

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

RELAZIONE STATICA PRELIMINARE
GALLERIE DI STAZIONE NATURALI IN TRADIZIONALE

COMMESSA	FASE	COMPARTO	DOCUMENTO	REV	SCALA	NOME FILE
MPA1	PP	GPR	INRS05	0	-	MPA1PPGPRINRS05.doc

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	AUTORIZZATO	PROGETTISTA
0	MAGGIO 2006	EMISSIONE ELABORATI OPERE CIVILI	Cedrone	Pesce	Cecchi/Di Nicola	Piscitelli	



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea - Tratta funzionale Oreto/Notarbartolo.

Relazione Statica preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

1 PREMESSA

2 DESCRIZIONE DELLE OPERE IN SOTTERRANEO

STAZIONE BORSA

STAZIONE MASSIMO

3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOTECNICO (FASE CONOSCITIVA)

4 ANALISI DEL COMPORTAMENTO DEFORMATIVO ALLO SCAVO

(FASE DI DIAGNOSI)

4.1 VALUTAZIONE DELLA STABILITÀ AL FRONTE

4.2 DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO.

5 FASE DI TERAPIA

5.1 VERIFICA DEI RIVESTIMENTI DI PRIMA FASE

5.2 VERIFICA DEI RIVESTIMENTI DEFINITIVI

6 STAZIONE DI ORETO NORD

7 MONITORAGGIO



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

1 PREMESSA

Nella presente relazione si affrontano le problematiche progettuali connesse alla realizzazione delle gallerie di stazione facenti parte della Linea Automatica della Metropolitana della città di Palermo, riportando la descrizione dei requisiti funzionali, degli interventi previsti e delle modalità di realizzazione.

La metodologia di lavoro è stata sviluppata secondo l'approccio che prevede i seguenti step progettuali:

1.FASE CONOSCITIVA: in tale fase si sono raccolte le informazioni geologiche e geotecniche sull'area in esame e sono stati definiti i parametri geotecnici di progetto.

2.FASE DI DIAGNOSI: è stato valutato il comportamento allo scavo dei materiali attraversati in assenza di interventi. Verranno definite pertanto 3 categorie di comportamento del fronte a seconda dei fenomeni deformativi attesi: A (fronte stabile), B (fronte stabile a breve termine), C (fronte instabile).

3.FASE DI TERAPIA: si sono individuati gli interventi idonei per realizzare l'opera in condizioni di sicurezza mediante la definizione delle sezioni tipo di scavo e consolidamento.

Pertanto, dopo una descrizione delle opere in progetto in questa fase preliminare, si è proceduto alla definizione di un sintetico quadro geologico - geomeccanico (fase conoscitiva), per un approfondimento del quale si rimanda alla relazione geologica, all'individuazione del comportamento dell'ammasso allo scavo (fase di diagnosi) ed alla scelta delle modalità di avanzamento da applicare (fase di terapia).

A conclusione dello studio condotto, si riportano valutazioni in merito al programma di monitoraggio da predisporre per il controllo tenso-deformativo dell'ammasso e dei rivestimenti durante lo scavo.

In questa fase di Progetto Preliminare la scelta delle sezioni tipo è stata condotta facendo ricorso al metodo delle linee caratteristiche e ad analisi di stabilità dei fronti di scavo mediante



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

metodi dell'equilibrio limite come il metodo di Tamez.

Riguardo l'uso delle linee caratteristiche va puntualizzato che le ipotesi che stanno alla base di questo metodo riguardano l'omogeneità del materiale attraversato e la isotropia degli sforzi litostatici in situ (schematizzazione assialsimmetrica): ne deriva che il metodo è applicabile con buona approssimazione per gallerie profonde ($H > 2.5-3D$).

Nel caso specifico il rapporto H/D è prossimo a 2 per cui a rigore tale metodo cade in difetto, se consideriamo però la presenza degli edifici in superficie, trasformando la pressione che essi applicano in una altezza equivalente di terreno, si può ipotizzare una copertura prossima ai 3 diametri e pertanto si rientra nei limiti di applicabilità del metodo.

Tale procedura può apparire grossolana ma per un primo dimensionamento e introducendo adeguati coefficienti di sicurezza sui parametri di resistenza del terreno può ritenersi sufficiente e congrua al livello preliminare di progettazione in corso.



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

2 DESCRIZIONE DELLE OPERE IN SOTTERRANEO

Il tracciato della linea metropolitana in esame è relativo alla prima tratta funzionale da Oreto a Notarbartolo. Come accennato in premessa la seguente relazione si occupa delle gallerie di stazione e nello specifico:

STAZIONE BORSA

STAZIONE MASSIMO

STAZIONE ORETO NORD

La galleria di stazione di Borsa ha uno sviluppo longitudinale di circa 22 m, l'asse corre ad una profondità di 17 m, gli stessi dati valgono per la galleria di stazione Massimo. La stazione di Oreto nord ha uno sviluppo di circa 57 m, la sezione è analoga alle stazioni Borsa e Massimo, le modalità di scavo verranno studiate separatamente.

Le gallerie hanno una sezione di intradosso policentrica come rappresentato nella figura seguente:

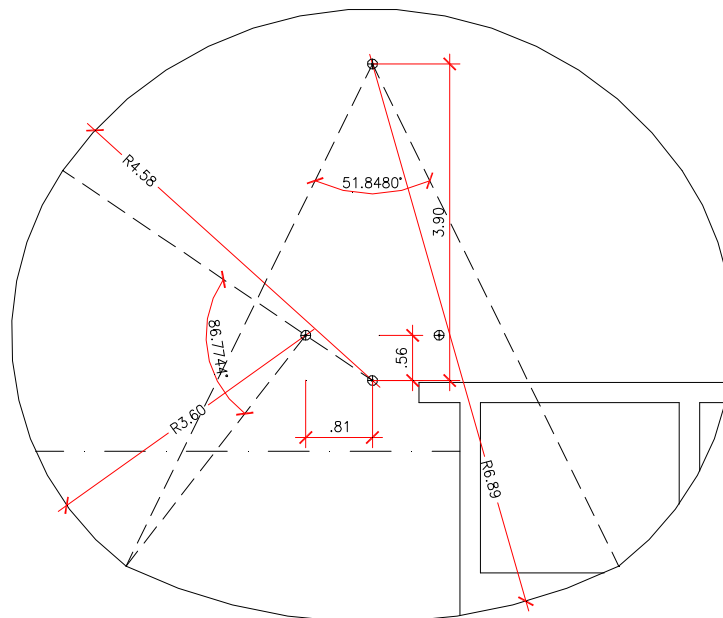


Fig.1 Sezione tipo di intradosso

L'area di scavo è approssimativamente pari a 90 m^2 considerando anche i rivestimenti previsti di prima e seconda fase. Le gallerie di stazione Borsa e Massimo verranno realizzate in anticipo rispetto alla galleria di linea così da permettere il transito della fresa che realizza la



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

linea metropolitana. La galleria di stazione di Oreto nord al contrario verrà realizzata in allargò rispetto alla sezione definita dalla fresa.

3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOTECNICO (FASE CONOSCITIVA)

La stazione Borsa ricade nei depositi alluvionali del Kemonia e del Papireto; essi sono composti da sabbia a grana da fina a media, spesso limosa o debolmente limosa. A tratti è presente della torba mista a ghiaia a spigoli arrotondati di dimensioni centimetriche, in matrice sabbioso-limosa di colore grigio e bruno, passante a sabbia e ghiaia di colore grigiastro e giallastro. In successione stratigrafica troviamo un limo sabbioso o debolmente sabbioso, di colore grigio o grigio-verdastro, fossilifero, da mediamente a ben addensato, talora con ghiaia arrotondata; stratigraficamente è per lo più sottostante alle sabbie calcarenitiche, ma si può trovare anche intercalato ad esse.

Gli spessori conosciuti nella piana di Palermo sono intorno ai 90 metri. Il livello piezometrico è posto ad una quota variabile tra i 5 e i 15 m dal piano campagna. Da quanto riportato nel profilo geologico e sulla base dei dati disponibili in questa fase progettuale la galleria di stazione Borsa si sviluppa per lo più nei limi sabbiosi, il contatto con le alluvioni sembra svilupparsi in calotta in cui è presente una lente di calcarenite nodulare (CN).

AL - DEPOSITI ALLUVIONALI			LS - LIMO SABBIOSO			CN - CALCARENITE NODULARE		
$\gamma =$	18	kN/m ³	$\gamma =$	19	kN/m ³	$\gamma =$	20	kN/m ³
$\phi =$	23° - 26°		$\phi =$	22° - 24°		$\phi =$	38° - 40°	
$c' =$	0 - 10	kPa	$c' =$	15 - 25	kPa	$c' =$	0 - 20	kPa
$E =$	20 - 40	Mpa	$E =$	30 - 50	Mpa	$E =$	100 - 200	Mpa

La stazione Massimo si sviluppa interamente all'interno della calcarenite nodulare; si tratta di un calcarenite a grana medio-fine, di colore giallastro e biancastro, caratterizzata da una struttura a noduli, ben cementati di forma irregolare e dimensioni centimetriche e decimetriche, fra loro interconnessi e associati a sabbia presente negli spazi internodulari. Gli spessori sono compresi tra i 3 ed i 9 metri. Il livello piezometrico è posto ad una quota variabile tra i 5 e i 15 m dal piano campagna.

Potrebbe essere possibile, in quanto il contatto non è definito in maniera netta, incontrare sul fronte di scavo la calcarenite bioclastica; è una calcarenite litoide (bioclastica), a grana media, a zone vacuolare, di colore giallastro e biancastro, con grado di cementazione variabile, da



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

ben cementata e lapidea a debolmente cementata, tenera e talora friabile, in strati di spessore da centimetrico a decimetrico alternati a sottili livelli sabbiosi.

