

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 - TARATURA E VALIDAZIONE DEI LEGAMI COSTITUTIVI PER IL CODICE DI CALCOLO FLAC3D

SCALA:

-

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

RS3V 40 D 29 RH GE0005 015 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

RS3V40D29RHGE0005015A.doc

n. E.ab.: 185\_6



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

FV01 - TARATURA E VALIDAZIONE DEI LEGAMI  
COSTITUTIVI PER IL CODICE DI CALCOLO FLAC3D

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 015	A	2 di 30

## INDICE

1. PREMESSA .....	3
2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	4
2.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	4
2.2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	4
2.3 SOFTWARE .....	4
3. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	5
3.1 INDAGINI ESEGUITE.....	5
3.2 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO .....	5
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 MODELLI COSTITUTIVI DEL TERRENO.....	22
5.2 PARAMETRI GEOTECNICI E STRATIGRAFIA.....	25
5.3 VALIDAZIONE DEI MODELLI COSTITUTIVI.....	29

## 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.

In particolare, il presente documento espone la validazione del legame costitutivo utilizzato nelle analisi drenate Plastic Hardening Small Strain, confrontando una sezione del modello Flac3D con la medesima sezione nell'analisi Plaxis2D di progetto. Il legame costitutivo Soft Soil, utilizzato per le analisi di consolidazione, presenta parametri equivalenti ai parametri del modello PH, ricavati tramite le formulazioni espone nel seguito.

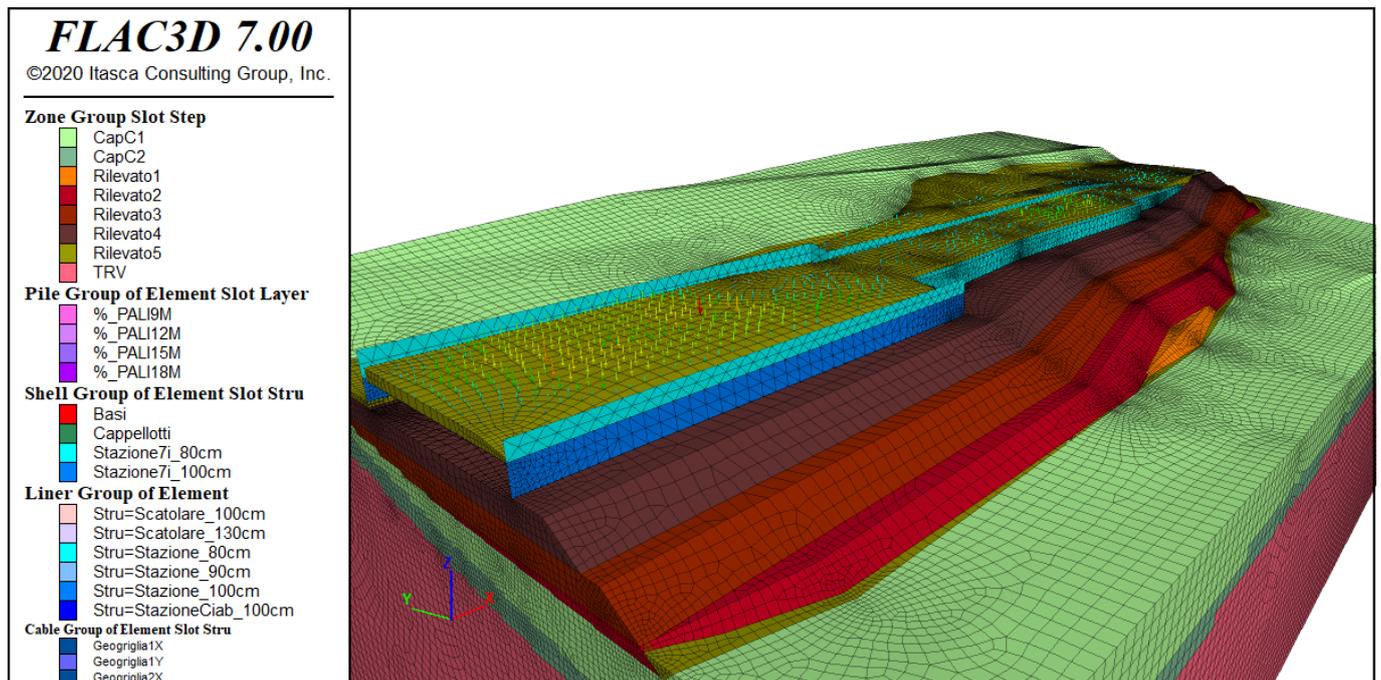


Figura 1. Modello geotecnico tridimensionale



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

FV01 - TARATURA E VALIDAZIONE DEI LEGAMI  
COSTITUTIVI PER IL CODICE DI CALCOLO FLAC3D

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 015	A	4 di 30

## 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

### 2.3 **Software**

- Plaxis2D versione 2019, VIP Service nr. 1-1192109
- 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 - TARATURA E VALIDAZIONE DEI LEGAMI  
COSTITUTIVI PER IL CODICE DI CALCOLO FLAC3D

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 015	A	5 di 30

### 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 - TARATURA E VALIDAZIONE DEI LEGAMI  
COSTITUTIVI PER IL CODICE DI CALCOLO FLAC3D

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 015	A	6 di 30

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

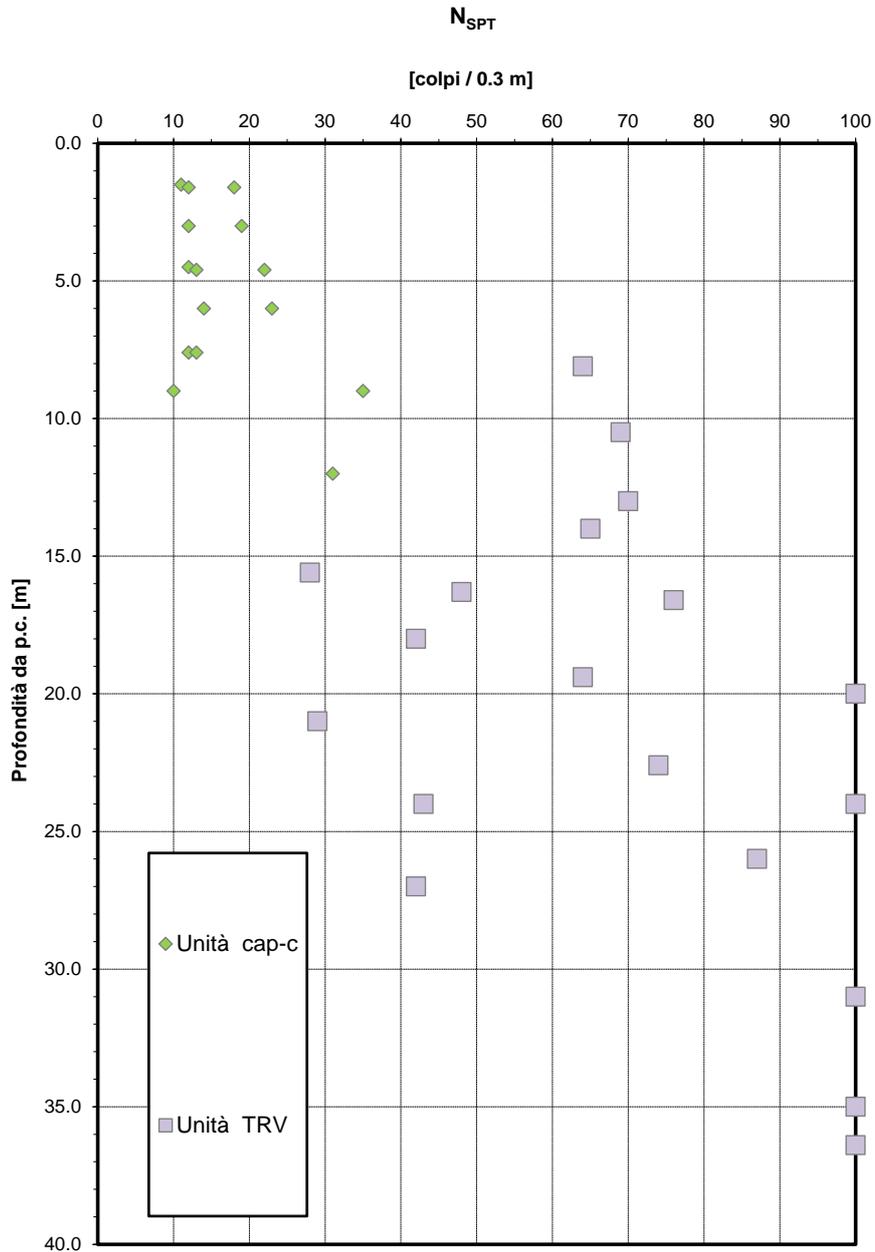
**Da 0.0 a 14.5 m Unità cap – c: Cappellaccio limoso sabbioso costituente la parte alterata della formazione di base**

$\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$	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
$E_o = 250 \text{ MPa } z > 9.5\text{m}$	
$C_{\alpha} = 0.0015$	
$k = 6.0E^{-06} \div 7.0E^{-07} (1.0E^{-07}) \text{ m/s}$	permeabilità (valore medio)

