



Anas SpA

TRANS-EUROPEAN TRANSPORT NETWORK EXECUTIVE AGENCY  
TEN-T EA

Ministero  
delle Infrastrutture e dei Trasporti

Direzione Centrale Progettazione

# PROGETTAZIONE PRELIMINARE ED ANALISI ECONOMICA DEL TRATTO TERMINALE DEL COLLEGAMENTO DEL PORTO DI CIVITAVECCHIA CON IL NODO INTERMODALE DI ORTE PER IL COMPLETAMENTO DELL'ASSE VIARIO EST-OVEST (CIVITAVECCHIA-ANCONA) 2012-IT-91060-P

## TRATTA: MONTE ROMANO EST - CIVITAVECCHIA

### PROGETTO PRELIMINARE

PROGETTAZIONE: ANAS - DIREZIONE CENTRALE PROGETTAZIONE

**PROGETTISTA:**

Ing. Maurizio Mancinetti  
Ordine Ing. di Roma n° 19506

**IL GEOLOGO**

Dott. Geol. Stefano Serangeli  
Ordine Geol. Lazio n. 659

**IL RESPONSABILE DEL S.I.A.**

Dott. Geol. Serena Majetta

**COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE**

Arch. Roberto Roggi

**IL RESP. DEL PROCEDIMENTO**

Ing. Ilaria COPPA

**GRUPPO DI PROGETTAZIONE ANAS**

Ing. F. Bario	Geom. R. Izzo
Ing. F. Bezzi	Ing. E. Luziatelli
Geol. G. Cardillo	Geom. D. Maggi
Ing. L. Cedrone	Geom. M. Maggi
Ing. P. G. D'Armini	Ing. E. Mittiga
Sig.ra A. M. D'Aversa	Ing. M. Panebianco
Ing. A. De Leo	Dott.ssa D. Perfetti
Geom. E. De Masi	Ing. A. Petrillo
Geom. M. Diamente	Ing. F. Pisani
Ing. P. Fabbro	Arch. R. Roggi
Ing. G. Giovannini	

**SERVIZI SUPPORTO ESTERNO**

PROTOCOLLO

DATA

VISTO: IL DIRETTORE CENTRALE  
Ing. Ugo DIBENNARDO

## OPERE IN SOTTERRANEO GALLERIA CALISTRO Relazione Tecnica

**CODICE PROGETTO**

PROGETTO      LIV. PROG.      N. PROG.

L0402D    P    1301

**NOME FILE**

P01\_GN00\_OST\_RE01\_C.dwg

**CODICE ELAB.**

P01GN00OSTRE01

REVISIONE

C

TAVOLA

1 DI 1

SCALA:

1:50

REV.	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
C	REVISIONE	CEDRONE	MANCINETTI	COPPA
B	REVISIONE	CEDRONE	MANCINETTI	COPPA
A	EMISSIONE	CEDRONE	MANCINETTI	COPPA

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>NORMATIVE, RACCOMANDAZIONI, LINEE GUIDA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>CARATTERISTICHE DEI MATERIALI .....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>DESCRIZIONE DELLE OPERE IN SOTTERRANEO.....</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>SINTESI DEL QUADRO GEOLOGICO-GEOMECCANICO (FASE CONOSCITIVA).....</b>	<b>8</b>
<b>5.1</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOLOGICO e IDROGEOLOGICO .....</b>	<b>8</b>
<b>5.2</b>	<b>VALUTAZIONE DEI PARAMETRI GEOMECCANICI DI PROGETTO .....</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>ANALISI DEL COMPORTAMENTO DEFORMATIVO ALLO SCAVO (FASE DI DIAGNOSI)</b>	
	10	
<b>6.1</b>	<b>VALUTAZIONE DELLA STABILITÀ AL FRONTE .....</b>	<b>10</b>
<b>6.1.1</b>	<b>CATEGORIA A: galleria a fronte stabile .....</b>	<b>11</b>
<b>6.1.2</b>	<b>CATEGORIA B: galleria a fronte stabile a breve termine .....</b>	<b>11</b>
<b>6.1.3</b>	<b>CATEGORIA C: galleria a fronte instabile .....</b>	<b>12</b>
<b>6.2</b>	<b>DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO. ....</b>	<b>12</b>
<b>7</b>	<b>FASE DI TERAPIA .....</b>	<b>18</b>
<b>7.1</b>	<b>SEZIONI TIPO ADOTTATE .....</b>	<b>19</b>
<b>7.1.2</b>	<b>Sezione tipo B1.....</b>	<b>21</b>
<b>7.1.3</b>	<b>Sezione tipo B2.....</b>	<b>21</b>
<b>7.1.4</b>	<b>Sezione tipo C2.....</b>	<b>21</b>
<b>7.2</b>	<b>OPERE D'IMBOCCO E TRATTE A BASSA COPERTURA .....</b>	<b>24</b>
<b>8</b>	<b>MONITORAGGIO .....</b>	<b>27</b>

## 1 PREMESSA

Nella presente relazione si affrontano le problematiche progettuali connesse alla realizzazione delle opere in sotterraneo facenti parte del Progetto preliminare del tratto terminale (Monte Romano Est – Civitavecchia) di collegamento del Porto di Civitavecchia con il nodo intermodale di Orte per il completamento dell'asse viario Est-Ovest (Civitavecchia – Ancona), riportando la descrizione delle problematiche connesse, dei requisiti funzionali, e delle modalità di realizzazione dell'opera.

La strada in progetto appartiene alla categoria B in accordo con il D. M. Infrastrutture e Trasporti n° 6792 del 5 novembre 2001 (Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade), con una piattaforma stradale, che definisce le caratteristiche dimensionali della galleria, di ml 9,75, così ripartita:

– Corsia di marcia normale	ml	3,75
– Corsia di marcia di sorpasso	"	3,75
– Banchina laterale destra	"	1,75
– Banchina laterale sinistra	"	0,50

In tutti i casi l'altezza libera nella galleria, misurata sulla verticale a partire da qualsiasi punto dalla piattaforma, risulta uguale o maggiore di 4,80 ml., conformemente a quanto prescritto dal dal D.M. 2001. In funzione dell'andamento planimetrico dell'asse, dovranno essere previsti eventuali allargamenti della sede stradale per esigenze di visibilità.

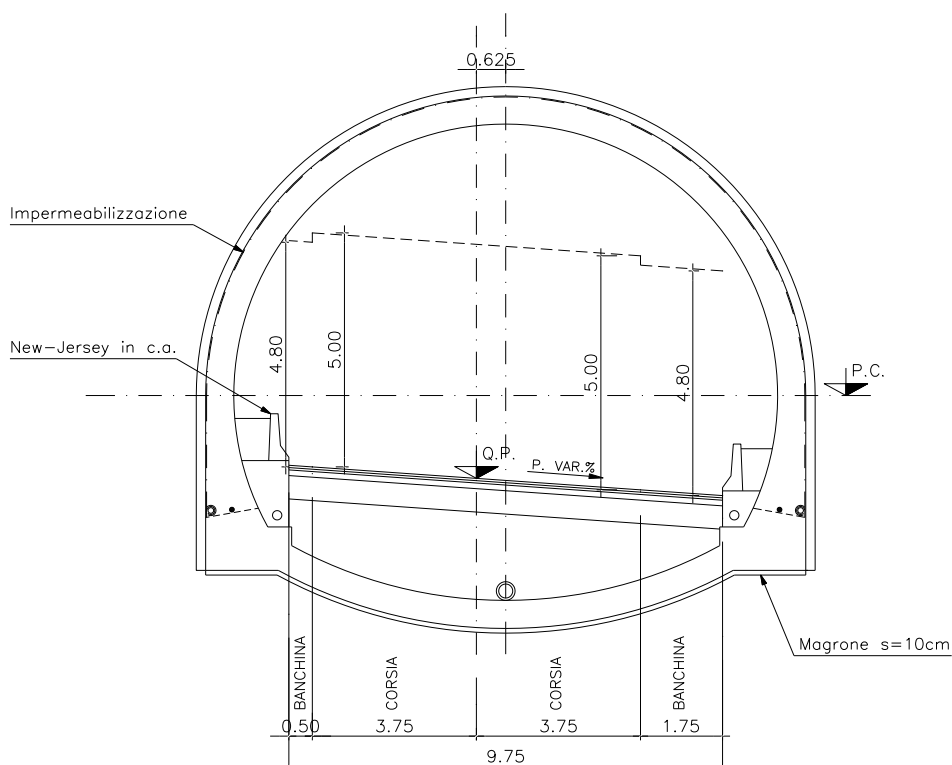


Figura 1 - Sezione tipo galleria naturale - Categoria B

La metodologia di lavoro è stata sviluppata secondo l'approccio del metodo ADECO-RS, con 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 classi 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 introduzione al 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 del terreno e dei rivestimenti durante lo scavo.

In questa fase di Progetto la scelta delle sezioni tipo è stata condotta facendo ricorso al metodo delle linee caratteristiche.

