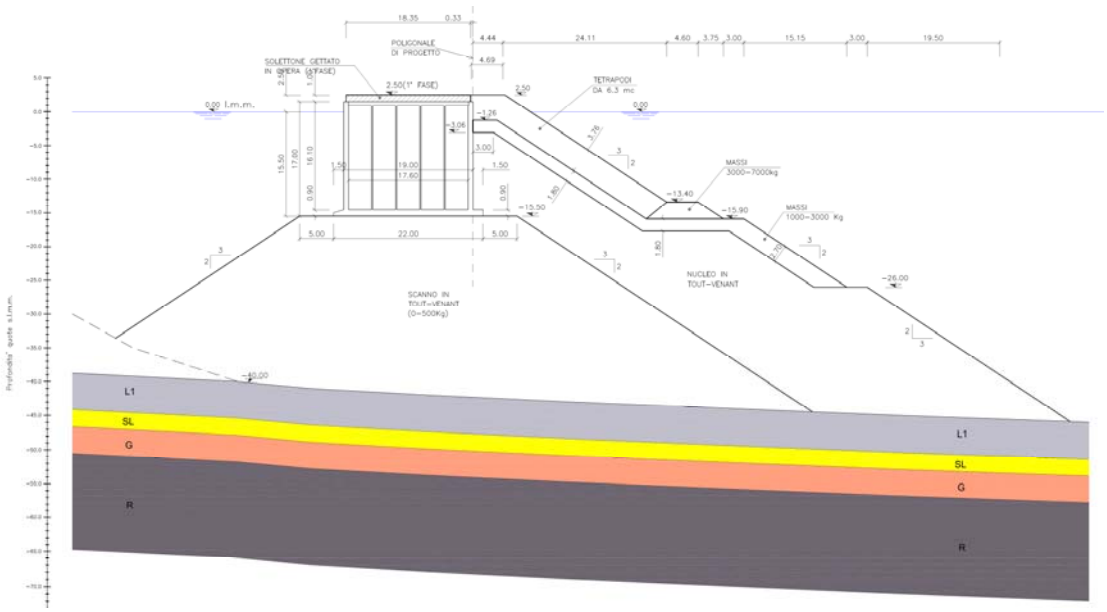



FIG. 2-6 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – SEZIONE CASSONE TIPO B

## 3. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Sono di seguito presentati i documenti di riferimento e le fonti da cui sono state attinte informazioni geotecniche complementari alle indagini geognostiche di stretta pertinenza della Nuova Diga Foranea:

[1] Progetto Definitivo della Nuova Piastra Multifunzionale del Porto di Vado Ligure – Technital S.p.A.

[2] Progetto Esecutivo Fase 1 e Fase 2 della Nuova Piastra Multifunzionale del Porto di Vado Ligure – Technital S.p.A.

[3] Norme Tecniche per le costruzioni di cui al DM 14/01/2008

[4] Istruzioni per l'applicazione delle Nuove Tecniche per le costruzioni di cui al DM 14/01/2008, Circolare del 2/2/2009

[5] Gstabl72, Gregory Geotechnical Software, USA

[6] PLAXIS 2D AE. "Plaxis – Finite Element Code for Soil and Rock Analyses", Netherland.

# 4. VERIFICHE NORMATIVE

Le verifiche sono state condotte con riferimento al DM 14 gennaio 2008, utilizzando pertanto il metodo semiprobabilistico agli stati limite, applicando direttamente ai valori caratteristici di azioni e resistenze dei coefficienti di sicurezza parziali, così da ottenerne i corrispondenti valori di progetto. Pertanto le verifiche di sicurezza sono soddisfatte se le resistenze di progetto sono maggiori dell'azione di progetto:

$$R_d \geq F_d$$

Sono quindi state svolte verifiche a stato limite di esercizio (SLE) e stato limite ultimo (SLU) sia in condizioni statiche che sismiche.
Tali verifiche sono state svolte sia durante le varie fasi costruttive più critiche, realizzazione diga in tout-venant e posa cassone, sia in fase di esercizio, in presenza dei carichi d'onda o del sisma. Durante le varie fasi costruttive si è pertanto verificata la stabilità globale, mentre in fase di esercizio si è verificata sia la stabilità globale che la capacità portante dei cassoni.
Si sono quindi valutati i cedimenti relativi allo stato limite di esercizio, sia durante le fasi costruttive che in quelle di esercizio.

## 4.1. Combinazione delle azioni

I valori di progetto delle azioni si sono determinati combinandoli nei seguenti modi:

- Combinazione fondamentale SLU

$$F_d = \sum_{j\geq 1} \gamma_{Gj} G_{Kj} + \gamma_{Q1} Q_{K1} + \sum_{i\geq 2} \gamma_{Qi} \psi_{0i} Q_{Ki}$$

- Combinazione sismica sia per SLE che SLU

$$F_d = \sum_{j\geq 1} G_{Kj} + E + \sum_{i\geq 1} \psi_{2,i} Q_{Ki}$$

- Combinazione rara SLE

$$F_d = \sum_{j\geq 1} G_{Kj} + Q_{k1} + \sum_{i\geq 2} \psi_{0i} Q_{Ki}$$

La tabella seguente riporta i coefficienti di combinazione $\psi$ utilizzati.

| | $\Psi_{0i}$ | $\Psi_{1i}$ | $\Psi_{2i}$ |
|---|---|---|---|
| Onde | 0.6 | 0.2 | 0 |

## 4.2. Coefficienti di sicurezza parziali

Le verifiche che sono state condotte fanno riferimento alle seguenti combinazioni.

| VERIFICHE | Combinazione |
|---|---|
| Capacità portante | A1+M1+R3 (Approccio 2) |
| Stabilità globale | A2+M2+R2 |

Si sottolinea che in condizioni sismiche si applicano sempre i coefficienti M1, anche nel caso della stabilità globale.
Nella Tab. 4-1 che segue si riportano i coefficienti parziali lato resistenze del terreno, in accordo con la tab.6.2.II delle NTC2008.

TAB. 4-1 - VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA - COEFFICIENTI DI SICUREZZA PARZIALE LATO PARAMETRI DEL TERRENO

| Parametri | Grandezza | Coefficiente | M1 | M2 |
|---|---|---|---|---|
| Tangente dell'angolo di attrito | $\tan\varphi'_k$ | $\gamma_\phi$ | 1.0 | 1.25 |
| Coesione efficace | C' | $\gamma_c$ | 1.0 | 1.25 |
| Resistenza al taglio non drenata | Cu | $\gamma_{Cu}$ | 1.0 | 1.4 |
| Peso dell'unità di volume | $\gamma$ | $\gamma_\gamma$ | 1.0 | 1.0 |

In Tab. 4-2 si riportano i coefficienti parziali lato azioni, in accordo con la tab.6.2.I delle NTC2008.

TAB. 4-2 - VADO LIGURE - NUOVA DIGA FORANEA – COEFFICIENTI DI SICUREZZA PARZIALE LATO AZIONI

| Carichi | Effetto | Coefficiente | A1 | A2 |
|---|---|---|---|---|
| Permanenti | Favorevole | $\gamma_{G1}$ | 1.0 | 1.0 |
| | Sfavorevole | | 1.3 | 1.0 |
| Permanenti non strutturali | Favorevole | $\gamma_{G2}$ | 0.0 | 0.0 |
| | Sfavorevole | | 1.5 | 1.3 |
| Variabili | Favorevole | $\gamma_{Qi}$ | 0.0 | 0.0 |
| | Sfavorevole | | 1.5 | 1.3 |

Lato resistenze i coefficienti di sicurezza sono quelli riportati in Tab. 4-3, in accordo con la tab.6.5.I delle NTC2008 nel caso delle opere di sostegno.

TAB. 4-3 - VADO LIGURE - NUOVA DIGA FORANEA - COEFFICIENTI DI SICUREZZA PARZIALI LATO RESISTENZE - CASO OPERE DI SOSTEGNO

| **Verifica** | **Coefficiente Parziale** |
|---|---|
| | $\gamma_R$ |
| Capacità portante R3 | 1.4 |
| Stabilità globale R2 | 1.1 |

# 5. CARICHI AGENTI

Si riportano nel seguito i carichi relativi alle diverse tipologie di cassoni che verranno considerati nelle successive analisi di stabilità, capacità portante e cedimento.
I cassoni tipo A e B sono molto simili, avendo entrambi il rinfianco in terra lato mare. Tuttavia il cassone tipo A risulta più stretto ed ha inoltre una vita utile inferiore, 10 anni, contro i 50 anni dei restanti cassoni.
I cassoni tipo D ed E hanno le stesse dimensioni e quindi gli stessi carichi, tuttavia il cassone tipo E risulta essere quello più critico sia per i cedimenti che per la stabilità, poichè insiste su fondali maggiori. Infine si presentano i carichi dei cassoni tipo C che sono i cassoni che scaricano in fondazione il peso maggiore.

## 5.1. Cassoni tipo A

La seguente Tab. 5-1 riporta i carichi dei cassoni tipo A, che hanno dimensioni in pianta 18.2 x 30 m e risultano imbasati alla -15.5 m l.m.m.

TAB. 5-1 – VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONI TIPO A – ANALISI DEI CARICHI

| DESCRIZIONE | TIPOLOGIA | CARICO (kN/m) | PRESSIONE (kPa) |
|---|---|---|---|
| Peso cassone | Permanente | 1565.3 | 86 |
| Sovrastruttura+muro | Permanente | 564.6+376.7 | 31+20.7 |
| Zavorra cassone | Permanente | 3802 | 208.9 |
| Sotto spinta | Permanente | -2383 | -130.9 |
| Parziale carichi permanenti | | 3925.6 | 215.7 |
| | | | |
| Onda cresta con muro | Variabile | 861.4 | - |
| Onda cresta no muro | Variabile | 876.3 | - |
| Onda cavo | Variabile | 756.8 | - |

Come si può osservare il cassone scarica una pressione massima di circa 216 kPa.

In fase di esercizio il cassone sarà poi soggetto ad un carico d'onda, relativo ad un tempo di ritorno di soli 50 anni, poiché questo cassone ha una vita utile di 10 anni, nonché al carico sismico.

Per quanto concerne la configurazione di esercizio questa tipologia di cassone viene analizzata considerando due diversi scenari, ossia in presenza ed in assenza del muro paraonde.

## 5.2. Cassoni tipo B

La seguente Tab. 5-2 riporta i carichi di esercizio dei cassoni tipo B, che hanno dimensioni in pianta 22 x 30.2 m e risultano imbasati alla -15.5 m l.m.m. Come si può osservare il cassone scarica una pressione massima di circa 218 kPa, molto simile al cassone tipo A. Il cassone tipo B, pur essendo assimilabile al cassone tipo A, sia in termini tipologia strutturale che di carichi d'onda in fase di esercizio temporanea (configurazione di diga di 1° fase), risulta invece diverso da quest'ultimo in fase di esercizio. Questo cassone rimane infatti in opera anche con la diga foranea in configurazione da PRP, per la quale non è però prevista la protezione in scogliera. Ne deriva che i carichi d'onda di progetto in fase di esercizio per il cassone tipo B fanno riferimento a un cassone a parete verticale completamente esposta e a un tempo di ritorno maggiore, pari a 250 anni.

TAB. 5-2 – VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONI TIPO B – ANALISI DEI CARICHI

| DESCRIZIONE | TIPOLOGIA | CARICO (kN/m) | PRESSIONE (kPa) |
|---|---|---|---|
| Peso cassone | Permanente | 1896.6 | 86.2 |
| Sovrastruttura | Permanente | 999.9 | 45.4 |
| Zavorra cassone | Permanente | 4865.2 | 211.1 |
| Sottospinta | Permanente | 2972 | 135.1 |
| Parziale carichi permanenti | | 4789.6 | 217.7 |
| Onda cresta | Variabile | 1593.8 | - |
| Onda cavo | Variabile | 1004.8 | - |

## 5.3. Cassoni tipo C

La seguente Tab. 5-3 riporta i carichi dei cassoni tipo C che hanno dimensioni in pianta 25 x 32 m e risultano imbasati alla -25.5 m l.m.m.
Come si può osservare il cassone scarica una pressione massima di 310 kPa.
In fase di esercizio il cassone sarà poi soggetto ad un carico d'onda, relativo ad un tempo di ritorno di 250 anni, nonché al carico sismico.

TAB. 5-3 – VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONI TIPO C – ANALISI DEI CARICHI

| DESCRIZIONE | TIPOLOGIA | CARICO (kN/m) | PRESSIONE (kPa) |
|---|---|---|---|
| Peso cassone | Permanente | 2964.4 | 118.5 |
| Sovrastruttura | Permanente | 1166.8 | 46.6 |
| Zavorra cassone | Permanente | 9320.9 | 372.8 |
| Sottospinta | Permanente | -5700.9 | -228 |
| Parziale carichi permanenti | | 7751.2 | 310 |
| | | | |
| Onda cresta | Variabile | 2244.9 | - |
| Onda cavo | Variabile | 1646.5 | - |

## 5.4. Cassoni tipo D/E

La seguente Tab. 5-4 riporta i carichi dei cassoni tipo D ed E, che hanno entrambi dimensioni in pianta 22 x 30.2 m e risultano imbasati alla -19.5 m l.m.m.

TAB. 5-4 – VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONI TIPO D/E – ANALISI DEI CARICHI

| DESCRIZIONE | TIPOLOGIA | CARICO (kN/m) | PRESSIONE (kPa) |
|---|---|---|---|
| Peso cassone | Permanente | 2198.4 | 99.9 |
| Sovrastruttura | Permanente | 1226.5 | 55.7 |
| Zavorra cassone | Permanente | 5946.8 | 270.3 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Sottospinta | Permanente | 3735 | 169.8 |
| Parziale carichi permanenti | | 5636.7 | 256.2 |
| | | | |
| Onda cresta | Variabile | 1870 | - |
| Onda cavo | Variabile | 1278 | - |

Come si può osservare il cassone scarica una pressione massima di 256 kPa.
In fase di esercizio il cassone sarà poi soggetto ad un carico d'onda, relativo ad un tempo di ritorno di 250 anni, nonché al carico sismico.

## 5.5. Azione sismica

La valutazione dell'azione sismica è stata fatta secondo le prescrizioni contenute nel DM 14/01/2008.
In relazione alle caratteristiche della Diga Foranea sono stati stabiliti i seguenti parametri significativi:
$V_N$ = vita nominale della struttura = 50 anni
$V_R = C_u V_N$
classe d'uso = II
$C_u = 1$
$V_R = V_N = 50$ anni
Le probabilità di superamento $P_{VR}$ degli stati limiti sono:
stati limiti di danno SLD: $P_{VR} = 63\%$
stati limiti di salvaguardia della vita SLV: $P_{VR} = 10\%$
stati limiti di prevenzione del collasso SLC: $P_{VR} = 5\%$.
A questi valori di $P_{VR}$ corrispondono i seguenti periodi di ritorno $T_r$ e quindi, per il sito di Vado Ligure, valgono i seguenti valori di $a_g$, $F_0$, $T_c^*$.

| $P_{VR}$ | $T_r$ | $a_g$ | $F_0$ | $T_c^*$ |
|---|---|---|---|---|
| 63 | 50 | 0.024 | 2.54 | 0.187 |
| 10 | 475 | 0.058 | 2.608 | 0.307 |
| 5 | 975 | 0.074 | 2.64 | 0.326 |

Soltanto per i cassoni tipo A è prevista una vita utile inferiore, pertanto:
$V_N$ = vita nominale della struttura = 10 anni
$V_R = C_u V_N$
classe d'uso = II
$C_u = 1$
$V_R = V_N = 10$ anni

I corrispondenti periodi di ritorno $T_r$ e quindi i relativi valori di $a_g$, $F_0$, $T_c^*$ sono:

| $P_{VR}$ | $T_r$ | $a_g$ | $F_0$ | $T_c^*$ |
|---|---|---|---|---|
| 63 | 35 | 0.020 | 2.565 | 0.167 |
| 10 | 332 | 0.051 | 2.589 | 0.292 |
| 5 | 682 | 0.066 | 2.623 | 0.315 |

Per quanto riguarda la categoria del suolo, ai sensi delle NTC2008, il terreno di fondazione si inquadra nella categoria D.
Conoscendo la categoria del suolo la normativa definisce un coefficiente di sito con cui valutare il massimo valore dell'accelerazione al livello del fondale:
$a_{max} = a_g S_S S_T$
dove:
Ss = coefficiente di sito
$S_T$ = coefficiente topografico
Per suolo di categoria D in base alla normativa si ottiene: $S_S = 1.8$.
Data la geometria delle opere il coefficiente topografico $S_T$ vale invece 1.4.
Considerando lo stato limite SLV si ottiene $a_{max}$:

| | | | |
|---|---|---|---|
| $a_{max}$ | = 0.146 | per $T_r$ = 475 anni | cassoni tipo B, C, D e E |
| $a_{max}$ | = 0.128 | per $T_r$ = 332 anni | cassoni tipo A |

I corrispondenti coefficienti sismici orizzontali e verticali kh e kv sono i seguenti:

$$kh = \beta_m \frac{a_{max}}{g}$$

$$kv = 0.5kh$$

Il coefficiente $\beta$, considerando un'opera di sostegno con un'accelerazione su suolo rigido inferiore a 0.1 g, sarà pari a 0.18, da cui:

CASSONE TIPO B, C, D, E:

$kh = 0.026$

$kv = 0.013$

CASSONE TIPO A:

$kh = 0.023$

$kv = 0.011$

In aggiunta a tali carichi, in presenza di sisma, si considera poi la spinta idrodinamica dell'acqua valutata secondo Westergaard:

$$q = \frac{7}{8} k_h \gamma_w \sqrt{hz}$$

dove

h = altezza di acqua libera;

z = quota dal pelo libero;

$\gamma_w$ = peso di volume dell'acqua.

Per i cassoni tipo A e B, che hanno anche un riempimento in terra lato mare, si è valutata, in aggiunta ai carichi precedenti, la spinta dinamica del terreno, tramite il coefficiente di spinta dinamico di Mononobe Okabe:

$$K = \frac{sin^2(\Psi + \varphi' - \vartheta)}{cos\vartheta\, sin^2(\Psi)\sin(\Psi + \vartheta - \delta)\left[1 + \sqrt{\frac{sin(\varphi' + \delta)\sin(\varphi' - \beta - \vartheta)}{\sin(\Psi - \vartheta - \delta)\sin(\Psi + \beta)}}\right]^2}$$

Dove:

$\varphi$' = angolo d'attrito del terreno

$\Psi$ = angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale della parete del muro

$\beta$ = angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale della superficie del terreno

$\delta$ = attrito muro terreno

$tan\vartheta = \frac{\gamma_d}{\gamma'} \frac{kh}{1 \pm kv}$ (caso terreno permeabile).

# 6. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

I parametri geotecnici dei terreni di fondazione sono stati valutati sulla base delle indagini disponibili, eseguite sia nell'area della vicina Piattaforma, sia nell'area della nuova Diga. Si rimanda alla relazione geotecnica per tutti i dettagli circa la definizione geotecnica dei terreni.

Di seguito si richiama la tabella di caratterizzazione, Tab. 6-2, e la stratigrafia media utilizzata per la analisi svolte sulla Diga, Tab. 6-1.

Come si può osservare la stratigrafia nell'area della diga è costituita da 3 strati principali, a granulometria via via più grossolana con la profondità, con spessore medio complessivo di circa 15 m. Al di sotto di tali strati si ritrova la roccia di base. Soltanto nella parte più a mare della diga si è osservato un rapido approfondimento del tetto della roccia di base, con un conseguente incremento dello spessore dello strato di ghiaia G.

TAB. 6-1 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – STRATIGRAFIA MEDIA

| **STRATIGRAFIA MEDIA DI PROGETTO** | | |
|---|---|---|
| Spessore medio [m] | Strato | Note |
| 5 | L1 | Limo sabbioso con spessore variabile tra 4 e 6 m |
| 5 | SL | Sabbie più o meno limose con sottolivelli di limo sabbioso. Spessore variabile tra 2 e 8 m, crescente verso la parte più a mare della diga |
| 4 | G | Ghiaia con sabbia e poco limo, con spessore circa costante lungo la diga, che si incrementa in modo significativo al di sotto del cassone tipo E, per un rapido approfondimento della roccia di base |

TAB. 6-2 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

**CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA**

| Livello | $\gamma$ | IP | $G_s$ | OCR | $e_0$ | K | $c_v$ | $C_u$ | c' | $\phi$' | E (*) (MPa) | | $G_{max}$ | $\alpha_{Eur}$ (**) | CR RR | $C_\alpha$ | $\nu$ | $k_0$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kN/m$^3$) | (-) | (-) | (-) | (-) | (m/s) | (m$^2$/s) | (kPa) | (kPa) | (°) | m | n | (MPa) | (-) | (-) | (-) | (-) | (-) |
| L1 | 16 | 10 | 2.73 | 5 | 1.35 | 3E-8 | 5E-6 | (***) | 0 | 33 | 1.5 | 0.75 | 15 | 14 | 0.135<br>0.0096 | 3E-3 | 0.35 | 0.50 |
| L2 | 17 | 10 | 2.73 | 1 | 1.28 | 3E-8 | 2E-5 | (***) | 0 | 32 | 1.5 | 0.75 | 40 | 13 | 0.135<br>0.0096 | 3E-3 | 0.35 | 0.50 |
| SL | 18 | - | 2.72 | 1 | 1.10 | 1E-7 | - | - | 0 | 32 | - | 0.6 | 70 | 9 | - | - | 0.30 | 0.50 |
| G | 19 | - | 2.72 | 1 | - | 1E-5 | - | - | 0 | 40 | 30 | 0.6 | 120 | 8 | - | - | 0.30 | 0.50 |
| A | 18.5 | 20 | 2.75 | ≥ 3 | 1.00 | 1E-9 | 3E-6 | 200 | 200 | 27 | - | | 150 | - | 0.27<br>0.025 | 1E-3 | 0.25 | 1.50 |

(*) Per SL e G il modulo E varia con lo stato tensionale tramite la formula seguente:

$E = m(\sigma'_v/p_a)^n$ dove $p_a$ = pressione atmosferica,

$\sigma'_v$ = sforzo verticale agente $= \sigma'_{v0}$ allo stato naturale

$= \sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v$ in presenza delle opere

Per L1, L2 e A le caratteristiche di deformabilità sono ricavabili da CR ed RR, adeguandoli al valore della tensione efficace agente.

