

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Napoli

Corso breve sulla normativa inerente la progettazione
e la realizzazione di opere pubbliche

Presentazione del progetto di
un'opera geotecnica

Sergio Gobbi

Considerazioni preliminari

Cosa si intende per “*opera geotecnica*” ?

Importanza del concetto di “*progettazione geotecnica*”

Scelta del caso di studio

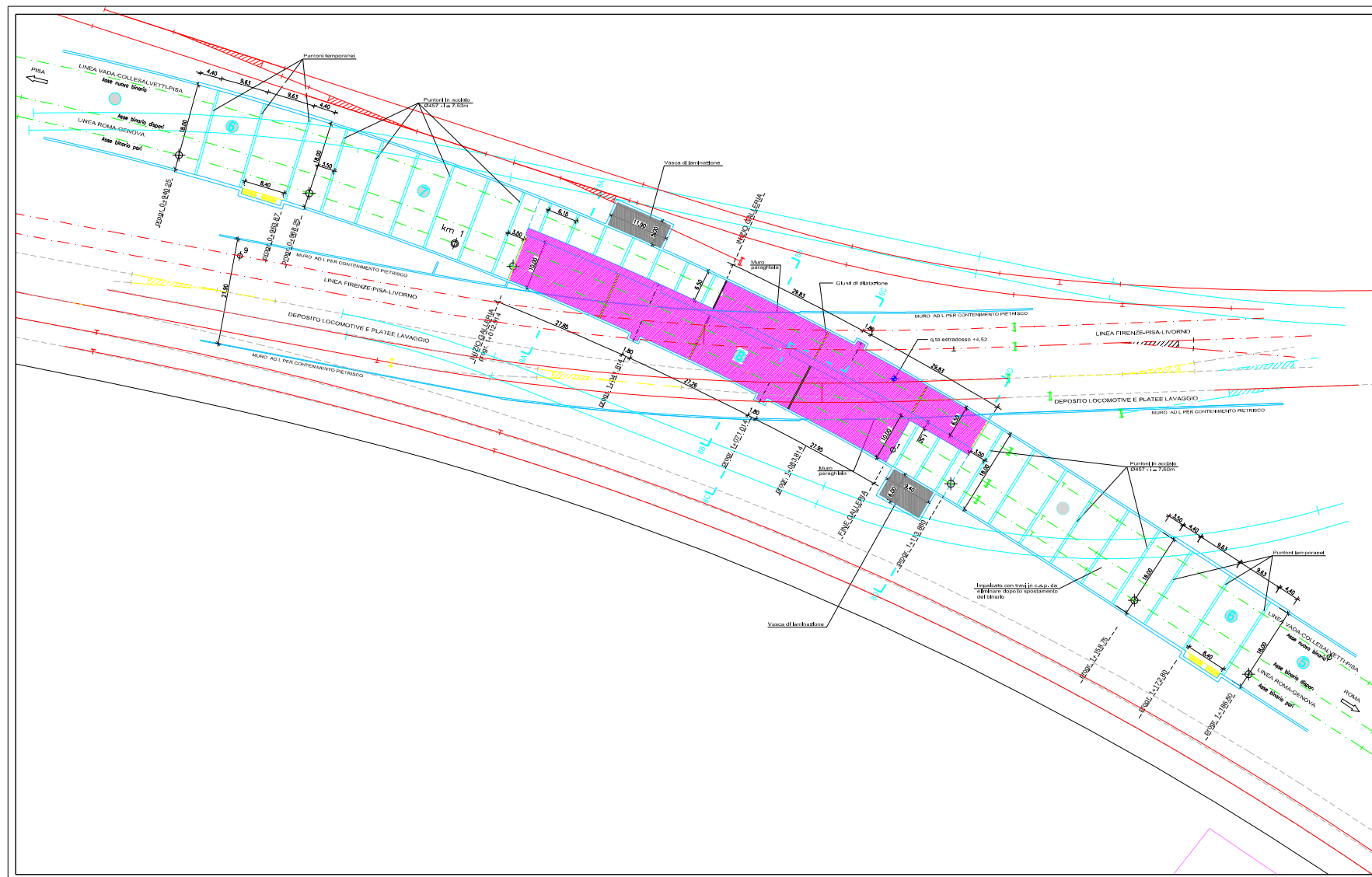
Tra le varie applicazioni effettuate in ambito progettuale è stato scelto **uno scavo sostenuto da paratie** per le seguenti ragioni:

- Il caso specifico presenta vari aspetti di interesse:
 - Scavo in terreni sede di falda idrica, fin dal piano campagna
 - Analisi in condizioni non drenate in tensioni efficaci e simulazione della consolidazione
 - Simulazione di interventi di consolidamento con *jet-grouting*
 - Simulazione dell'installazione di un puntone provvisorio (e della successiva rimozione)
 - Possibilità di effettuare un confronto tra varie soluzioni progettuali
- Si tratta dei problemi per i quali l'uso di una modellazione numerica inizia a divenire parte essenziale del progetto

Finalità dell'esposizione

- Importanza della programmazione della fase di indagini in relazione agli scopi prefissi ed ai modelli adoperati
- Inquadramento della fase di verifica numerica nell'ambito del processo progettuale
- Utilizzazione del programma di calcolo come stimolo per:
 - ragionare sulle scelte fatte
 - verificare ed eventualmente rimuovere i propri preconcetti
- Spunto per l'illustrazione di alcune soluzioni tecnologiche

Stralcio planimetrico zona di intersezione (galleria artificiale)



Sezione trasversale tipo

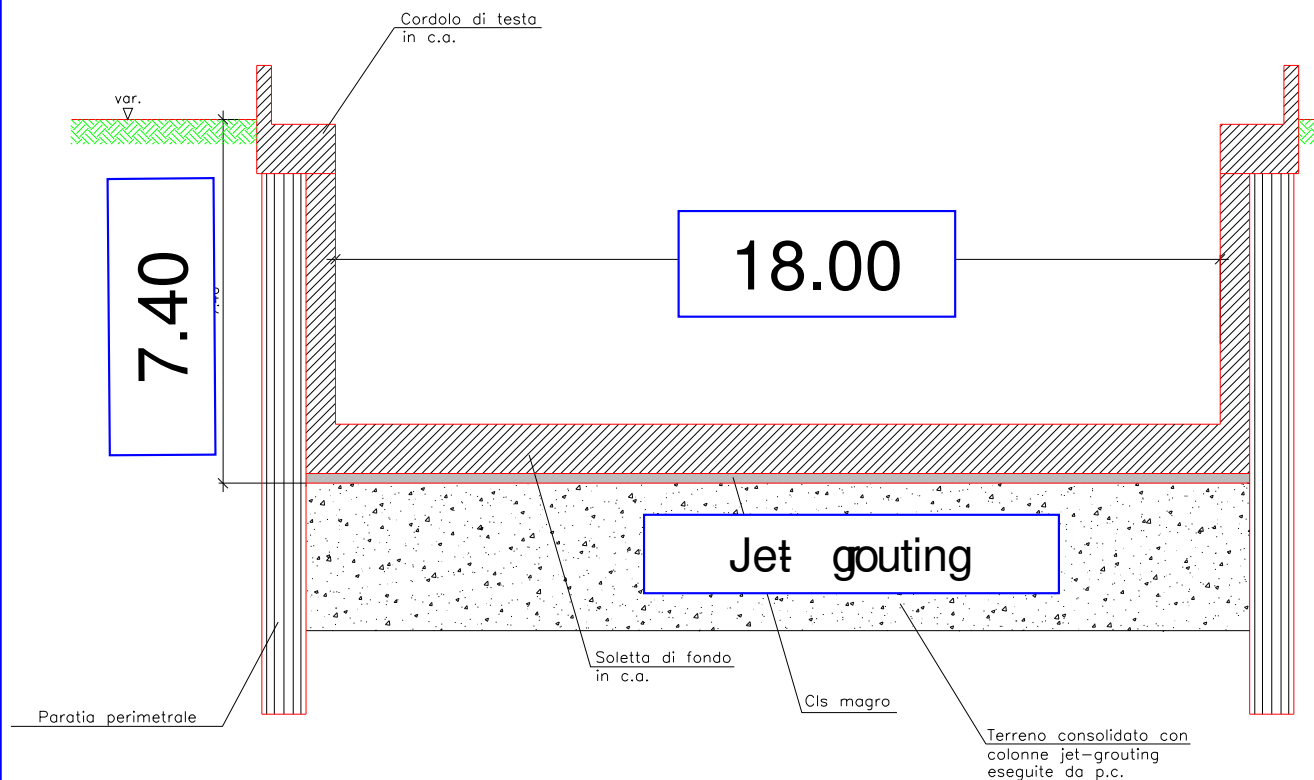
Sezione analizzata

Sottopasso

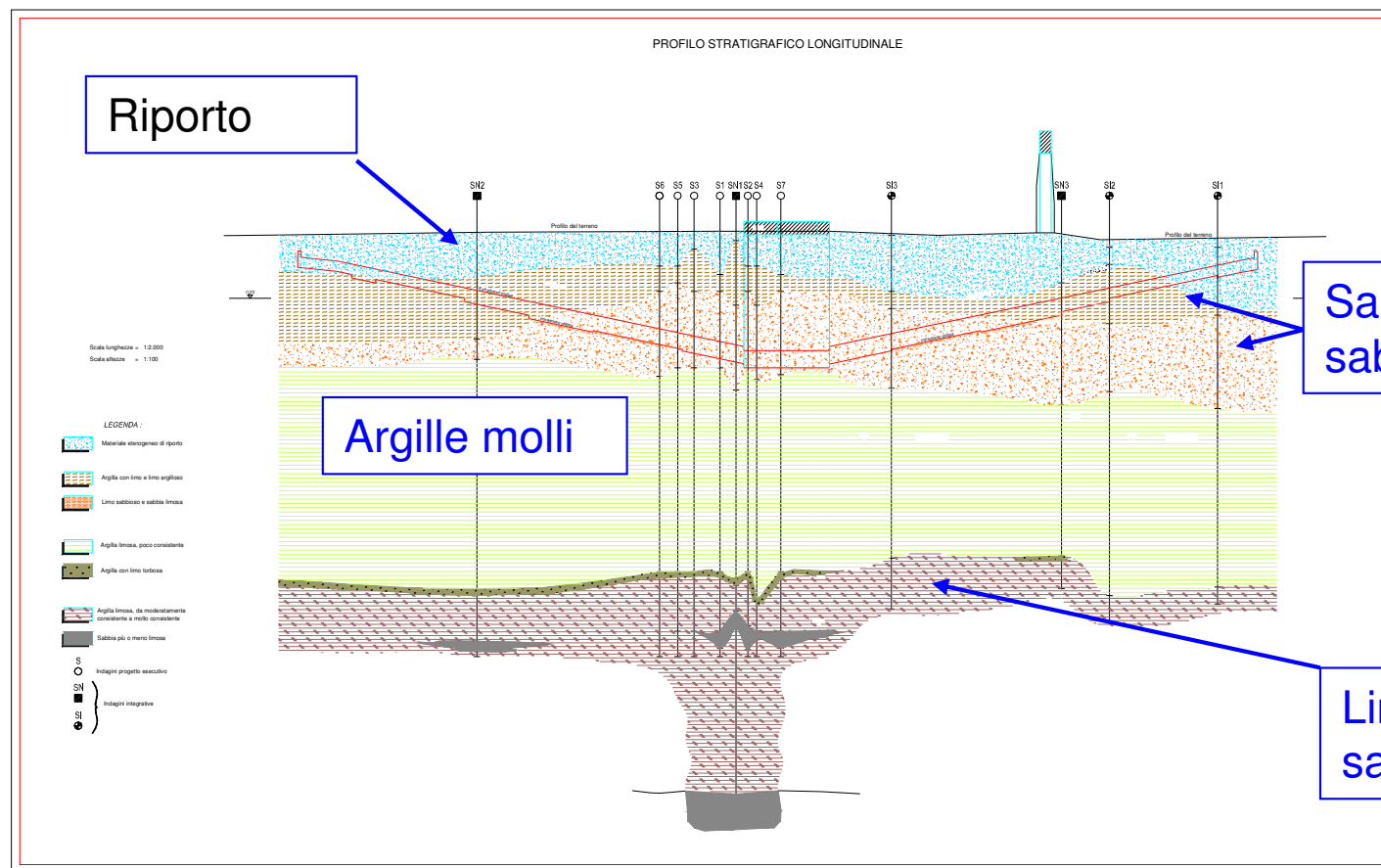
Sviluppo complessivo:
circa 1100 m

Larghezza di scavo:
14.0÷18.0 m

Profondità massima di
scavo: 8.10 m



Profilo longitudinale stratigrafico



Stati limite ultimi e di servizio

| Problematica | Stato limite | Parametri e dati necessari |
|--|--------------|--|
| Instabilità delle paratie | SLU | CND: stratigrafia, γ , c_u , ϕ' (per i terreni a grana grossa) |
| | | CD: stratigrafia, γ , c' , ϕ' , andamento falda idrica |
| Sifonamento | SLU | CD: stratigrafia, γ , condizioni della falda idrica |
| Instabilità fondo scavo | SLU | CND: stratigrafia, γ , c_u |
| “Stappamento” fondo scavo | SLU | CND: stratigrafia, γ |
| Galleggiamento | SLU | Condizioni di falda ed, eventualmente, caratteristiche di resistenza dei terreni |
| Spostamenti paratia e cedimenti piano campagna | SLS | CND e CD: stratigrafia, γ , c' , ϕ' , k_o , parametri di deformabilità a piccoli livelli di deformazione, condizioni iniziali della falda idrica, coefficiente di permeabilità dei terreni |
| Sollecitazioni nella paratia e nelle altre parti strutturali | SLS | CND e CD: vedi sopra |
| Infiltrazioni d'acqua | SLS | Stratigrafia, k e condizioni iniziali della falda idrica |



Scelta delle modalità di analisi

- Analisi in tensioni efficaci sia in CD sia in CND
- Studio della consolidazione e dei suoi effetti
- Simulazione delle fasi di scavo e di realizzazione (o rimozione) degli elementi strutturali
- Necessità di utilizzare una modellazione numerica

Indagini eseguite

Progetto esecutivo

- 10 sondaggi a carotaggio continuo
- 5 sondaggi a distruzione di nucleo
- 45 prove SPT
- 8 prove CPT
- 12 prove di permeabilità Lefranc

- 40 prove di taglio diretto (TD)
- 1 prova triassiale non consolidata non drenata (TX \cup)
- 2 prove di compressione uniassiale a espansione laterale libera (ELL)
- 4 prove di compressione edometrica

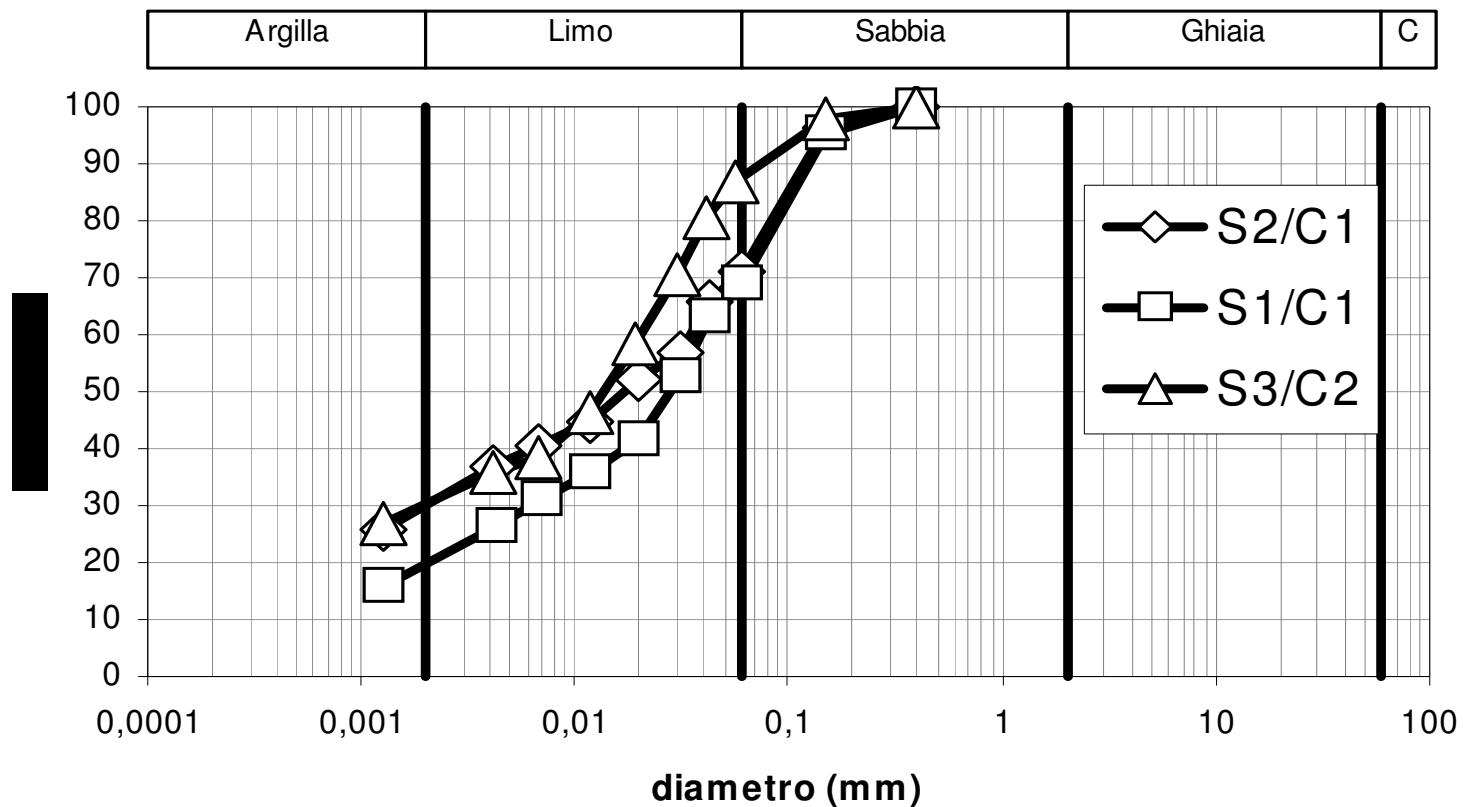
Progetto costruttivo

- 6 sondaggi a carotaggio continuo
- 3 prove penetrometriche (CPTU)
- 2 prove dilatometriche (DMT)
- 1 prova cross ble
- Installazione di 3 piezometri Casagrande
- 3 prove di permeabilità Lefranc