Dal punto di vista geomeccanico, comunque le due formazioni possono essere considerate omogenee anche in relazione alla estrema variabilità del grado di cementazione che caratterizza questi litotipi.

Infine in arco rovescio potrebbe essere presente uno strato di conglomerati e ghiaie; questo ultimo aspetto va tenuto in debita considerazione in relazione alle venute d'acqua che potrebbero presentarsi in quanto le gallerie vengono scavate per la maggior parte sotto falda.

CN - CL CALCARENITI		
$\gamma =$	20	kN/m ³
$\phi =$	38° - 40°	
$c' =$	0 - 20	kPa
$E =$	100 - 200	Mpa



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

4 ANALISI DEL COMPORTAMENTO DEFORMATIVO ALLO SCAVO

(FASE DI DIAGNOSI)

4.1 VALUTAZIONE DELLA STABILITÀ AL FRONTE

Il processo di verifica dello scavo della galleria prevede una fase di “diagnosi” finalizzata alla valutazione dei fenomeni deformativi del mezzo attraversato, da cui discende una valutazione della stabilità dello scavo al fronte e lontano da esso.

Il comportamento del fronte di scavo, al quale è legato quello della cavità, può essere sostanzialmente ricondotto alle seguenti tre categorie di comportamento.

- CATEGORIA A: Galleria a fronte stabile
- CATEGORIA B: Galleria a fronte stabile a breve termine
- CATEGORIA C: Galleria a fronte instabile

Le tre categorie precedentemente introdotte sono definite secondo le seguenti caratteristiche.

CATEGORIA A: galleria a fronte stabile

Se il fronte di scavo è stabile, lo stato tensionale al contorno della cavità in prossimità del fronte si mantiene in campo prevalentemente elastico ed i fenomeni deformativi osservabili sono di piccola entità e tendono ad esaurirsi rapidamente. In questo caso anche il comportamento del cavo sarà stabile, mantenendosi prevalentemente in campo elastico, e quindi non si rendono necessari interventi preventivi di consolidamento, se non localizzati e in misura molto ridotta. Il rivestimento definitivo costituirà allora il margine di sicurezza per la stabilità a lungo termine.

CATEGORIA B: galleria a fronte stabile a breve termine

Questa condizione si verifica quando lo stato tensionale indotto dall'apertura della cavità supera la resistenza geomeccanica del materiale al fronte, che si allontana progressivamente



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

da un comportamento di tipo elastico, per passare ad un comportamento di tipo elasto-plastico. I fenomeni deformativi connessi con la redistribuzione delle tensioni risultano più accentuati che nel caso precedente e producono nell'ammasso al fronte una riduzione delle caratteristiche di resistenza con decadimento verso i parametri plastici residui.

La decompressione indotta dallo scavo può essere opportunamente controllata con adeguati interventi di preconsolidamento del fronte. In tal modo si fornisce l'opportuno contenimento all'ammasso, che manterrà un comportamento stabile.

Nel caso non si prevedano opportuni interventi, lo stato tenso-deformativo potrà evolvere verso situazioni di instabilità del cavo in via di realizzazione. Il rivestimento definitivo costituirà, ancora, il margine di sicurezza per la stabilità nel lungo termine.

CATEGORIA C: galleria a fronte instabile

L'instabilità progressiva del fronte di scavo è attribuibile ad una accentuazione dei fenomeni deformativi in campo plastico, che risultano immediati e più rilevanti, manifestandosi prima ancora che avvenga lo scavo, oltre il fronte stesso. Tali deformazioni producono un incremento dell'estensione della zona dell'ammasso decompressa in corrispondenza del fronte, dove si sviluppa un progressivo e rapido decadimento delle caratteristiche geomeccaniche del materiale. L'espansione della fascia di materiale decompresso al contorno del cavo deve essere contenuta prima dell'arrivo del fronte di scavo, e richiede pertanto interventi di preconsolidamento sistematici in avanzamento, che consentano di creare artificialmente l'effetto arco capace di far evolvere la situazione verso configurazioni di equilibrio stabile.



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

4.2 DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO.

Per la definizione delle categorie di comportamento si fa ricorso al metodo delle curve caratteristiche del fronte e del cavo e all'applicazione del metodo di Tamez, il quale come già accennato rientra nei metodi di stabilità basati sulla teoria dell'equilibrio limite.

Una volta definite le categorie di comportamento verranno eseguite nuovamente le analisi introducendo gli interventi di scavo e consolidamento iterando il calcolo fino a quando non si ritiene di aver dimensionato tali interventi garantendo adeguati margini di sicurezza nei confronti dello scavo (fase di terapia).

Il comportamento del fronte e del cavo è funzione, oltre che delle caratteristiche geometriche della cavità stessa e dei carichi litostatici cui è soggetta, anche delle caratteristiche di resistenza e di deformabilità del nucleo d'avanzamento, inteso come la porzione di terreno da scavare che dal fronte si estende per una profondità di circa un diametro.

Con tutte le limitazioni del caso in base a quanto esposto in premessa i risultati derivanti dalle linee caratteristiche vanno presi come indicazione sufficientemente approssimata del comportamento del fronte e del cavo, in assenza di interventi di consolidamento e sostegno.

A verifica di quanto dedotto attraverso l'analisi con le linee caratteristiche si eseguono le verifiche di stabilità anche con il metodo di Tamez.

Il metodo dell'equilibrio limite proposto da Tamez tiene conto della riduzione dello stato di confinamento triassiale del nucleo di terreno oltre il fronte per mezzo di un meccanismo di rottura del tipo effetto volta, con il quale il volume di terreno gravante sulla corona della galleria è definito da un paraboloide, approssimato mediante tre solidi prismatici, come illustrato nella figura della pagina seguente.

Il metodo determina le massime tensioni tangenziali che si possono sviluppare sulle facce di ogni prisma senza che avvengano scorrimenti (forze resistenti) e le forze di massa di ogni prisma (forze agenti).

Il rapporto tra i momenti delle forze resistenti e delle forze agenti fornisce un coefficiente di sicurezza, denominato FSF (face security factor).

Tuttavia, è possibile che la stabilità del prisma 3, gravante sulla zona di galleria non ancora sostenuta, sia più critica rispetto all'equilibrio complessivo dei tre prismi che approssimano il paraboloide.

Sarà pertanto necessario determinare entrambi i coefficienti di sicurezza e considerare il minore dei due.

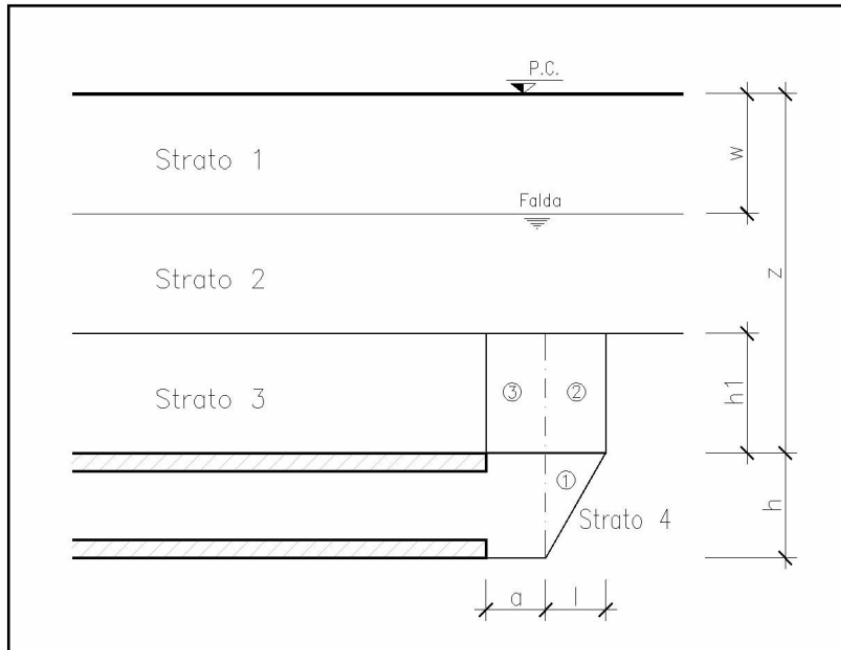


Fig. 2 schema di calcolo del metodo di Tamez

Si ritiene accettabile un coefficiente di sicurezza $FSF \geq 1.5$

Il fattore di sicurezza FSF viene espresso in funzione della distanza dal fronte non sostenuta "a". Anche per le analisi con il metodo dell'equilibrio limite è possibile tener conto di eventuali interventi di preconsolidamento del fronte (realizzato con elementi strutturali in VTR) mediante l'applicazione di una pressione fittizia P_E applicata al fronte.