(**) $E_R$ si ottiene da E attraverso il fattore $\alpha_{Eur}$ quindi: $E_{ur} = \alpha_{Eur} \times E$

(***) Per individuare il valore di Cu per L1 ed L2 si può utilizzare la seguente relazione:

$Cu = 0.46 \cdot OCR^{0.7} \sigma'_v$

Per quanto concerne le caratteristiche del materiale utilizzato per la realizzazione della diga, considerando che si tratta di un tout-venant 0-500 kg, si assumono le seguenti caratteristiche geotecniche:

$\gamma$ = 18 kN/m$^3$

E = 40 Mpa

$\Phi$' = 45 °.

## 7. ANALISI SVOLTE

Nel seguito si riportano i risultati delle analisi geotecniche svolte relative alla Diga Foranea.

In particolare, le analisi sono state svolte per i cassoni più critici, ossia il cassone tipo E, che, pur avendo la stessa geometria e gli stessi carichi del cassone D, risulta su fondali maggiori, il cassone tipo C, che risulta essere il cassone coi carichi maggiori, poiché imbasato alla quota maggiore. Tra i cassoni tipo A e B, imbasati alla -15.5 m con un riempimento in terra lato mare e aventi entrambi uno scarico in fondazione analogo, i cedimenti si sono verificati soltanto per i cassoni tipo A, ritenendo il cedimento del cassone B adiacente pressoché analogo. Allo stesso modo, le verifiche di stabilità in fase temporanea vengono presentate solo per il cassone tipo A, essendo più critico rispetto al B poiché con una larghezza inferiore. Vengono invece mostrate tutte le verifiche in fase di esercizio anche per il cassone tipo B, poiché quest'ultimo in esercizio, e quindi in configurazione di diga da PRP, non sarà protetto dalla scogliera lato mare e avendo una vita utile maggiore, sarà sollecitato da carichi con tempo di ritorno maggiore rispetto al cassone tipo A.

Si sottolinea inoltre che per i cassoni tipo A si presentano le verifiche in fase di esercizio sia in presenza che in assenza del muro paraonde.

Per i cassoni tipo A, C ed E si è quindi svolto un modello agli elementi finiti tramite PLAXIS 2D, simulando le diverse fasi costruttive, valutando così i cedimenti nel tempo, legati sia alla costruzione che ai carichi di esercizio. Per tutti i terreni di fondazione si è adottata una legge costitutiva incrudente, ossia in grado di valutare l'incremento del modulo elastico col crescere della tensione efficace, ed un criterio di rottura tipo Mohr-Coulomb. Per il materiale del rilevato invece si è adottata una legge di tipo elasto-plastica.

Tutte le analisi hanno considerato lo sviluppo delle sovrappressioni nel terreno nel tempo. Pertanto a ciascuna fase costruttiva è stata associata una tempistica, ritenuta verosimile. Laddove le analisi abbiano evidenziato criticità dal punto di vista della stabilità, si è pertanto potuta definire la tempistica minima costruttiva per garantire la stabilità stessa, come nel caso della posa e zavorramento cassoni.

La fasistica adottata nelle analisi risulta la seguente:

- Realizzazione rilevato in tout-venant per strati (tempo complessivo 50 gg)
- Consolidazione
- Posa e zavorramento cassone (variabile tra 10 e 30 gg)
- Completamento protezioni in massi (10 gg)
- Realizzazione sovrastruttura (10 gg)
- Muro paraonde
- Carichi d'onda

Prima della posa del cassone si lascia consolidare il carico legato alla realizzazione del rilevato in tout-venant.

Per i cassoni A e B, dopo la fase di posa e zavorramento è prevista una fase di completamento del rilevato lato mare, prima della posa delle protezioni finali.

I carichi d'onda si sono applicati in condizioni drenate così da valutare il massimo spostamento indotto da tali carichi. Allo stesso modo anche il muro è stato applicato in condizioni drenate, non sapendo di preciso la sua tempistica di realizzazione rispetto alla sovrastruttura. Così facendo però si valuta l'incremento di cedimento legato alla sua realizzazione.

Analisi di dettaglio per la stabilità, sono poi state ulteriormente svolte tramite il codice di calcolo all'equilibrio limite GSTABL. Con tale programma si sono quindi valutati i coefficienti di sicurezza alla stabilità globale nelle diverse fasi costruttive ed i coefficienti di sicurezza per la capacità portante, considerando le combinazioni di normativa prima presentate.

Per le analisi di stabilità globale, si è lasciata al programma la possibilità di trovare la superficie di scivolamento più critica, mentre per le analisi di capacità portante si è imposto al programma di verificare la superficie di scivolamento che parte dallo spigolo del cassone.

Per quanto riguarda la stabilità globale, questa è stata valutata nelle seguenti fasi:

- Fine realizzazione tout-venant
- Posa e zavorramento cassone
- Esercizio + cresta d'onda
- Esercizio + cavo d'onda
- Esercizio + sisma

Per quanto riguarda la capacità portante, questa è stata valutata nelle seguenti fasi:

- Posa e zavorramento cassone
- Esercizio + cresta d'onda
- Esercizio + cavo d'onda
- Esercizio + sisma

Le stabilità in fase temporanea sono state valutate considerando la presenza di sovrappressioni nei terreni di fondazione, applicando il coefficiente ru, valutato considerando i valori di sovrappressioni calcolati con il modello Plaxis nella relativa fase.
La seguente Fig. 7-1 riporta la geometria tipo realizzata con Plaxis2D.

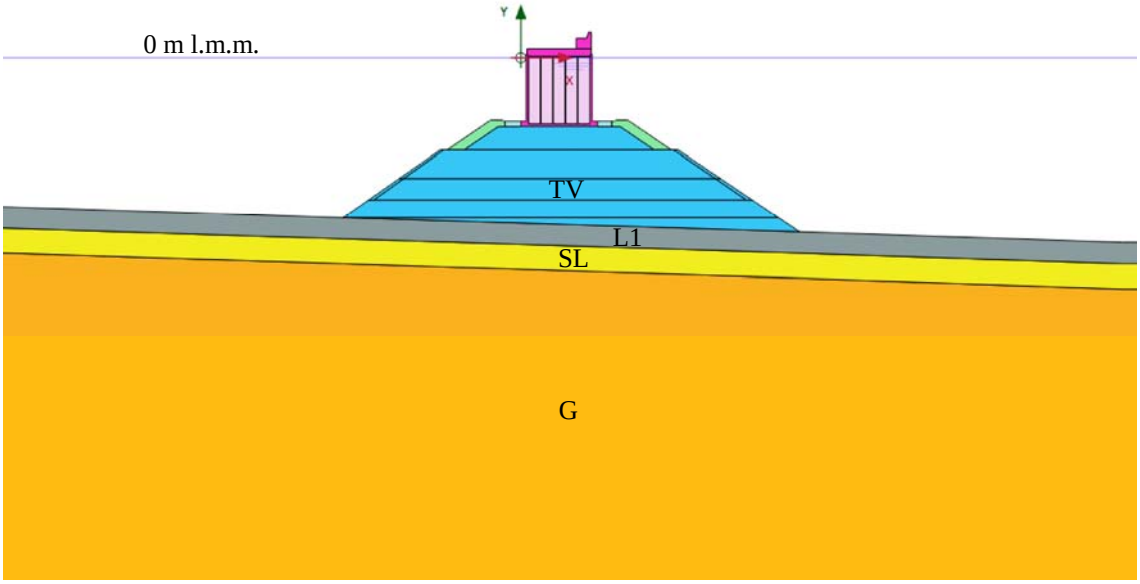



FIG. 7-1 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – GEOMETRIA MODELLO PLAXIS

## 7.1. Cassoni tipo A - risultati

### 7.1.1. Cedimenti

L'analisi Plaxis ha permesso di valutare i cedimenti nel tempo. Il grafico in Fig. 7-2 riporta il cedimento nel tempo per un punto di osservazione preso in mezzeria al cassone al tetto del rilevato in tout-venant e per uno in mezzeria ma al tetto di L1, fino al completamento di tutto il rilevato alla -15.5 m l.m.m, ossia prima

della posa cassone. Come si può osservare dal grafico, il cedimento complessivo risulta essere circa 0.45 m per entrambi i punti.

La costruzione stessa è stata simulata in 40 gg e si può osservare che quasi tutto il cedimento si è già sviluppato in contemporanea con la costruzione stessa. Si può infatti osservare un tempo di consolidazione complessivo di circa 45 gg. La successiva posa del cassone si può quindi correttamente considerare che avverrà quando la consolidazione legata alla costruzione della diga in terra si sarà già esaurita.

La successiva Fig. 7-3 mostra invece il cedimento complessivo a lungo termine, considerando anche la posa/zavorramento del cassone, il completamento del rilevato lato mare e la realizzazione della sovrastruttura.

L'analisi mostra un cedimento a lungo termine di circa 0.70 m, di cui 0.10 m legati al materiale da costruzione. Anche in questo caso il cedimento risulta contemporaneo alla costruzione stessa.

Per meglio comprendere l'andamento dei cedimenti all'interno della diga, in Fig. 7-4 si riporta il cedimento lungo una sezione trasversale sul fondale a lungo termine. Si osserva pertanto che il massimo cedimento di circa 0.60 m si sviluppa al di sotto del cassone. A tale cedimento si devono aggiungere 0.10 m di cedimento del rilevato stesso al di sotto del cassone e 0.15 m per il rilevato a lato del cassone.

La successiva fase di completamento della sezione con il muro e le protezioni finali, fase 2, incrementa il cedimento complessivo di circa 2 cm come si può osservare dalla deformata lungo la sezione trasversale sul fondale riportata sullo stesso grafico.

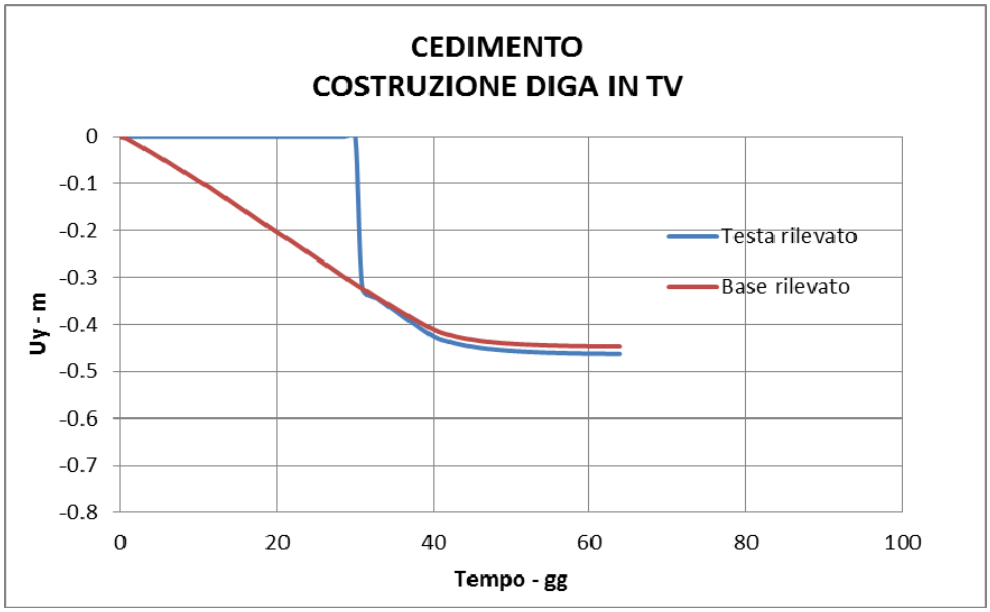



FIG. 7-2 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO A – CEDIMENTO COSTRUZIONE DIGA IN TV

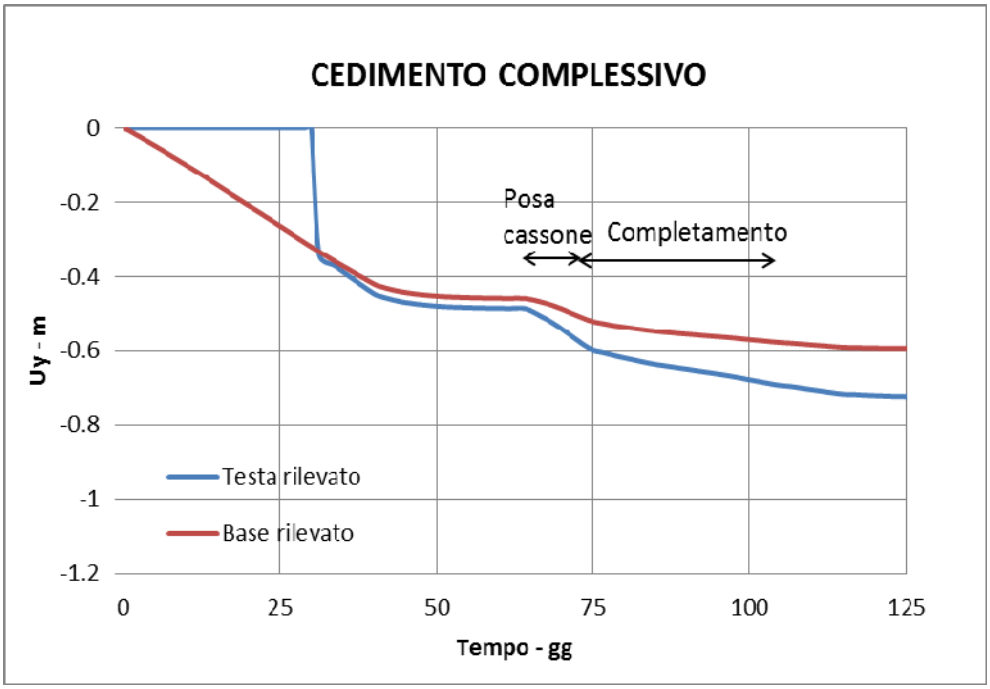



FIG. 7-3 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO A – CEDIMENTO A LUNGO TERMINE

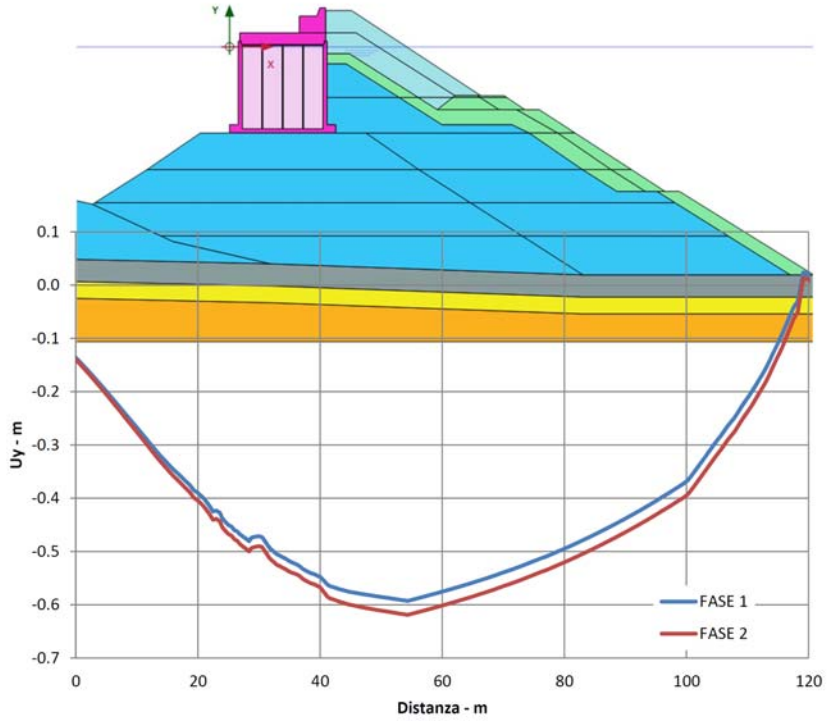
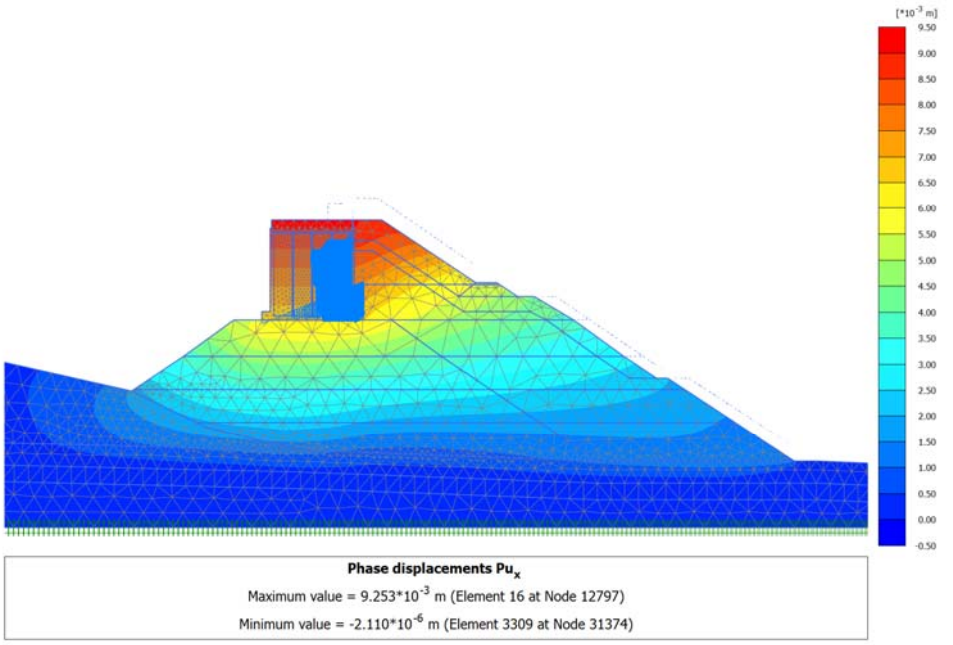



FIG. 7-4 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO A – CEDIMENTO LUNGO TERMINE TRASVERSALE

Per quanto riguarda i carichi d'onda, si riporta in Fig. 7-5 lo spostamento orizzontale causato dal cavo e dalla cresta d'onda con tempo di ritorno 50 anni in assenza del muro. Data la presenza della diga i carichi d'onda sono piuttosto ridotti e pertanto gli spostamenti conseguenti sono pressoché trascurabili.

In Fig. 7-6 si riporta invece lo spostamento orizzontale causato dal cavo e dalla cresta d'onda con tempo di ritorno 50 anni ma in presenza del muro. Data la presenza della diga i carichi d'onda sono piuttosto ridotti e anche in questo caso gli spostamenti conseguenti sono trascurabili.



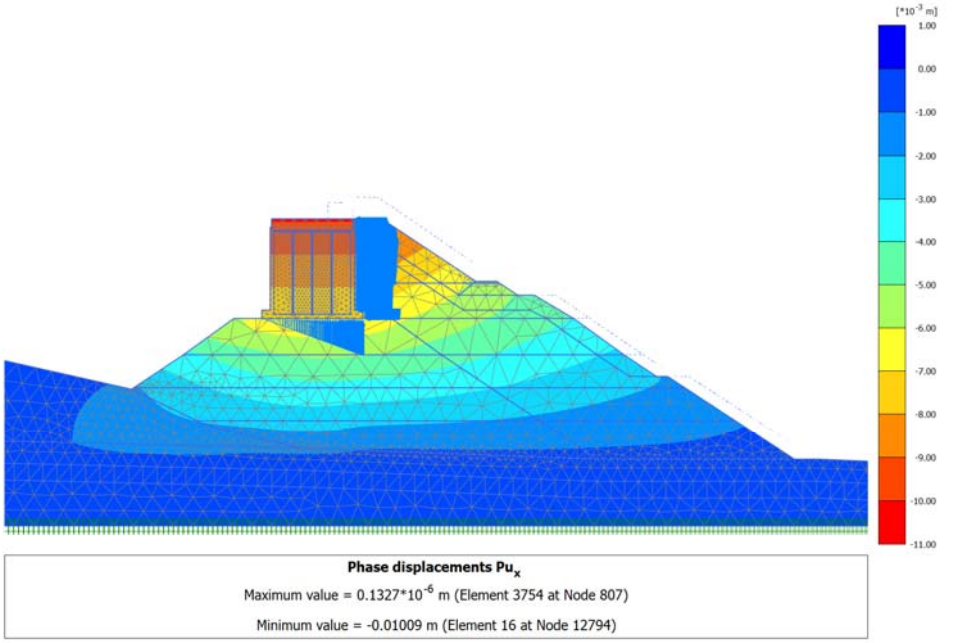
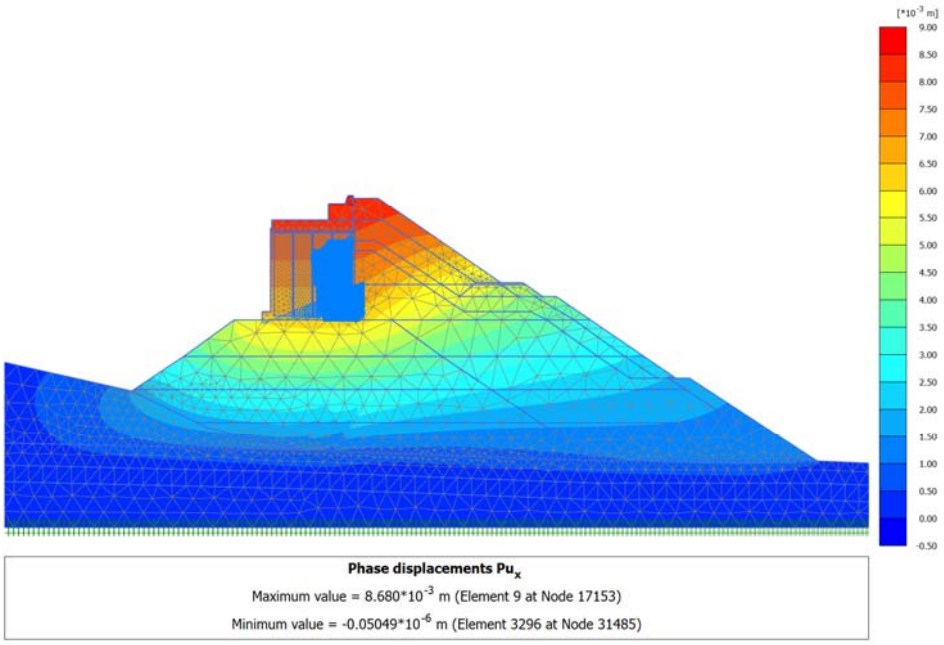