- Prove di riconoscimento
- 7 prove edometriche
- 9 prove triassiale TX \cup
- 2 prove triassiali TX \cup

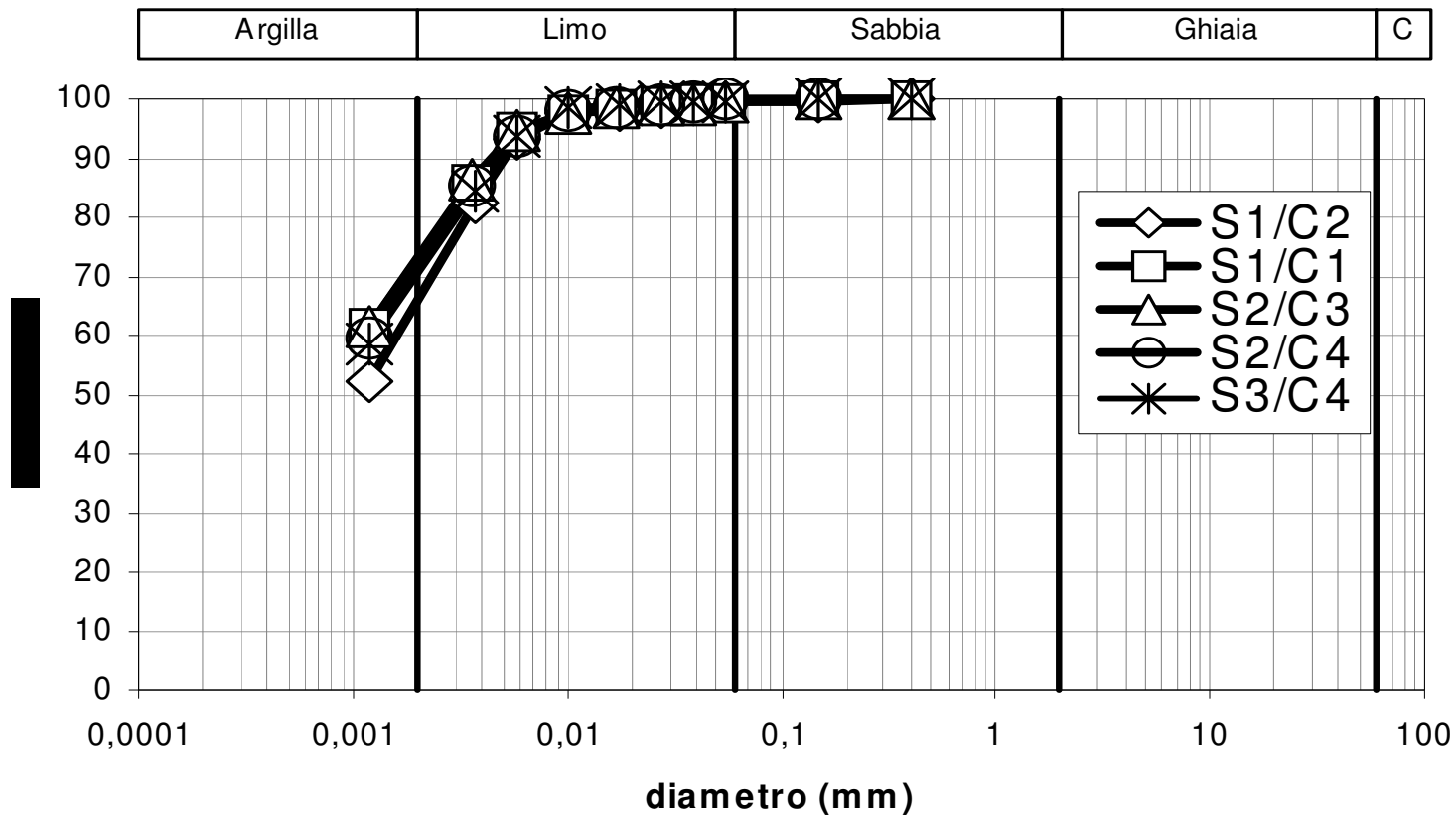
Alcuni risultati ottenuti dalle indagini

Granulometria - Complesso superiore



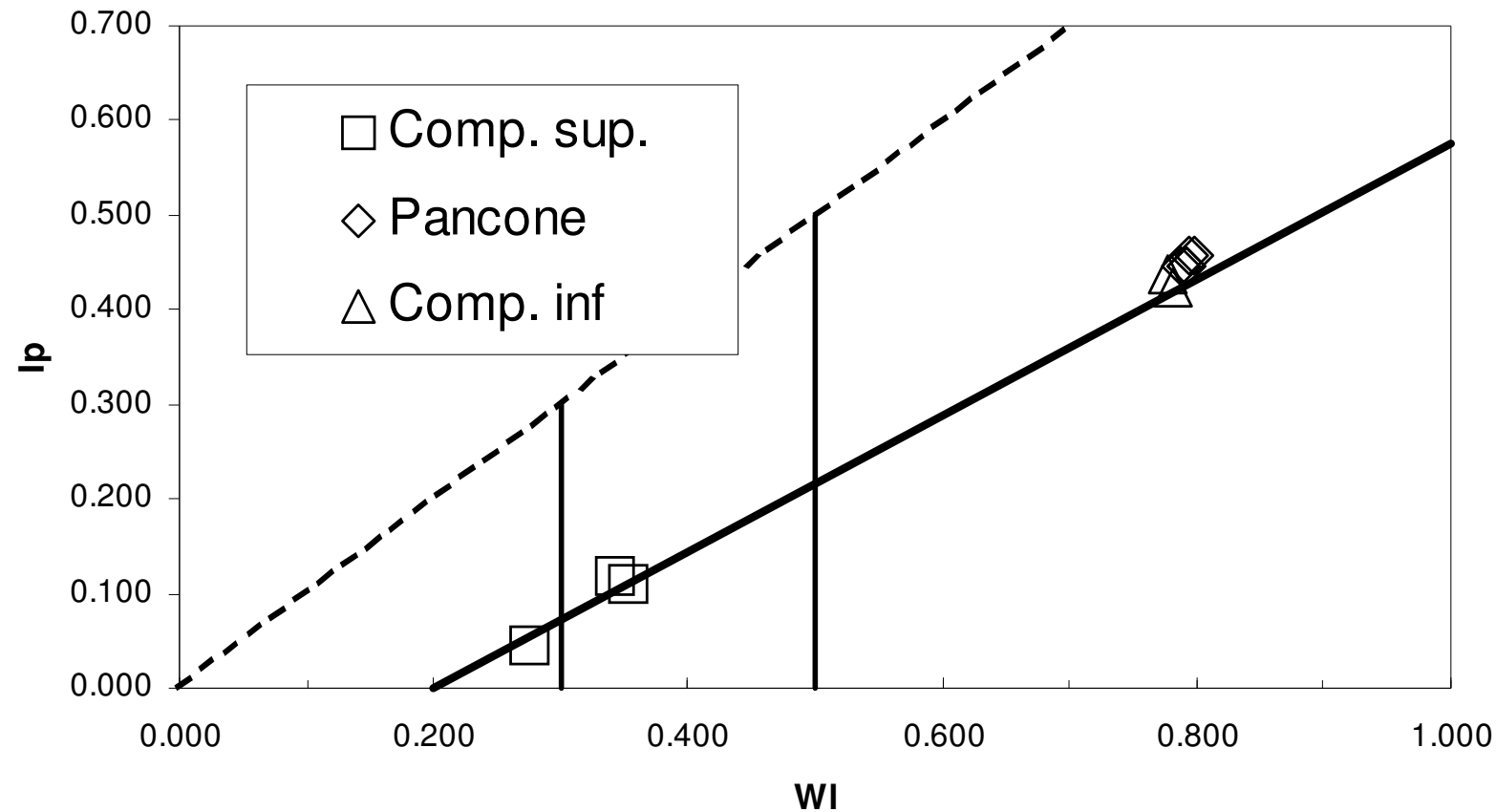
Alcuni risultati ottenuti dalle indagini

Granulometria - Pancone



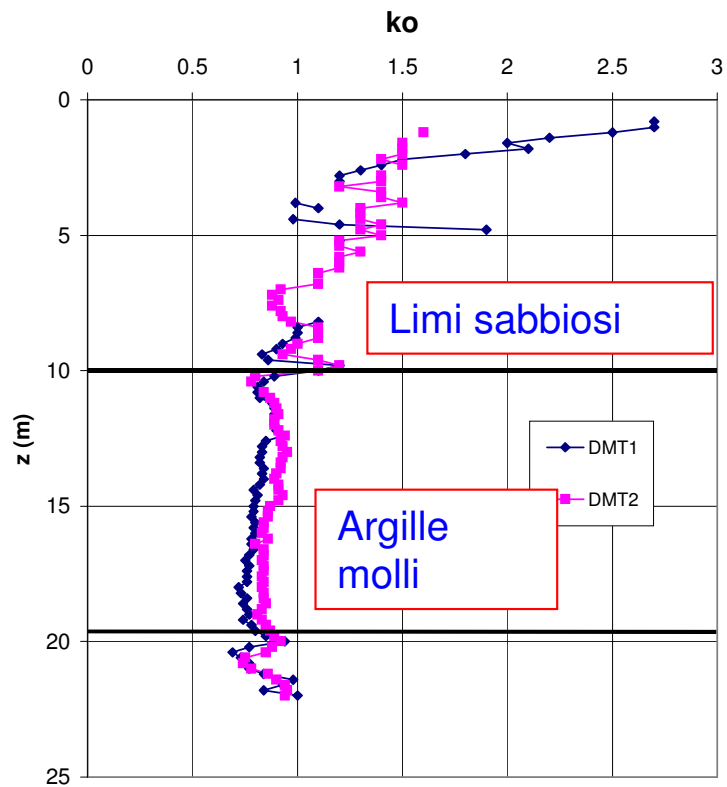
Alcuni risultati ottenuti dalle indagini

Carta di Casagrande

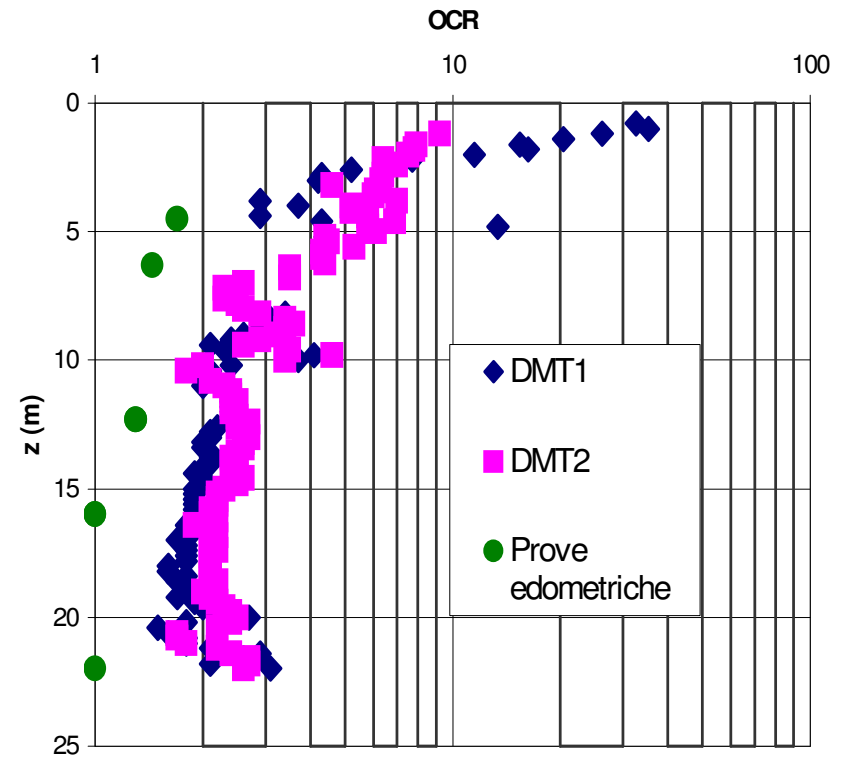


Alcuni risultati ottenuti dalle indagini

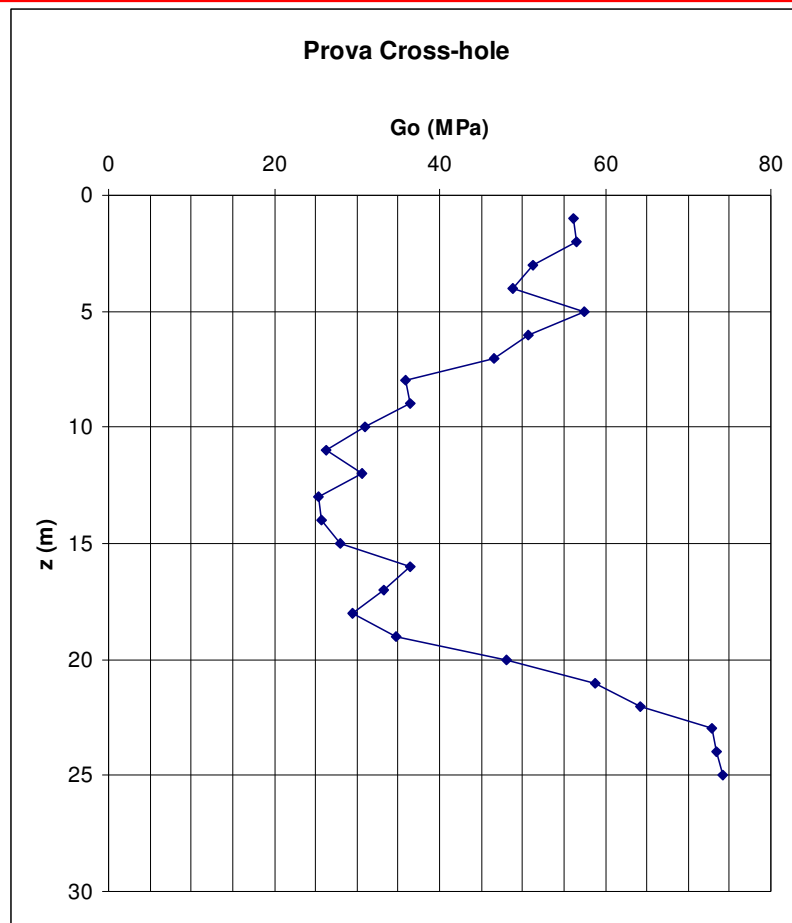
Coefficiente di spinta a riposo



Grado di sovraconsolidazione



Alcuni risultati ottenuti dalle indagini



Per la caratterizzazione si sono utilizzati unitariamente i risultati di tutte le prove in sito e lab.