La pressione di confinamento P_E risultante dall'applicazione degli elementi strutturali in VTR è data da :

$$P_E = N \cdot (T/A)$$

dove:

N = numero di barre in VTR

T = tiro massimo della barra in VTR

A = area della sezione di scavo



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

La resistenza (T) che un elemento strutturale in vetroresina è in grado di esercitare è la minima tra la resistenza allo sfilamento (T1) e quella di rottura del materiale (T2):

$$T = \min (T1, T2)$$

$$T1 = \pi \cdot D \cdot L \cdot \tau$$

$$T2 = \sigma_{yld} \cdot A_{VTR}$$

dove:

D = diametro del bulbo di fondazione

τ = resistenza limite fra bulbo di fondazione e terreno

L = lunghezza minima di sovrapposizione dei tubi

σ_{yld} = resistenza a trazione dei tubi in VTR

A_{VTR} = area della sezione del tubo in VTR

Si riportano i parametri adottati nelle verifiche:

STAZIONE BORSA:

- Raggio galleria = 5.35 m (raggio equivalente ad una sezione circolare)
- Copertura = 13 m
- Peso di volume = 19 kN/m³
- Angolo di attrito medio dei terreni di copertura = 23°
- Coesione media dei terreni sopra la calotta = 0 kPa
- Coesione media dei terreni da scavare = 10 kPa (distinzione applicata al modello di Tamez)
- Modulo elastico = 35 MPa
- Coefficiente di Poisson = 0.25
- Posizione falda = 5 m sotto il piano campagna
- Chiodi al fronte = 0



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

STAZIONE MASSIMO:

- Raggio galleria = 5.35 m (raggio equivalente ad una sezione circolare)
- Copertura = 13 m
- Peso di volume = 20 kN/m^3
- Angolo di attrito medio dei terreni di copertura = 38°
- Coesione media dei terreni sopra la calotta = 0 kPa
- Coesione media dei terreni da scavare = 10 kPa (distinzione applicata al modello di Tamez)
- Modulo elastico = 50 MPa
- Coefficiente di Poisson = 0.25
- Posizione falda = 5 m sotto il piano campagna
- Chiodi al fronte = 0

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti mediante le linee caratteristiche e mediante il metodo di Tamez, in entrambi i casi a cavo libero. Seguono i commenti ai risultati dopodichè verranno dimensionati gli interventi di scavo e consolidamento al fine di eseguire i lavori con adeguati margini di sicurezza.

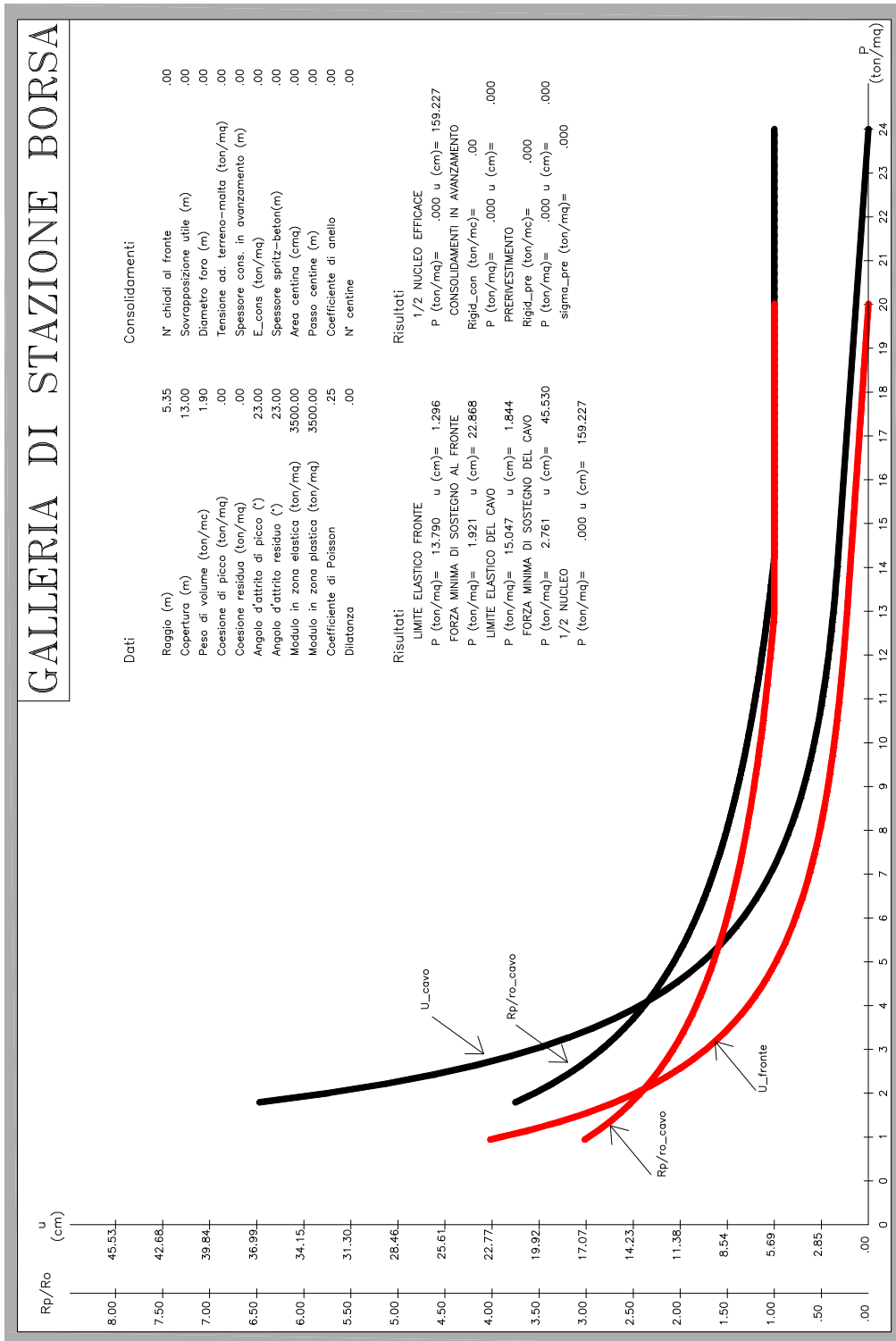


Fig.3 Linea caratteristica G.N. Stazione Borsa (terreno non consolidato)



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

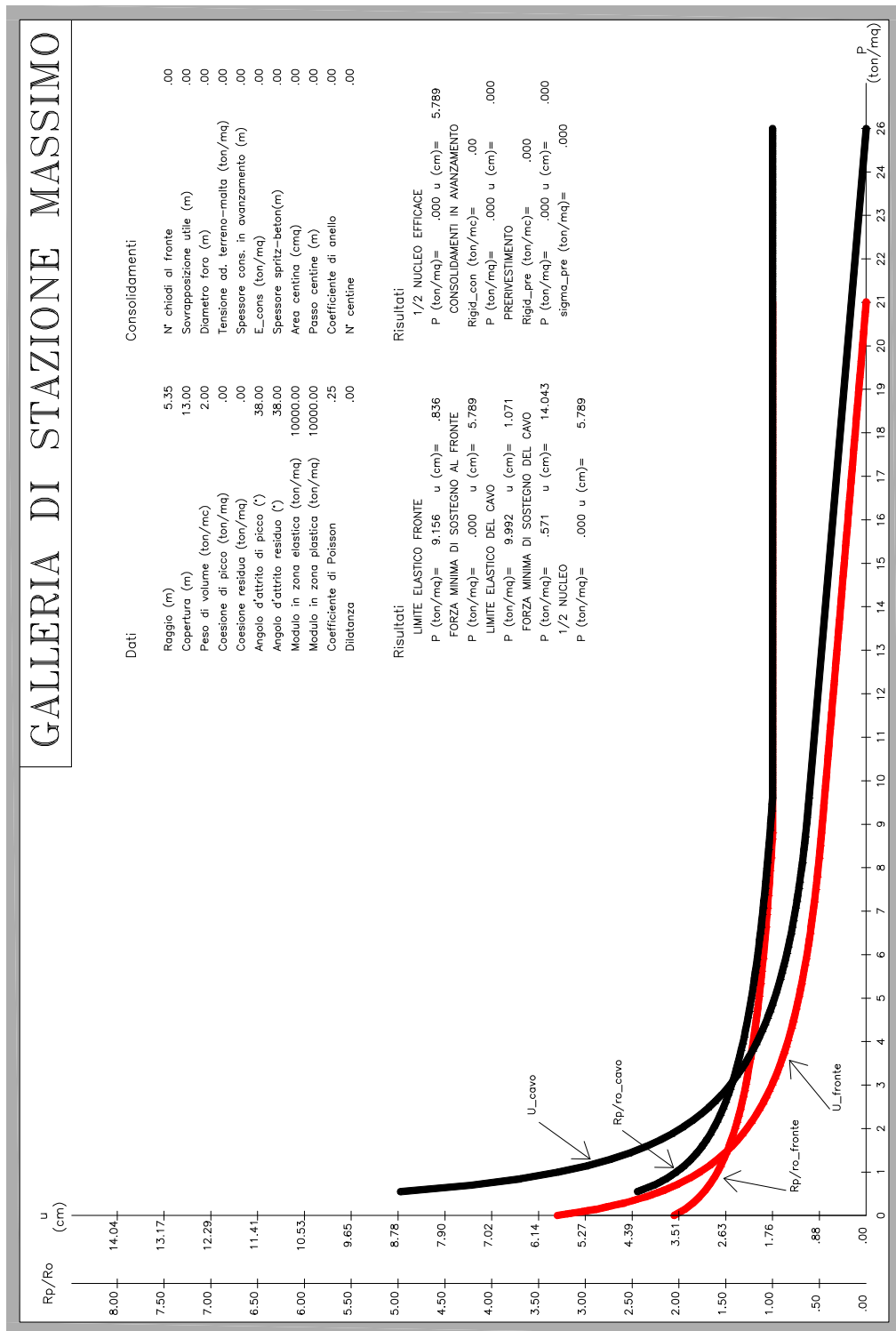


Fig.4 Linea caratteristica G.N. Stazione Massimo (terreno non consolidato)



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

Sintesi dei risultati:

ANALISI	Formazione	Convergenza fronte Uf (cm)	Rp/R0 al fronte	Categoria di comportamento
1	Depositi alluvionali	-	-	C
2	Calcareni	5.79	3.51	B/C

Metodo di Tamez:

Galleria di Stazione Borsa

a	FSF(a)	FS
0	0,235	
0,5	0,211	
1	0,190	0,017
1,5	0,171	0,012
2	0,155	0,009
2,5	0,141	0,008
3	0,129	0,007





Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

Galleria di Stazione Massimo

a	FSF(a)	
0	0,304	
0,5	0,263	
1	0,228	FS
1,5	0,200	0,012
2	0,176	0,008
2,5	0,156	0,006
3	0,139	0,005



Le analisi condotte relativamente alla **galleria Borsa** confermano un comportamento comunque ipotizzabile date le ridotte coperture e i parametri geomeccanici del terreno relativamente scadenti: infatti si ha la completa instabilità del fronte di scavo con fenomeni deformativi che possono raggiungere anche la superficie, inoltre i coefficienti di sicurezza desunti attraverso il metodo di Tamez sono molto lontani da valori accettabili. In queste condizioni è necessario prevedere interventi di precontenimento del fronte di scavo e del contorno della galleria, come verrà meglio illustrato nel paragrafo relativo alla fase di terapia.