FIG. 7-5 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO A – SPOSTAMENTI ORIZZONTALI PER CAVO E CRESTA D'ONDA



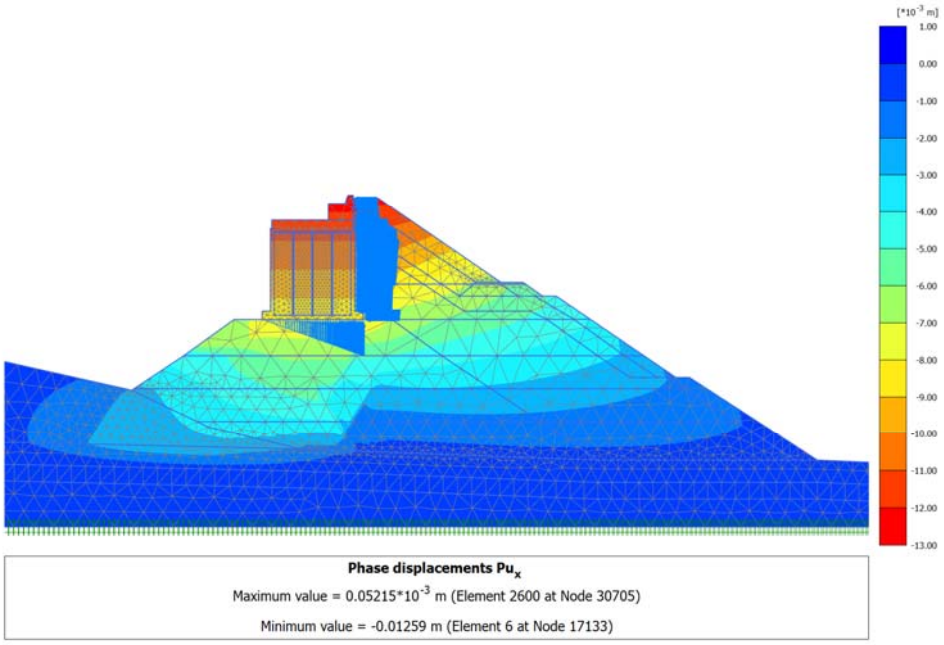




FIG. 7-6 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO A – SPOSTAMENTI ORIZZONTALI PER CAVO E CRESTA D'ONDA CON MURO PARAONDE

### 7.1.1. Stabilità

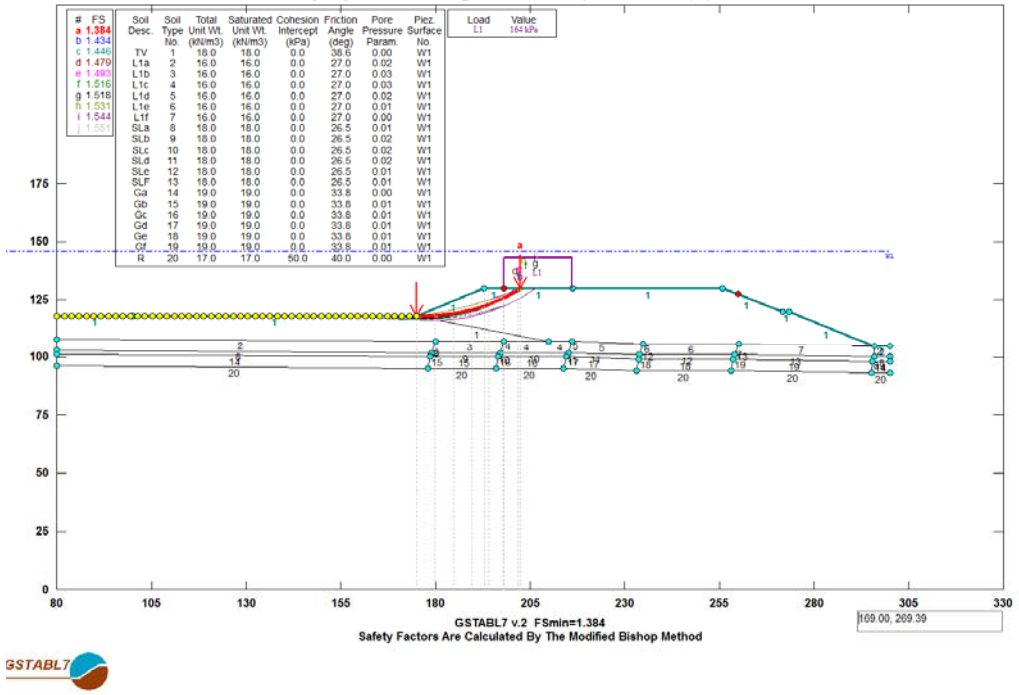
Come prima anticipato la stabilità globale e la capacità portante sono state valutate tramite il codice GSTABL nelle fasi più critiche, sia di costruzione, che di esercizio. Si sottolinea che tutti i carichi agenti sul cassone ed il peso del cassone stesso sono stati applicati nel programma come carico distribuito sulla base del cassone.

Per quanto concerne la fase temporanea di fine posa/zavorramento cassone, si sono applicati i coefficienti ru, per simulare la presenza di sovrappressioni nel terreno di fondazione. Tali coefficienti sono stati valutati tramite i valori di sovrappressione calcolati con il modello Plaxis, avendo considerato un tempo di posa e zavorramento di 10 gg.

Nelle seguenti figure da Fig. 7-7 a Fig. 7-12 si riportano i risultati delle analisi svolte, in cui si può osservare la superficie di scivolamento più critica ed il relativo coefficiente di sicurezza.

Come si può osservare, in tutti i casi esaminati i coefficienti di sicurezza risultano superiori ai minimi richiesti da normativa, pertanto le verifiche risultano soddisfatte.

POSA E ZAVORRAMENTO CASSONE STABILITA'




POSA E ZAVORRAMENTO CASSONE CAPACITA' PORTANTE

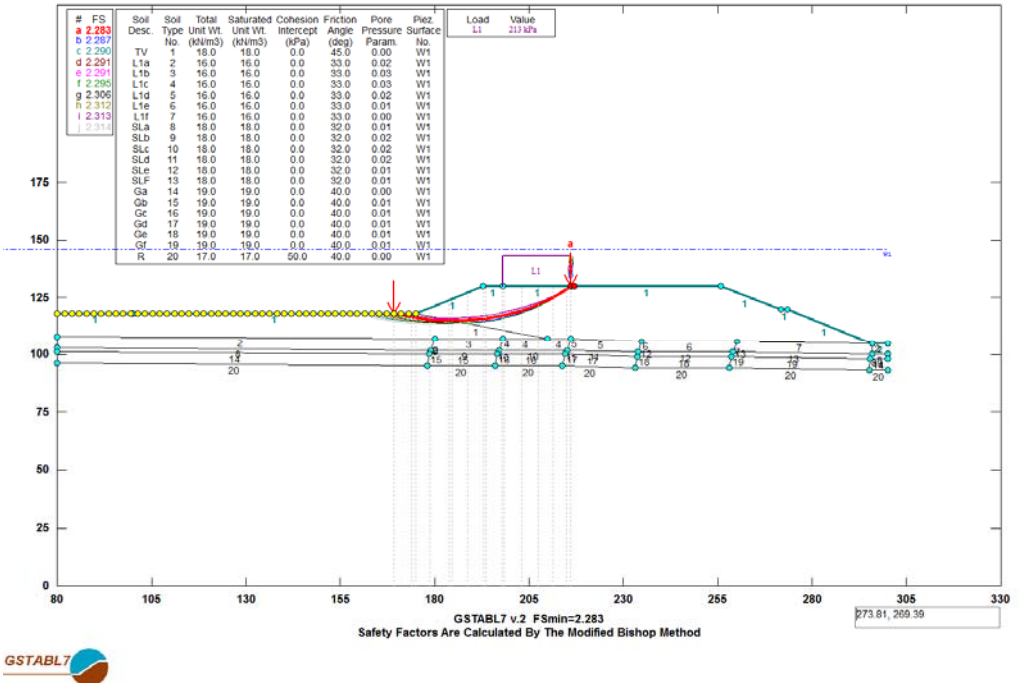
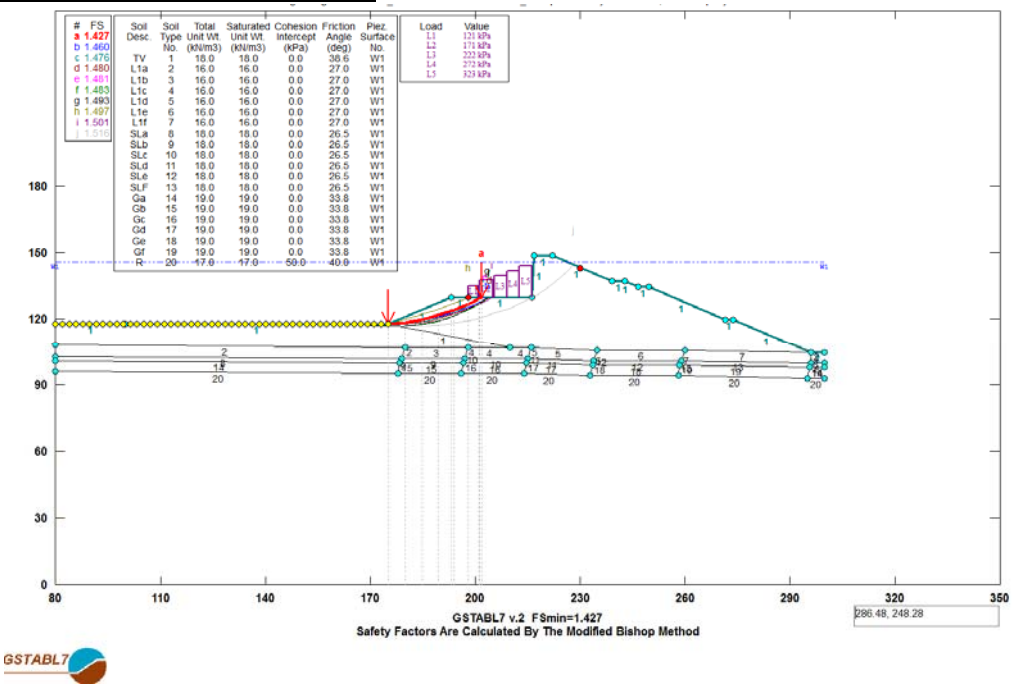



FIG. 7-7 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO A – STABILITÀ E CAPACITÀ PORTANTE POSA CASSONE

ESERCIZIO + CAVO STABILITA'




ESERCIZIO + CAVO CAPACITA' PORTANTE

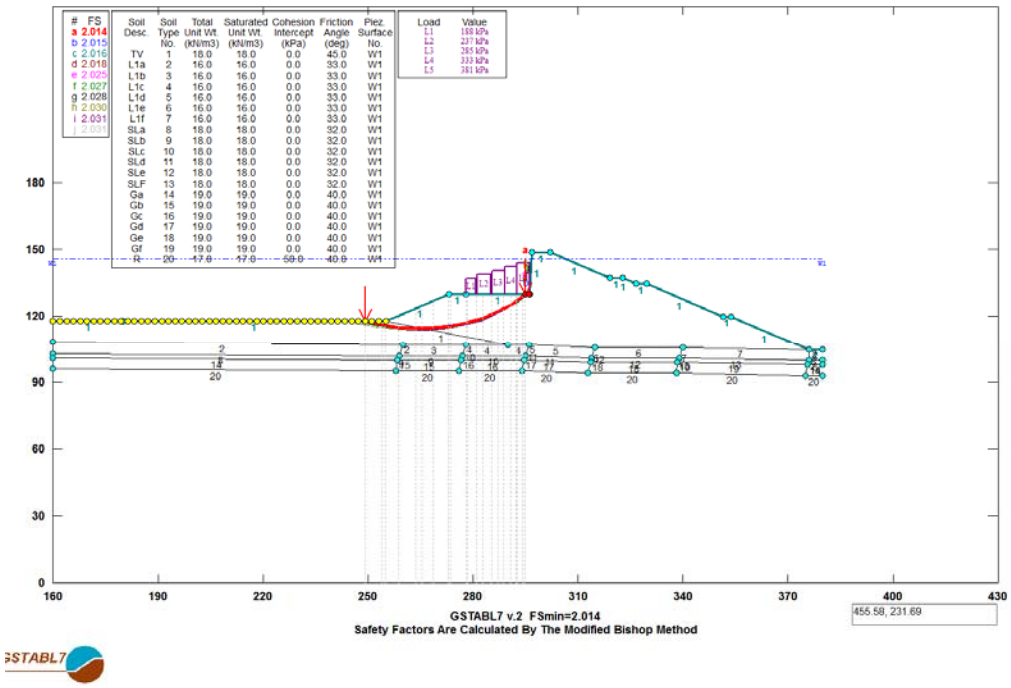
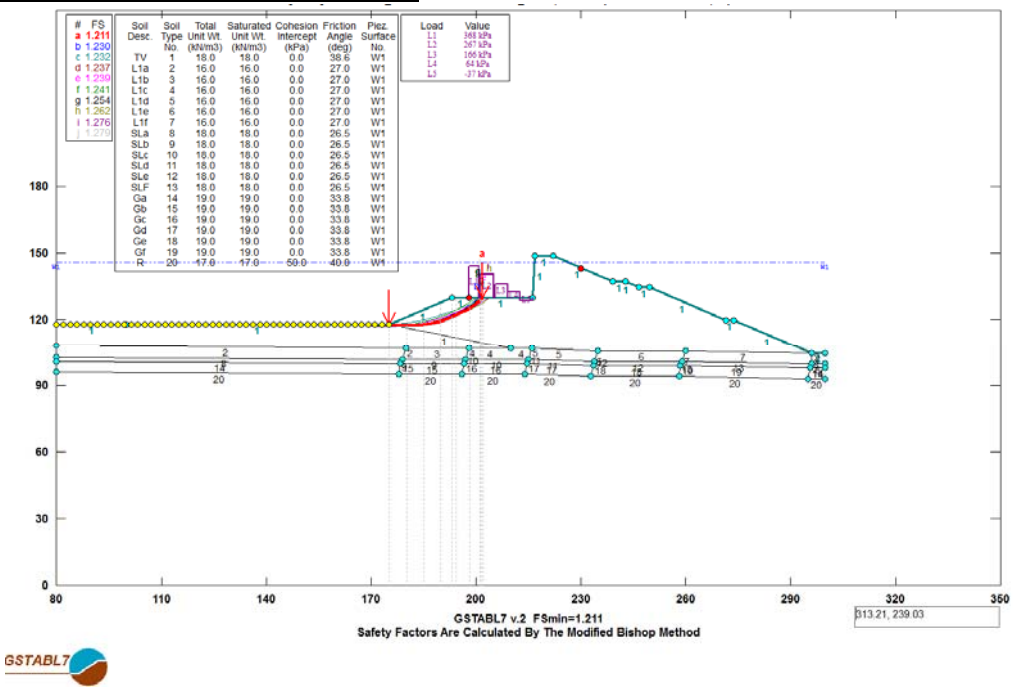



FIG. 7-8 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO A – STABILITA' E CAPACITA' PORTANTE IN ESERCIZIO CON CAVO

ESERCIZIO + CRESTA STABILITA'




ESERCIZIO + CRESTA CAPACITA' PORTANTE

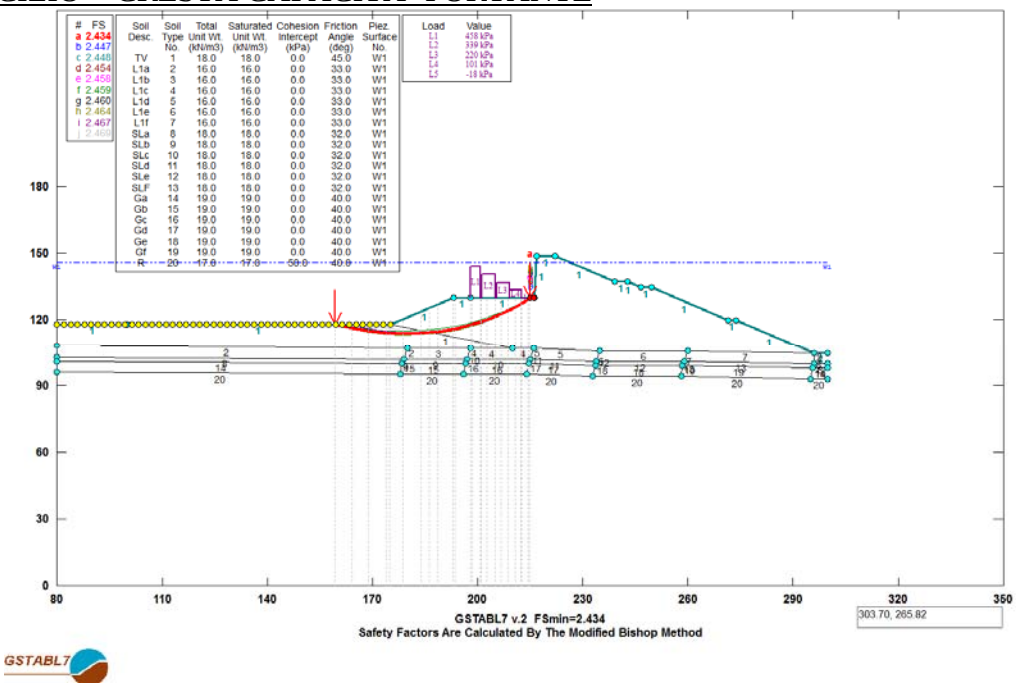
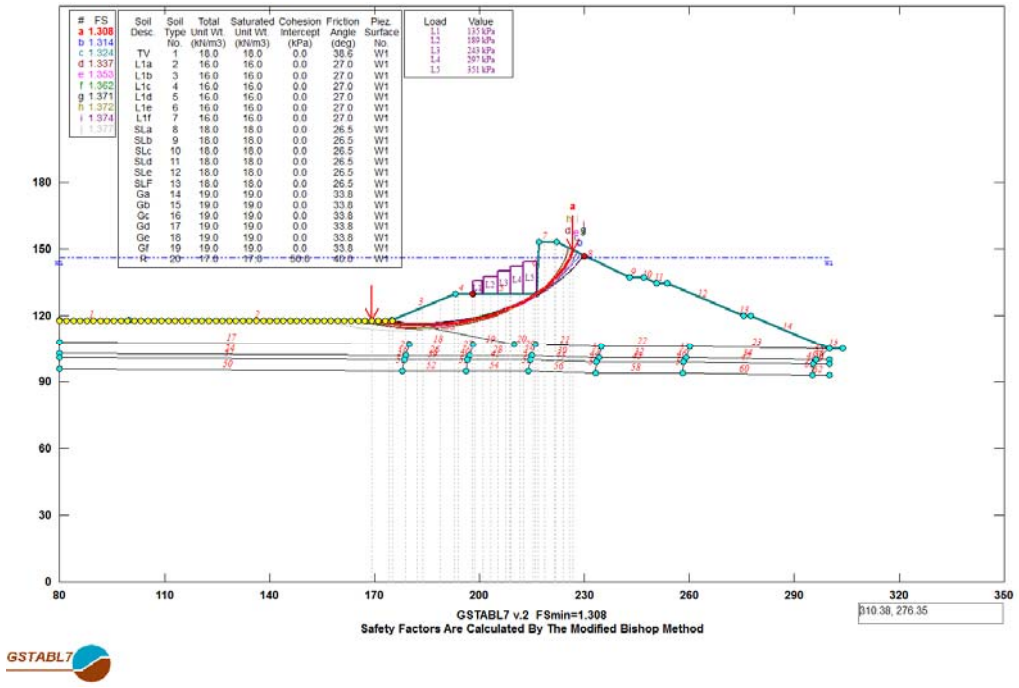



FIG. 7-9 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO A – STABILITA' E CAPACITA' PORTANTE IN ESERCIZIO CON CRESTA

ESERCIZIO + CAVO STABILITA'




ESERCIZIO + CAVO CAPACITA' PORTANTE

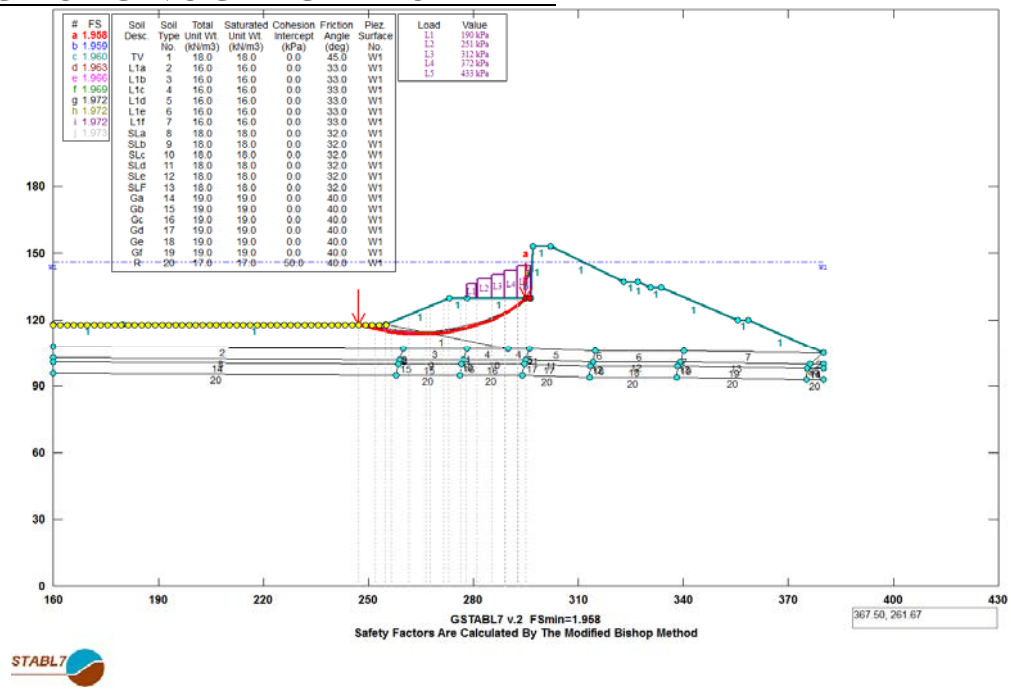
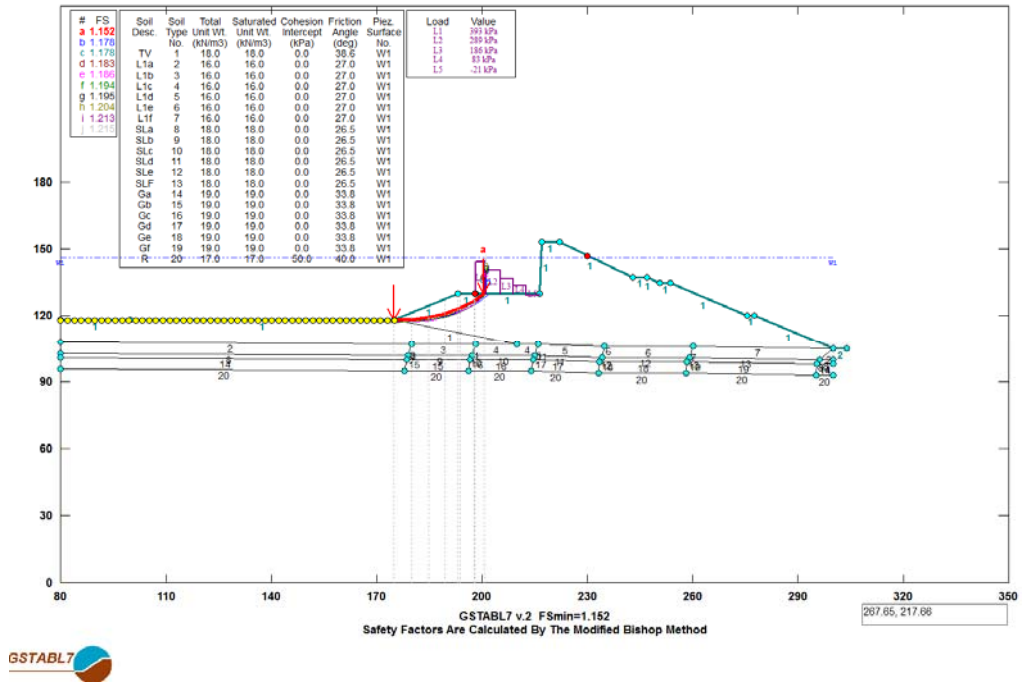



