

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO**

**NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO–CATANIA**

**U.O. INFRASTRUTTURE CENTRO**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4B)**

**GEOTECNICA**

**FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE**

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

RS3V 40 D 29 RH GE0005 016 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	L.Castellani	Febbraio 2020	M. Arcangeli	Febbraio 2020	F.Sparacino	Febbraio 2020	F. Arduini Febbraio 2020

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma  
n. 15492 del 4/4  
ITALFERR S.p.A.  
Direzione Tecnica  
Infrastrutture Centro  
Dott. Ing. Fabrizio Arduini



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO**  
**NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA**  
PROGETTO DEFINITIVO  
TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	2 di 62

## INDICE

1. PREMESSA .....	4
2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	5
2.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	5
2.2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	5
2.3 SOFTWARE.....	5
3. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	6
3.1 INDAGINI ESEGUITE.....	6
3.2 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO .....	6
3.3 FALDA.....	15
3.4 CATEGORIA SOTTOSUOLO SISMICA .....	15
4. GEOMETRIA MODELLATA E STUDIO DELLA GRADONATURA .....	17
4.1 DIMENSIONE DEL MODELLO .....	17
4.2 GEOMETRIA DEL PIANO CAMPAGNA.....	18
4.3 GRADONATURA DI PROGETTO E PALI DI CONSOLIDAMENTO.....	19
5. ANALISI INTERVENTO DI CONSOLIDAMENTO.....	22
5.1 PREMESSA.....	22
5.2 MODELLI COSTITUTIVI DEL TERRENO.....	22
5.3 PARAMETRI GEOTECNICI E STRATIGRAFIA.....	26
5.4 STRUTTURE ED ELEMENTI DI CONSOLIDAZIONE .....	32
5.5 FASI DI CALCOLO .....	35
5.5.1 Inizializzazione dello stato tensionale .....	35
5.5.2 Scavo della gradonatura .....	36
5.5.3 Realizzazione dei pali di consolidamento.....	38



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO**  
**NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA**  
 PROGETTO DEFINITIVO  
 TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	3 di 62

5.5.4	Rilevato fino a quota 429 m s.l.m. ....	40
5.5.5	Rilevato fino a quota 434 m s.l.m. ....	42
5.5.6	Rilevato fino a quota 439 m s.l.m. ....	43
5.5.7	Rilevato fino a quota 444 m s.l.m. ....	45
5.5.8	Ultimazione dell'opera.....	46
5.5.9	Fase di Esercizio .....	48
5.6	TEMPI E MODALITÀ DI ANALISI .....	49
5.7	RISULTATI DELL'ANALISI DI CONSOLIDAZIONE.....	50
5.8	RISULTATI IN TERMINI DI SPOSTAMENTI.....	52
5.9	RISULTATI IN TERMINI DI SOLLECITAZIONI STRUTTURALI .....	59

## 1. PREMESSA

Nella presente relazione si espone il modello geotecnico 3D alle differenze finite che include i 100 m finali della struttura di stazione, gli scatolari ferroviari di approccio all'edificio di stazione, lo scatolare stradale di monte ed i primi 50 m circa di rilevato ferroviario di linea (senza strutture portate, se non i binari). Il rilevato ha un'altezza media di circa 15 m misurati dal piede dell'edificio di stazione al piede del rilevato.

Nel seguito, dopo una sintesi delle indagini e della caratterizzazione geotecnica dell'area, si espongono le caratteristiche e i parametri del modello 3D, le fasi di calcolo modellate ed i principali risultati ottenuti in regime di accoppiamento solido-fluido, con la valutazione degli effetti differiti nel tempo dovuti alla consolidazione.

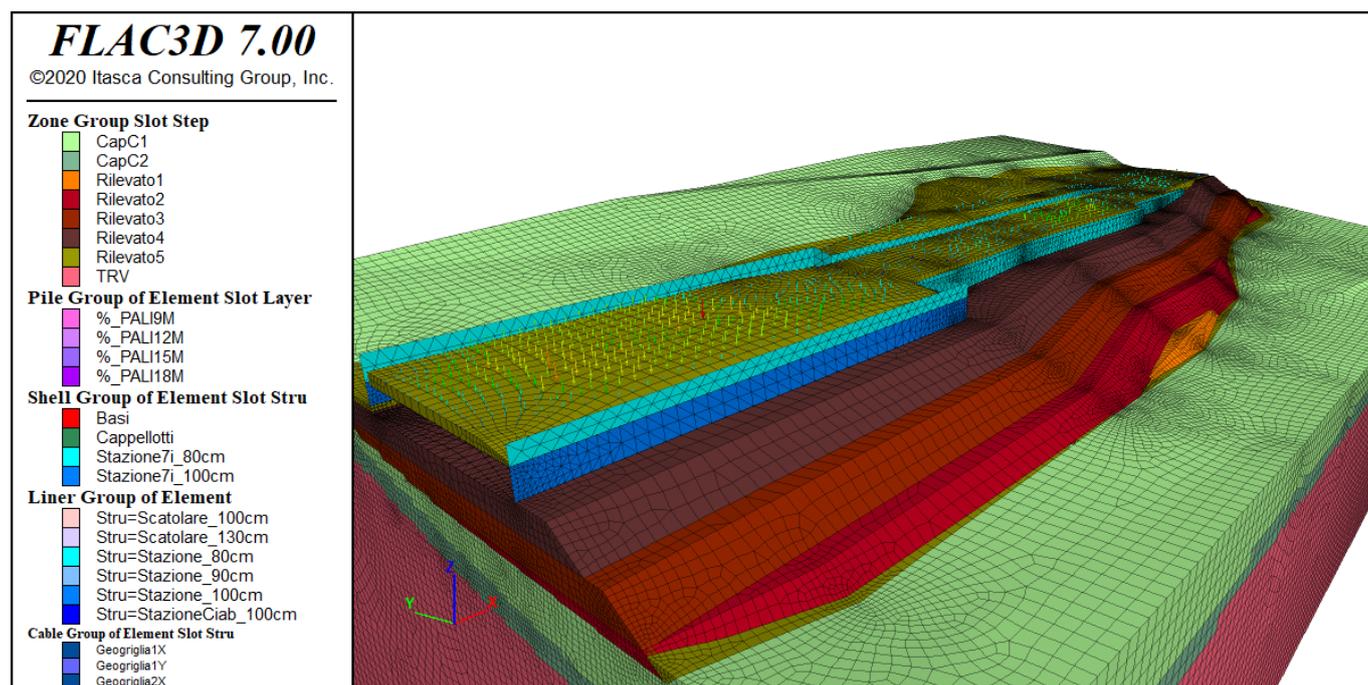


Figura 1. Modello geotecnico tridimensionale



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO**  
**NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA**  
PROGETTO DEFINITIVO  
TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	5 di 62

## 2. **NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

### 2.1 **Normativa di riferimento**

- [N.1]. Norme Tecniche per le Costruzioni, DM del 17/01/2018;  
[N.2]. C.M. 21/01/2019 n.7: Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni.

### 2.2 **Documenti di riferimento**

- [DC1]. RS3V 40 D09 RH GE0001 001 - Nuovo collegamento Palermo-Catania, tratta Nuova Enna - Dittaino. Progetto Definitivo. Relazione Geotecnica tratti all'aperto - Lotto 4b.  
[DC2]. RS3V 40 D09 F6 GE0001 001 ÷ RS3V 40 D09 F6 GE0001 010 - Nuovo collegamento Palermo-Catania tratta Nuova Enna - Dittaino. Progetto Definitivo. Profilo geotecnico - Lotto 4B – 10 tavole.  
[DC3]. RS3V 40 D29 RB FV0100 001 A - FV01-Stazione di Enna - Relazione di calcolo e stabilità rilevato  
[DC4]. RS3V 40 D29 RB FV0100 002 A - FV01-Stazione di Enna - Relazione di calcolo e stabilità rilevato  
[DC5]. RS3V 40 D29 RB FV0100 003 A - FV01-Stazione di Enna - Relazione di calcolo e stabilità rilevato  
[DC6]. RS3V 40 D29 RH GE0005 017 A - Modello B - Analisi tridimensionale dell'esecuzione della stazione nell'ipotesi di condizioni drenate con legame costitutivo Hardening Soil / Hardening Soil Small Strain

### 2.3 **Software**

- Flac3D versione 7.00.117, licenza n. 242-039-0044-22565.



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO  
NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO  
TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	6 di 62

### 3. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Nel presente capitolo si riporta la caratterizzazione geotecnica per l'opera in esame, valutata sulla base dell'interpretazione delle indagini geotecniche svolte in prossimità dell'opera.

La stratigrafia di riferimento è individuata sulla base delle indagini eseguite in corrispondenza dell'opera, come rappresentate nel profilo stratigrafico longitudinale.

Per maggiori dettagli sulla caratterizzazione geotecnica si rimanda alla Relazione geotecnica generale [DC1].

#### 3.1 Indagini eseguite

In corrispondenza dell'opera sono state eseguite le seguenti indagini in sito:

- sondaggi 4SD2 , 4A\_S30, 4S10;
- DPSH08;
- Masw6-HVSR90;
- Stese geofisiche LS11, LS21, LS22 con restituzione tomografica.

In corrispondenza dei sondaggi sono stati prelevati campioni indisturbati e rimaneggiati per prove di laboratorio.

Nei sondaggi sono stati installati piezometri per il rilievo della falda.

#### 3.2 Stratigrafia e parametri geotecnici di progetto

Sulla base dei risultati delle indagini (in sito ed in laboratorio) è stato intercettato a parire da p.c. cappellaccio alterato della formazione di base (unità cap-c) limoso argilloso sabbioso con spessore massimo 14.5 m ed a seguire la formazione di base argilloso marnosa **Formazione di Terravecchia** unità TRV, fino alla massima profondità investigata. In corrispondenza del sondaggio 4S10, verso monte inizia ad affiorare la Formazione di Terravecchia in facies arenarie e sabbie alternate con peliti (Unità TRVa).

Dalle stese geofisiche a restituzione tomografica, gli spessori delle coperture non sembrano variare in maniera significativa nelle sezioni tracciate, quindi la situazione stratigrafica appare sostanzialmente omogenea nell'area in esame.

Nei sondaggi sono stati installati piezometri che hanno rilevato livello massimo di falda a p.c..

Nel seguito si sintetizzano le caratteristiche geotecniche di progetto per le varie unità geotecniche, in accordo a quanto definito nella relazione geotecnica generale, a cui si rimanda per i dettagli.



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO  
NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA**  
PROGETTO DEFINITIVO  
TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	7 di 62

Cautelativamente, considerata l'importanza dell'opera, si prende a riferimento la situazione stratigrafica più cautelativa individuata dalle indagini fino ad ora eseguite.

**Da 0.0 a 14.5 m      Unità cap – c: Cappellaccio limoso sabbioso costituente la parte alterata della formazione di base**

$\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 0 \div 5 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\phi' = 28^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c_u = 50 \div 70 \text{ kPa } z < 9.5\text{m}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$c_u = 120 \text{ kPa } z > 9.5\text{m}$	
$V_s = 150 \div 350 \text{ m/s}$	velocità delle onde di taglio
$E_o = 100 \div 120 \text{ MPa } z < 9.5\text{m}$	modulo di deformazione elastico iniziale
$E_o = 250 \text{ MPa } z > 9.5\text{m}$	
Calfa = 0.0015	
$k = 6.0E^{-06} \div 7.0E^{-07} (1.0E^{-07}) \text{ m/s}$	permeabilità (valore medio)

**da 14.5 m a 50.0 m: Unità TRV– Formazione di Terravecchia: argilla da debolmente marnosa a marnosa**

$\gamma = 21.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 15 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\phi' = 24^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$V_s = 400 \div 600 \text{ m/s}$	velocità delle onde di taglio
$c_u = 200 \text{ kPa per } z < 25\text{m}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$c_u = 300 \div 350 \text{ kPa } z > 25\text{m}$	
$E_o = 250 \div 400 \text{ MPa per } z < 25\text{m}$	Modulo di deformazione elastico iniziale
$E_o = 800 \div 1200 \text{ MPa per } z > 25\text{m}$	modulo di deformazione elastico iniziale
$E'_{op} = E_o/10 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico operativo per analisi cedimenti rilevati
Calfa = 0.0015	
$k = 2.0E^{-08} \div 2.0E^{-06} (4.0E^{-08}) \text{ m/s}$	permeabilità(valore medio)

La falda è stata rilevata circa a p.c..

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	8 di 62

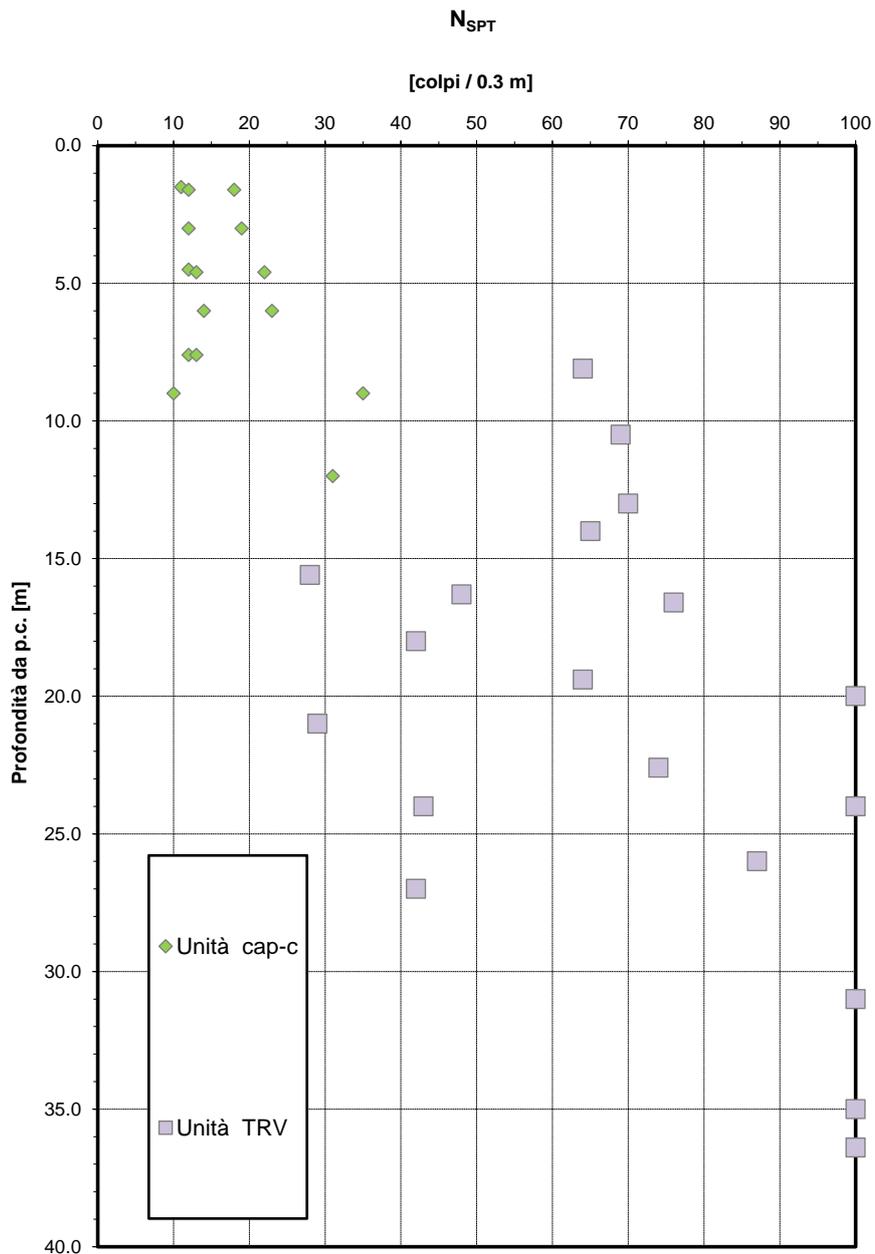
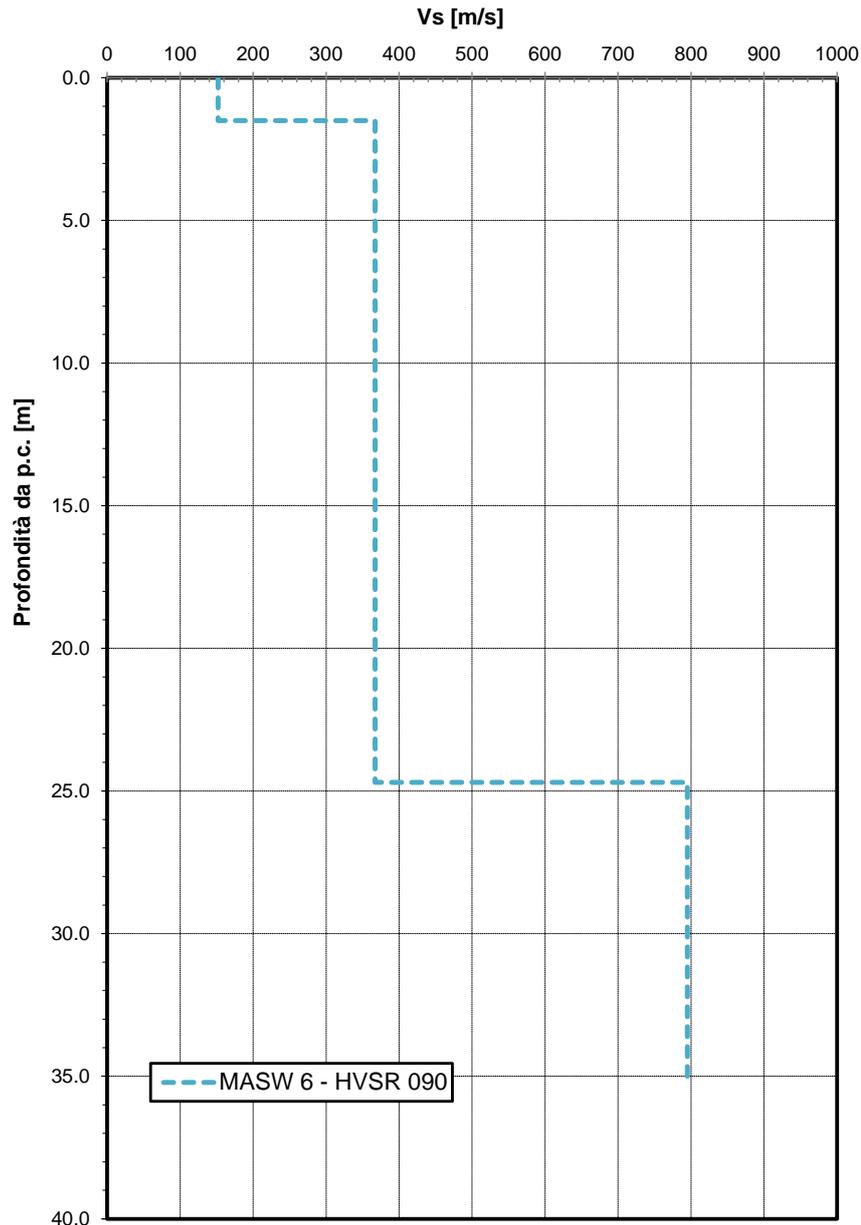


Figura 2 – Risultati prova SPT – Stazione Enna

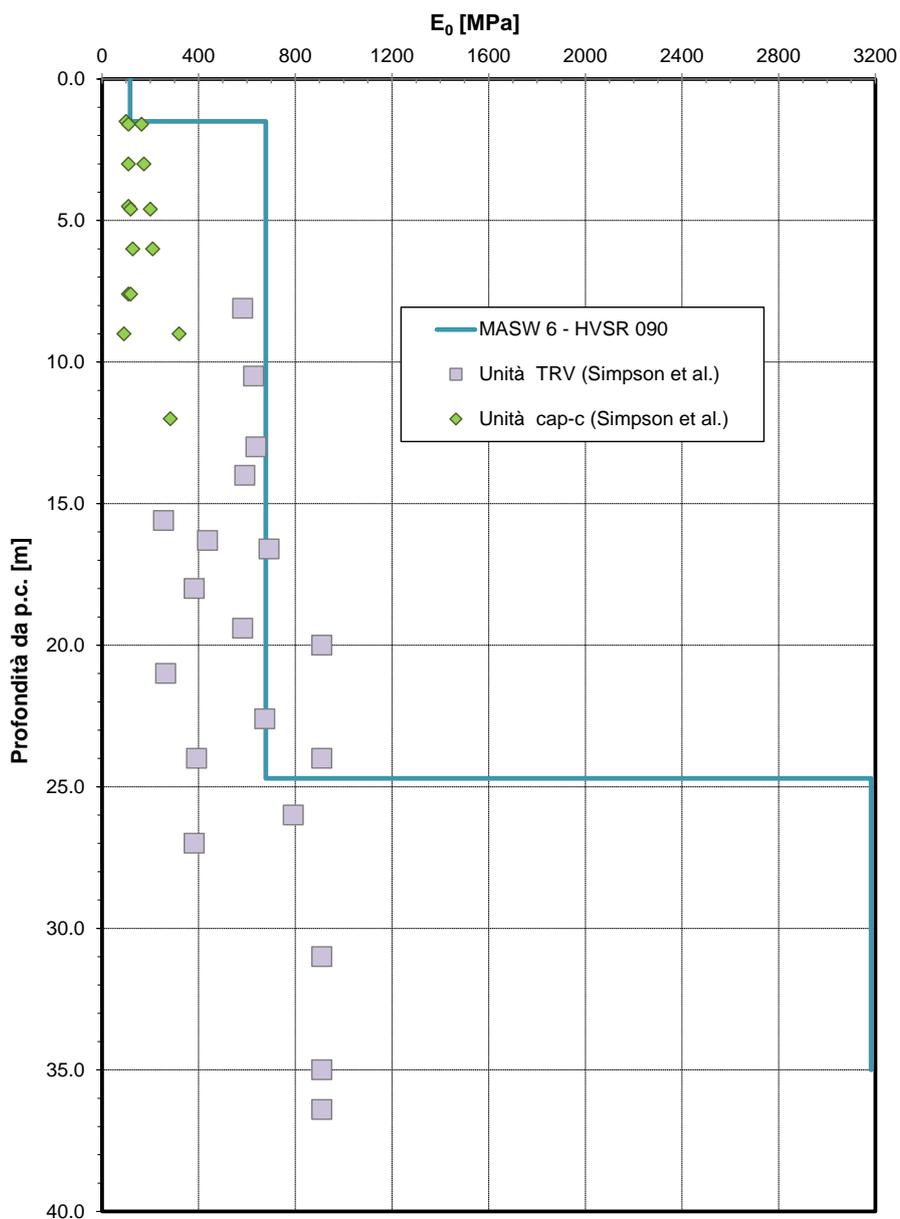
FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	9 di 62



**Figura 3 – Velocità delle onde di taglio  $V_s$  da prove Sismiche (MASW 6 – HVSR 090) – Stazione Enna**

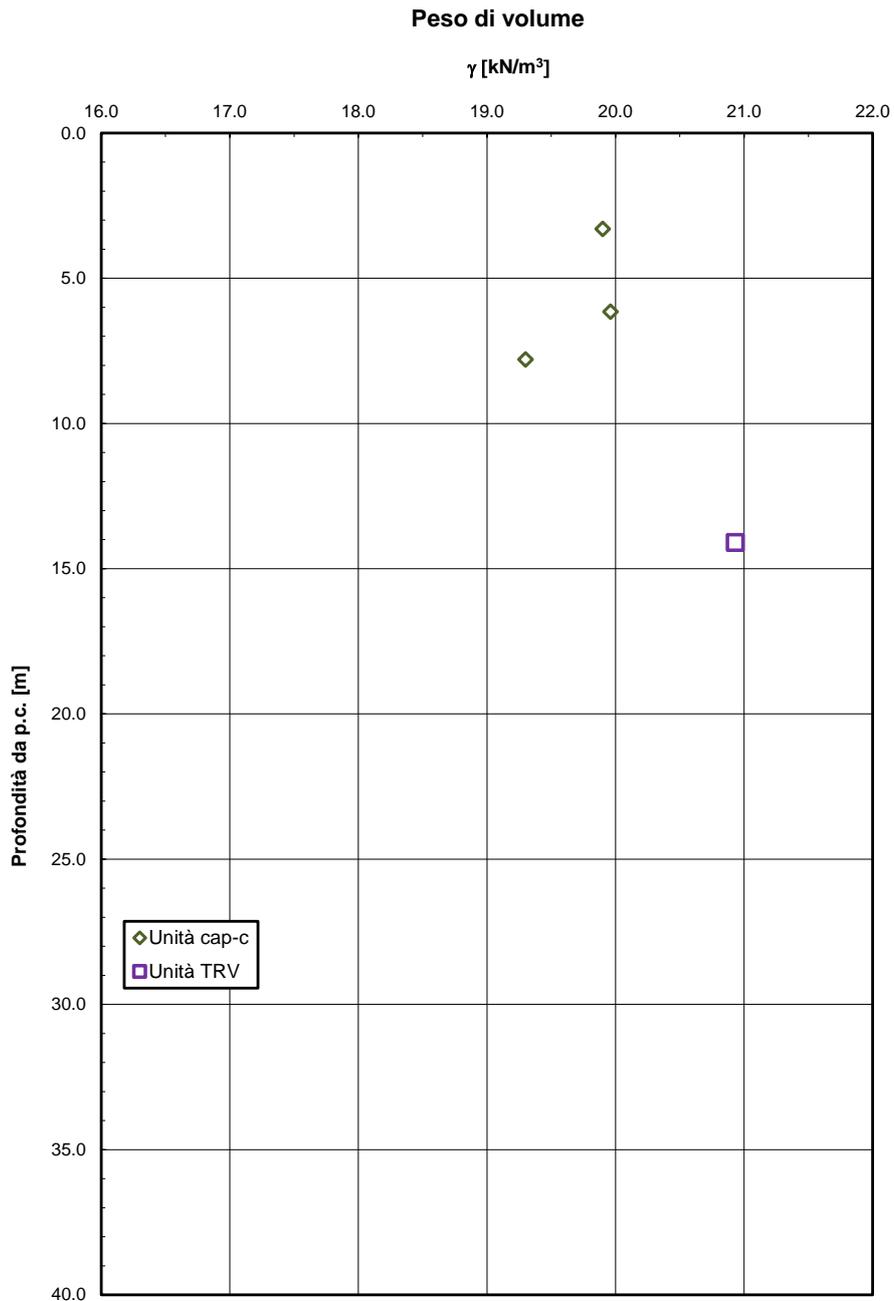
**Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT e sismiche**