## 2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 NORMATIVE, RACCOMANDAZIONI, LINEE GUIDA

- [N1] **Decreto Ministeriale 5 novembre 2001, n. 6792 (S.O. n.5 alla G.U. n.3. del 4.1.02)** - *Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade.*
- [N2] **Decreto Ministeriale 14/09/2005** - *Norme tecniche per le costruzioni.*
- [N3] **Decreto Ministeriale LL.PP. 9/1/1996** - *Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche.*
- [N4] **Decreto Ministeriale LL.PP. 16/1/1996** - *Criteri generali per la verifica della sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi.*
- [N5] **Circolare 15/10/1996 Ministero LL.PP.** - *Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche di cui al decreto ministeriale 9/1/1996.*
- [N6] **Circolare 4/7/1996 Ministero LL.PP.** - *Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche di cui al decreto ministeriale 16/1/1996.*
- [N7] **Decreto Ministeriale LL.PP. 11/3/1988** - *Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione*
- [N8] **Circolare LL.PP. 24/9/1988 n.30483 - L.2.2.1974, n.64 - art.1** - *Istruzioni per l'applicazione del D.M. 11/3/1988.*
- [N9] **A.F.T.E.S. Groupe de Travail n. 7 – Tunnel support and lining.** - *"Recommendations for use of convergence – confinement method"*

## 2.2 BIBLIOGRAFIA

- [B1] **Lombardi G., Amberg W. A. (1974).** *Une méthode de calcul élasto-plastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine. Congresso Internazionale ISRM, Denver, 1974.*
- [B2] **Lunardi P. (2000).** *The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils. Tunnels & Tunnelling International, May 2000.*
- [B3] **Panet M., Guenot A. (1982).** *Analysis of convergence behind the face of a tunnel – Tunnelling '82, Brighton, 197-204.*
- [B4] **A.F.T.E.S. (1993).** *Tunnel et ouvrages souterrains – Supplement n°117.*
- [B5] **Hoek, E. and Brown, E.T. 1980.** *Underground Excavations in Rock, London, Instn Min. Metall.*
- [B6] **Hoek, E. 1990.** *Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion. Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts. 12 (3), 227-229.*
- [B7] **Hoek, E., Kaiser P.K. and Bawden W.F. 1995.** *Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam, Balkema.*
- [B8] **Marinos. P, and Hoek, E. 2001.** *– Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. Accepted for publication in the Bulletin of the International Association of Engineering Geologists.*
- [B9] **Pietro Lunardi - Progetto e costruzione di gallerie - Analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli (ADECO-RS), Hoepli**

### **3 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI**

Di seguito sono riportate le caratteristiche meccaniche dei materiali che vanno a costituire gli elementi strutturali:

#### **CALCESTRUZZO PROIETTATO**

Rck 28 gg  $\geq 25\text{MPa}$

Incidenza fibre  $\geq 35\text{ Kg/mc}$

#### **ELEMENTI STRUTTURALI IN VETRORESINA (A 3 PIATTI O TUBI)**

Densità  $\geq 1.9\text{t/mc}$

Resistenza a trazione  $f_{yk} \geq 1000\text{ MPa}$

Resistenza a taglio  $\tau \geq 140\text{ MPa}$

Contenuto in vetro  $\geq 60\%$

#### **ACCIAI**

Acciaio centine, piastre e calastrelli: S275

Catene: FeB 32k

Micropali/infilaggi: S355

Acciaio per armatura: B450C

Bulloni classe 8.8 a dado classe 8

#### **DRENAGGI**

Tubi microfessurati in PVC ad alta resistenza (4.5 Mpa alla trazione)

#### **IMPERMEABILIZZAZIONE**

Teli in PVC sp.=2+-0.5 mm densità  $\geq 1.3\text{ g/cm}^2$

Strato d tessuto non tessuto di 400 gr/mq a filo continuo

#### **CALCESTRUZZO DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO**

Rck  $\geq 35\text{ Mpa}$

Copriferro (inteso come ricoprimento minimo sull'armatura)  $\geq 4\text{ cm}$

## 4 DESCRIZIONE DELLE OPERE IN SOTTERRANEO

L'itinerario prevede la realizzazione di una galleria naturale "Calistro" scavata con metodo tradizionale, di lunghezza pari a 2070m per entrambe le carreggiate. La galleria di progetto, che verrà realizzata con tunnel a doppio fornice, è prevista con sagoma policentrica di raggio di intradosso pari a 6.10 m in calotta e 10.00 m in arco rovescio. La copertura minima è di circa 5 metri, mentre quella massima è di circa 90 metri. La galleria naturale presenta una sezione di scavo media di circa 150mq.

Con riferimento alle normative vigenti e tenuto conto della lunghezza della galleria naturale in questione, si dovranno inoltre prevedere piazzole di sosta aventi dimensioni minime di 45 x 3 ml con interdistanza di 600m per ogni senso di marcia con una sezione di scavo pari a ca. 200mq (**n° 2** piazzole di sosta per ogni singola canna). Dovranno inoltre essere previsti collegamenti pedonali ogni 300m (**n° 6** by-pass pedonali) e collegamenti per il passaggio di veicoli di soccorso o di servizio ogni 900m (**n° 2** by-pass carrabili).

Le progressive di imbocco della galleria naturale e dei portali sono definite nella seguente tabella:

<b>GALLERIA CALISTRO</b>	<i>BECCO DI FLAUTO</i>	<i>GALLERIA ARTIFICIALE</i>	<i>GALLERIA NATURALE</i>	<i>GALLERIA NATURALE</i>	<i>GALLERIA ARTIFICIALE</i>	<i>BECCO DI FLAUTO</i>
<b><u>carreggiata sud</u></b>	2+600	2.620	2+650	4+620	4+650	4+670
<b><u>carreggiata nord</u></b>	2+650	2+670	2+685	4+670	4+700	4+720

Le gallerie saranno equipaggiate con tutte le dotazioni infrastrutturali ed impiantistiche necessarie per rispondere ai requisiti di sicurezza dell'esercizio in rispondenza al DM 5/11/2001 ed alla Direttiva Europea 2004/54/CE.



## **5. SINTESI DEL QUADRO GEOLOGICO-GEOMECCANICO (FASE CONOSCITIVA)**

### **5.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO e IDROGEOLOGICO**

La galleria Calistro si sviluppa interamente nel flysch argillo-scaglioso, argille scagliettate grigio piombo, marnose, con evidenti superfici di discontinuità per taglio, intensamente tettonizzate. Interessate da venature calcitiche. Subordinati strati litoidi (0,5m - 2m) di calcari grigi, a frattura concoide o aciculare. Verso NE affiora anche come argille scagliose rosso-vinaccia, verdastre e calcari marnosi litoidi. Frequentemente ricoperto da una coltre eluviale costituita da blocchi planari di calcari marnosi grigi compatti, a frattura concoide (frammenti di strati) immersi in suolo limo-argilloso, con evidenze di ossidazione.

Nei profili geomeccanici è indicata la successione litologica lungo il tracciato, messa a punto al fine di individuare le modalità di scavo ed effettuare quindi previsioni sui tempi e sui costi di realizzazione delle opere, obiettivo primario di questa fase di progettazione.

Le progressive che individuano i passaggi litologici sono state derivate da carte geologiche e geostrutturali, sono stati inoltre fatti una serie di sondaggi geognostici a carotaggio continuo (anno 2013) e prove in sito indirizzati alla definizione delle caratteristiche geomeccaniche dei terreni e del quadro idrogeologico di riferimento.

### **5.2 VALUTAZIONE DEI PARAMETRI GEOMECCANICI DI PROGETTO**

Ai fini della caratterizzazione geomeccanica dei terreni per la progettazione delle gallerie, sono stati utilizzati i dati desunti da bibliografia integrati con i parametri ottenuti dai risultati di indagini eseguite in sito e sui campioni indisturbati prelevati.

Attraverso l'applicazione della classificazione G.S.I. (Hoek & Marinos, 2001), per le formazioni a carattere litoide strutturalmente complesse e attraverso l'uso dei parametri di resistenza che caratterizzano il modello di Hoek-Brown, si sono ricavati, attraverso interpolazione, gli intervalli equivalenti dei parametri relativi al modello di Mohr-Coulomb.

Per i terreni si sono desunti, direttamente dalle informazioni a disposizione, i parametri secondo il modello di Mohr-Coulomb. Di seguito si riportano una serie di tabelle di sintesi, dei campi di variabilità dei parametri suddetti rappresentativi di tutte le litologie interessanti le gallerie, che

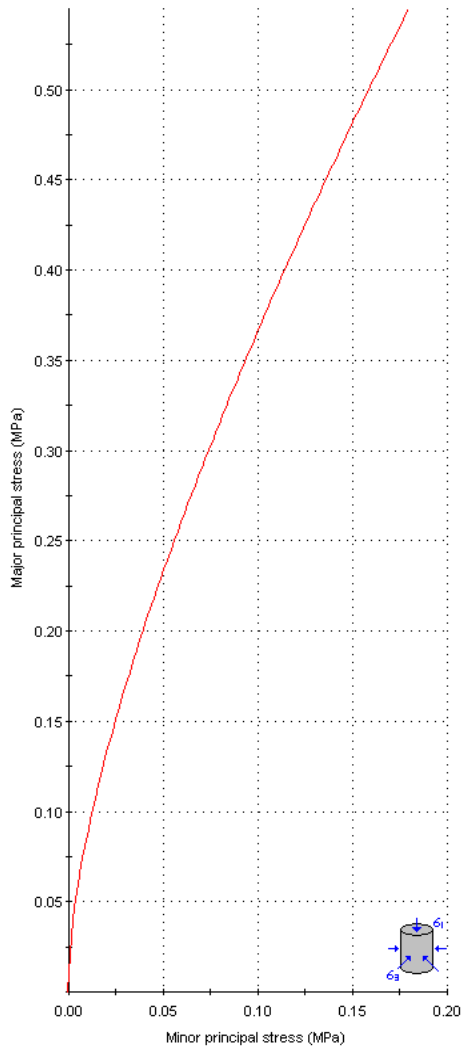
saranno impiegati nelle analisi preliminari volte alla valutazione del comportamento del fronte e del cavo.

## GALLERIA CALISTRO

Progressive	LITOLOGIA	GSI	$\sigma_c$ (Mpa)	Coperture (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	CARATTERISTICHE DI RESISTENZA			E (GPa)
						$C_u$ (kPa)	$C'$ (kPa)	$\phi$	
2+650 4+720	Flysch argilloso - scaglioso	10 - 20	3 - 8	40	19 - 21	-	20 - 40	21 - 23	0.15 - 0.35

Nota: Data la notevole eterogeneità del materiale le caratteristiche geomeccaniche possono variare a seconda del prevalere di una facies su un'altra; mediamente comunque i valori assunti per le caratteristiche d'ammasso si ritengono realistici e sufficientemente cautelativi.