Le analisi condotte relativamente alla **galleria Massimo** mostrano una situazione di analoga instabilità. Si possono fare però alcune considerazioni: le calcareniti in funzione del grado di



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

cementazione o della struttura più o meno litoide potrebbero tendenzialmente mostrare un comportamento di stabilità, in realtà il coefficiente di sicurezza nei confronti dello scavo di questi materiali è abbastanza basso in quanto presentano un comportamento elasto-fragile in cui anche a livelli bassi di deformazione si potrebbe avere l'improvviso collasso della cavità.



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

5 FASE DI TERAPIA

I risultati delle analisi condotte rilevano la necessità di consolidare la galleria mediante interventi al fronte e al contorno, in modo da realizzare lo scavo delle gallerie in maniera sicura e mitigare gli effetti indotti dallo scavo sulle preesistenze superficiali.

In relazione ai litotipi interessati dallo scavo delle gallerie, essenzialmente granulari e caratterizzati da parametri di resistenza relativamente bassi, si ritiene necessario adottare interventi di consolidamento mediante la tecnologia del Jet-grouting. Tale scelta è anche dettata dal fatto che dovendo scavare sotto falda si ha la necessità di creare una volta sostanzialmente impermeabile cercando di disturbare il meno possibile l'equilibrio idrodinamico in sito. Le colonne in jet-grouting andranno realizzate su tutto il contorno dello scavo quindi anche in arco rovescio e dovranno compenetrarsi almeno per 10 cm. Al fronte si prevedono invece interventi in microjet armati con barre in vetroresina, lo scopo di tale intervento è quello di ridare una coesione al fronte di scavo ridurre la permeabilità del nucleo di avanzamento e aumentare la resistenza al taglio mediante gli elementi strutturali in VTR. La zona subito dietro il fronte, alla fine di ogni campo di scavo, verrà trattata attraverso iniezioni di consolidamento e impermeabilizzazione. Le iniezioni verranno eseguite attraverso tubi a manchettes si suddividono in primarie "cementizie" e secondarie "chimiche" a base di gel di silice. In questo modo si potrà realizzare lo scavo all'interno di una "camera" delimitata dal jet al contorno e dal trattamento con iniezioni a fine campo riducendo il rischio di drenare eccessive quantità d'acqua e produrre cedimenti in superficie. La stabilità del fronte durante le fasi di scavo sarà poi assicurata dai consolidamenti mediante microjet armato con VTR.

Nella zona del nucleo di avanzamento potranno essere utilizzati dei drenaggi con lo scopo di abbattere la falda in prossimità del fronte. Nel dettaglio la sezione è così caratterizzata:

La sezione tipo (campi di 8 m) è costituita da:

- 47 (± 30 %) trattamenti in Jet-Grouting ($\varnothing 300$) al fronte, armati con elementi in VTR
 $L_{\text{media}} = 11$ m sovr. media = 3 m
- 28 trattamenti in Jet-Grouting ($\varnothing 600$) in arco rovescio, $L_{\text{media}} = 12.0$ m, sovr. media 4 m (1.5 di perforazione a vuoto)



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

- 85 trattamenti in Jet-Grouting (\varnothing 600) al contorno, $L_{media}=12.0$ m sovr. media 4 m armati alternativamente con tubi in acciaio (Fe 430) $D=127$ mm sp. 8 mm a coprire un angolo di 120° in calotta.
- centine 2IPN200/1 m ± 20 %
- spritz-beton fibrorinforzato o armato con rete elettrosaldata fino ad uno spessore totale di 25 cm;
- impermeabilizzazione costituita da geotessuto, e un manto in PVC anche in arco rovescio
- arco rovescio in c.a., sp. 80 cm, gettato a circa $0.5 \varnothing$ dal fronte;
- rivestimento di calotta tronco conico in c.a. sp. min 60 cm max 145 cm gettato a circa $1 \varnothing$ dal fronte.
- A fine campo prima di iniziare lo scavo della galleria verranno eseguite le iniezioni di consolidamento e impermeabilizzazione allo scopo di creare un “tappo” e isolare idraulicamente il campo di scavo
- Rivestimento definitivo: calotta a sezione troncoconica sp. min 60 cm – sp. max 145 cm arco rovescio sp. 80 cm

Le caratteristiche di resistenza del mezzo composito costituito da una matrice principale (sabbie calcarenitiche) con assegnate caratteristiche meccaniche e da un materiale di rinforzo (jet-grouting) con caratteristiche nettamente superiori, sono state valutate con il criterio dell'omogeneizzazione: il terreno in sito, rinforzato con le colonne di jet-grouting al fronte, è sostituito con un mezzo ideale avente caratteristiche meccaniche equivalenti, intermedie fra quelle dei due materiali, e considerate omogenee e costanti nell'ambito del terreno trattato.

In base a tale criterio il valore della coesione equivalente del terreno trattato risulta essere pari a:

- | | |
|-------------------------------|---|
| – Area sezione colonne | $A_c = n \pi d^2/4 = 3.32$ mq (47 colonne) |
| – Numero di colonne al fronte | $n = 47$ |
| – Area fronte di scavo | $A_f = 90$ mq (area sezione media) |
| – Coesione equivalente | $c_{eq} = (A_f \cdot c' + A_c \cdot c'') / A_f$ |

Assumendo un valore dell'angolo di attrito del materiale trattato pari a quello del materiale non trattato, al fronte può essere assunto un valore della coesione della colonna trattata pari



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

a 1 - 1.2 MPa. Per quanto riguarda la calotta si può rapportare il valore di coesione alla copertura complessiva sopra la calotta della galleria considerando che la zona trattata in jet si può estendere per un'altezza di circa 60 cm si ha: $0.6/13 \cdot 1000 = 45$ kPa circa

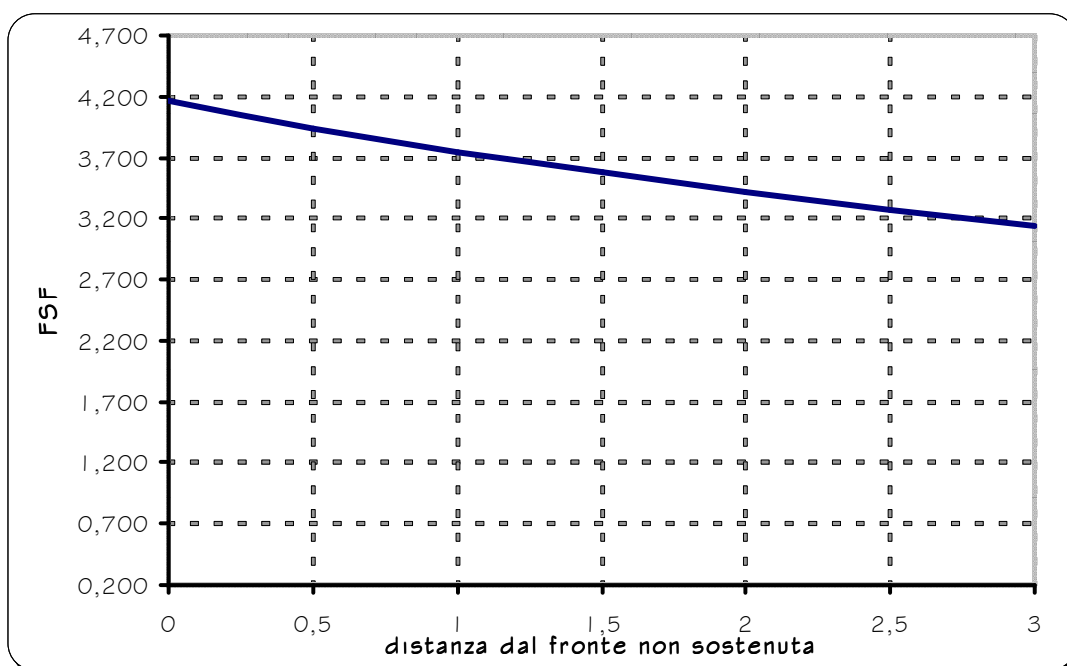
Il valore della coesione equivalente al fronte risulta quindi essere pari a circa 37 kPa mentre in calotta per l'altezza di 13 m si può assumere un valore pari a 45 kPa

Inoltre la presenza dell'armatura in VTR può essere considerata come equivalente ad una pressione di confinamento che, sulla base di quanto esposto in precedenza è pari a circa 70 kPa.