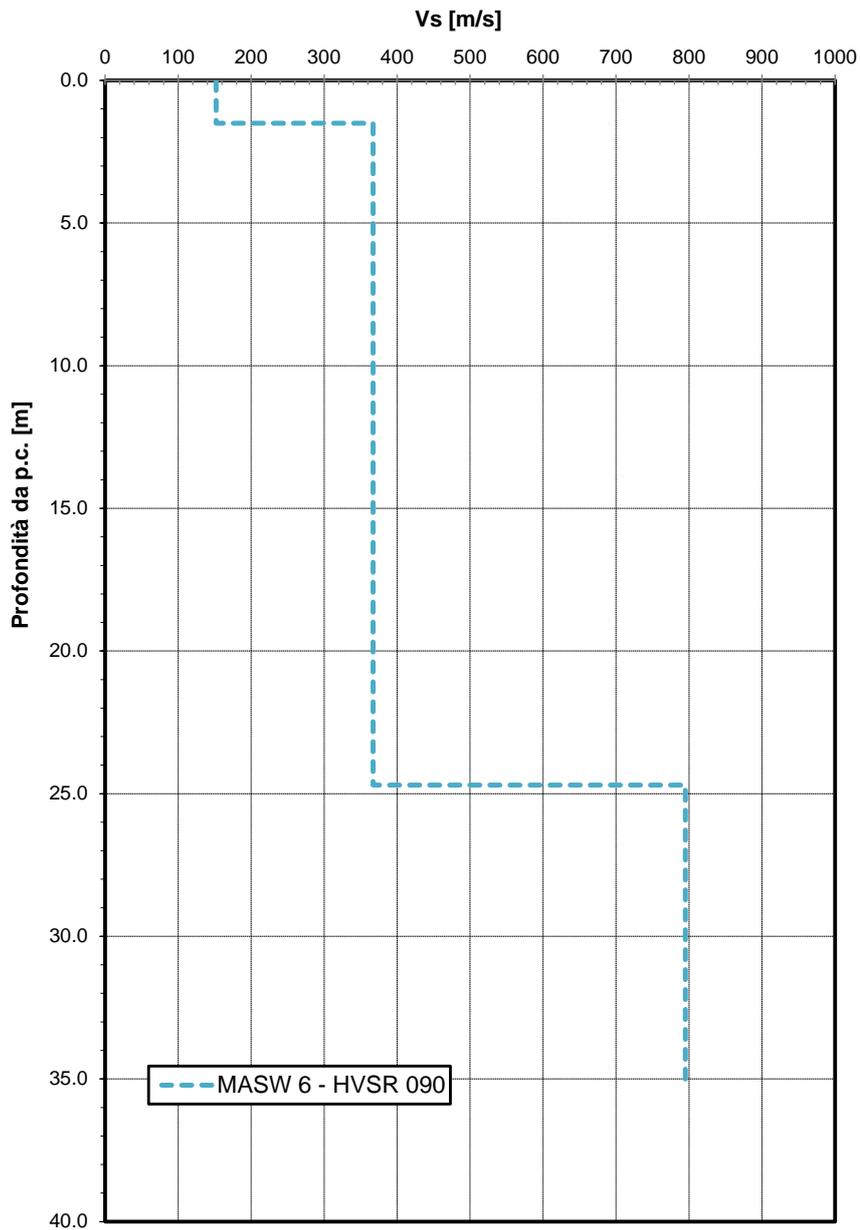
**da 14.5 m a 50.0 m: Unità TRV– Formazione di Terravecchia: argilla da debolmente marnosa a marnosa**

$\gamma = 21.0 \text{ kN/m}^3$	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
$C_{\alpha} = 0.0015$	
$k = 2.0E^{-08} \div 2.0E^{-06} (4.0E^{-08}) \text{ m/s}$	permeabilità(valore medio)