### Analysis of Rock Strength using RocLab



#### Hoek-Brown Classification

intact uniaxial compressive strength = 3 MPa  
GSI = 20  $m_i = 10$  Disturbance factor = 0.3

#### Hoek-Brown Criterion

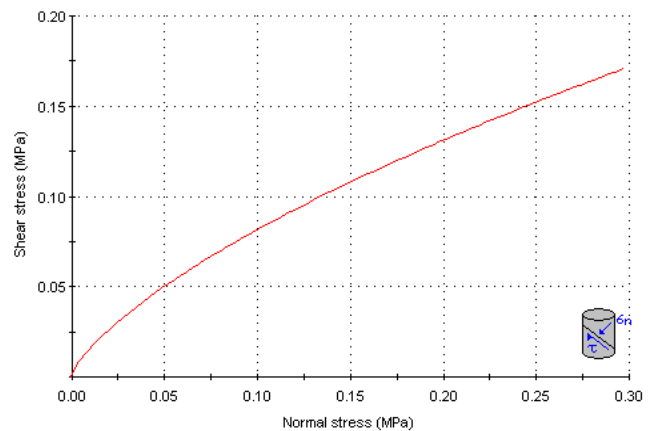
$m_b = 0.347$   $s = 0.0001$   $a = 0.544$

#### Mohr-Coulomb Fit

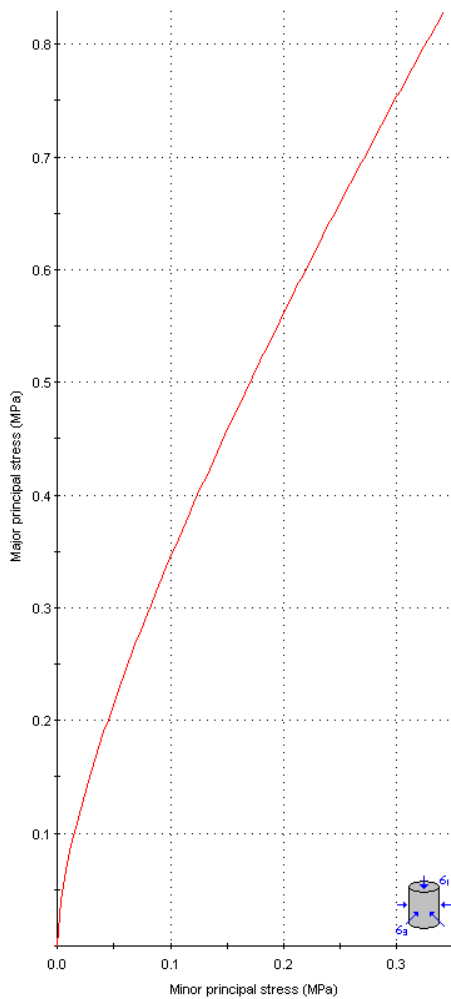
cohesion = 0.026 MPa friction angle = 27.23 deg

#### Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.000444 MPa  
uniaxial compressive strength = 0.014 MPa  
global strength = 0.185 MPa  
modulus of deformation = 268.64 MPa



## Analysis of Rock Strength using RocLab

**Hoek-Brown Classification**

intact uniaxial compressive strength = 3 MPa  
 GSI = 15  $m_i = 10$  Disturbance factor = 0.2

**Hoek-Brown Criterion**

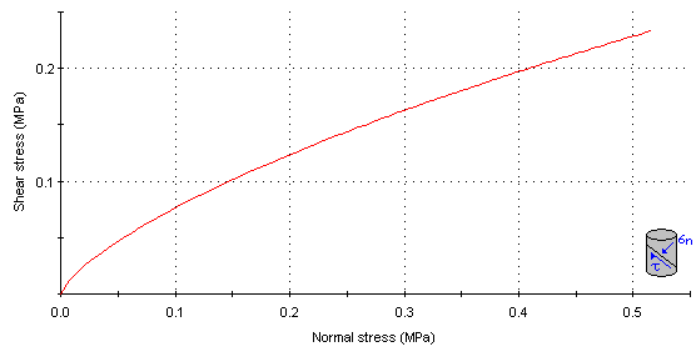
$m_b = 0.343$   $s = 4.03e-5$   $a = 0.561$

**Mohr-Coulomb Fit**

cohesion = 0.036 MPa friction angle = 21.99 deg

**Rock Mass Parameters**

tensile strength = -0.000353 MPa  
 uniaxial compressive strength = 0.010 MPa  
 global strength = 0.166 MPa  
 modulus of deformation = 243.66 MPa



Gli intervalli proposti risultano essere indicativi e talora ampi a causa di una dispersione dei dati osservati e soprattutto al fine di tenere conto del grado di alterazione e della eterogeneità presente in diverse tratte delle formazioni.

I valori inferiori dell'intervallo si applicano principalmente a campi di copertura modesti ovvero in presenza di stati tensionali contenuti.

## 6. ANALISI DEL COMPORTAMENTO DEFORMATIVO ALLO SCAVO (FASE DI DIAGNOSI)

### 6.1 VALUTAZIONE DELLA STABILITÀ AL FRONTE

Il processo di verifica dello scavo della galleria (metodo ADECO-RS) 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 secondo il metodo ADECO-RS sono definite secondo le seguenti caratteristiche.

### **6.1.1 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.

### **6.1.2 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 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.

### **6.1.3 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.

## **6.2 DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO.**

Per la definizione di tali categorie si fa ricorso al metodo delle curve caratteristiche del fronte e del cavo.

Le linee caratteristiche, o meglio il metodo convergenza-confinamento, consistono nel simulare lo scavo di una galleria nell'ipotesi di simmetria assiale e di stato di deformazione piana.

Lo scavo è rappresentato come una graduale riduzione di una pressione fittizia "p" applicata alle pareti della galleria, tramite cui si simula il progressivo deconfinamento della roccia prodotto dall'avvicinarsi del fronte di scavo alla sezione di calcolo e al successivo avanzamento del fronte stesso, cui corrisponde una convergenza radiale "u" crescente in funzione delle caratteristiche dell'ammasso.

Se la galleria è scavata in assenza di sostegni, il valore finale della pressione di confinamento è pari a 0; in caso contrario, allo stato finale, è presente una pressione di confinamento  $> 0$  che rappresenta la pressione di equilibrio del cavo ottenuta dall'intersezione della linea caratteristica della cavità e dei rivestimenti impiegati.

Quest'ultima curva, a sua volta, dipende dalle proprietà dei materiali impiegati e dalle deformazioni subite dall'ammasso prima della posa in opera dei sostegni provvisori e quindi, in ultima analisi, è legata al comportamento del fronte di scavo ed al tipo di interventi previsti in avanzamento.

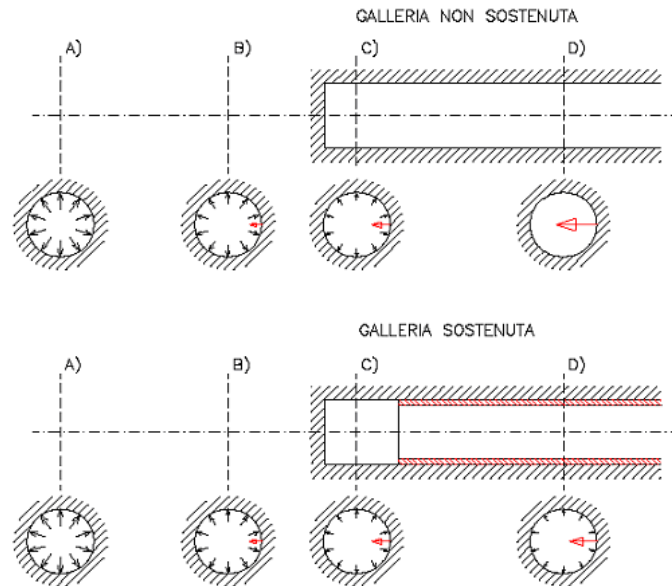


Figura 1: Progressivo deconfinamento del bordo di scavo per simulare l'avanzamento della galleria

Mediante la sovrapposizione degli effetti delle linee "caratteristiche" della galleria, dei sostegni provvisori e definitivi e del fronte, è possibile ridurre il problema tridimensionale in prossimità del fronte di scavo ad un problema bidimensionale; l'intersezione delle varie curve permette di determinare graficamente il comportamento della galleria allo scavo.

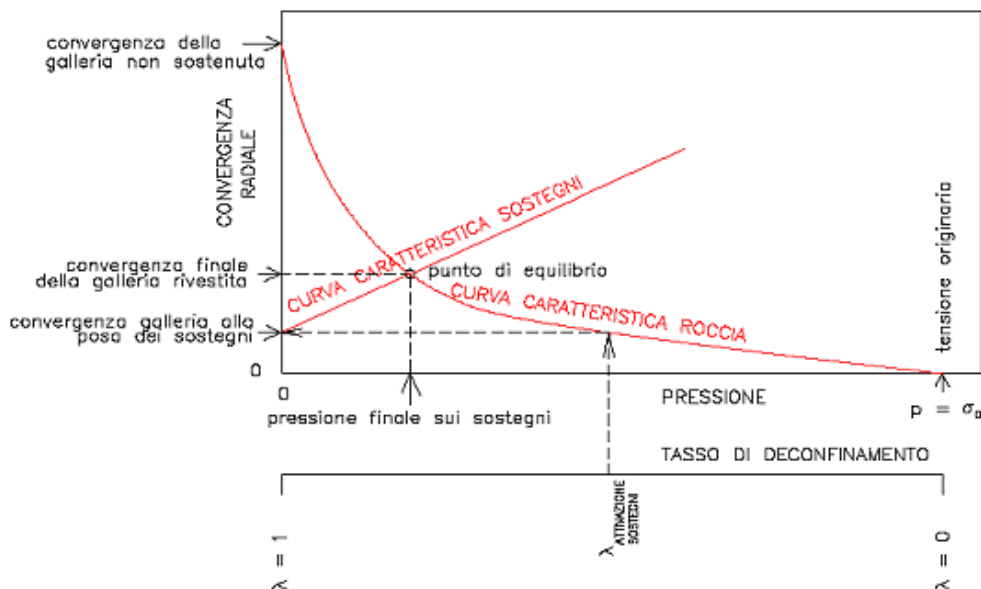


Figura 2: Curve caratteristiche – Interazione tra ammasso roccioso e sostegni

Come accennato poco sopra, le curve caratteristiche da considerare per risolvere completamente il problema sono tre e sono rispettivamente:

- la curva caratteristica della galleria o di convergenza;
- la curva caratteristica del rivestimento o di confinamento;
- la curva caratteristica del fronte.