STAZIONE BORSA

Coefficienti di sicurezza in seguito ad interventi di consolidamento

a	FSF(a)	
0	4,157	
0,5	3,942	FS
1	3,748	13,668
1,5	3,573	9,480
2	3,415	7,385
2,5	3,273	6,129
3	3,144	5,291





Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

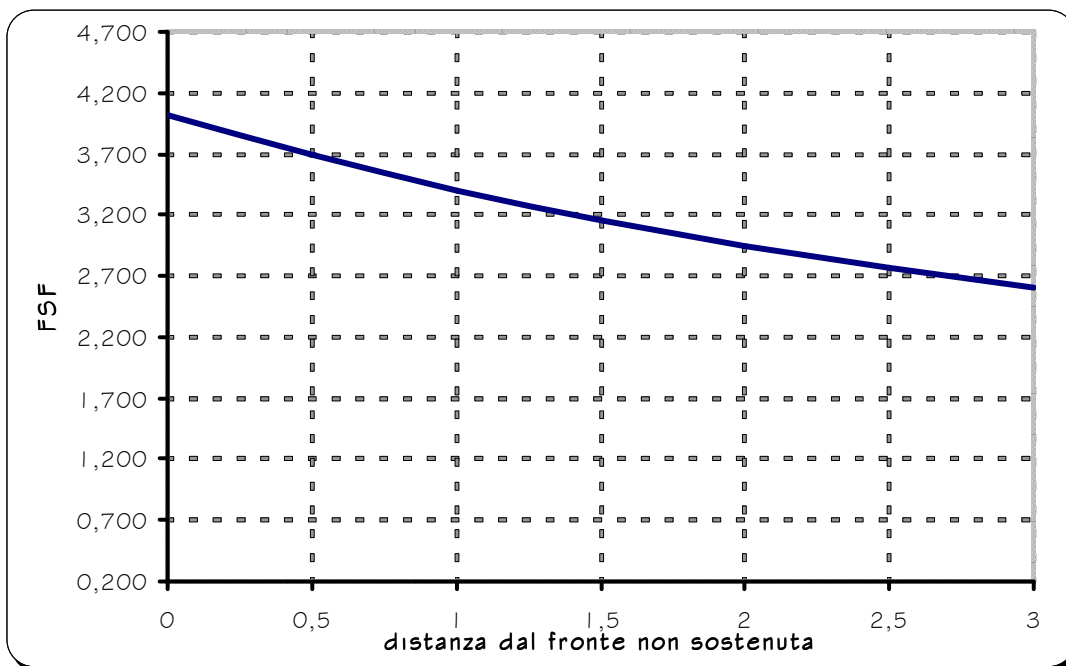
Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

STAZIONE MASSIMO

Coefficienti di sicurezza in seguito ad interventi di consolidamento

a	FSF(a)	
0	4,022	
0,5	3,692	FS
1	3,408	9,168
1,5	3,163	6,359
2	2,952	4,954
2,5	2,769	4,111
3	2,609	3,549





Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

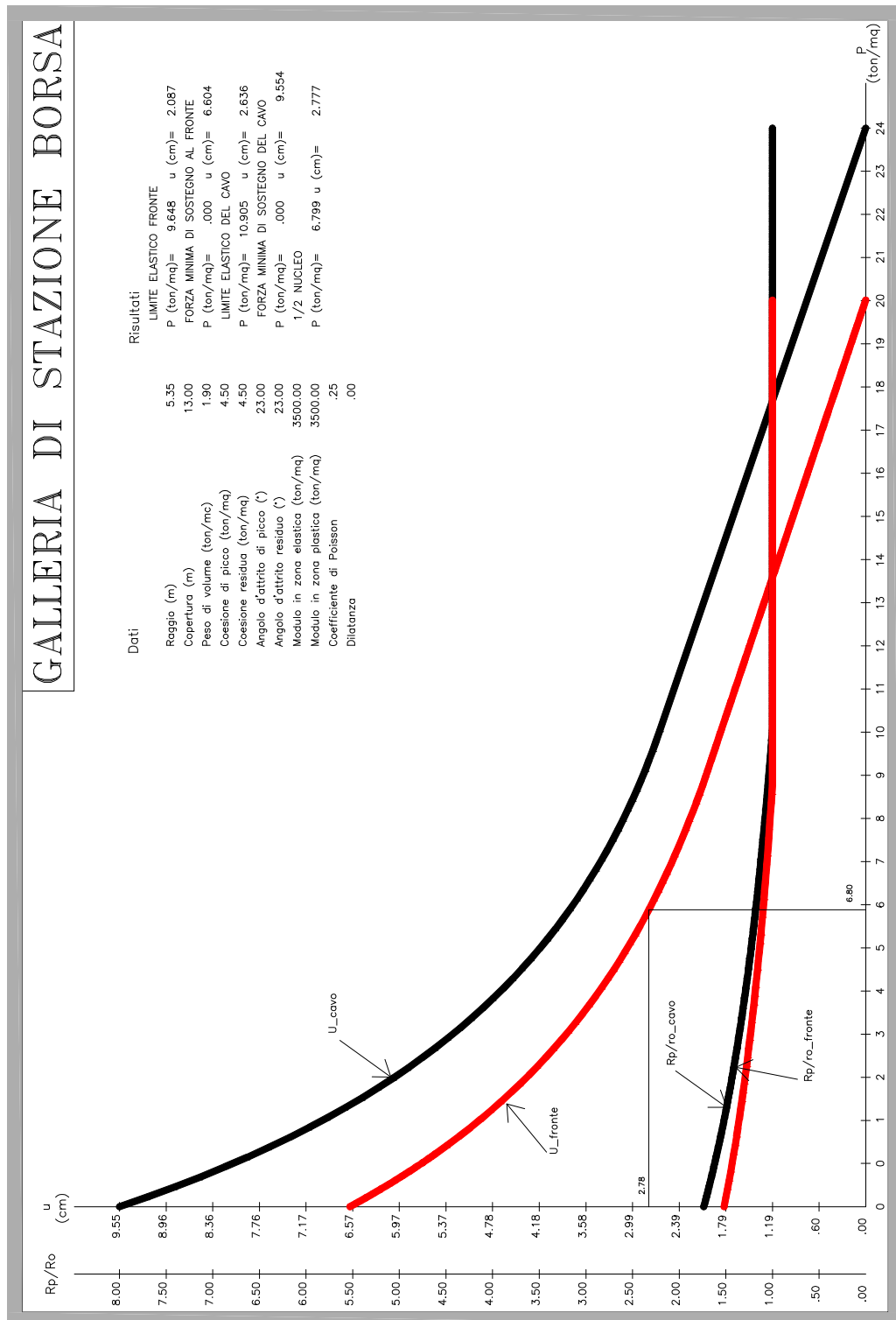


Fig.5 Linea caratteristica G.N. Stazione Borsa (terreno consolidato)



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

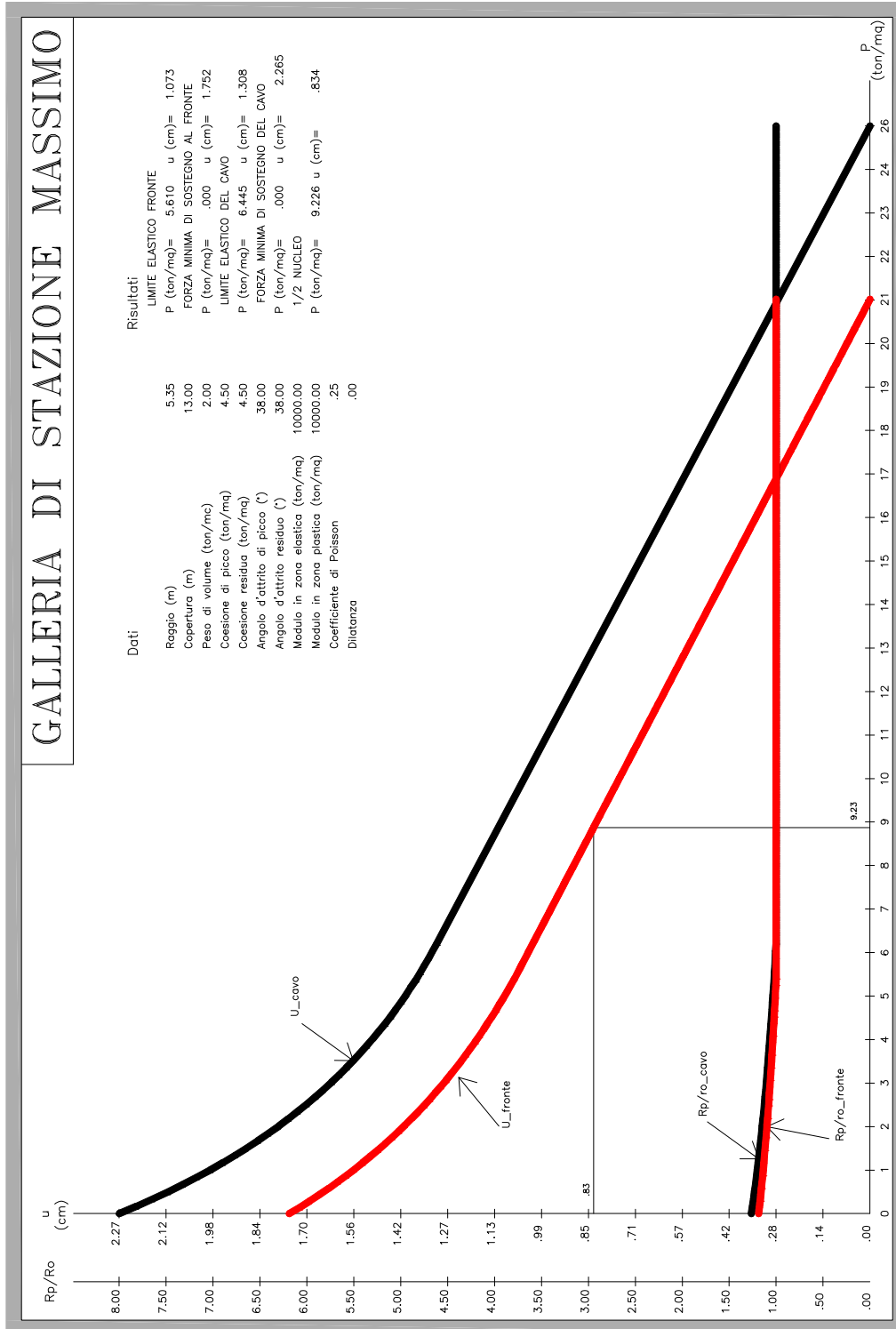


Fig.6 Linea caratteristica G.N. Stazione Massimo (terreno consolidato)



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

Le analisi condotte mostrano l'efficacia degli interventi proposti in particolare dopo aver dimensionato gli interventi di precontenimento e consolidamento del fronte e del cavo tramite il metodo di Tamez, si è proceduto a ricalcolare le linee caratteristiche, esse mostrano come il fronte è in grado attraverso l'incremento di resistenza di rimanere sostanzialmente in campo elastico o al più di scontare valori di convergenza del tutto accettabili. In queste condizioni l'utilizzo delle centine dello spritz fibrorinforzato e dei rivestimenti definitivi rappresenta l'incremento di sicurezza nei confronti della stabilità del cavo a lungo termine.