Ipotesi progettuali

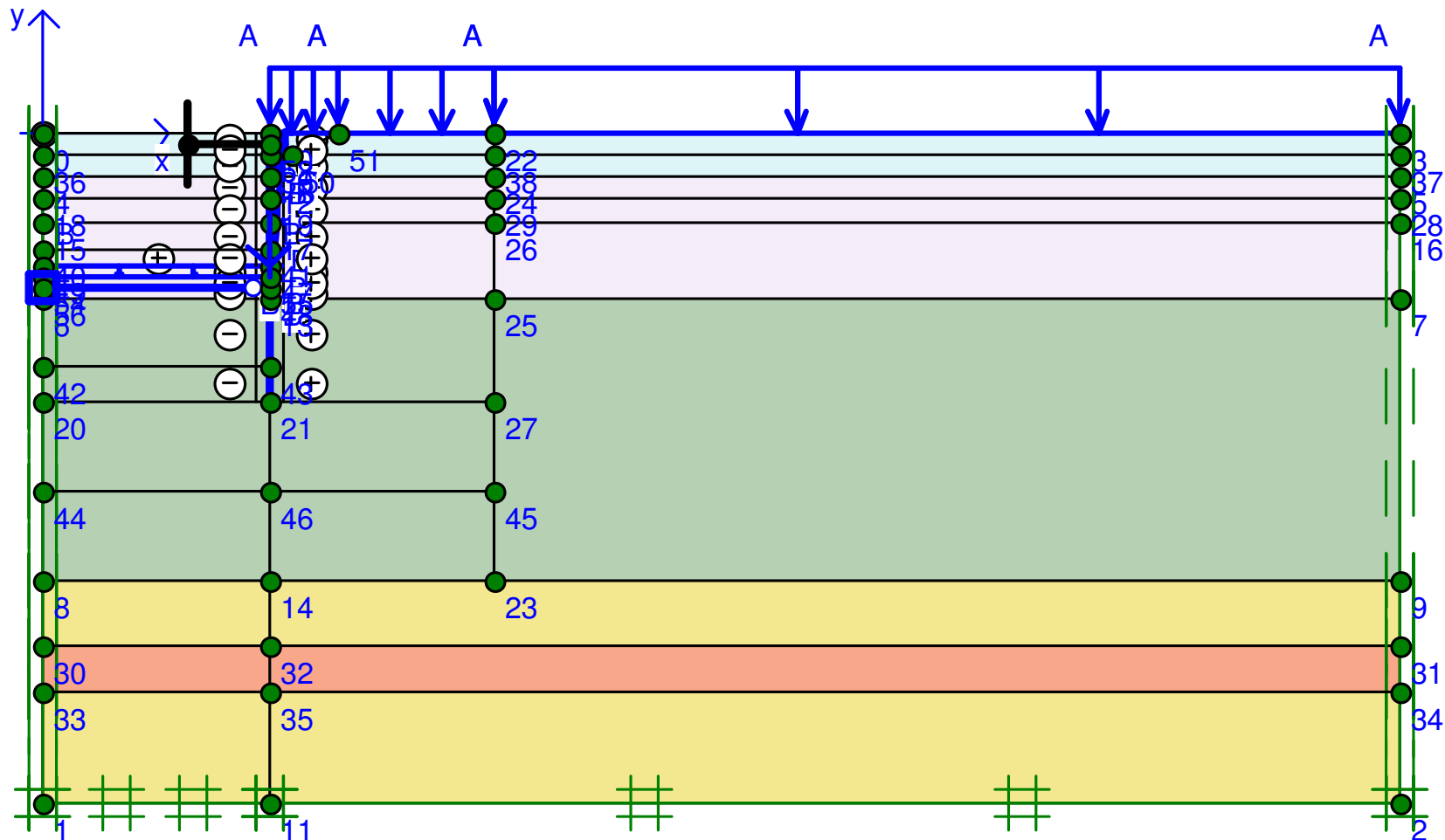
~~➤ Scavo con paratia libera~~

➤ Scavo in presenza del solo puntone

➤ Scavo in presenza del solo jet-grouting

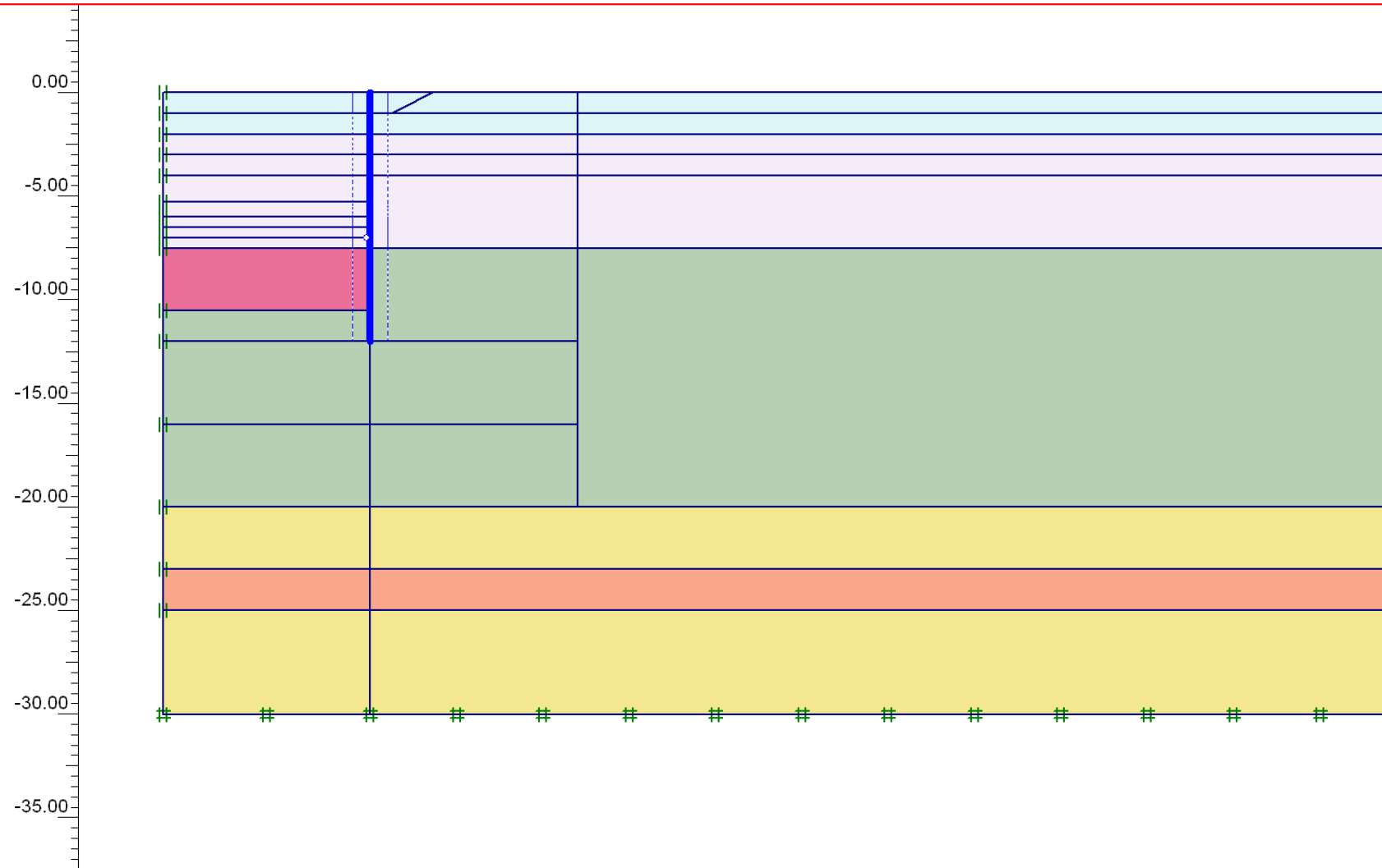
➤ Scavo in presenza di puntone provvisorio e jet-grouting