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

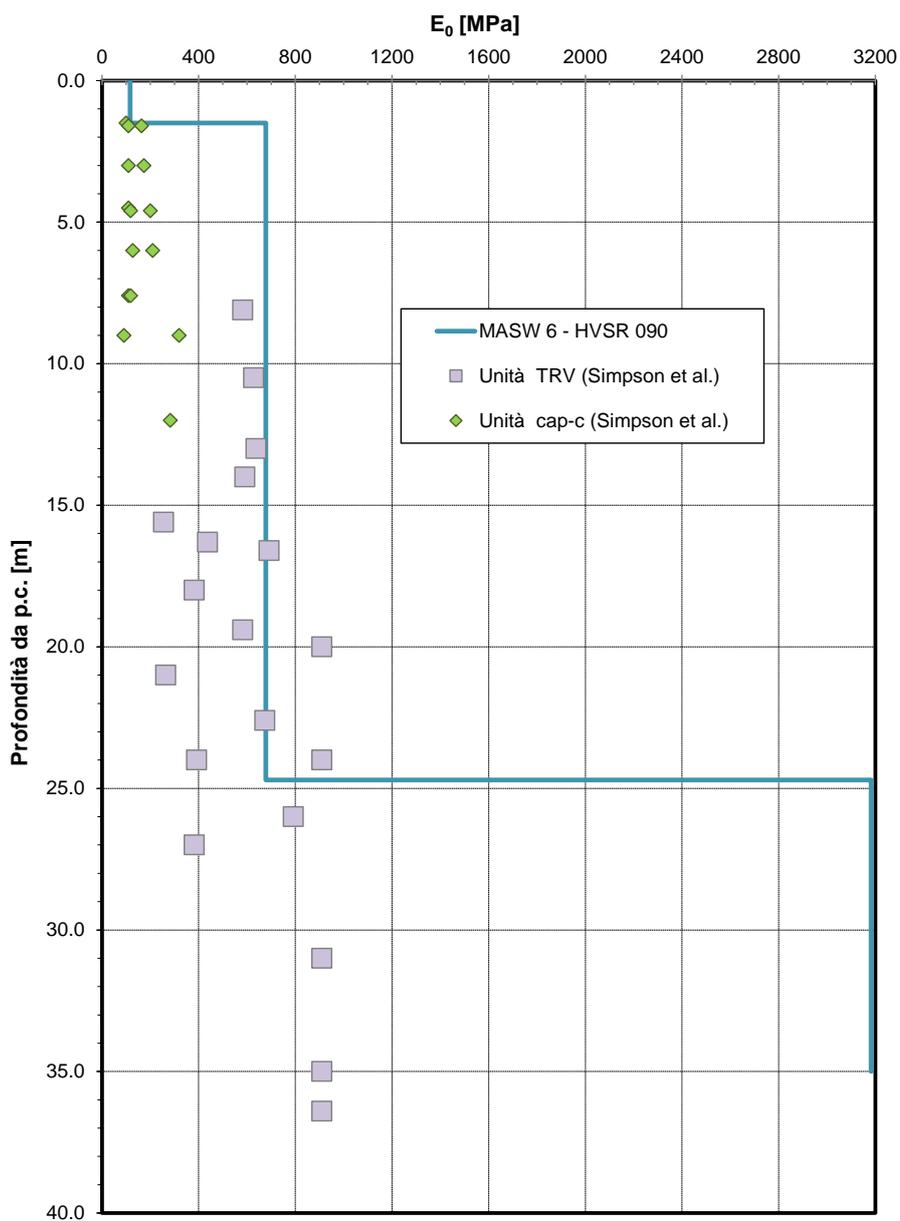


**Figura 2 – Risultati prova SPT – Stazione Enna**

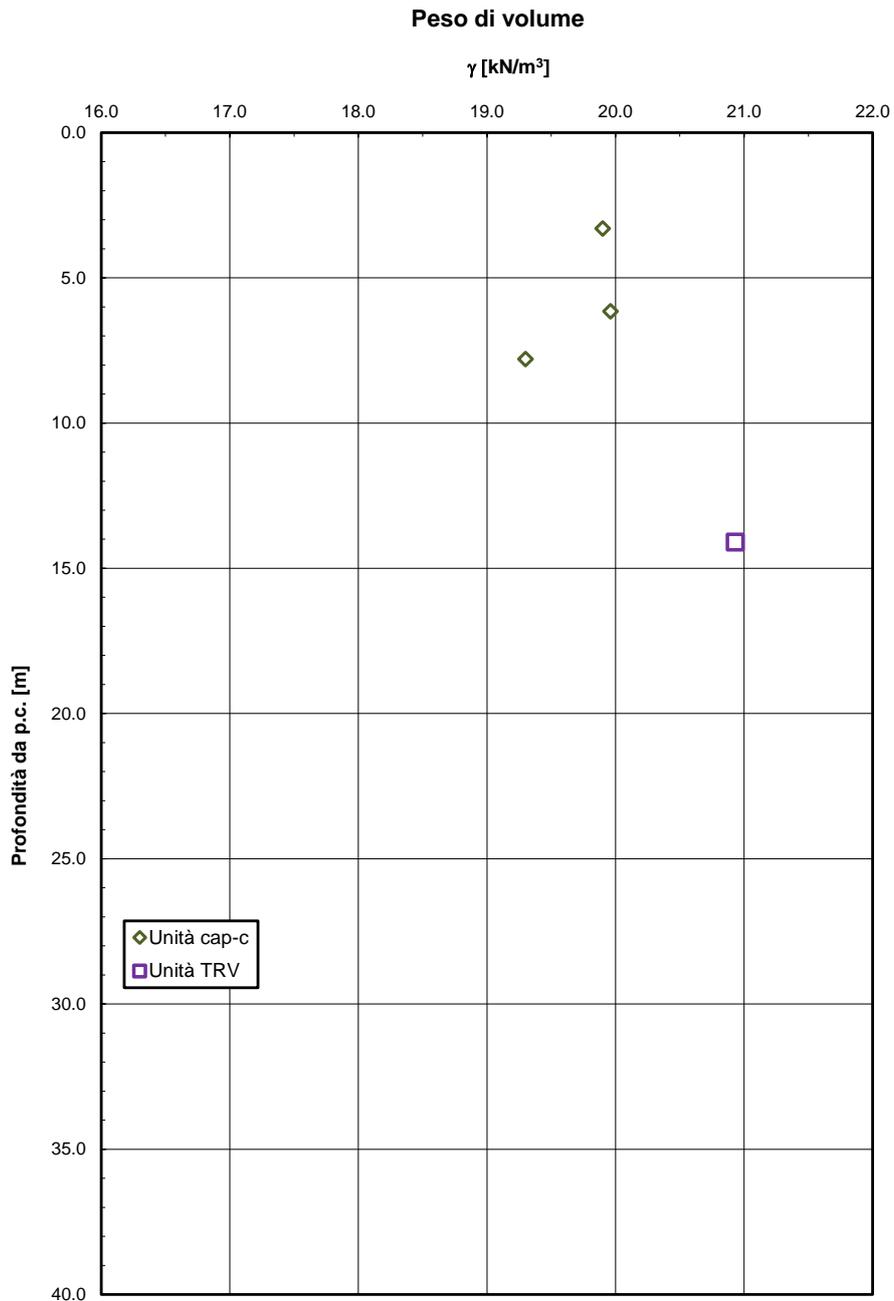


**Figura 3 – Velocità delle onde di taglio  $V_s$  da prove Sismiche (MASW 6 – HVSr 090) – Stazione Enna**

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



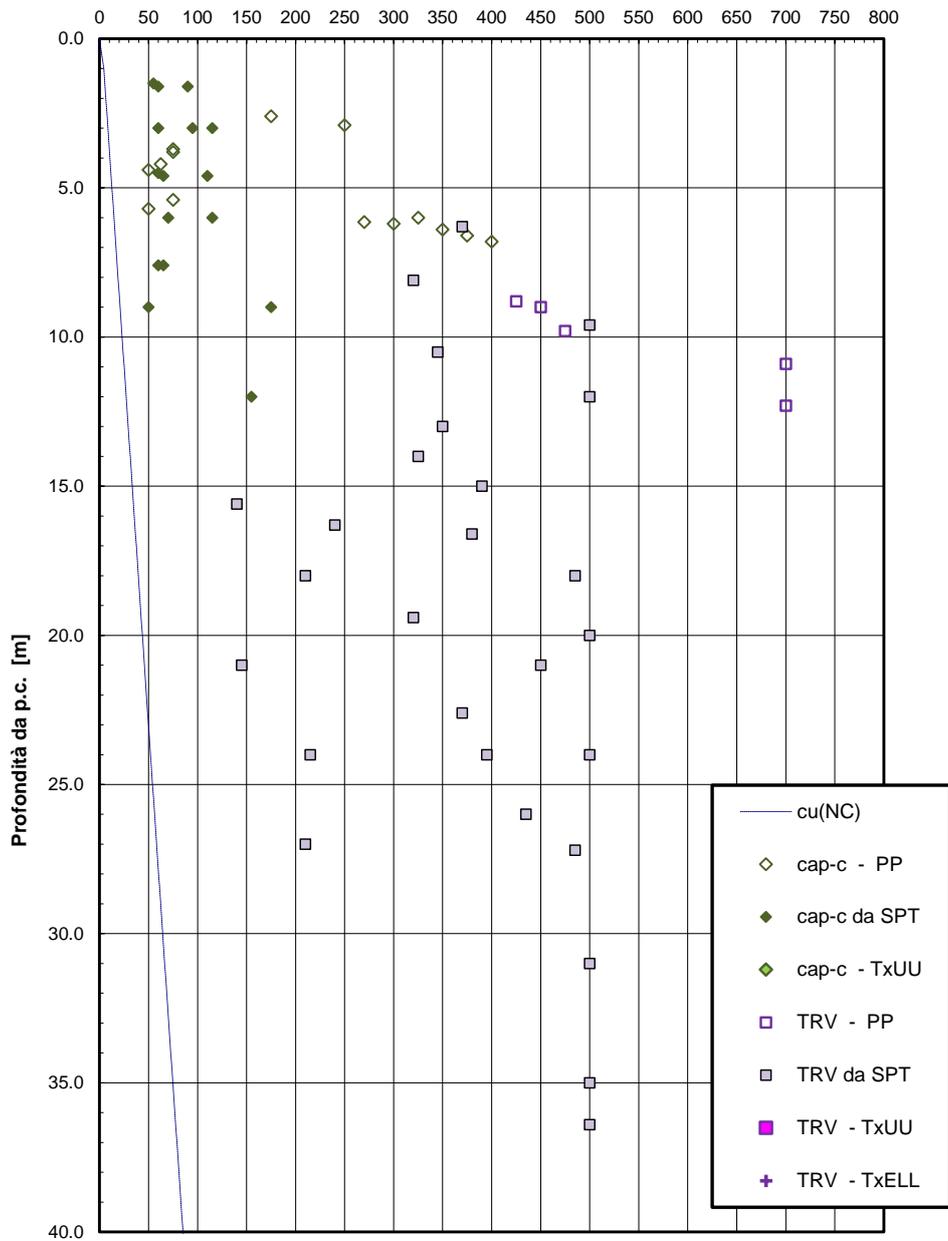
**Figura 4 – Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT e sismiche – Stazione Enna**



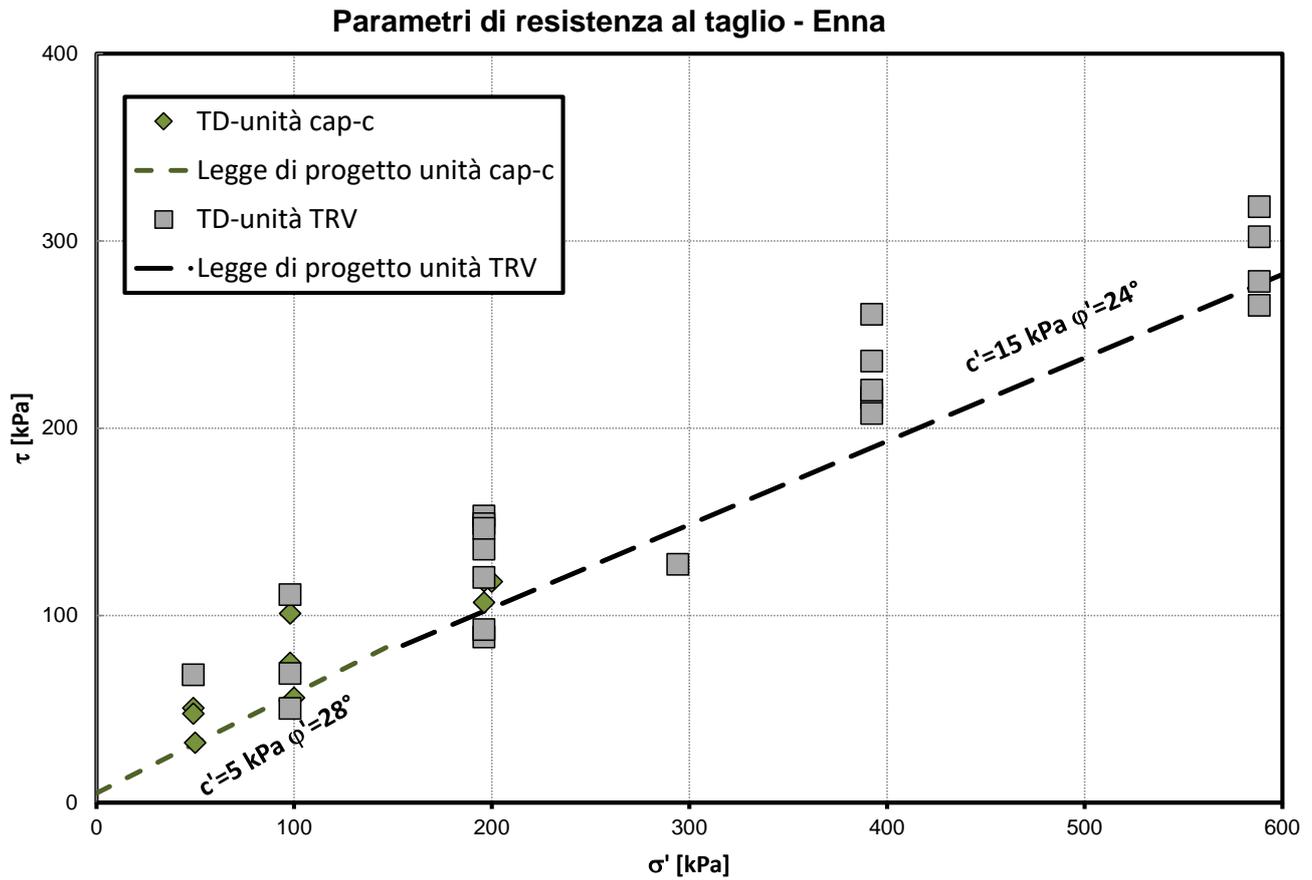
**Figura 5 – Peso di volume – Stazione Enna**

**Andamento della resistenza al taglio non drenata**

cu [kPa]