Il comportamento del fronte e del cavo è funzione, oltre che delle caratteristiche geometriche della cavità stessa e dei carichi litostatici cui è soggetta, 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.

Il metodo delle linee caratteristiche consente di valutare la risposta deformativa del fronte e della cavità nelle ipotesi di sforzo originario isotropo e galleria circolare, ed è pertanto applicabile nel caso di galleria profonda: in queste analisi si sono considerate coperture minime variabili tra 2.5 D e 3 D.

Quali parametri di resistenza e deformabilità per il calcolo delle curve caratteristiche si sono indicativamente adottati i valori medi nelle zone con bassa copertura (comunque nei limiti di applicabilità delle linee caratteristiche). Nelle zone a media ed elevata copertura si sono adottati parametri superiori, ma sempre interni al dominio di resistenza definito.

Di seguito sono riportate le sezioni analizzate, con indicate le formazioni a comportamento geomeccanico omogeneo, le coperture, e i valori dei parametri del modello di Mohr-Coulomb utilizzati nelle analisi con le linee caratteristiche.

ANALISI	Formazione	Cop. m	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	Parametri di M-C delle Linee Caratteristiche		
				$c_u/c'$ kPa	$\varphi^\circ$	E MPa
Sezione I	Flysch in facies di argille scagliose	40	20	30	22	200
Sezione II	Flysch in facies di argille scagliose	60	20	30	22	300
Sezione III	Flysch in facies di argille scagliose	90	20	40	23	350

Le linee caratteristiche sono riportate in forma grafica nelle pagine che seguono; nei grafici è riportata la curva caratteristica del cavo libero, come previsione sul comportamento del cavo in condizioni intrinseche (non rivestito).

Nella tabella seguente si riportano, per l'analisi del fronte, il valore della convergenza al fronte, l'entità dell'anello plastico al contorno del cavo (quale rapporto tra il raggio plastico ed il raggio teorico di scavo  $R_p/R_o$ ) e la conseguente categoria di comportamento individuata; tra parentesi è indicata la categoria superiore per situazioni di frontiera fra due categorie di comportamento nei casi in cui modeste variazioni della parametrizzazione possono variare la categoria di comportamento.

Qualora le linee caratteristiche, valutate in assenza di interventi, abbiano evidenziato elevati valori di convergenze e/o plasticizzazioni al contorno del cavo non gestibili in fase di scavo, si è ipotizzato di adottare, come meglio discusso nel capitolo 7 dedicato alla terapia, interventi di consolidamento in avanzamento al fronte ed al contorno del cavo.

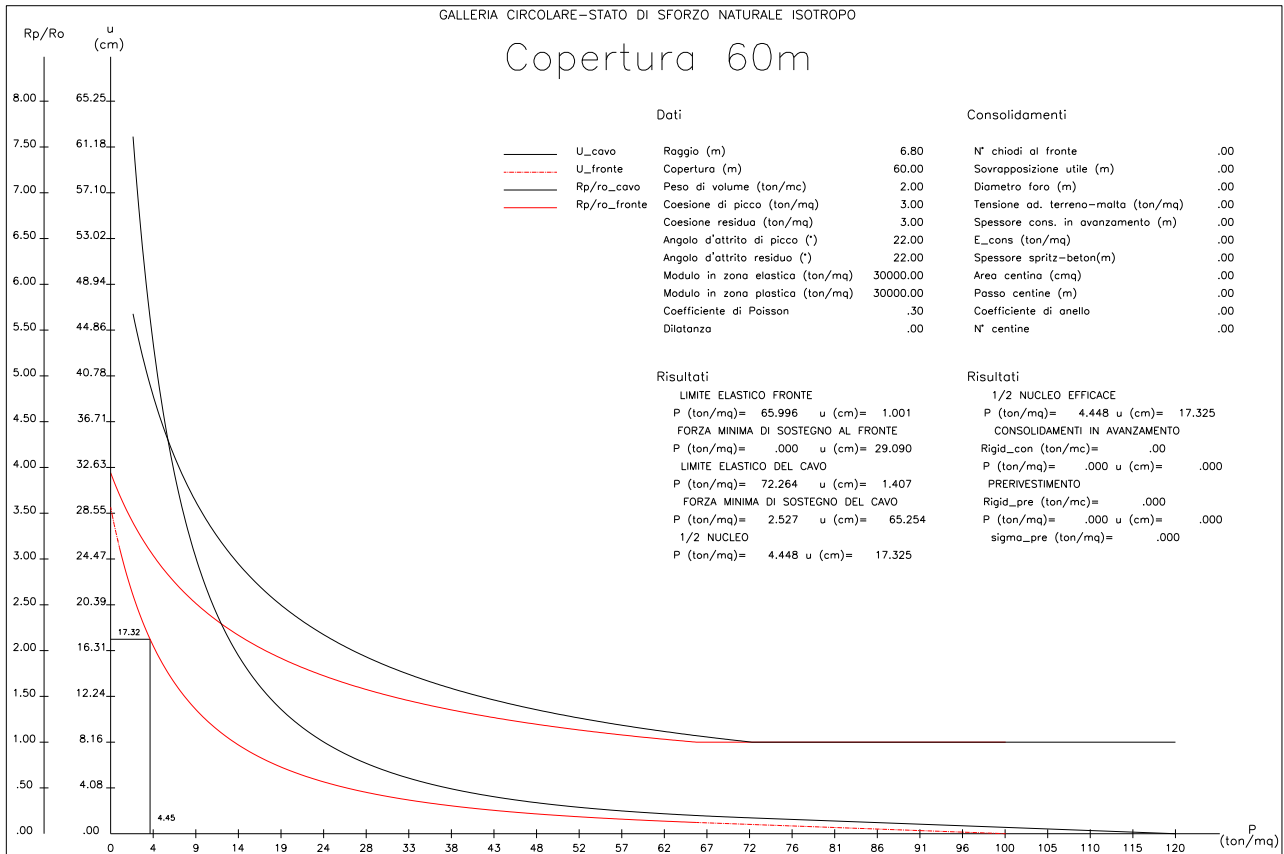
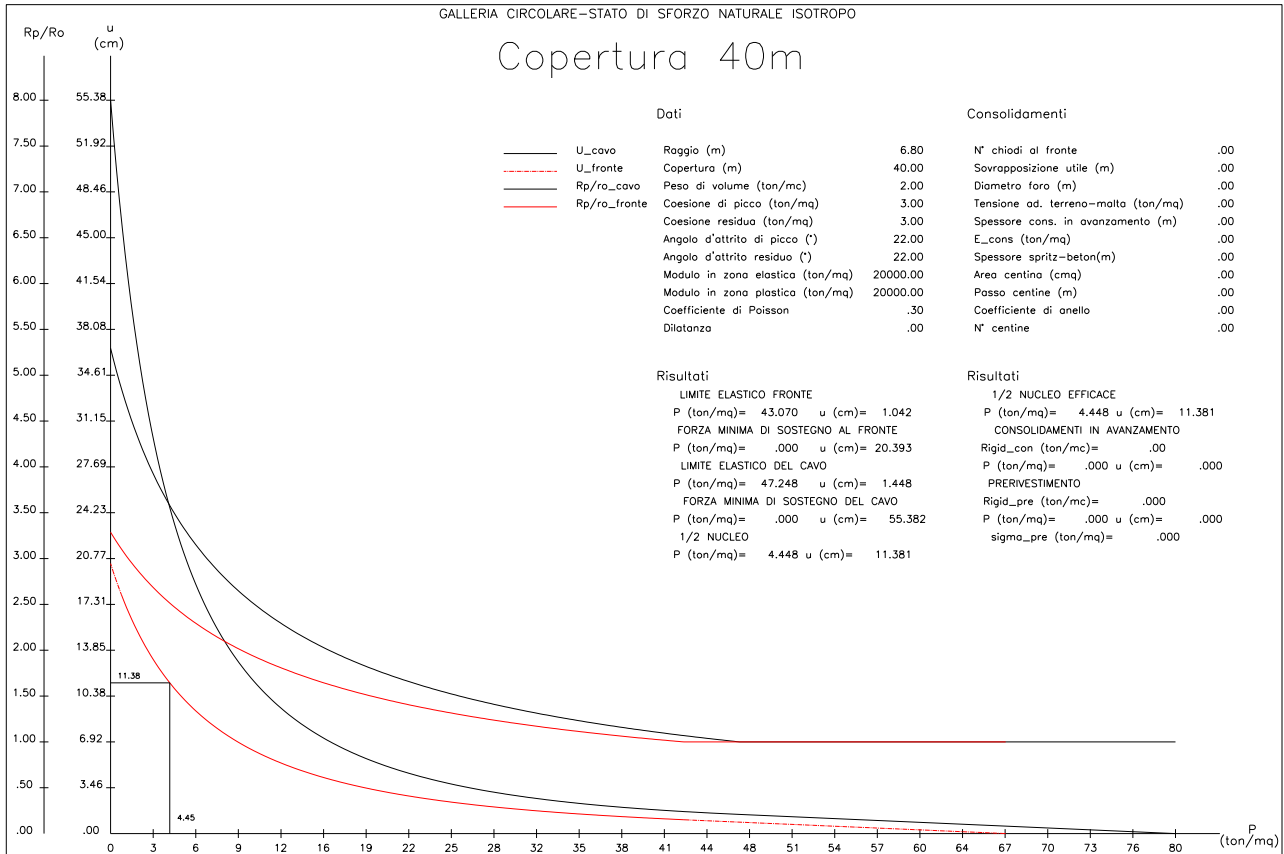
In sede di Progetto Definitivo ed Esecutivo occorrerà svolgere analisi di dettaglio per simulare più realisticamente la successione delle fasi esecutive e l'efficacia degli interventi di consolidamento adottati.