FIG. 7-10 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO A – STABILITA' E CAPACITA' PORTANTE IN ESERCIZIO CON CAVO CON MURO

ESERCIZIO + CRESTA STABILITA'




ESERCIZIO + CRESTA CAPACITA' PORTANTE

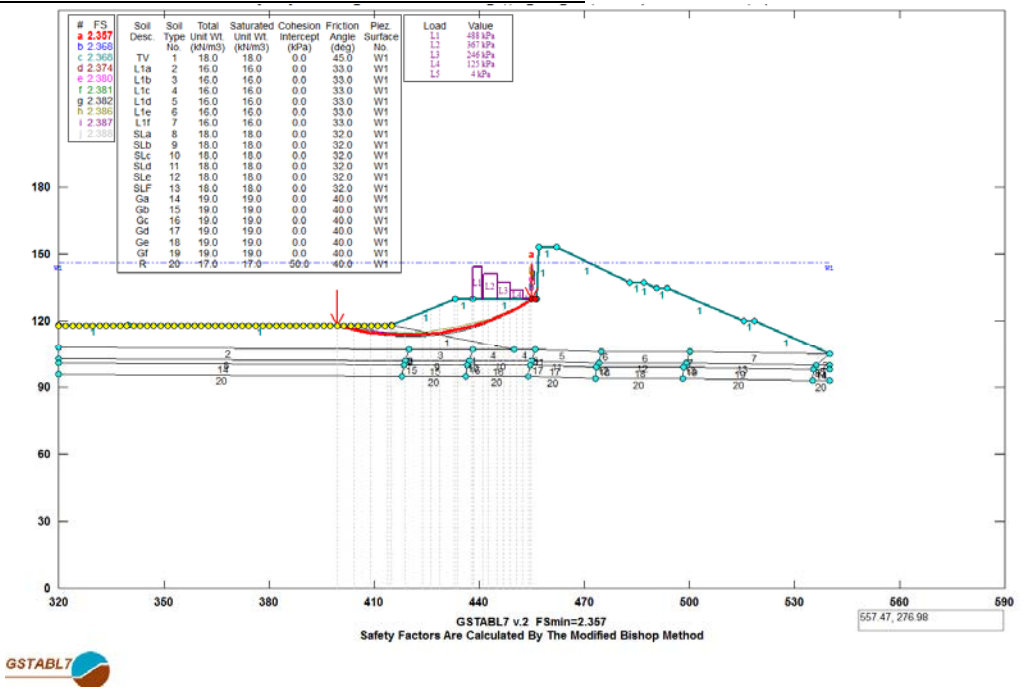
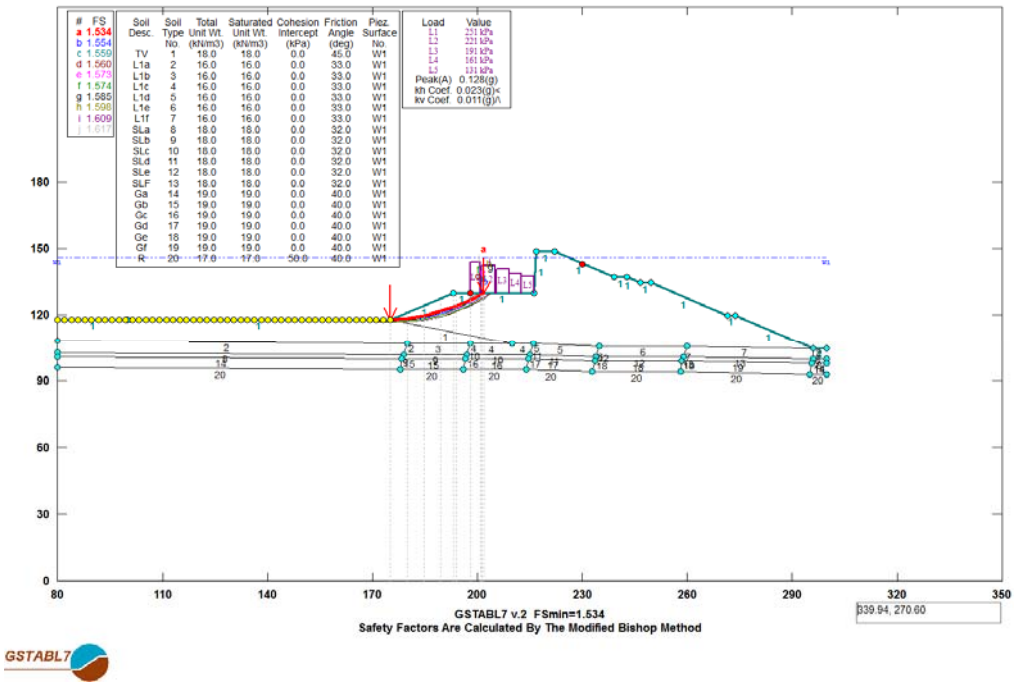



FIG. 7-11 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO A – STABILITA' E CAPACITA' PORTANTE IN ESERCIZIO CON CRESTA CON MURO

ESERCIZIO + SISMA STABILITA'




ESERCIZIO + SISMA CAPACITA' PORTANTE

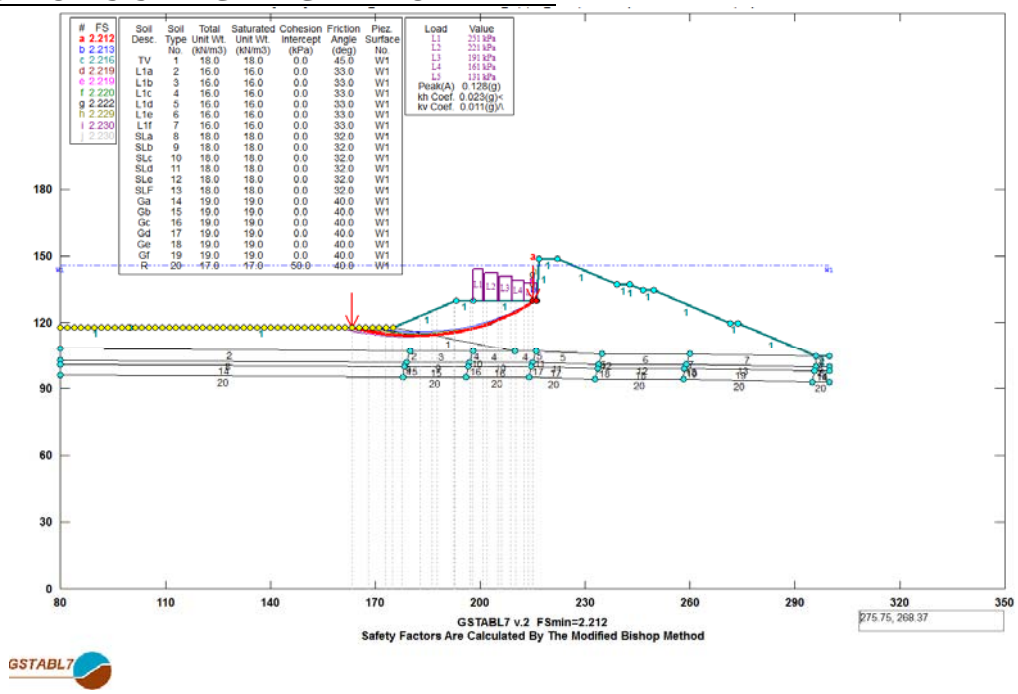
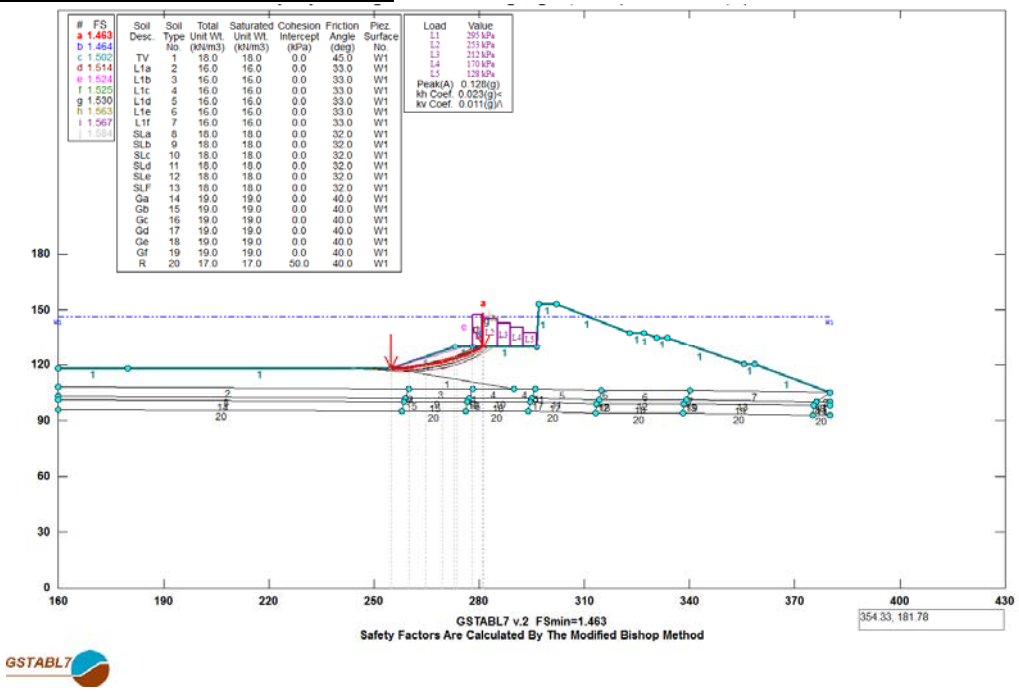



FIG. 7-12 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO A – STABILITA' E CAPACITA' PORTANTE IN ESERCIZIO CON SISMA

ESERCIZIO + SISMA STABILITA'




ESERCIZIO + SISMA CAPACITA' PORTANTE

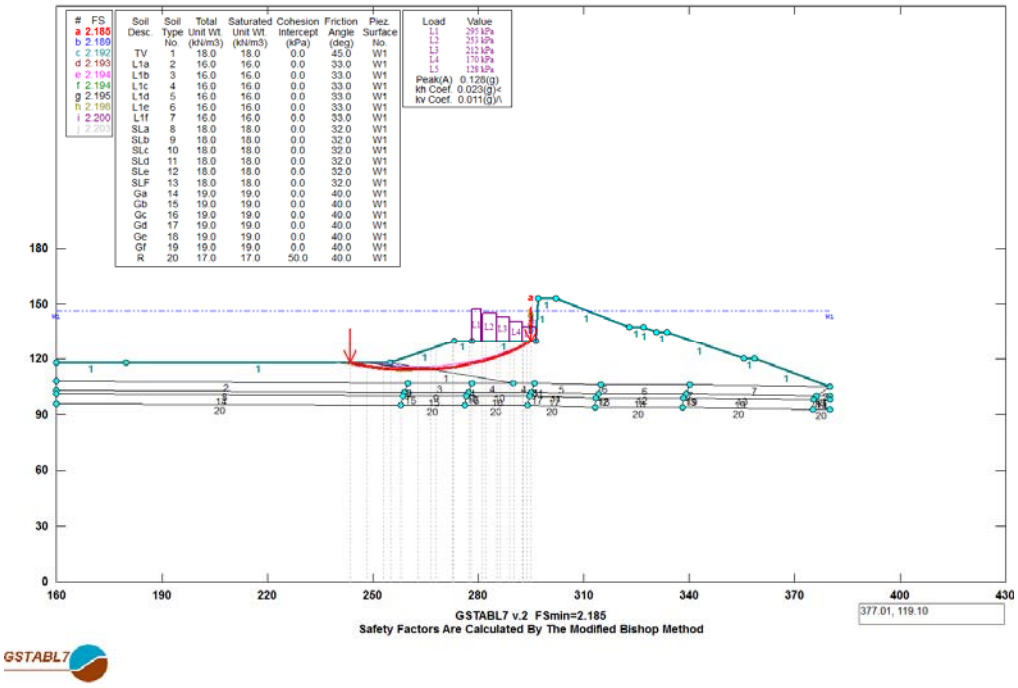



FIG. 7-13 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO A – STABILITA' E CAPACITA' PORTANTE IN ESERCIZIO CON SISMA CON MURO

La seguente Tab. 7-1 invece riassume i coefficienti di sicurezza ottenuti, che come si può osservare, in tutti i casi, risultano superiori a quanto richiesto da normativa.

TAB. 7-1 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – SINTESI FATTORI DI SICUREZZA – CASSONE A

| CASSONE TIPO | FASE | STABILITA' GLOBALE A2 + M2 + R2 FS > 1.1 | CAPACITA' PORTANTE A1 + M1 + R3 FS > 1.4 |
|---|---|---|---|
| A | Fine costruzione rilevato | - | - |
| | Fine zavorramento cassone | 1.38 | 2.28 |
| | Esercizio + cavo | 1.42 | 2.01 |
| | Esercizio + cresta | 1.21 | 2.43 |
| | Esercizio + cavo muro | 1.30 | 1.95 |
| | Esercizio + cresta muro | 1.15 | 2.35 |
| | Esercizio + sisma | 1.53 | 2.21 |
| | Esercizio + sisma muro | 1.46 | 2.18 |

## 7.2. Cassone tipo B - Risultati

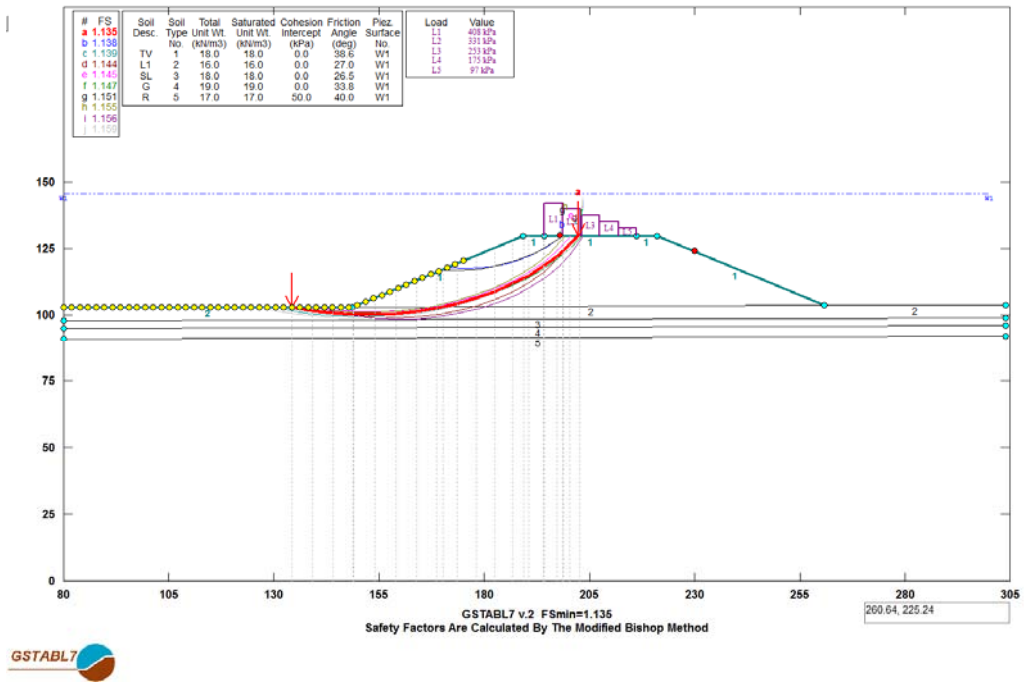
### 7.2.1. Stabilità

Come prima anticipato per il cassone tipo B si presentano le analisi di stabilità globale e la capacità portante svolte tramite il codice GSTABL nelle fasi più critiche di esercizio. Si sottolinea che tutti i carichi agenti sul cassone ed il peso del cassone stesso sono stati applicati nel programma come carico distribuito sulla base del cassone.

Nelle seguenti figure da Fig. 7-14 a Fig. 7-16 si riportano i risultati delle analisi svolte, in cui si può osservare la superficie di scivolamento più critica ed il relativo coefficiente di sicurezza.

Come si può osservare, in tutti i casi esaminati i coefficienti di sicurezza risultano superiori ai minimi richiesti da normativa, pertanto le verifiche risultano soddisfatte.

ESERCIZIO + CAVO STABILITA'




ESERCIZIO + CAVO CAPACITA' PORTANTE

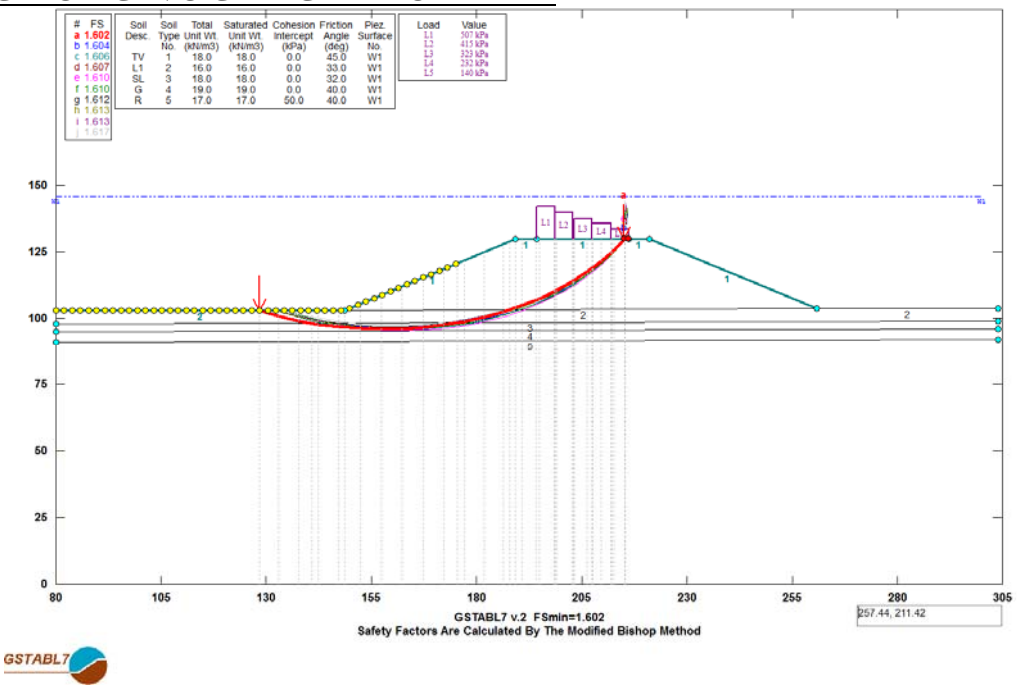
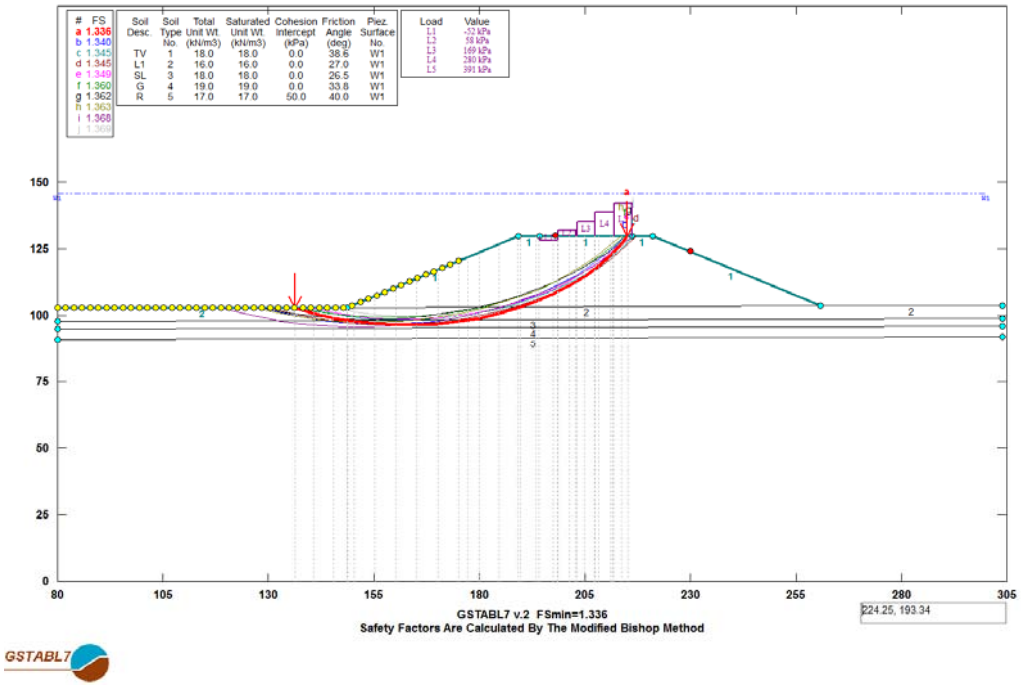