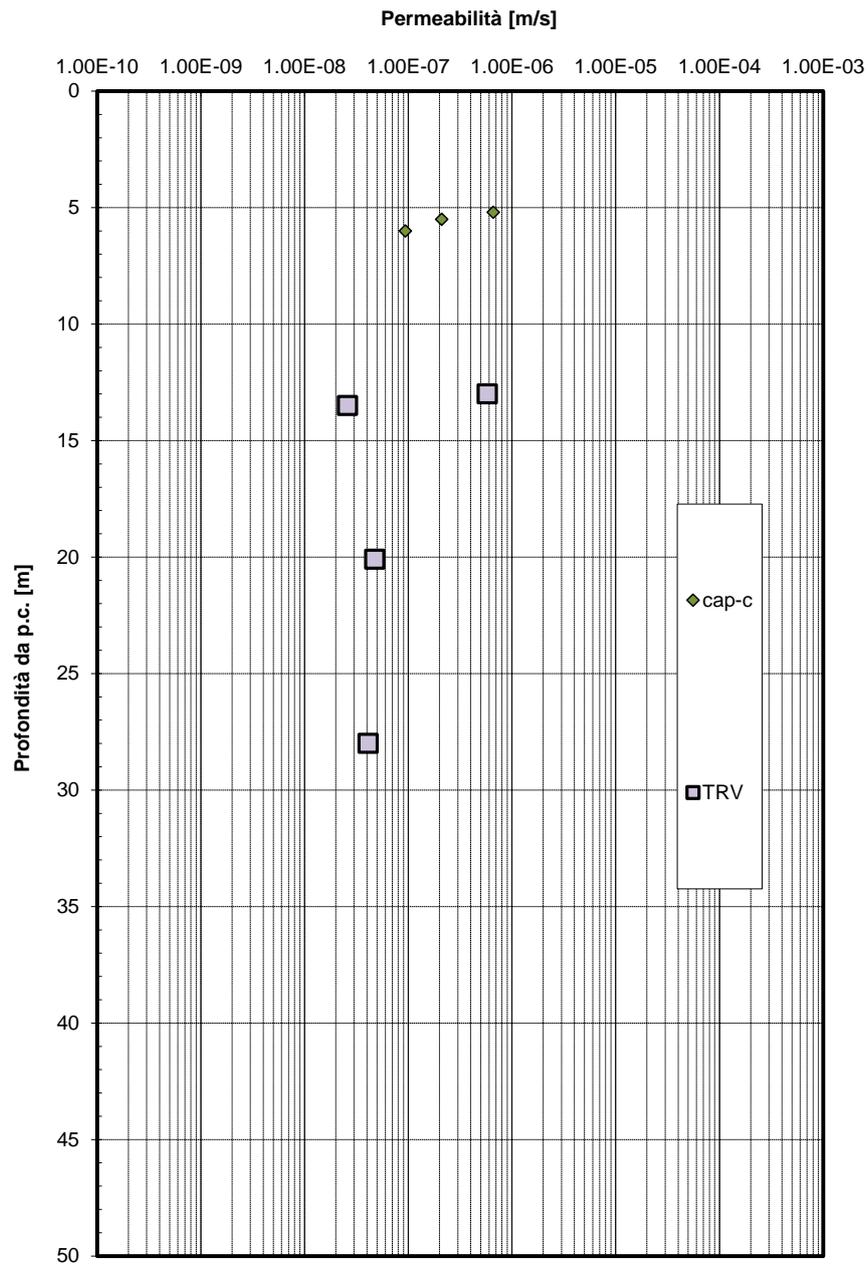


**Figura 6 – Andamento della resistenza al taglio non drenata – Stazione Enna**



**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**

### 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.

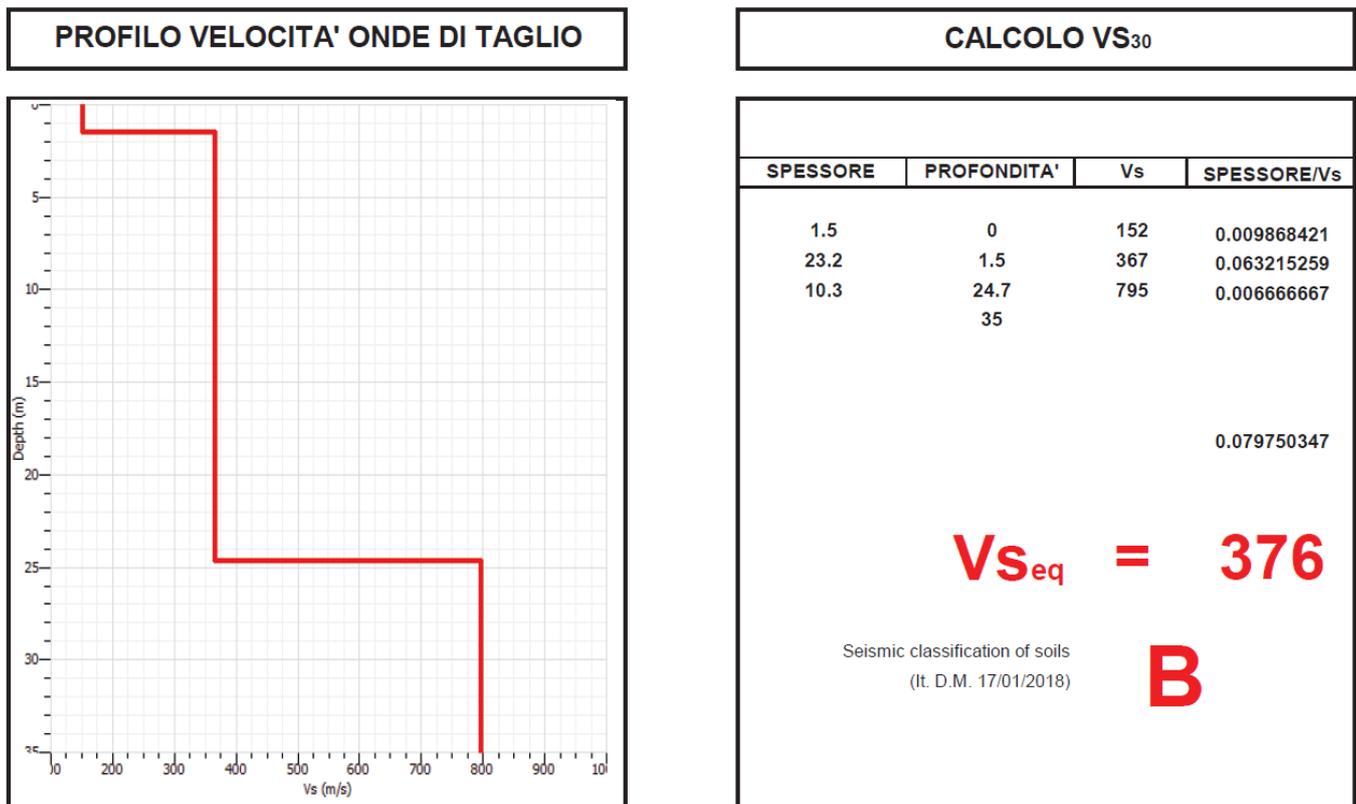
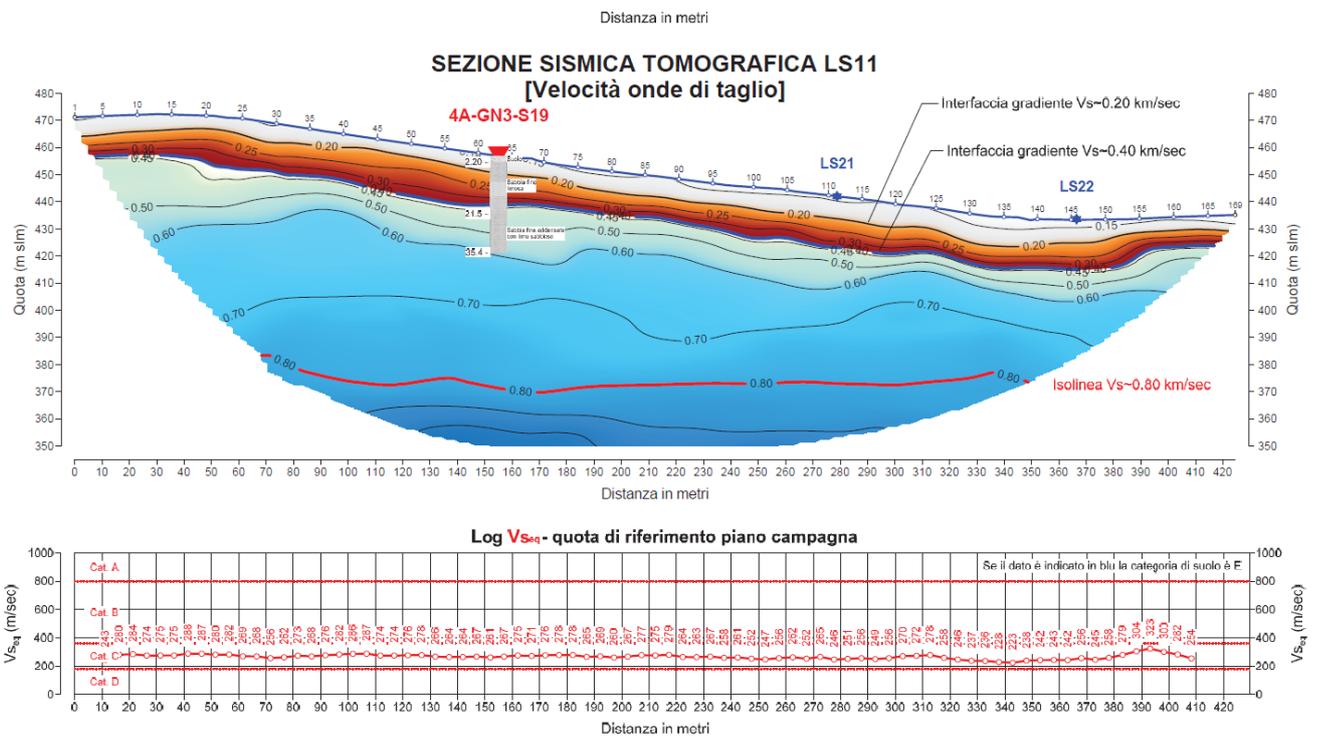


Figura 9 –  $V_{s,eq}$  da prova sismica Masw



**Figura 10 – Vs,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).

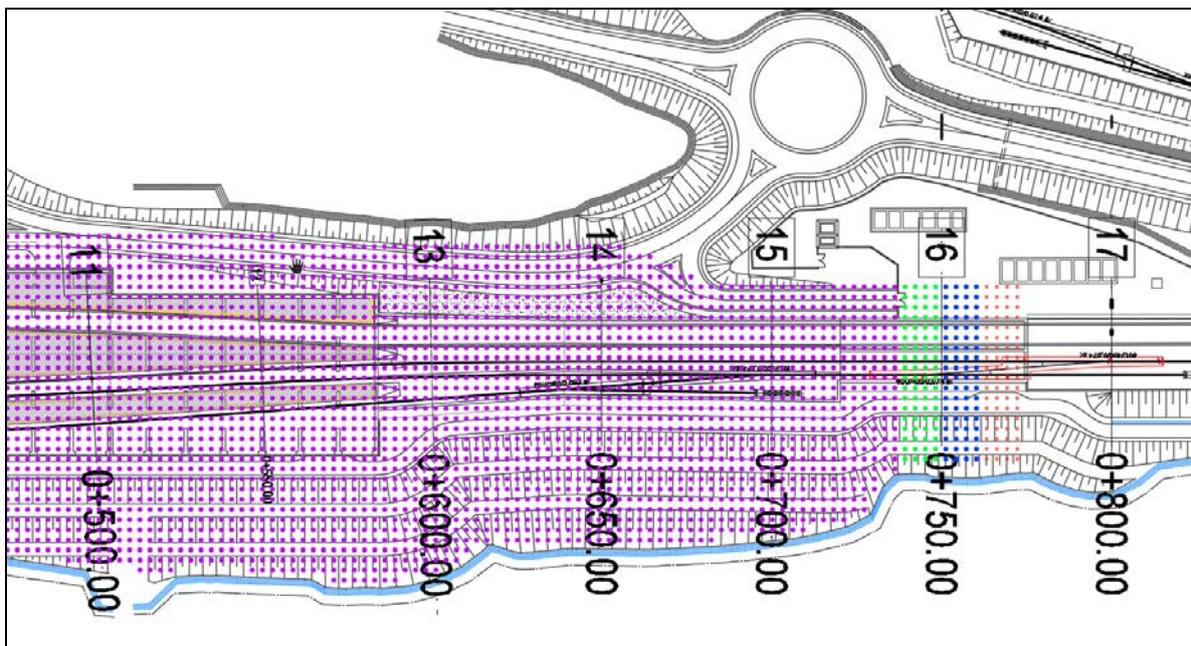


Figura 11. Porzione planimetrica implementata nel modello tridimensionale

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO					
	FV01 - TARATURA E VALIDAZIONE DEI LEGAMI COSTITUTIVI PER IL CODICE DI CALCOLO FLAC3D	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0005 015	REV. A

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.