Modellazione FEM del sottosuolo

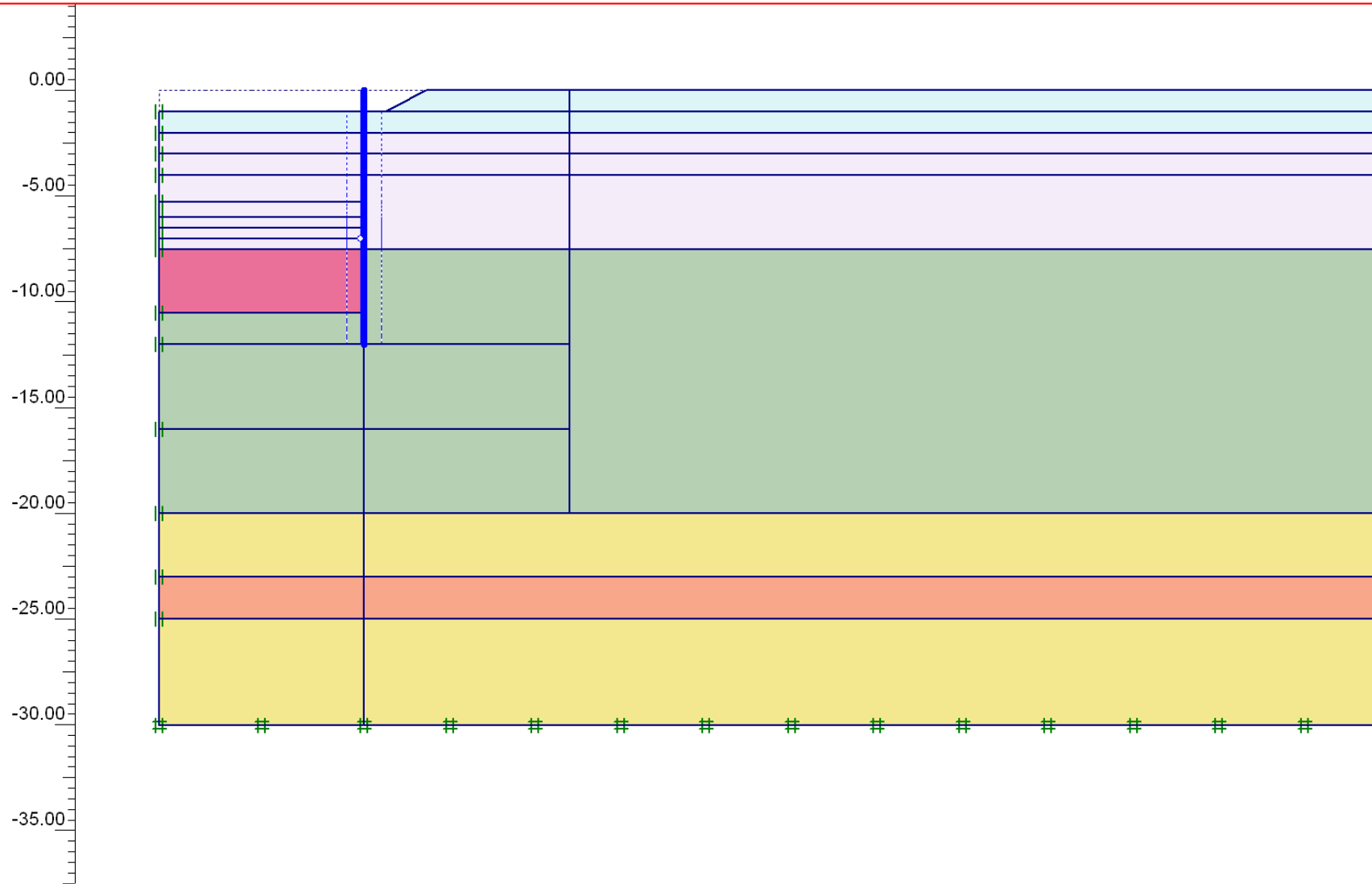


Simulazione delle fasi

stato iniziale – realizzazione paratia e jet-grouting

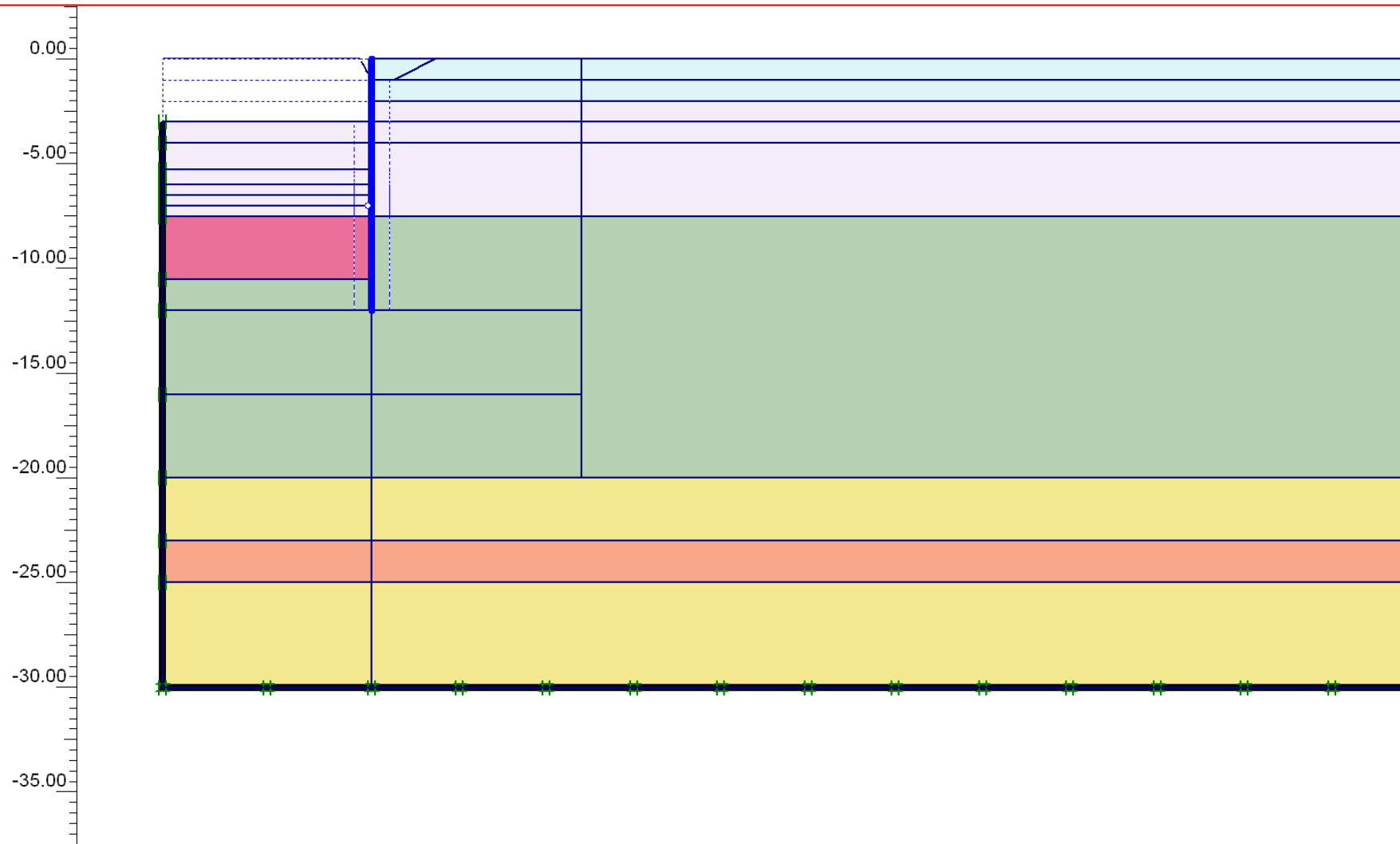


Simulazione delle fasi prescavo

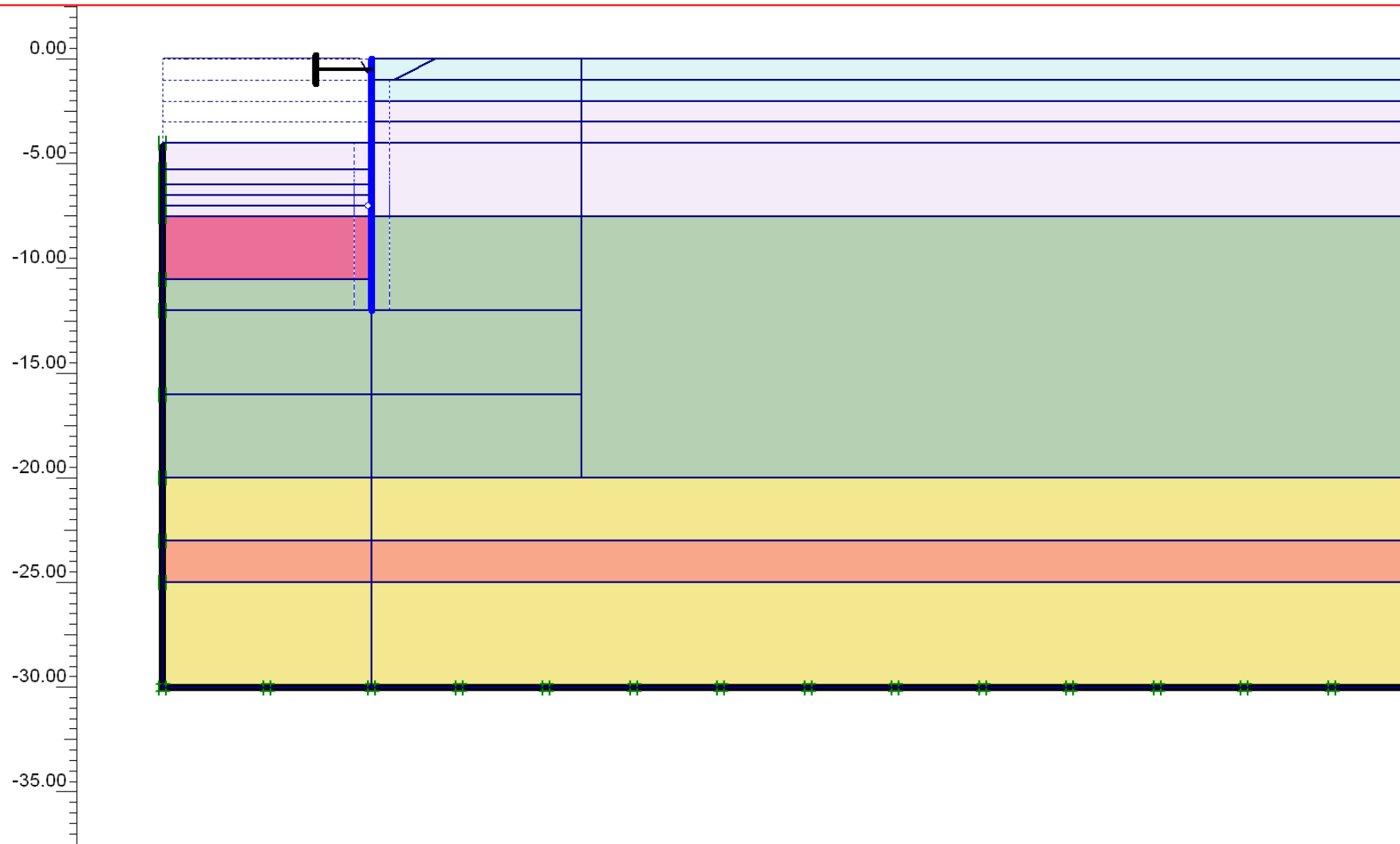


Simulazione delle fasi

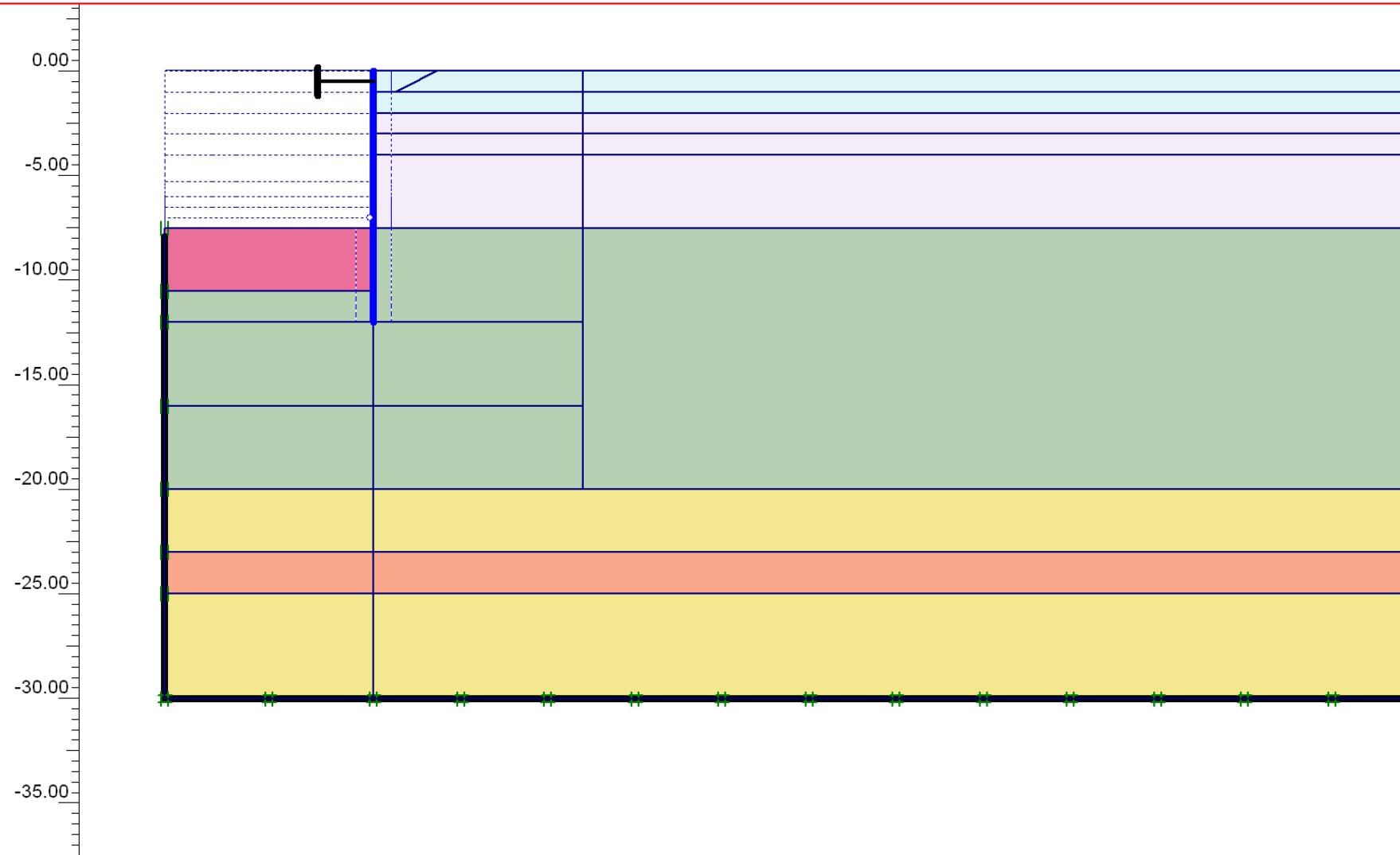
scavo primi 3 metri



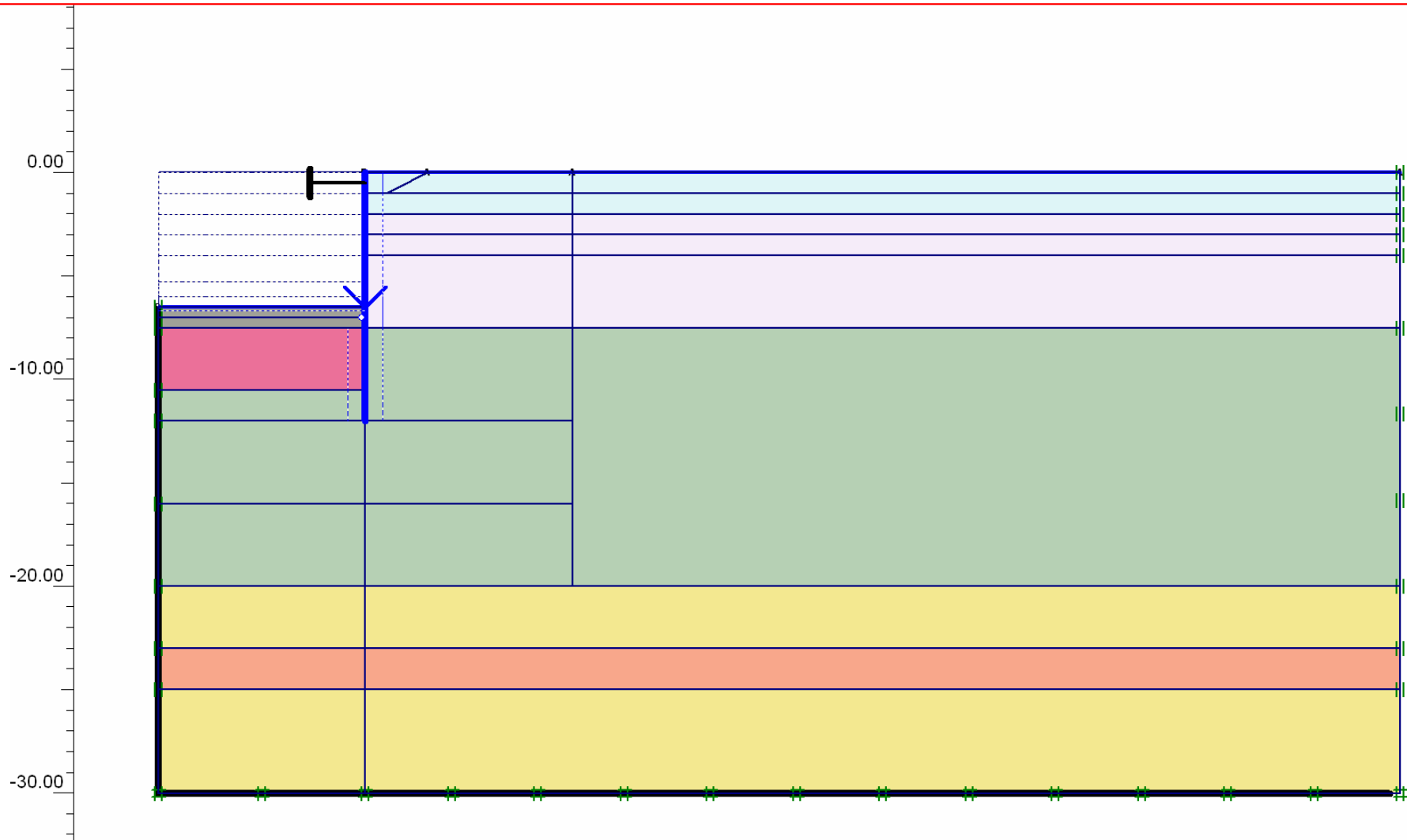
Simulazione delle fasi installazione puntone



Simulazione delle fasi completamento scavo

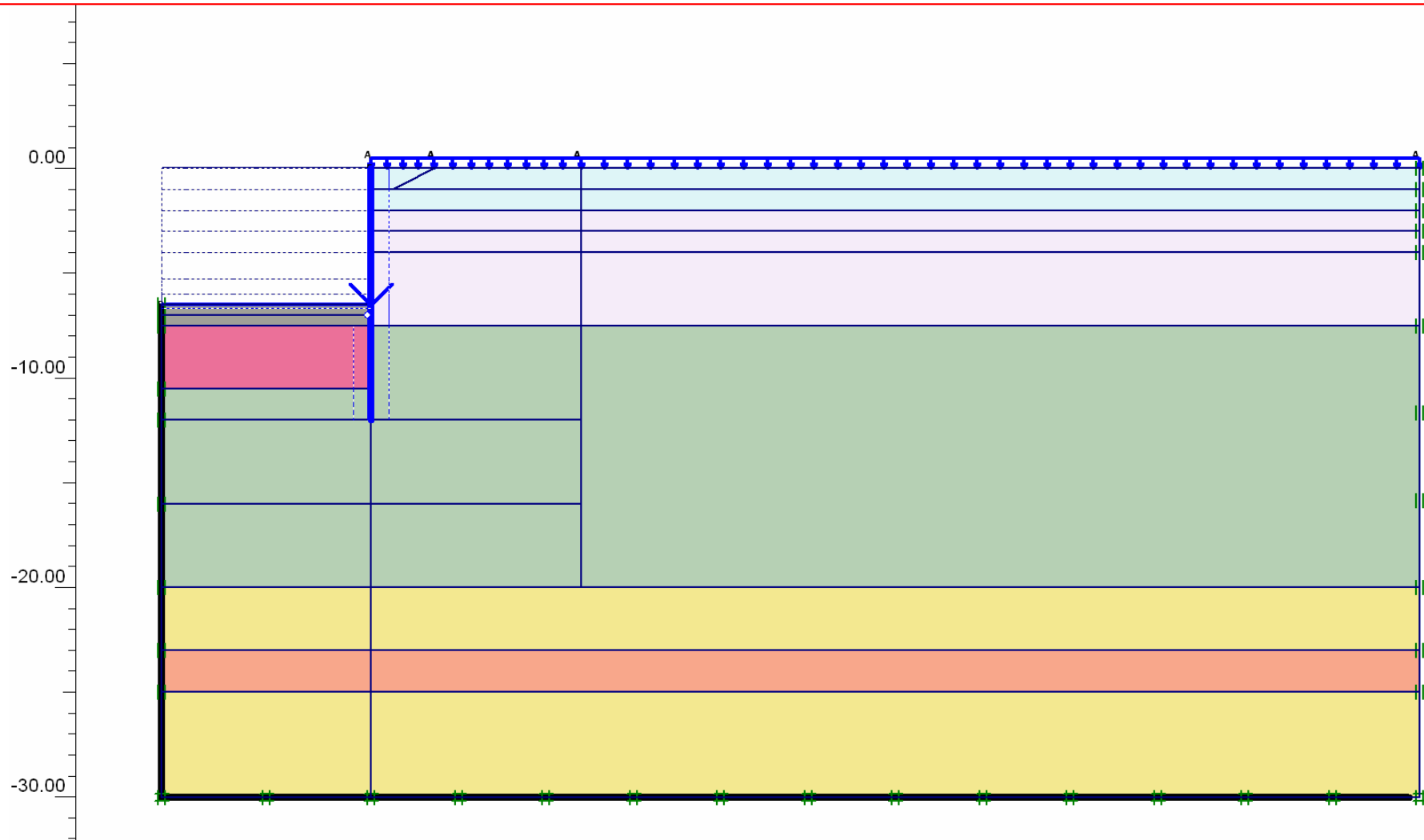


Simulazione delle fasi realizzazione soletta di fondo



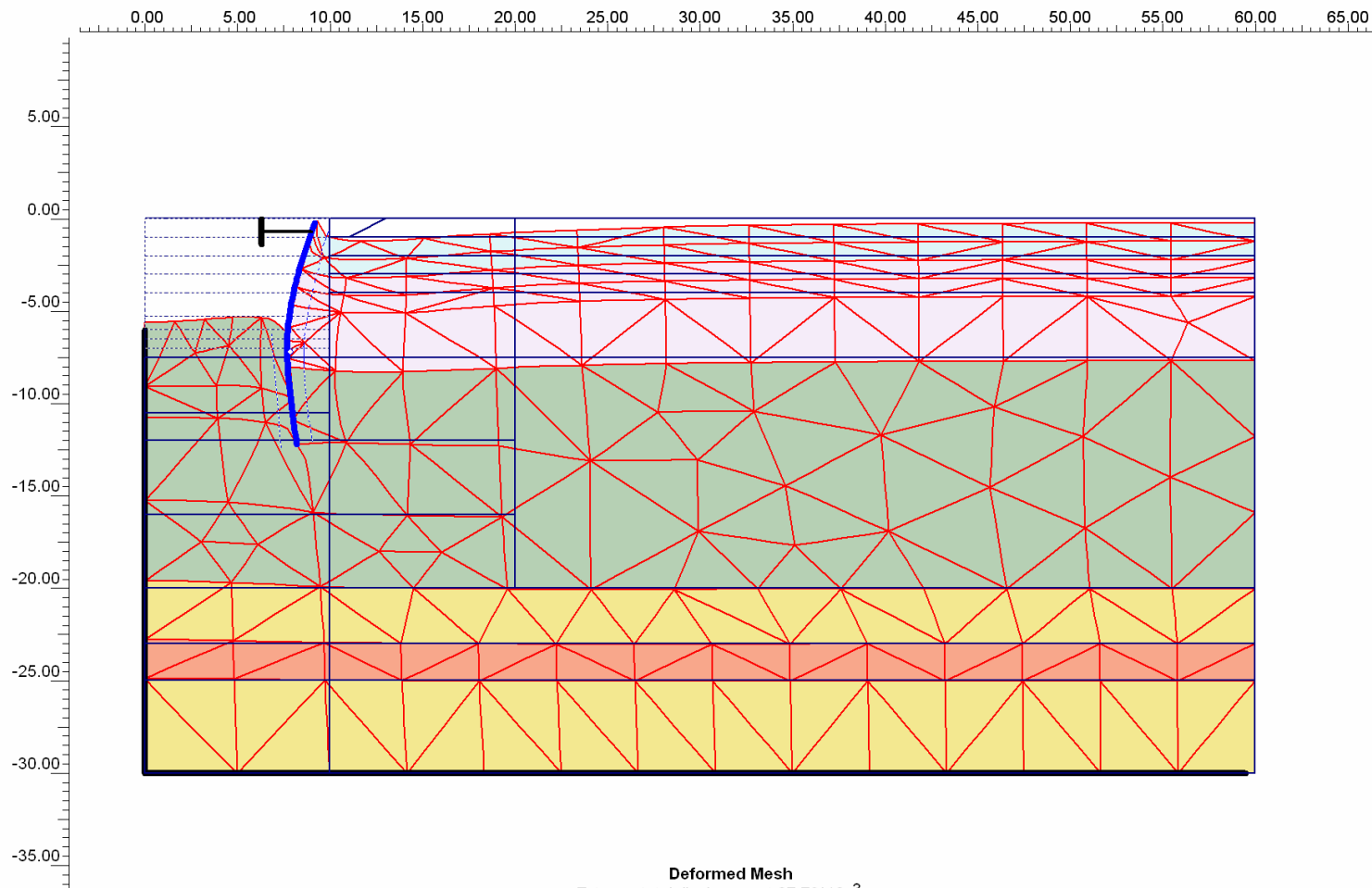
Simulazione delle fasi

rimoz. puntone; applicazione sovraccarichi e consolidazione



Scavo in presenza del solo puntone

Mesh deformata a fine scavo

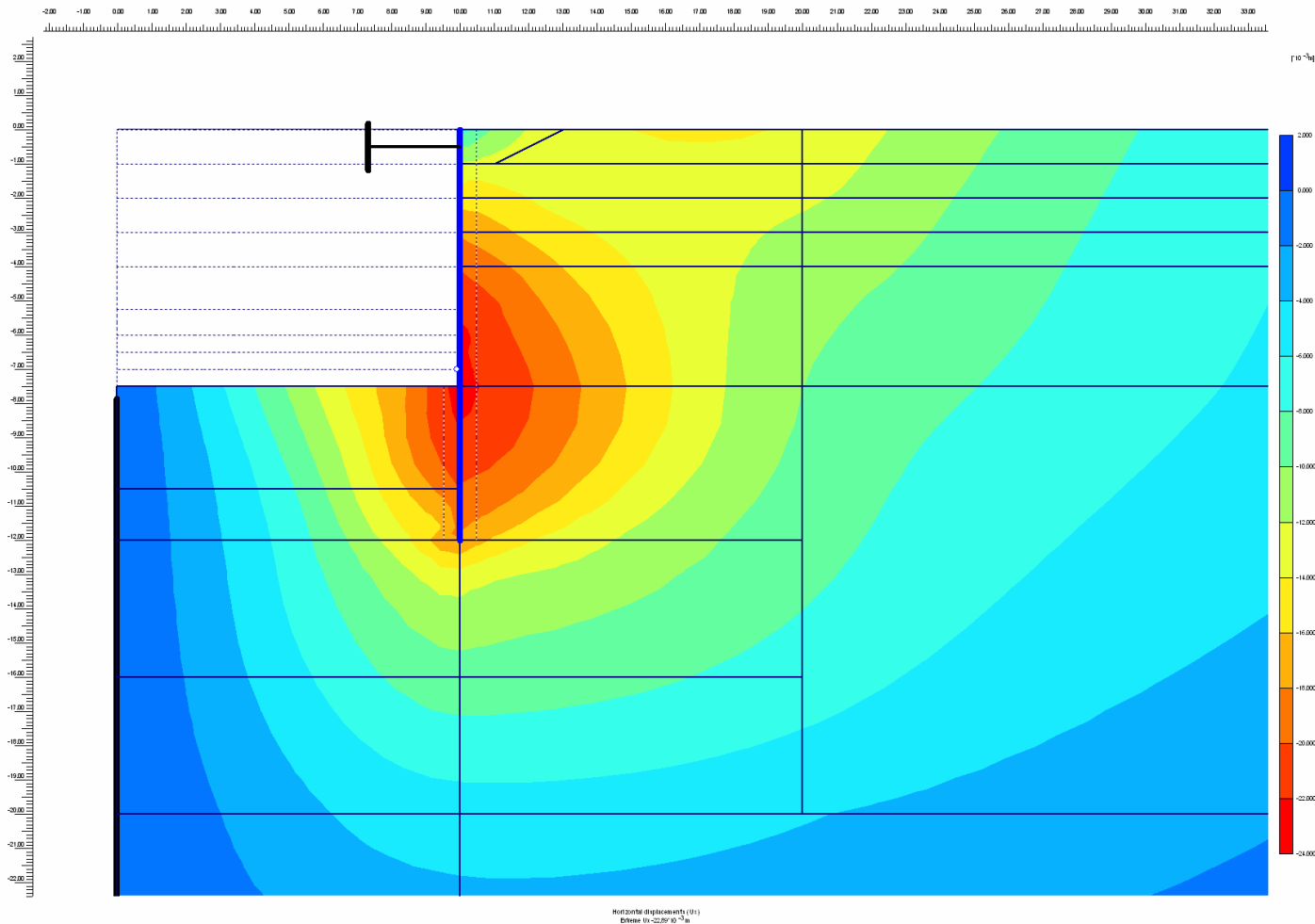


**Massimo
spostamento a
piano scavo**

Deformed Mesh
Extreme total displacement $27.73 \cdot 10^{-3}$ m
(displacements scaled up 100,00 times)