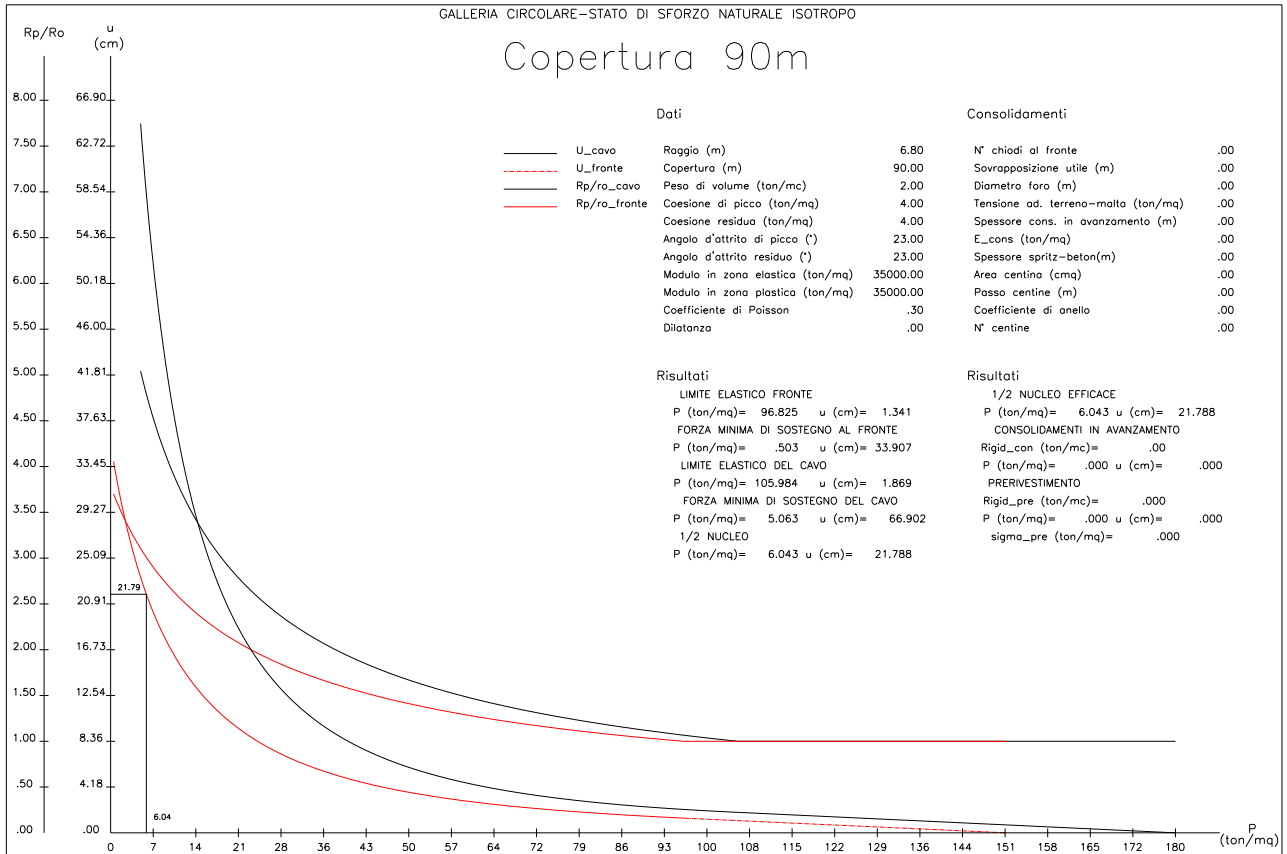
<b>ANALISI</b>	<b>Formazione</b>	<b>Copertura (m)</b>	<b>Convergenza fronte Uf (cm)</b>	<b>Categoria di comportamento ADECO-RS</b>
<b>Sezione I</b>	Flysch in facies di argille scagliose	40	11.38	C
<b>Sezione II</b>	Flysch in facies di argille scagliose	60	17.32	C
<b>Sezione III</b>	Flysch in facies di argille scagliose	90	21.79	C

Nei profili geomeccanici delle gallerie in oggetto (vedi documenti di riferimento) si è proceduto ad individuare, nell'ultima finca, in funzione dei risultati delle linee caratteristiche esaminate e delle considerazioni esposte, le percentuali delle categorie di comportamento (A, B o C) per ciascuna tratta a comportamento geotecnico omogeneo ed in funzione delle coperture e delle problematiche allo scavo.



Progetto Preliminare





## 7. FASE DI TERAPIA

Le gallerie saranno realizzate mediante scavo in tradizionale, con esplosivo o demolitore meccanico, a seconda del contesto geomeccanico attraversato. La sezione di scavo, ad esclusione dei fuori scavo, risulta variabile tra 143.5m<sup>2</sup> e 169.7m<sup>2</sup>, in dipendenza dagli spessori dei rivestimenti di prima fase e definitivi. In ammassi di caratteristiche geomeccaniche scadenti, si procederà alla realizzazione di consolidamenti in avanzamento, mediante elementi strutturali in vetroresina iniettati. Effettuato lo scavo e le operazioni di smarino, si procederà alla posa in opera dei rivestimenti di prima fase, mediante spritz-beton, bulloni e/o centine metalliche al fine di garantire l'adeguato confinamento delle pareti di scavo. A distanza dal fronte di scavo, in funzione del comportamento deformativo del cavo, si procederà al getto dei rivestimenti definitivi di arco rovescio, così da contrastare il piede del rivestimento di prima fase, e, previa posa dell'impermeabilizzazione, al getto dei rivestimenti definitivi di calotta. Al piede dello strato di impermeabilizzazione esterna, si disporrà una canaletta microfessurata di raccolta delle acque, con scarico nel condotto di smaltimento delle acque bianche. I rivestimenti definitivi saranno armati o in calcestruzzo semplice in funzione delle caratteristiche dell'ammasso e delle coperture presenti.

Nel caso di presenza di trattamenti di rinforzo del fronte con barre di vetroresina (VTR) posti in opera in avanzamento, il loro effetto stabilizzante può utilmente essere tenuto in conto, incrementando la resistenza coesiva dell'ammasso.

Infatti la chiodatura esercita un'azione di contenimento passivo del fronte, rappresentabile, nel caso di impiego di elementi strutturali in VTR, da una tensione di confinamento  $\sigma_{3V}^{VTR}$  fittizia, funzione dei parametri tecnici del trattamento secondo le equazioni:

$$\sigma_{3V}^{VTR_A} = \frac{\tau_A \cdot L_A \cdot 2p_A}{A_i}$$

$$\sigma_{3V}^{VTR_B} = \frac{\sigma_T \cdot A_T}{A_i}$$

$$\sigma_{3V}^{VTR} = \text{minimo} (\sigma_{3V}^{VTR_A}, \sigma_{3V}^{VTR_B})$$

dove:

$\tau_a$  = tensione di aderenza ammasso-fondazione

$L_A$  = semi-lunghezza dell'elemento di rinforzo (si assume che mezzo elemento costituisca la fondazione)

$2p_A$  = perimetro della sezione reagente a sfilamento

$\sigma_t$  = resistenza a trazione dell'elemento di rinforzo

$A_i$  = area di influenza di un elemento strutturale

$A_t$  = sezione dell'elemento resistente a trazione

L'effetto di  $\sigma_3 VTR$  può essere considerato come incremento di resistenza uniassiale dell'ammasso:

$$\Delta\sigma_{CA}^{Fronte} = \frac{1 + \sin \phi_{picco}}{1 - \sin \phi_{picco}} \cdot \sigma_3^{VTR}$$

L'incremento di resistenza corrisponde ad un incremento di coesione del fronte di scavo, valutabile mediante la seguente espressione:

$$\Delta c = \Delta\sigma_{CA}^{Fronte} \cdot \tan(45 + \phi/2) / 2$$

## 7.1 SEZIONI TIPO ADOTTATE

In merito alle modalità di avanzamento delle gallerie è prevista l'adozione dello scavo a piena sezione, per sfondi di lunghezza funzione delle caratteristiche geomeccaniche degli ammassi attraversati e del loro comportamento allo scavo; tale metodologia di scavo consente il controllo delle deformazioni al contorno del cavo (e conseguentemente dei livelli di plasticizzazione), con un rapido contenimento del cavo a seguito dello scavo, mediante il getto dell'arco rovescio a ridosso del fronte, quale incremento della capacità portante dei rivestimenti di prima fase. Il rivestimento definitivo di calotta sarà gettato ad una distanza funzione dello stato deformativo del prerinvestimento e della relativa pressione esercitata dall'ammasso circostante.

Il rivestimento di prima fase è costituito da uno strato di spritz-beton e centine metalliche, talvolta anche bulloni metallici (ad ancoraggio continuo) in funzione del grado di separazione strutturale e dei carichi preventivabili sui rivestimenti. Tali interventi rappresentano azioni di "contenimento" del cavo. In contesti spingenti si adotterà una sagoma di scavo, in corrispondenza dei piedritti, curvilinea.