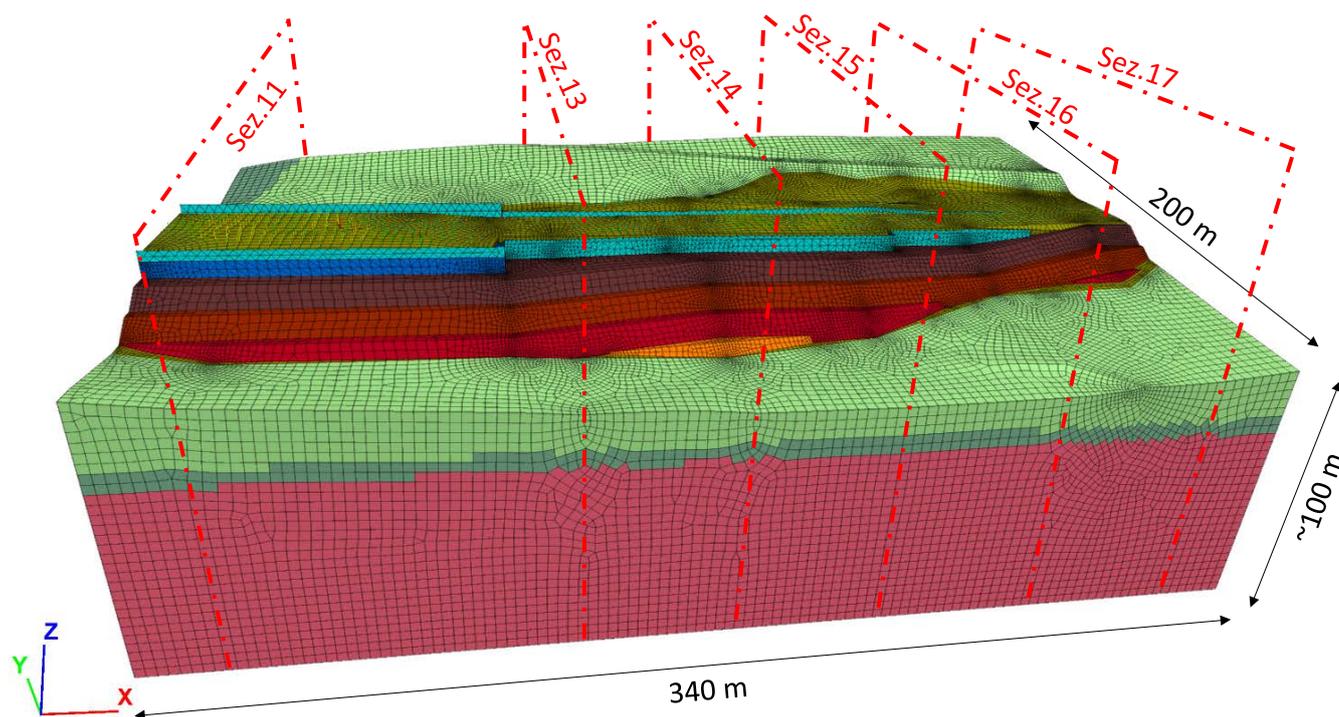


Figura 12. Dimensioni del modello e sezioni di progetto

#### 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.

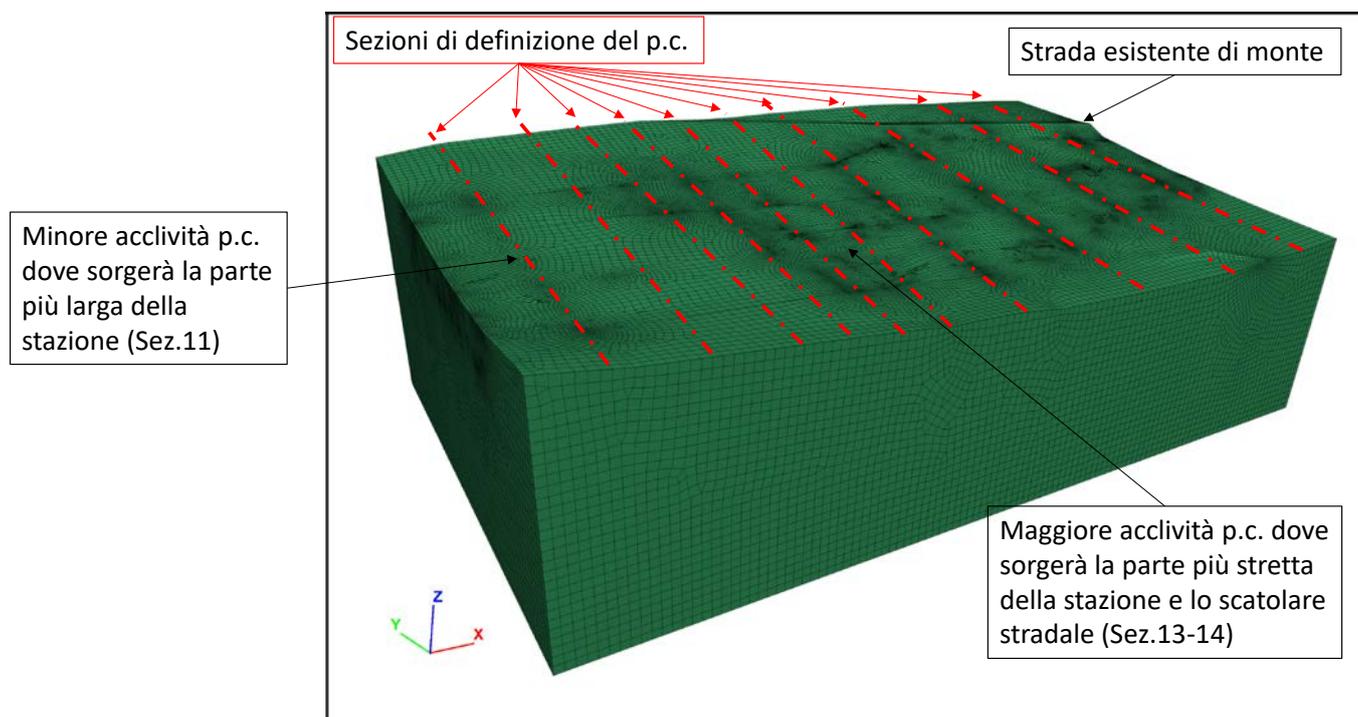


Figura 13. Definizione della superficie del p.c.

### 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. § **Error! Reference source not found.**).

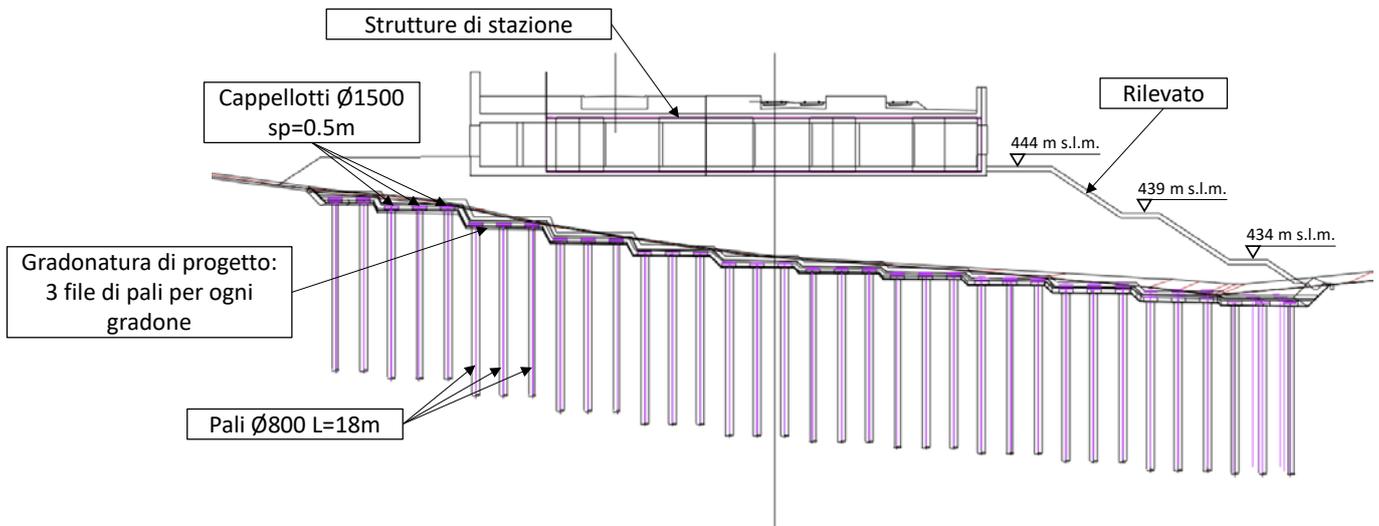


Figura 14. Sezione 11. Sovrapposizione tra sezione di progetto e porzione di geometria implementata nel modello