FIG. 7-14 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO B – STABILITA' E CAPACITA' PORTANTE IN ESERCIZIO CON CAVO

ESERCIZIO + CRESTA STABILITA'




ESERCIZIO + CRESTA CAPACITA' PORTANTE

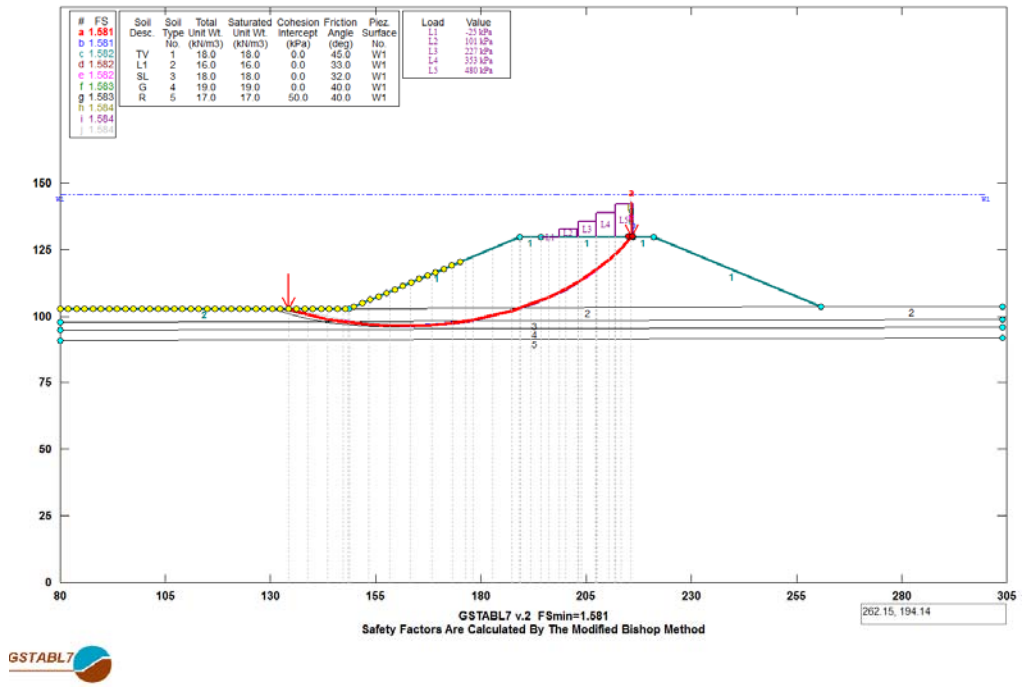
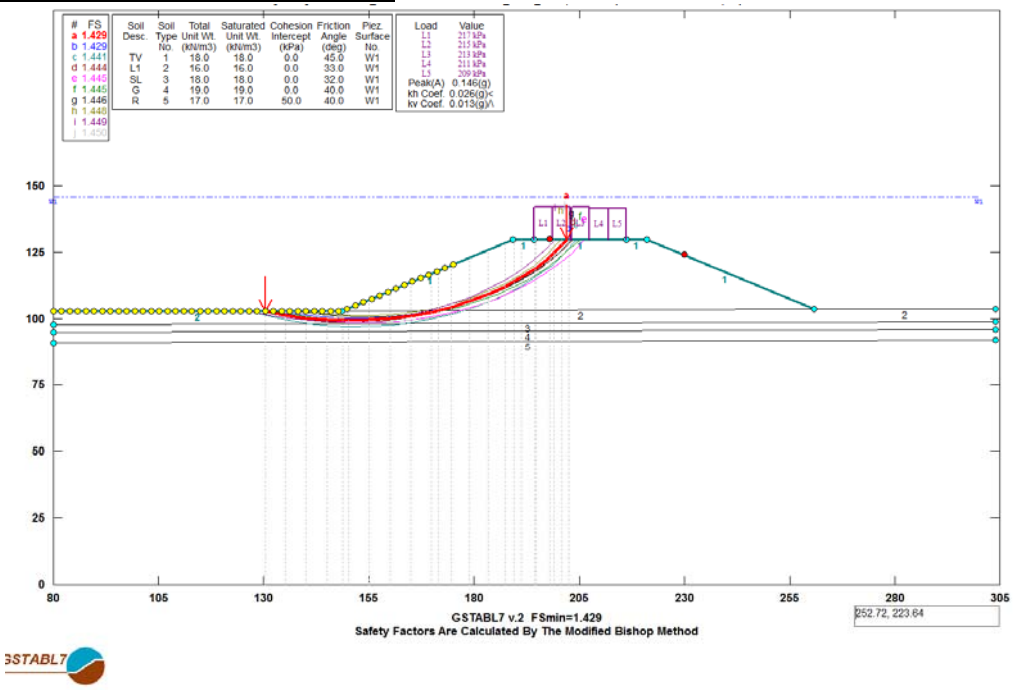



FIG. 7-15 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO B – STABILITA' E CAPACITA' PORTANTE IN ESERCIZIO CON CRESTA

ESERCIZIO + SISMA STABILITA'




ESERCIZIO + SISMA CAPACITA' PORTANTE

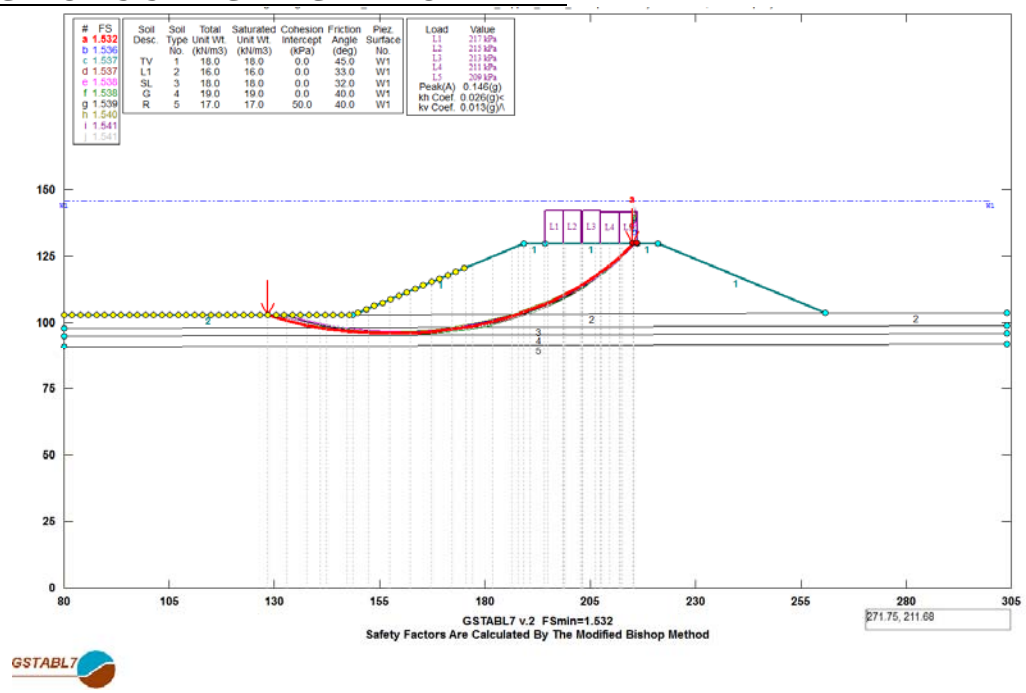



FIG. 7-16 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO B – STABILITA' E CAPACITA' PORTANTE IN ESERCIZIO CON SISMA

La seguente Tab. 7-2 invece riassume i coefficienti di sicurezza ottenuti, che come si può osservare, in tutti i casi, risultano superiori a quanto richiesto da normativa.

TAB. 7-2 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – SINTESI FATTORI DI SICUREZZA – CASSONE B

| CASSONE TIPO | FASE | STABILITA' GLOBALE A2 + M2 + R2 FS > 1.1 | CAPACITA' PORTANTE A1 + M1 + R3 FS > 1.4 |
|---|---|---|---|
| B | Esercizio + cavo | 1.13 | 1.60 |
| | Esercizio + cresta | 1.33 | 1.58 |
| | Esercizio + sisma | 1.42 | 1.53 |

## 7.3. Cassoni tipo C - risultati

### 7.3.1. Cedimenti

L'analisi Plaxis ha permesso di valutare i cedimenti nel tempo. Il grafico in Fig. 7-17 riporta il cedimento nel tempo per un punto di osservazione preso in mezzeria al cassone al tetto del rilevato in tout-venant e per uno in mezzeria ma al tetto di L1. Come si può osservare dal grafico, il cedimento complessivo risulta essere circa 0.55 m, di cui, per differenza, 5 cm sono il cedimento del solo materiale da costruzione.

La costruzione stessa è stata simulata in 50 gg e si può osservare come quasi tutto il cedimento si sia già sviluppato in contemporanea con la costruzione stessa. Si può infatti osservare un tempo di consolidazione complessivo di circa 60 gg. La successiva posa del cassone si può quindi correttamente considerare che avverrà quando la consolidazione legata alla costruzione della diga in terra si sarà già esaurita. Il successivo grafico sempre in Fig. 7-17 mostra invece il cedimento complessivo a lungo termine, considerando anche la successiva posa/zavorramento del cassone, la realizzazione della sovrastruttura, e la posa delle protezioni.

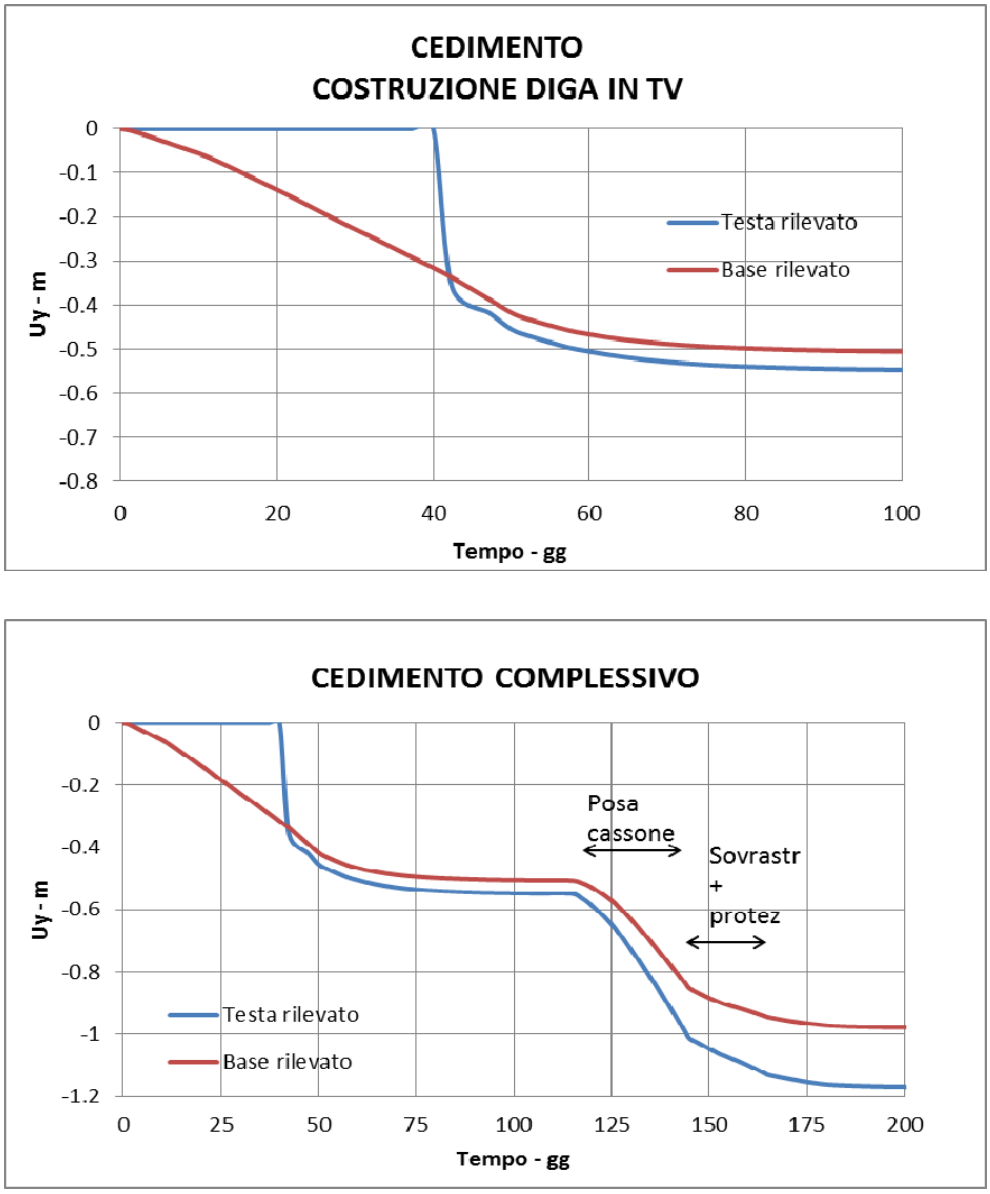



FIG. 7-17 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO C – CEDIMENTO COSTRUZIONE RILEVATO E A LUNGO TERMINE

L'analisi mostra un cedimento a lungo termine di circa 1.17 m, di cui 0.20 m legati al materiale da costruzione.

La successiva realizzazione del muro paraonde comporterà un ulteriore cedimento di circa 0.04 m, come si osserva nella seguente Fig. 7-18.

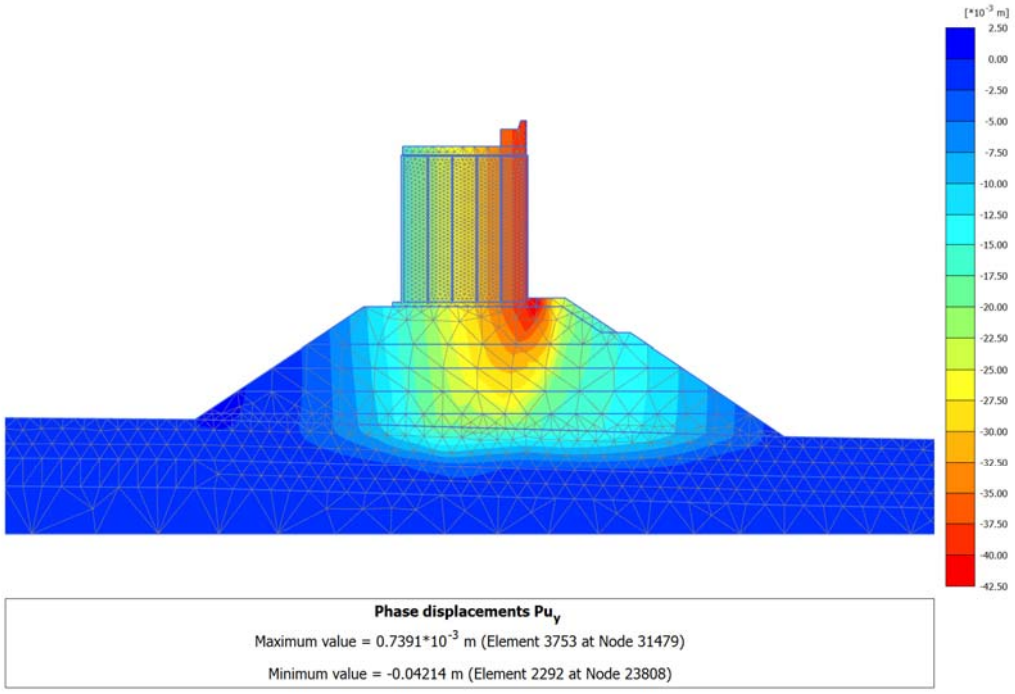



FIG. 7-18 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO C – CEDIMENTO MURO PARAONDE

Per meglio comprendere l'andamento dei cedimenti all'interno della diga, in Fig. 7-19 si riporta il cedimento lungo una sezione trasversale sul fondale a lungo termine. Si osserva pertanto che il massimo cedimento di circa 1 m si sviluppa al di sotto del cassone. A tale cedimento si devono aggiungere come detto 0.20 m di cedimento del corpo del rilevato stesso.

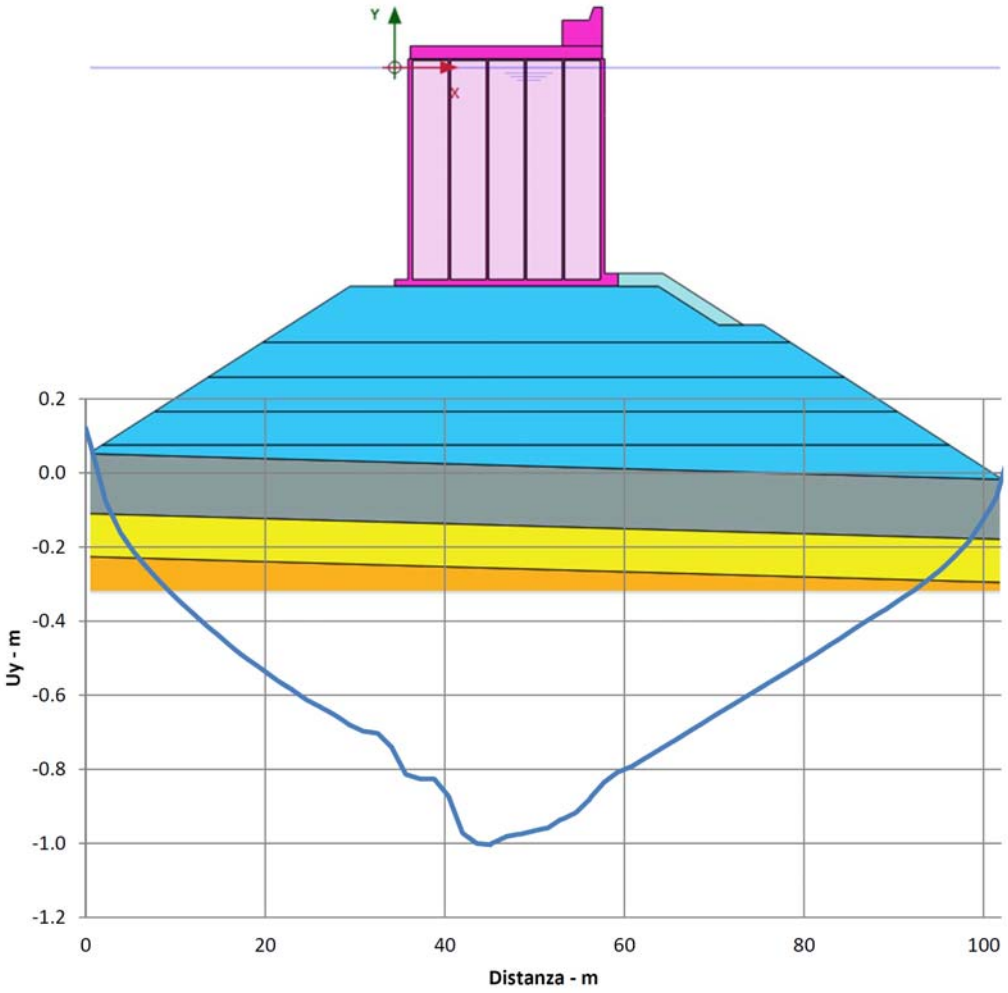
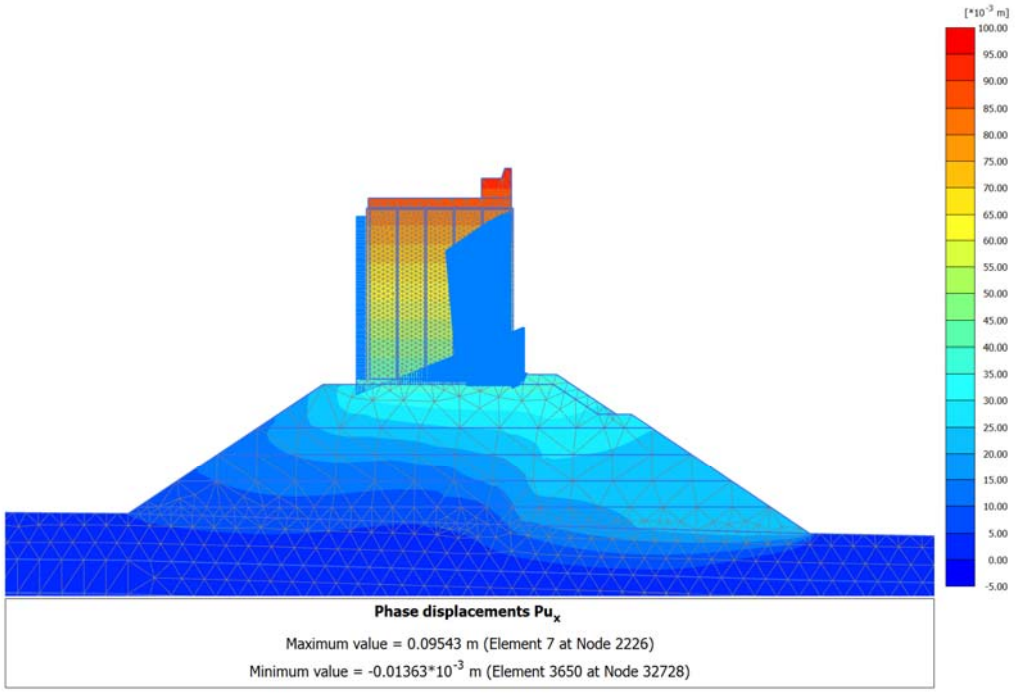



FIG. 7-19 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO C – CEDIMENTO A LUNGO TERMINE TRASVERSALE

Per quanto riguarda i carichi d'onda, si riporta in Fig. 7-20 lo spostamento orizzontale causato dal cavo e dalla cresta d'onda, entrambi con tempo di ritorno 250 anni. Questo risulta pari a circa 9.5 cm e 11.8 cm, rispettivamente per cavo e cresta. E' importante sottolineare che tali carichi sono stati applicati in condizioni drenate, pertanto rappresentano un limite superiore del cedimento reale, che, poiché sono carichi ciclici, risulterà sicuramente inferiore.