Quali azioni di "pre-contenimento" in avanzamento al fronte si è previsto l'impiego di elementi strutturali in vetroresina a semplice cementazione in ammassi alquanto fratturati ed alterati ed in ammassi a litologia prevalentemente marnosa o argillosa; in particolare questa azione di precontenimento del fronte appare molto importante negli ammassi spingenti appartenenti alle formazioni del Flysch in facies di argille scagliose.

Quali azioni di "pre-consolidamento" in avanzamento al contorno del cavo si sono previsti elementi in VTR iniettati a pressione mediante valvole (o cementati mediante miscele espansive) con schema a quinconce tale da determinare la formazione di un "arco consolidato". Questo assolve alla funzione di "scaricare" il nucleo di scavo riducendo, in combinazione con il trattamento del fronte, i fenomeni estrusivi del nucleo, i valori di pre-convergenza al fronte e conseguentemente controllando lo stato di plasticizzazione dell'ammasso e le pressioni sul cavo. Tale intervento permette di evitare il decadimento dei parametri geomeccanici dell'ammasso verso condizioni residue.

In presenza di ammassi molto fratturati, ma non spingenti, potranno essere impiegati come interventi di "presostegno" tubi metallici in corrispondenza della calotta. Questa situazione appare particolarmente idonea per situazioni a basse coperture in presenza di rocce tenere o flysch.

Dovranno inoltre essere previsti drenaggi in avanzamento nelle tratte ove è presente il rischio di venute d'acqua.

I rivestimenti sono previsti in calcestruzzo armato e non, in funzione della presenza di zone caratterizzate da rocce alquanto fratturate, faglie, spinte elevate o nelle tratte a bassa copertura, per le quali si è prevista armatura o in arco rovescio o sia in calotta che in arco rovescio: più precisamente si può ipotizzare l'adozione di armatura in arco rovescio per le sezioni di avanzamento tipo B e per l'intero rivestimento per le sezioni tipo C.

A tergo dei rivestimenti definitivi di calotta e piedritto si porrà in opera l'impermeabilizzazione, costituita da uno strato di geotessuto e da una guaina in PVC.

Le sezioni tipo di avanzamento prevedono gli interventi descritti nei paragrafi che seguono, intesi quali quantità medie, da calibrare in funzione del comportamento deformativo riscontrato allo scavo attraverso l'analisi delle misure e dei rilievi di un apposito monitoraggio, descritto nel capitolo 8.

### **7.1.1 Sezione tipo B1**

La sezione tipo B1 (campi di 9.00m) è costituita da:

- Eventuali 3+3 dreni nel caso di presenza d'acqua;
- 50±15% elementi VTR cementati al fronte, L=15.00m, sovr. 3.00 – 5.00m;
- centine 2IPN180/0.80 a 1.20m;
- spritz-beton fibrorinforzato o armato con rete elettrosaldato fino ad uno spessore totale di 25cm;
- impermeabilizzazione costituita da geotessuto, e un manto in pvc;
- arco rovescio in cls, sp. 80cm gettato da 0.5Ø a 1Ø dal fronte;
- rivestimento di calotta in cls. sp. 70cm gettato da 3Ø a 5Ø dal fronte.

### **7.1.2 Sezione tipo B2**

La sezione tipo B2 (campi di 11.50m) è costituita da:

- Eventuali 3+3 dreni nel caso di presenza d'acqua;
- 37 tubi metallici Ø127/10 mm, L=15.00 m sovr. 3.50 m, per 120° di calotta, valvolati (1 vl/m);
- 60±15% elementi VTR cementati al fronte, L=20.00m, sovr. 8.50m;
- centine 2IPN180/0.80 - 1.20m;
- spritz-beton fibrorinforzato o armato con rete elettrosaldato fino ad uno spessore totale di 25cm;
- impermeabilizzazione costituita da geotessuto, e un manto in pvc;
- arco rovescio in c.a., sp. 80cm gettato a circa da 0.5Ø a 1Ø dal fronte;
- rivestimento di calotta in cls. sp. Min 60cm sp. Max 125cm gettato da 3Ø a 5Ø dal fronte.

### **7.1.3 Sezione tipo C2**

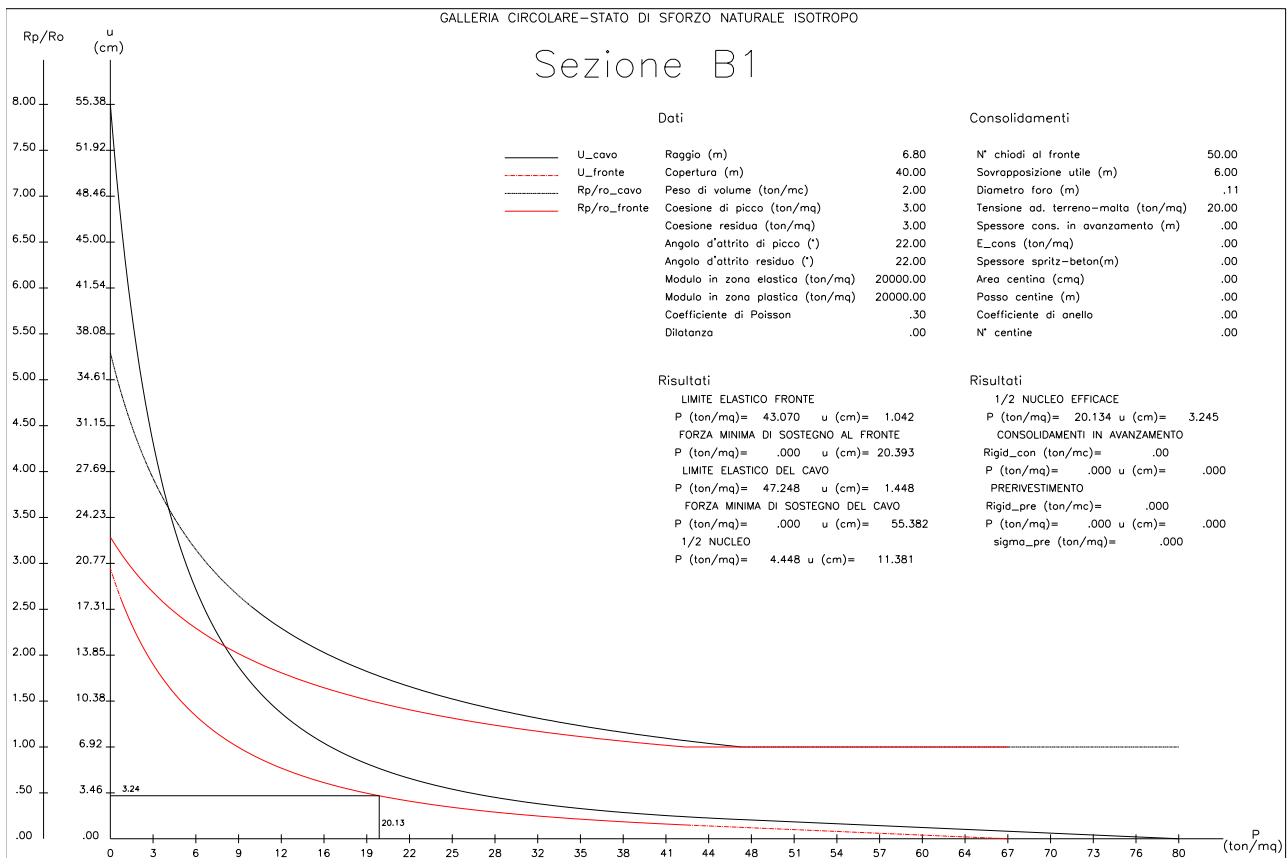
La sezione tipo C2 (campi di 10.00-12.00m) è costituita da:

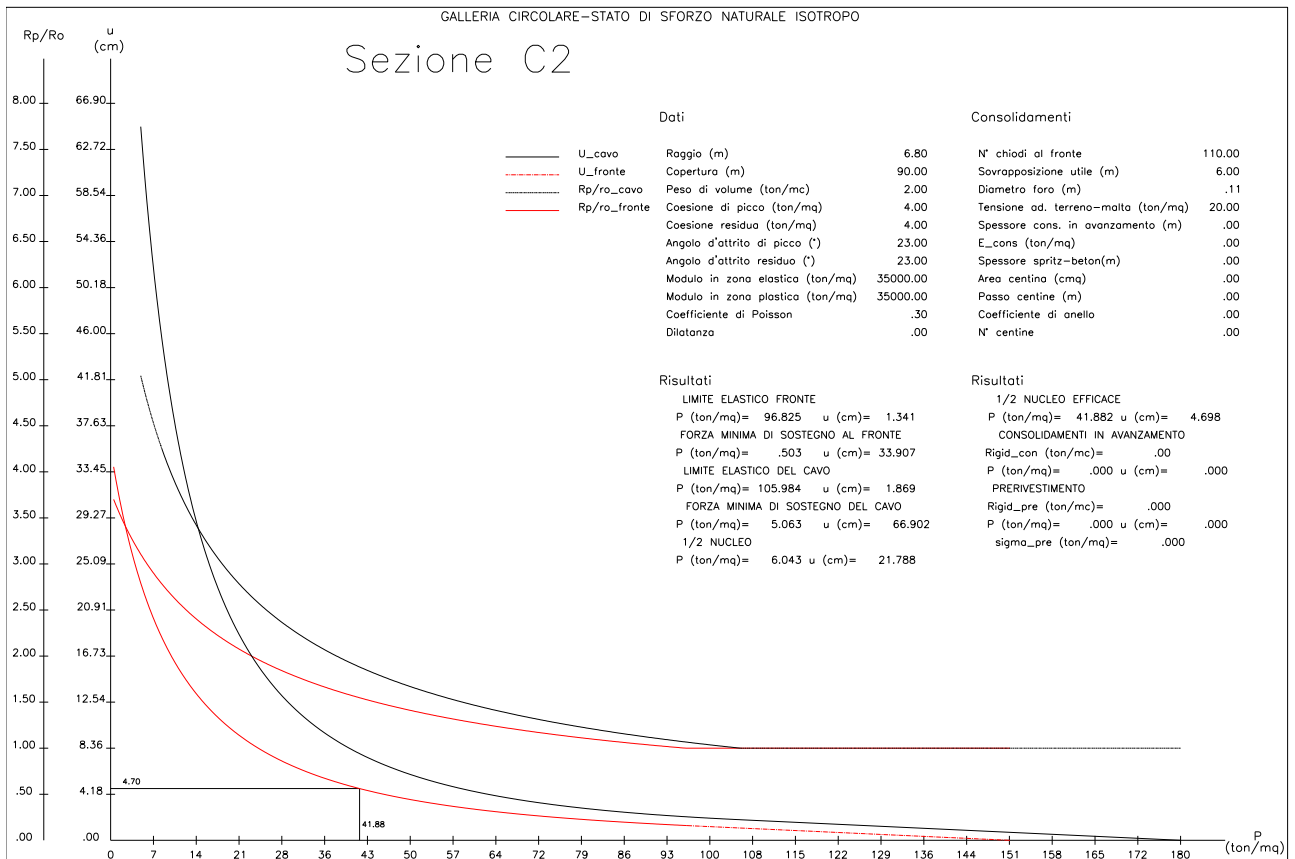
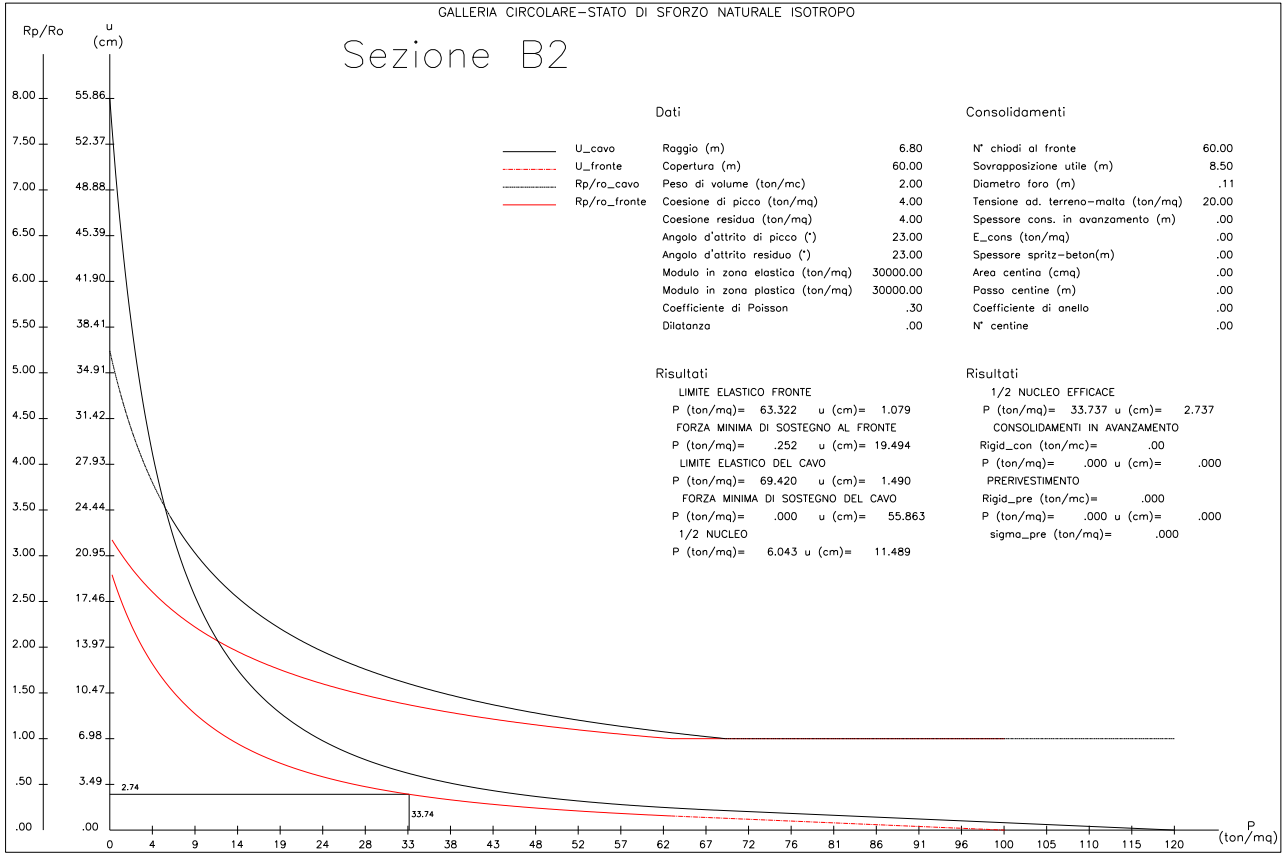
- Eventuali 3+3 dreni nel caso di presenza d'acqua;
- 80±15% elementi VTR al fronte cementati, L=15.00 m sovr. 3.00 – 5.00m;
- 5+5 elementi strutturali in VTR al piede centina valvolati (2vlv/m), o cementati con miscele espansive L media= 15.00 m, sovr. 3.00 – 5.00m
- 50 elementi VTR al contorno cementati, L=15.00 m sovr. 3.00 – 5.00m;

- centine 2IPN200/0.80 – 1.10m;
- spritz-beton fibrorinforzato o armato con rete elettrosaldada fino ad uno spessore totale di 30 cm;
- impermeabilizzazione costituita da geotessuto, e un manto in pvc;
- arco rovescio in c.a., sp. 100cm, gettato da 0.5Ø a 1Ø al fronte;
- rivestimento di calotta in c.a. sp. 90 cm, gettato a circa 1Ø dal fronte.

L'efficacia delle sezioni di scavo e consolidamento adottate è stata realizzata attraverso il metodo delle linee caratteristiche, valutando i valori di convergenze e/o plasticizzazioni e verificando che tali valori determinano una categoria di comportamento stabile e conseguentemente uno stato tensionale al contorno della cavità in prossimità del fronte prevalentemente elastico.

I risultati delle verifiche effettuate sono riportati nei grafici e nella tabella sottostanti:







<b>ANALISI</b>	<b>Formazione</b>	<b>Copertura (m)</b>	<b>Convergenza fronte Uf (cm)</b>
<b>Sezione B1</b>	Flysch in facies di argille scagliose	40	3.24
<b>Sezione B2</b>	Flysch in facies di argille scagliose	60	2.74
<b>Sezione C2</b>	Flysch in facies di argille scagliose	90	4.70

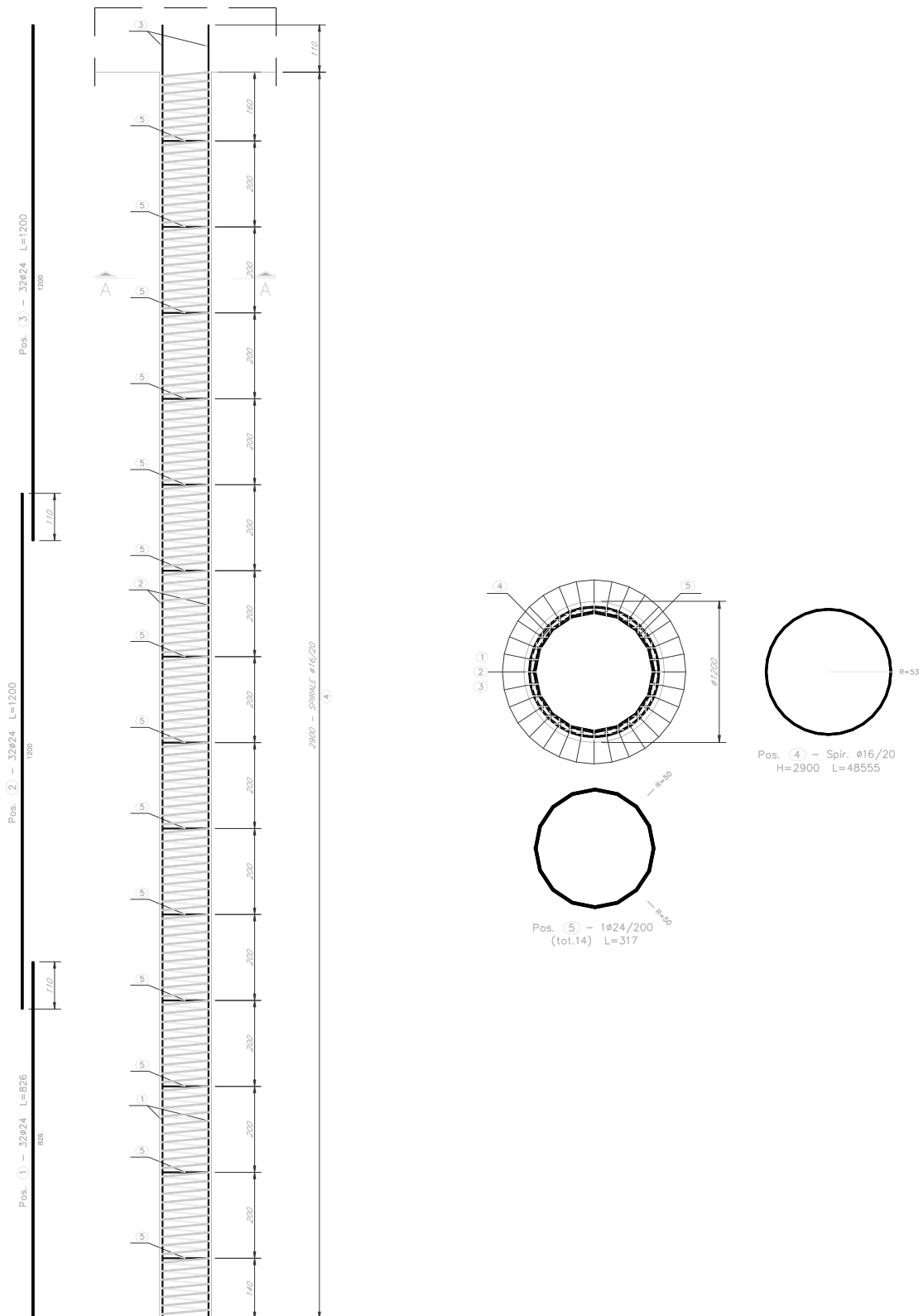
## 7.2 OPERE D'IMBOCCO E TRATTE A BASSA COPERTURA