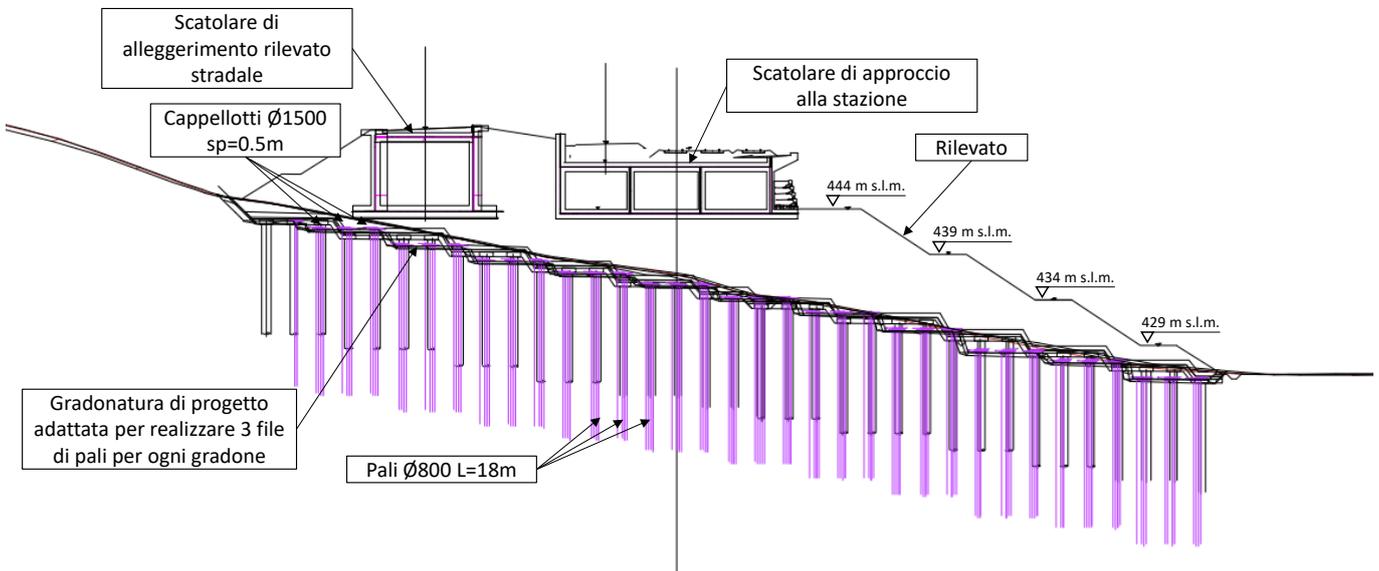


Figura 15. Sezione 14. Sovrapposizione tra sezione di progetto e porzione di geometria implementata nel modello

FV01 - TARATURA E VALIDAZIONE DEI LEGAMI  
COSTITUTIVI PER IL CODICE DI CALCOLO FLAC3D

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 015	A	21 di 30

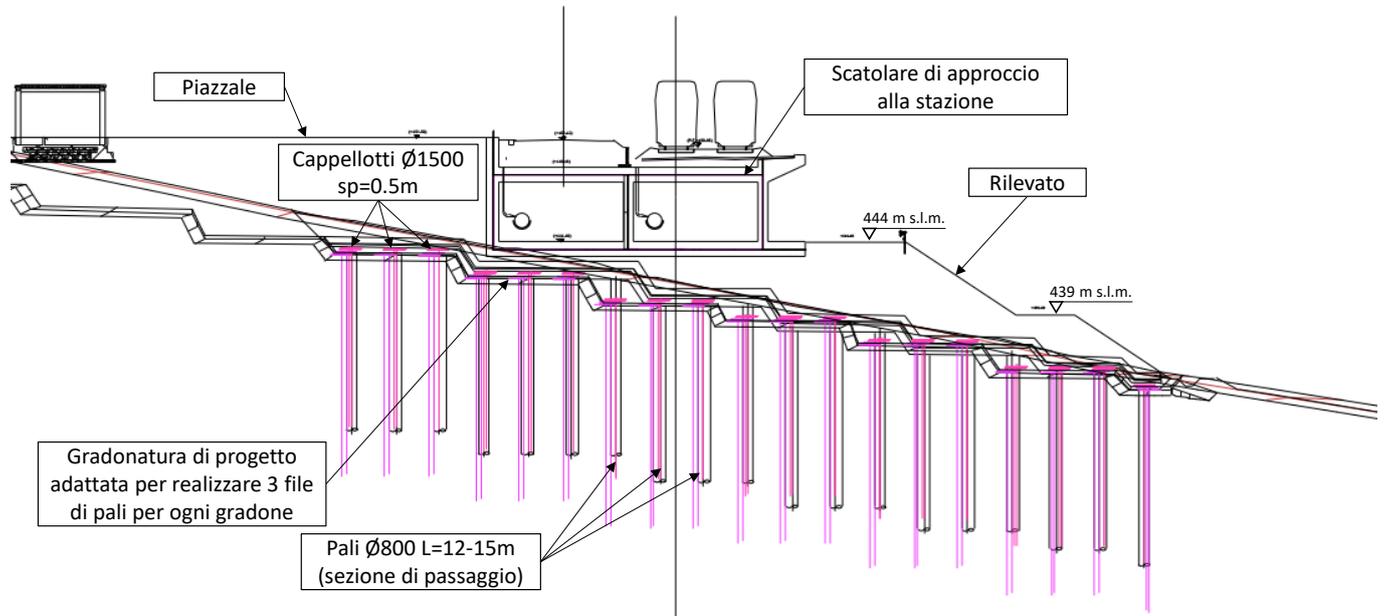


Figura 16. Sezione 16. Sovrapposizione tra sezione di progetto e porzione di geometria implementata nel modello

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO					
FV01 - TARATURA E VALIDAZIONE DEI LEGAMI COSTITUTIVI PER IL CODICE DI CALCOLO FLAC3D	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0005 015	REV. A	FOGLIO 22 di 30

## 5. ANALISI INTERVENTO DI CONSOLIDAMENTO

### 5.1 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 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 rigidezza,  $E_{50}$ , 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  $p^{ref}$ .

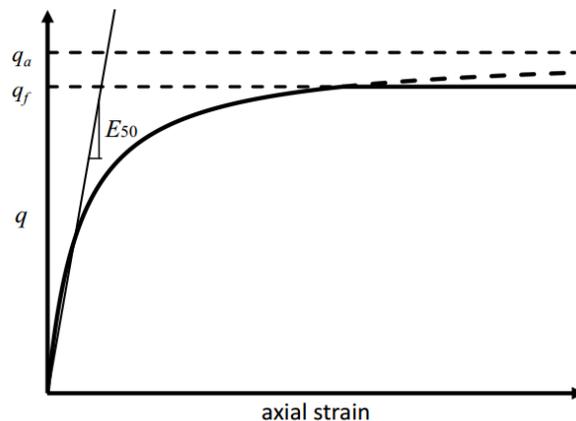


Figura 17. Relazione iperbolica tensione-deformazione per percorsi di carico primari

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:

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

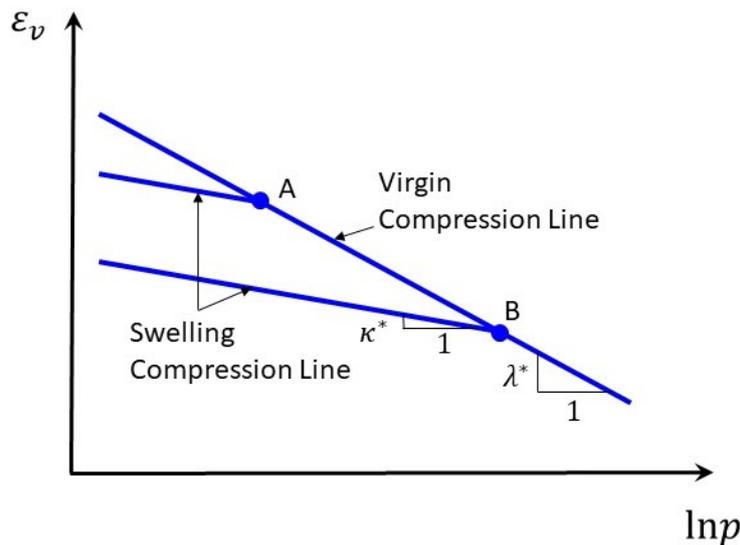


Figura 18. Relazione tra la compressione volumetrica e la pressione media

I parametri di deformabilità  $\lambda^*$  e  $\kappa^*$ , sono correlati agli indici di compressione e ricompressione 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 ricompressione 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  $p_{ref}$ :

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

## 5.2 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. § 5.1).

Tabella 1. Parametri geotecnici di calcolo

Unità [--]	z [m da p.c.]	$\gamma_{dry}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	indice vuoti e [-]	porosità n [-]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$k_{0,NC}$ [--]	OCR [--]	$k_0$ [--]	c' [kPa]	$\phi'$ [deg]	$v_{ref}$ [---]	$p_{ref}$ [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 [--]	$V_s$ [m/s]	$G_0$ [kPa]	$E_0$ [kPa]	$K_0$ [kPa]	$E_{50}$ [--]	m	$E_{50,ref}$ [kPa]	$E_{ur,ref}$ [--]	$E_{Oed,ref}$ [--]	$\gamma_{07}$ [--]	$C_c$ [--]	$C_s$ [--]	k [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									

La taratura dei precedenti parametri di rigidezza per i modelli 3D è avvenuta in modo equivalente a quella per le analisi 2D: la seguente immagine mostra il confronto tra i profili di progetto delle onde di taglio  $V_s$  utilizzati nei 2 tipi di modelli.