Scavo in presenza del solo puntone

Spostamenti orizzontali a fine scavo

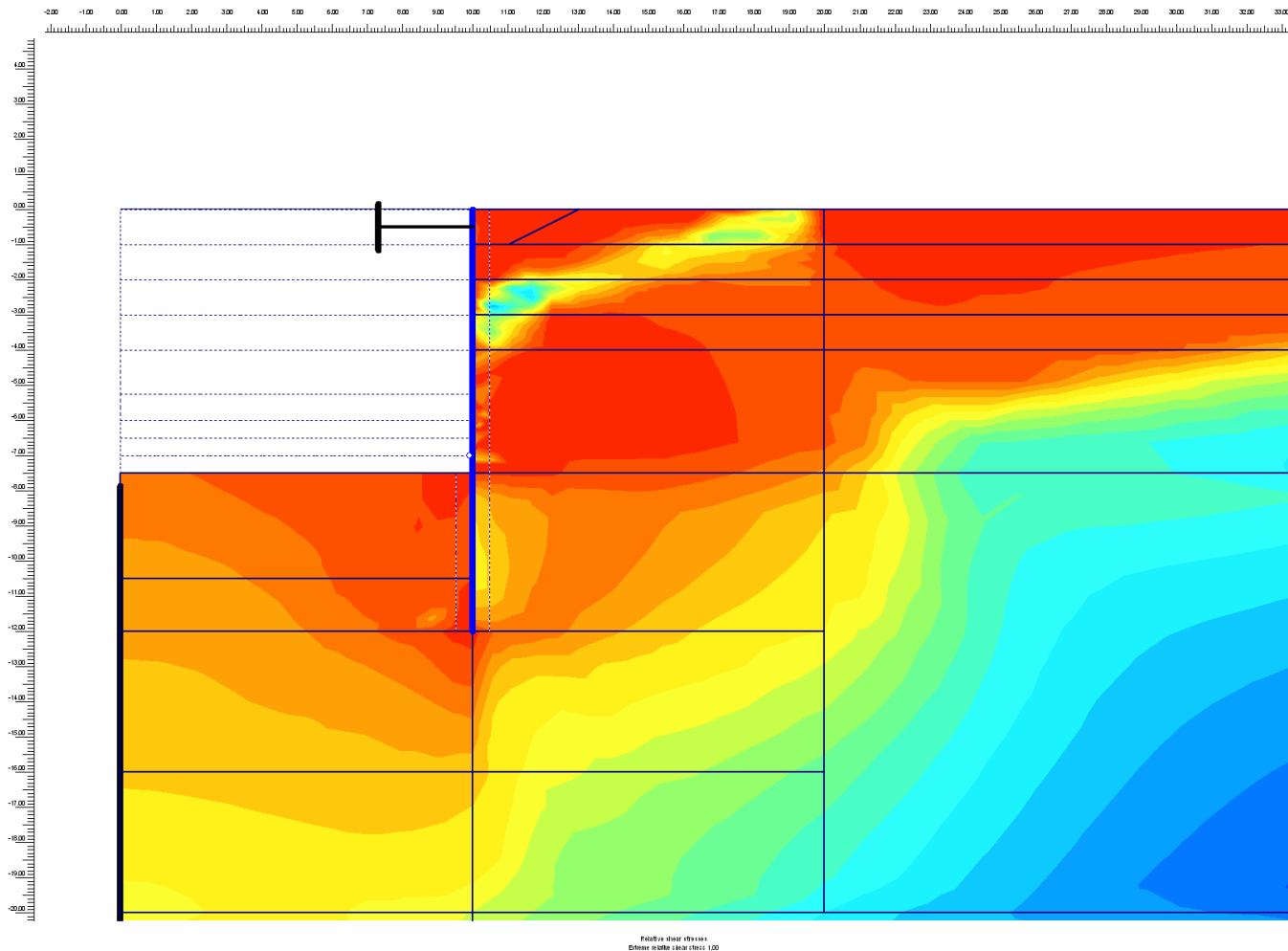


**Massimo
spostamento
orizzontale**

$$U_{x\max} = 22 \text{ mm}$$

Scavo in presenza del solo puntone

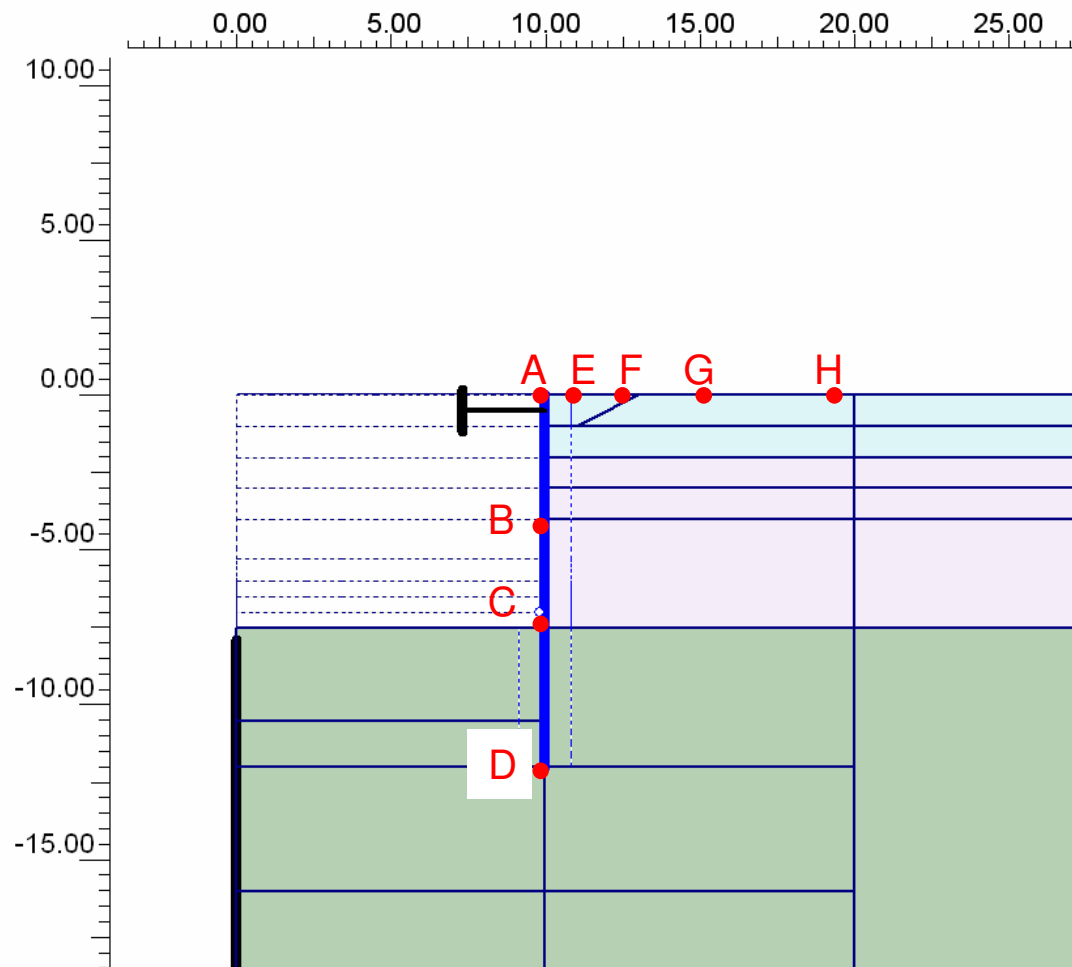
Grado di mobilitazione della resistenza a taglio



**Rosso = tensioni
tangenziali limite**

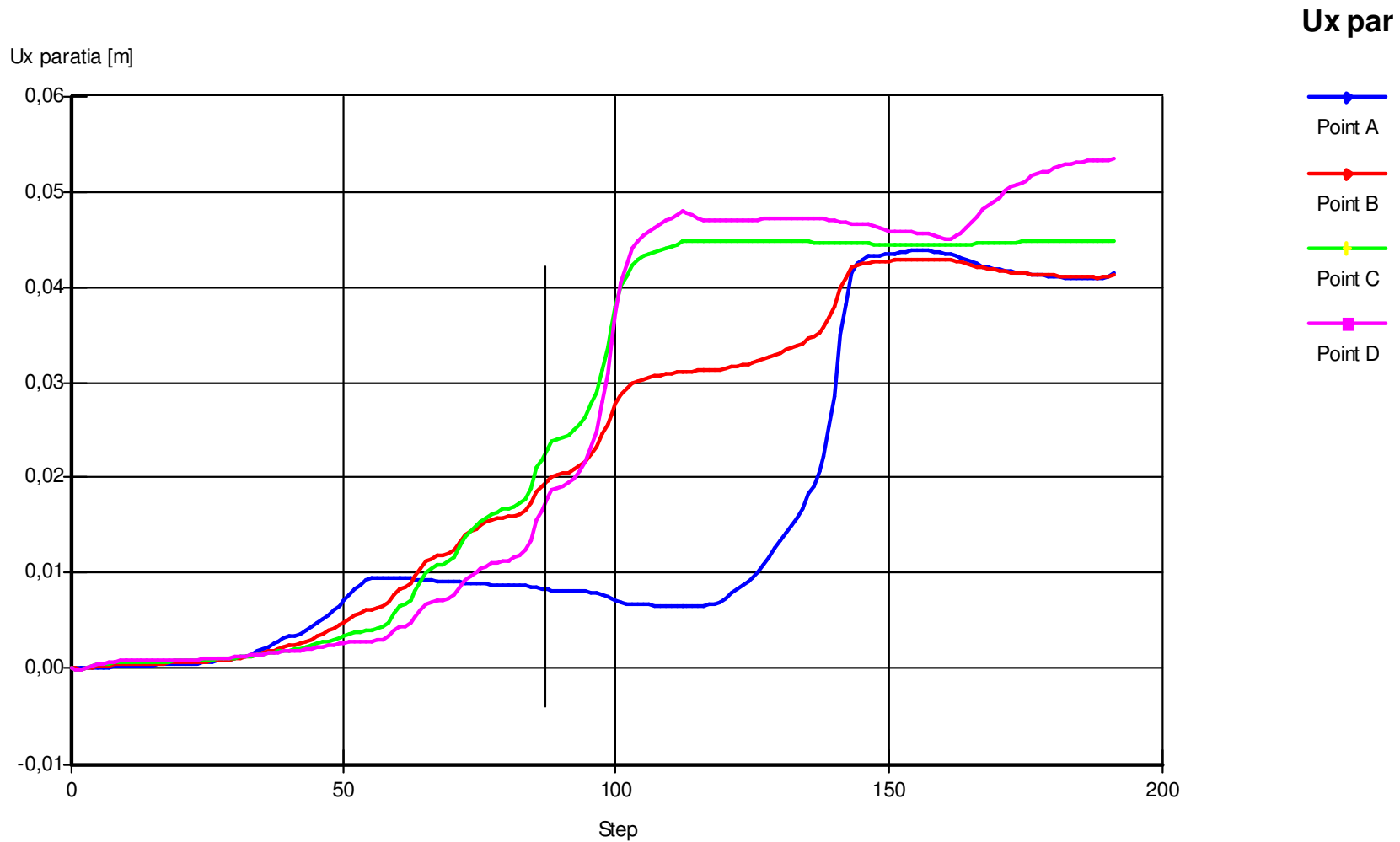
**Raggiungimento
delle tensioni
limite in molte
zone del
sottosuolo**