Le progressive di imbocco, da verificare in sede di progetto definitivo, della galleria naturale e dei portali sono definite nella seguente tabella:

<b>GALLERIA CALISTRO</b>	<i>BECCO DI FLAUTO</i>	<i>GALLERIA ARTIFICIALE</i>	<i>GALLERIA NATURALE</i>	<i>GALLERIA NATURALE</i>	<i>GALLERIA ARTIFICIALE</i>	<i>BECCO DI FLAUTO</i>
<u>carreggiata sud</u>	2+600	2.620	2+650	4+620	4+650	4+670
<u>carreggiata nord</u>	2+650	2+670	2+685	4+670	4+700	4+720



Le opere di stabilizzazione e sostegno degli scavi, previste per gli imbocchi di entrambe le carreggiate della galleria "Calistro", ricadendo nella litologia dei flysch argillo-scaglioso, sono realizzate mediante paratie di pali di grande diametro con più livelli di tiranti. In particolare si prevede la realizzazione di pali  $\Phi 1200$ , armati con un'armatura definita nella figura sottostante, disposti ad interasse di 1.5m e collegati in testa per mezzo di un cordolo in cemento armato (1.4x1.0m).

L'ancoraggio della paratia è garantito attraverso la collocazione di un numero massimo di 5 ordini di tiranti a trefoli, da installare contestualmente alla progressione degli scavi di sbancamento. I tiranti avranno lunghezza complessiva variabile da 20m a 25m e saranno costituiti da 3, 4 e 5 trefoli. L'inclinazione dei tiranti è di 10°. Le caratteristiche dei tiranti sono riportate nella figura sottostante.



Progetto Preliminare

Barre

Sagoma	Pos.	∅ (mm)	nb	A (cm)	B (cm)	L (m)	Ltot (m)	Note
	1	24	32	826		8,26	264,32	
	2	24	32	1200		12,00	384,00	
	3	24	32	1200		12,00	384,00	
	5	24	14	80	79	3,17	44,33	

Spirali

Spirale	Pos.	R (cm)	H (m)	ng	∅ (mm)	S (cm)	Ltot (m)	Note
	4	53	29,00	1	16	20	485,55	

Massa barre

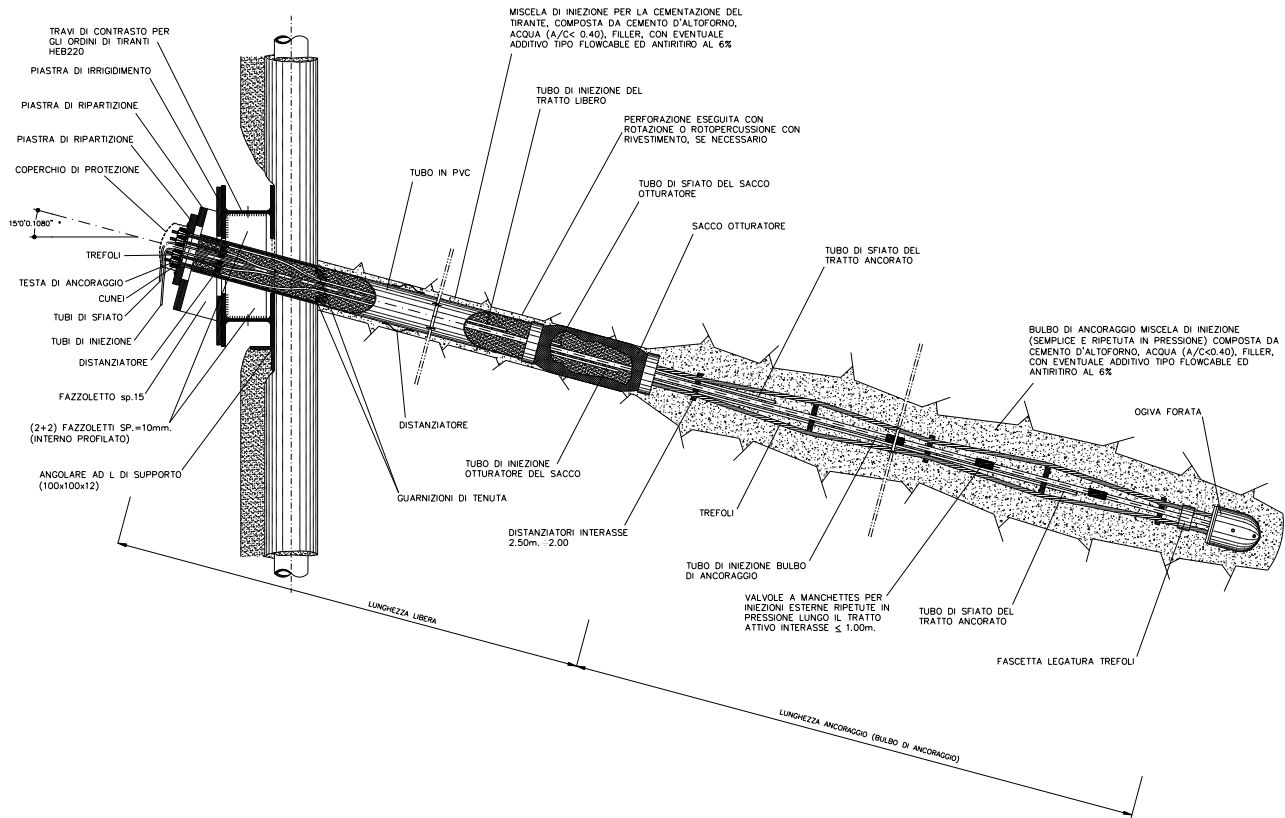
∅ (mm)	M/L (kg/m)	Ltot (m)	Mtot (kg)
24	3,551	1076,65	3823,5

Massa spirali

∅ (mm)	M/L (kg/m)	Ltot (m)	Mtot (kg)
16	1,578	485,55	766,4

Massa totale acciaio : 4589,8 kg

Ultima posizione : 5



La geometria delle paratie è studiata in modo tale da minimizzare gli sbancamenti necessari per inserire l'opera nel contesto ambientale e, nel contempo, permettere una sistemazione definitiva dei versanti rispettosa della morfologia originaria degli stessi.

A tergo della paratia d'imbocco, in prossimità della progressiva chilometrica 2+800, si attraversa una tratta in bassa copertura (5m - 6m), che potrebbe compromettere la stabilità e la sicurezza delle operazioni di scavo. Pertanto si prevede l'esecuzione di trattamenti colonnari realizzati mediante pali plastici, di diametro 1000 mm, disposti ad interasse 1.20m in senso longitudinale e 0.8m in senso trasversale.

Il trattamento previsto sulle due carreggiate va a consolidare una porzione di terreno al contorno della futura sagoma di scavo per uno spessore, minimo, di circa 5.00m; nella prima e quarta fila i pali plastici arrivano, alternativamente, sino al disotto della sagoma di scavo garantendo una maggiore sicurezza delle maestranze nel momento dell'attraversamento di tale tratta critica.

In prossimità di quest'ultima, di lunghezza pari a 80m, riportata nel profilo geomeccanico, è prevista una sezione di scavo e consolidamento B1.

## **8. MONITORAGGIO**

Nelle successive fasi della progettazione dovrà essere posta attenzione nella redazione di un dettagliato programma di monitoraggio che segua le diverse fasi costruttive delle gallerie consentendo la valutazione degli effetti prodotti dalle operazioni di scavo nei terreni e nelle strutture presenti nell'area di influenza delle gallerie.

L'acquisizione di dati significativi (variazione dello stato tenso-deformativo nel terreno, variazione delle pressioni neutre, evoluzione degli spostamenti e delle sollecitazioni nelle strutture di sostegno, ecc.) conseguenti alle operazioni di scavo consente infatti di avere un controllo continuo e completo dell'evoluzione verso le nuove condizioni di equilibrio del terreno e delle strutture di sostegno.

Dal confronto sistematico tra i dati acquisiti e le previsioni progettuali, sarà possibile avere conferma delle ipotesi e degli schemi assunti nei calcoli, verificando in maniera continua l'efficacia

delle strutture di sostegno delle gallerie e, se necessario, adeguare i metodi costruttivi e l'entità dei sostegni alla reale risposta tenso – deformativa del cavo, in modo da assicurare la stabilità dell'opera nel breve e lungo termine, la sicurezza del cantiere e delle lavorazioni al fronte.

In linea di principio per le gallerie in oggetto dovranno essere eseguite, durante la realizzazione delle opere, almeno seguenti tipologie di misure:

- Misure di convergenza su 5 punti sul contorno del cavo.
- Misure di estrusione del fronte per i materiali maggiormente deformabili.
- Misure delle sollecitazioni nel rivestimento definitivo.
- Misure delle pressioni neutre.
- Misure estensimetriche per i materiali rocciosi.
- Misure inclinometriche
- Misure su capisaldi superficiali.

Di norma queste misure saranno raggruppate in diverse "sezioni di misura" organizzate in relazione ai dati che si intenderanno acquisire.