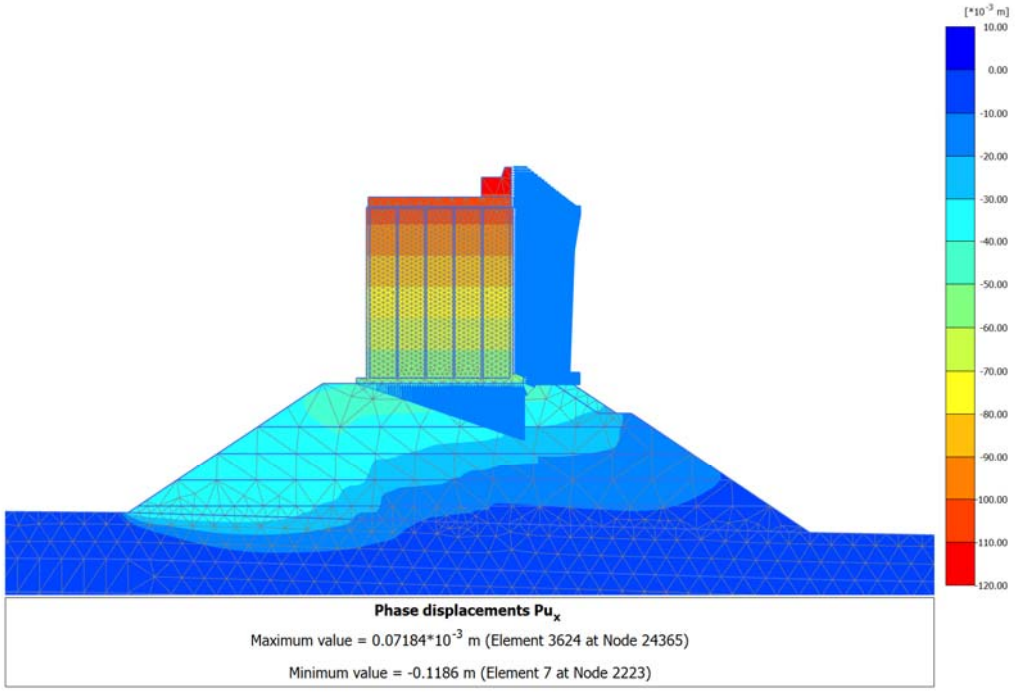




FIG. 7-20 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO C – SPOSTAMENTI ORIZZONTALI PER CAVO E CRESTA D'ONDA

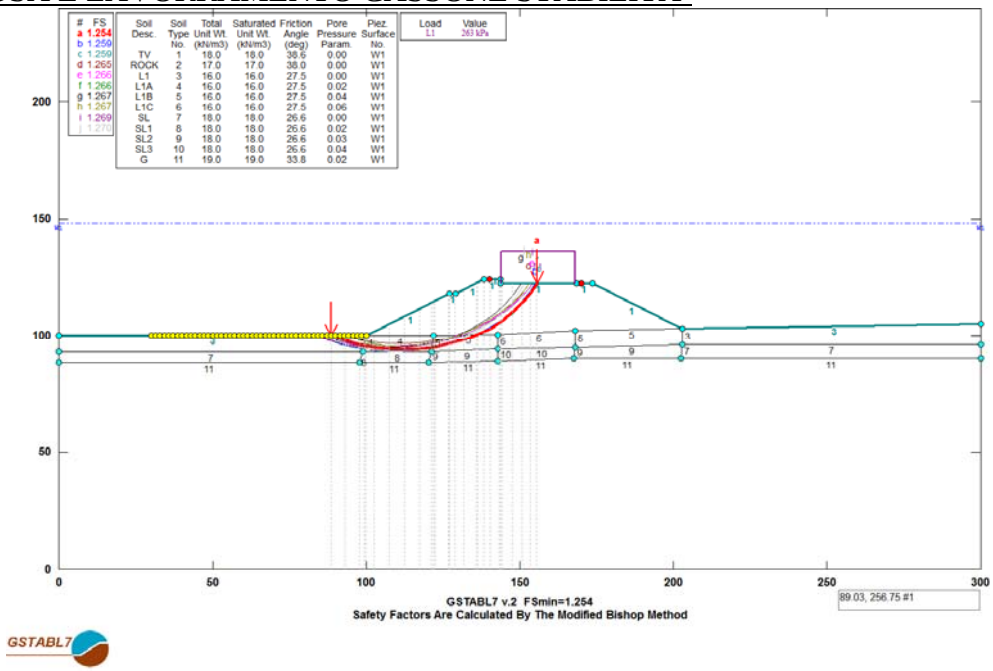
### 7.3.2. Stabilità

Come prima anticipato la stabilità globale e la capacità portante sono state valutate tramite il codice GSTABL nelle fasi più critiche, sia di costruzione, che di esercizio. Si sottolinea che tutti i carichi agenti sul cassone ed il peso del cassone stesso sono stati applicati nel programma come carico distribuito sulla base del cassone.

Per quanto concerne le fasi temporanee si riporta solo la fase di fine posa/zavorramento cassone, in cui si sono applicati i coefficienti ru, per simulare la presenza di sovrappressioni nel terreno di fondazione. Tali coefficienti sono stati valutati sulla base dei valori di sovrappressione calcolati con il modello Plaxis. La verifica di stabilità della fase di costruzione del rilevato è stata infatti svolta soltanto per il caso dei cassoni E, ossia per il caso più critico, con la massima altezza del rilevato.

Nelle seguenti figure da Fig. 7-21 a Fig. 7-24 si riportano i risultati delle analisi svolte, in cui si può osservare la superficie di scivolamento più critica ed il relativo coefficiente di sicurezza.

POSA E ZAVORRAMENTO CASSONE STABILITA'




POSA E ZAVORRAMENTO CASSONE CAPACITA' PORTANTE

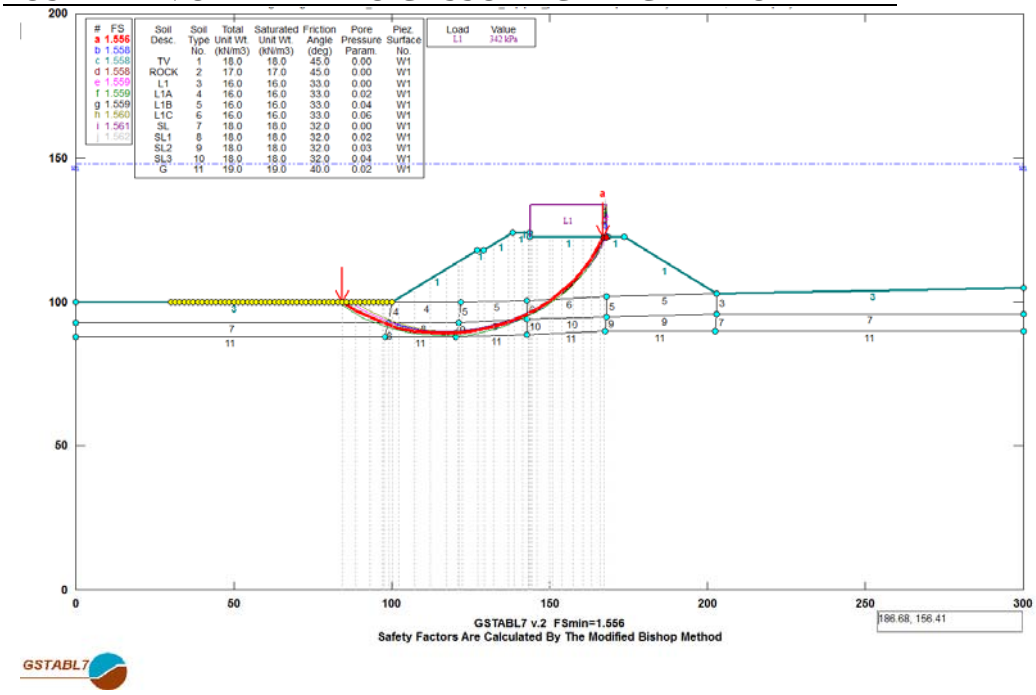
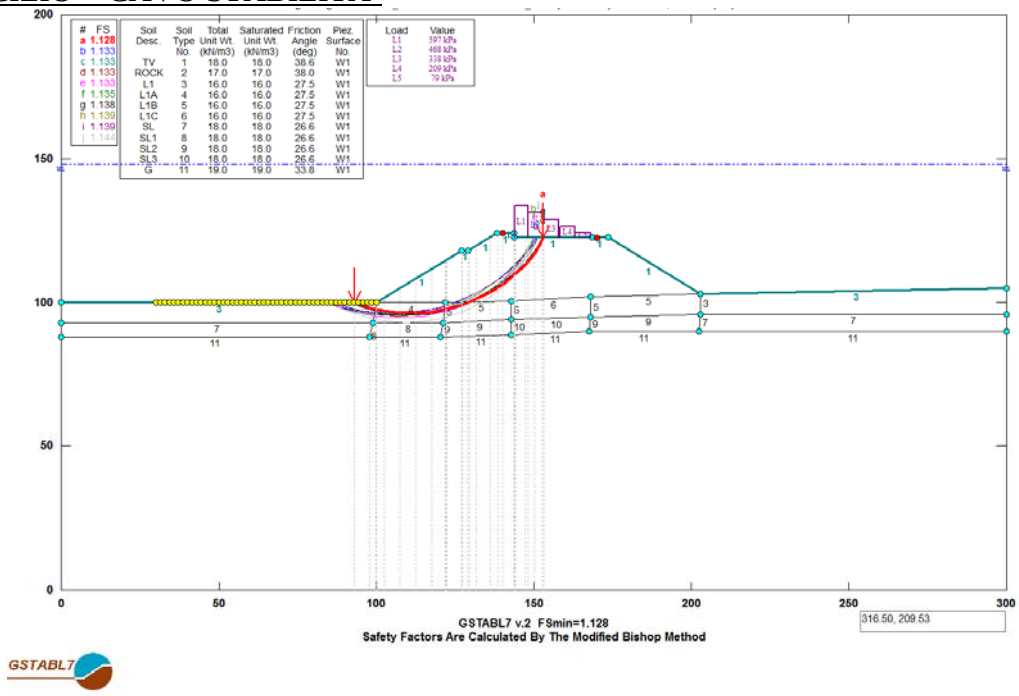



FIG. 7-21 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO C – STABILITA' E CAPACITÀ PORTANTE POSA CASSONE

ESERCIZIO + CAVO STABILITA'




ESERCIZIO + CAVO CAPACITA' PORTANTE

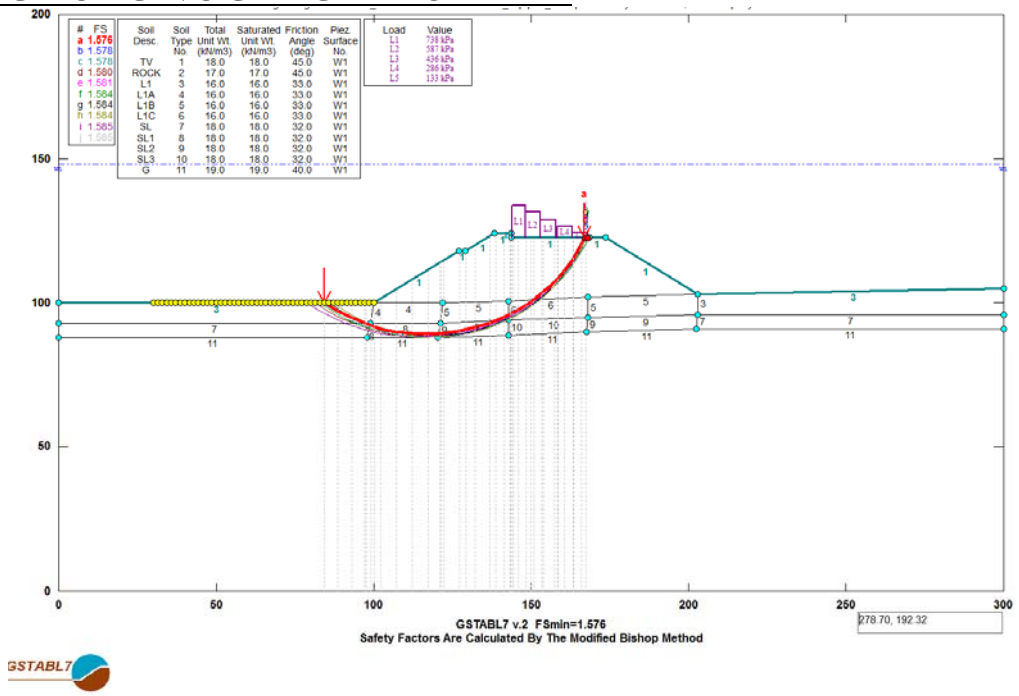
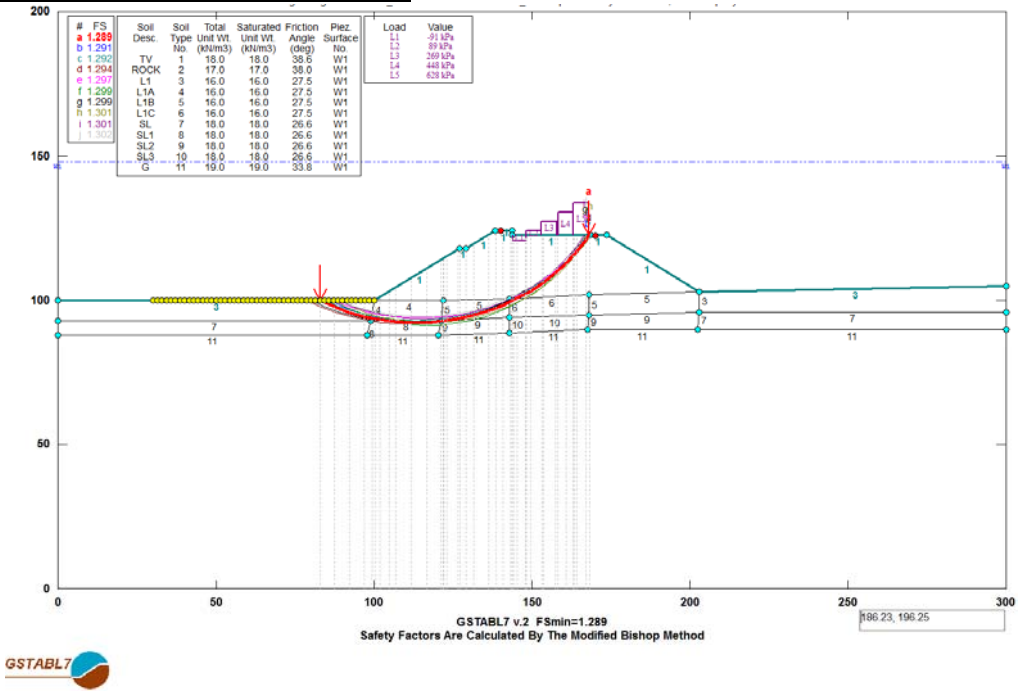



FIG. 7-22 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO C – STABILITA' E CAPACITA' PORTANTE IN ESERCIZIO CON CAVO

ESERCIZIO + CRESTA STABILITA'




ESERCIZIO + CRESTA CAPACITA' PORTANTE

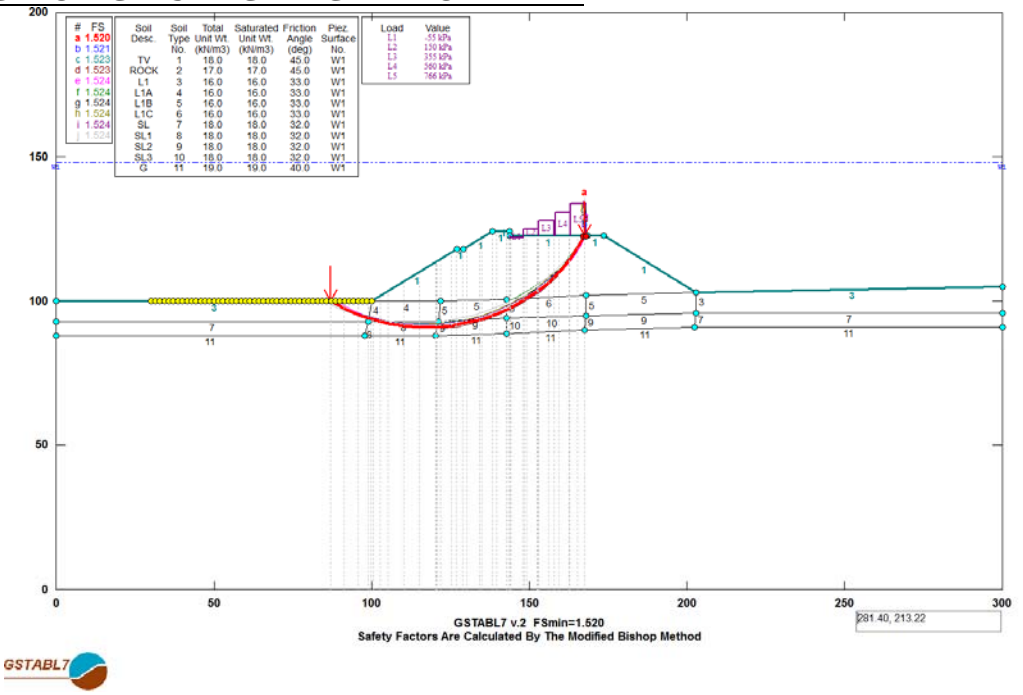
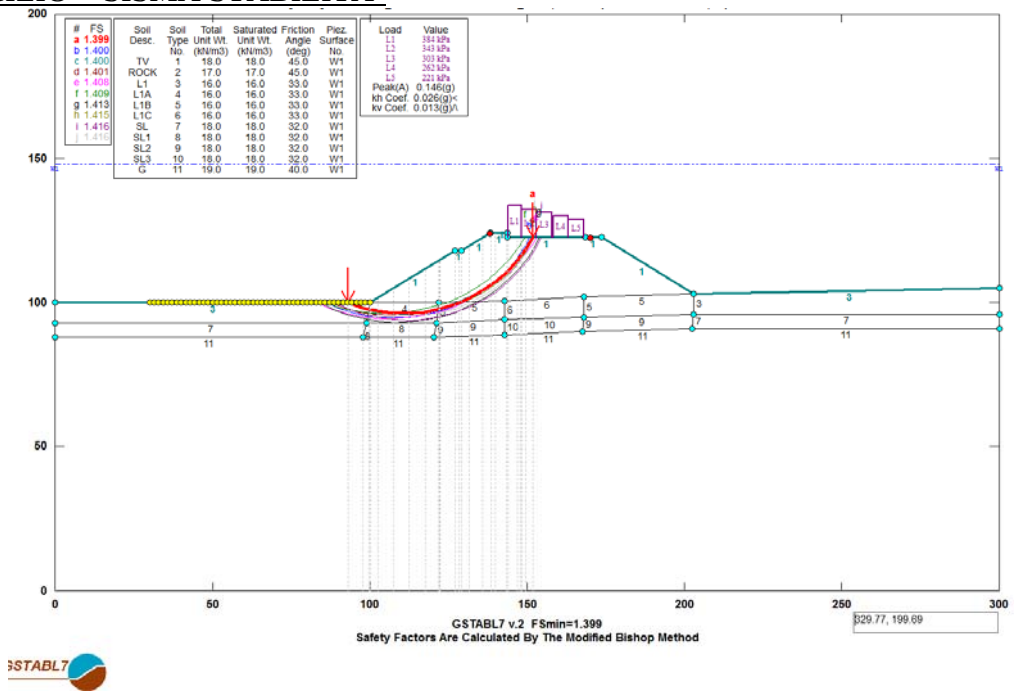



FIG. 7-23 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO C – STABILITA' E CAPACITA' PORTANTE IN ESERCIZIO CON CRESTA

ESERCIZIO + SISMA STABILITA'




ESERCIZIO + SISMA CAPACITA' PORTANTE

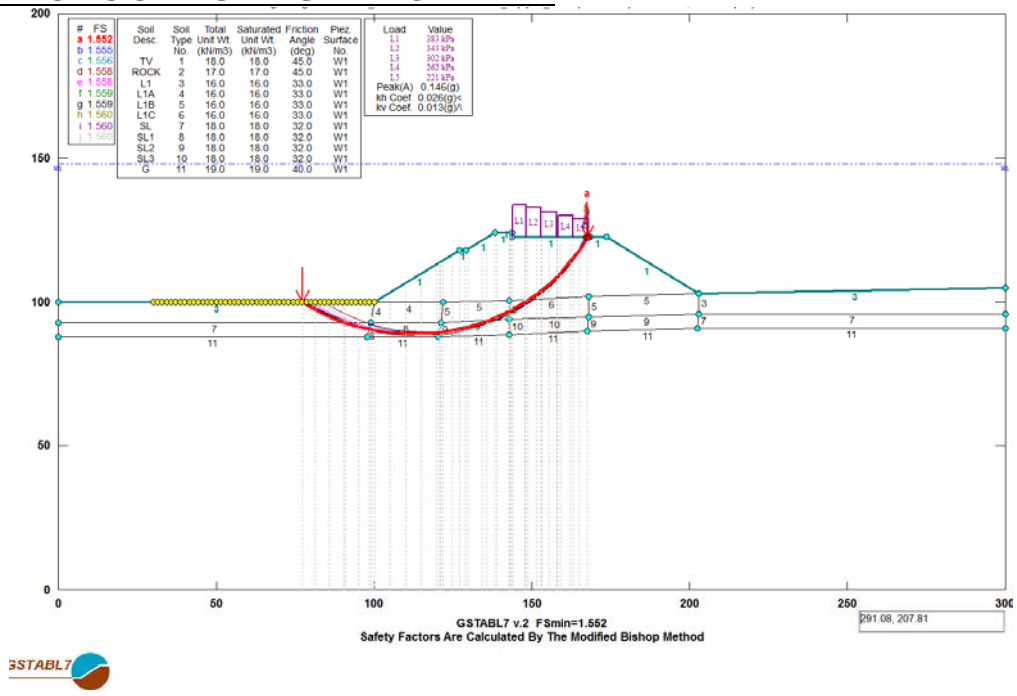



FIG. 7-24 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO C – STABILITA' E CAPACITA' PORTANTE IN ESERCIZIO CON SISMA

La seguente Tab. 7-3 invece riassume i coefficienti di sicurezza ottenuti, che come si può osservare, in tutti i casi, risultano superiori a quanto richiesto da normativa.