Posizione dei punti di calcolo degli spostamenti



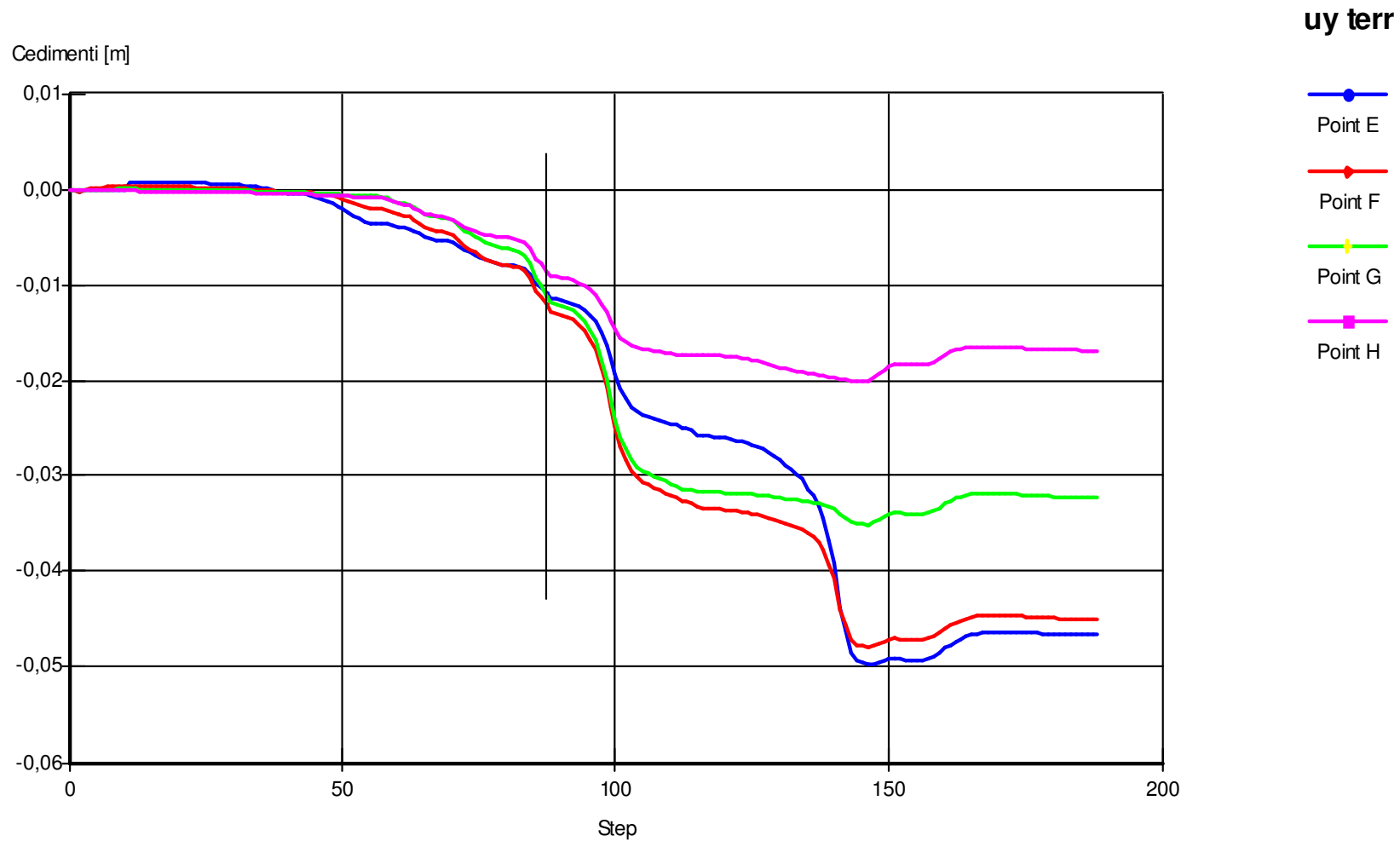
Scavo in presenza del solo puntone

Spostamenti paratia in funzione degli step

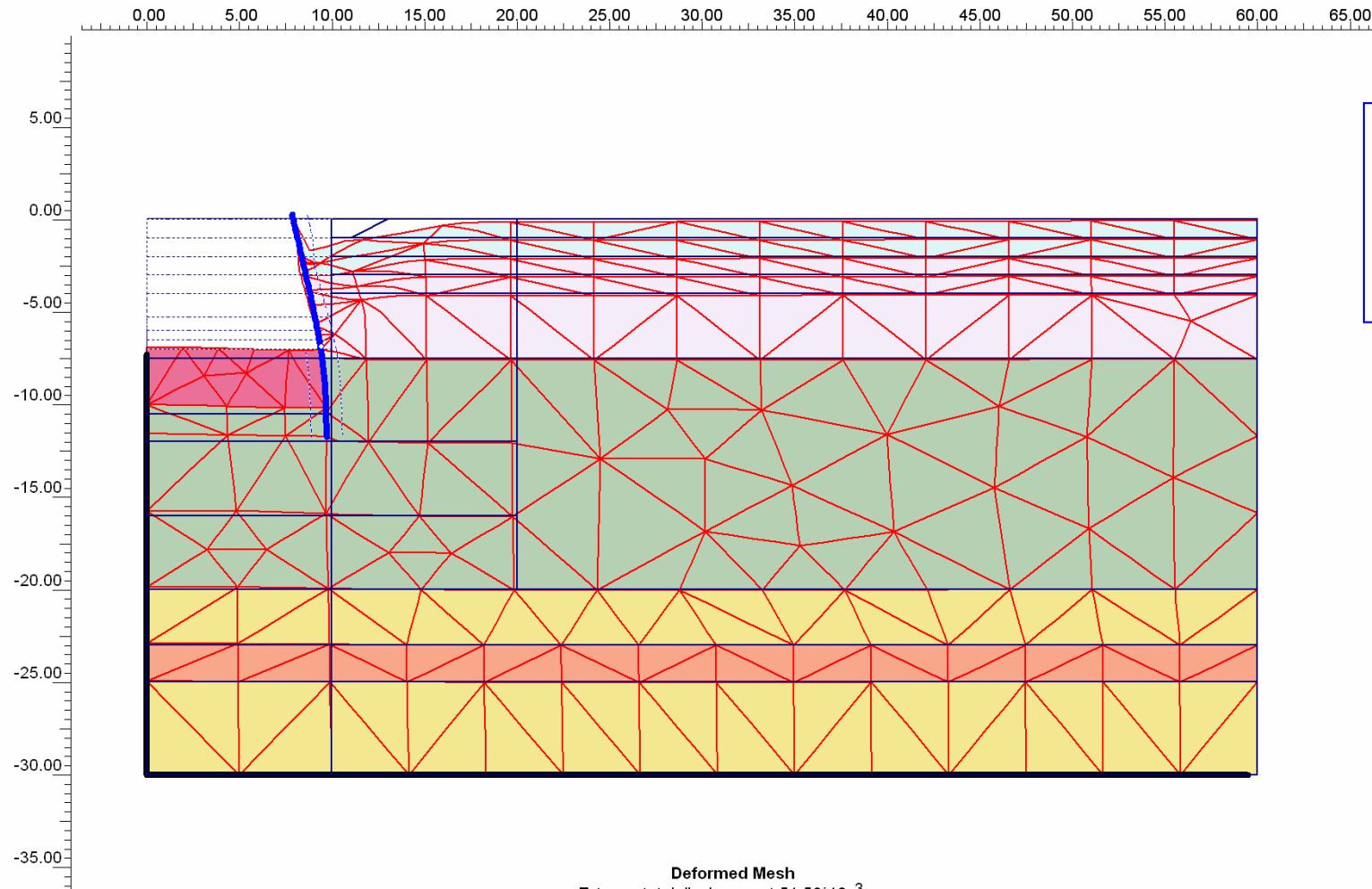


Scavo in presenza del solo puntone

Cedimenti terreno in funzione degli step



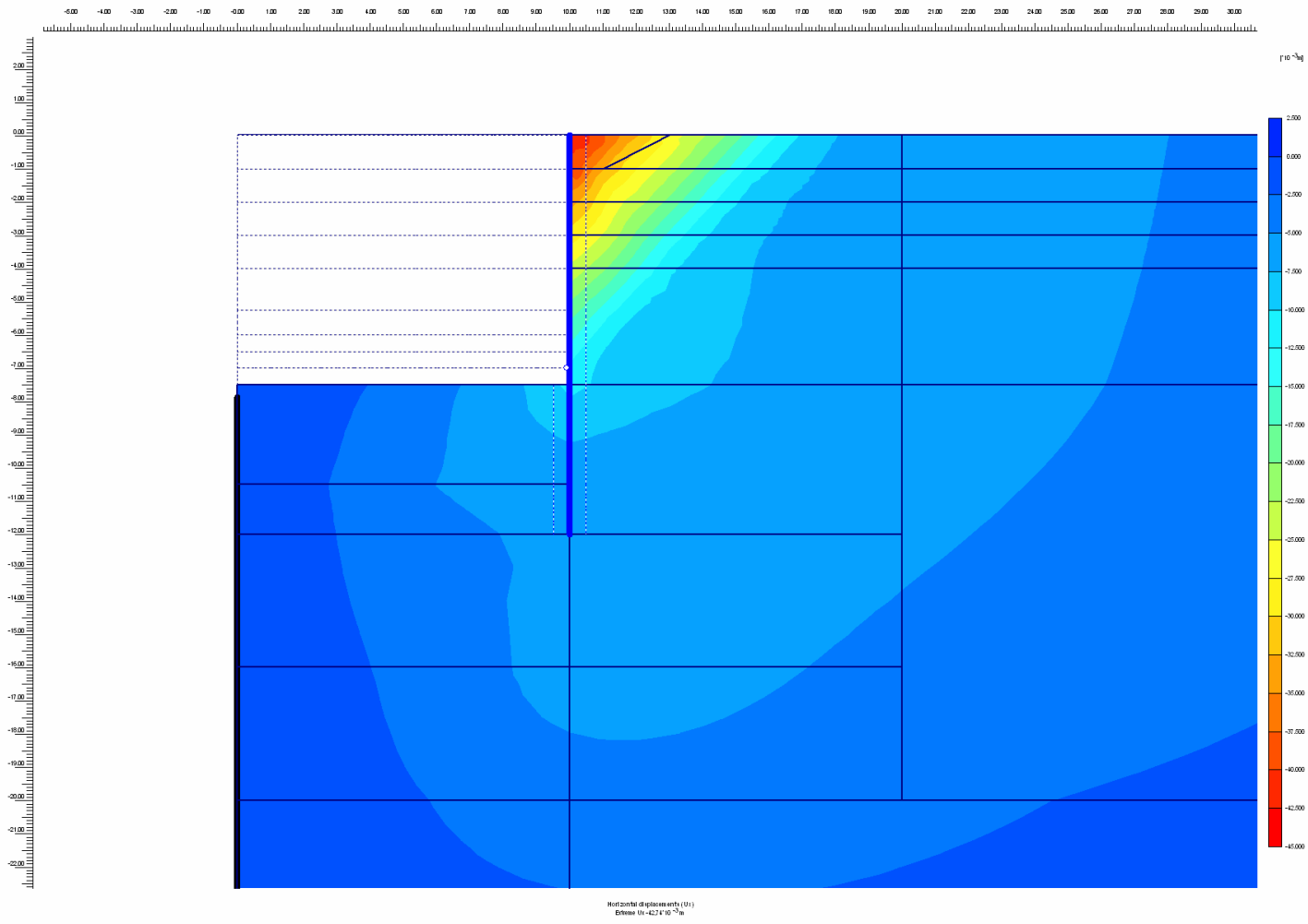
Scavo in presenza del solo jet-grouting Mesh deformata a fine scavo



Deformed Mesh
Extreme total displacement $51,56 \cdot 10^{-3}$ m
(displacements scaled up 50,00 times)