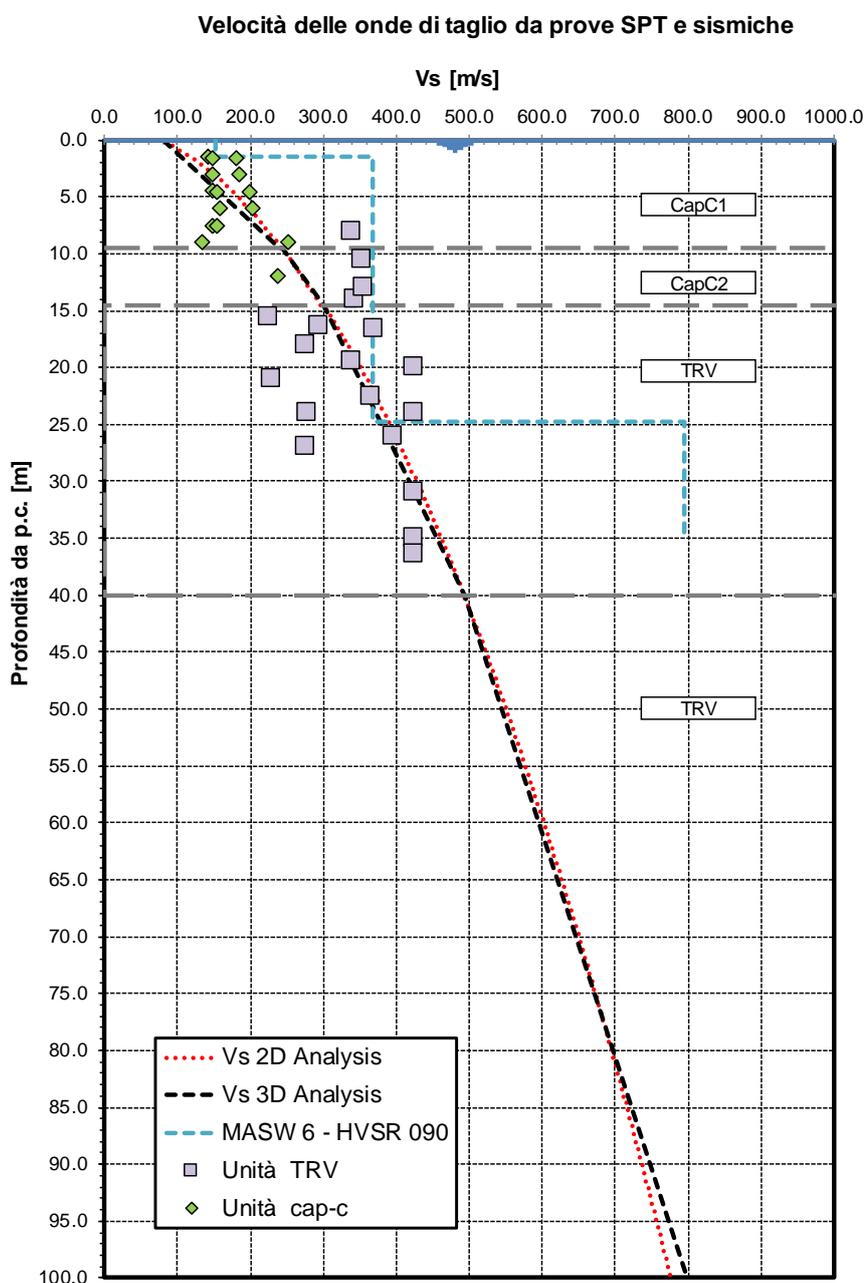


Figura 19 – Andamento delle velocità delle onde di taglio con la profondità: confronto tra profili di progetto per analisi 2D e 3D

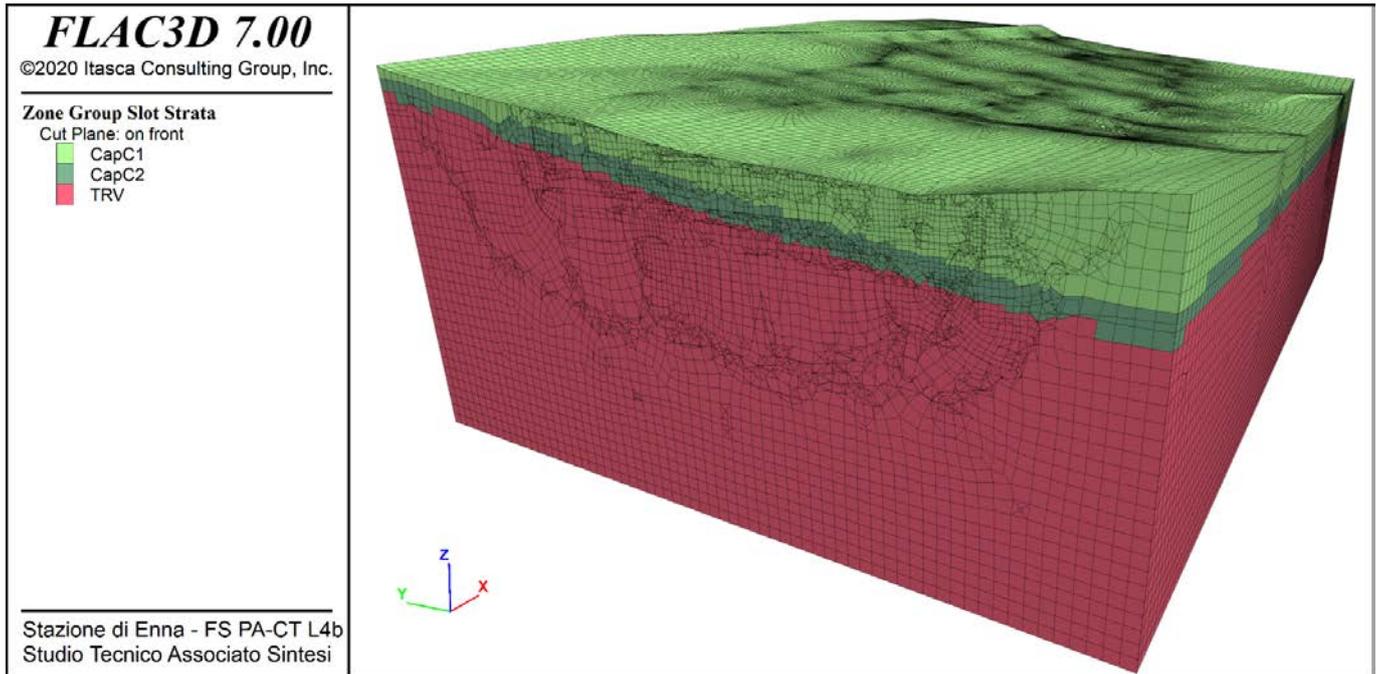


Figura 20. Stratigrafia implementata nel modello tridimensionale

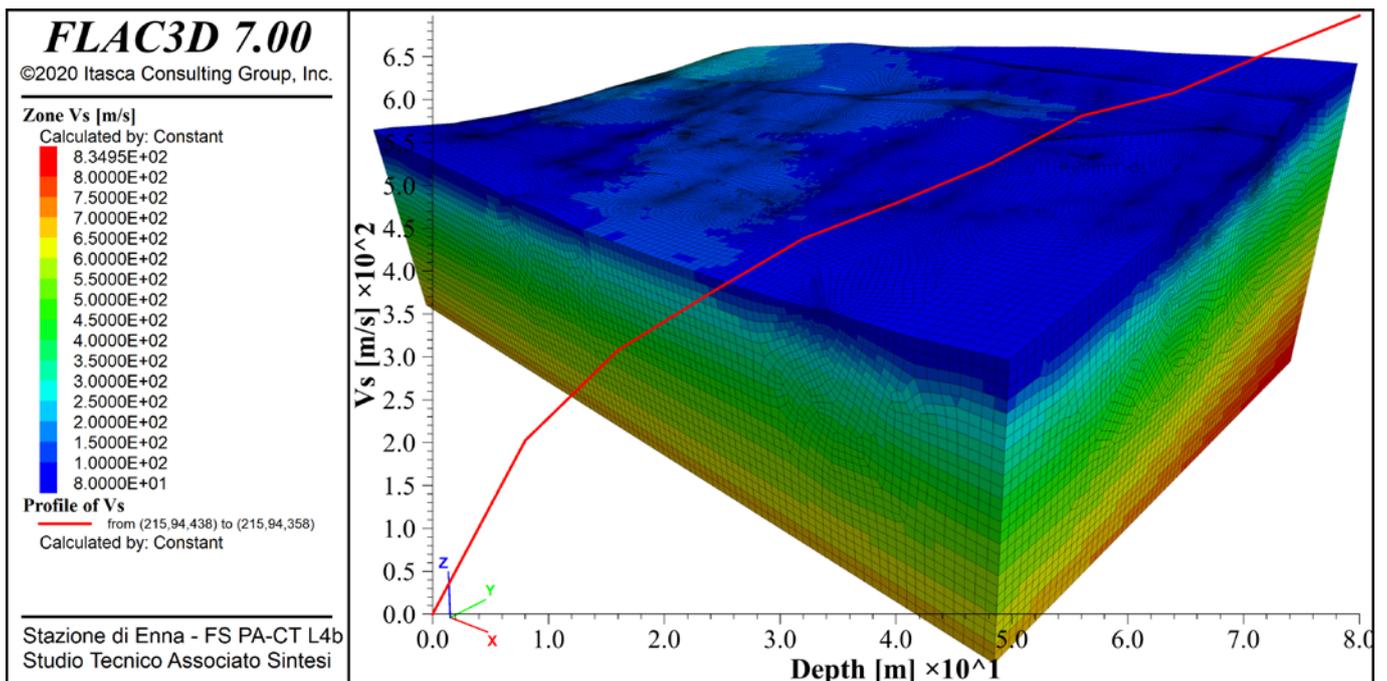


Figura 21. Implementazione delle Vs nel modello tridimensionale

### 5.3 Validazione dei modelli costitutivi

Nelle seguenti immagini si mostrano, per la medesima sezione di calcolo, i risultati in termini di spostamenti dei modelli drenati 2D, e per i modelli 3D completi, sia in condizioni drenate che in regime di accoppiamento solido-fluido (analisi di consolidazione). Si può notare come la risposta del sistema sia analoga e che lo spostamento verticale massimo tra i modelli differisca di pochi mm (25÷28 mm, cedimento massimo al centro).

