

COMMITTENTE



COMUNE DI PALERMO
AREA INFRASTRUTTURE E TERRITORIO

PROGETTISTA

ATI:



(Capogruppo Mandataria)



DOMINIQUE PERRAULT
ARCHITECTE

METROPOLITANA AUTOMATICA LEGGERA DELLA CITTA' DI
PALERMO
PRIMA LINEA
TRATTA FUNZIONALE ORETO/NOTARBARTOLO

PROGETTO PRELIMINARE

CONSOLIDAMENTO
ANALISI FEM IN CORRISPONDENZA DELL'EDIFICIO B63

COMMESSA	FASE	COMPARTO	DOCUMENTO	REV	SCALA	NOME FILE
MPA1	PP	CSD	INRC01	2	-	CSD_INRC01_2.doc

							PROGETTISTA
2	SETT. 2006	REVISIONE GENERALE	Silvestri	Pedrazzi	Cecchi/Di Nicola	Piscitelli	
1	AGOSTO 2006	AGGIORNAMENTO DATA DI CONSEGNA E REVISIONE GENERALE	Silvestri	Pedrazzi	Cecchi/Di Nicola	Piscitelli	
0	MAGGIO 2006	EMISSIONE ELABORATI OPERE CIVILI	Silvestri	Pedrazzi	Cecchi/Di Nicola	Piscitelli	
REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	AUTORIZZATO	

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea - Tratta funzionale Oreto/Notarbartolo.
	Analisi FEM in corrispondenza dell'edificio B63

1 INTRODUZIONE

Nella seguente relazione si affrontano le tematiche relative all'attraversamento dei terreni alluvionali del fiume Oreto durante gli scavi per la realizzazione delle gallerie naturali della Metropolitana Leggera di Palermo.

L'attraversamento delle alluvioni del Fiume Oreto avviene mediante scavo meccanizzato con TBM scudata con sostegno in pressione del fronte di scavo. La profondità della calotta delle due gallerie affiancate è variabile da 18 e i 23 m, l'attraversamento dei terreni alluvionali interessa una tratta di lunghezza pari a ca. 200 m.

L'attraversamento di questa particolare tratta merita una serie di approfondimenti, necessari sia per le scadenti caratteristiche geotecniche dei terreni da attraversare che per le potenziali ripercussioni indotte in superficie. In superficie è presente l'edificio individuato dalla sigla B63 (Via Stazzone n. 4), si tratta di un edificio per civile abitazione in c.a. con 6 piani fuori terra e 1 piano interrato, fondato direttamente su terreni di riporto che sovrastano le alluvioni. Lo stato di consistenza delle strutture (v. "Schede sui fabbricati", gruppi A e B) è buono, sono state rilevate solo tracce di umidità in corrispondenza delle fondazioni.

Il problema geotecnico è stato affrontato per mezzo di una serie di indagini numeriche in condizioni tridimensionali e bidimensionali, nelle quali si è simulata la costruzione per fasi dei due tunnel, al fine di valutare i potenziali effetti indotti in superficie ed il conseguente rischio di danno per gli edifici soprastanti.

Le macrofasi di analisi sono:

Fase 1: analisi 3D che simula l'avanzamento step by step della TBM per un singolo tunnel, al fine di verificare le condizioni operative della macchina e di determinare i corrispondenti tassi di deconfinamento; l'analisi è stata sviluppata esaminando due casi estremi:

- **caso 1:** moduli del terreno relativamente elevati in concomitanza con pressioni al fronte e pressione del grouting relativamente basse;
- **caso 2:** moduli del terreno relativamente bassi in concomitanza con pressioni al fronte e pressione del grouting relativamente elevate.

Fase 2: analisi 2D tarata sui risultati dei modelli 3D, nella quale è stata considerata la presenza del doppio tunnel; questo modello è finalizzato principalmente alla valutazione degli effetti indotti in superficie.

I casi analizzati con la modellazione 3D hanno lo scopo di mettere in evidenza la variabilità delle subsidenze indotte, variando abbastanza drasticamente sia le condizioni operative della TBM che la deformabilità dei terreni, al fine di mettere in evidenza eventuali criticità non risolvibili dosando opportunamente i parametri operativi durante lo scavo.

Dopo un breve richiamo alle condizioni geotecniche del sito (cap. 2), si illustrano nel seguito i modelli di calcolo adottati, le fasi esecutive considerate ed i risultati ottenuti (cap. 3).

2 RICHIAMI ALLE CONDIZIONI GEOTECNICHE DEL SITO

Per una descrizione di dettaglio e ulteriori informazioni sulle caratteristiche dei terreni interessati dallo scavo si rimanda alla “Relazione geologica” e alla “Relazione geotecnica” allegate al progetto.

I terreni alluvionali del fiume Oreto, (indicati con le sigle Alf e ALg sui profili geologici e geotecnici), sono costituiti in prevalenza da sabbie a grana da fina a media, a tratti limosa e debolmente limosa (ALf). Sono presenti inoltre lenti di ghiaia poligenica a spigoli arrotondati (Alg), frammista ad una matrice sabbiosa più o meno grossolana. Le alluvioni sono generalmente di colore grigio o nerastro, e non è da escludere la presenza di lenti di materiale organico.

Al disopra dei terreni alluvionali sono presenti dei riporti di natura antropica costituiti prevalentemente da sabbie limose e limi sabbiosi, con inclusi elementi ghiaiosi a spigoli vivi di natura calcarea e calcarenitica frammisti a frammenti di laterizi.

La seguente figura riporta uno stralcio del profilo geologico nella zona in esame:

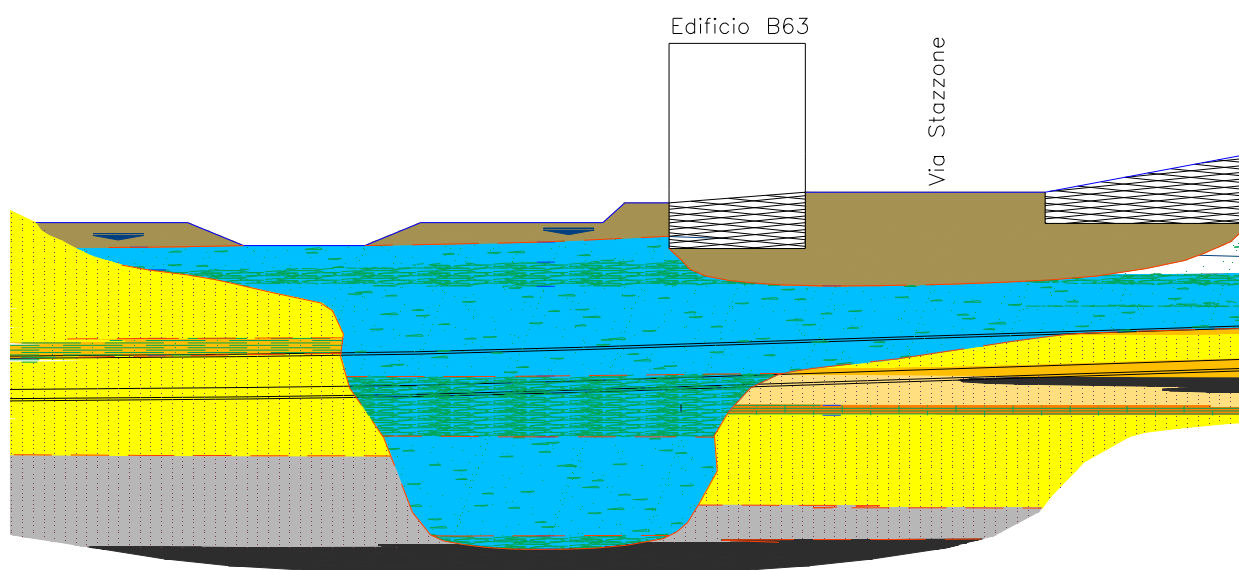


Figura 2.1 Stralcio del profilo geologico

Sulla base di informazioni disponibili in letteratura e secondo quanto riportato nella Relazione Geotecnica è ragionevole considerare i seguenti valori per i parametri geotecnici dei terreni in esame:

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Analisi FEM in corrispondenza dell'edificio B63

Terreni di riporto R:

- $\gamma = 18$ kN/m^3 peso naturale dell'unità di volume;
- $c' = 0 \div 2$ kPa coesione efficace;
- $\phi' = 25 \div 30$ $^\circ$ angolo di resistenza al taglio;
- $E'_{ur} = 20 \div 50$ MPa modulo elastico (in fase di carico);

Alluvioni del fiume Oreto ALf-ALg:

- $\gamma = 18$ kN/m^3 peso naturale dell'unità di volume;
- $c' = 0 \div 20$ kPa coesione efficace;
- $\phi' = 23 \div 28$ $^\circ$ angolo di resistenza al taglio;
- $E'_{ur} = 5 \div 15$ MPa modulo elastico (in fase di carico).

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.
	Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Analisi FEM in corrispondenza dell'edificio B63

3 ANALISI FEM

3.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO

Lo studio dell'interazione struttura-terreno, delle fasi di scavo e dei conseguenti cedimenti indotti, è stato condotto mediante una analisi FEM (Finite Element Method) con il codice di calcolo Plaxis. L'analisi è stata condotta sia in condizioni 3D che in condizioni 2D.

Per i modelli 3D, il volume di terreno significativo interessato dalla variazione tensionale causata dalla realizzazione della galleria naturale è stato reso discreto con una mesh larga 30 m, lunga 80 m e profonda 40 m dal p.c., costituita da circa n. 18000 elementi triangolari tridimensionali a 15 nodi.

Per i modelli 2D è stato considerato un volume di terreno avente larghezza di 90 m, profondità dal p.c. 40 m discretizzato con una mesh di circa 1200 elementi triangolari a 15 nodi.

Le dimensioni della mesh, in relazione alla geometria della galleria sono sufficienti a garantire che i risultati delle analisi siano indipendenti dalla particolare mesh adottata, e sono tali da permettere di vincolare il lato inferiore della mesh bloccando gli spostamenti orizzontali e verticali ed i lati sinistro e destro del modello bloccandone gli spostamenti orizzontali.

L'analisi FEM è stata condotta nell'ipotesi di condizioni drenate perché tale ipotesi sul regime idraulico è la più cautelativa sia per la valutazioni delle deformazioni che per le sollecitazioni sui rivestimenti.