5.1 VERIFICA DEI RIVESTIMENTI DI PRIMA FASE

Il dimensionamento dei rivestimenti di prima fase e definitivi è stato condotto attraverso l'utilizzo delle linee caratteristiche, che si ritiene più che adeguato al livello preliminare di progettazione in corso.

Le analisi sono state condotte ipotizzando che l'installazione dei sostegni di prima fase avvenga al fronte. Le verifiche statiche sul rivestimento di prima fase sono state condotte considerando la sezione equivalente di spritz-beton; la tensione massima nel prerivestimento è stata calcolata mediante la formula di Lamè:

$$\sigma_{sb} = 2 \cdot P_{eq} \frac{(R_i + s_{eff})^2}{s_{eff}^2 + 2R_i \cdot s_{eff}}$$

dove:

P_{eq} = pressione di equilibrio agente sul prerivestimento

R_i = raggio di intradosso del prerivestimento

S_{eff} = spessore staticamente equivalente

Dall'analisi attraverso le curve caratteristiche si desume una pressione di equilibrio di 9.5 t/m² che equivalgono applicando la formula precedente a una tensione nello spritz di circa 2 MPa.

La tensione ammissibile dello spritz-beton è stata valutata mediante la seguente espressione:

$$\bar{\sigma}_c = \frac{R_{ck}}{F_s} \text{ con } F_s=1.5 \text{ ed è assumendo un } R_{ck} \text{ di } 13 \text{ MPa pari a } 8.6 \text{ MPa.}$$



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

Di seguito è riportata la linea caratteristica relativa al calcolo eseguito.

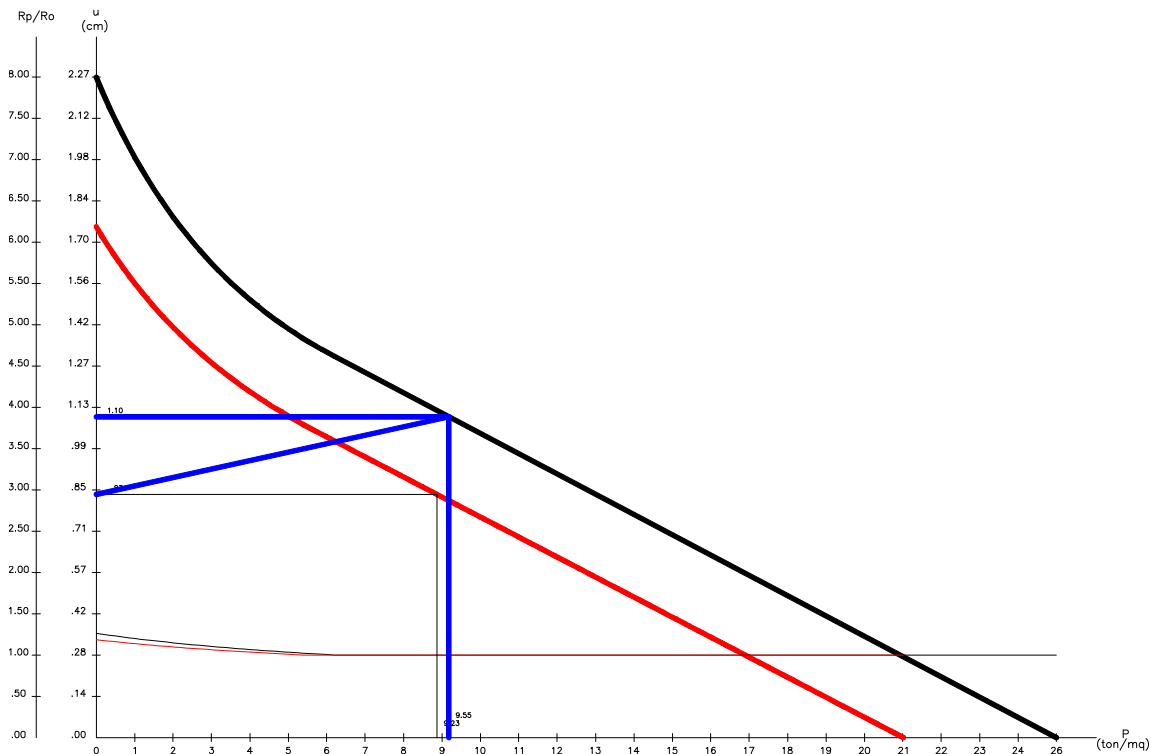


Fig.7 Linea caratteristica: verifica rivestimenti di prima fase

5.2 VERIFICA DEI RIVESTIMENTI DEFINITIVI

I rivestimenti definitivi vengono dimensionati con l'ausilio delle linee caratteristiche; la verifica viene condotta adottando a favore di sicurezza i parametri di resistenza e deformabilità del terreno non consolidato e si adotteranno i parametri dei terreni della stazione Borsa.

La verifica rappresenta un dimensionamento di massima, nelle successive fasi progettuali andranno condotte le verifiche portando in conto le fasi realizzative di scavo attraverso modelli numerici che necessariamente forniscono soluzioni più accurate.

L'area di scavo è di circa 90 m^2 ; pertanto il raggio equivalente di scavo è di 5.35 m .

Dalla figura che segue si desume che la pressione sul rivestimento nelle condizioni assunte per il calcolo è inferiore ai valori ammissibili, dati comunque i limiti di una schematizzazione di questo tipo si ritiene opportuno armare il rivestimento con i seguenti quantitativi di armatura:



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

60 kg/m³ per arco rovescio e murette, 30 kg/m³ per la calotta.

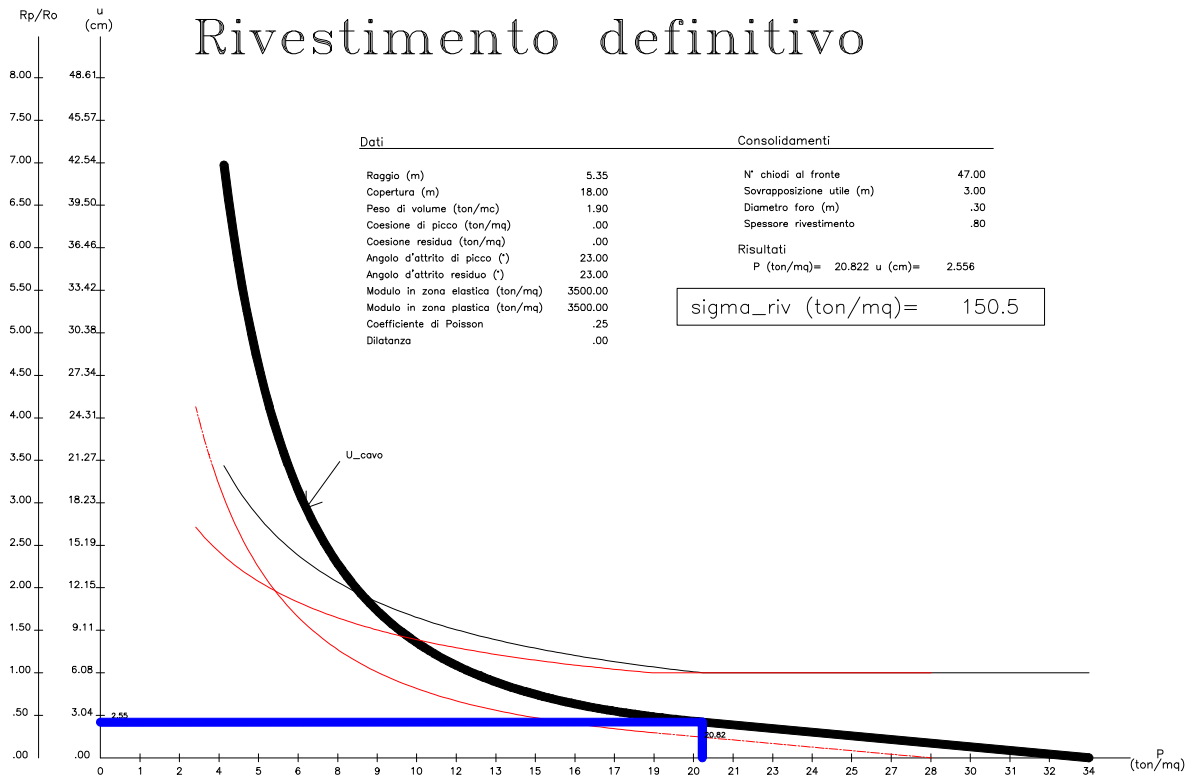


Fig.8 Linea caratteristica: verifica rivestimenti definitivi



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

6 STAZIONE DI ORETO NORD

Di seguito vengono descritte le scelte progettuali per la realizzazione delle gallerie di fermata della stazione di Oreto Nord.