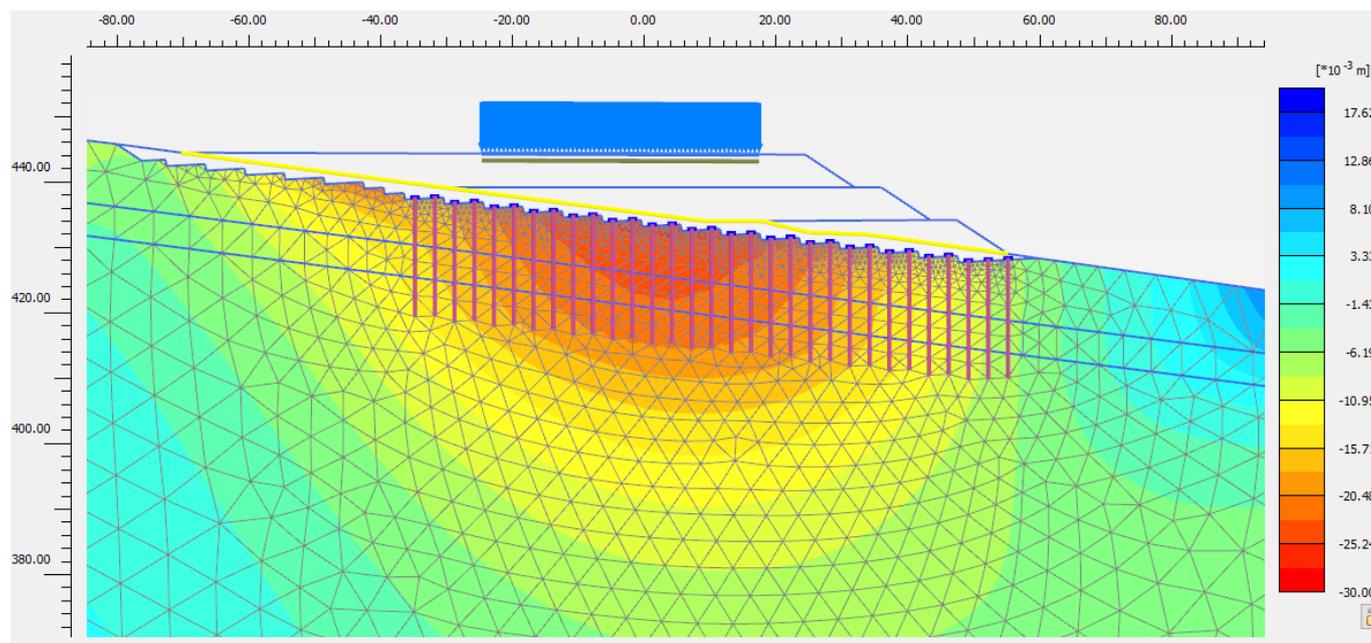


Figura 22. Sezione 11. Spostamenti verticali totali analisi 2D drenata (modello Hardening Soil Small Strain)

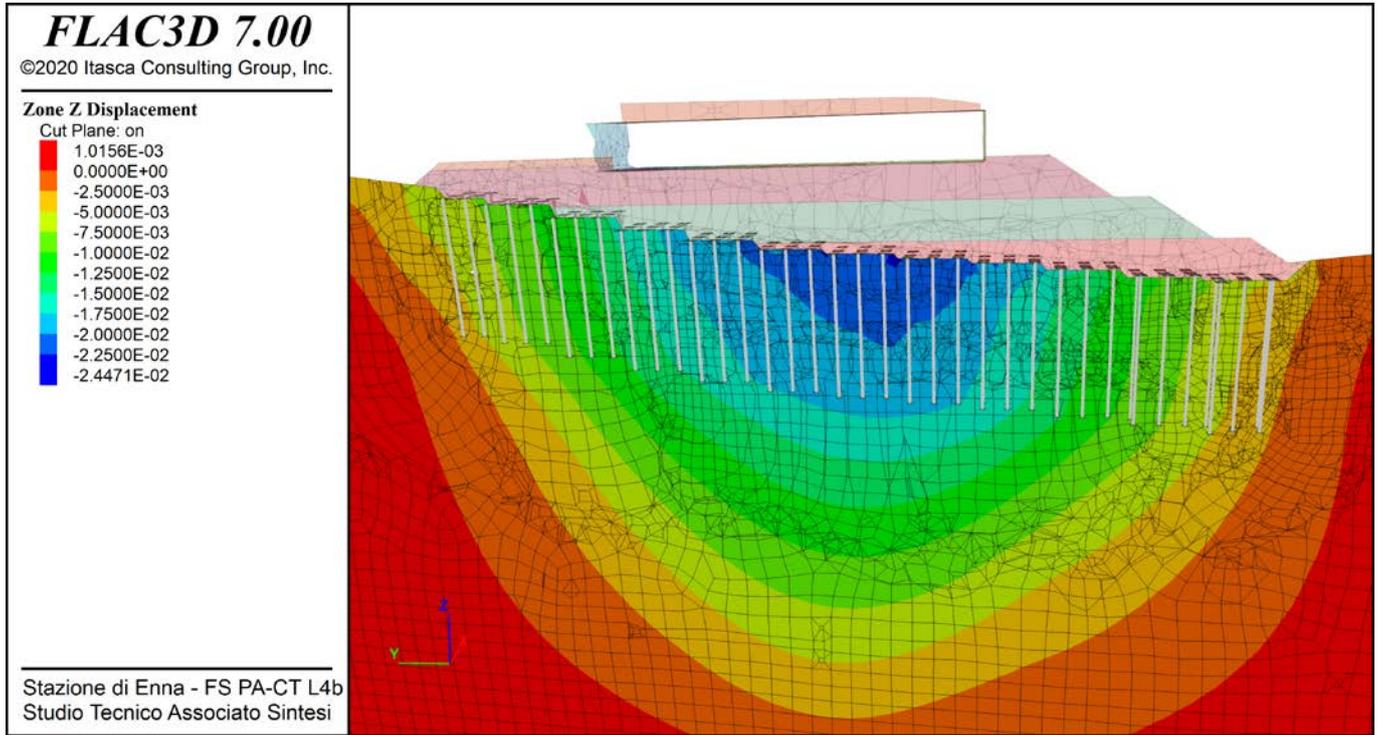


Figura 23. Sezione 11. Spostamenti verticali totali analisi 3D drenato (modello Plastic Hardening – Small Strain)

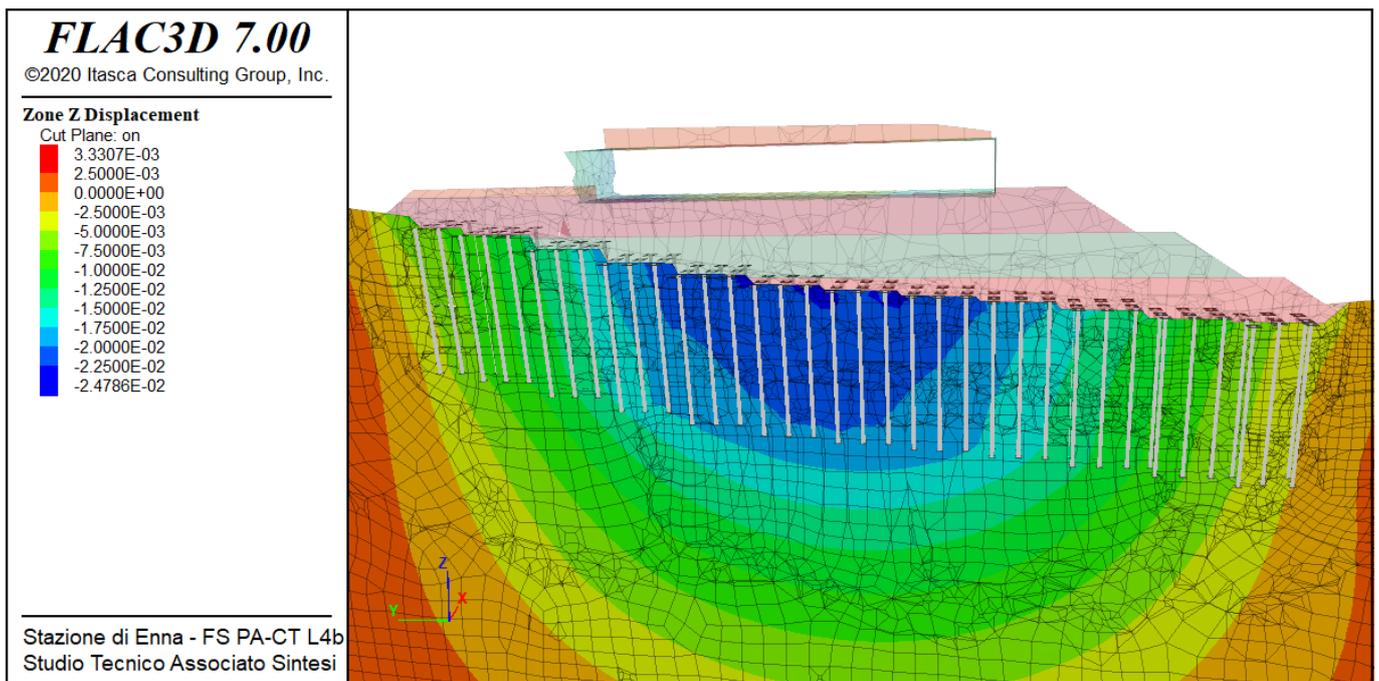


Figura 24. Sezione 11. Spostamenti verticali totali analisi 3D di consolidazione (modello Soft Soil)