Le unità di terreno R ed ALf sono state modellate come mezzi porosi continui, caratterizzati da un legame costitutivo elastico isotropo, plastico incrudente con flusso non associato e superficie di snervamento chiusa (v. Figura 3.1).

Le caratteristiche principali del modello adottato (Hardening Soil Model) sono:

- una differente rigidità per percorsi tensionali di primo carico e di scarico-ricarico;
- la rigidità secante E_{50} per percorsi tensionali di primo carico è funzione della tensione di confinamento applicata:

$$E_{50} = E_{50,ref} \cdot [(c' \cdot \cos\varphi - \sigma'_{min} \cdot \sin\varphi) / (c' \cdot \cos\varphi + p_{ref} \cdot \sin\varphi)]^m$$

dove p_{ref} è la pressione di riferimento, σ'_{min} è la tensione principale minore, $E_{50,ref}$ è il modulo di rigidità secante alla pressione di riferimento, E_{50} è il modulo di rigidità secante alla tensione σ'_{min} ed m è un parametro dipendente dal litotipo considerato;

- la rigidità secante E_{ur} per percorsi tensionali di scarico-ricarico è funzione della tensione di confinamento applicata:

$$E_{ur} = E_{ur,ref} [(c' \cdot \cos\varphi - \sigma'_{min} \cdot \sin\varphi) / (c' \cdot \cos\varphi + p_{ref} \cdot \sin\varphi)]^m$$

dove p_{ref} è la pressione di riferimento, σ'_{min} è la tensione principale minore, $E_{ur,ref}$ è il modulo di rigidità secante alla pressione di riferimento, E_{ur} è il modulo di rigidità secante alla tensione σ'_{min} ed m è un parametro dipendente dal litotipo considerato;

- sviluppo di deformazioni plastiche per stati tensionali deviatorici e sferici;
- criterio di rottura di tipo Mohr-Coulomb.

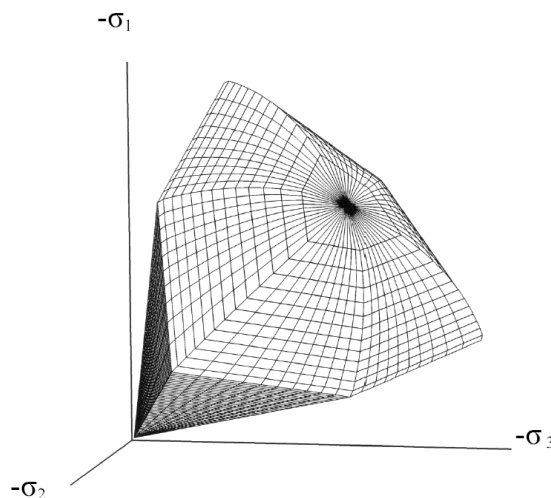


Figura 3.1: Superficie di snervamento dell'Hardening Soil Model

Tenendo conto della natura dell'opera e delle caratteristiche dei terreni in esame, ai fini della definizione del comportamento meccanico dei suoli modellati si sono adottati, per i due casi di analisi presi in esame i parametri di calcolo riportati nelle seguenti tabelle 3.1. e 3.2:

Tabella 3.1: Parametri di calcolo dei "terreni HM" utilizzati nelle analisi: Caso 1

Unità [-]	γ [kN/m ³]	$E_{50,ref}$ [kN/m ²]	$E_{ur,ref}$ [kN/m ²]	c' [kN/m ²]	ϕ [-]	ψ [-]	ν [-]	p_{ref} [kN/m ²]	m [-]	K_{0nc} [-]
R	18	5000	25000	1	29°	1°	0.2	100	0.7	0.515
ALf	18	25000	75000	5	26°	1°	0.2	100	0.6	0.562

Tabella 3.2: Parametri di calcolo dei "terreni HM" utilizzati nelle analisi: Caso 2

Unità [-]	γ [kN/m ³]	$E_{50,ref}$ [kN/m ²]	$E_{ur,ref}$ [kN/m ²]	c' [kN/m ²]	ϕ [-]	ψ [-]	ν [-]	p_{ref} [kN/m ²]	m [-]	K_{0nc} [-]
R	18	5000	25000	1	29°	1°	0.2	100	0.7	0.515
ALf	18	5000	25000	5	26°	1°	0.2	100	0.6	0.562

γ = peso di volume;

c' = coesione drenata;

ϕ' = angolo di attrito;

ψ = angolo di dilatanza;

E_{50ref} = modulo di rigidità per percorsi tensionali di primo carico;

$E_{ur,ref}$ = modulo di rigidità per percorsi tensionali di scarico-ricarico;

ν_{ur} = coefficiente di Poisson.

Le intercalazioni di terreni alluvionali a grana grossa (ALg) sono state trascurate a vantaggio di sicurezza, anche per la loro incerta continuità spaziale. Pertanto il modello di calcolo è costituito solo dalle unità di terreno R e ALf.

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Analisi FEM in corrispondenza dell'edificio B63

Come si evince dalle soprastanti tabelle, i parametri geotecnici dei terreni in termini di caratteristiche di resistenza (c e ϕ) sono stati opportunamente scelti all'interno degli intervalli di confidenza riportati nella relazione geotecnica.

Per quanto concerne le caratteristiche di deformabilità dei terreni, parametri che come è ben noto è molto difficile determinare soprattutto per i problemi di scavo, si osserva quanto segue:

- il modello costitutivo implementato nei calcoli FEM (Hardening Soil Model) prevede un comportamento incrudente per i terreni, per cui i parametri di deformabilità dipendono dallo stato tensionale presente (e quindi nelle condizioni iniziali generalmente i moduli crescono con la profondità),
- la rigidezza dei terreni di riporto R è stata considerata cautelativamente inferiore ai valori riportati nella relazione geotecnica: in questo modo il terreno in sito è stato modellato con una rigidezza progressivamente in aumento con la profondità,
- per i parametri di rigidezza dei terreni alluvionali AL_f si sono considerati due casi estremi; il caso 1 in cui i parametri di rigidezza del terreno sono relativamente elevati, il caso 2 in cui i moduli sono molto più bassi.

La seguente figura 3.2 rappresenta l'andamento dei moduli di rigidezza in fase di scarico E_{ur} con la profondità del modello, nelle condizioni geostatiche.

Andamenti dei moduli unloading considerati nelle analisi

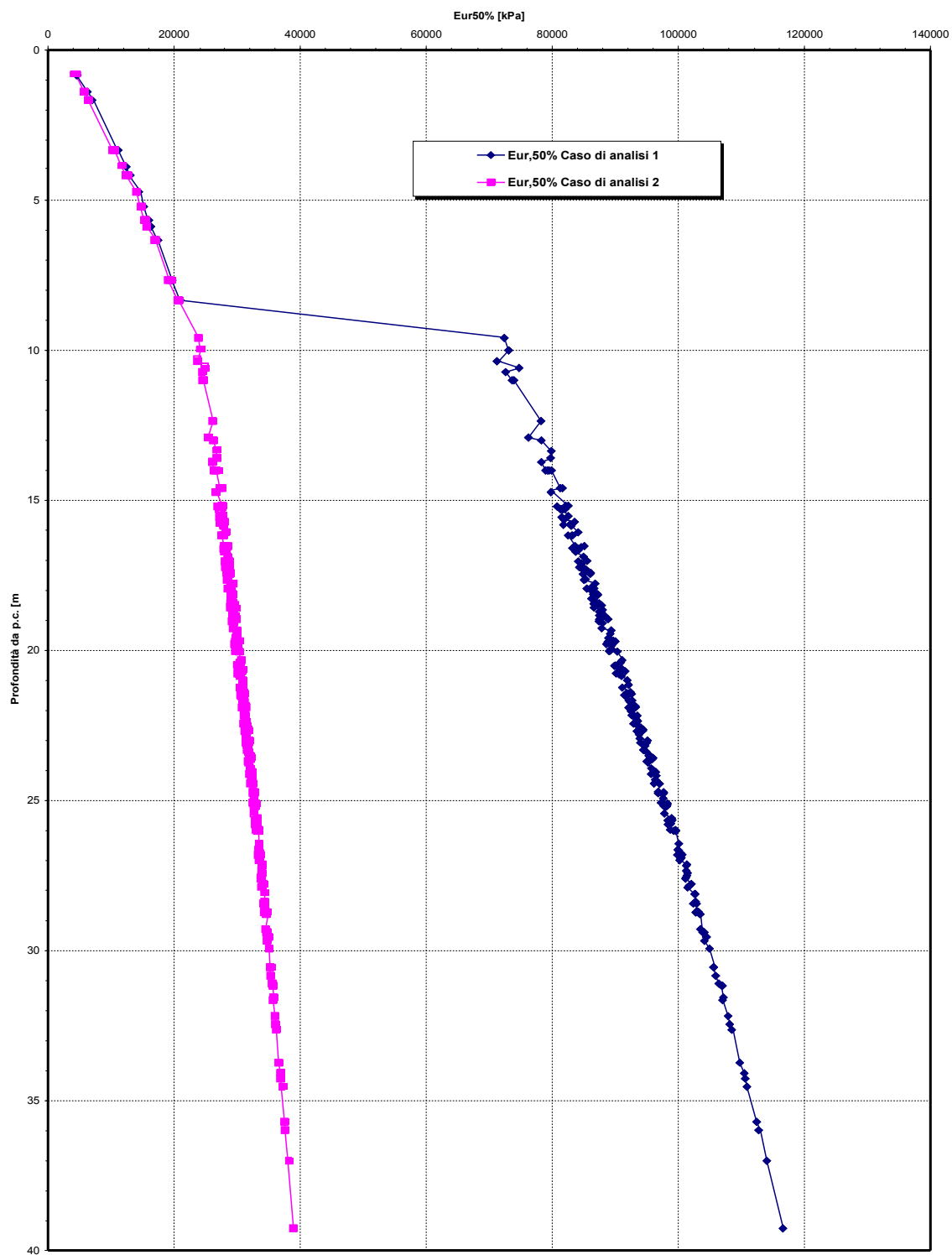


Figura 3.2: Modulo di rigidezza in fase di scarico-ricarico in funzione della profondità