Si prevede di realizzare le gallerie di fermata in allargo rispetto allo scavo realizzato tramite la fresa. Preventivamente allo scavo della fresa andranno eseguite iniezioni di consolidamento e impermeabilizzazione mediante iniezioni suddivise in due fasi

PRIMA FASE: iniezione di miscela cementizia (con cemento microfine)

SECONDA FASE: iniezioni chimiche a base di gel di silice.

Queste iniezioni hanno lo scopo di migliorare le caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno e di ridurre la permeabilità. Entrambi gli aspetti sono funzionali al contenimento degli effetti prodotti in superficie e alla stabilità dello scavo durante le fasi di allargo.

Sarà quindi necessario in fase realizzativa eseguire dei campi provvedendo alla verifica dei risultati mediante dei sondaggi. Inoltre durante le fasi di scavo con fresa sarà utile prevedere delle ispezioni al fronte in modo da avere a disposizione un "foro pilota" del diametro di 6.10 m all'interno del futuro scavo di allargo in grado di fornire al progettista elementi utilissimi riguardanti la tipologia di consolidamento e il comportamento del fronte nel brevissimo e nel breve termine.

Allo scopo andranno eseguiti i seguenti monitoraggi durante il transito della macchina nella zona di fermata:

- Misure dei cedimenti in superficie e dello stato deformativo del terreno nell'intorno dello scavo mediante rilevamenti topografici ed estenso-inclinometrici;
- Visite nella camera di scavo per un esame visivo della natura dei terreni (trattati) e della stabilità del fronte e una valutazione delle portate d'acqua di filtrazione e dei relativi effetti sulla stabilità;
- Prelievi di campioni di terreno estratto dalla fresa sulle quali eseguire prove di laboratorio.



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

Una volta realizzato l'intervento di consolidamento ed impermeabilizzazione lo scavo avverrà a piena sezione secondo le seguenti fasi costruttive.

Scavo della sezione di attacco operando un allargo graduale per i primi 6 m fino al raggiungimento della sezione massima di scavo (quella della stazione); in questo modo si consente la creazione di una camera di scavo idonea al posizionamento della macchina per eventuali consolidamenti.

Scavo della galleria di fermata e posa dei rivestimenti secondo la sezione tipo prevista e dettagliata nei paragrafi seguenti; con il procedere dello scavo verranno messi in sicurezza gli anelli del rivestimento prefabbricato davanti al fronte, mediante centine circolari messe a contrasto con l'interno dei conci prefabbricati della galleria di linea scavata con fresa.

Terminati gli scavi della galleria di fermata, realizzazione degli innesti della galleria di fermata al cunicolo di esodo e al gruppo scale. Nel getto del rivestimento definitivo verranno lasciate vuote le impronte degli innesti, in modo da poter eseguire eventuali pre-consolidamenti al fronte e in calotta prima di procedere con gli scavi;

Prima di iniziare le operazioni di demolizione e di allargo si effettuerà sulla tratta iniziale di 7.5 m circa, un intervento di presostegno mediante n°20 infilaggi metallici Ø101.6 sp. 8.8 di lunghezza e inclinazione variabile messi in opera ad interasse di 40 cm.

Successivamente verranno messi in sicurezza gli anelli di rivestimento prefabbricato mediante la messa in opera di n°4 centine dietro il primo anello da demolire e n°8 centine davanti all'anello da demolire. Le centine sono costituite da profilati circolari HEB 140 e verranno messe in contrasto mediante martinetti idraulici. Le centine interessate dalle successive demolizioni verranno rimosse una alla volta e spostate in avanti per essere riutilizzate nel campo successivo.

Si comincerà la demolizione dei conci della galleria operando su un concio alla volta (l=1,5 m) ed effettuando, dopo ogni singola demolizione, la posa di centine (2 IPN 180/1,5m) e spritz-beton fibro-rinforzato (sp. 25 cm, incidenza fibre 30 Kg/mc). La demolizione dei conci verrà effettuata mediante idro-demolizione e/o pinza idraulica affinché non si inducano nel terreno circostante vibrazioni e/o scuotimenti.

La prima tratta di allargo di 7.5 m (circa) verrà realizzata mediante un allargo progressivo fino ad arrivare alla sezione massima di scavo. Terminato l'allargo dei primi metri verrà messo in



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

sicurezza il fronte mediante spritz-beton fibro-rinforzato. Proseguirà lo scavo e la demolizione dei conci per sfondi massimi di un 1/1.5 m e la posa del priverivestimento costituito da 2 centine IPN 180/1.5m e spritz-beton sp.25 cm.

Terminato lo scavo e la posa del rivestimento di prima fase si effettuerà il riempimento provvisorio dell'arco rovescio per consentire il transito dei mezzi.

I primi due anelli di rivestimento prefabbricato che sono stati danneggiati dai carotaggi per l'esecuzione degli infilaggi verranno demoliti previo rinforzo radiale con elementi in VTR del terreno al contorno.

Si procederà quindi con la rimozione del riempimento provvisorio, la posa dell'impermeabilizzazione ed il getto dell'arco rovescio e delle murette per tutto il tratto scavato fino a tre metri dal fronte e al getto di calotta secondo la sagoma della galleria di fermata.

In tutte le sezioni tipo correnti di scavo della galleria di fermata sono previsti sfondi di 1/1.5 m in quanto si presume che la demolizione del rivestimento della galleria di linea avvenga rimuovendo gli elementi prefabbricati lungo le linee di giunto che sono poste longitudinalmente a 1/1.5 m di distanza.

Una volta consolidato il terreno con le iniezioni si ritiene sufficiente proseguire lo scavo di allargo adottando la sezione tipo descritta di seguito:

Priverivestimento costituito da 2 IPN 180/1.5m (oppure 1HEB200/1m) e spritz-beton sp.25 cm armato con 30Kg/ mc di fibre;

Impermeabilizzazione costituita da un telo in PVC con sp.≥ 2mm;

Muretta e arco rovescio armati da gettare ad una distanza dal fronte variabile da 7 m a 16 m (armatura 60 kg/m³ a.r. e murette; 30 kg/m³ piedritti e calotta)

Rivestimento definitivo di calotta armato con spessore 80 cm

Rivestimento definitivo in arco rovescio armato di spessore 80 cm

Le fasi esecutive consistono:

- Messa in sicurezza dei conci mediante centine contrastate con martinetti idraulici ad



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

esclusione del concio da demolire.

- Solo relativamente al tratto in allargò il concio attraverso il quale verranno eseguiti gli infilaggi verrà contrastato prima della demolizione del concio successivo.
- Posa di spritz-beton fibro-rinforzato dello spessore minimo di 10 cm sulla porzione di fronte di scavo ogni fine campo;
- Demolizione dell'anello di conci prefabbricati con attrezzatura che non induca nel terreno vibrazioni e/o scuotimenti tipo pinza idraulica. Esecuzione dello scavo del terreno per singoli sfondi di 1,5m (1m);
- Posa in opera delle centine di calotta ed arco rovescio e dello spritz-beton fibro-rinforzato;
- Posa del riempimento provvisorio per il transito dei mezzi meccanici;
- Posa del tessuto non tessuto e dell'impermeabilizzazione in arco rovescio e murette previa rimozione del riempimento;
- Getto di murette e arco rovescio ad una distanza massima di 0.5ϕ dal fronte;
- Getto del rivestimento definitivo di calotta ad una distanza massima di 1ϕ dal fronte previo posa del tessuto non tessuto e dell'impermeabilizzazione.

Analogamente a quanto fatto per le stazioni di Borsa e Massimo si può verificare il comportamento del cavo consolidato mediante l'utilizzo delle linee caratteristiche, in questo caso i parametri di resistenza e deformabilità saranno una media pesata sulla copertura tra i valori del terreno consolidato e quello naturale in posto.