**Figura 4 – Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT e sismiche – Stazione Enna**

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

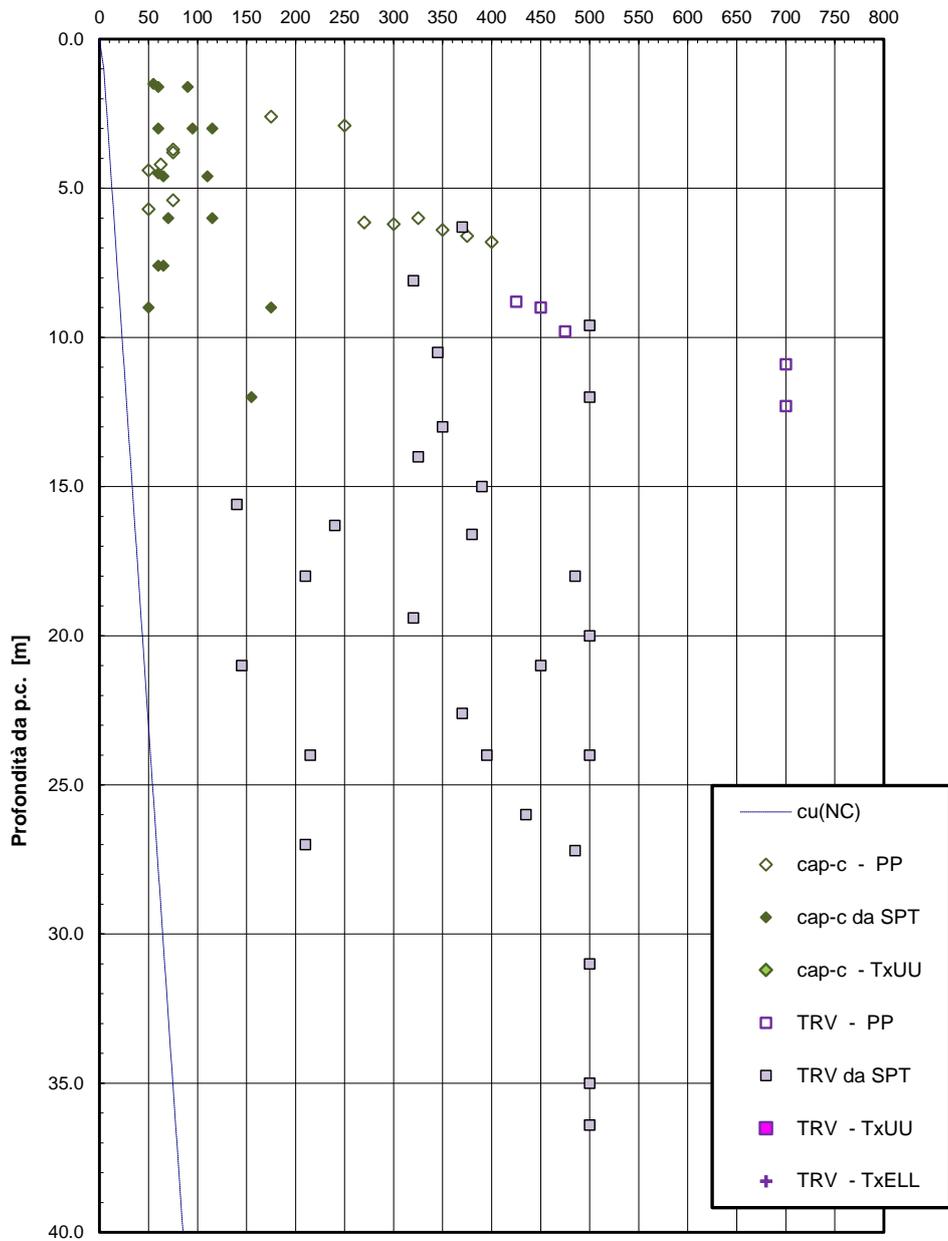
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	11 di 62



**Figura 5 – Peso di volume – Stazione Enna**

**Andamento della resistenza al taglio non drenata**

cu [kPa]



**Figura 6 – Andamento della resistenza al taglio non drenata – Stazione Enna**

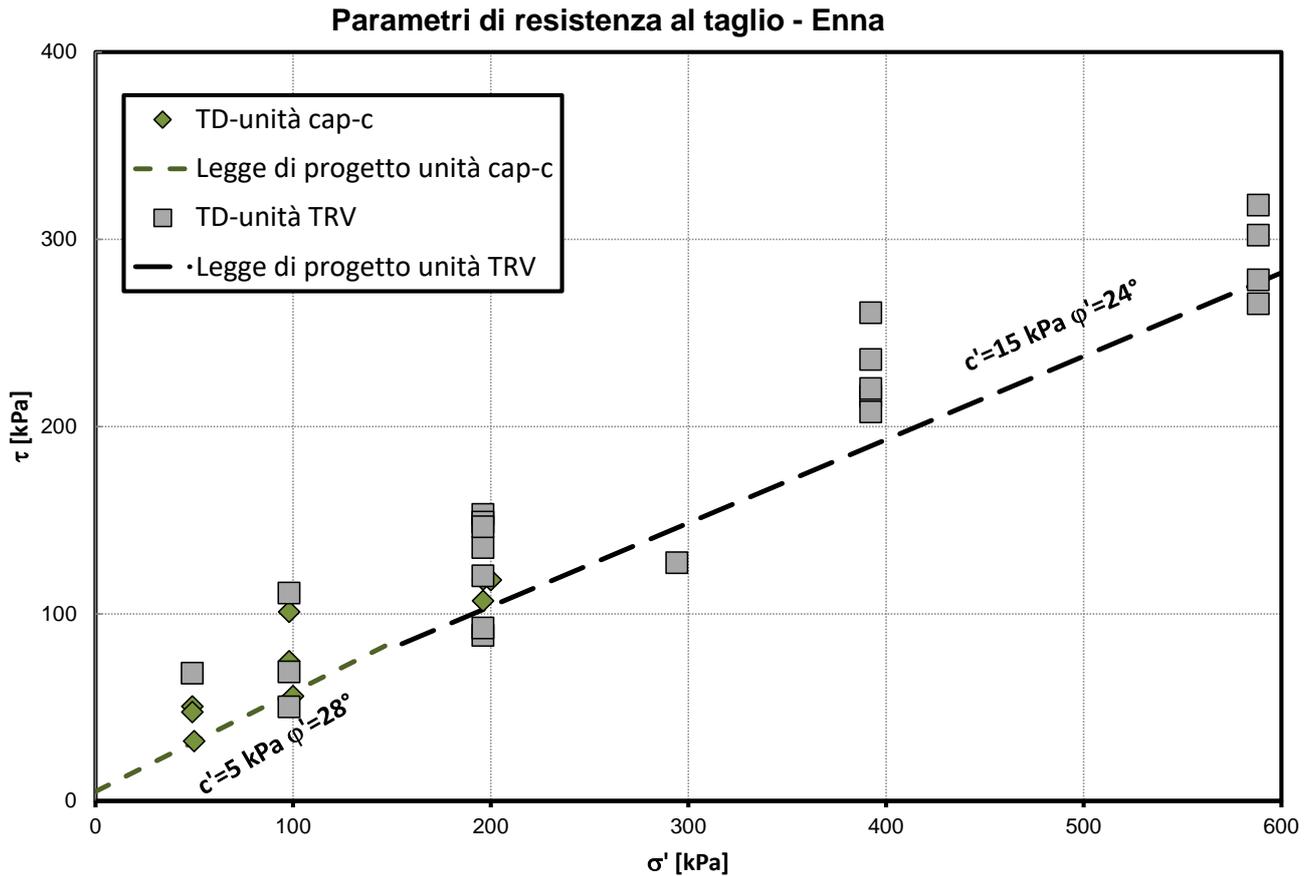
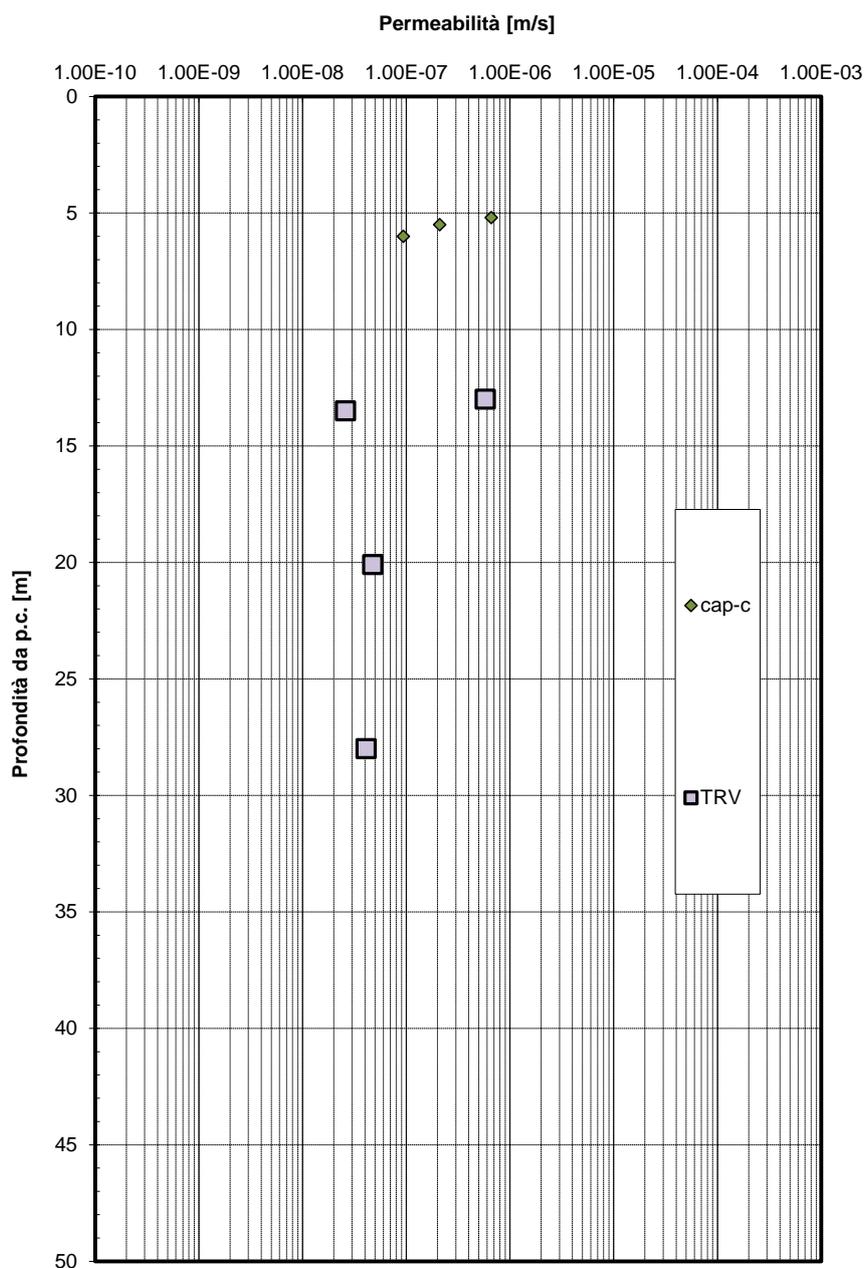


Figura 7 – Parametri di resistenza al taglio (laboratorio) – Stazione Enna

**Permeabilità da prove Lefranc e Lugeon**



**Figura 8 – Permeabilità da prove Lefranc e Lugeon – Stazione Enna**

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	15 di 62

### 3.3 Falda

Nei sondaggi sono stati installati piezometri che hanno rilevato livello massimo di falda circa a p.c..

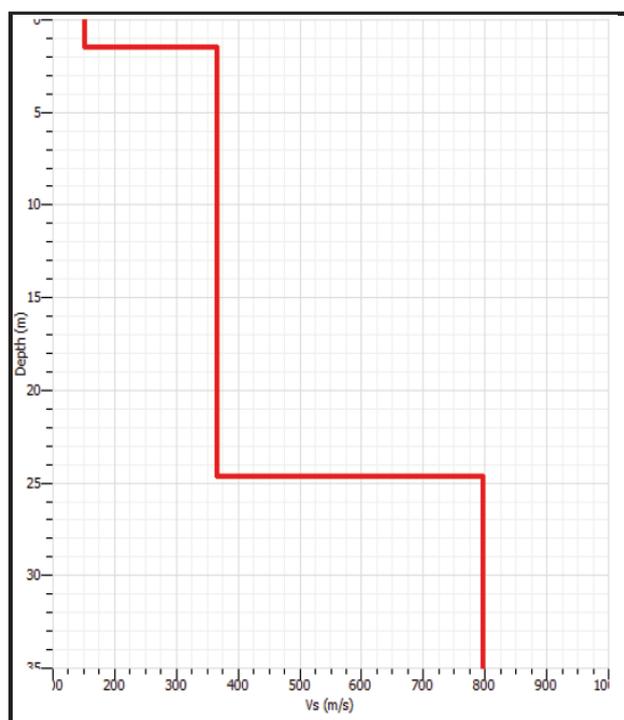
### 3.4 Categoria sottosuolo sismica

Da prova geosismica MASW (MASW 6 – HVSR 090) si è ottenuto un valore di  $V_{s,eq} = 376$  m/s, definendo una categoria di sottosuolo nell'intorno del valore limite tra B e C. Dalle tomografie sismiche (vedasi stesa tomografica LS11) si definisce categoria sottosuolo C.

Per le analisi che seguono si considera la categoria di sottosuolo C, confermata dalle analisi di Risposta Sismica Locale in termini di accelerazione di ancoraggio al suolo.

Nelle figure seguenti si riportano i risultati delle indagini sismiche.

**PROFILO VELOCITA' ONDE DI TAGLIO**



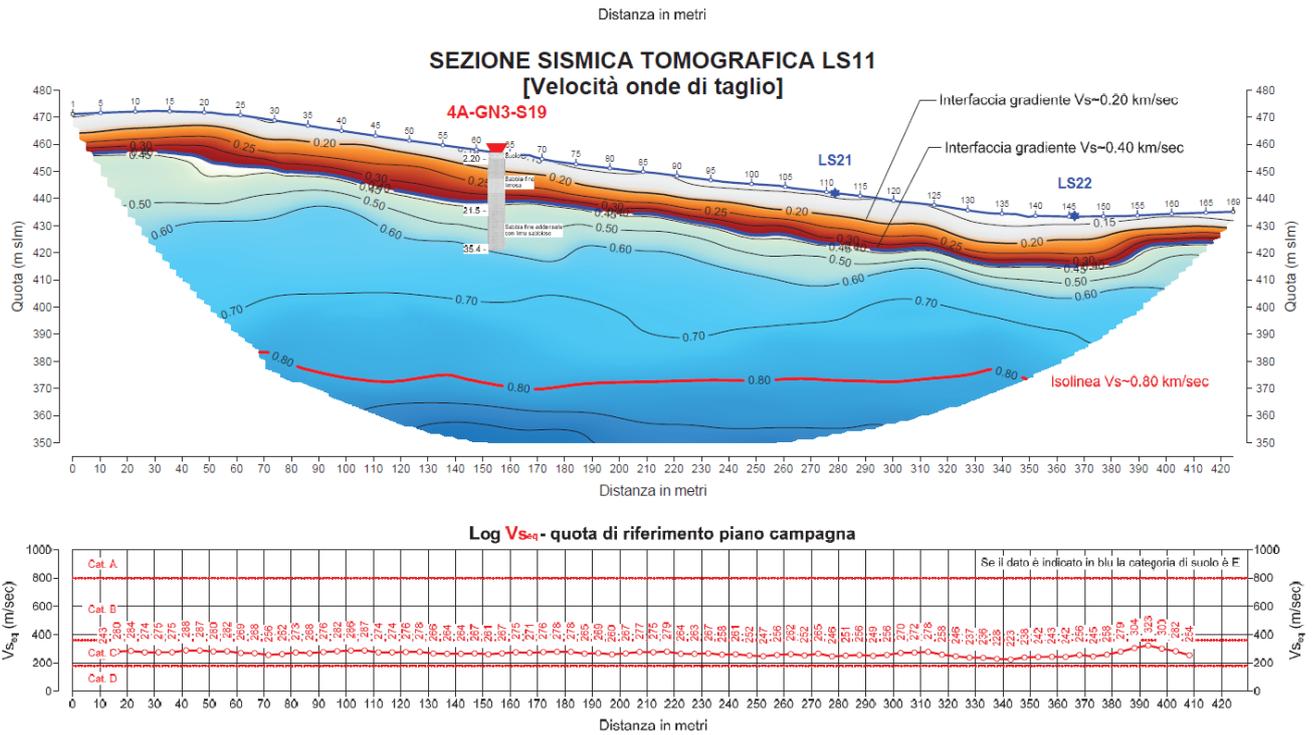
**CALCOLO VS30**

SPESSORE	PROFONDITA'	Vs	SPESSORE/Vs
1.5	0	152	0.009868421
23.2	1.5	367	0.063215259
10.3	24.7	795	0.006666667
	35		0.079750347

**$V_{s,eq} = 376$**

Seismic classification of soils  
(It. D.M. 17/01/2018) **B**

Figura 9 –  $V_{s,eq}$  da prova sismica Masw



**Figura 10 –  $V_{s,eq}$  da tomografia sismica**

Per l'opera è stata comunque eseguita una analisi di risposta sismica locale, per i risultati si rimanda all'apposito elaborato.

## 4. GEOMETRIA MODELLATA E STUDIO DELLA GRADONATURA

### 4.1 Dimensione del modello

Il modello tridimensionale studiato implementa la geometria rappresentata in Figura 11, che include una porzione di lunghezza pari a circa 100 m dell'edificio della stazione, le due strutture scatolari di approccio che sostengono il rilevato ferroviario e lo scatolare stradale di alleggerimento della viabilità di monte, posta a quota (453 m s.l.m.) circa 9 m al di sopra del piano di imposta di fondazione della stazione (444 m s.l.m.).

Su tale area si sviluppa l'importante rilevato di progetto, che presenta 4 banche orizzontali con differenze di quota di 5 m, di cui la maggiore a quota 444 m s.l.m. ha larghezza pari a circa 7.0 m dal ciglio alla parete esterna dell'edificio di stazione, mentre le altre, rispettivamente a quote 439, 434 e 429 m s.l.m., sono di larghezza 4.0 m e sono raccordate da scarpate di pendenza 2/3 (verticale/orizzontale).

Dallo studio geometrico effettuato emerge la necessità di realizzare le 4 banche solamente per un tratto di sviluppo circa 50 m in corrispondenza della sezione 14, mentre per il restante sviluppo sono sufficienti le 3 banche più alte.

Lo studio geometrico include, negli ultimi 50 m circa, il rilevato ferroviario di approccio privo di strutture portate (binari d linea).

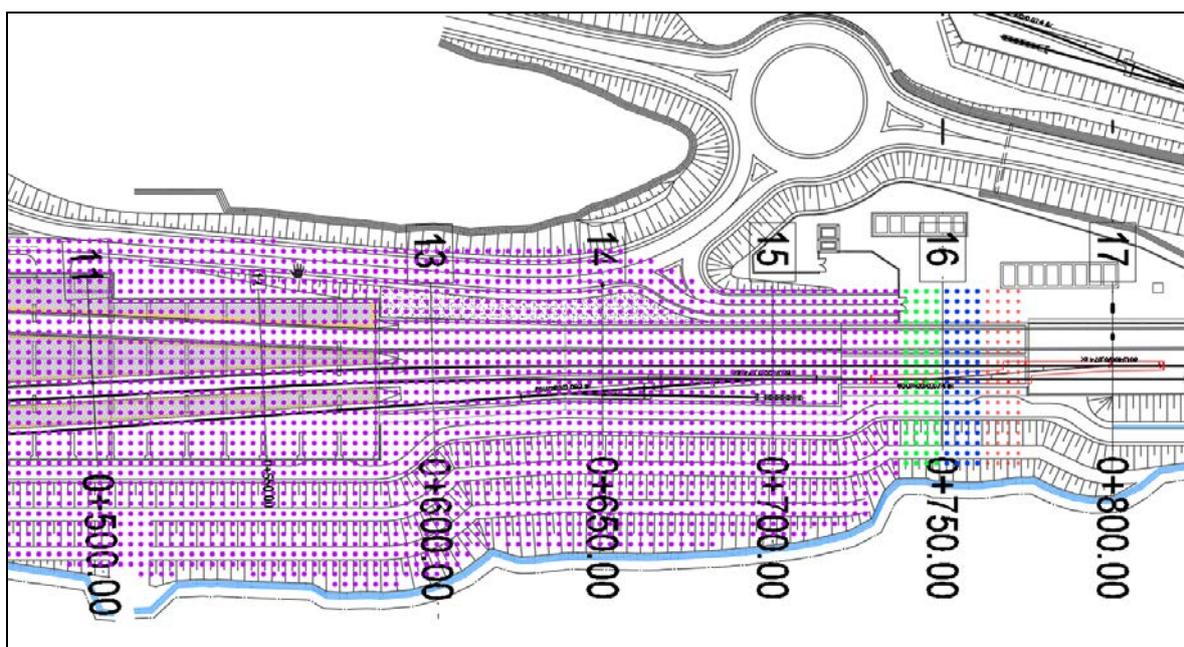


Figura 11. Porzione planimetrica implementata nel modello tridimensionale

La definizione del modello è operata principalmente tramite le sezioni di progetto dalla 11 alla 17, come mostrato in Figura 12, che ne mostra anche le dimensioni.

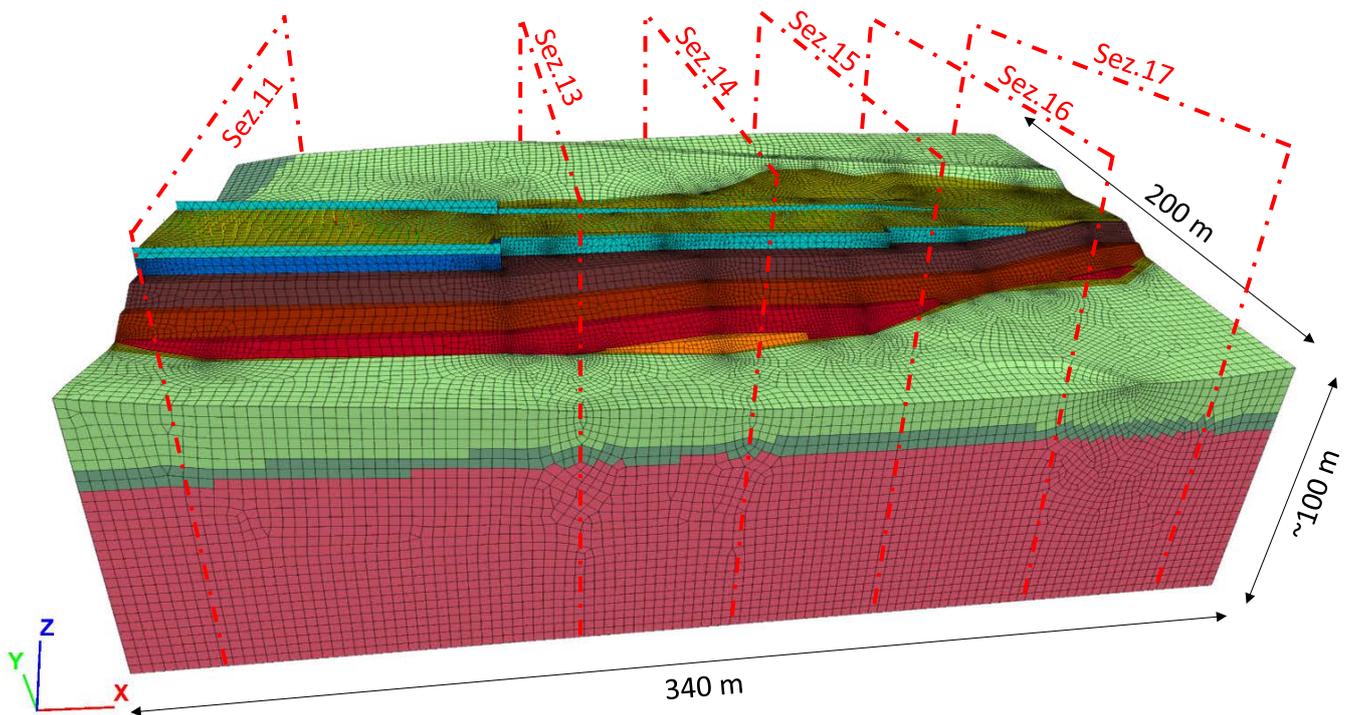


Figura 12. Dimensioni del modello e sezioni di progetto

#### 4.2 Geometria del piano campagna

La modellazione del p.c. locale è resa possibile dal modello topografico digitale del terreno (DTM) disponibile in progetto. Al fine di ottenere una discretizzazione implementabile nel modello geotecnico alle differenze finite, la superficie del terreno è stata lievemente semplificata tramite un numero discreto di sezioni, opportunamente raffittite per cogliere le singolarità locali, interpolate linearmente fra loro.

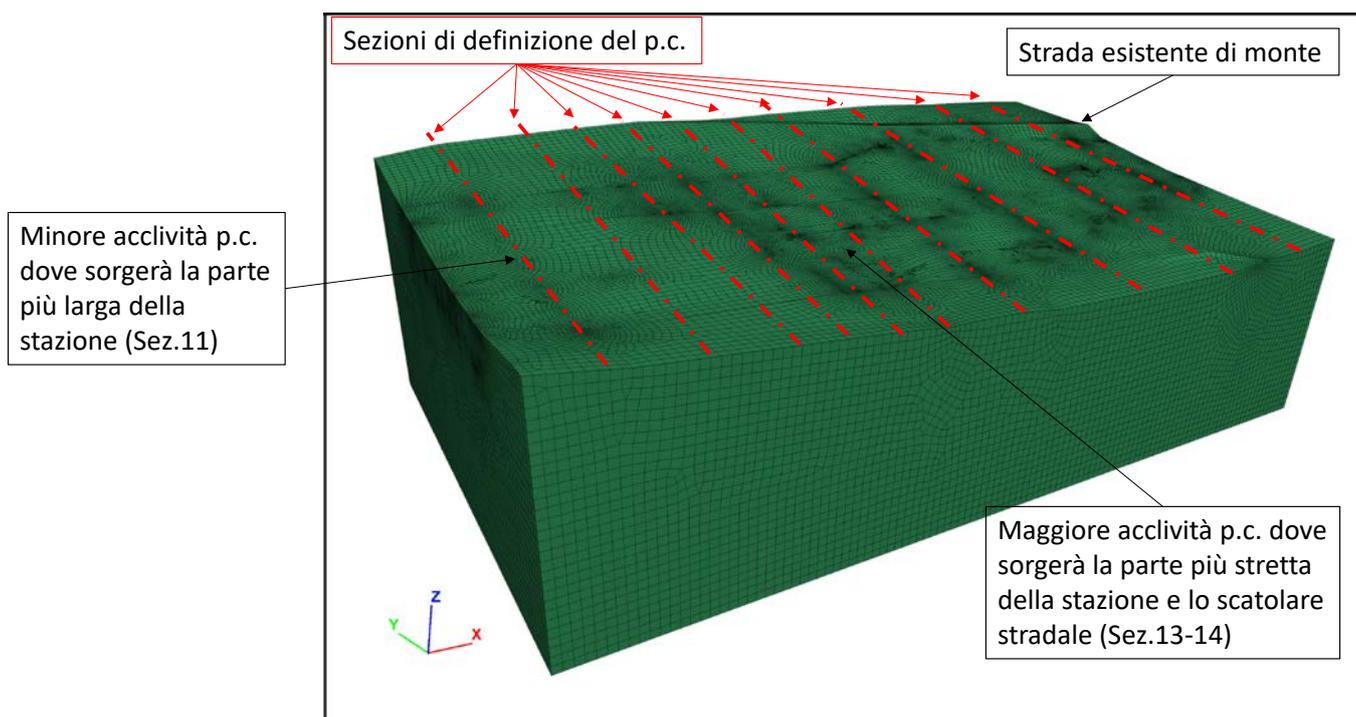


Figura 13. Definizione della superficie del p.c.

### 4.3 Gradonatura di progetto e pali di consolidamento

Lo scavo per la realizzazione della gradonatura ha richiesto un approfondimento geometrico delle sezioni di progetto, poiché il p.c. presenta una acclività inferiore nella parte iniziale (sezione 11) e finale (sezione 16), mentre vi è una pendenza maggiore nella “conca” centrale (sezioni 13 e 14). A partire dalla gradonatura di sezione 11 (cfr. Figura 14), rispettata fedelmente dal modello 3D, le gradonature delle altre sezioni sono state lievemente adattate, al fine di rispettare i criteri suddetti (cfr. Figura 15 e Figura 16). Le “piste” risultano omogenee, con pendenze longitudinali limitate, quasi interamente in scavo e di larghezza circa 9 m. La disposizione finale dei pali seguirà necessariamente la geometria dei gradoni, rispettando l’interasse longitudinale e trasversale di 3.0 m (cfr. § 5.5.3).