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.
	Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Analisi FEM in corrispondenza dell'edificio B63

Le seguenti figure 3.3 e 3.4 riportano invece la stratigrafia considerata e la geometria della sezione trasversale e longitudinale:

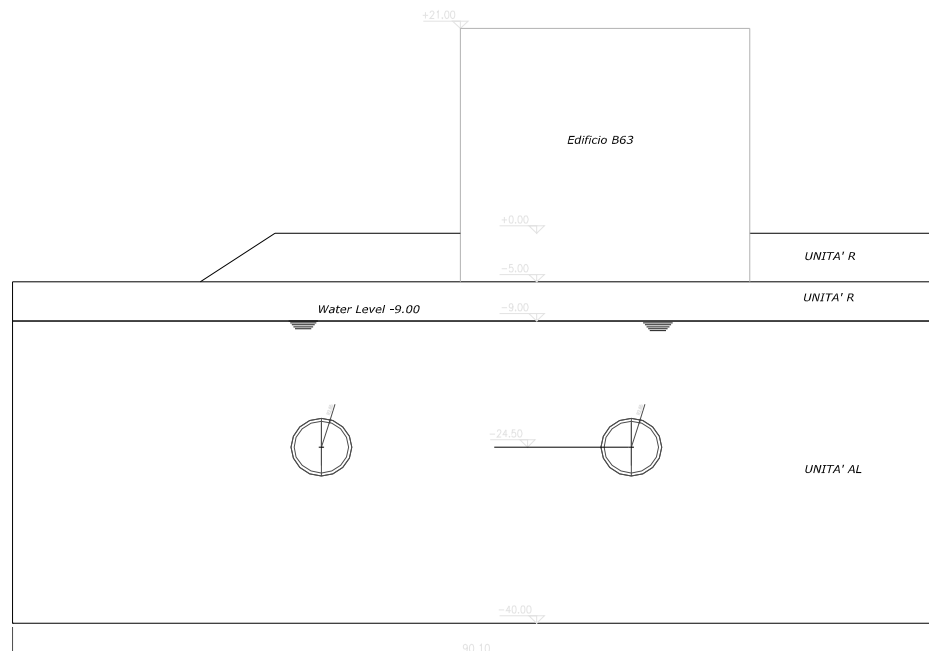


Figura 3.3: Sezione trasversale del modello

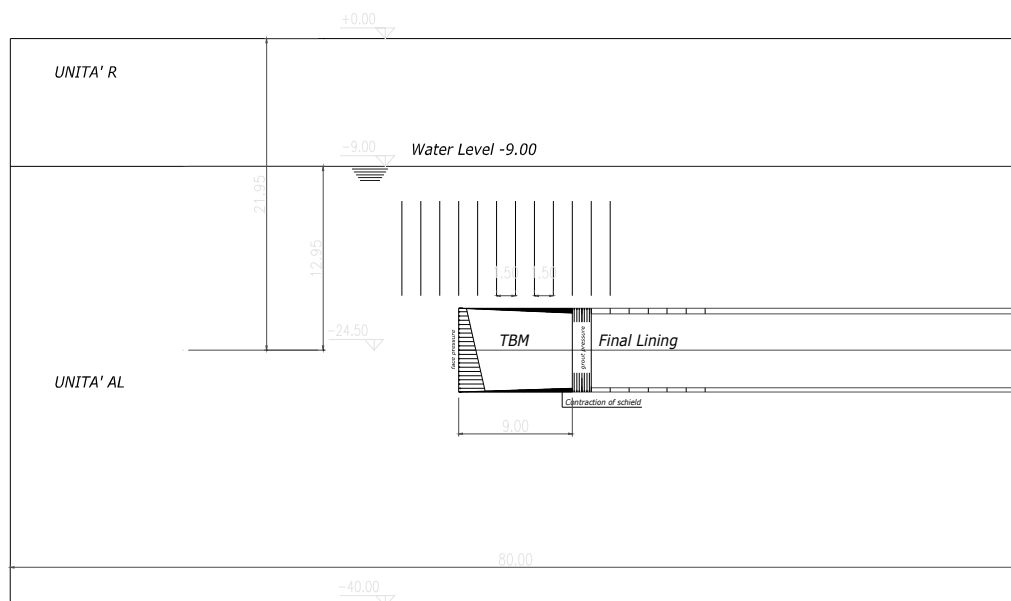


Figura 3.4: Sezione longitudinale del modello

Le condizioni operative della TBM analizzate sono le seguenti:

Caso 1: (pressioni basse)

- pressione al fronte: calotta 120 kPa; gradiente 14 kN/m³;
- perdita di volume per conicità: 0.5%
- grout pressure di intasamento: calotta 150 kPa; gradiente 20 kN/m³;

Caso 2: (pressioni alte)

- pressione al fronte: calotta 250 kPa; gradiente 14 kN/m³;
- perdita di volume per conicità: 0.5%
- grout pressure di intasamento: calotta 250 kPa; gradiente 20 kN/m³;

La TBM è stata modellata su una lunghezza di 9.0 m, con elementi shell aventi le seguenti caratteristiche:

$EA = 1 \cdot 10^7$	kN/m	rigidezza assiale;
$EJ = 1 \cdot 10^4$	kN m ² /m	rigidezza flessionale;
$w = 38$	kN/m/m	peso per unità di superficie (peso complessivo ≈ 6500 kN)

La seguente figura 3.5 riporta la geometria del modello 3D:

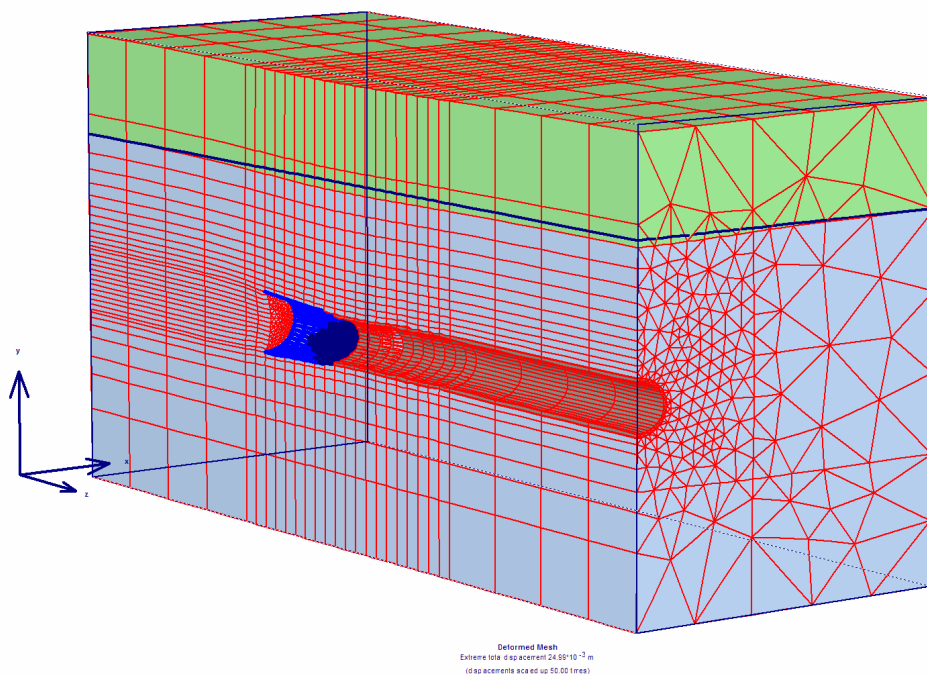
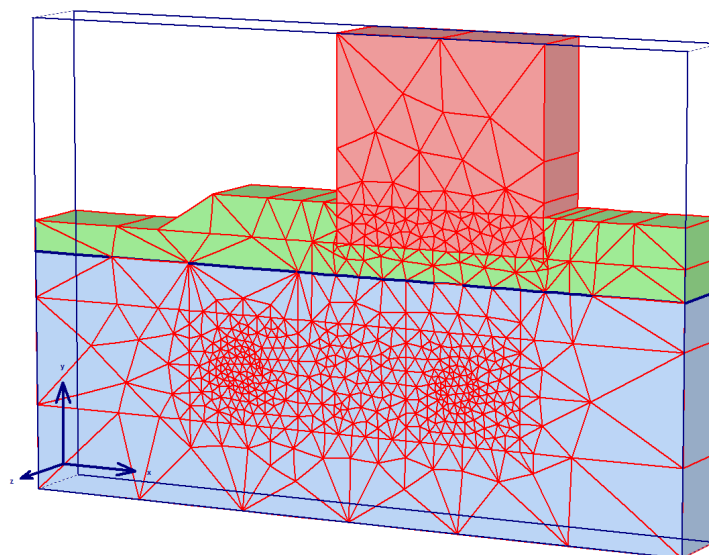


Figura 3.5: Modello 3D

La seguente figura 3.6. riporta la geometria del modello 2D:



Deformed Mesh
Extreme total displacement 0.00 m
(displacements scaled up 0.00 times)

Figura 3.6: Modello 2D

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Analisi FEM in corrispondenza dell'edificio B63

3.2 DESCRIZIONE DELLE FASI ESECUTIVE CONSIDERATE

Con riferimento al modello 3D, si sono considerate le fasi operative riassunte per lo step di calcolo i-esimo nella seguente figura:

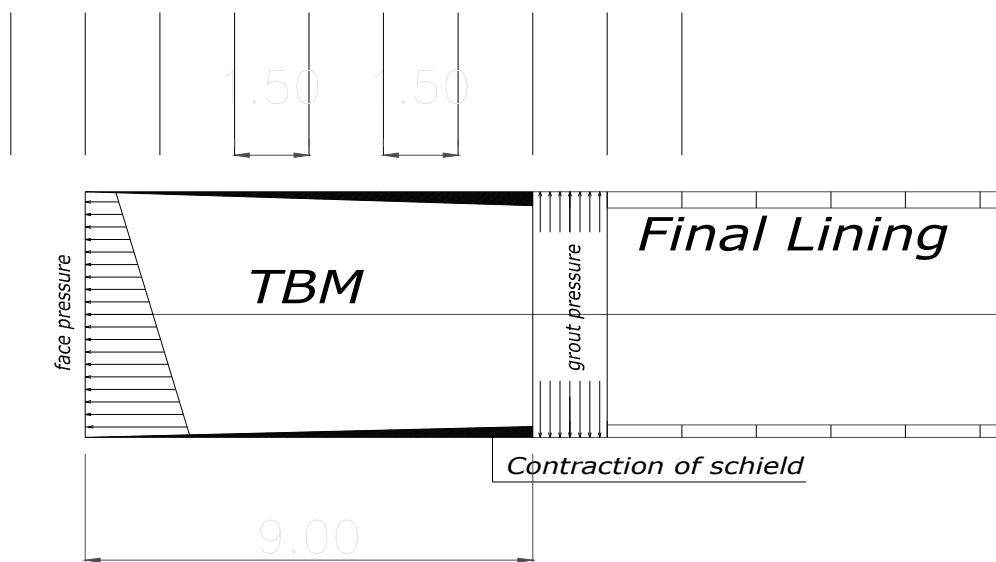


Figura 3.7: Fasi esecutive e modellazione della TBM

- step di scavo di 1.50 m;
- applicazione della pressione sul fronte;
- applicazione della grout pressure;
- applicazione della contrazione di volume;
- avanzamento del rivestimento definitivo.