TAB. 7-3 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – SINTESI FATTORI DI SICUREZZA – CASSONE C

| CASSONE TIPO | FASE | STABILITA' GLOBALE A2 + M2 + R2 FS > 1.1 | CAPACITA' PORTANTE A1 + M1 + R3 FS > 1.4 |
|---|---|---|---|
| C | Fine costruzione rilevato | - | - |
| | Fine zavorramento cassone (32 gg) | 1.25 | 1.55 |
| | Esercizio + cavo | 1.12 | 1.57 |
| | Esercizio + cresta | 1.28 | 1.52 |
| | Esercizio + sisma | 1.39 | 1.55 |

Al fine di garantire la stabilità durante la fase di posa e zavorramento del cassone, fase che induce le massime sovrappressioni nel terreno di fondazione, dalle analisi risulta necessario un tempo di circa 30 giorni. In particolare, dalle analisi svolte, si potrà eseguire la posa ed un primo zavorramento fino a 130 kPa nei primi 2 giorni, per poi completare lo zavorramento fino a 263 kPa in 30 giorni. Questo per garantire una sufficiente dissipazione delle sovrappressioni e quindi la stabilità dell'opera.

## 7.4. Cassoni tipo E - risultati

### 7.4.1. Cedimenti

L'analisi Plaxis ha permesso di valutare i cedimenti nel tempo. Il grafico in Fig. 7-25 riporta il cedimento nel tempo per un punto di osservazione preso in mezzeria al cassone al tetto del rilevato in tout-venant e per uno in mezzeria ma al tetto di L1. Come si può osservare dal grafico, il cedimento complessivo risulta

essere circa 0.74 m, di cui, per differenza, 5 cm sono il cedimento del solo materiale da costruzione.

La costruzione stessa è stata simulata in 50 gg e si può osservare che quasi tutto il cedimento si è già sviluppato in contemporanea con la costruzione stessa. Si può infatti osservare un tempo di consolidazione complessivo di circa 60 gg. La successiva posa del cassone si può quindi correttamente considerare che avverrà quando la consolidazione legata alla costruzione della diga in terra si sarà già esaurita.

La successiva Fig. 7-26 mostra invece il cedimento complessivo a lungo termine, considerando anche la posa/zavorramento del cassone, la realizzazione della sovrastruttura, e la posa delle protezioni.

L'analisi mostra un cedimento a lungo termine di circa 1.14 m, di cui 0.20 m legati al materiale da costruzione. Anche in questo caso il cedimento risulta contemporaneo alla costruzione stessa.

La successiva realizzazione del muro paraonde comporterà un ulteriore cedimento di circa 0.03 m, come si osserva nella seguente Fig. 7-27.

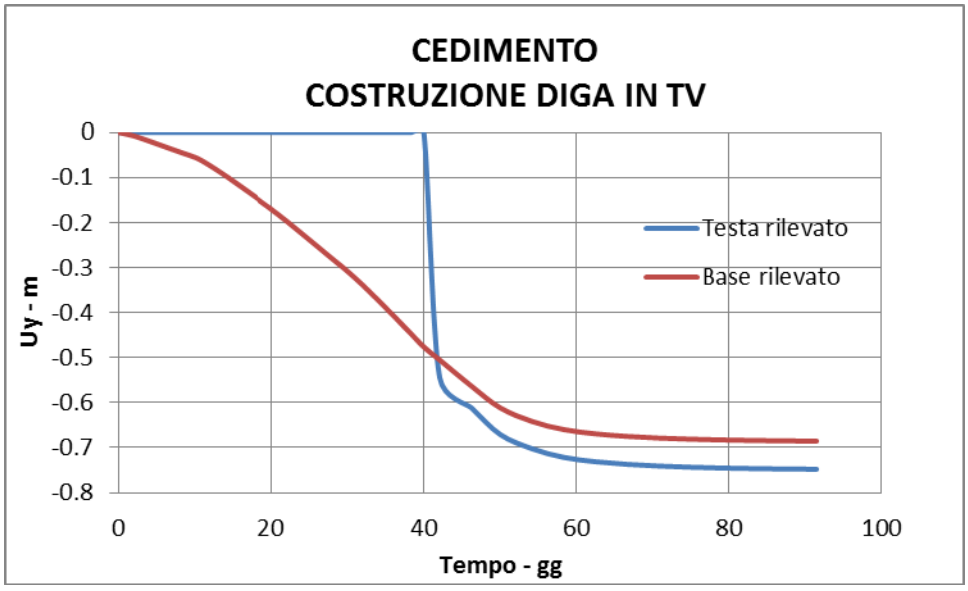



FIG. 7-25 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO E – CEDIMENTO COSTRUZIONE DIGA IN TV

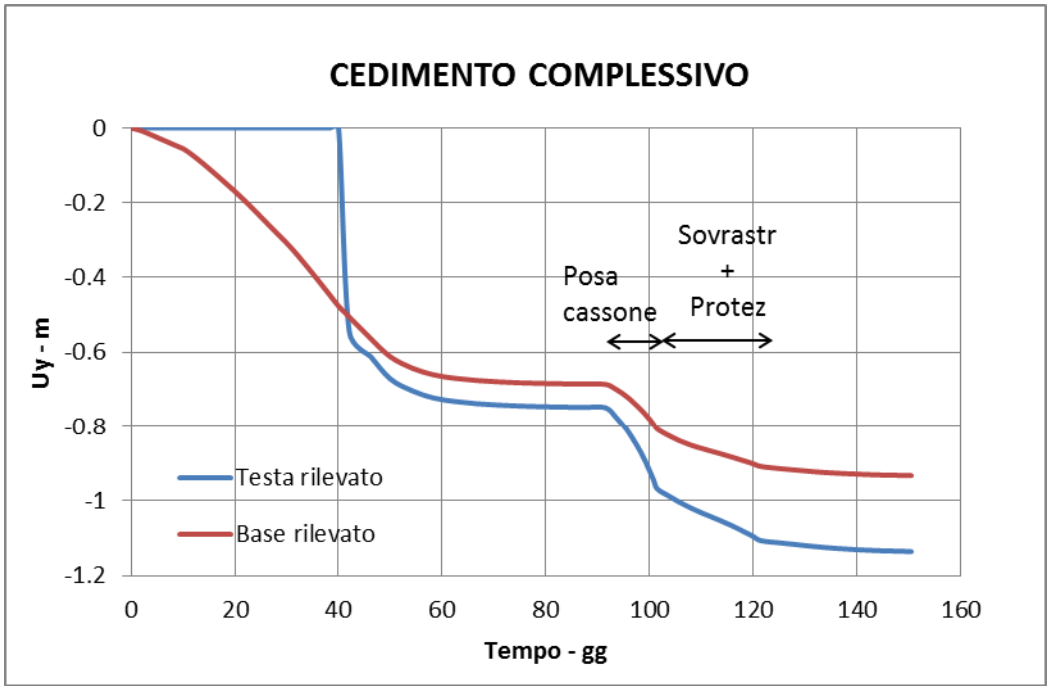



FIG. 7-26 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO E – CEDIMENTO A LUNGO TERMINE

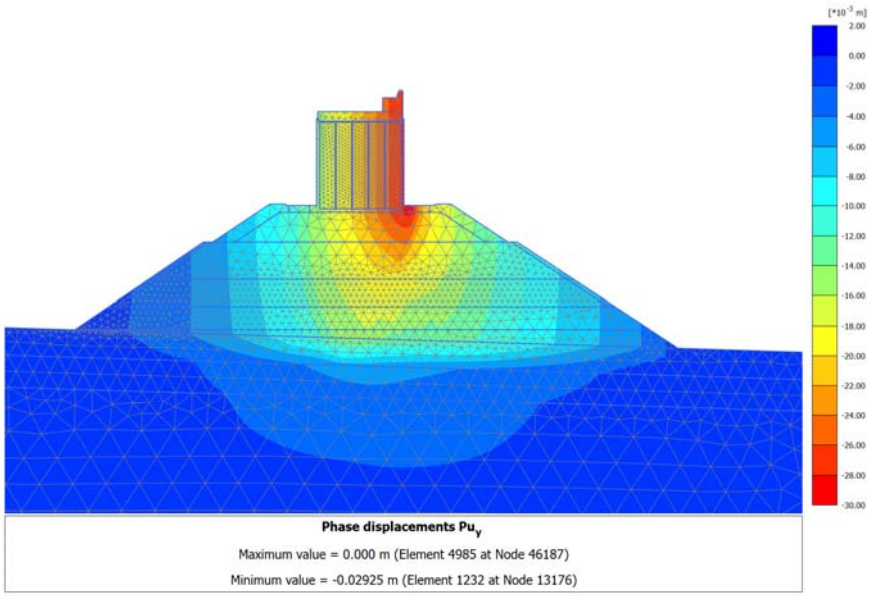



FIG. 7-27 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO E – CEDIMENTO MURO PARAONDE

Per quanto riguarda i carichi d'onda, si riporta in Fig. 7-28 lo spostamento orizzontale causato dal cavo e dalla cresta d'onda con tempo di ritorno 250 anni. Tali spostamenti sono circa 4.7 e 6.2 cm rispettivamente. E' importante però sottolineare che tali carichi sono stati applicati in condizioni drenate, pertanto rappresentano un limite superiore del cedimento reale, che, poiché sono carichi ciclici, risulterà sicuramente inferiore.

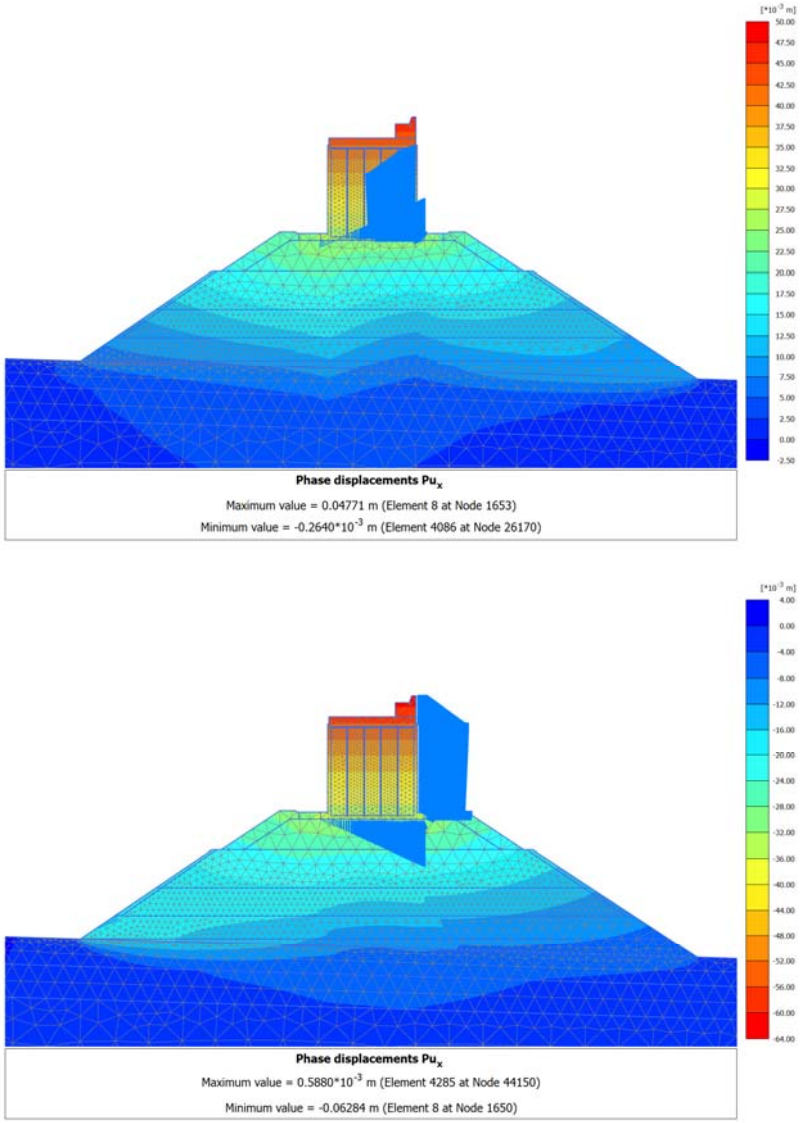



FIG. 7-28 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO E – SPOSTAMENTI ORIZZONTALI PER CAVO E CRESTA D'ONDA

Per meglio comprendere l'andamento dei cedimenti all'interno della diga, in Fig. 7-29 si riporta il cedimento lungo una sezione trasversale sul fondale a lungo termine. Si osserva pertanto che il massimo cedimento di circa 0.9 m si sviluppa al di sotto del cassone. A tale cedimento si devono aggiungere come detto 0.20 m di cedimento del corpo del rilevato stesso.

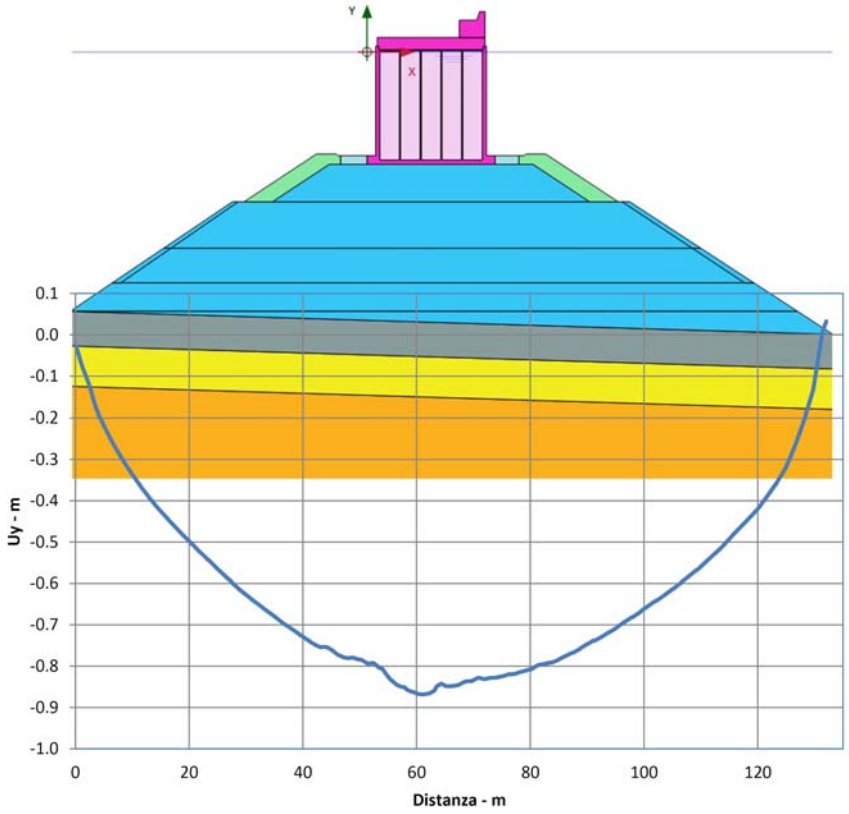



FIG. 7-29 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO E – CEDIMENTO LUNGO TERMINE TRASVERSALE

### 7.4.2. Stabilità

Come prima anticipato la stabilità globale e la capacità portante sono state valutate tramite il codice GSTABL nelle fasi più critiche, sia di costruzione, che di esercizio. Si sottolinea che tutti i carichi agenti sul cassone ed il peso del cassone stes-

so sono stati applicati nel programma come carico distribuito sulla base del cassone.

Per quanto concerne le fasi temporanee, fine costruzione rilevato e fine posa/zavorramento cassone, si sono applicati i coefficienti ru, per simulare la presenza di sovrappressioni nel terreno di fondazione. Tali coefficienti sono stati valutati tramite i valori di sovrappressione calcolati con il modello Plaxis.

Nelle seguenti figure da Fig. 7-30 a Fig. 7-34 si riportano i risultati delle analisi svolte, in cui si può osservare la superficie di scivolamento più critica ed il relativo coefficiente di sicurezza.

COSTRUZIONE RILEVATO

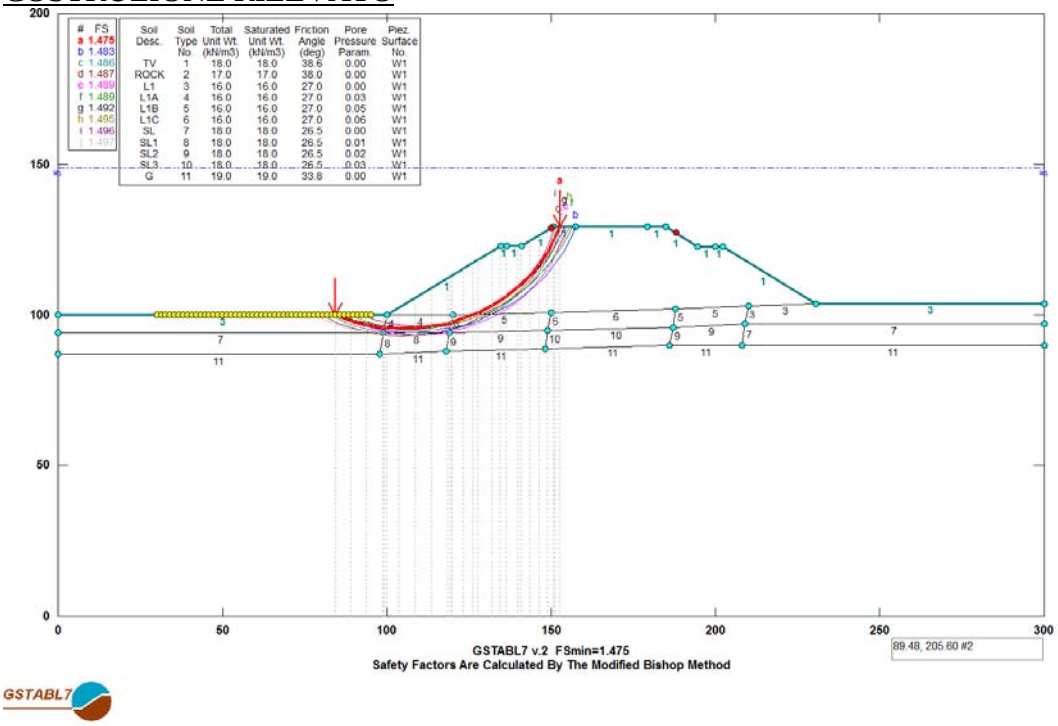
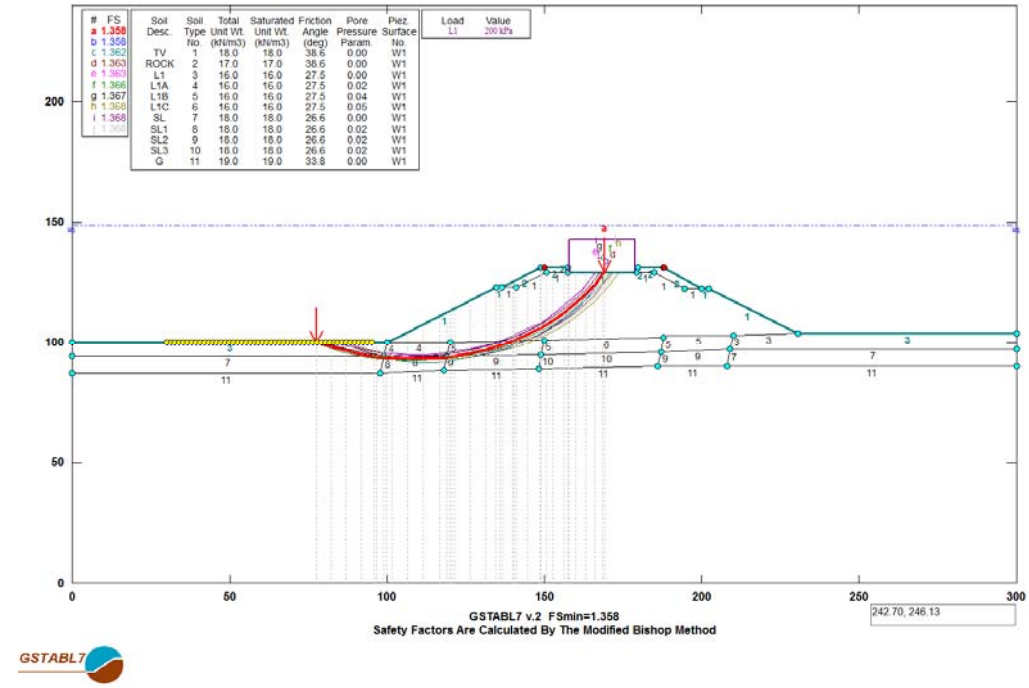



FIG. 7-30 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO E – STABILITÀ FASE TEMPORANEA

POSA E ZAVORRAMENTO CASSONE STABILITA'