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	20 di 62

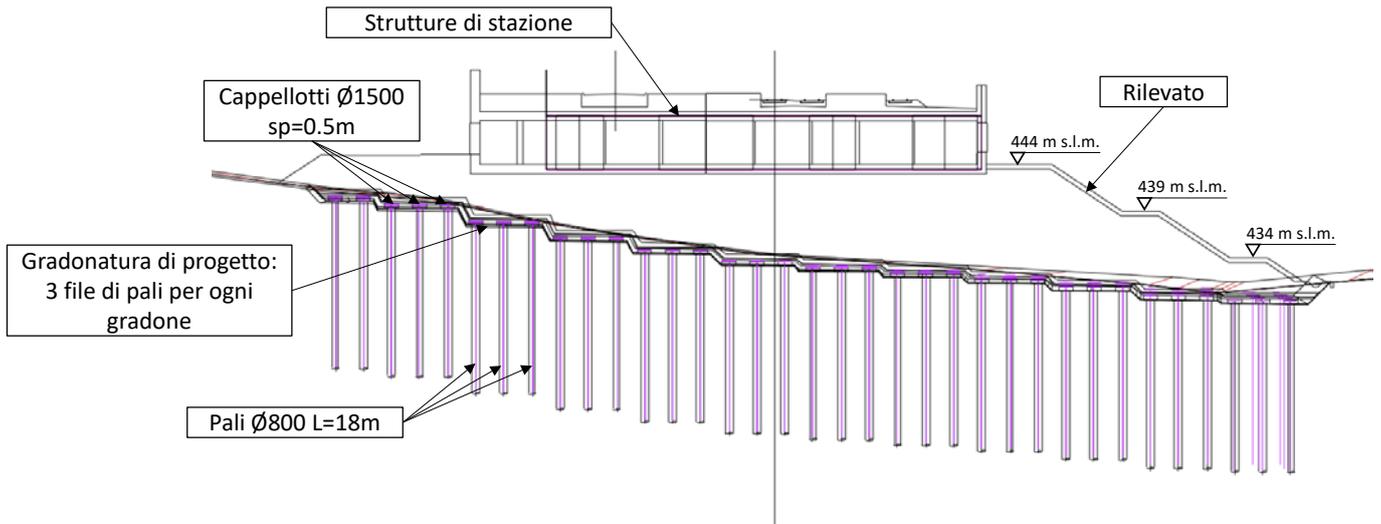


Figura 14. Sezione 11. Sovrapposizione tra sezione di progetto e porzione di geometria implementata nel modello

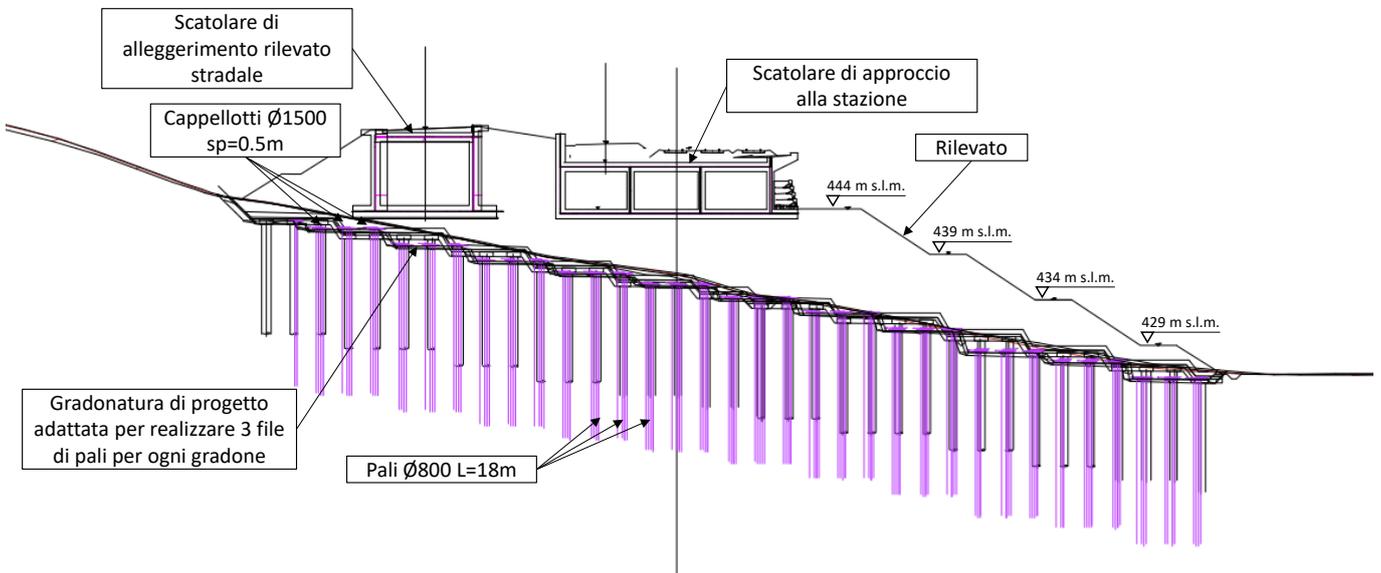


Figura 15. Sezione 14. Sovrapposizione tra sezione di progetto e porzione di geometria implementata nel modello

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	21 di 62

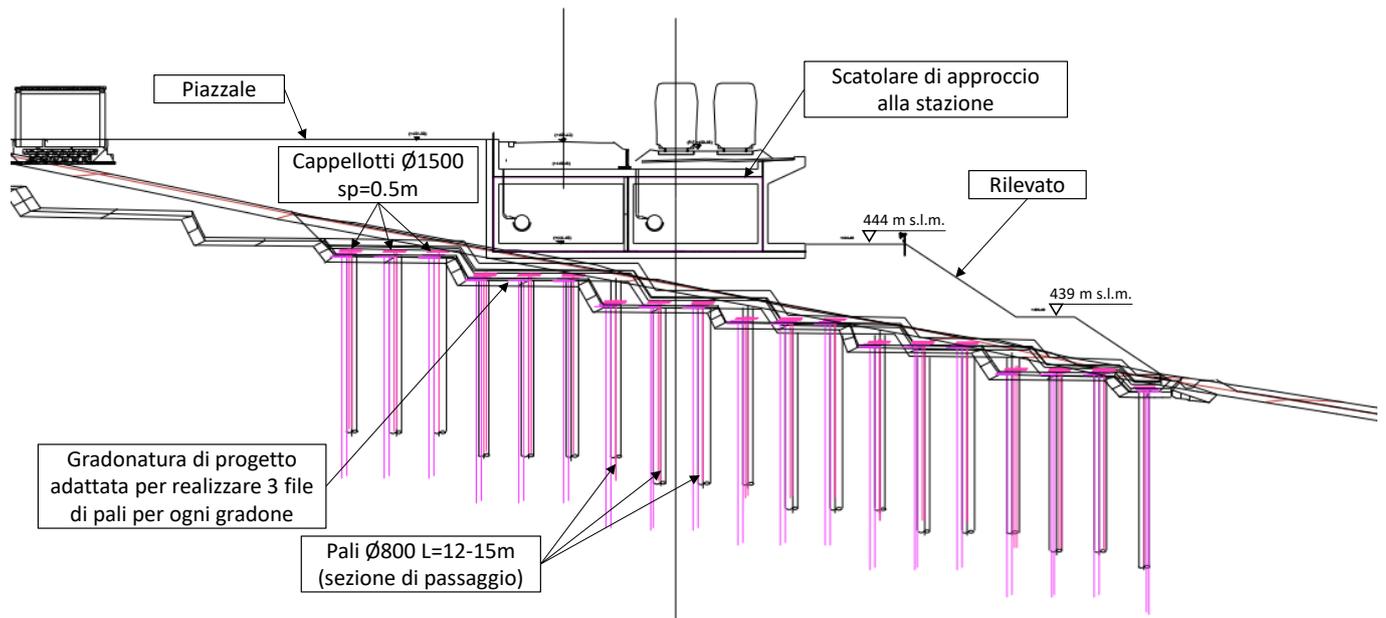


Figura 16. Sezione 16. Sovrapposizione tra sezione di progetto e porzione di geometria implementata nel modello



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO**  
**NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA**  
PROGETTO DEFINITIVO  
TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	22 di 62

## 5. ANALISI INTERVENTO DI CONSOLIDAMENTO

### 5.1 Premessa

Per l'opera si prevede un intervento di consolidamento costituito da:

- Colonne di consolidamento CFA in c.a. Ø800mm di lunghezza da 9.0 a 18.0 m, disposti a maglia quadrata 3.0 m x 3.0 m, con armatura minima (8 Ø24, spirale Ø10 / 10 cm).
- Cappellotti di ripartizione in c.a. a testa palo, di diametro 1.50 m e spessore 0.50 m.
- Geogriglia di ripartizione con resistenza nominale  $R > 500$  kN/m (direzione trasversale).

### 5.2 Modelli costitutivi del terreno

Per le analisi in oggetto si è utilizzato il codice 3D Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC3D versione 7.00.117), che implementa il metodo delle Differenze Finite.

Il modello di calcolo è tarato per differenti legami costitutivi attribuiti al terreno, al fine di ottenere una valutazione dei cedimenti totali e dei cedimenti differiti nel tempo, con varie formulazioni. A tal fine i terreni sono stati caratterizzati per:

- Legame costitutivo "Plastic Hardening – Small Strain", che implementa l'incrudimento volumetrico del terreno e una legge di diminuzione della rigidità in funzione dello stato deformativo, unitamente a differenti percorsi tenso-deformativi per i rami di scarico-ricarico e di compressione vergine, quindi ideale per modellare terreni sovraconsolidati in e stimare i cedimenti in condizioni drenate
- Legame costitutivo "Soft Soil", che implementa i parametri di deformabilità tarabili tramite prove di laboratorio edometriche ( $C_c$ ,  $C_s$ ), ampiamente validato in letteratura per argille-limi normalconsolidati, la cui applicazione è estesa a terreni sovraconsolidati in modo cautelativo (sovrastimando la deformabilità), al fine di consentire una valutazione dei cedimenti differiti nel tempo dovuti ai processi di consolidazione.

In particolare nella presente relazione si descriverà l'analisi con il modello "Soft Soil", utilizzando il modello "Plastic Hardening" per determinare i parametri di compressibilità, tramite equivalenze elastiche tra i due. Quest'ultimo è infatti di più agevole taratura tramite le prove in sito SPT e MASW disponibili, e fornisce risultati



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO  
NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO  
TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	23 di 62

in genere più realistici per terreni sovraconsolidati. Il “Soft Soil” è invece più adatto per analisi differite nel tempo, in conformità a quanto effettuato nelle analisi 2D di progetto (cfr. [DC3], [DC4], [DC5]).

Il legame costitutivo denominato “Plastic Hardening”, corrispondente al noto Hardening Soil, ampiamente validato in letteratura, simula il comportamento del terreno tramite incrudimento tangenziale e volumetrico: se sottoposto a sforzo deviatorico, il terreno solitamente è soggetto ad una riduzione di rigidità, accompagnato da una deformazione plastica irreversibile.

Nel modello PH il modulo di Young è dipendente dal livello tensionale. In particolare il modulo per percorsi di scarico-ricarico  $E_{ur}$  è dato dalla seguente:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cot \varphi - \sigma_3}{c \cdot \cot \varphi + p^{ref}} \right)^m$$

dove  $E_{ur}^{ref}$  è il valore del modulo di scarico-ricarico riferita alla pressione di riferimento  $p^{ref}$ . Il reale valore di  $E_{ur}$  dipende dalla tensione principale massima  $\sigma_3$ , dalla coesione  $c$ , e dall'angolo di resistenza al taglio  $\varphi$ , oltre che dall'esponente  $m$ . Il modello PH inoltre adotta un'altra misura della rigidità,  $E_{50}$ , che identifica l'andamento dei percorsi di carico primari, ed è data dalla seguente espressione:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cot \varphi - \sigma_3}{c \cdot \cot \varphi + p^{ref}} \right)^m$$

dove  $E_{50}^{ref}$  è un parametro del materiale, riferito alla pressione  $p^{ref}$ .

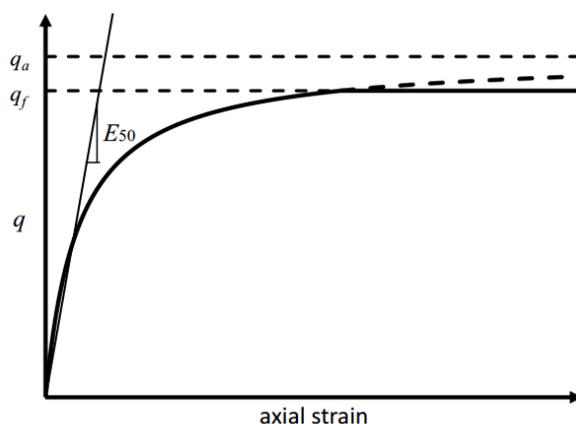


Figura 17. Relazione iperbolica tensione-deformazione per percorsi di carico primari

Il legame costitutivo denominato Soft Soil, è utilizzato principalmente per valutare gli effetti differiti nel tempo dovuti alla consolidazione. Tale legame, ottimizzato per analizzare terreni normalconsolidati, è implementato in questo caso per limi-argille sovraconsolidati in maniera cautelativa.

In particolare i parametri di compressibilità dei terreni del modello sono formulati a partire dalla compressione volumetrica di prima compressione  $\Delta\varepsilon_v$  e da quella per rami di scarico e ricarico  $\Delta\varepsilon_v^e$ , definiti in funzione della pressione media  $p$ , dei parametri di resistenza al taglio  $c$  e  $\varphi$ , e del rapporto di sovraconsolidazione OCR:

$$\Delta\varepsilon_v = -\frac{\lambda^* \Delta p}{p + c \cot \varphi} ; \quad \Delta\varepsilon_v^e = -\frac{\kappa^* \Delta p}{p + c \cot \varphi}$$

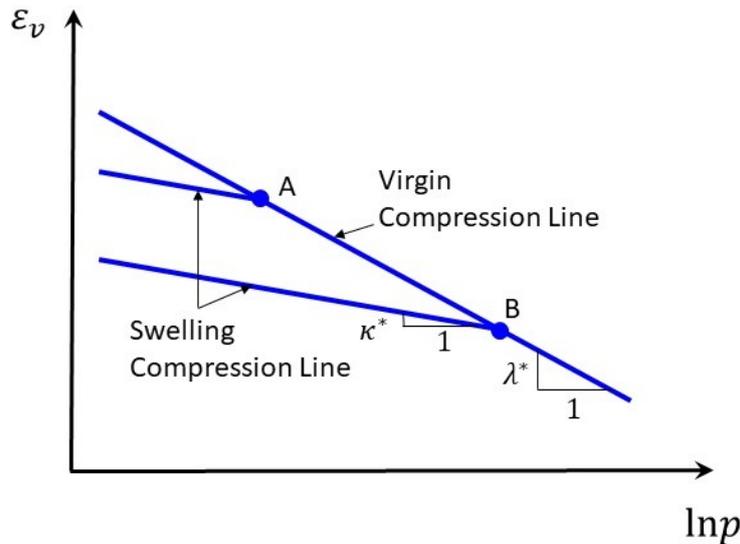


Figura 18. Relazione tra la compressione volumetrica e la pressione media

I parametri di deformabilità  $\lambda^*$  e  $\kappa^*$ , sono correlati agli indici di compressione e ricomprensione edometrici  $C_c$  e  $C_s$ , tramite le seguenti relazioni, in funzione dell'indice dei vuoti  $e$ , del coefficiente di spinta a riposo  $K_0$  e del coefficiente di Poisson  $\nu$ :

$$\lambda^* = \frac{C_c}{(1+e)\ln 10} ; \quad \kappa^* \cong C_s \frac{(1+2K_0)(1-\nu)}{(1+\nu)(1+e)\ln 10}$$

Al fine di avere una corrispondenza in termini deformativi tra i due legami costitutivi adottati nel modello geotecnico tridimensionale, a meno delle deformazioni differite nel tempo dovuti ai processi di consolidazione, gli indici di compressione e ricomprensione edometrici  $C_c$  e  $C_s$  possono essere valutati tramite le seguenti formulazioni, in funzione dei valori di riferimento del legame costitutivo Plastic Hardening  $E_{oed}^{ref} \cong 0.8E_{50}^{ref}$  e  $E_{ur}^{ref}$ , dell'indice dei vuoti iniziale  $e_0$  e della pressione di riferimento  $p_{ref}$ :

$$C_c = \frac{2.3(1+e_0)p_{ref}}{E_{oed}^{ref}} ; \quad C_s \cong \frac{2.3(1+e_0)(1+\nu)(1-2\nu)p_{ref}}{(1-\nu)E_{ur}^{ref}K_0}$$



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO  
NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO  
TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	26 di 62

### 5.3 Parametri geotecnici e stratigrafia

In base alle relazioni sopra esposte, l'andamento dei parametri geotecnici con la profondità implementati nel modello è stato opportunamente calibrato dai risultati delle indagini disponibili per l'area in esame. In particolare, la legge di deformabilità del terreno con la profondità, è tarata sulla base delle velocità delle onde di taglio  $V_s$  derivanti dalle correlazioni indirette dalle prove SPT e dalle misure dirette dalla prova MASW. Il profilo di progetto delle  $V_s$  è definito coerentemente a quanto già assunto nelle analisi 2D (cfr. [DC3], [DC4], [DC5]), come rappresentato in Figura 19, in cui sono sovrapposti i risultati delle indagini. Anche la stratigrafia di calcolo è stata definita in coerenza con le analisi 2D, attribuendo passaggi stratigrafici a pendenza circa costante su tutto il volume modellato alle profondità di progetto (9.5 e 14.5 m da p.c.).

Per quanto riguarda il legame costitutivo Plastic-Hardening, il profilo delle onde di taglio  $V_s$  di progetto è implementato direttamente nel modello 3D (cfr. Figura 21). Esso consente di definire la legge costitutiva, puntualmente per le singole zone del modello 3D: ipotizzando la densità del terreno, si ricava direttamente il modulo a taglio per piccole deformazioni  $G_0$ , ed assumendo il coefficiente di Poisson  $\nu = 0.27$ , il modulo di Young per piccole deformazioni  $E_0$ . Nella seguente tabella sono esposti i parametri di progetto implementati nella analisi. Il modulo "operativo" secante  $E_{50}$  per i percorsi di primo carico, utile alla definizione della curva del legame costitutivo di Figura 17, è assunto cautelativamente pari ad 1/14 del modulo iniziale  $E_0$ , al fine di ottenere parametri analoghi a quelli già implementati nelle analisi 2D (cfr. [DC3], [DC4], [DC5]), mentre il modulo per i percorsi tensionali di scarico e ricarico  $E_{ur}$  è assunto pari a 3.0 volte  $E_{50}$ .

I parametri di deformabilità  $C_c$  e  $C_s$  del legame costitutivo Soft Soil sono definiti rispettivamente a partire da  $E_{50}$  e  $E_{ur}$  del modello PH (cfr. § 5.2).

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	27 di 62

Tabella 1. Parametri geotecnici di calcolo

Unità	z	$\gamma_{dry}$	indice vuoti	porosità	$\gamma_{sat}$	$k_{0,NC}$	OCR	$k_0$	$c'$	$\phi'$	$v_{ref}$	$p_{ref}$
[--]	[m da p.c.]	[kN/m <sup>3</sup> ]	e	n	[kN/m <sup>3</sup> ]	[--]	[--]	[--]	[kPa]	[deg]	[--]	[kPa]
CapC1	0.0	15.6	0.65	0.39	19.5	0.53	3.0	0.889	5	28°	0.27	101.3
	-9.5	15.6	0.65	0.39								
CapC2	-9.5	15.6	0.65	0.39	19.5	0.53	3.0	0.889	5	28°	0.27	101.3
	-14.5	15.6	0.65	0.39								
TRV	-14.5	17.1	0.65	0.39	21.0	0.59	3.0	0.927	15	24°	0.27	101.3
	-40.0	17.1	0.65	0.39								
TRVinf	-40.0	17.1	0.65	0.39	21.0	0.59	3.0	0.927	15	24°	0.27	101.3
	-120.0	17.1	0.65	0.39								
Rilevato	20.0				19.0	0.38	1	0.384	0	38°	0.27	101.3
	0.0											

Unità	$V_s$	$G_0$	$E_0$	$K_0$	$E_0$	m	$E_{50,ref}$	$E_{ur\ ref}$	$E_{Oed\ ref}$	$\gamma_{07}$	$C_c$	$C_s$	k
[--]	[m/s]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	$E_{50}$		[kPa]	[--]	[--]	[--]	[--]	[--]	[m/s]
CapC1	80	12480	31699	22970	14	0.99	22127	3.0	0.80	5.0E-04	0.0217	0.0052	1.0E-07
	240	112320	285293	206734			24886				0.0193	0.0046	
CapC2	243	115146	292470	211935	14	0.99	25512	3.0	0.80	5.0E-04	0.0188	0.0045	1.0E-07
	300	175500	445770	323022			26618				0.0180	0.0043	
TRV	300	189000	480060	347870	14	0.99	25437	3.0	0.80	5.0E-04	0.0189	0.0043	4.0E-08
	493	510403	1296423	939437			28578				0.0168	0.0039	
TRVinf	493	510403	1296423	939437	14	0.99	28578	3.0	0.80	5.0E-04	0.0168	0.0039	4.0E-08
	900	1701000	4320540	3130826			33845				0.0142	0.0033	
Rilevato	190	68590	174219	126245	3.5		50000						5.0E-05
	190	68590	174219	126245									