3.3 RISULTATI DELLE ANALISI 3D

Nel presente paragrafo si riassumono, facendo ampio ricorso a grafici esplicativi, i principali risultati delle analisi.

Le seguenti figure 3.8 e 3.9 riportano la mappatura di colori che rappresenta gli spostamenti verticali, rispettivamente per il caso di analisi 1 e per il caso 2:

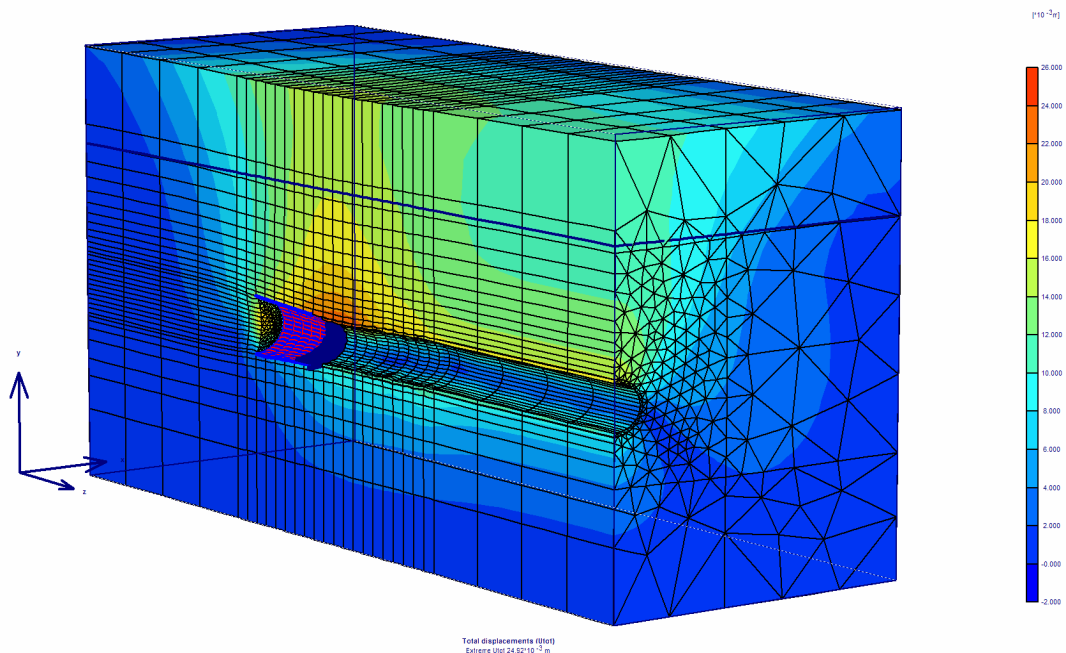


Figura 3.8: Caso 1: spostamenti massimi dell'ordine di 25 mm in calotta

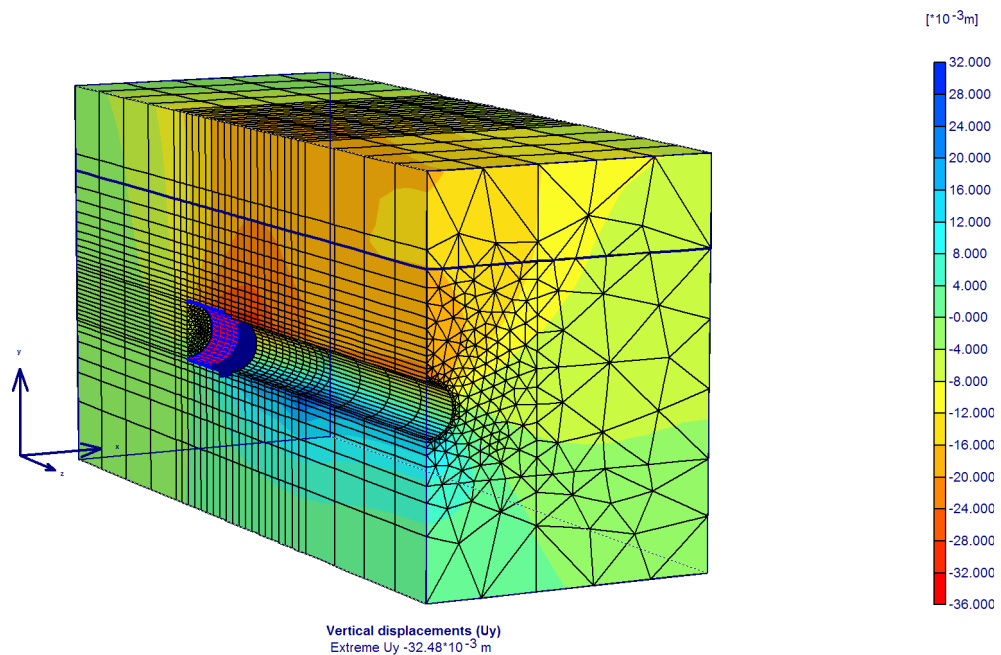


Figura 3.9: Caso 2: spostamenti massimi dell'ordine di 32 mm in calotta

La seguente figura, 3.10 riporta invece i diagrammi dell'andamento degli spostamenti verticali alla quota della calotta e alla quota fondazioni dell'edificio in funzione della distanza dal fronte di scavo:

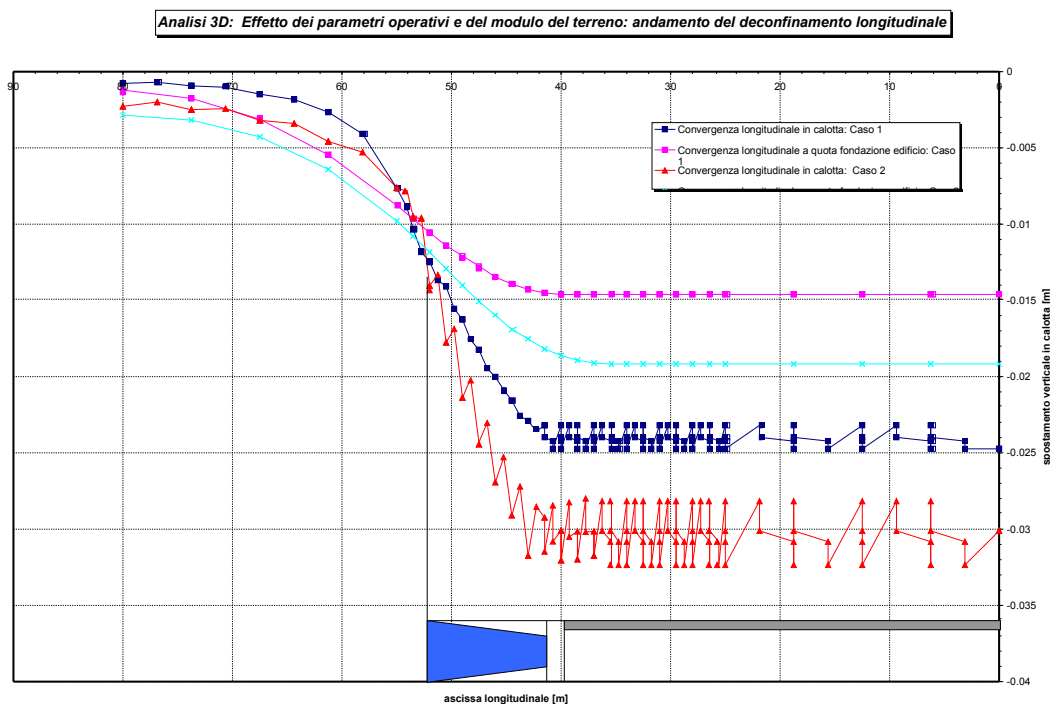


Figura 3.10: Casi 1 e 2: spostamenti verticali in calotta e a quota fondazione edificio

Come si può osservare, facendo variare la deformabilità del terreno ed i parametri operativi della TBM in un range da ritenersi comunque ancora cautelativo secondo le usuali esperienze, si ottengono risultati piuttosto simili in termini di spostamento: la convergenza al fronte risulta pari a ca. 12 mm per entrambi i casi analizzati, con convergenze finali dell'ordine di 25 mm per il caso di analisi 1 e di 30 mm per il caso di analisi 2.