Scavo in presenza del solo jet-grouting

Spostamenti orizzontali a fine scavo

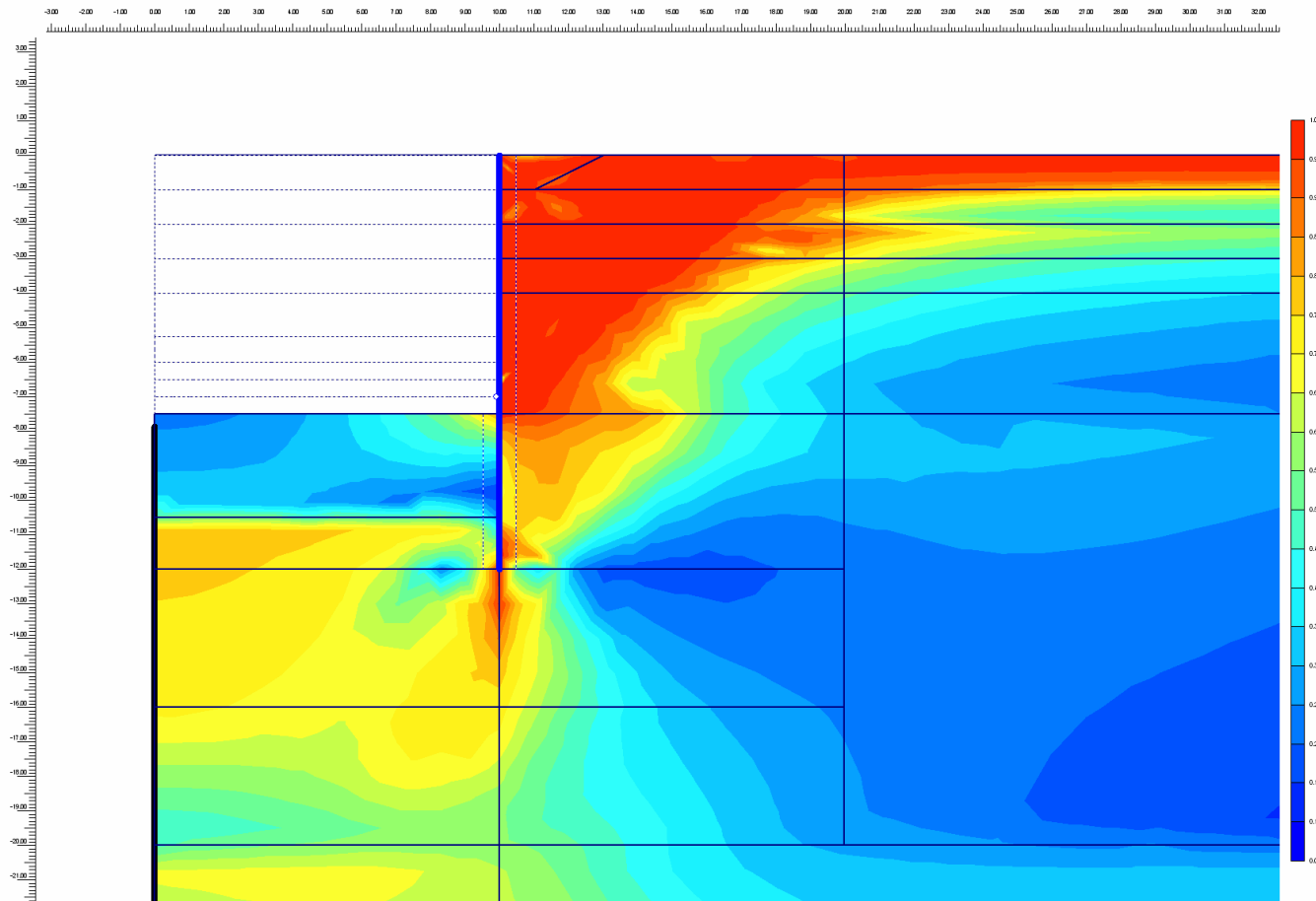


**Massimo
spostamento
orizzontale**

$$U_{x\max} = 42 \text{ mm}$$

Scavo in presenza del solo jet-grouting

Grado di mobilitazione della resistenza a taglio

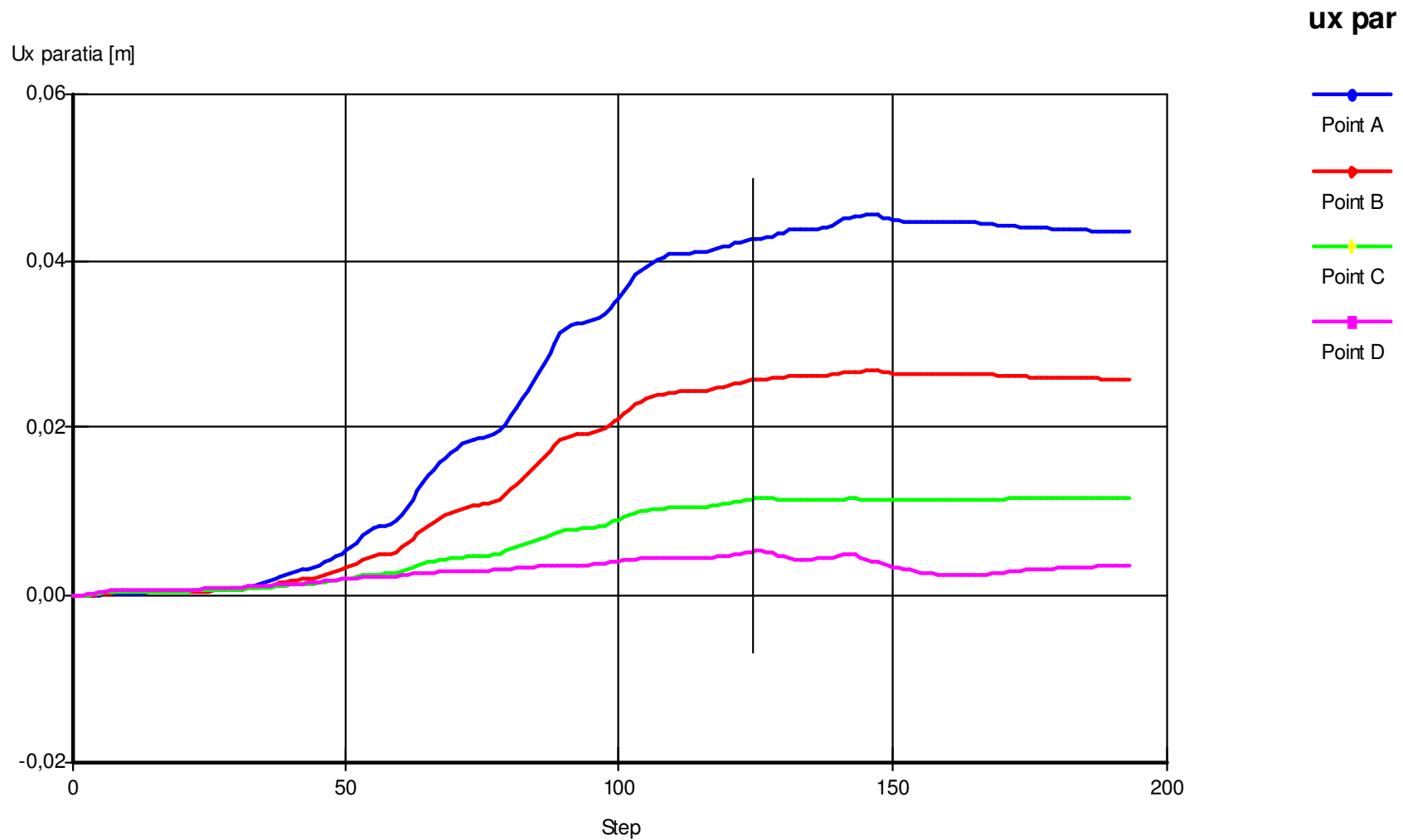


**Rosso = tensioni
tangenziali limite**

**Raggiungimento
delle tensioni
limite a tergo della
paratia**

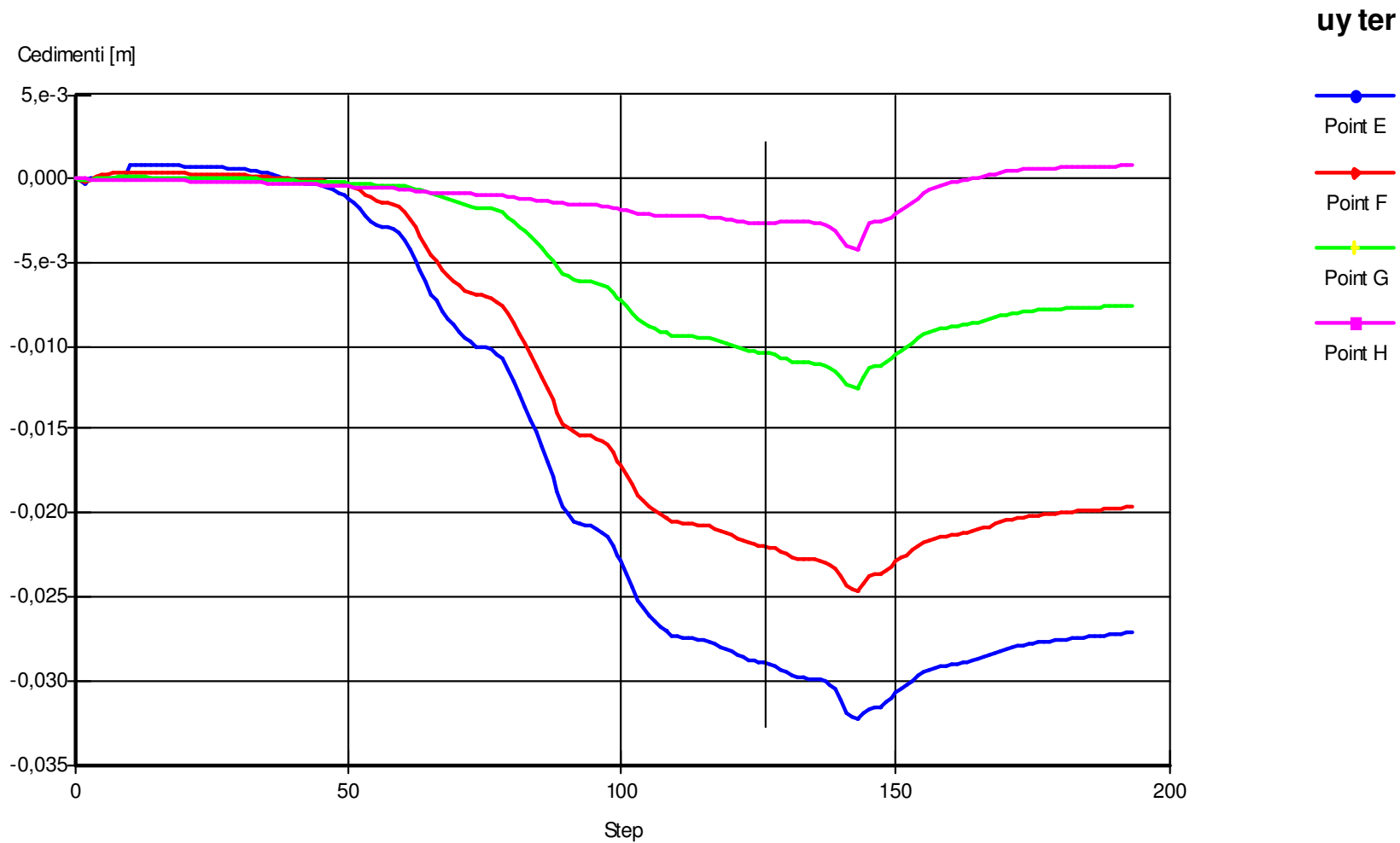
Scavo in presenza del solo jet-grouting

Spostamenti paratia in funzione degli step



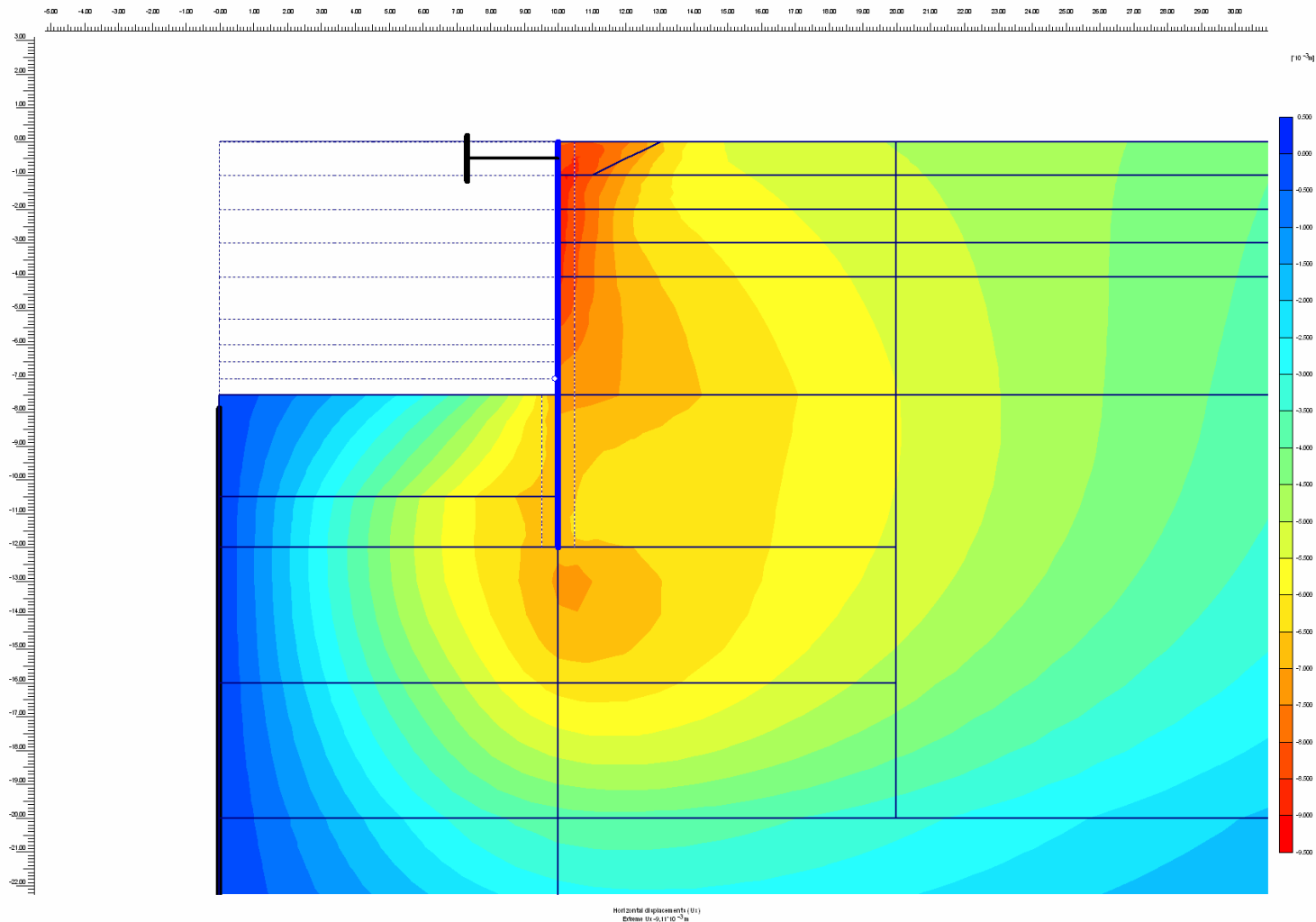
Scavo in presenza del solo jet-grouting

Cedimenti terreno in funzione degli step



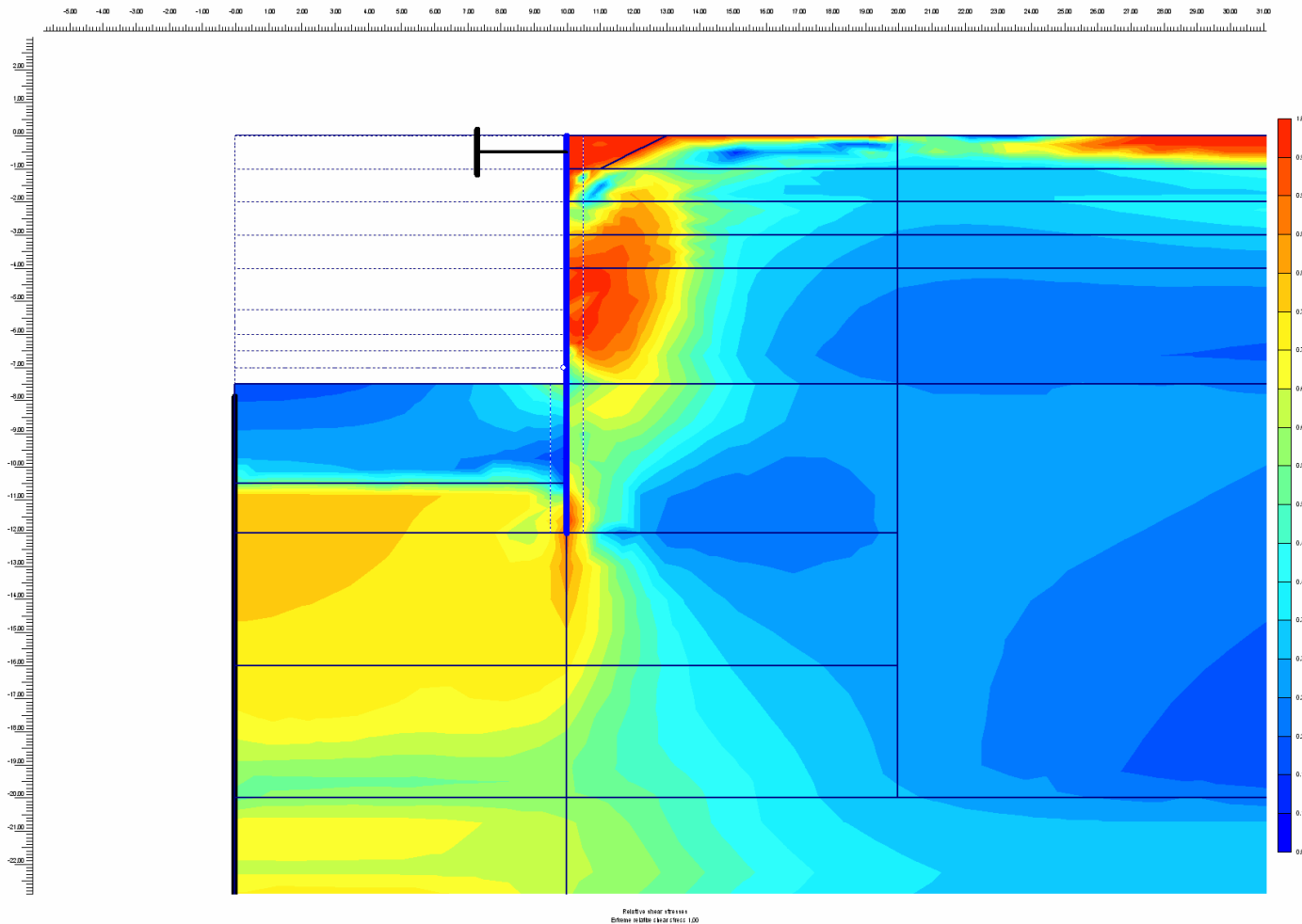
Scavo in presenza di puntone e jet-grouting

Spostamenti orizzontali a fine scavo



Scavo in presenza di puntone e jet-grouting

Grado di mobilitazione della resistenza a taglio

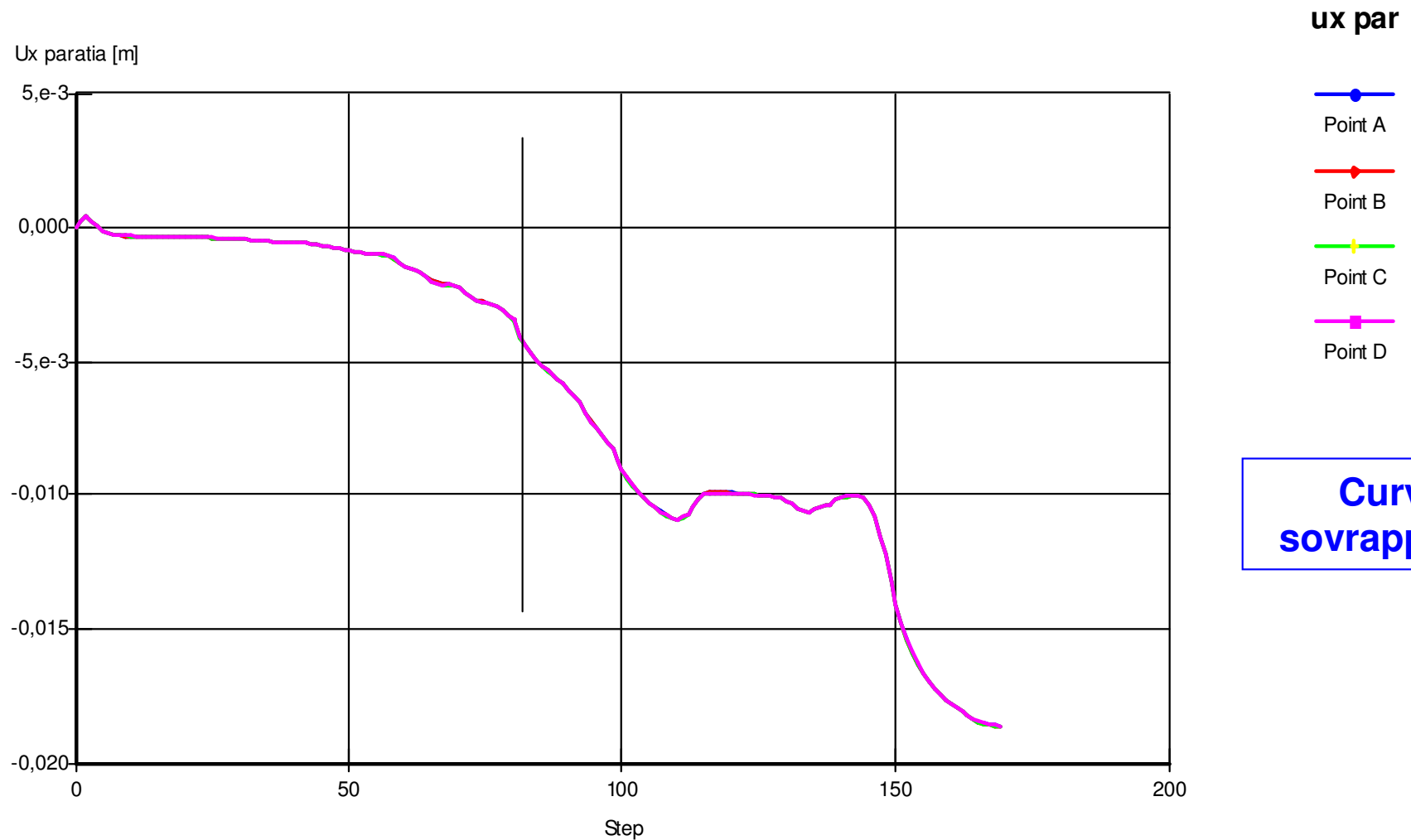


**Rosso = tensioni
tangenziali limite**

**Lontani dal
raggiungimento
delle tensioni limite
al piede della paratia
per la presenza del
jet grouting**

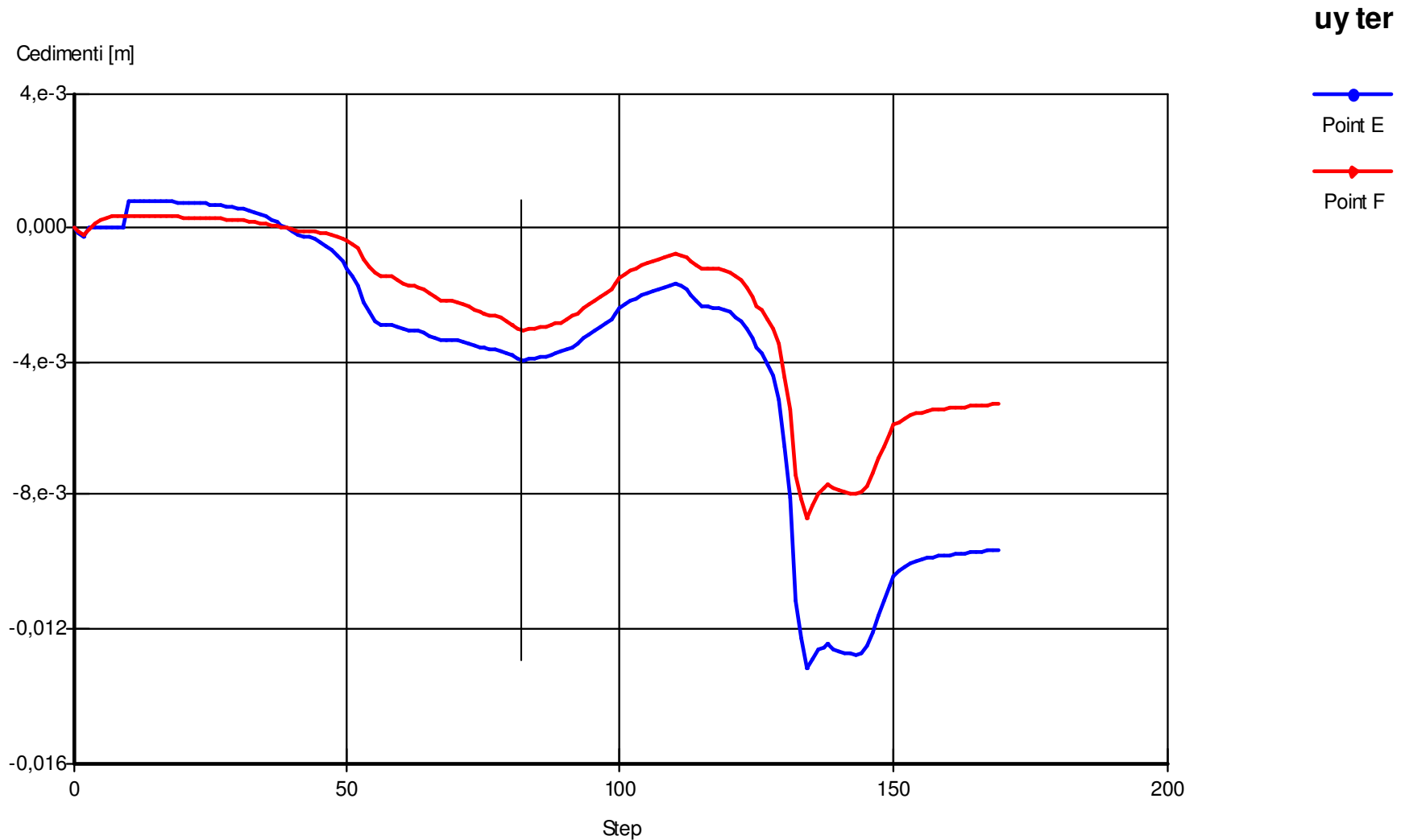
Scavo in presenza di puntone e jet-grouting

Spostamenti paratia in funzione degli step



Scavo in presenza di puntone e jet-grouting

Cedimenti terreno in funzione degli step

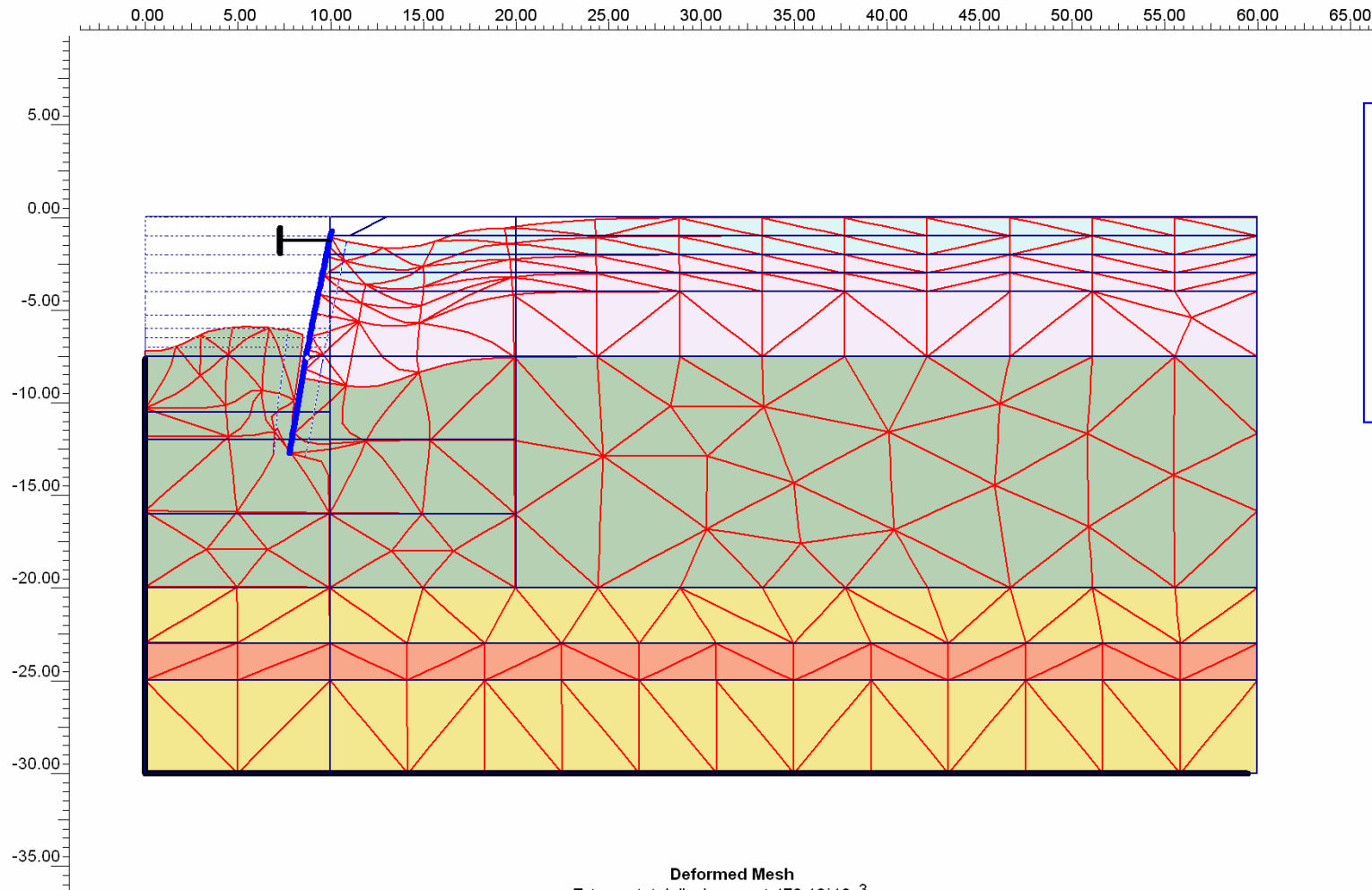


Confronto tra le soluzioni in termini di spostamento

| Soluzione | $U_{x,max}$ (cm) | $U_{y,max}$ (cm) |
|------------------------|---------------------|---------------------|
| Solo puntone | 2.2 | 1.1 (4.7) |
| Solo jet-grouting | 4.2 | 2.9 (2.8) |
| Puntone + jet-grouting | 0.9 | 0.4 (1.0) |