**Velocità delle onde di taglio da prove SPT e sismiche**

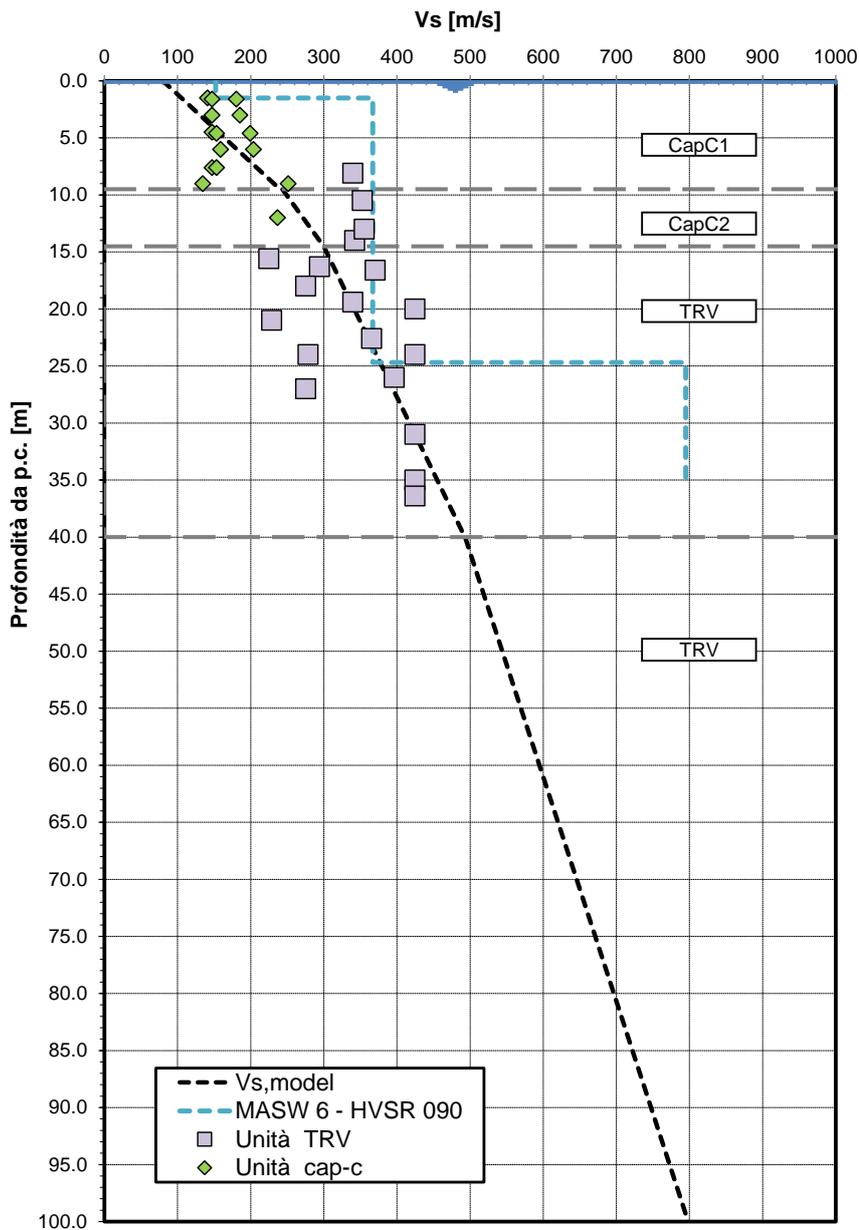


Figura 19 – Andamento delle velocità delle onde di taglio con la profondità

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	29 di 62

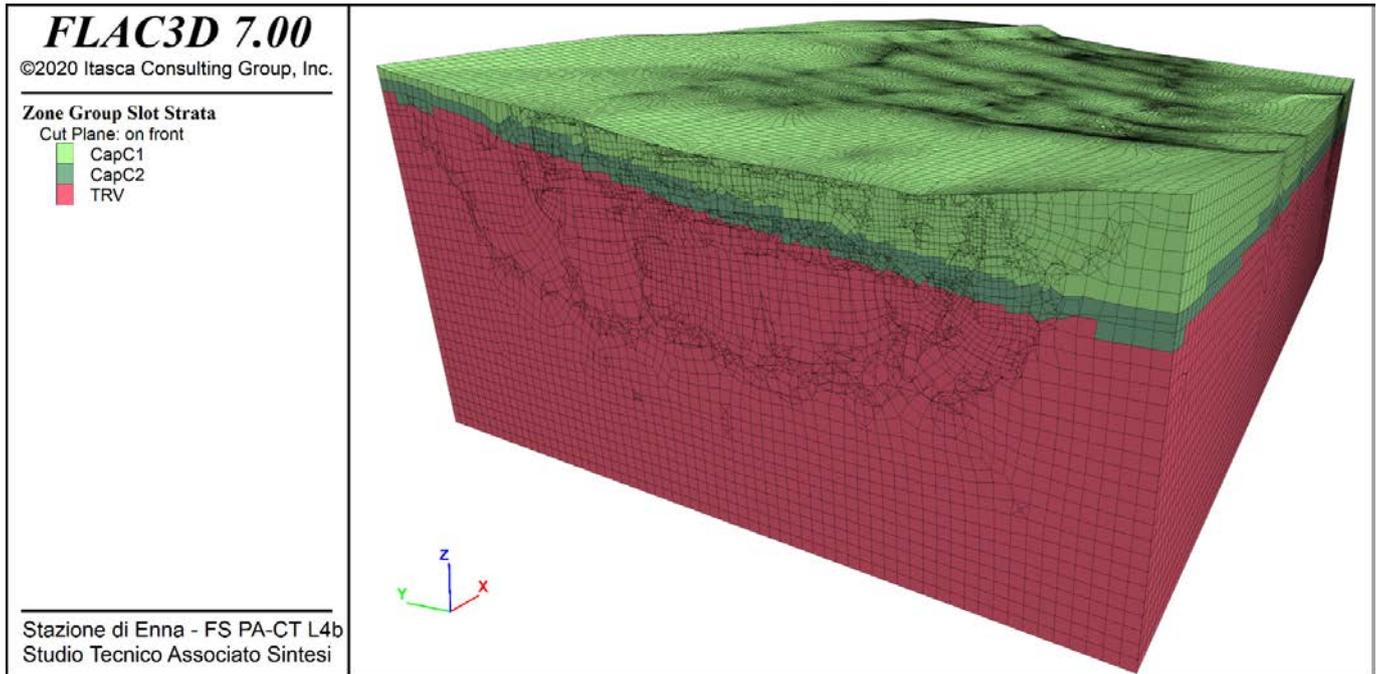


Figura 20. Stratigrafia implementata nel modello tridimensionale

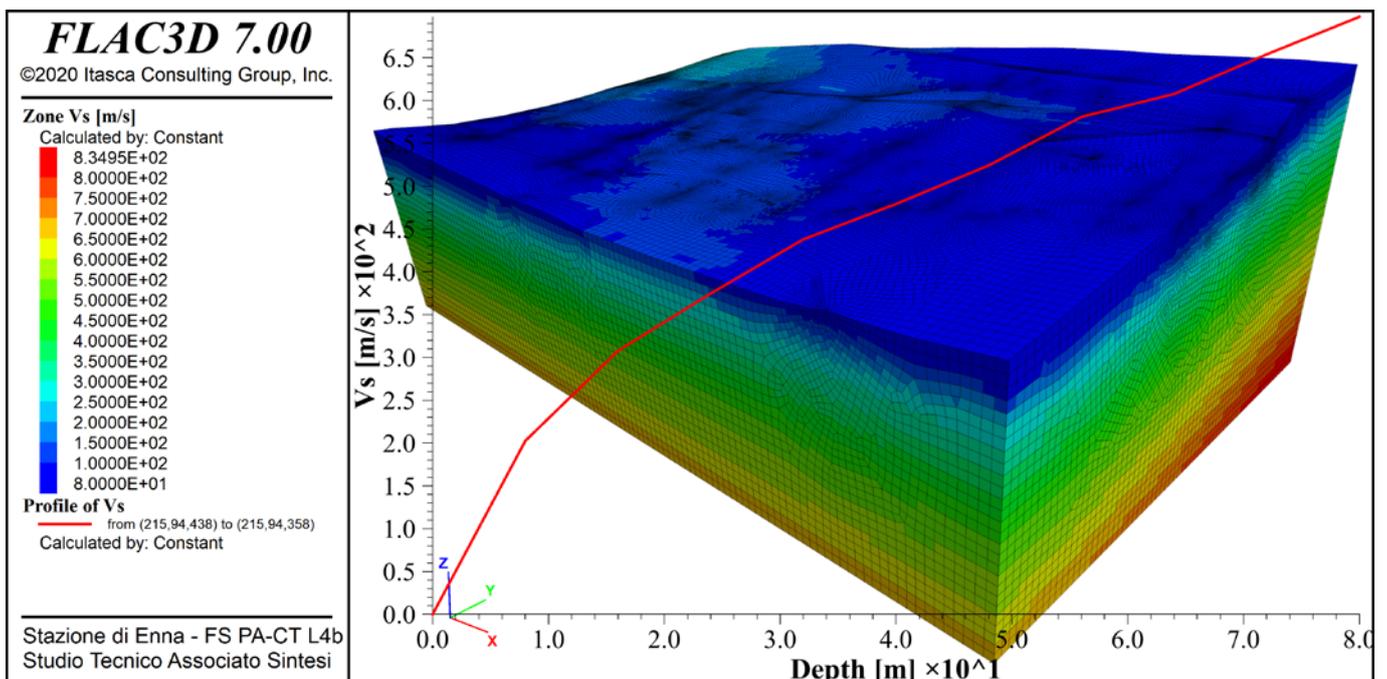


Figura 21. Implementazione delle Vs nel modello tridimensionale

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	30 di 62

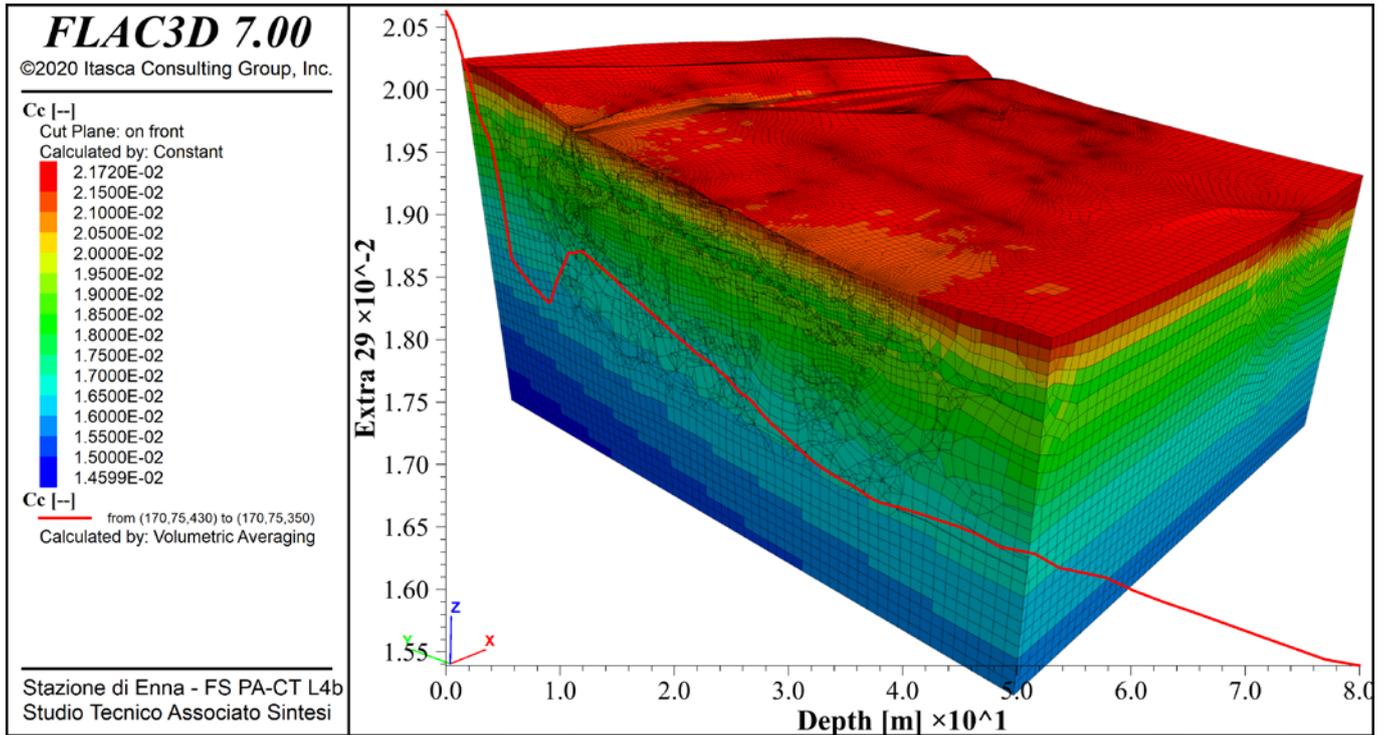


Figura 22. Distribuzione di Cc

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	31 di 62

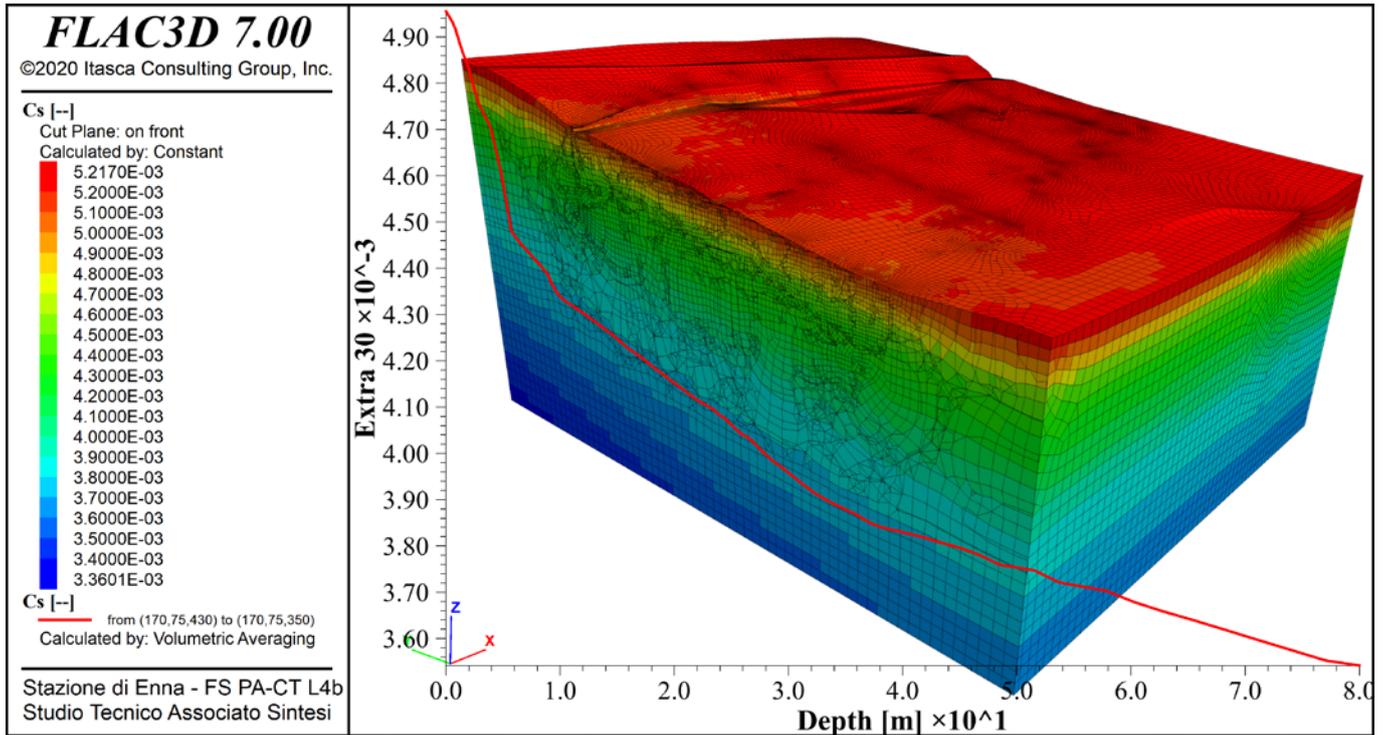


Figura 23. Distribuzione di Cs

#### 5.4 Strutture ed elementi di consolidazione

Il modello tridimensionale è completo di tutti gli elementi strutturali e di consolidamento previsti in progetto.

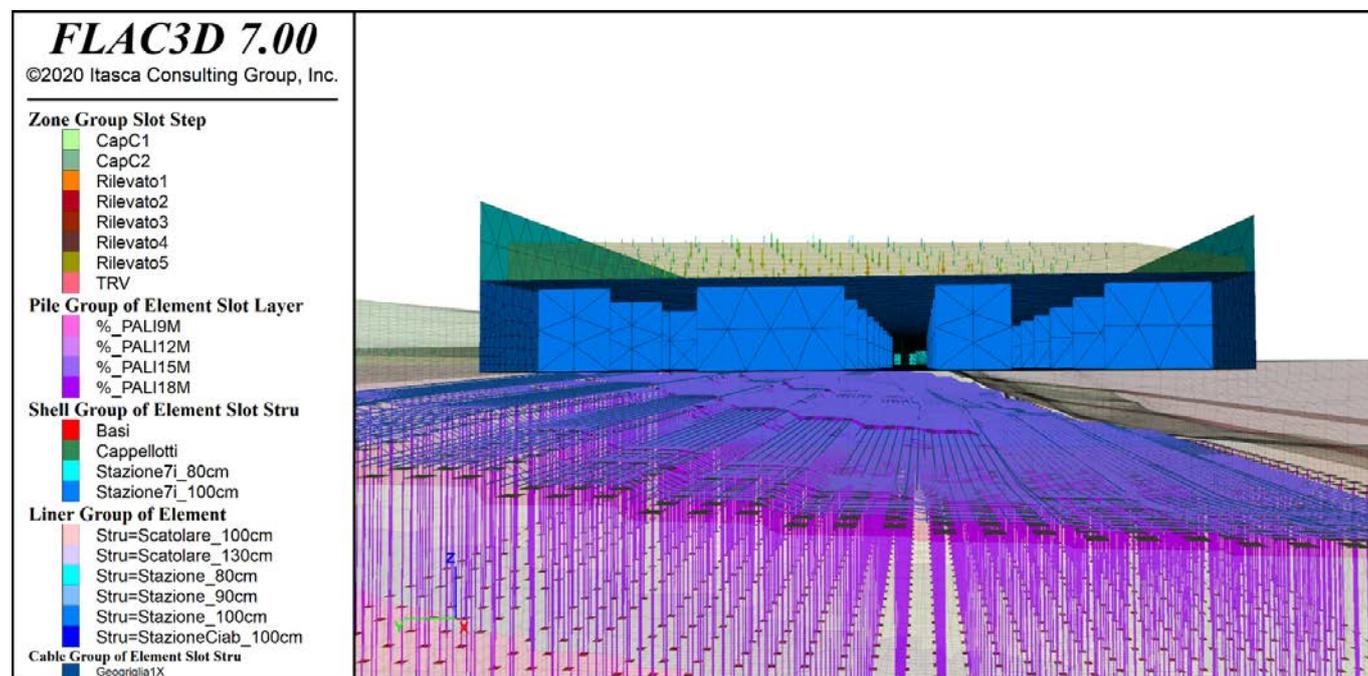


Figura 24. Strutture implementate

Ciascun palo di consolidamento è implementato tramite 3 elementi strutturali:

- Il fusto del palo è implementato con elementi monodimensionali tipo *embedded pile*, caratterizzati da inerzia e area date dalla sezione circolare  $\varnothing 800$ , lunghezza caratteristica dell'elemento (9, 12, 15, 18 m), caratteristiche elastiche del c.a. ( $E = 30 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.18$ ), ed appositi elementi di interfaccia che ne modellano l'interazione con gli elementi di volume; in particolare la resistenza laterale assiale è caratterizzata da  $\tau = 0.7 \cdot \tan \varphi$
- La testa del palo è modellata con elementi bidimensionali tipo *shell* di superficie quadrata equivalente al cappellotto in c.a., di diametro 1.50 m, con spessore 0.50 m e caratteristiche elastiche del c.a.; tali elementi, connessi rigidamente agli elementi di volume, consentono al palo di assorbire la giusta aliquota di tensione verticale trasmessa dal rilevato;
- La base del palo è modellata con elementi *shell*, analogamente ai capellotti in c.a., ma con area equivalente alla sezione del palo, di diametro  $\varnothing 800$ , al fine di trasmettere correttamente la tensione verticale agli elementi di volume

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	33 di 62

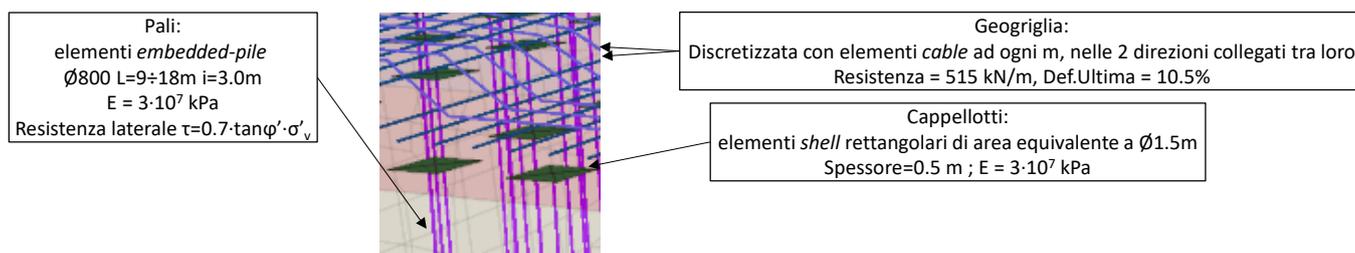


Figura 25. Ingrandimento degli elementi di consolidamento alla base del rilevato.

La geogriglia è discretizzata con elementi monodimensionali tipo *cable*, posti ad ogni metro sia in direzione trasversale che longitudinale, a quota pari a 0.50 m al di sopra dei cappellotti in c.a.. Tali elementi, rigidamente connessi agli elementi di volume, sono in grado di assorbire solamente le azioni assiali. Ad essi è attribuita una resistenza pari a 515 kN/m a trazione, resistenza nulla a compressione, ed una rigidità tale per cui la deformazione ultima risulti pari a 10.5%.

Gli elementi strutturali che caratterizzano la stazione, gli scolarari di approccio ferroviari e lo scolare stradale, sono modellati con elementi bidimensionali tipo *liner* (in grado di distaccarsi dagli elementi di volume ed interagire con legami attritivi, per gli elementi a contatto col terreno) e tipo *shell* (disconnessi dagli elementi di volume e connessi rigidamente ai *liner*, per i setti interni o non a contatto con il terreno); ad essi sono attribuite proprietà elastiche del c.a. ( $E = 30 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.18$ ), e proprietà inerziali date dai seguenti spessori:

- Per la struttura di stazione: fondazione copertura e setti interni di spessore 1.0 m
- Per gli scolarari di approccio alla stazione: fondazione di spessore 1.0 m, copertura 0.9 m, pareti laterali e setti interni 0.8 m
- Per lo scolare stradale di alleggerimento: fondazione di spessore 1.3 m, copertura e pareti 1.0 m

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	34 di 62

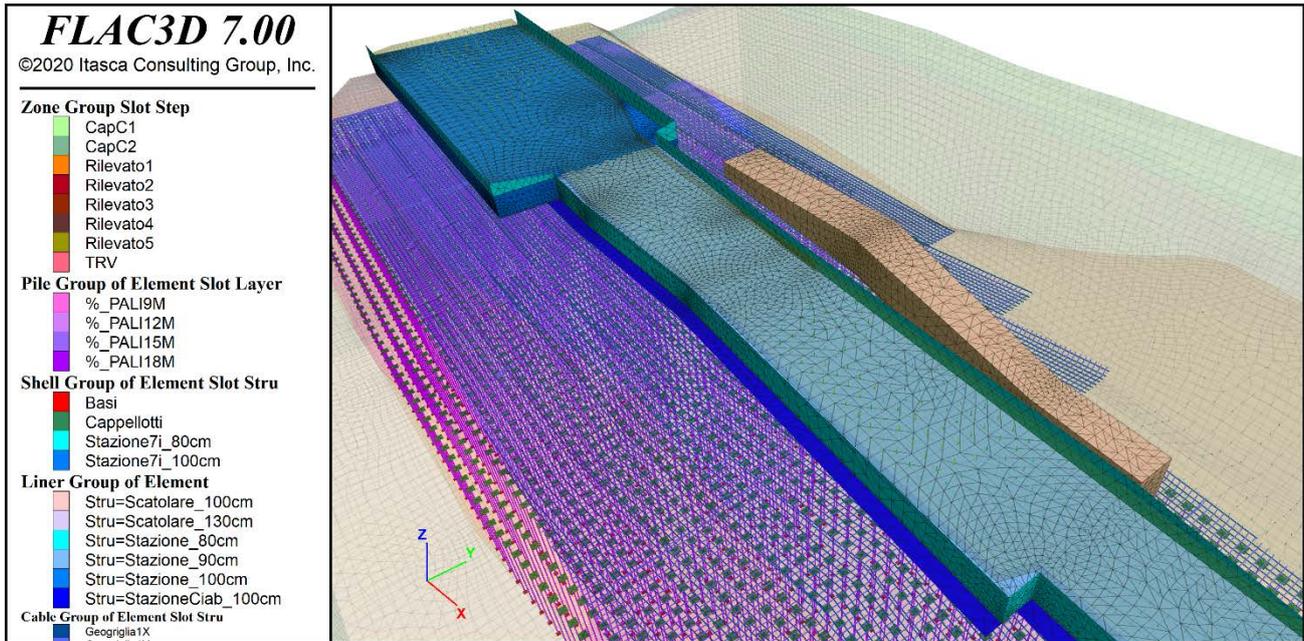


Figura 26. Strutture di stazione, scatolari di approccio ferroviario e scatolare di alleggerimento stradale

## 5.5 Fasi di calcolo

L'analisi implementa le principali fasi esecutive previste per la realizzazione dell'opera, a partire dall'inizializzazione dello stato attuale, riproducendo il probabile percorso tensionale dell'area studiata.

### 5.5.1 Inizializzazione dello stato tensionale

La prima fase implementata consiste nell'inizializzazione del legame costitutivo negli elementi di volume e dello stato tensionale e delle pressioni neutre, come evidenziato dalle seguenti immagini.

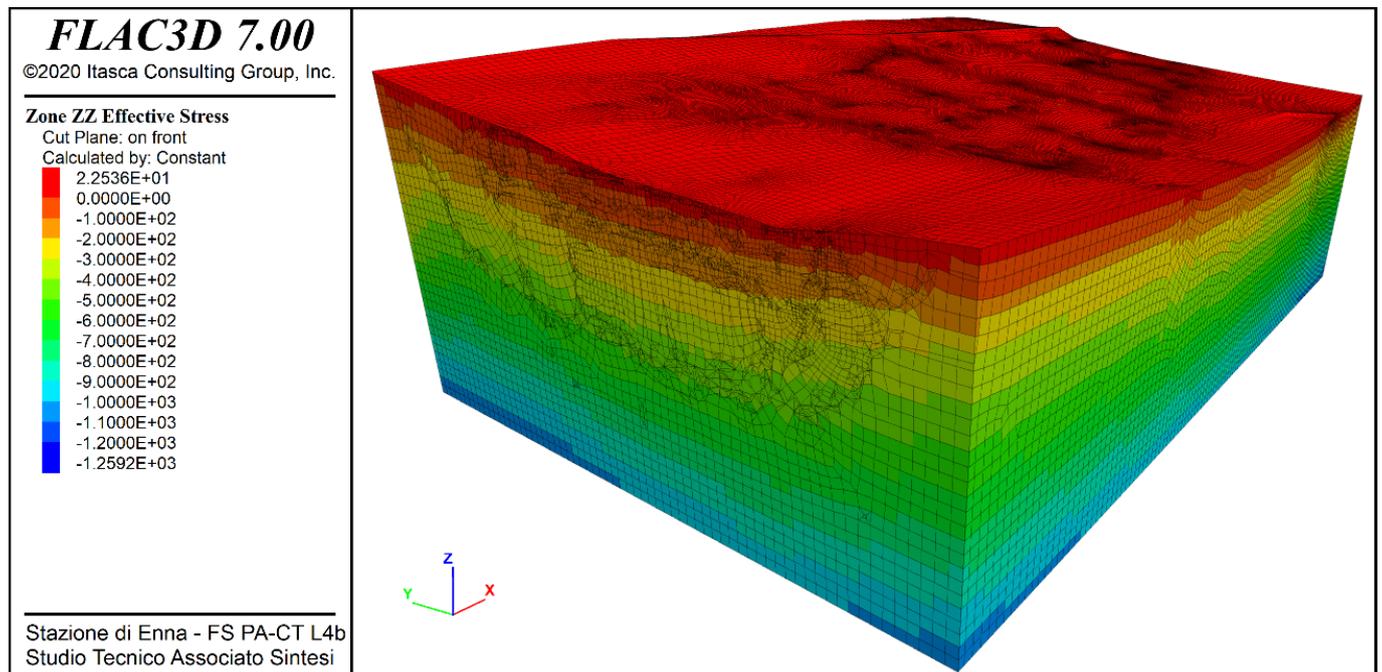


Figura 27. Tensioni verticali efficaci allo stato iniziale

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	36 di 62

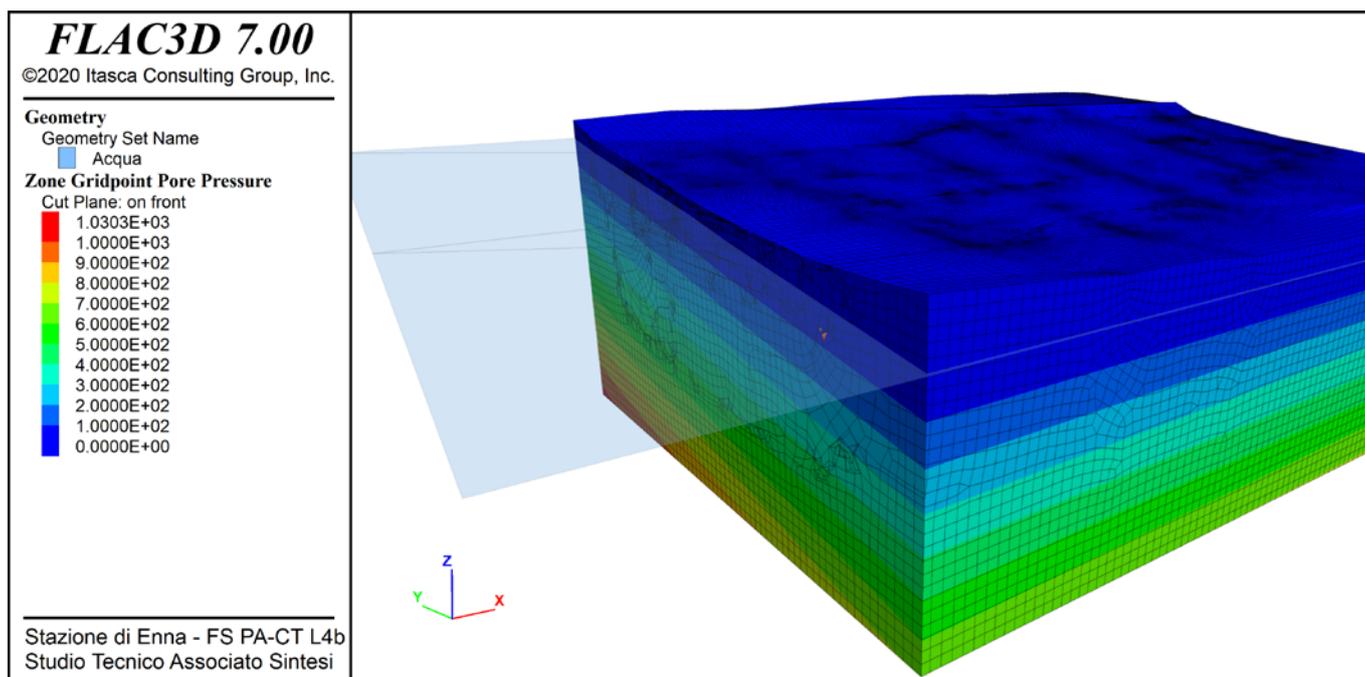


Figura 28. Piano di falda e pressioni neutre

### 5.5.2 Scavo della gradonatura

Lo scavo della gradonatura, descritto al paragrafo 4.3, opera un marginale detensionamento al p.c. e consente di creare la superficie necessaria per la corretta generazione degli elementi di consolidamento e per la posa delle fasi di rilevato.