Con riferimento alle problematiche di stabilità del fronte, le seguenti figure 3.11 e 3.12 riportano i rapporti di mobilitazione nell'intorno del fronte:

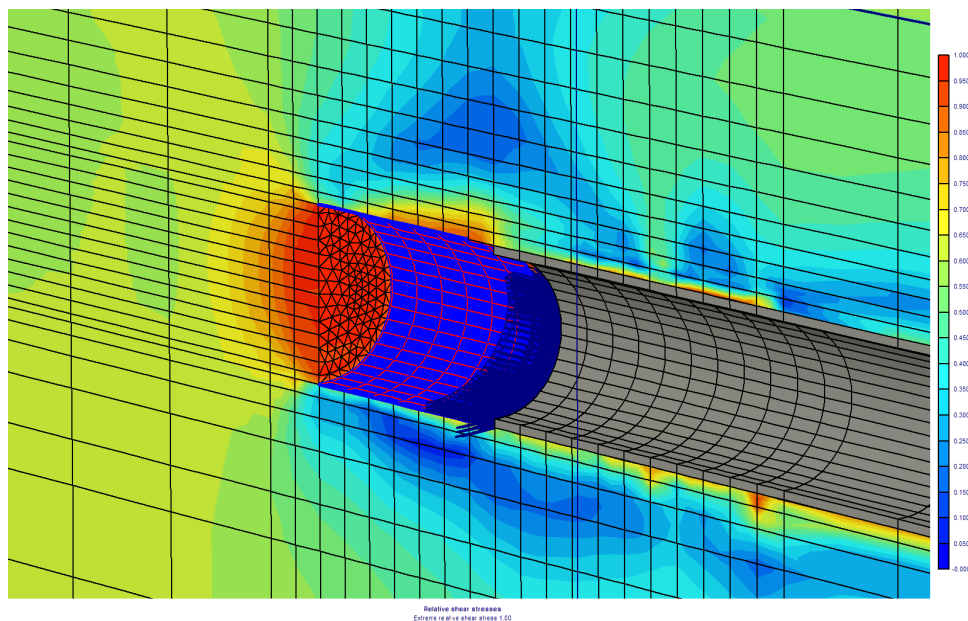


Figura 3.11: Caso 1: rapporto di mobilitazione max = 0.95

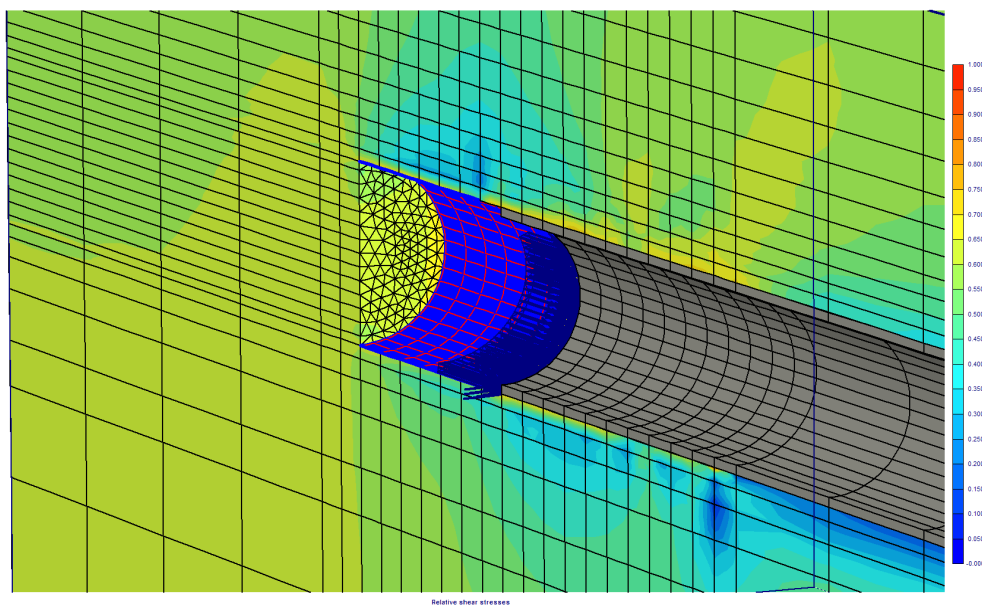
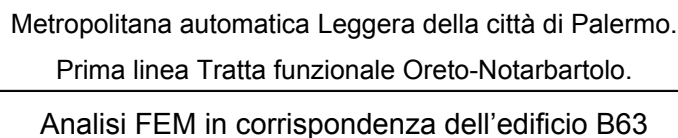


Figura 3.12: Caso 2: rapporto di mobilitazione max = 0.65

In ogni caso il fattore di sicurezza, tenendo conto anche delle cautele già adottate nella scelta dei parametri di resistenza al taglio del terreno, è superiore a 1.4.



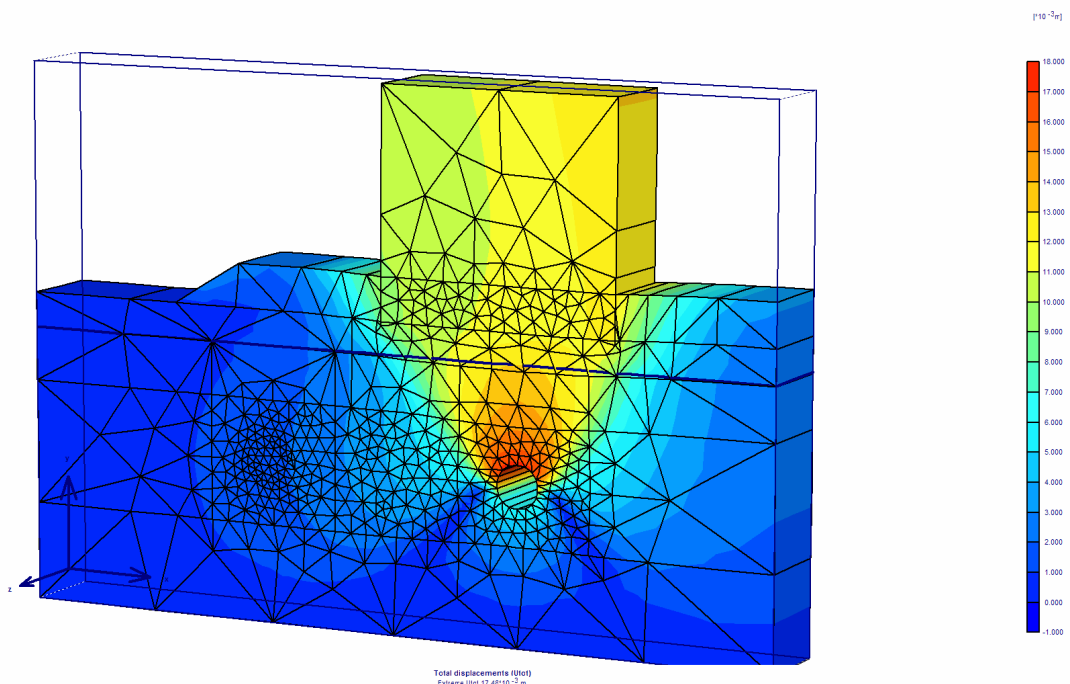


Figura 3.13: Caso 1: scavo primo tunnel, fase 1 ($1-\lambda = 0.27$)

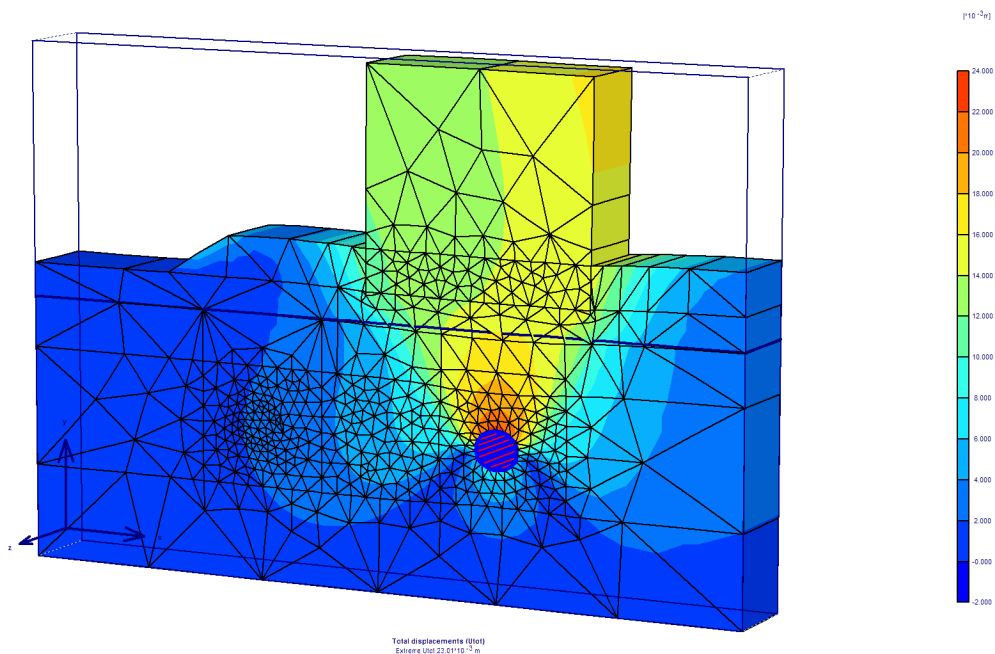


Figura 3.14: Caso 1: scavo primo tunnel, fase 2 (rilascio completo)

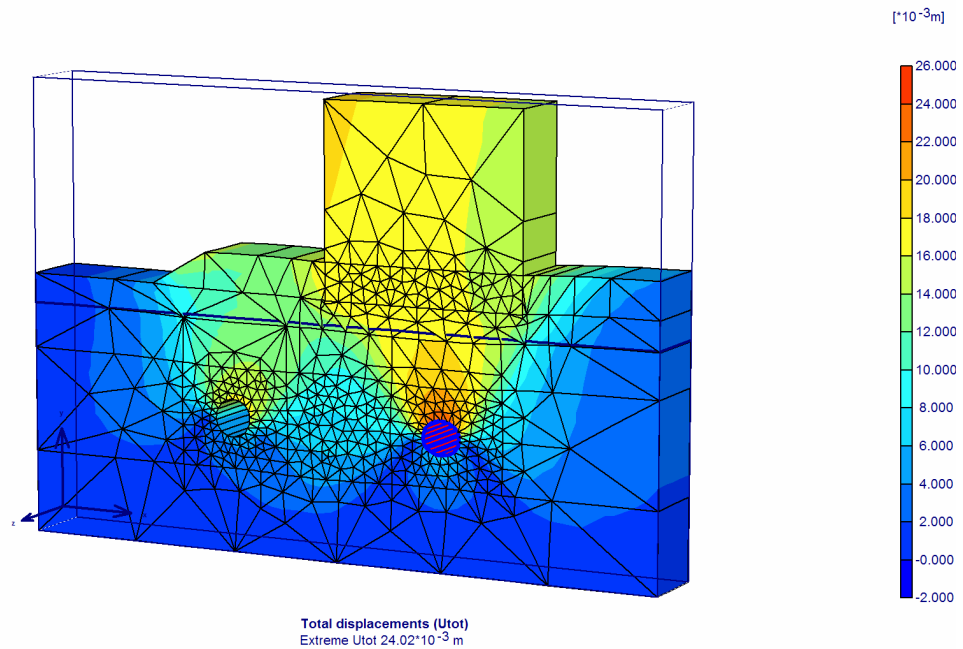


Figura 3.15: Caso 1: scavo secondo tunnel, fase 1 ($1-\lambda = 0.27$)