POSA E ZAVORRAMENTO CASSONE CAPACITA' PORTANTE

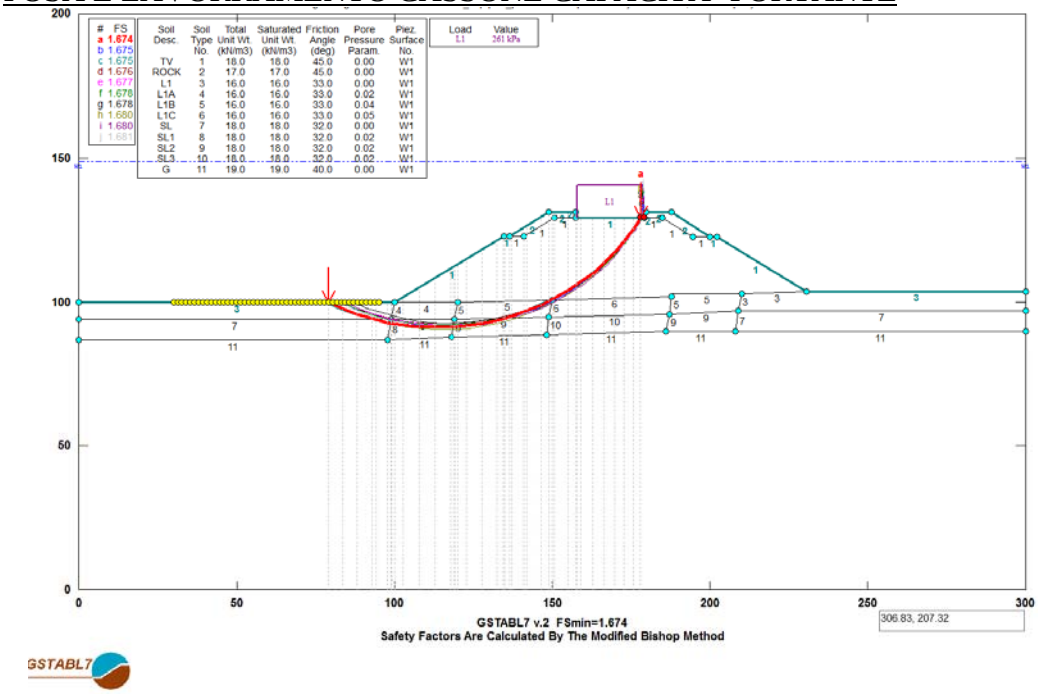
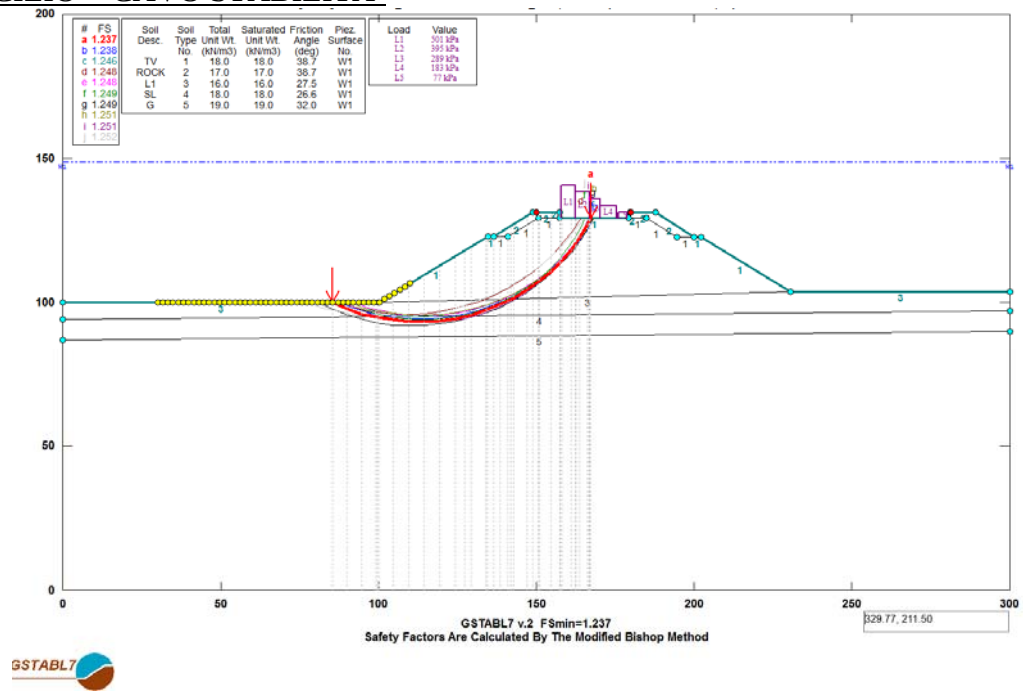



FIG. 7-31 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO E – STABILITA' POSA CASSONE

ESERCIZIO + CAVO STABILITA'




ESERCIZIO + CAVO CAPACITA' PORTANTE

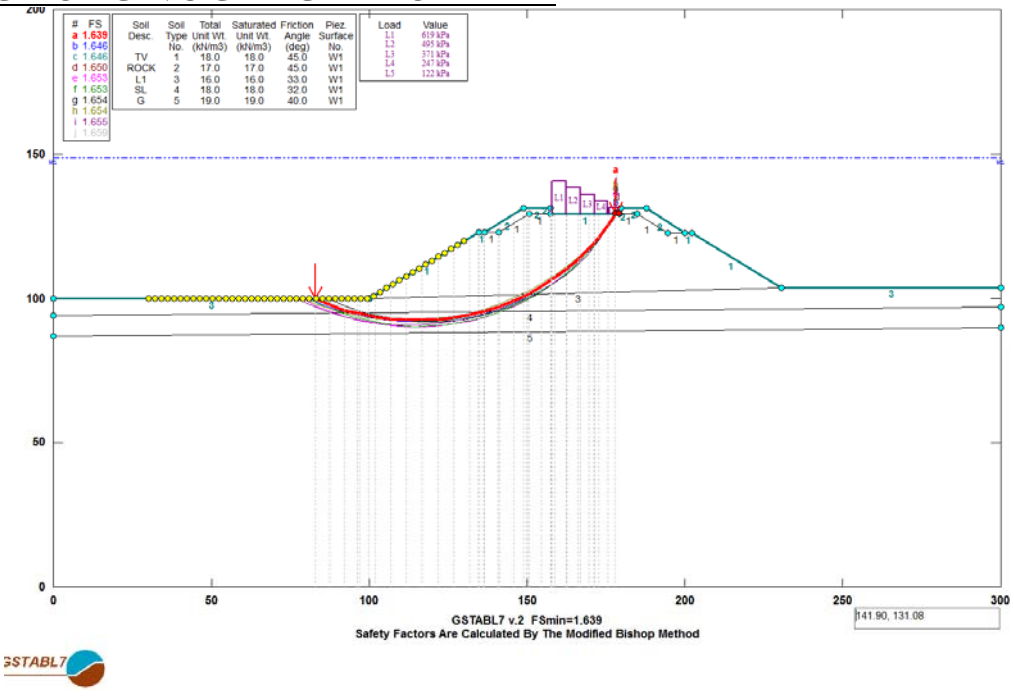
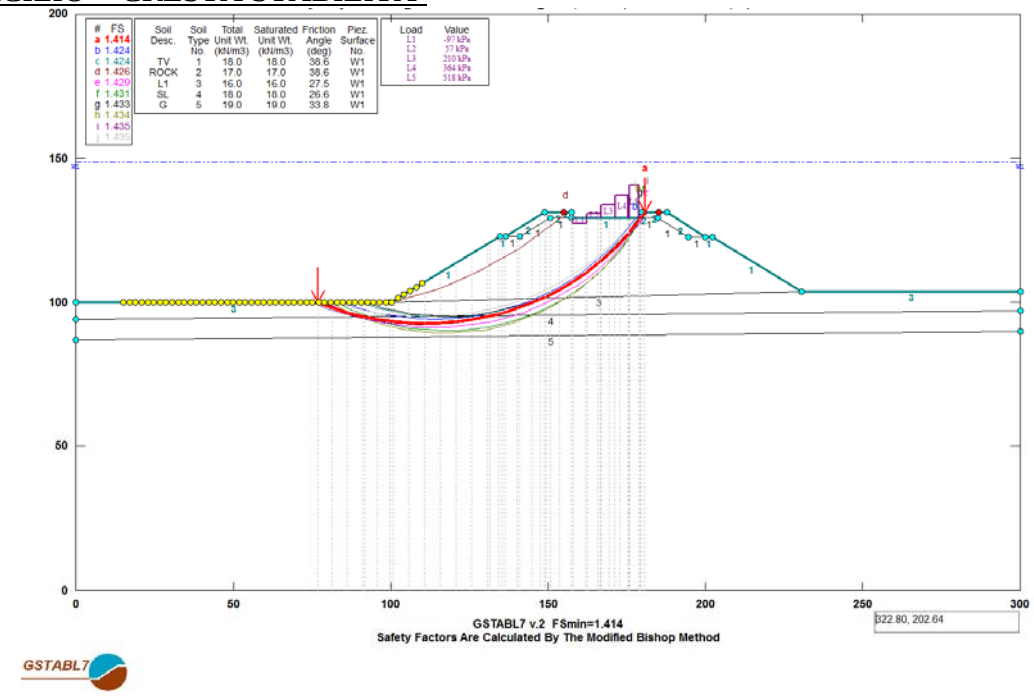



FIG. 7-32 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO E – STABILITA' E CAPACITA' PORTANTE IN ESERCIZIO CON CAVO

ESERCIZIO + CRESTA STABILITA'




ESERCIZIO + CRESTA CAPACITA' PORTANTE

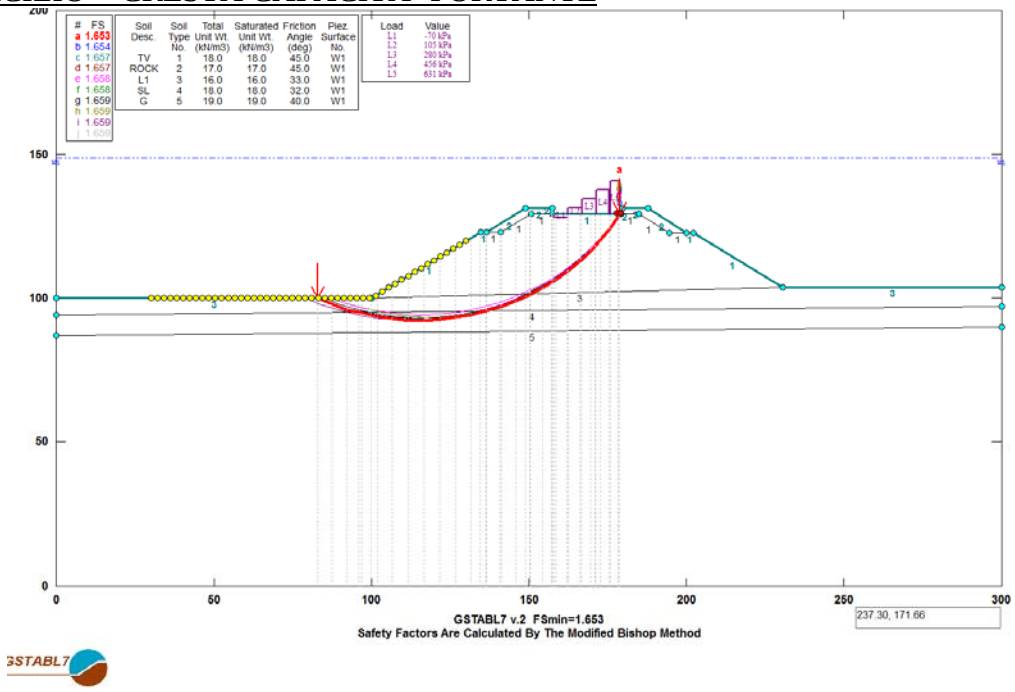
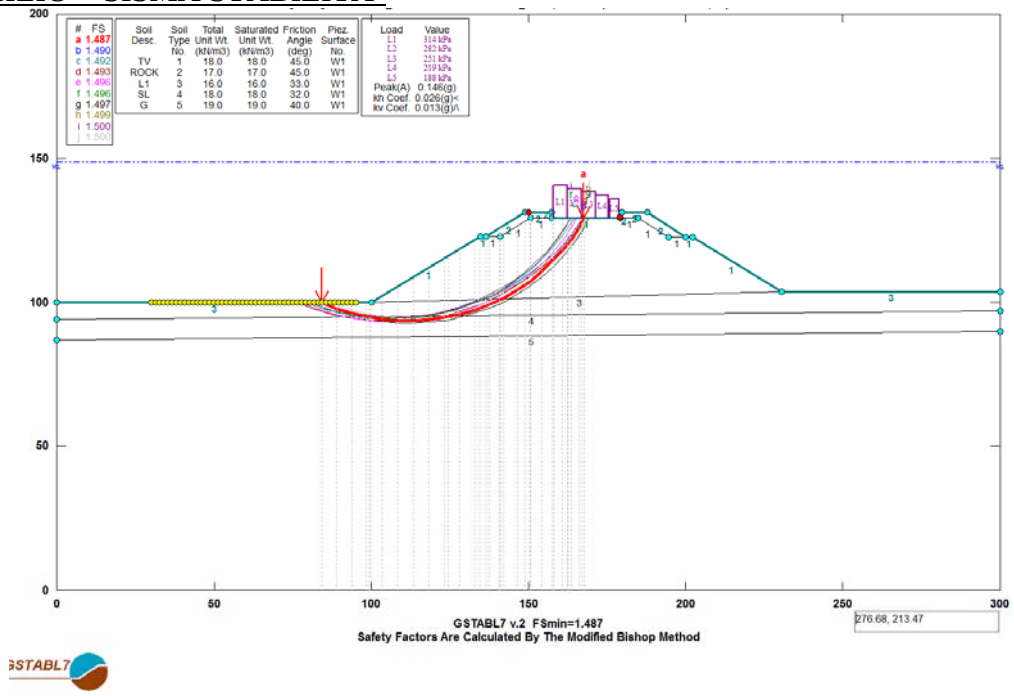



FIG. 7-33 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO E – STABILITA' E CAPACITA' PORTANTE IN ESERCIZIO CON CRESTA

ESERCIZIO + SISMA STABILITA'




ESERCIZIO + SISMA CAPACITA' PORTANTE

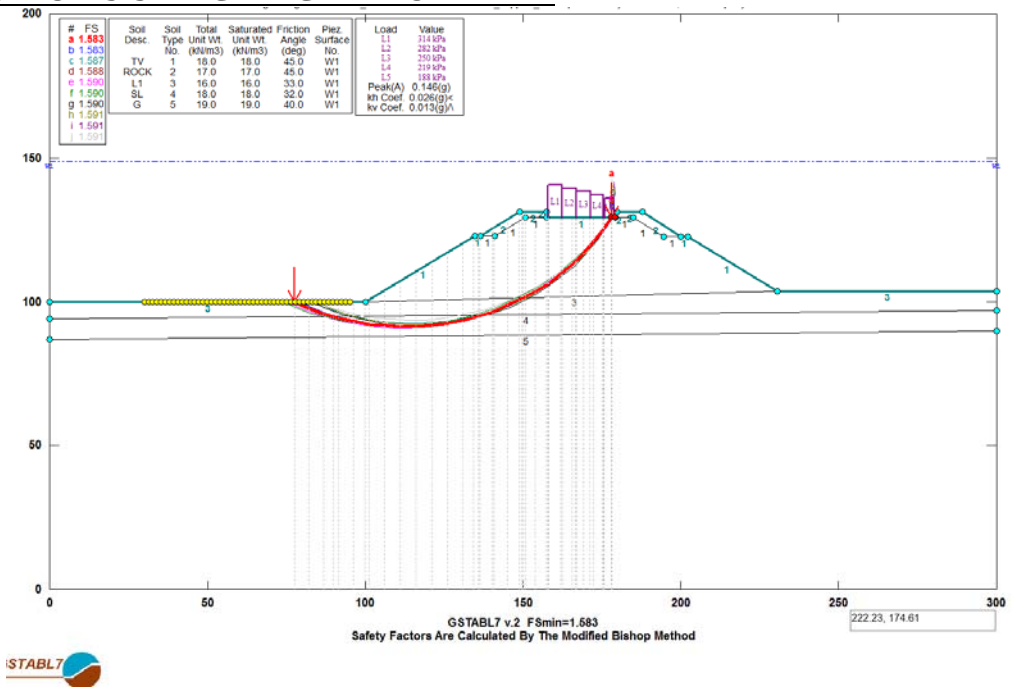



FIG. 7-34 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – CASSONE TIPO E – STABILITÀ E CAPACITÀ PORTANTE IN ESERCIZIO CON SISMA

La seguente Tab. 7-4 invece riassume i coefficienti di sicurezza ottenuti, che come si può osservare, in tutti i casi, risultano superiori a quanto richiesto da normativa.

TAB. 7-4 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – SINTESI FATTORI DI SICUREZZA – CASSONE E

| CASSONE TIPO | FASE | STABILITA' GLOBALE A2 + M2 + R2 FS > 1.1 | CAPACITA' PORTANTE A1 + M1 + R3 FS > 1.4 |
|---|---|---|---|
| E | Fine costruzione rilevato | 1.47 | - |
| | Fine zavorramento cassone | 1.36 | 1.67 |
| | Esercizio + cavo | 1.23 | 1.63 |
| | Esercizio + cresta | 1.41 | 1.65 |
| | Esercizio + sisma | 1.48 | 1.58 |

La fase più critica risulta essere quella di posa e zavorramento, poiché induce le massime sovrappressioni nel terreno di fondazione. Al fine di ridurre l'entità di queste, sarà opportuno eseguire lo zavorramento in almeno 10 giorni, così da permettere in parte la loro dissipazione, ottenendo quindi un sufficiente fattore di sicurezza.

# 8. CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI

La Nuova Diga Foranea verrà realizzata tramite un rilevato in tout-venant su cui si imbaseranno dei cassoni cellulari. Nella presente relazione sono state svolte le verifiche geotecniche di stabilità globale e capacità portante, nonché sono stati calcolati i cedimenti sia in fase di costruzione che di esercizio.

A tal fine si sono svolte, per i cassoni più critici, delle analisi tramite il codice di calcolo agli elementi finiti Plaxis 2D e tramite il codice GSTABL per le analisi ad equilibrio limite.

I modelli Plaxis hanno simulato tutte le diverse fasi costruttive, permettendo di valutare lo sviluppo delle sovrappressioni nel tempo e conseguentemente il cedimento.

La seguente Tab. 8-1 sintetizza i cedimenti massimi ottenuti dalle analisi per i diversi cassoni, estrapolando da tali risultati quelli dei restanti cassoni. Nella tabella si distingue il cedimento relativo alla costruzione del solo rilevato fino alla quota di imbasamento cassone, da quello relativo alla posa/zavorramento del cassone stesso e alle operazioni di completamento della sezione, quali la realizzazione della sovrastruttura o delle protezioni. Si sottolinea che il cedimento di posa/zavorramento e completamento, per i cassoni A e B, comprende anche l'aliquota di indotto legata al rinfianco in terra lato mare.

Il cedimento di costruzione, ossia quello legato alla realizzazione del solo rilevato in tout-venant e alla posa e zavorramento dei cassoni risulta compreso tra 0.45 m e 0.74 m. A lungo termine, tale cedimento diventa, a causa della posa cassoni e successivo completamento della sezione, 0.70 m – 1.14 m.

TAB. 8-1 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – SINTESI CEDIMENTI

| CASSONE | W costruzione rilevato (m) | W posa/zav + completamento (m) | W costruzione TOT (m) |
|---|---|---|---|
| A | 0.45 | 0.25 | 0.70 |
| B | 0.50 | 0.25 | 0.75 |
| C | 0.55 | 0.62 | 1.17 |
| D | 0.74 | 0.40 | 1.14 |
| E | 0.74 | 0.40 | 1.14 |

Le analisi mostrano un tempo di consolidazione piuttosto rapido, nell'ordine di 1.5 – 2 mesi ed infatti i cedimenti risultano pressoché contemporanei alla costruzione.
Dalle analisi si è potuto valutare come la costruzione del rilevato possa procedere per strati di circa 5 m di spessore in 10 giorni su tutta la lunghezza, senza la necessità di berme laterali, senza compromettere la stabilità, raggiungendo pertanto la quota di imbasamento in circa 40-50 giorni.
Dal punto di vista della stabilità, la fase più critica risulta essere quella di posa e zavorramento cassoni, in quanto si applica il maggior carico in un tempo ridotto.
Al fine di garantire la stabilità tali carichi andranno quindi applicati in un tempo di almeno 10 giorni, tranne il cassone C, che, essendo il cassone con il carico maggiore, risulta essere il più critico. Per questo motivo questo andrà posato e zavorrato in un tempo maggiore. In particolare si potrà posare e zavorrare fino a 130 kPa nei primi 2 giorni, completando poi il carico di 263 kPa nei successivi 30 giorni.
Per quanto concerne la realizzazione del muro paraonde, questo comporterà un cedimento aggiuntivo di soli 3 – 4 cm in tutti i casi.
I carichi di esercizio sono le onde, in condizioni di cresta o cavo. Tali carichi si sono applicati in fase di esercizio permettendo di valutare lo spostamento orizzontale conseguente. Si è valutato uno spostamento orizzontale che risulta trascurabile nel caso dei cassoni A e B, per via del rinfianco in terra. Nel caso invece dei cassoni C, D ed E questo risulta nell'ordine di 0.05 – 0.12 m. Tuttavia tali spostamenti sono un limite superiore, in quanto i carichi sono stati valutati in condizioni drenate, mentre tali carichi sono carichi ciclici. Pertanto l'entità di tali spostamenti sarà sicuramente inferiore.
La seguente Tab. 8-2 sintetizza i fattori di sicurezza ottenuti dalle diverse analisi di stabilità, che sono state svolte tramite analisi all'equilibrio limite, sia nelle fasi temporanee costruttive che in esercizio. Come si può osservare in tutti i casi le verifiche risultano soddisfatte.

TAB. 8-2 VADO LIGURE – NUOVA DIGA FORANEA – SINTESI FATTORI DI SICUREZZA

| CASSONE TIPO | FASE | STABILITA' GLOBALE A2 + M2 + R2 FS > 1.1 | CAPACITA' PORTANTE A1 + M1 + R3 FS > 1.4 |
|---|---|---|---|
| A | Fine costruzione rilevato | - | - |
| | Fine zavorramento cassone | 1.38 | 2.28 |
| | Esercizio + cavo | 1.42 | 2.01 |
| | Esercizio + cresta | 1.21 | 2.43 |
| | Esercizio + cavo muro | 1.30 | 1.95 |
| | Esercizio + cresta muro | 1.15 | 2.35 |
| | Esercizio + sisma | 1.53 | 2.21 |
| | Esercizio + sisma muro | 1.46 | 2.18 |
| B | Esercizio + cavo | 1.13 | 1.60 |
| | Esercizio + cresta | 1.33 | 1.58 |
| | Esercizio + sisma | 1.42 | 1.53 |
| C | Fine costruzione rilevato | - | - |
| | Fine zavorramento cassone (32 gg) | 1.25 | 1.55 |
| | Esercizio + cavo | 1.12 | 1.57 |
| | Esercizio + cresta | 1.28 | 1.52 |
| | Esercizio + sisma | 1.39 | 1.55 |
| E | Fine costruzione rilevato | 1.47 | - |
| | Fine zavorramento cassone | 1.36 | 1.67 |
| | Esercizio + cavo | 1.23 | 1.63 |
| | Esercizio + cresta | 1.41 | 1.65 |
| | Esercizio + sisma | 1.48 | 1.58 |