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	37 di 62

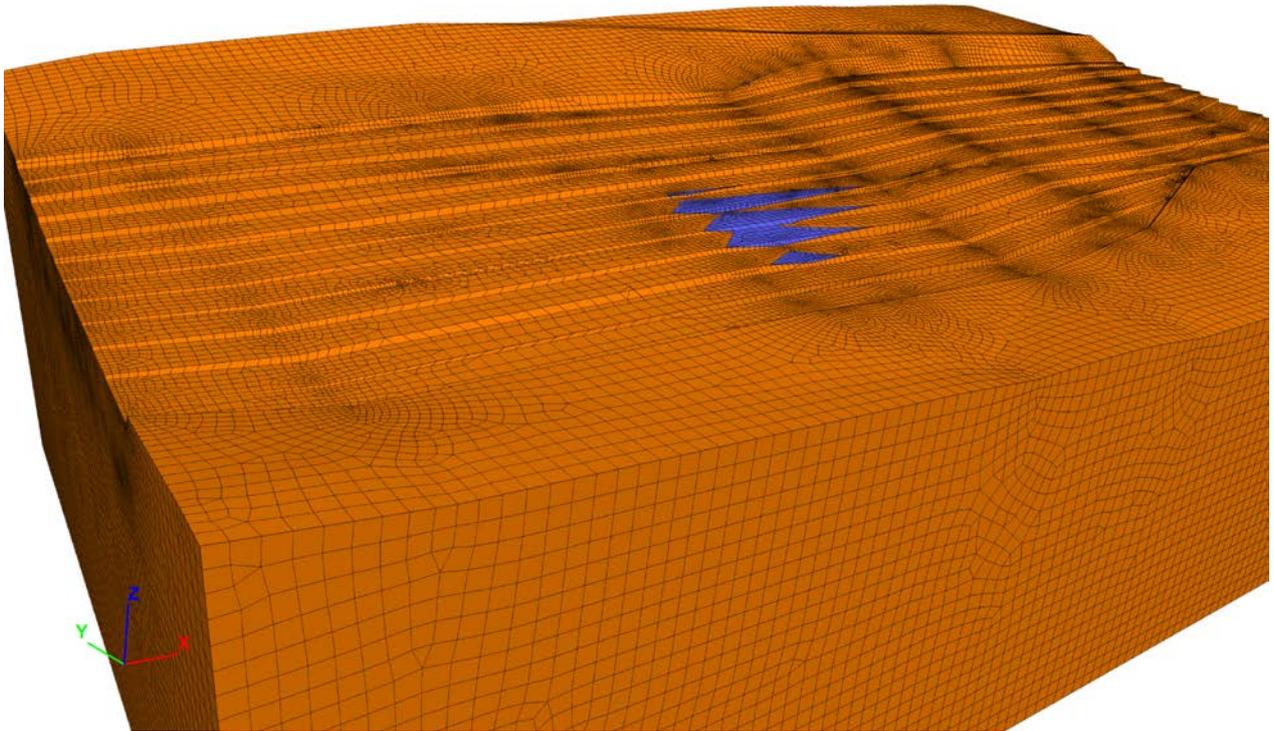
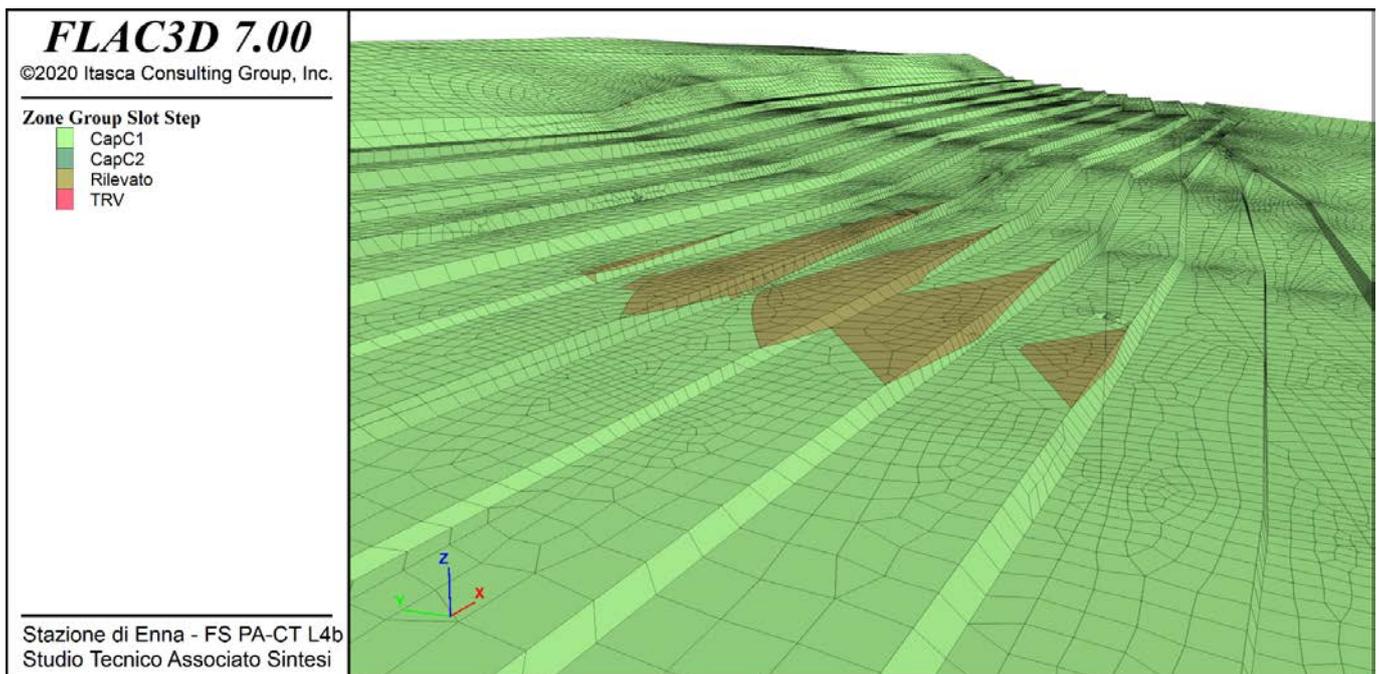


Figura 29. Scavo e gradonatura.



	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO					
FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0005 016	REV. A	FOGLIO 38 di 62

Figura 30. Scavo e gradonatura – ingrandimento sulla porzione in rilevato

### 5.5.3 Realizzazione dei pali di consolidamento

I pali di consolidamento, implementati tramite elementi *embedded pile* per il fusto, elementi *shell* per la base e per il cappellotto in c.a., sono generati nel modello in un'unica fase, rispettando la geometria e le quote imposte dai gradoni di ammorsamento del rilevato. Essi hanno interasse longitudinale e trasversale di 3.0 m. Nel modello sono implementati complessivamente 3028 pali, così distribuiti in base alla loro lunghezza:

- 72 pali Ø800 di lunghezza 9.0 m
- 73 pali Ø800 di lunghezza 12.0 m
- 78 pali Ø800 di lunghezza 15.0 m
- 2805 pali Ø800 di lunghezza 18.0 m

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	39 di 62

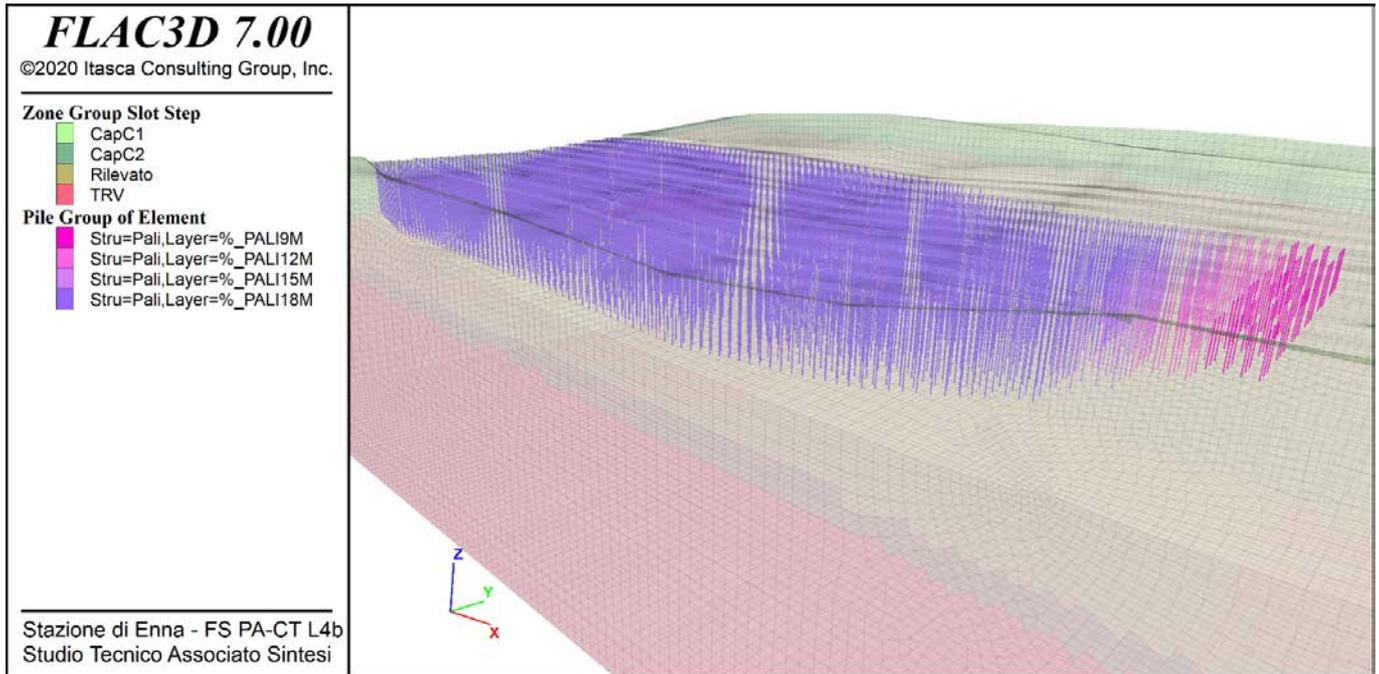


Figura 31. Pali di consolidamento

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	40 di 62

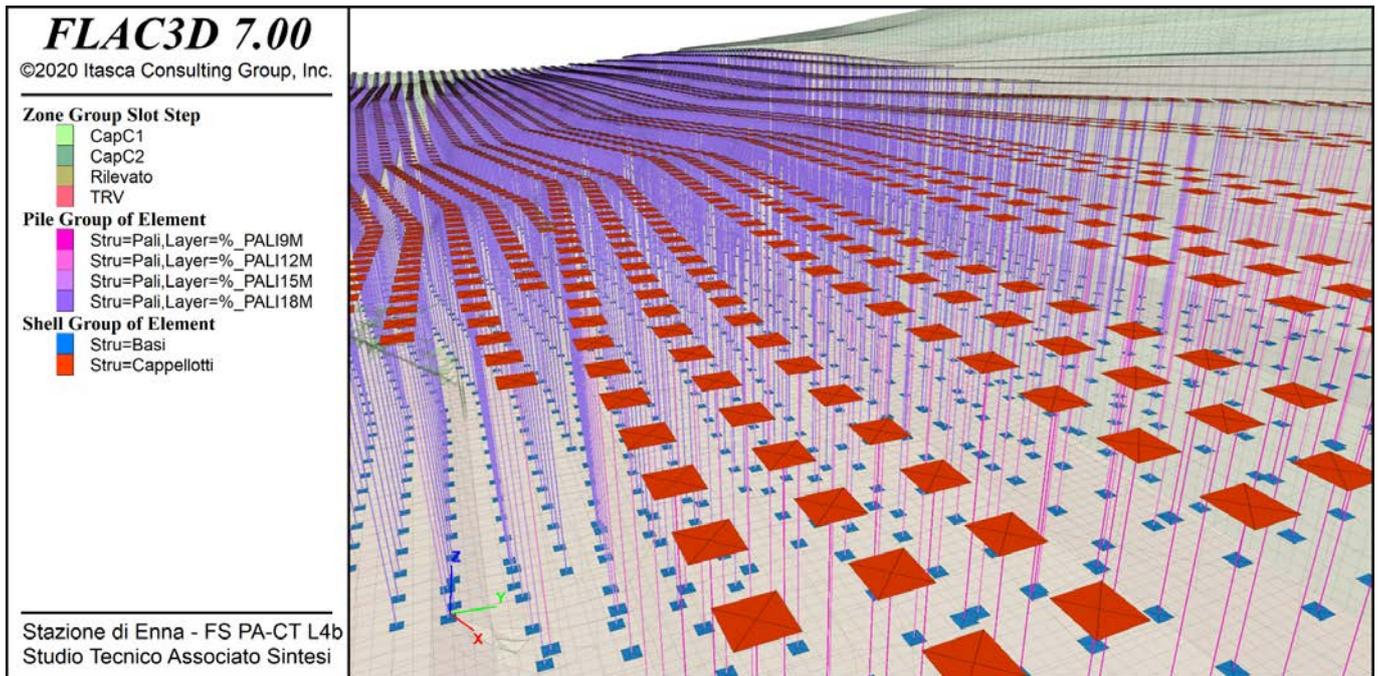


Figura 32. Pali di consolidamento (embedded pile) cappellotti in c.a. (shell rossi) e base dei pali (shell blu)

#### 5.5.4 Rilevato fino a quota 429 m s.l.m.

In questa fase è simulata la realizzazione del rilevato fino alla prima banca orizzontale, posta a quota 429 m s.l.m.. Tale lavorazione riguarda solo la zona di sviluppo circa 50 m nell'intorno della sezione 14. Contestualmente è simulata la posa della geogriglia al di sotto di tale rilevato, tramite attivazione degli opportuni elementi *cabla*.

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	41 di 62

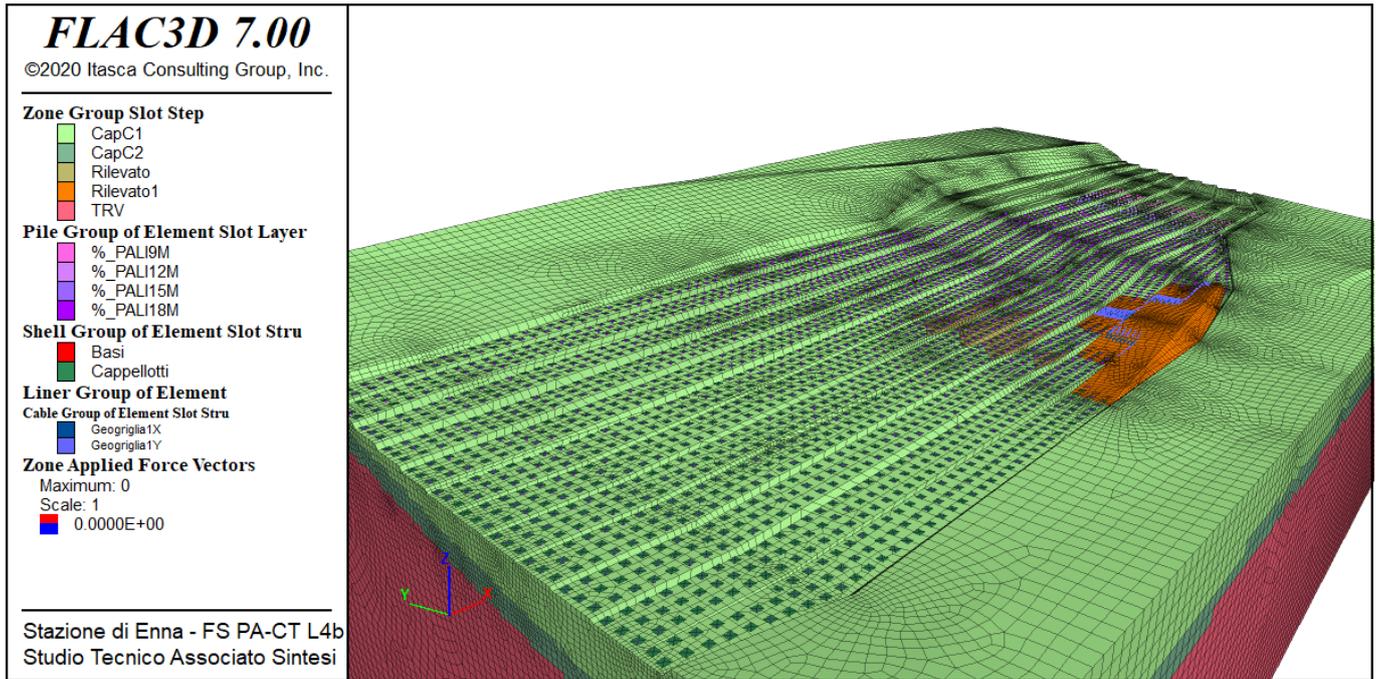


Figura 33. Rilevato fino a quota 429 m s.l.m.

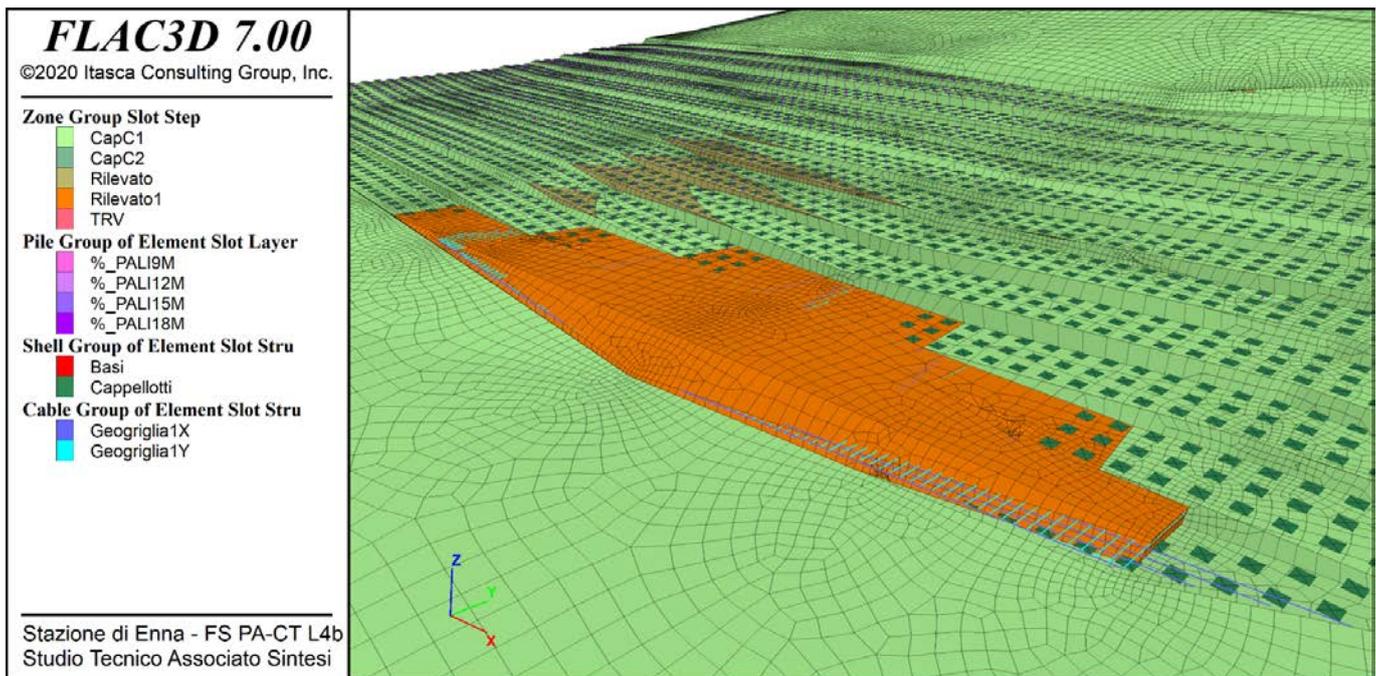


Figura 34. Rilevato fino a quota 429 m s.l.m.

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	42 di 62

### 5.5.5 Rilevato fino a quota 434 m s.l.m.

In questa fase è simulata la realizzazione del rilevato fino alla prima banca orizzontale, posta a quota 434 m s.l.m.. Tale lavorazione riguarda solo la quasi totalità dell'area studiata. Contestualmente è simulata la posa della geogriglia al di sotto di tale rilevato, tramite attivazione degli opportuni elementi *cabl*.

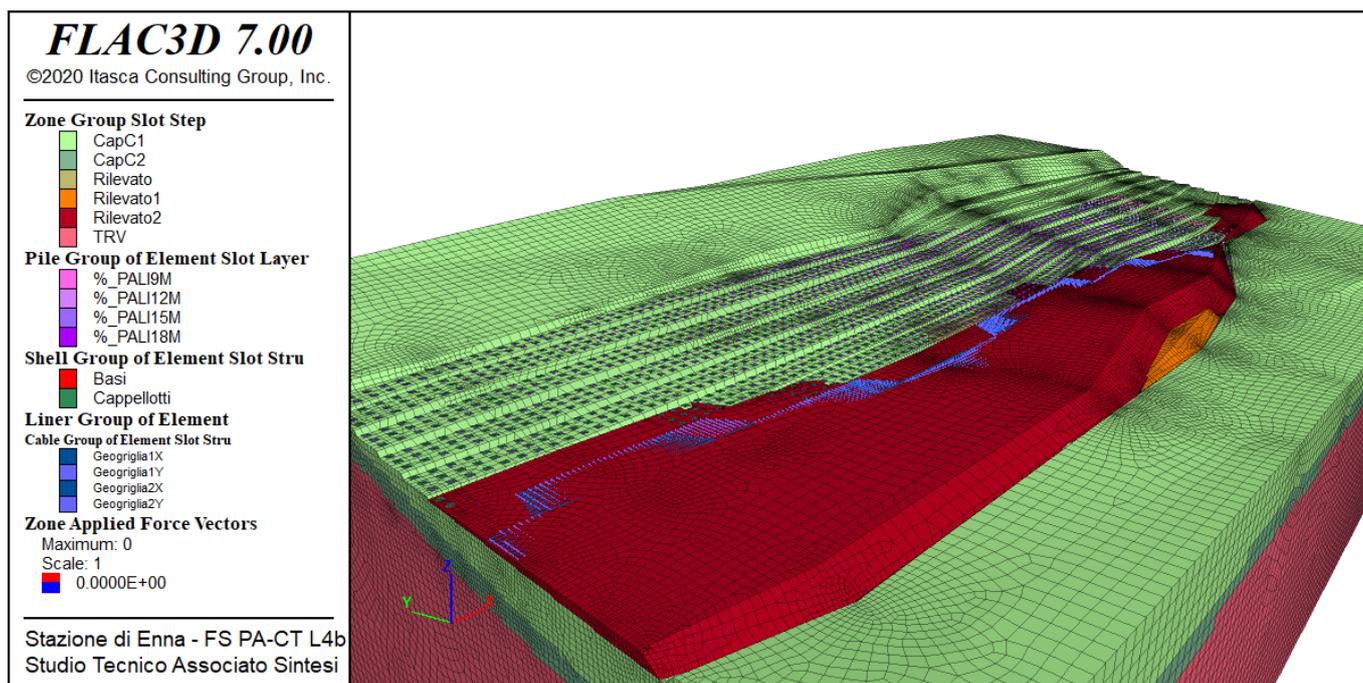


Figura 35. Rilevato fino a quota 434 m s.l.m.

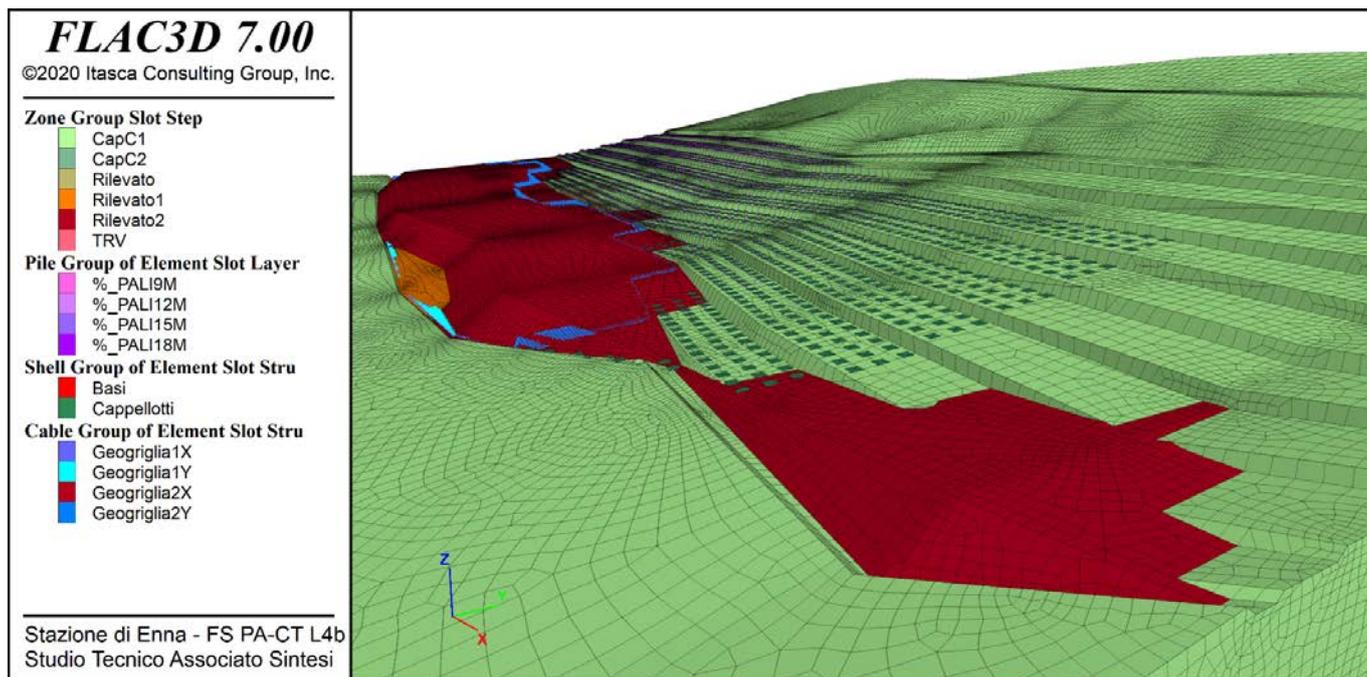


Figura 36. Rilevato fino a quota 434 m s.l.m.

### 5.5.6 Rilevato fino a quota 439 m s.l.m.

In questa fase è simulata la realizzazione del rilevato fino alla prima banca orizzontale, posta a quota 439 m s.l.m.. Contestualmente è simulata la posa della geogriglia al di sotto di tale rilevato, tramite attivazione degli opportuni elementi *cab*.

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	44 di 62

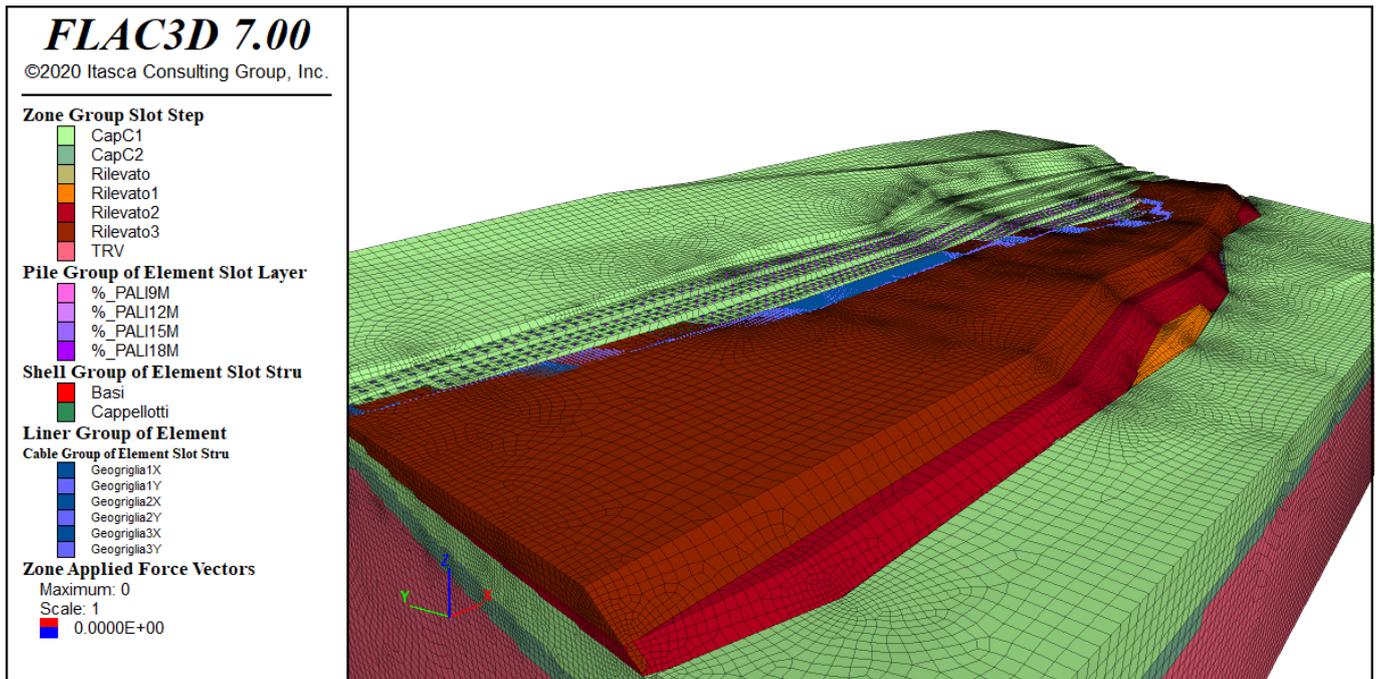


Figura 37. Rilevato fino a quota 439 m s.l.m.