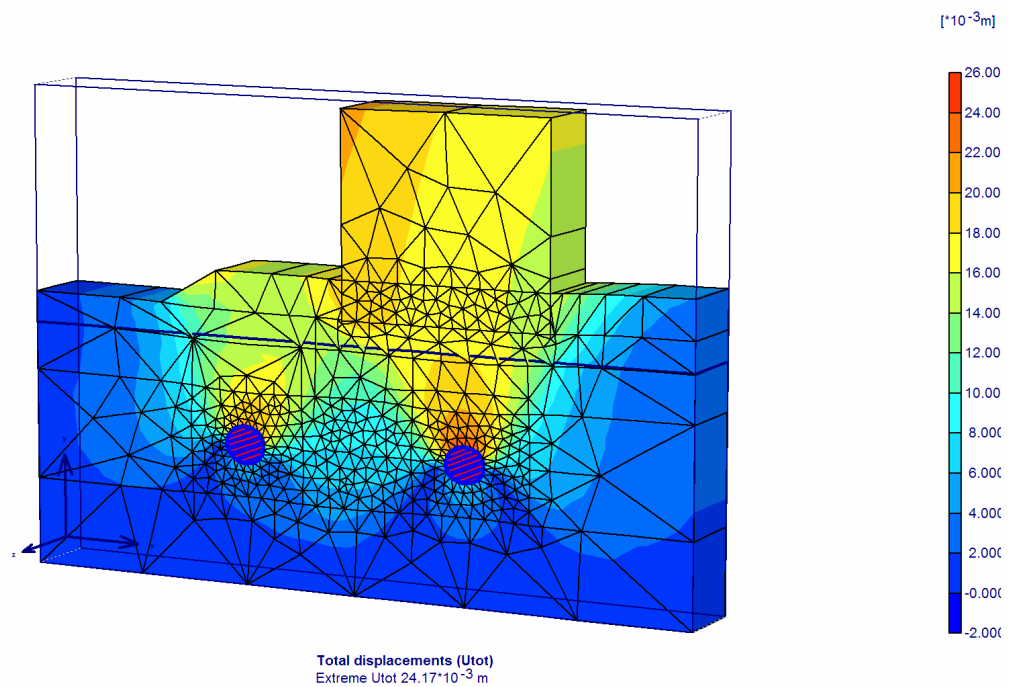


Figura 3.16: Caso 1: scavo secondo tunnel, fase 2 (rilascio completo)

Le seguenti figure 3.17, 3.18, 3.19 e 3.20 riportano invece gli spostamenti per le varie fasi relativi al caso di analisi 2:

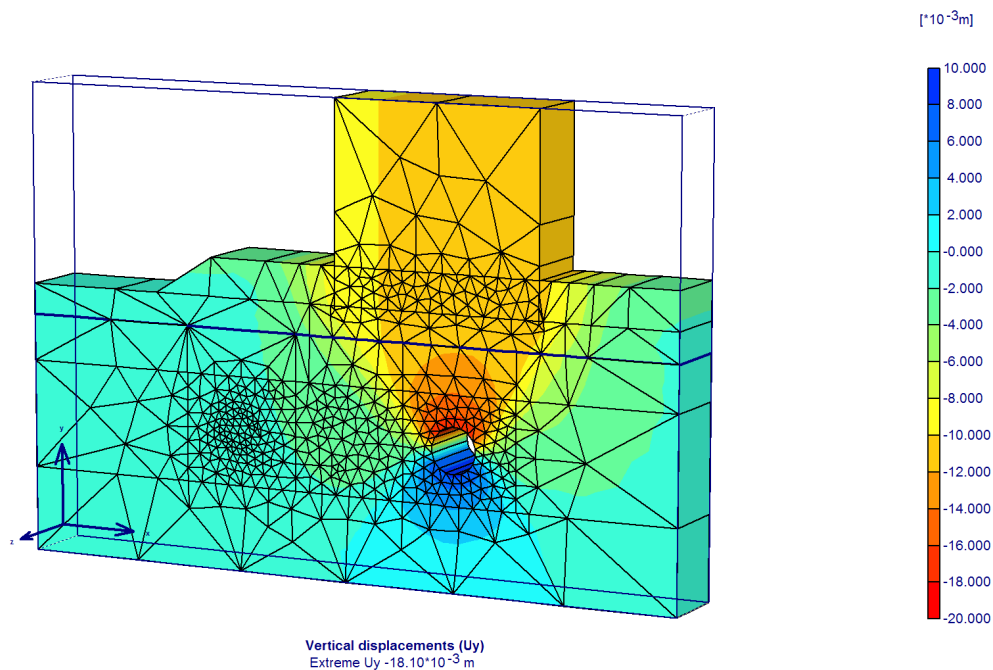


Figura 3.17: Caso 2: scavo primo tunnel, fase 1 ($1-\lambda = 0.14$)

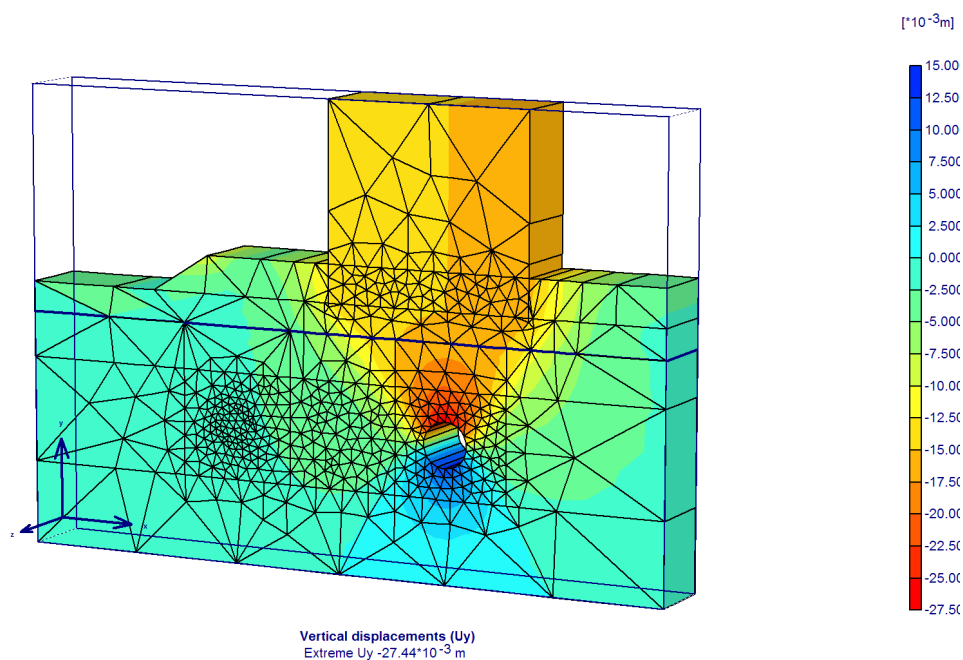


Figura 3.18: Caso 2: scavo primo tunnel, fase 2 (rilascio completo)

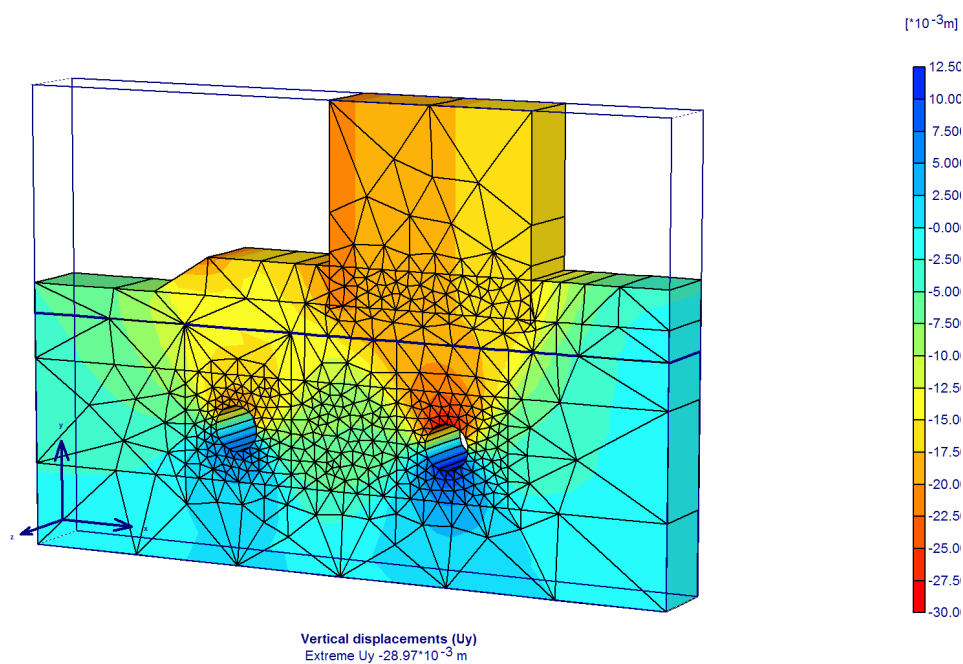


Figura 3.19: Caso 2: scavo secondo tunnel, fase 1 ($1-\lambda = 0.14$)