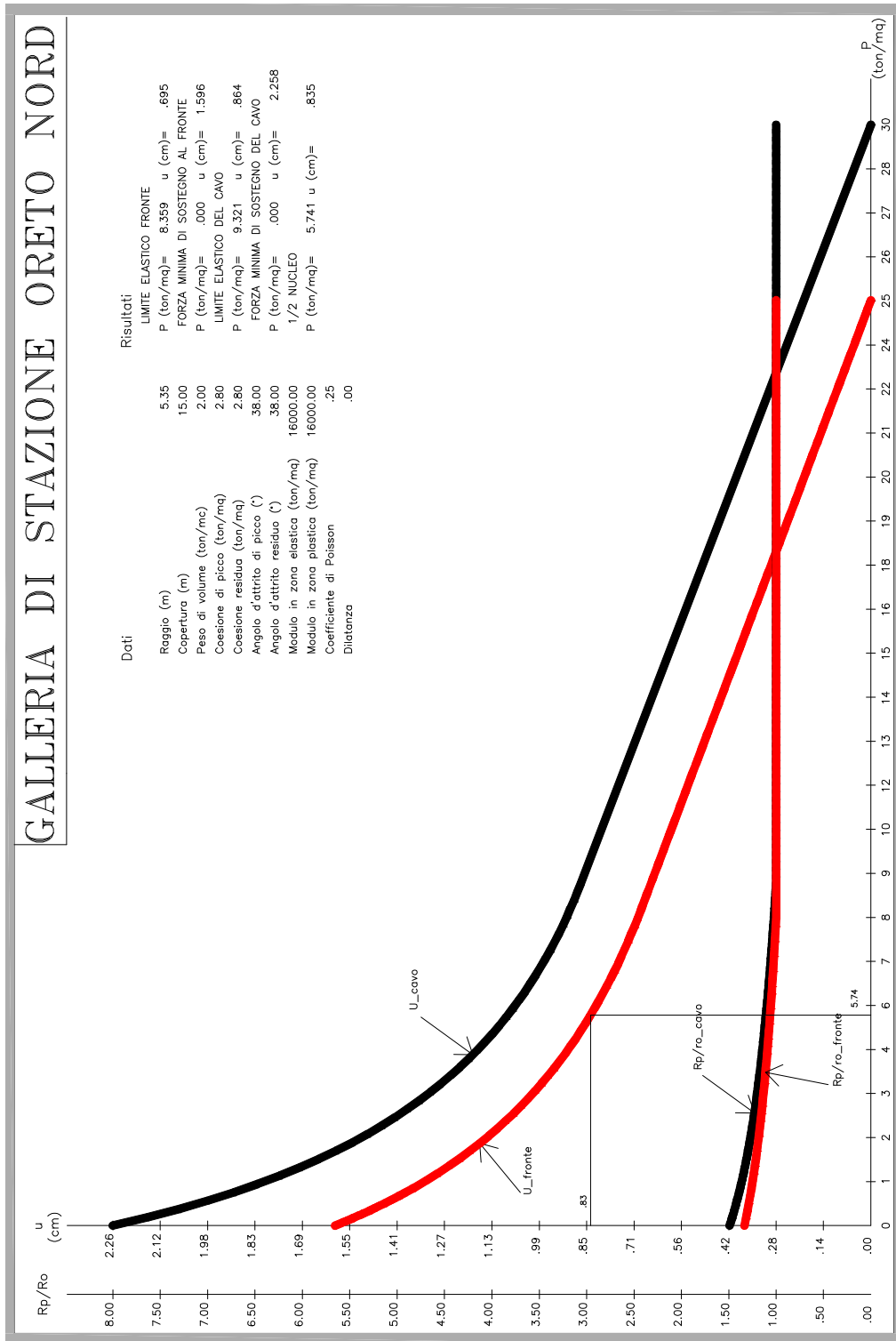


Fig.9 Linea caratteristica G.N. Stazione Oreto Nord (terreno consolidato)



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

Le convergenze al fronte sono tali da mantenere praticamente in campo elastico le deformazioni. A conferma dei risultati dedotti dall'applicazione di tale metodologia si eseguono di seguito le verifiche con l'applicazione del metodo di Tamez.

Per quanto riguarda le verifiche di stabilità del fronte, si può usare a favore di sicurezza il metodo di Tamez come se non ci fosse lo scavo eseguito con fresa (analogamente a quanto fatto con le linee caratteristiche) e quindi verificando l'intera sezione di scavo consolidata mediante le iniezioni.

La copertura è di circa 17 m formata da uno strato superficiale di circa 3 m costituito da riporti al di sotto dei quali si ha la calcarenite bioclastica le cui caratteristiche di resistenza e deformabilità sono le seguenti:

CN - CL CALCARENITI		
$\gamma =$	20	kN/m ³
$\phi =$	38° - 40°	
$c' =$	0 - 20	kPa
$E =$	100 - 200	Mpa

I parametri che ragionevolmente possono essere assunti per il terreno trattato sono:

$$c' = 100 \text{ Kpa}$$

$$\phi' = 35^\circ$$

$$E = 400 \text{ Mpa}$$

Si considerano pienamente trattati almeno 3 m al disopra della calotta

In questo contesto i risultati delle analisi sono i seguenti:

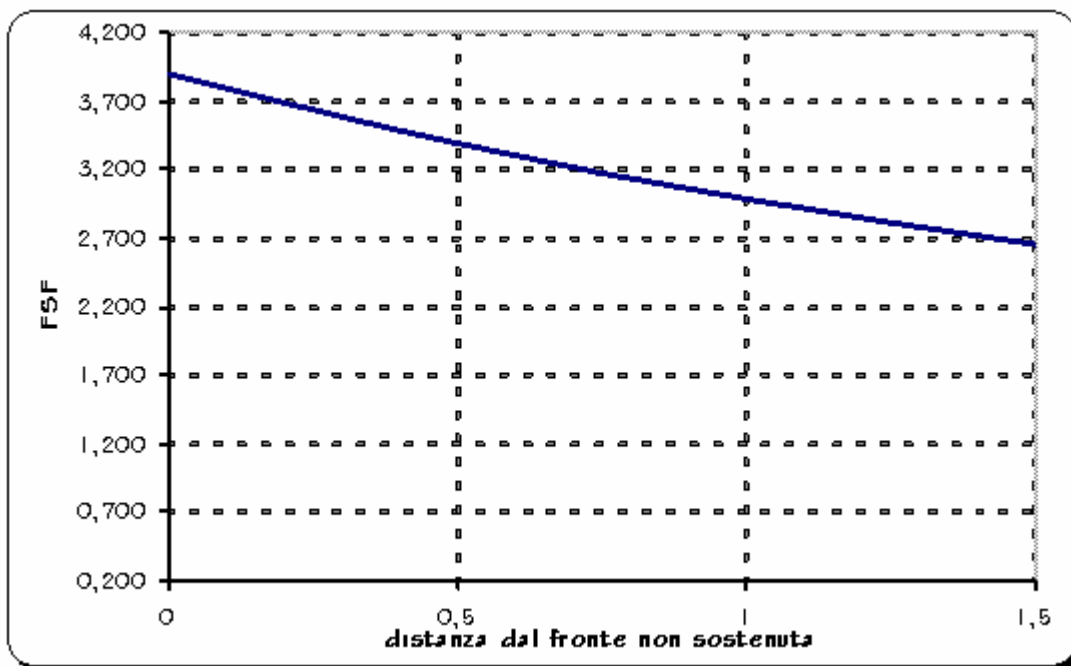


Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

a	$FSF(a)$	
0	3,895	
0,5	3,398	FS
1	2,991	2,948
1,5	2,656	2,044
2	2,378	1,593
2,5	2,145	1,322
3	1,949	1,141



Si può osservare come il coefficiente di sicurezza si mantiene al di sopra del valore accettabile pari a 2, in queste condizioni risulta pertanto possibile scavare la galleria con adeguato margine di sicurezza.

Riguardo le verifiche dei rivestimenti valgono le considerazioni effettuate per le stazioni di Borsa e Massimo.



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

7 MONITORAGGIO

Il sistema di monitoraggio dovrà permettere di:

- controllare gli effetti dei lavori sul comportamento dei vari manufatti in elevazione presenti lungo il tracciato e valutare gli spostamenti della superficie topografica (misura dei cedimenti assoluti e differenziali degli edifici, rilievo dello stato di fessurazione esistente e controllo della sua evoluzione);
- controllare la risposta tenso-deformativa del terreno sul contorno della cavità e lo stato di sollecitazione indotto sui rivestimenti della galleria durante le operazioni di scavo.

Il progetto di monitoraggio ha i seguenti scopi principali:

- controllo delle deformazioni degli edifici e delle infrastrutture di superficie,
- controllo dei cedimenti verticali e degli spostamenti orizzontali indotti nel terreno,
- taratura dei parametri di scavo.

Esso si articolerà in:

rilievi in superficie

- cedimenti e spostamenti orizzontali dei manufatti prossimi al tracciato,
- variazione delle lesioni già esistenti sugli edifici,
- cedimenti e spostamenti orizzontali del piano campagna interessato dal bacino di subsidenza indotto,

rilievi in sottoterraneo (nell'intorno della galleria)

- cedimenti di punti posti all'interno dei terreni sopra la calotta,
- spostamenti orizzontali lungo le verticali poste in prossimità della galleria,
- pressioni neutre nell'intorno dello scavo .



Metropolitana automatica Leggera della città di Palermo.

Prima linea Tratta funzionale Oreto-Notarbartolo.

Relazione Statica Preliminare - Gallerie di stazione naturali in tradizionale

Gli edifici saranno monitorati attraverso i seguenti strumenti:

- mire ottiche disposte sulle pareti perimetrali degli edifici,
- fessurimetri disposti sulle fessure esistenti.

Mire ottiche

Sono posizionate lungo i muri perimetrali degli edifici e devono permettere il rilievo degli spostamenti e delle deformazioni orizzontali (stazione di rilievo totale). Il loro numero deve essere funzione dei seguenti fattori:

- lunghezza edificio da monitorare,
- posizione edificio da monitorare rispetto all'eventuale bacino di subsidenza
- possibilità pratica di rilievo

e comunque ciascun edificio dovrà essere dotato di almeno 3 mire ottiche per ogni parete perimetrale libera, con distanza massima tra una mira e l'altra non superiore a sei metri. L'installazione delle mire ottiche e il rilievo degli spostamenti devono essere effettuati lungo muri perimetrali che siano accessibili e comunque monitorabili.

Fessurimetri

Sono posizionati a cavallo delle preesistenti fessure degli edifici e permettono, tramite la lettura, il rilievo degli spostamenti relativi tra i lembi della fessura; il loro numero verrà definito in corso d'opera in funzione di un attento rilievo dello stato di fessurazione esistente degli edifici.

Andranno inoltre previsti **Capisaldi Topografici, estensimetri e inclinometri.**

Andrà inoltre previsto un piano di monitoraggio all'interno della galleria durante le fasi di scavo; esso dovrà prevedere:

Rilievo geologico-geotecnico del fronte di scavo

Misure di convergenza

Misure di estrusione

Misure di tensione sulle centine