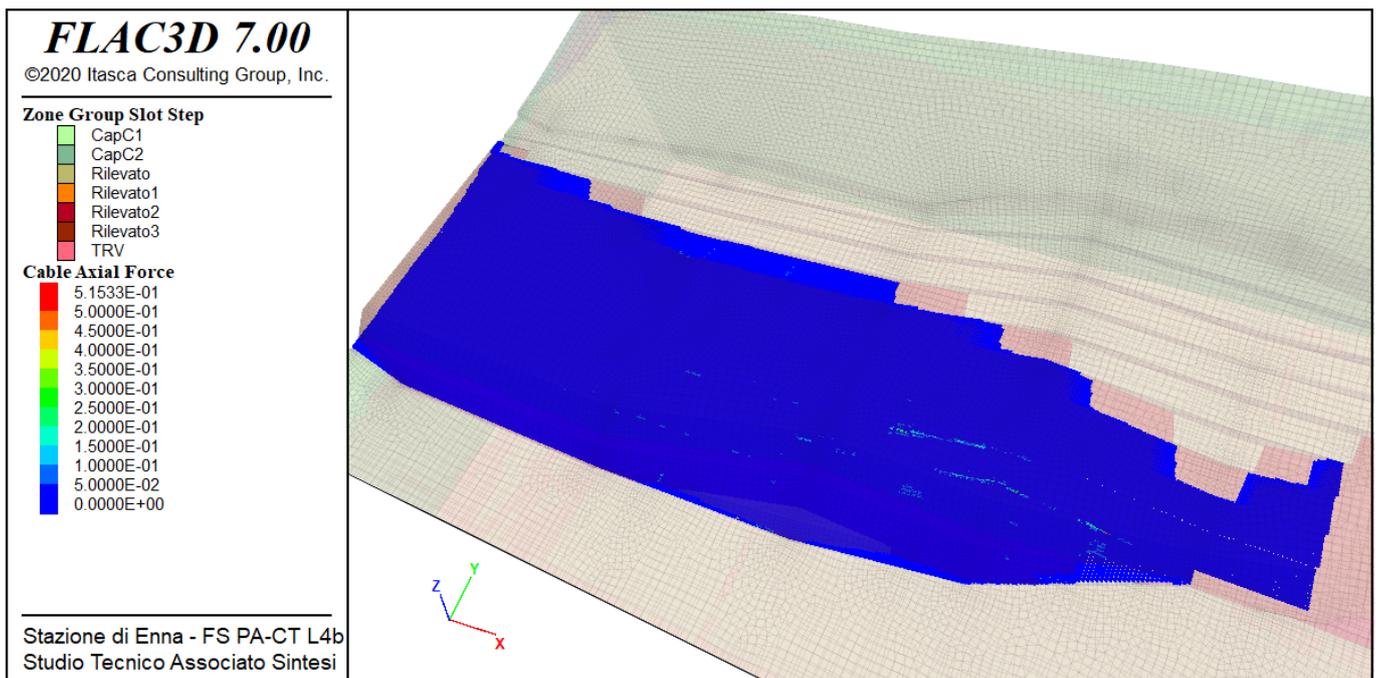


Figura 38. Rilevato fino a quota 439 m s.l.m. – geogriglia

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	45 di 62

### 5.5.7 Rilevato fino a quota 444 m s.l.m.

In questa fase è simulata la realizzazione del rilevato fino alla prima banca orizzontale, posta a quota 444 m s.l.m., corrispondente alla quota di imposta fondazione delle strutture in elevazione. Contestualmente è simulata la posa della geogriglia al di sotto di tale rilevato, tramite attivazione degli opportuni elementi *cab*.

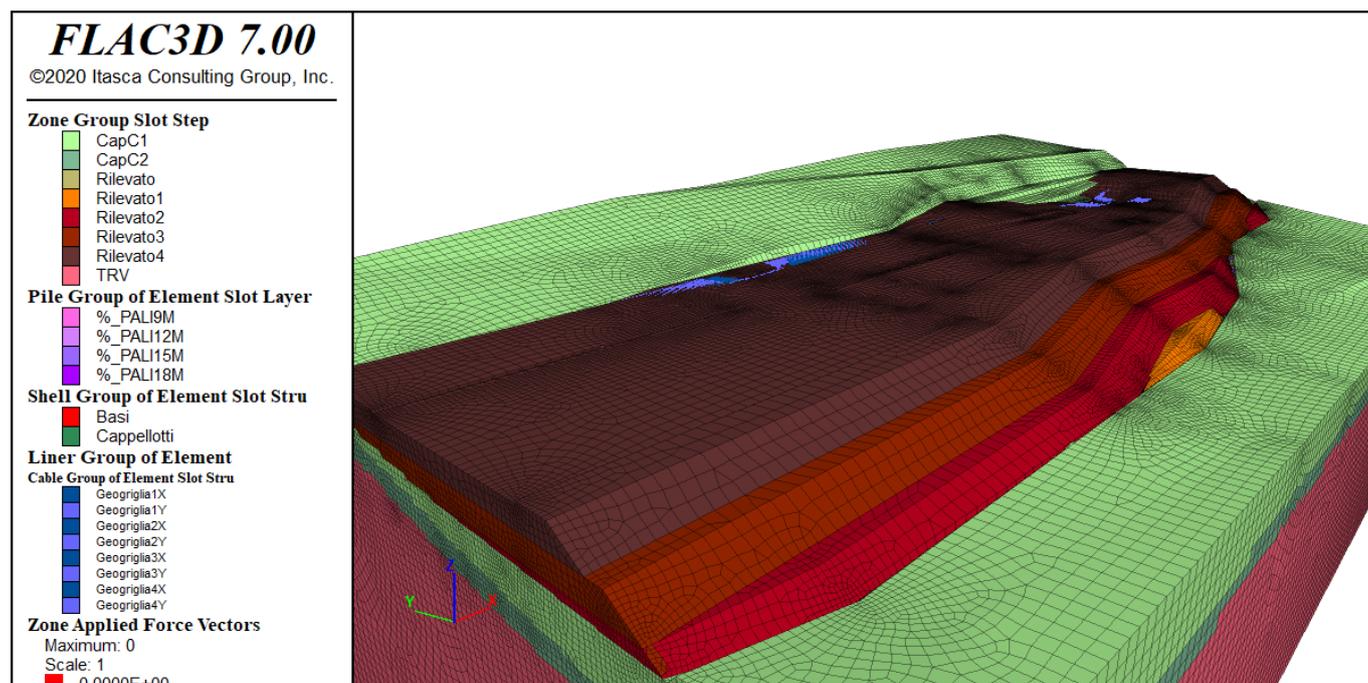


Figura 39. Rilevato fino a quota 444 m s.l.m.

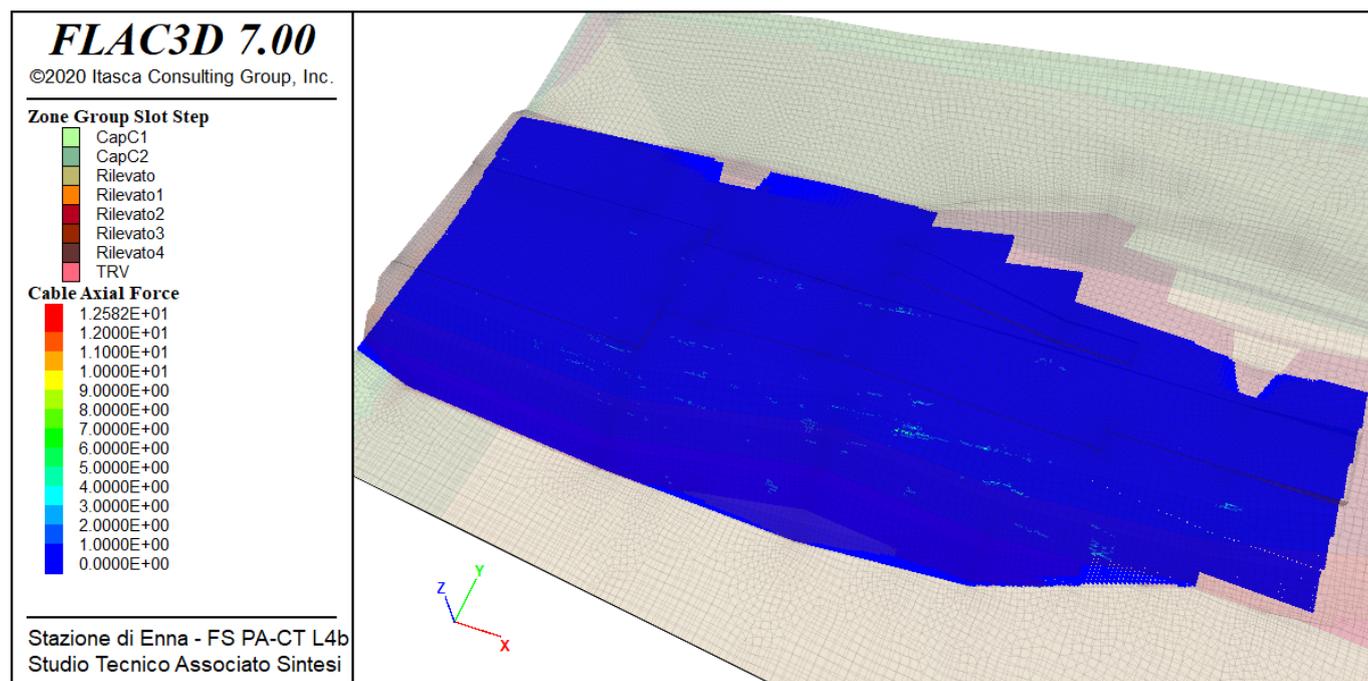


Figura 40. Rilevato fino a quota 444 m s.l.m. – geogriglia

### 5.5.8 Ultimazione dell'opera

In questa fase è simulata la realizzazione delle strutture in elevazione ed il completamento del rilevato. Gli elementi strutturali sono implementati con il loro peso di volume. Al rilevato presente sopra il piano ferroviario è applicato un sovraccarico aggiuntivo permanente, tale per cui la pressione complessiva scaricata dall'edificio di stazione corrisponda circa a 100 kPa.

Nella porzione tra la fine dello scatolare stradale e la sezione 16, per uno sviluppo longitudinale di circa 30 m, è stato inserito un volume di rilevato alleggerito, caratterizzato da un peso di volume di 13 kN/m<sup>3</sup>. Tale volume costituisce una zona di transizione tra il tratto precedente alleggerito mediante scatolare in c.a., ed il tratto successivo di rilevato corrente con altezze massime di circa 5 m, decrescenti allontanandosi dalla stazione.

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	47 di 62

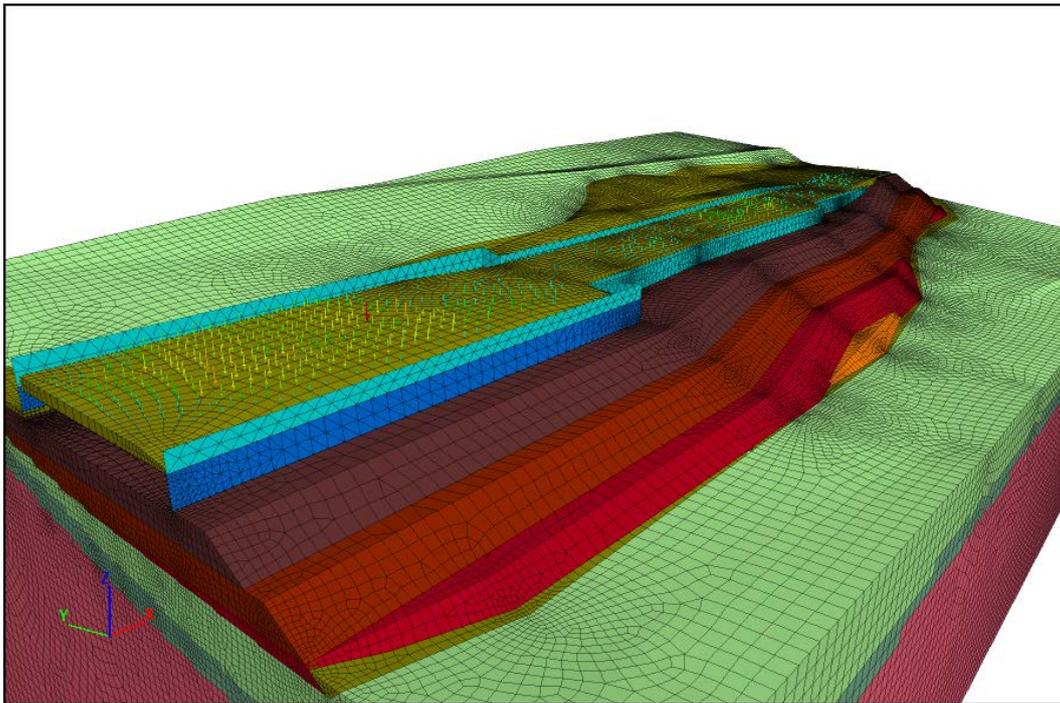


Figura 41. Strutture e completamento del rilevato

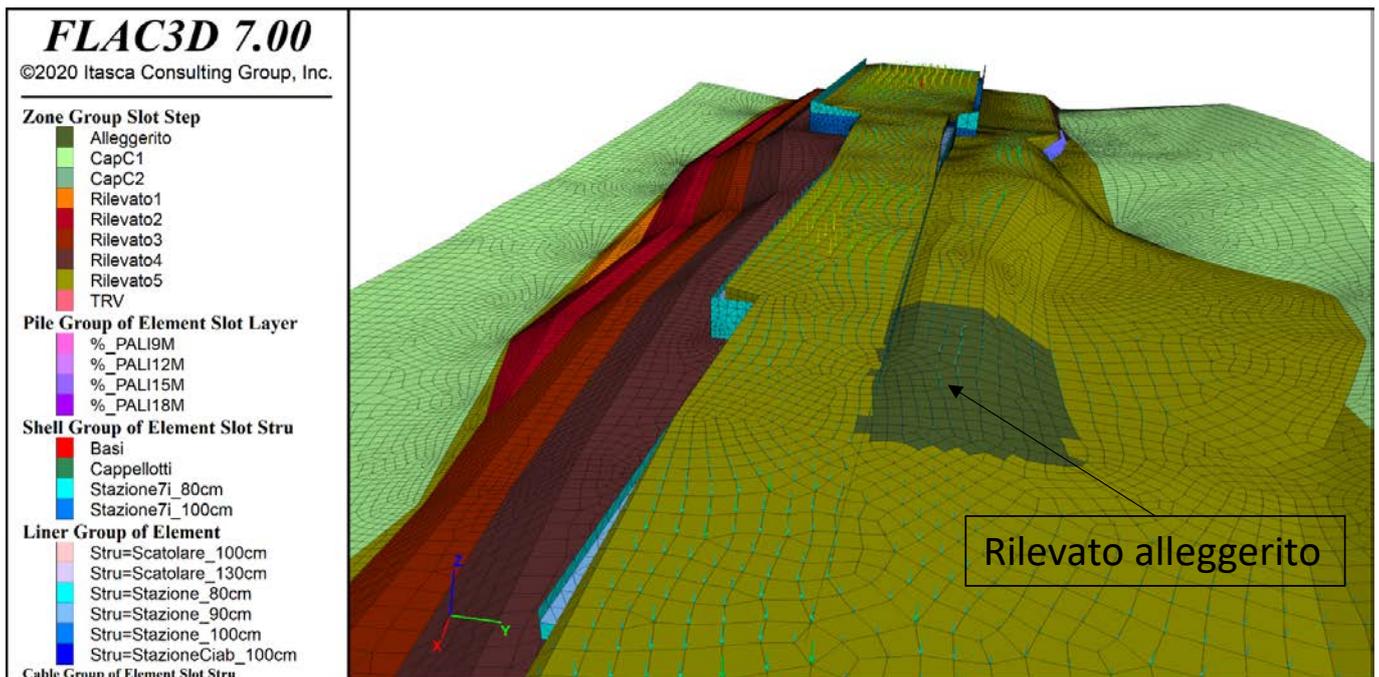


Figura 42. Strutture e completamento del rilevato – rilevato alleggerito

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	48 di 62

### 5.5.9 Fase di Esercizio

In fase di Esercizio si applica alle superfici del piano ferroviario un carico accidentale aggiuntivo di 20 kPa, su tutta l'area della copertura. Anche alla sede stradale della viabilità di monte si applica il carico accidentale di 20 kPa, mentre al piazzale dalla progressiva 0+720 in poi, si applica il carico accidentale di 20 kPa.

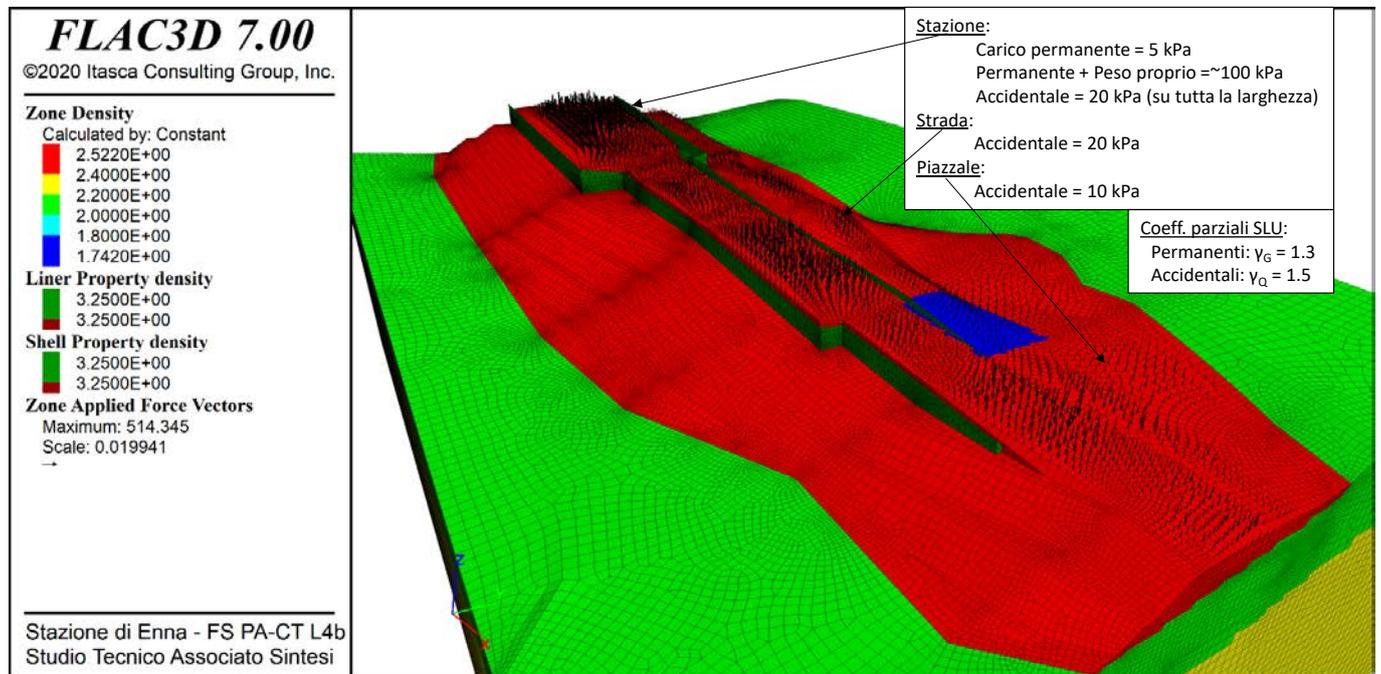


Figura 43. Applicazione carichi permanenti e accidentali fattorizzati, e amplificazione pesi propri allo SLU

## 5.6 Tempi e modalità di analisi

Per le analisi in regime di accoppiamento solido-fluido, sono indicati nella seguente tabella i tempi di esecuzione assunti e le modalità di analisi. Per le prime 3 fasi (stato attuale, scavo e gradonatura, esecuzione pali) si trascura il moto di filtrazione interstiziale e si considera la falda imposta (in questa fase le sovrappressioni neutre si possono considerare trascurabili). L'analisi di consolidazione inizia dalla prima fase di realizzazione del rilevato e prosegue per tutte le fasi esecutive di carico del rilevato, fino all'inizio dell'esercizio della ferrovia (ipotizzata cautelativamente dopo 450 giorni). Successivamente si analizza la consolidazione della stazione, che viene arrestata dopo 10 anni, ad avvenuta stabilizzazione dei cedimenti. La presente analisi omette il contributo della deformazione viscosa: nel modello tridimensionale, per via delle grandi dimensioni, della complessità geometrica, del dettaglio della discretizzazione e dei numerosi elementi strutturali implementati, l'analisi della consolidazione secondaria avrebbe richiesto un timestep di calcolo molto breve e conseguenti tempi di calcolo molto lunghi.

Tabella 2. Modalità di analisi e tempi di consolidazione

fase analisi	tipo analisi	tempo parziale	tempo progressivo	tempo progressivo	tempo progressivo
	[--]	[giorni]	[giorni]	[mesi]	[anni]
inizializzazione stato tensionale	drenata	-	-	-	-
scavo della gradonatura	drenata	-	-	-	-
realizzazione pali	drenata	-	-	-	-
rilevato fino a quota 429 m s.l.m.	consolidazione	10	10	0.3	0.0
rilevato fino a quota 434 m s.l.m.	consolidazione	40	50	1.7	0.1
rilevato fino a quota 439 m s.l.m.	consolidazione	40	90	3.0	0.3
rilevato fino a quota 444 m s.l.m.	consolidazione	40	130	4.3	0.4
edificio stazione e ultimazione opera	consolidazione	320	450	15.0	1.3
esercizio stazione	non drenata	0	450	15.0	1.3



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO**  
**NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA**  
 PROGETTO DEFINITIVO  
 TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	50 di 62

consolidazione	consolidazione	3650	4100	136.7	11.2
----------------	----------------	------	------	-------	------

### 5.7 Risultati dell'analisi di consolidazione

Nelle seguenti immagini si riportano i diagrammi in funzione del tempo degli spostamenti e delle pressioni neutre alla base del rilevato.

La Figura 45 mostra i cedimenti in funzione del tempo di punti di monitoraggio numerico posti in corrispondenza delle sezioni di tracciamento dell'opera (sez. 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 17) alla base del rilevato, nei punti ove l'altezza del sovraccarico è maggiore. Ad esclusione dell'ultima curva di colore rosa chiaro, che rappresenta un punto nella sezione 17, ove non è presente il consolidamento, i cedimenti totali complessivi sono inferiori a 25 mm. In particolare si evidenzia l'entrata in esercizio della stazione, ipotizzata dopo circa 1.3 anni dall'inizio dell'esecuzione del rilevato: l'incremento di cedimento da tale istante in poi è inferiore a 20 mm, come si può apprezzare dal confronto con la Figura 44. L'analisi di consolidazione è interrotta dopo 10 anni dall'inizio dell'esercizio, data la sostanziale stabilizzazione dei cedimenti: la gran parte dei cedimenti dovuti alla consolidazione si sviluppano dopo il primo anno dall'entrata in esercizio.

I risultati della presente analisi sono confrontabili con quelli ottenuti dalle analisi di consolidazione 2D (cfr. [DC3], [DC4], [DC5]), al netto del cedimento da consolidazione secondaria, in quanto nel modello tridimensionale, per via delle grandi dimensioni, della complessità geometrica, del dettaglio della discretizzazione e dei numerosi elementi strutturali implementati, l'analisi della deformazione viscosa avrebbe richiesto un timestep di calcolo molto breve e conseguenti tempi di calcolo molto lunghi, non gestibili. È stato possibile però verificare che:

- i risultati ottenuti sono dello stesso ordine di grandezza in termini di tempi di consolidazione primaria, per cui si ritengono validi i cedimenti massimi ottenuti dalle analisi 2D con il legame costitutivo "Soft Soil Creep", sicuramente cautelativi per l'opera in esame;
- i cedimenti complessivi al termine della consolidazione sono confrontabili con quelli ottenuti mediante l'analisi drenata, sia 2D che 3D, con un massimo di circa 25 mm (cfr. [DC6]).

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	51 di 62

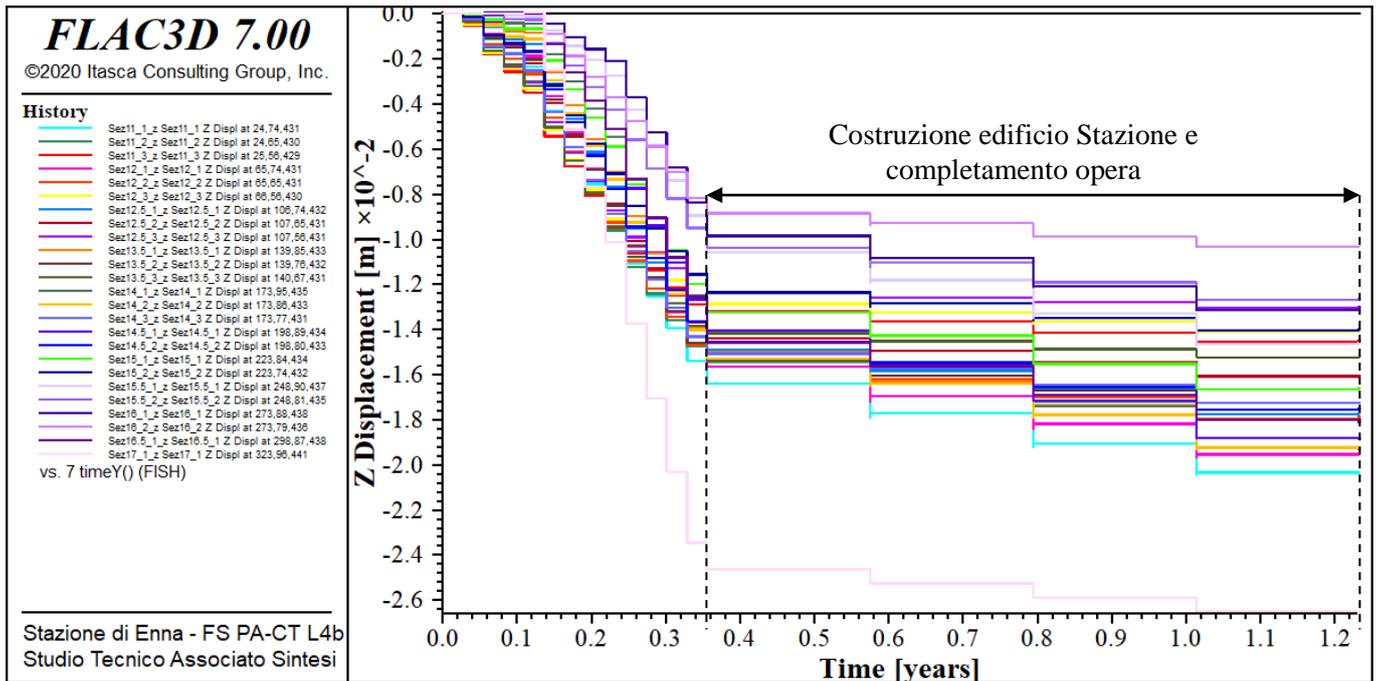


Figura 44. Cedimenti in funzione del tempo a fine costruzione (ipotizzata dopo 1.3 anni da inizio esecuzione rilevato)

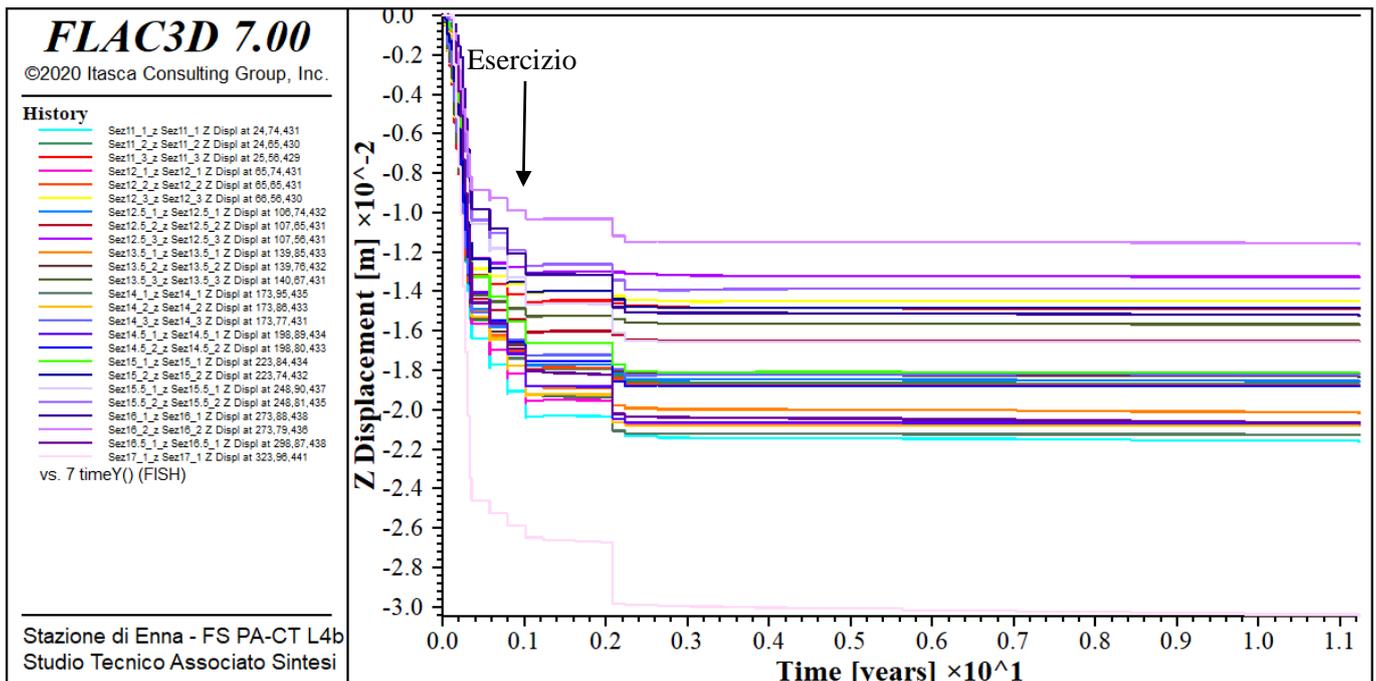


Figura 45. Cedimenti in funzione del tempo dopo 11 anni

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	52 di 62

### 5.8 Risultati in termini di spostamenti

Nelle seguenti immagini si riportano gli spostamenti totali dovuti all'ultimazione dell'opera ed all'applicazione dei carichi di esercizio.