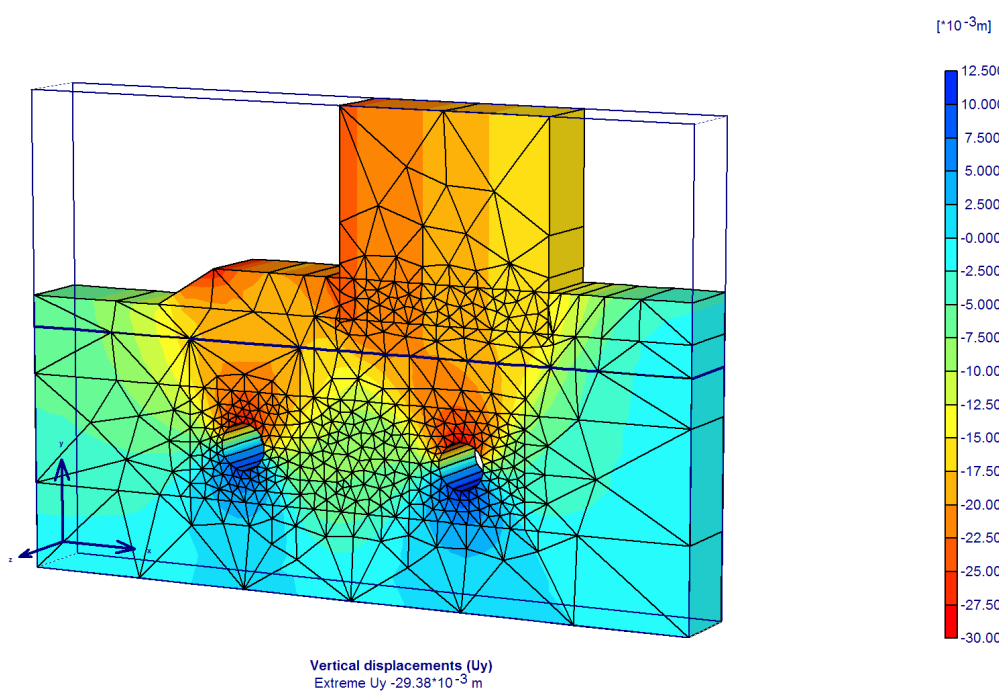


Figura 3.20: Caso 2: scavo secondo tunnel, fase 2 (rilascio completo)

La seguente figura riporta la posizione dei punti di monitoraggio degli spostamenti inseriti in corrispondenza dell'edificio:

- punto A: vertice in alto a sinistra;
- punto B: vertice in alto a destra;
- punto C: fondazione a sinistra;
- punto D: fondazione al cento;
- punto E: fondazione a destra;

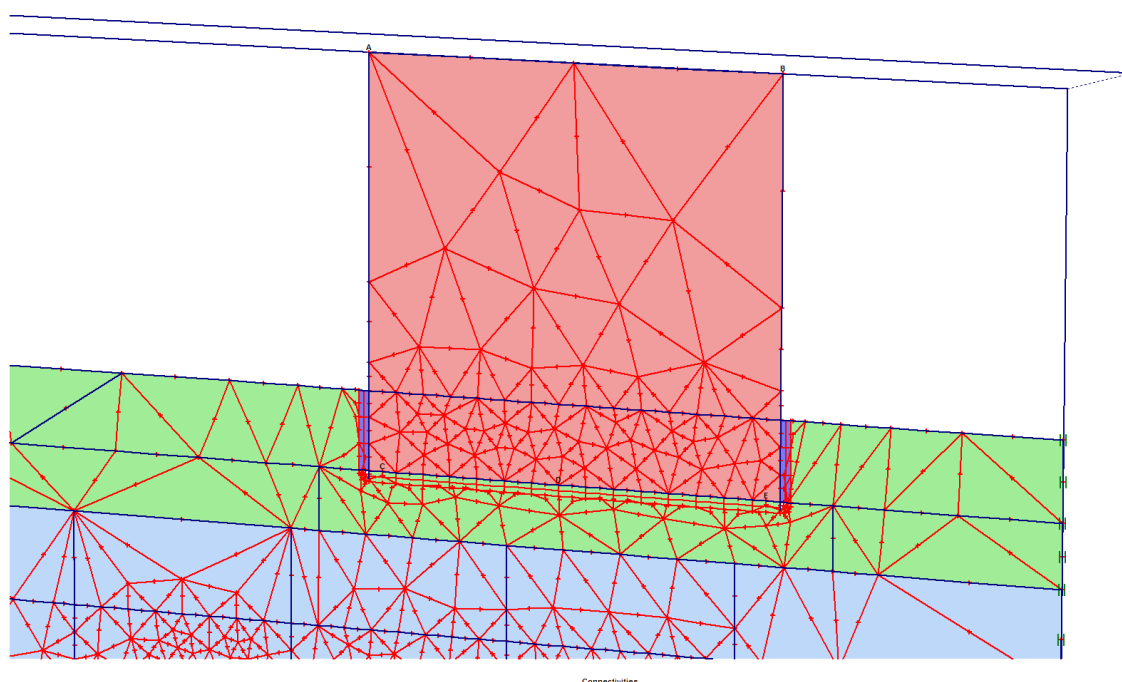


Figura 3.21: Punti di monitoraggio sull'edificio

I seguenti grafici riportano, per ciascuno dei suddetti punti, le time history degli spostamenti durante le varie fasi esecutive. I grafici si riferiscono al caso di analisi 1, ma i valori del caso di analisi 2 sono molto simili.

Per ogni grafico è riportato:

- curva blu: modulo del vettore spostamento;
- curva rossa: componente verticale;
- curva verde: componente orizzontale.

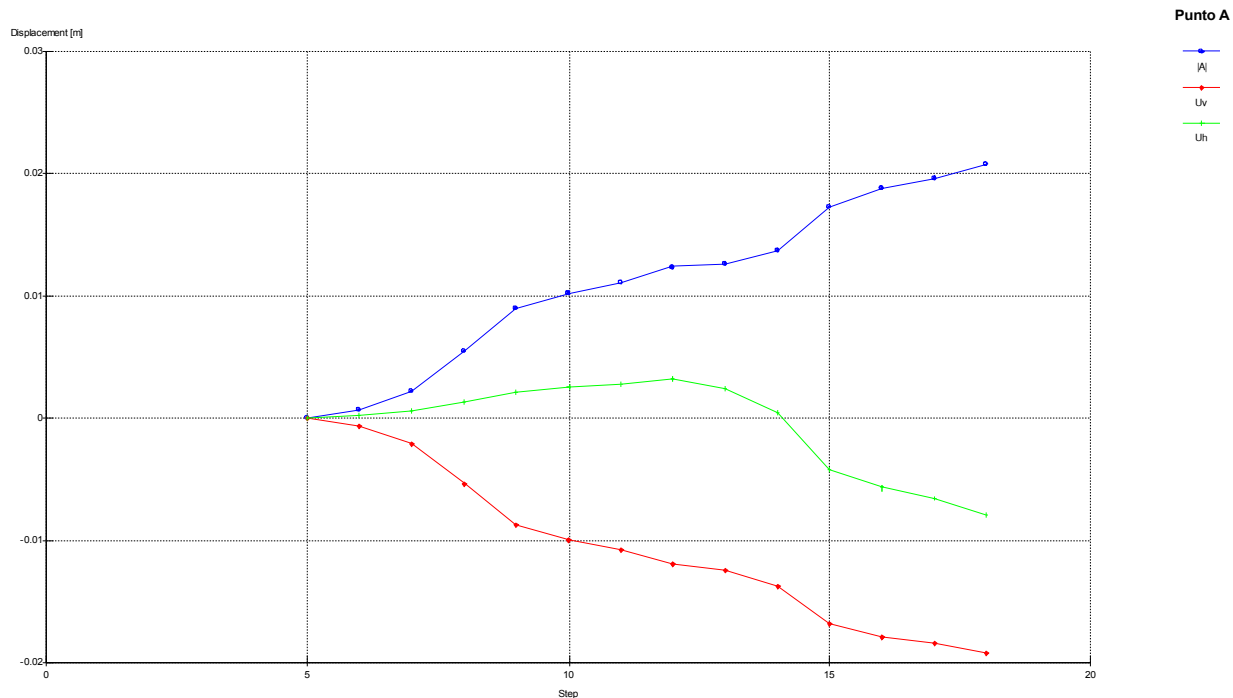


Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

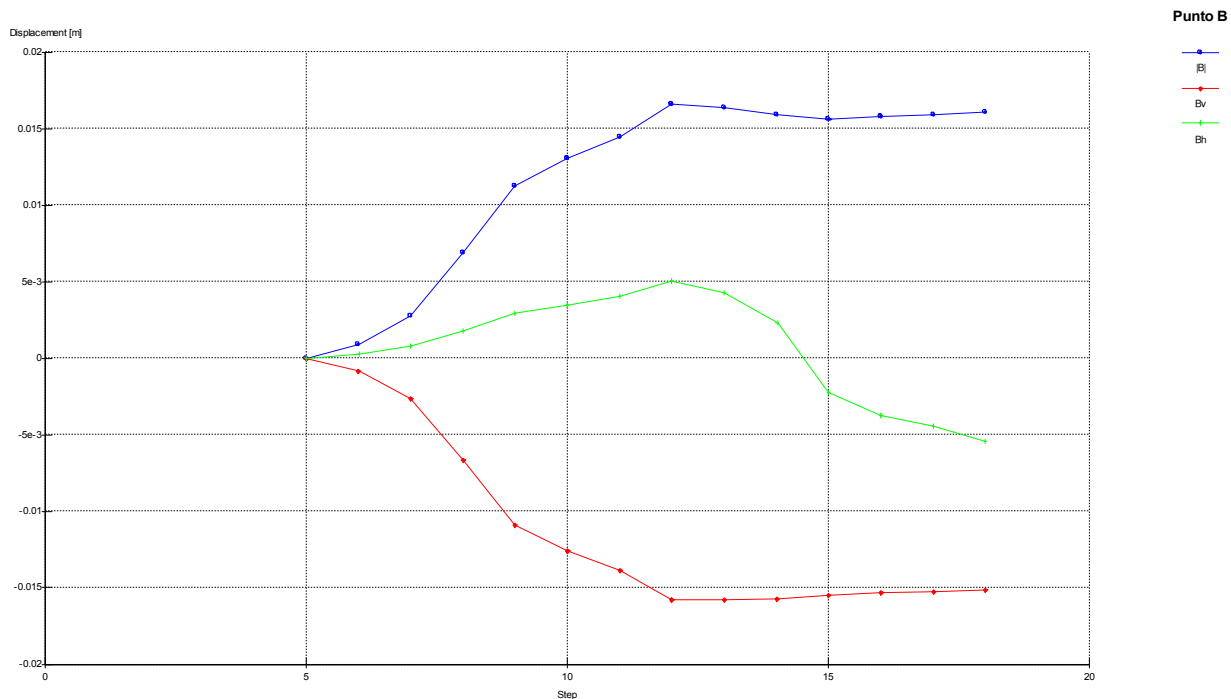
Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Analisi FEM in corrispondenza dell'edificio B63