Scavo in presenza del solo puntone

Mesh deformata dopo 180 giorni di consolidazione



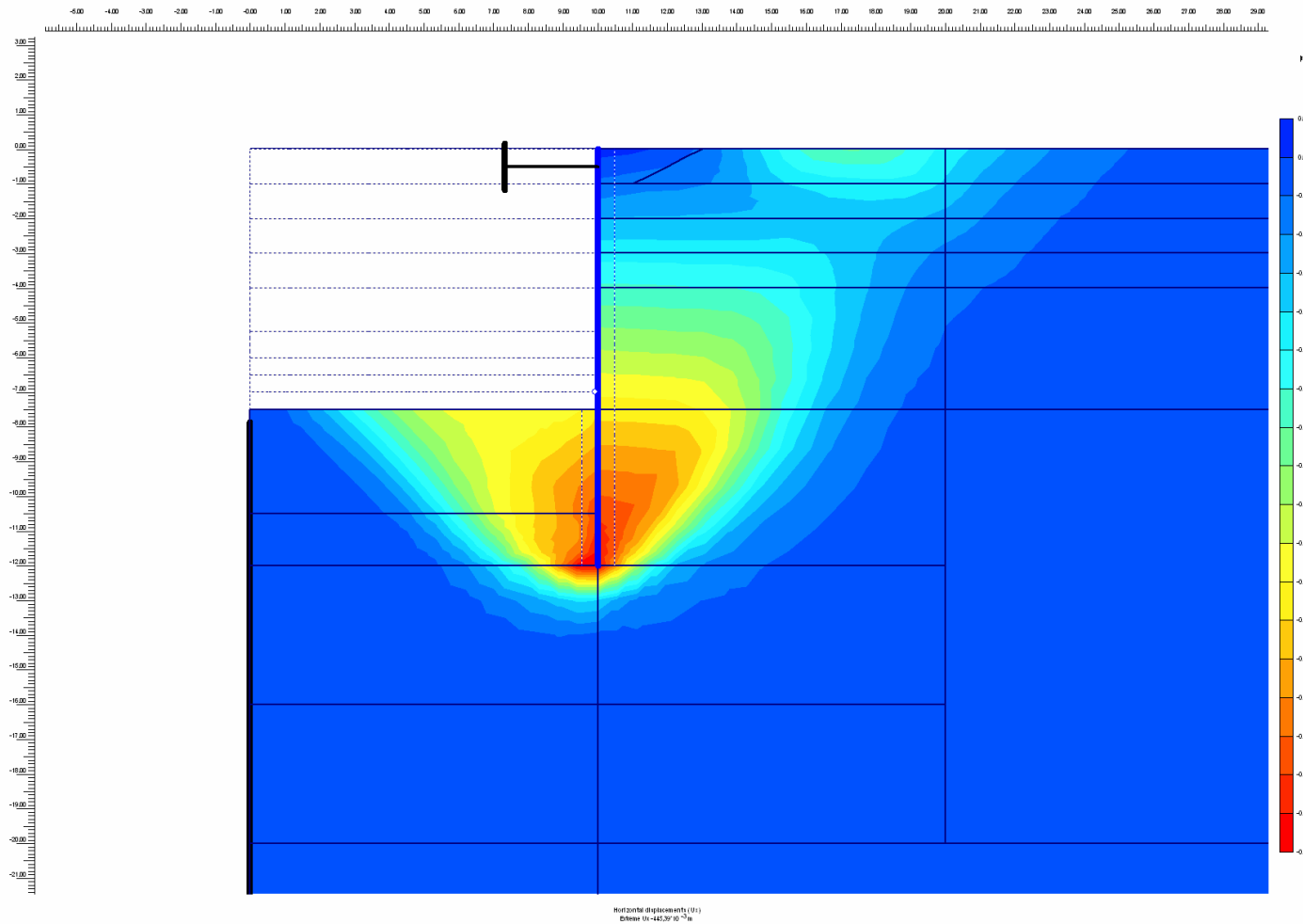
Massimo spostamento al piede

$U_x = 445 \text{ mm}$

Deformed Mesh
Extreme total displacement $472.12 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
(displacements scaled up 5,00 times)

Scavo in presenza del solo puntone

Spostamenti orizzontali dopo 180 giorni di consolidazione

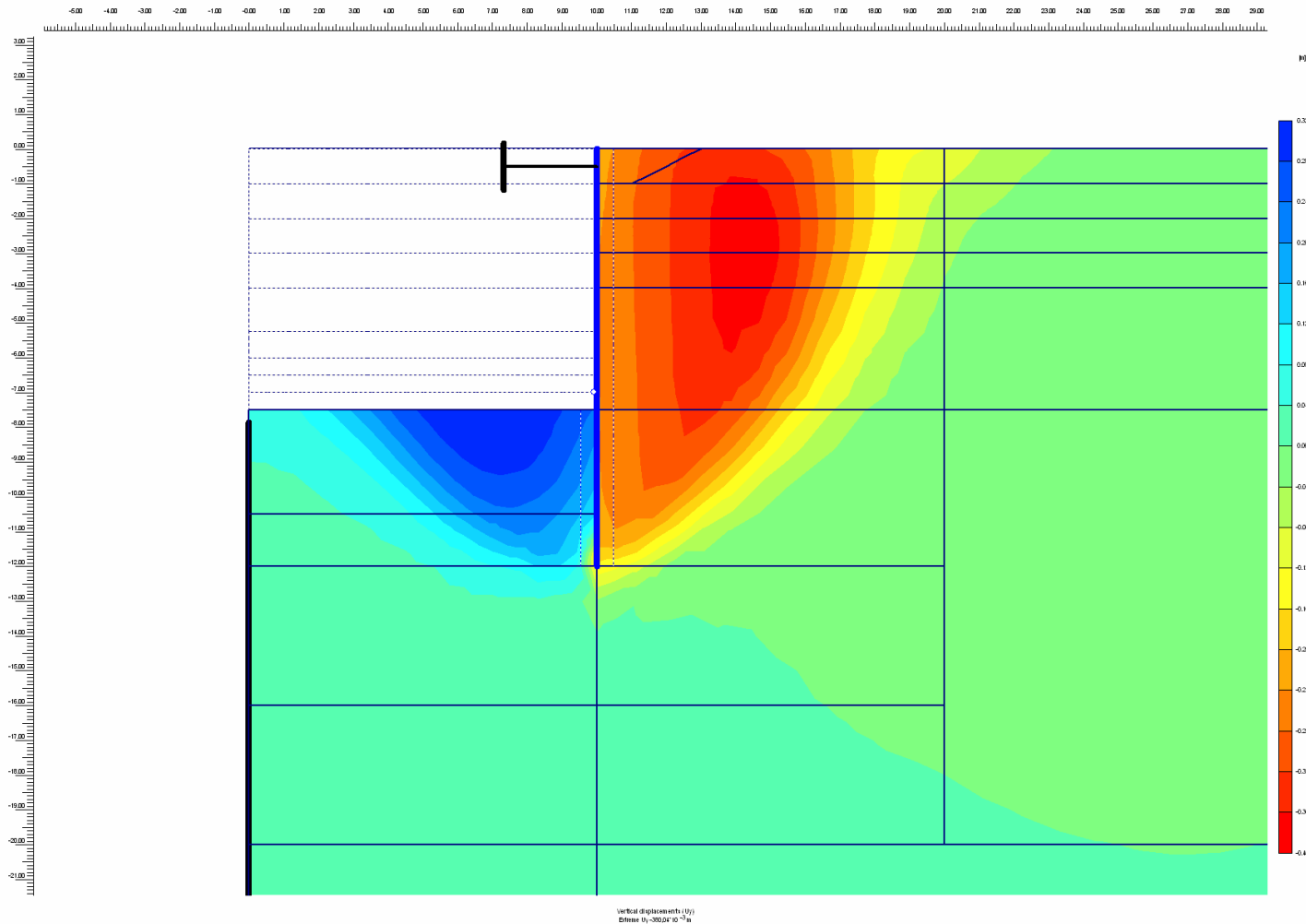


**Massimo
spostamento
orizzontale**

$$U_{xmax} = 445 \text{ mm}$$

Scavo in presenza del solo puntone

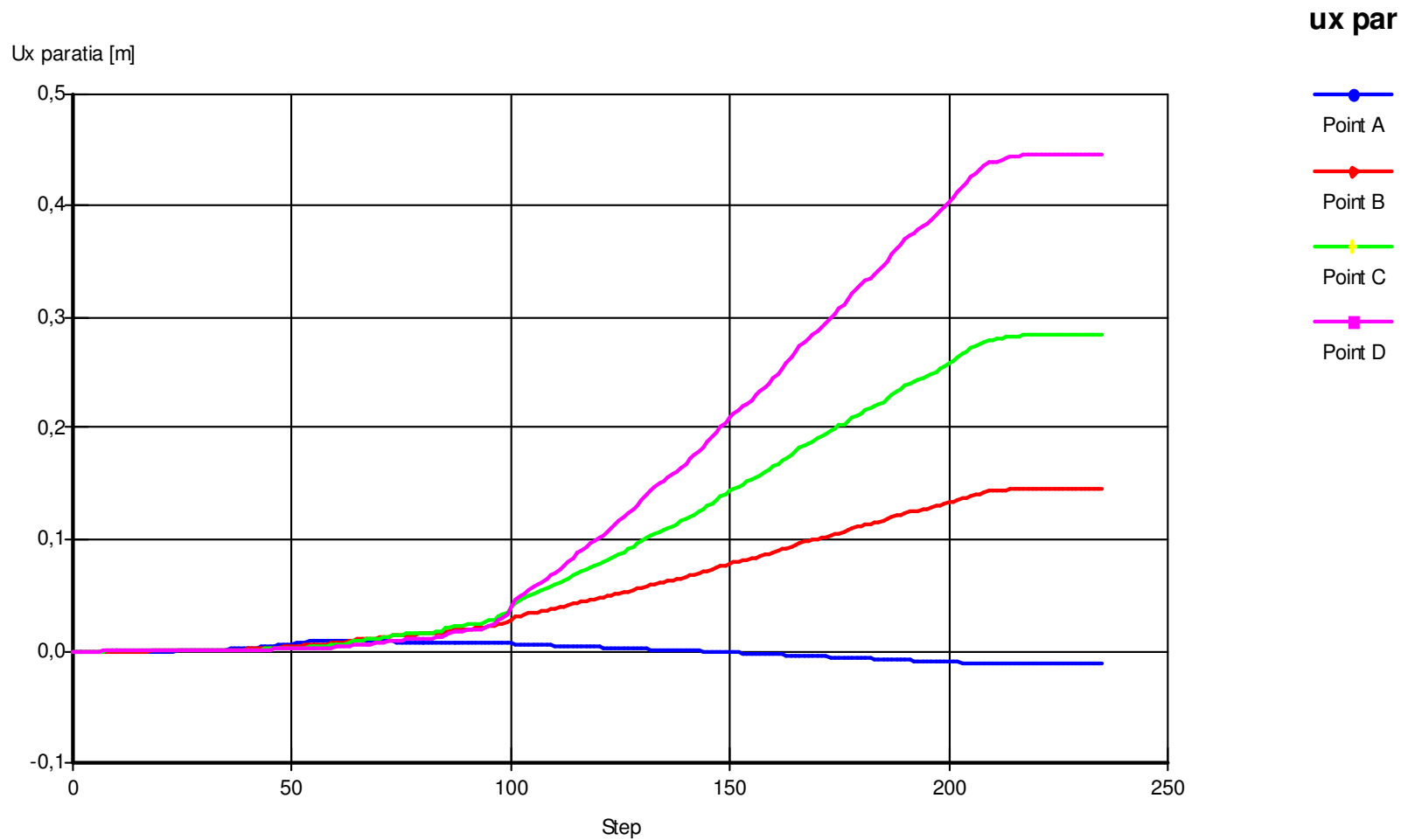
Spostamenti verticali dopo 180 giorni di consolidazione



Massimo spostamento verticale
 $U_{y\max} = 390 \text{ mm}$

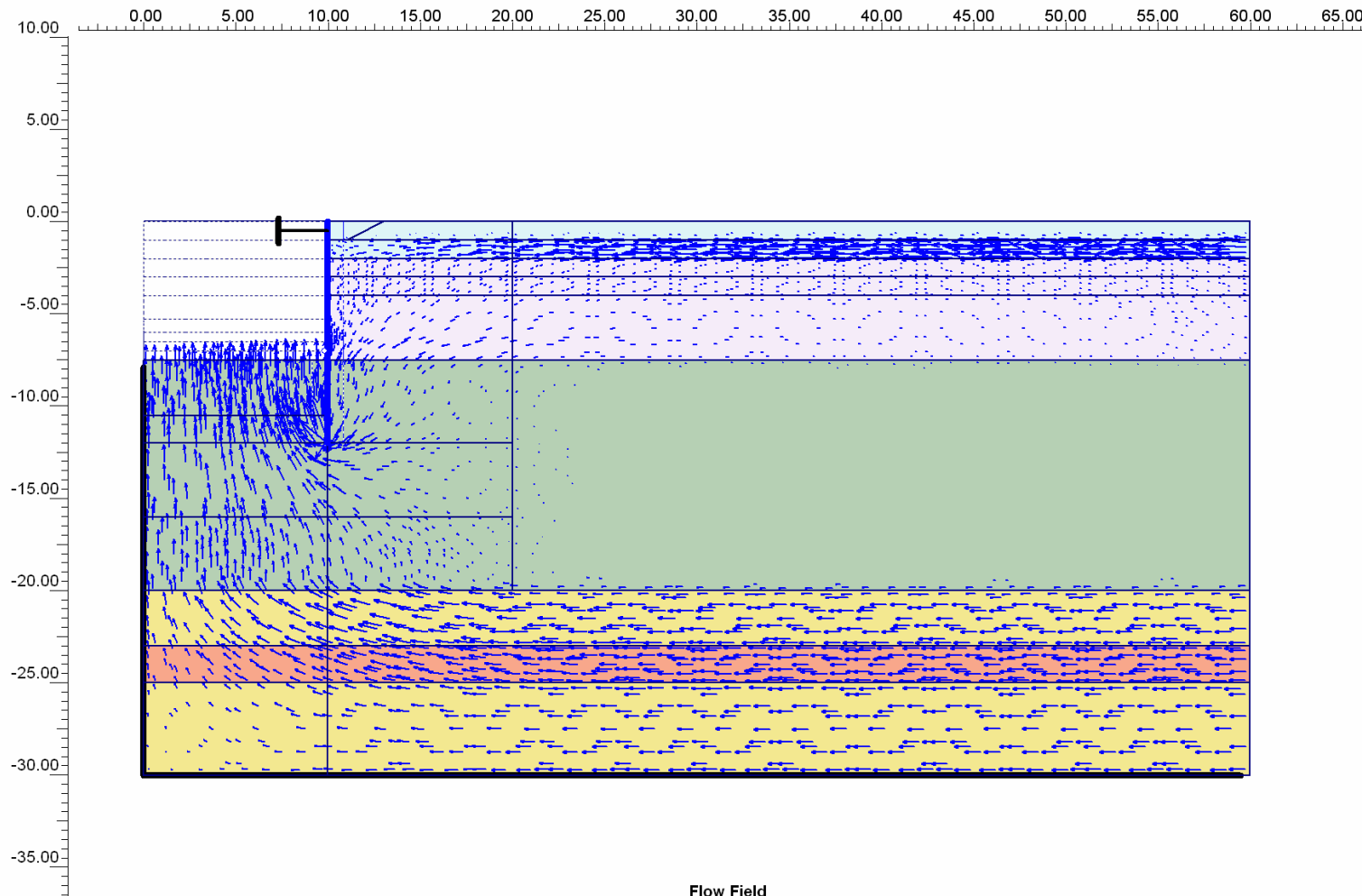
Scavo in presenza del solo puntone

Spostamenti paratia dopo 180 gg. di consolidazione



Scavo in presenza del solo puntone

Vettori velocità di filtrazione



Flow Field
Extreme velocity $76,62 \cdot 10^{-3}$ m/day