Gli spostamenti complessivi al di sotto dell'edificio di Stazione e degli scotolari di approccio è inferiore a 5 cm, sia per la fase esecutiva che per la fase di esercizio, inclusiva degli spostamenti del corpo del rilevato, non rilevabili all'atto pratico (perché avvengono durante le fasi costruttive e sono compensati in corso d'opera). Gli spostamenti alla base del rilevato, originati sul terreno naturale dall'opera, sono al massimo di 25 mm. L'effetto dei pali di consolidamento è evidente nella parte terminale del modello, dove, senza pali di consolidamento, si raggiungono 39 mm di cedimento alla base del rilevato.

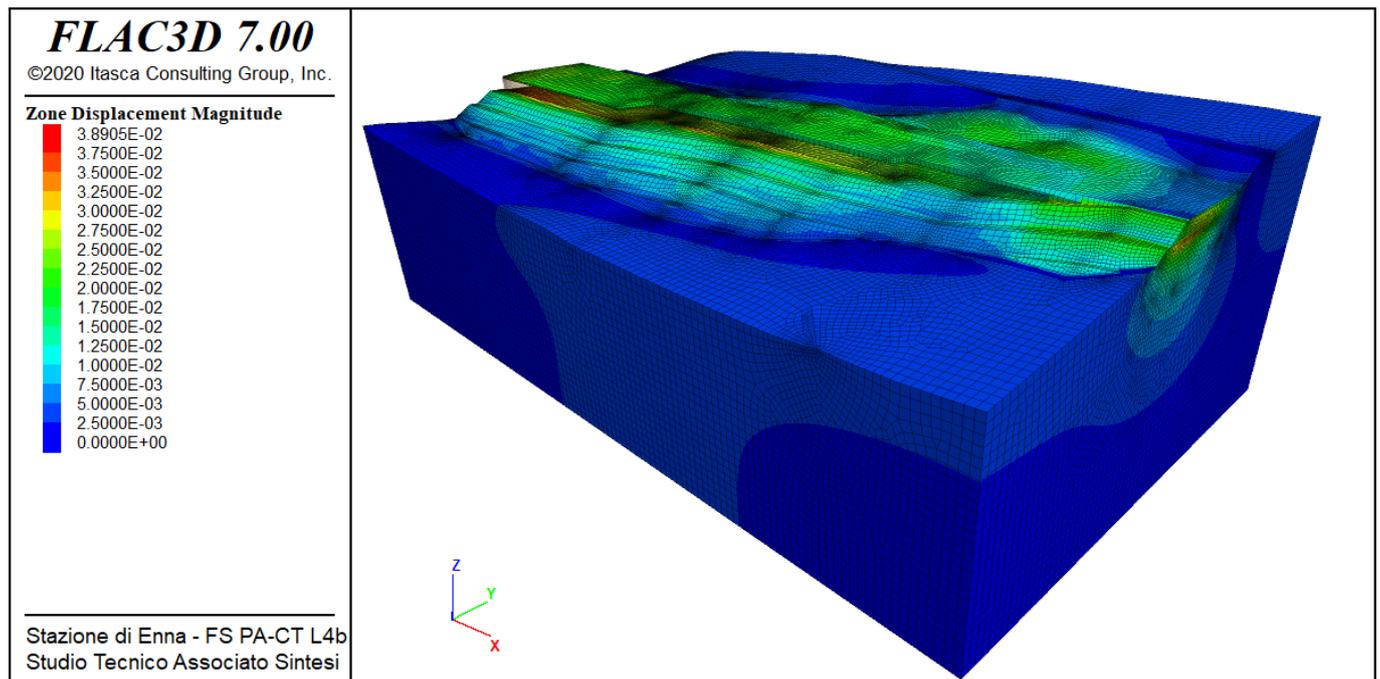


Figura 46. Spostamenti totali ad ultimazione opera

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	53 di 62

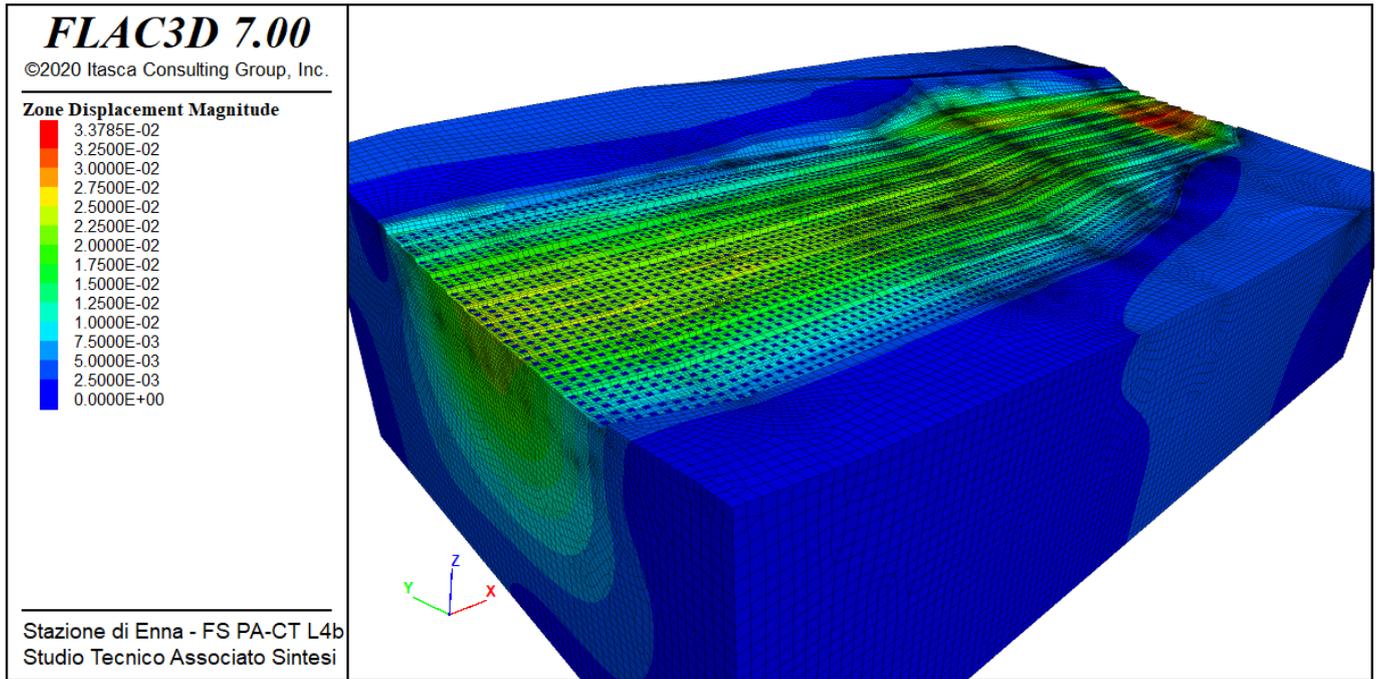


Figura 47. Spostamenti alla base del rilevato ad ultimazione opera

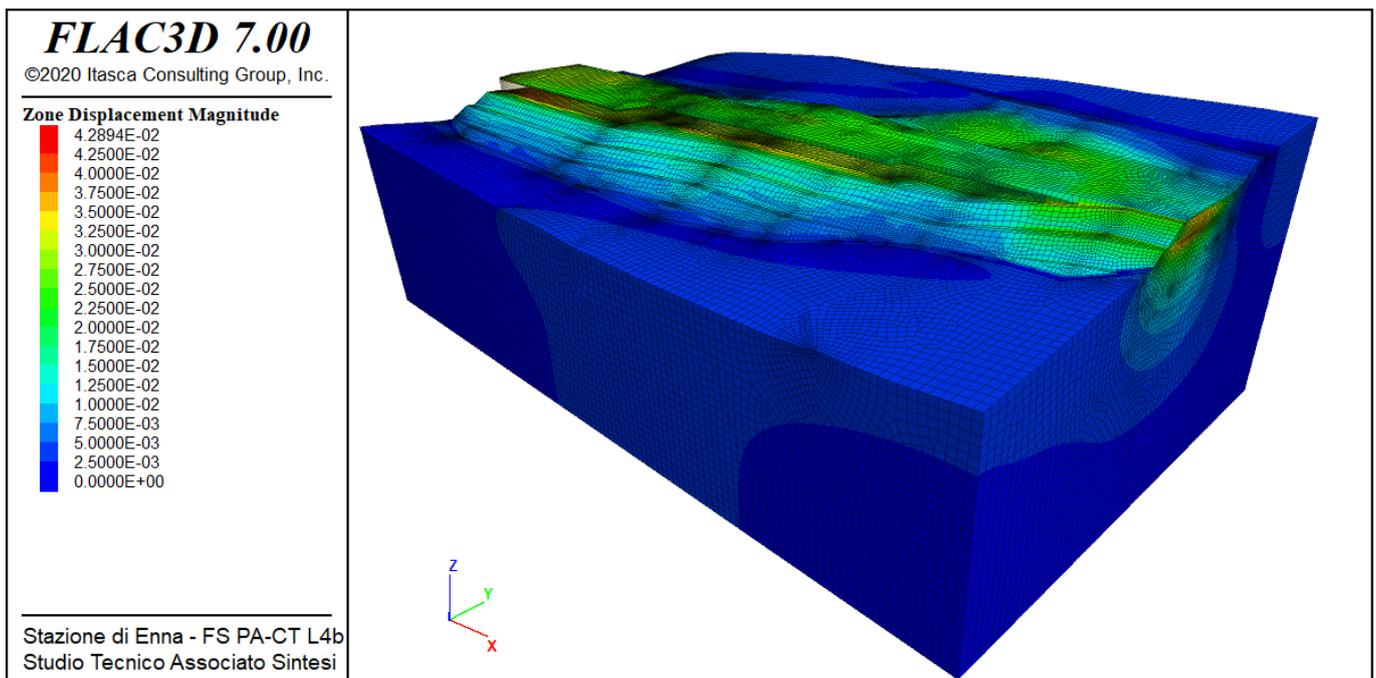


Figura 48. Spostamenti totali in fase di esercizio

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	54 di 62

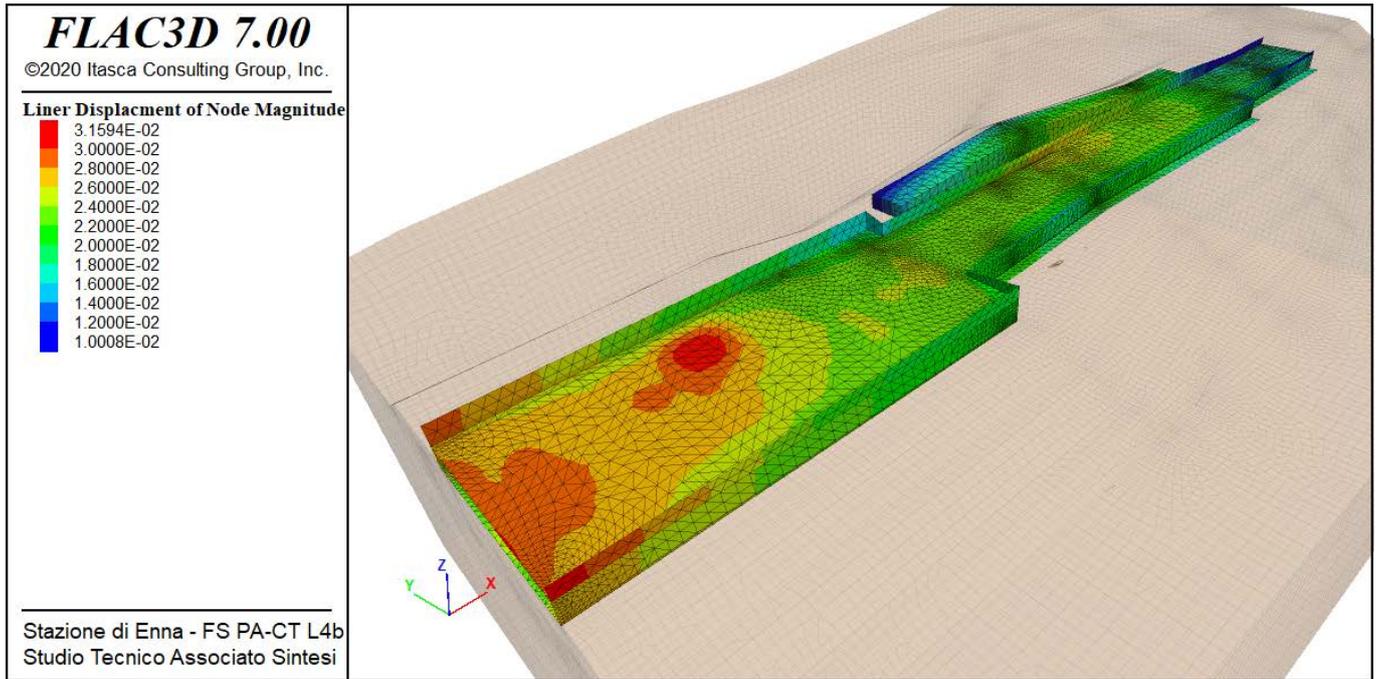


Figura 49. Spostamenti della struttura in esercizio

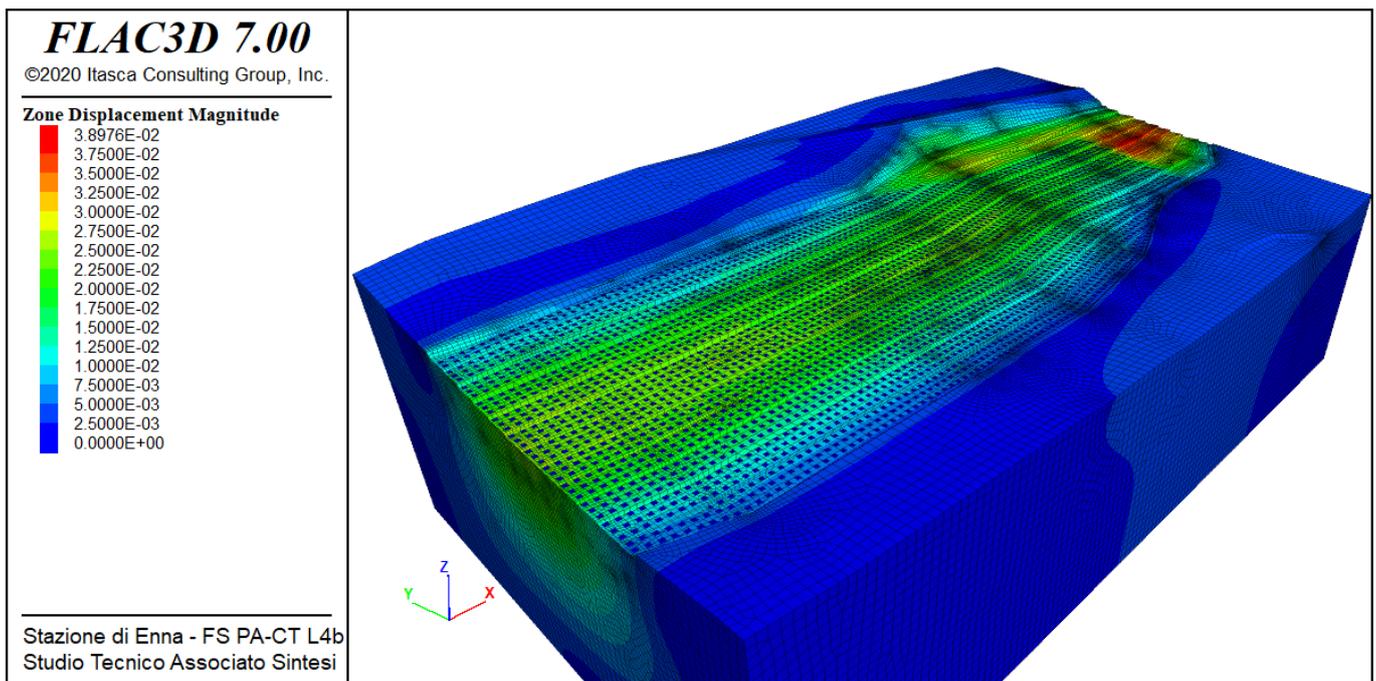


Figura 50. Spostamenti alla base del rilevato in esercizio

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	55 di 62

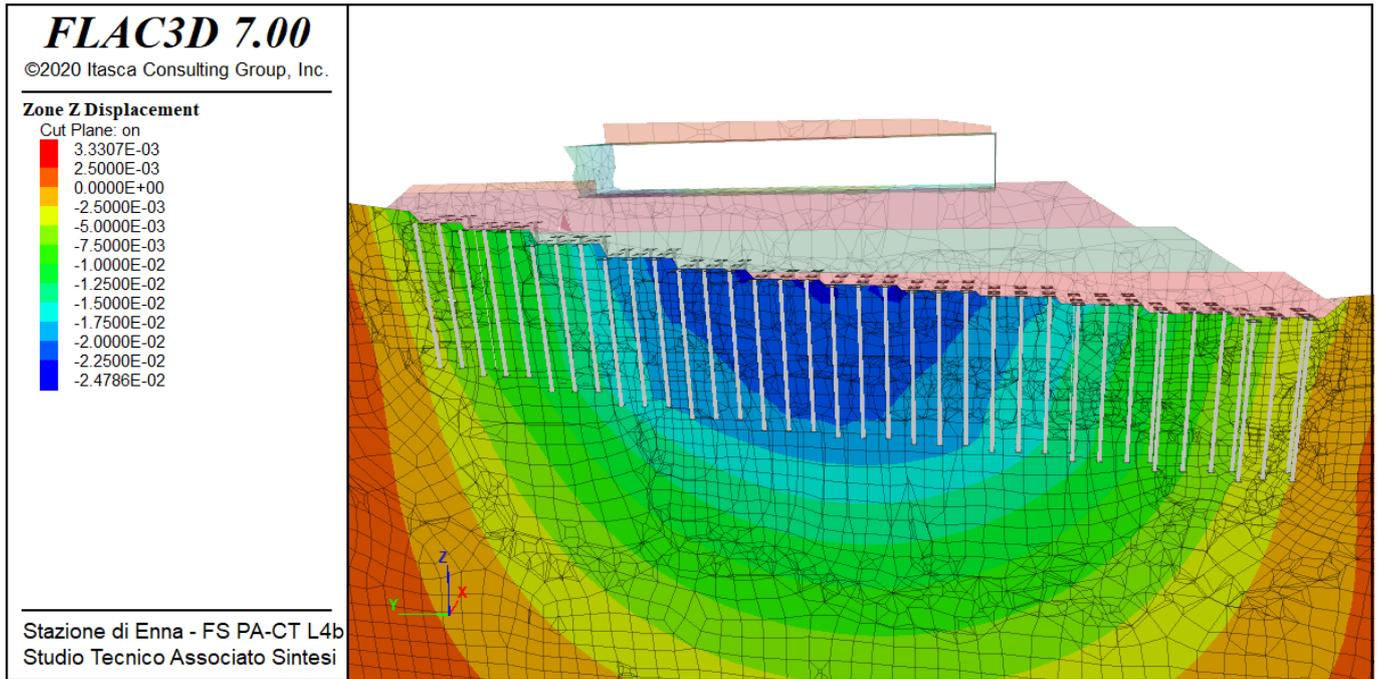


Figura 51. Spostamenti totali sezione 11 in esercizio

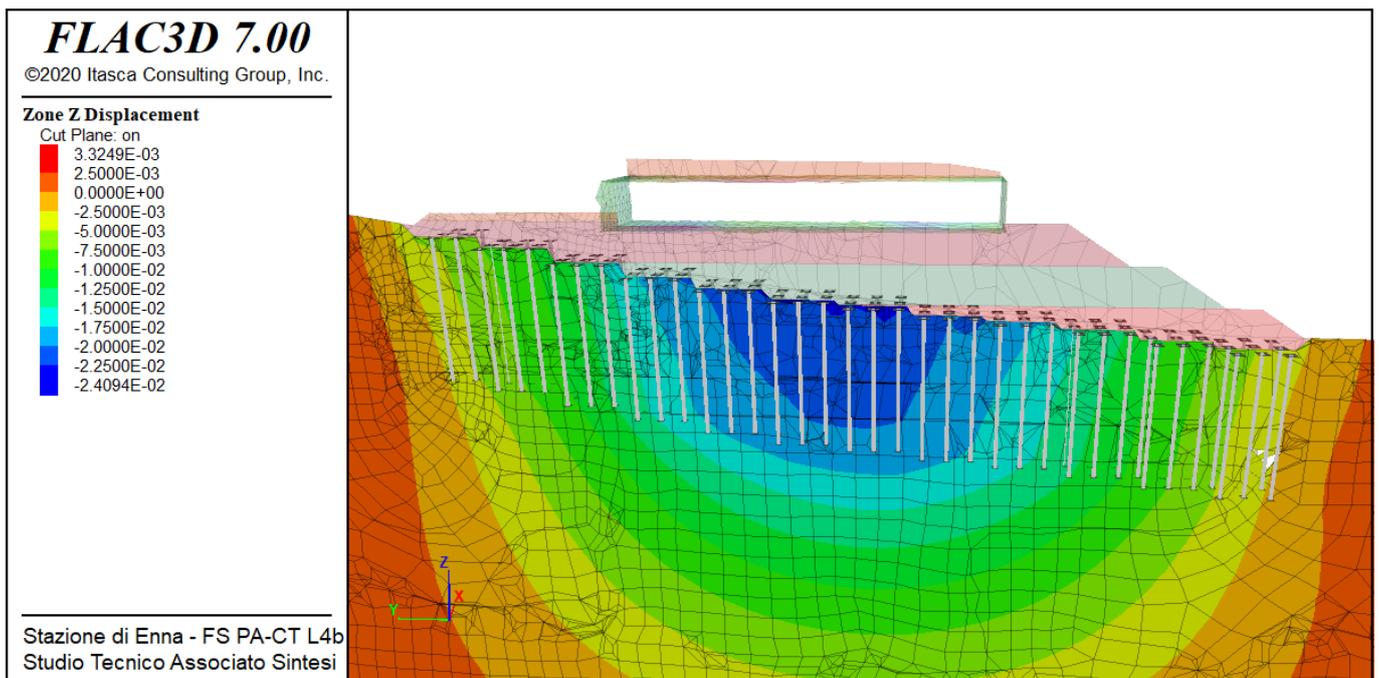


Figura 52. Spostamenti totali sezione 12 in esercizio

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	56 di 62

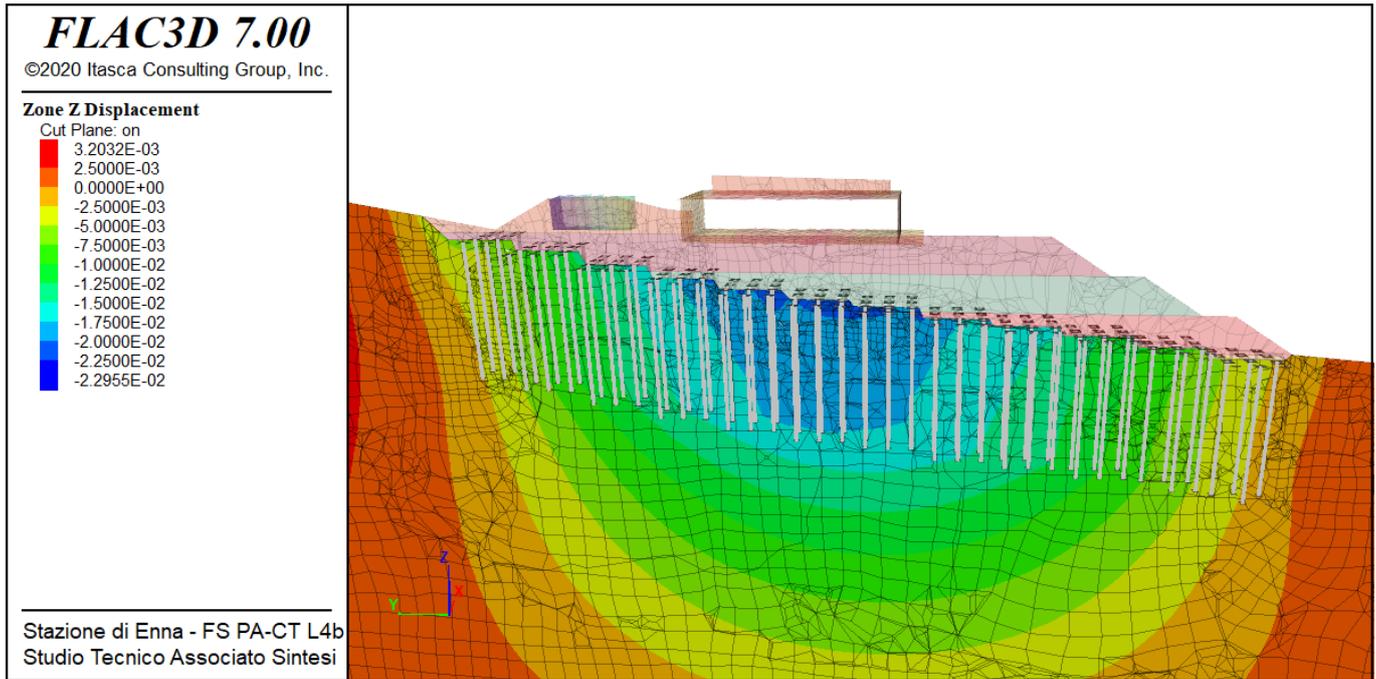


Figura 53. Spostamenti totali sezione 13 in esercizio

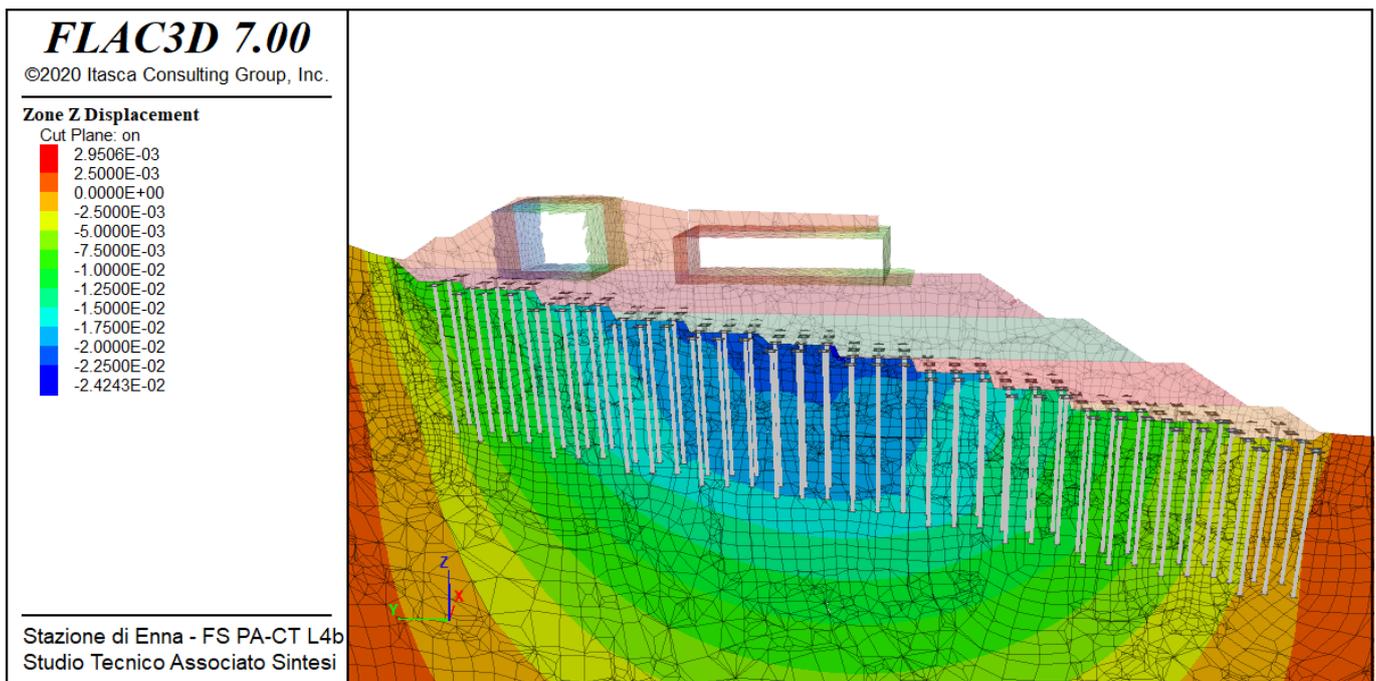


Figura 54. Spostamenti totali sezione 14 in esercizio

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	57 di 62

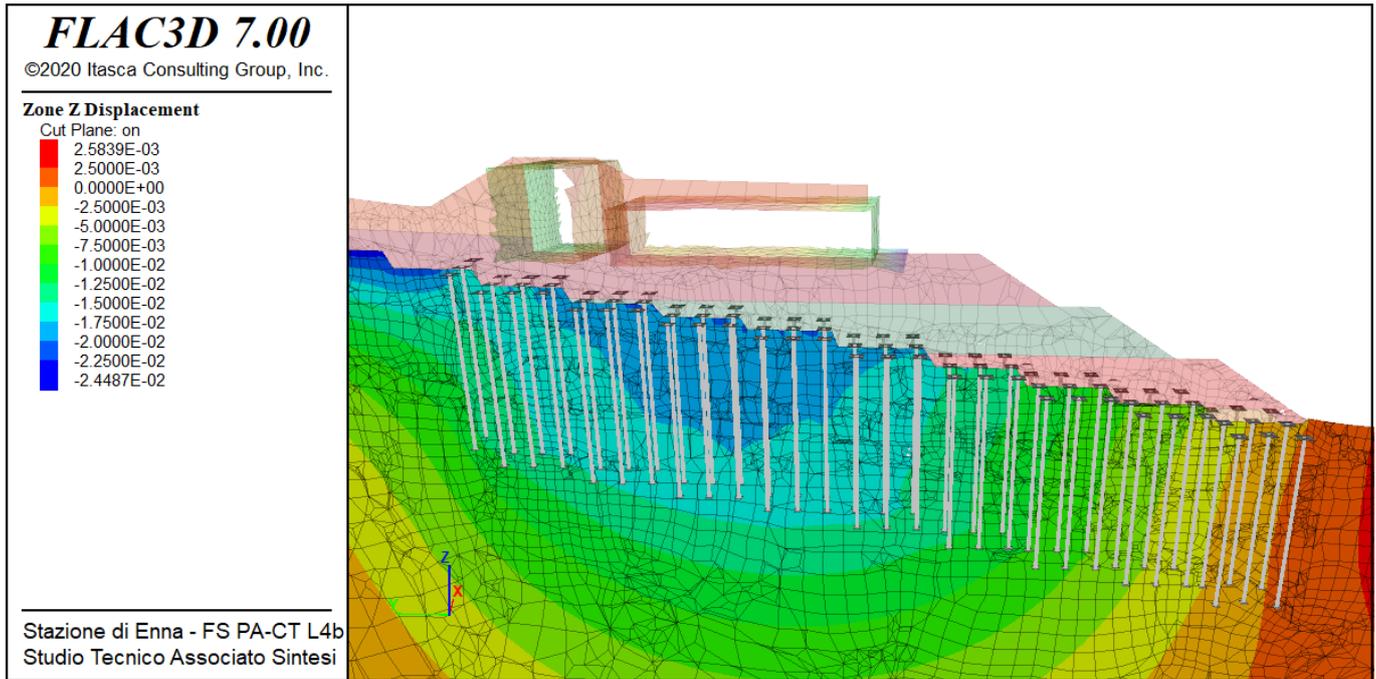


Figura 55. Spostamenti totali sezione 15 in esercizio

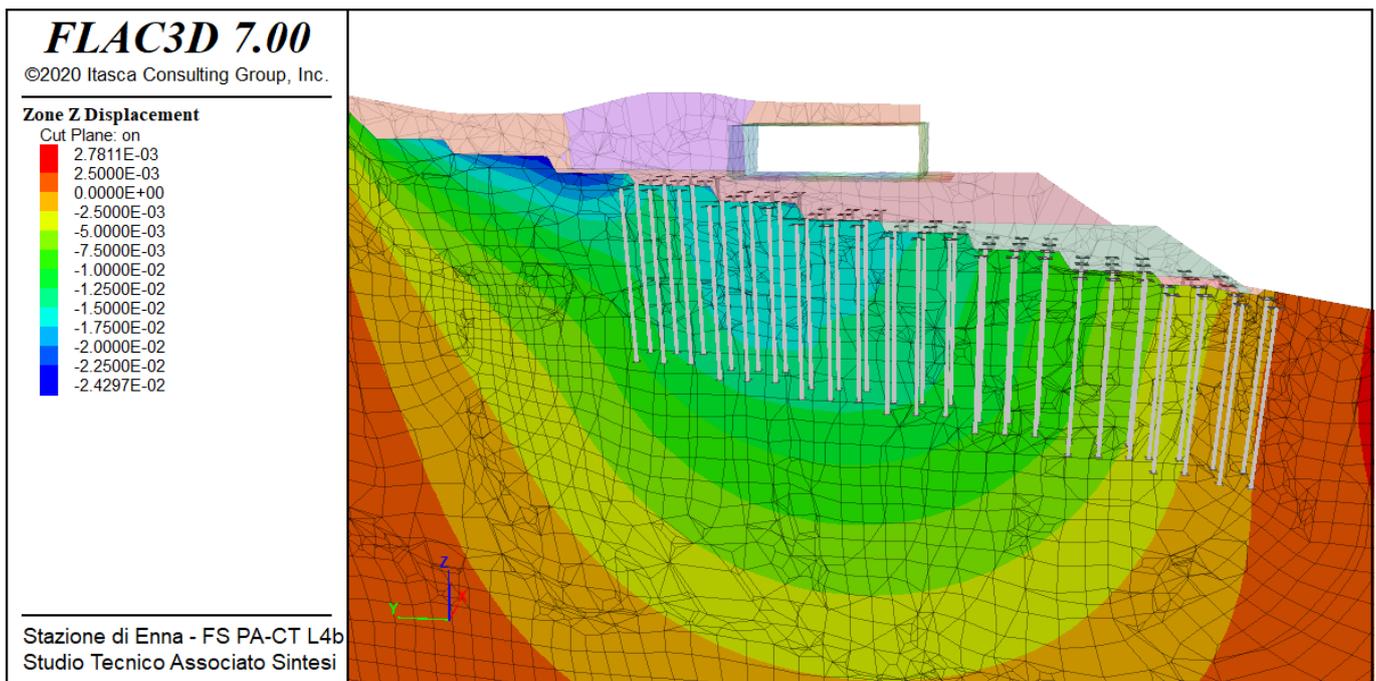


Figura 56. Spostamenti totali sezione alla pk 0+725 in esercizio

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	58 di 62

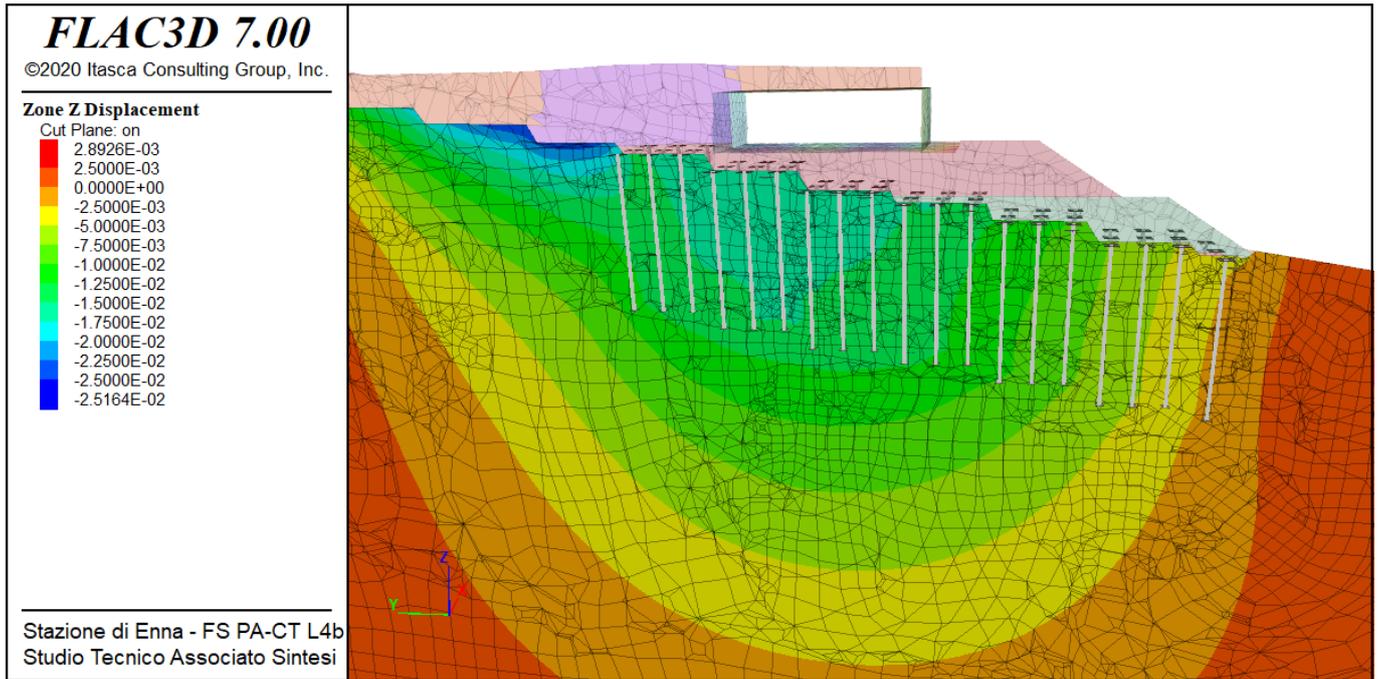


Figura 57. Spostamenti totali sezione 16 in esercizio

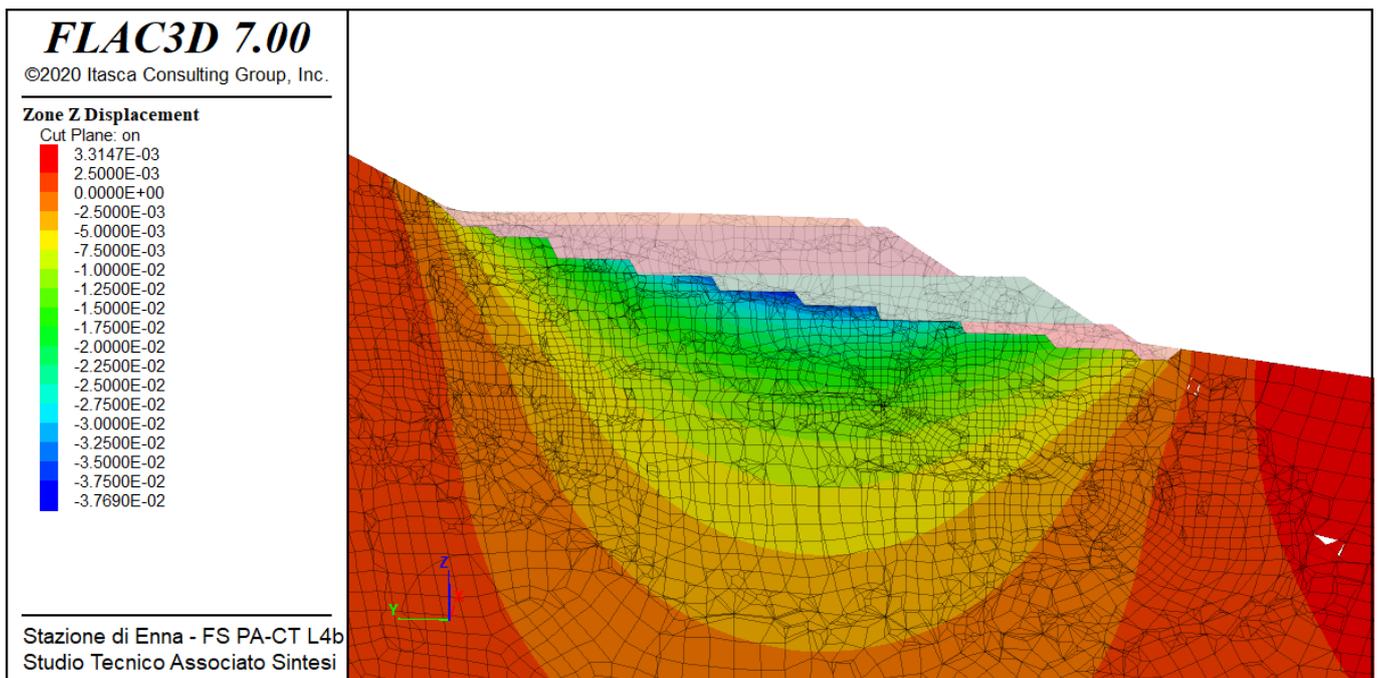


Figura 58. Spostamenti totali sezione 17 in esercizio