Punto A



Punto B



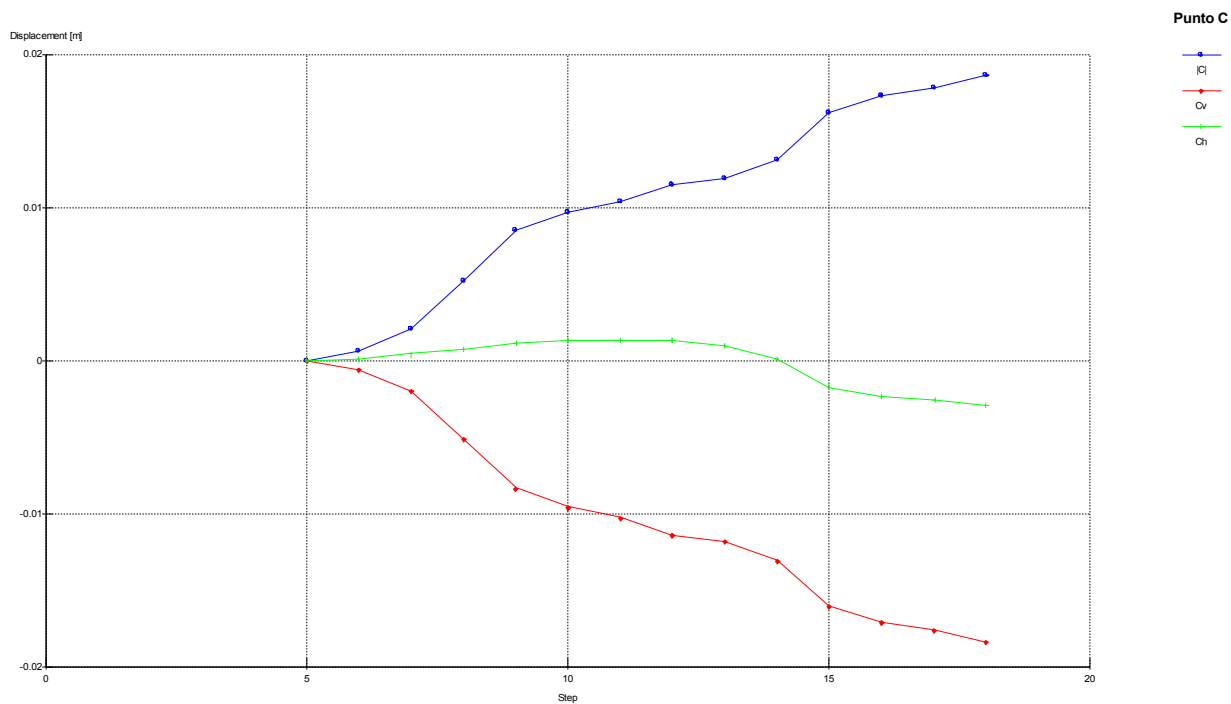


Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

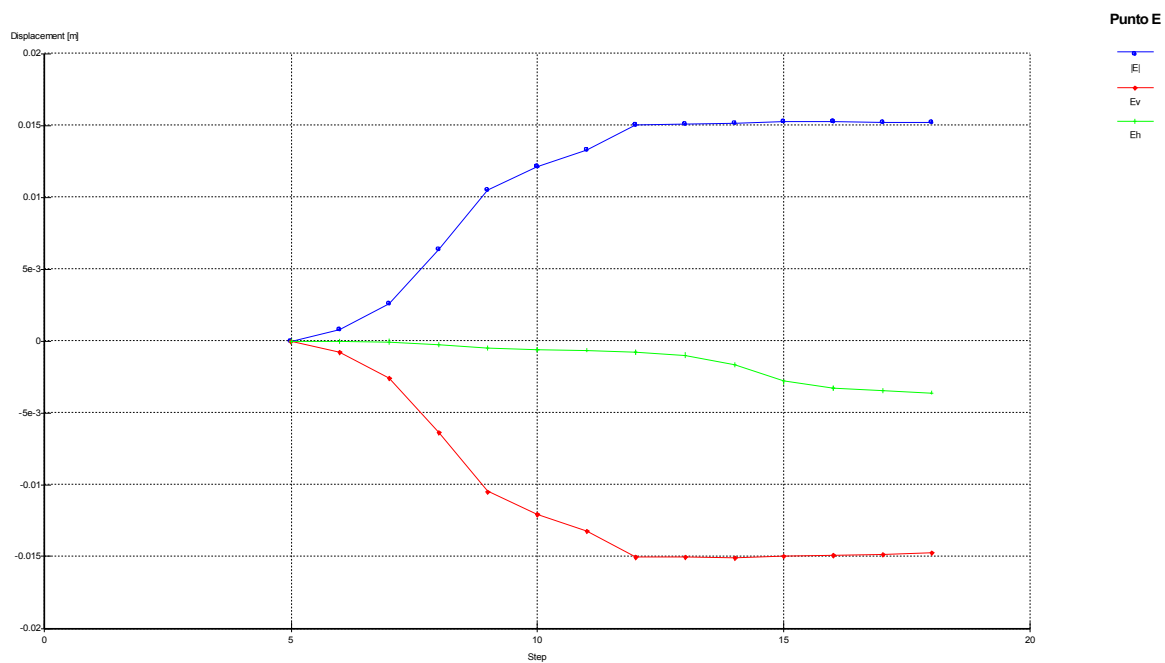
Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Analisi FEM in corrispondenza dell'edificio B63

Punto C



Punto E

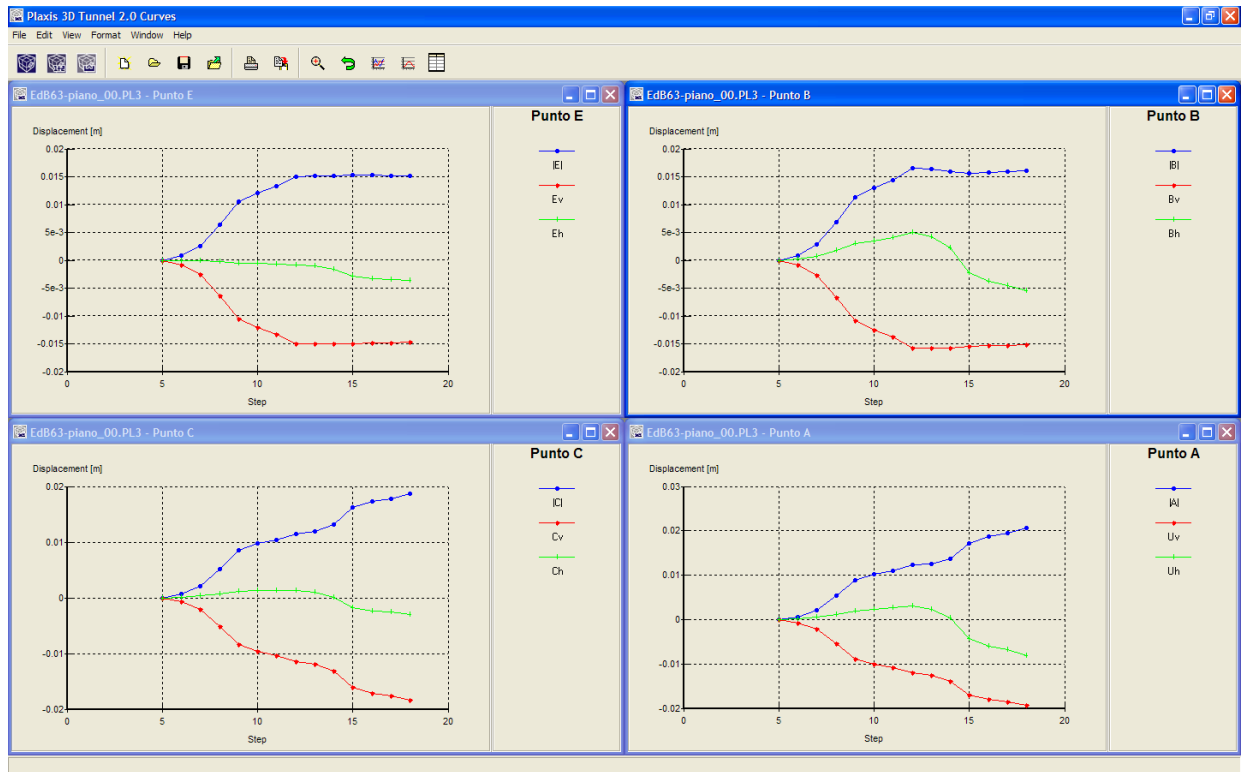




Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Analisi FEM in corrispondenza dell'edificio B63



Lo spostamento verticale massimo in fondazione è di circa 19 mm, con un differenziale dell'ordine di 5 mm, a cui corrisponde una rotazione di circa 0.018%; lo spostamento orizzontale massimo è dell'ordine di 5 mm, con un differenziale dell'ordine di 4 mm, cui corrisponde una ϵ dell'ordine di 0.014%.

Tali valori rientrano ampiamente entro i limiti di rischio di danno trascurabile (categoria di danno 0, deformazione limite di trazione 0.05%) secondo le tabelle di Burland e Boscarding & Cording (cfr. "Relazione tecnica dei cedimenti lungo la linea").

	Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo. Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.
	Analisi FEM in corrispondenza dell'edificio B63

4 CONCLUSIONI

Alla luce dei risultati illustrati in questa relazione, si può concludere che non è necessario prevedere particolari interventi di presidio per il fabbricato di Via Stazzone (sigla B63).

Inoltre le analisi mostrano come le condizioni operative della TBM, associate con il sistema di monitoraggio che deve consentire un'ottimale e immediata taratura della pressione sul fronte di scavo della galleria, consentano di fronteggiare l'attraversamento dei terreni alluvionali del fiume Oreto senza particolari rischi in termini di cedimenti indotti in superficie. Le pressioni operative ipotizzate sono congruenti con quelle usuali adoperate in contesti analoghi, in tali ipotesi il fronte dello scavo è stabile.