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO  
NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO  
TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE  
DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI  
CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO  
SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	59 di 62

## 5.9 Risultati in termini di sollecitazioni strutturali

Nelle seguenti immagini si riportano le azioni interne sugli elementi di consolidamento allo SLE.

Dalle immagini riportate nel seguito si nota come i pali più sollecitati siano quelli di valle, nella parte alta del palo, confermando il risultato già ottenuto con le analisi 2D (cfr. [DC3], [DC4], [DC5]).

Trattandosi di pali riduttori di cedimento, la normativa vigente ne richiede la verifica dell'integrità strutturale allo SLU. Le azioni interne allo SLU sono ottenute tramite amplificazione degli effetti per il coefficiente parziale  $\gamma = 1.4$ .

La Figura 61 riporta la verifica allo SLU per tutte le sezioni di palo, confrontate con il dominio di resistenza per l'armatura di progetto (8 Ø24): tutti i punti sono ampiamente all'interno del dominio con un buon margine di sicurezza. La verifica è soddisfatta.

La geogriglia è poco sollecitata, sviluppando allo SLU meno del 10% della sua resistenza.

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	60 di 62

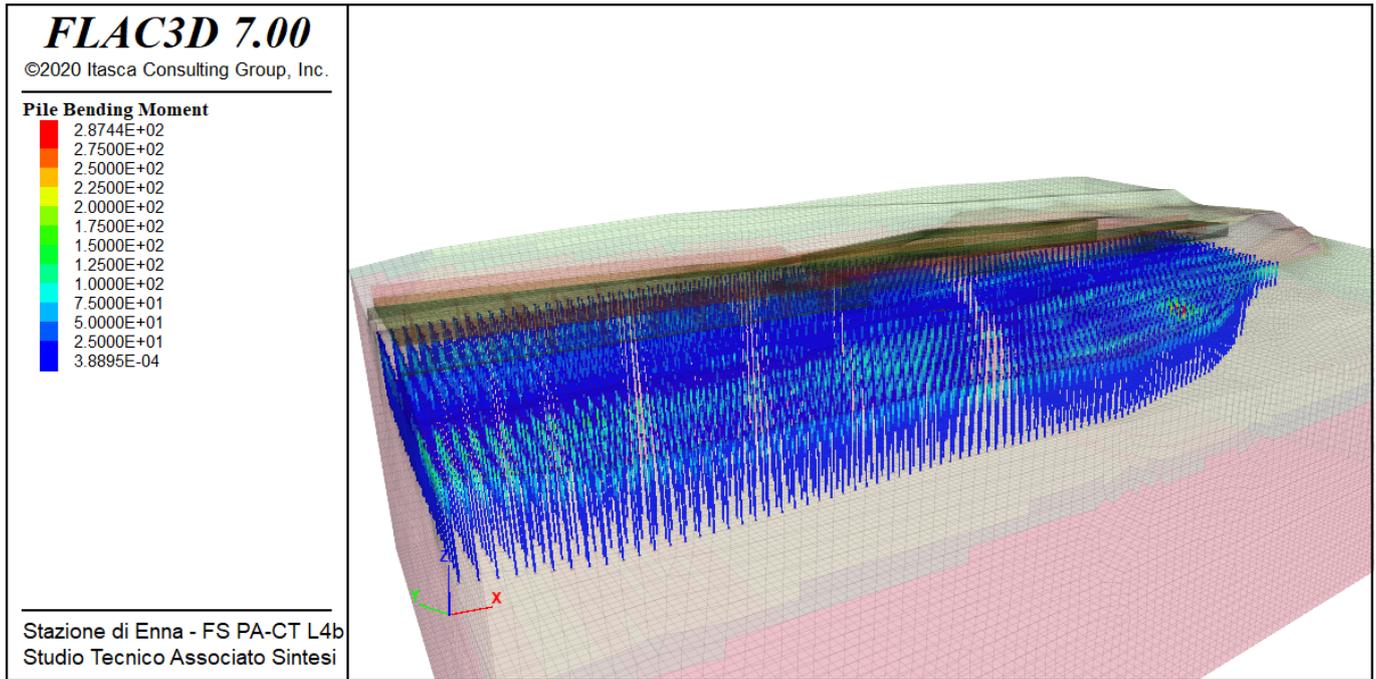


Figura 59. Momento flettente pali in esercizio

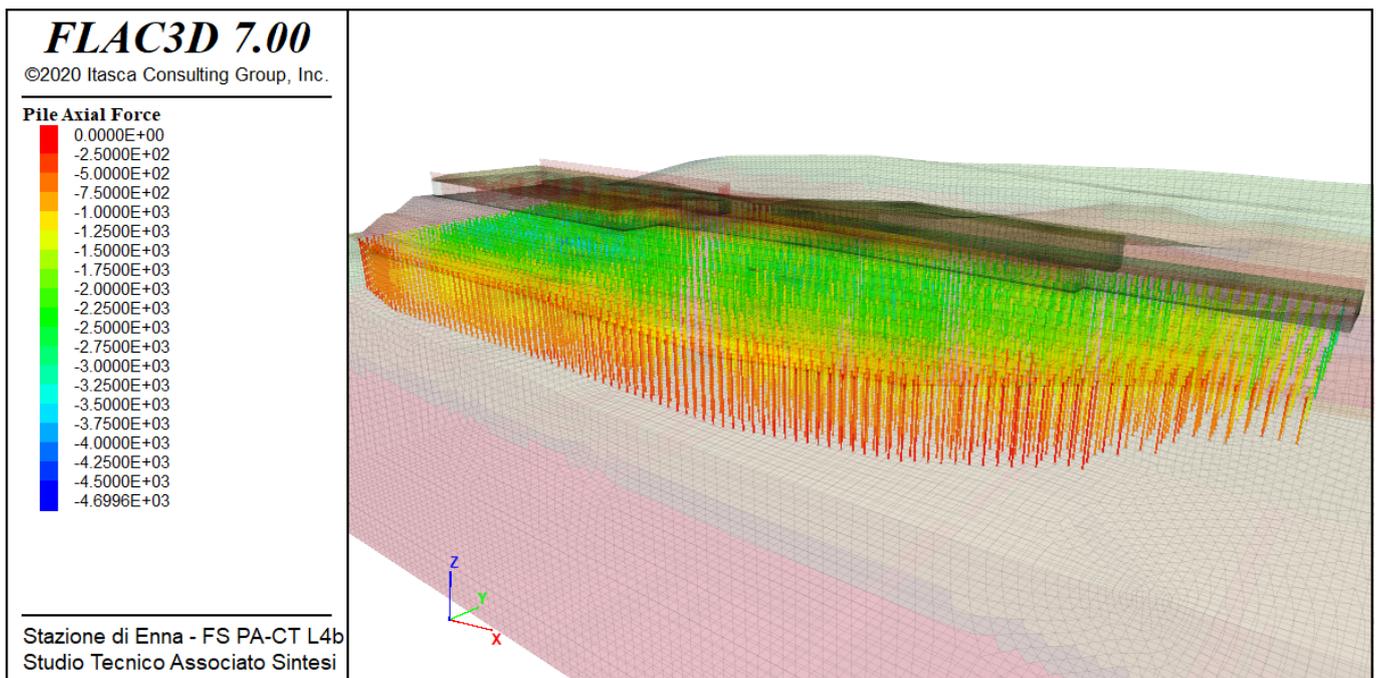


Figura 60. Azione assiale pali in esercizio

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	61 di 62

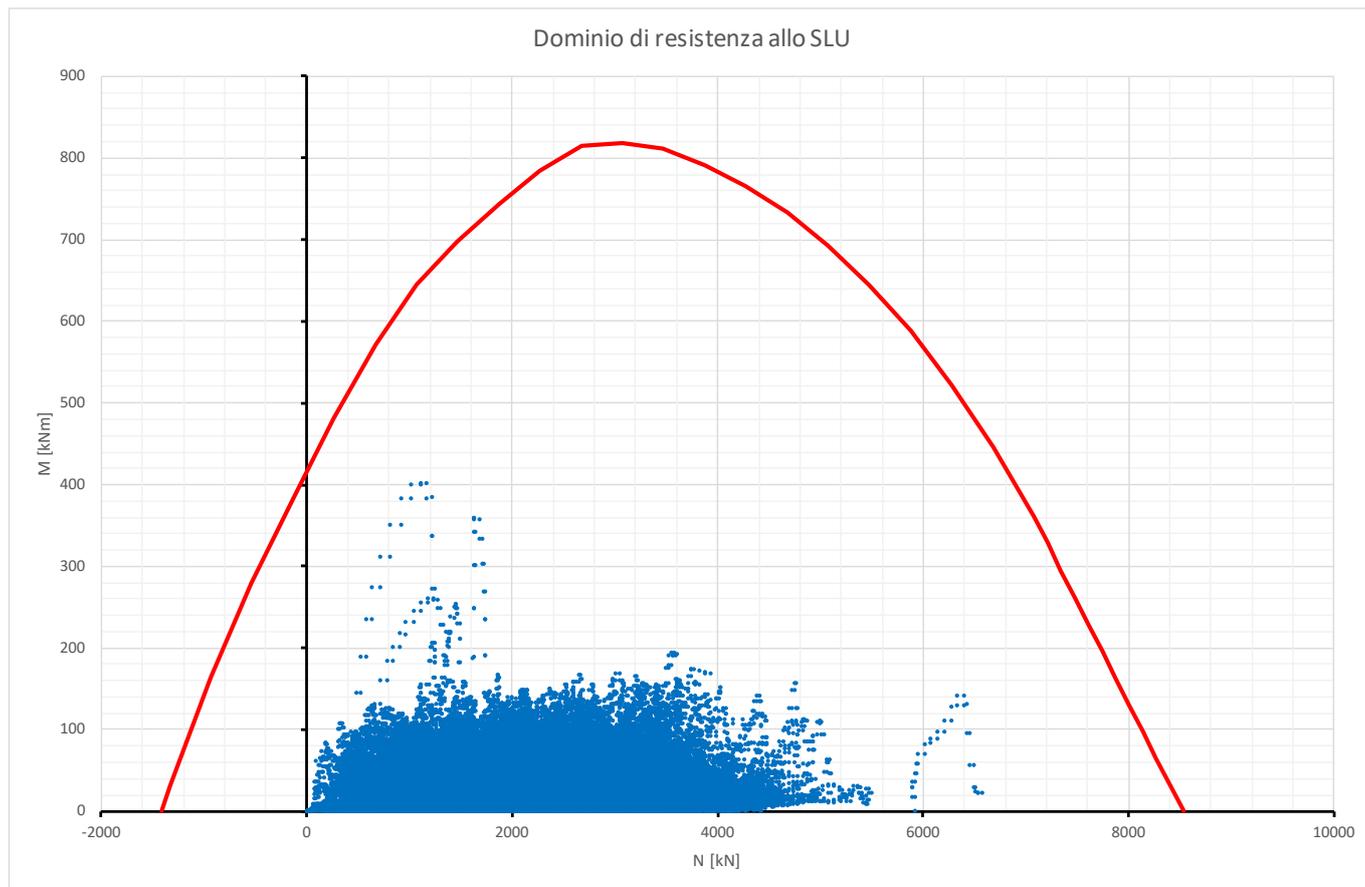


Figura 61. Verifica di integrità strutturale pali di consolidamento – Dominio N-M di tutte le sezioni



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO  
NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO  
TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO

FV01 - MODELLO A - ANALISI TRIDIMENSIONALE  
DELL'ESECUZIONE DELLA STAZIONE NELL'IPOTESI DI  
CONDIZIONI DRENATE, IN REGIME DI ACCOPPIAMENTO  
SOLIDO-FLUIDO E ANALISI DELLA CONSOLIDAZIONE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 016	A	62 di 62

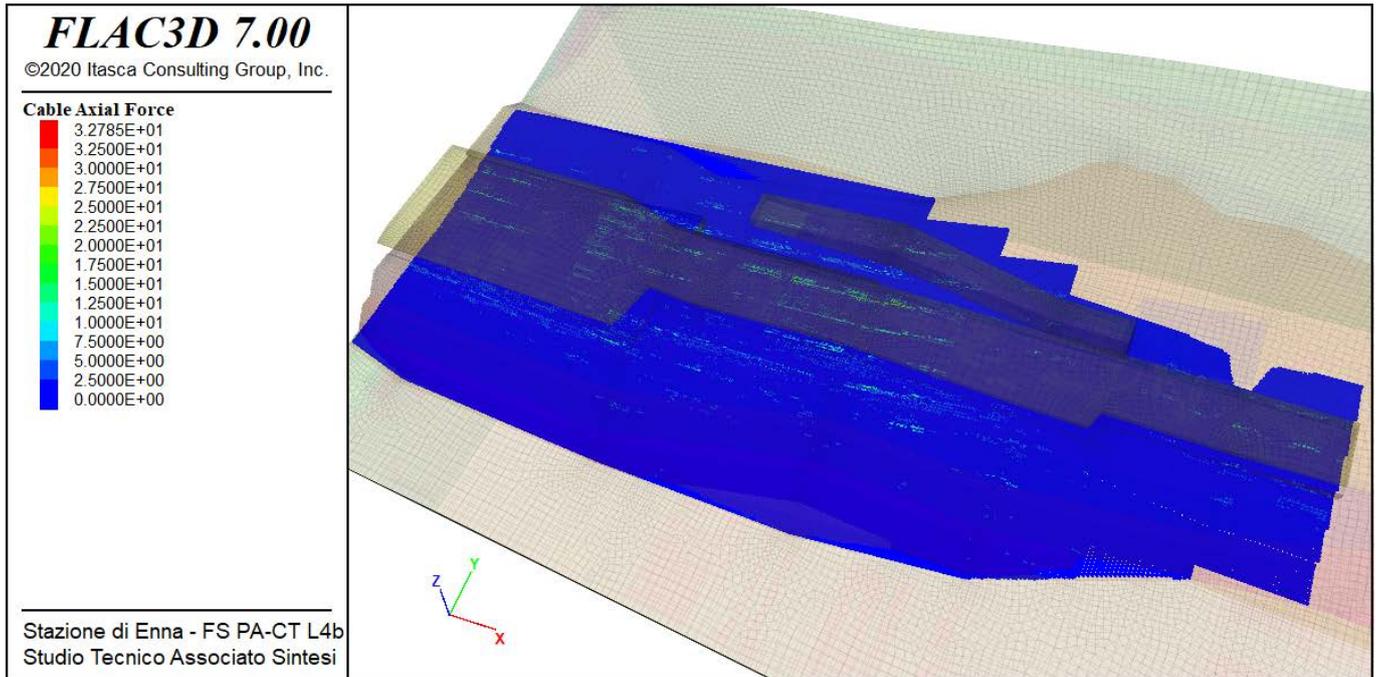


Figura 62. Azione massima sulla geogriglia