

IL PRECONSOLIDAMENTO DEL TERRENO NELLE OPERE IN SOTTERRANEO

Prof. Ing. Pietro Lunardi (Studio di progettazione Lunardi, Milano)

Come ormai noto agli addetti ai lavori, il Ministero dei Lavori Pubblici sta per emanare le nuove “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” [1].

Si tratta di un provvedimento legislativo necessario e da tempo atteso per fornire una guida e mettere ordine in un campo, quello della geotecnica e della meccanica delle rocce, assai delicato per le problematiche connesse e pur tuttavia troppo spesso teatro di superficialità e improvvisazione.

Particolarmente significativa è la presenza, nelle Norme in questione, di un intero capitolo dedicato agli “interventi di miglioramento e rinforzo dei terreni”, i cosiddetti consolidamenti, oramai ampiamente diffusi nel campo delle costruzioni civili. Essi vengono considerati come vere e proprie azioni aventi valenza strutturale, quindi da progettare, realizzare e poi collaudare come normalmente si fa per qualsiasi altra realizzazione nel campo dell’ingegneria civile.

Le Norme suddividono gli interventi di consolidamento in due categorie, definendo:

- **interventi di miglioramento:** quelli che agiscono sullo stato del terreno (tensioni, pressioni interstiziali, indice dei vuoti) o sulla sua costituzione (fluido interstiziale, scheletro solido, ecc.), con l’eventuale apporto di materiale. Rientrano tra questo genere d’interventi: il drenaggio (che modifica le pressioni totali e quelle interstiziali), la compattazione (che riduce l’indice dei vuoti), le iniezioni di idrofratturazione e quelle di compattazione (che riducono l’indice dei vuoti e modificano le tensioni e le pressioni interstiziali), le iniezioni di permeazione (che riempiono le discontinuità o sostituiscono il fluido interstiziale con miscele cementanti), il congelamento (che consolida il fluido interstiziale), la stabilizzazione granulometrica, chimica, elettrochimica e termica (che modificano lo scheletro solido).
- **interventi di rinforzo:** quelli che agiscono sulla costituzione del terreno con l’inserimento di ben definiti elementi strutturali. Tali interventi producono un nuovo materiale composito, caratterizzato da proprietà meccaniche assenti o poco pronunciate nel solo terreno.

Rientrano tra questi: la terra armata, le chiodature, il jet-grouting, le opere di contenimento (gabbioni, muri, ecc.).

Nel campo delle costruzioni in sotterraneo, gli interventi di consolidamento hanno assunto, specialmente negli ultimi quindici anni, un'importanza fondamentale. Questo è del tutto naturale, se consideriamo che il terreno, in questo genere di opere, costituisce il principale materiale da costruzione.

L'utilizzo degli interventi di consolidamento per affrontare complesse situazioni di scavo in galleria è una prassi ordinaria dell'approccio di progettazione e costruzione ADECO-RS, adottato per i lavori della Bologna-Firenze, che, in questa ottica, ha contribuito non poco alla loro valorizzazione.

In particolare, l'ADECO-RS [2], [3] insegna che i fenomeni deformativi in galleria non sono altro che la risposta dell'ammasso all'azione dello scavo, risposta che si manifesta a monte del fronte, nell'ambito del nucleo d'avanzamento, con deformazioni di estrusione e pre-convergenza, che successivamente evolvono a valle del fronte di scavo, sviluppando le temute convergenze.

L'ADECO-RS mostra che è possibile ottenere il controllo completo dei fenomeni deformativi in galleria, comprese le fatiche convergenze, solo se si contrastano efficacemente e tempestivamente, prima del loro nascere, le estrusioni e le pre-convergenze. A questo scopo è indispensabile (fig. 1):

- a monte del fronte di scavo, rinforzare e/o proteggere il nucleo d'avanzamento con adatti interventi di consolidamento per regolarne opportunamente la rigidità;
- a valle del fronte di scavo, operare un corretto confinamento del cavo, per regolare la maniera di estrudere del nucleo.

Gli interventi di consolidamento che si realizzano a monte del fronte di scavo prendono il nome di preconsolidamenti e sono progettati e attuati con modalità e geometrie espressamente studiate per rispondere alle problematiche tipiche delle opere in sotterraneo.

Per questo si preferisce allora parlare di interventi conservativi o di precontenimento del cavo [4], [5], [6], distinguendo tra (fig. 2):

- interventi protettivi, quando producono la canalizzazione delle tensioni all'esterno del nucleo d'avanzamento svolgendo appunto un'azione protettiva, che ne garantisce la conservazione delle caratteristiche naturali di resistenza e deformabilità (es.: aureole di drenaggi lanciati in avanzamento sul fronte di scavo, gusci di terreno consolidato mediante jet-grouting sub-verticale (fig. 3) o sub-orizzontale, gusci di betoncino fibrorinforzato o calcestruzzo ottenuti in avanzamento mediante pretaglio meccanico, protesi di terreno consolidato, ecc.);
- interventi di rinforzo, quando agiscono direttamente sulla consistenza del nucleo d'avanzamento migliorandone le caratteristiche naturali di resistenza e deformabilità attraverso opportune tecniche di consolidamento (es.: consolidamento del nucleo mediante elementi strutturali di vetroresina).

Benché questi tipi d'intervento per il controllo della risposta deformativa a monte del fronte di scavo, qualora considerati singolarmente, abbiano campi d'applicazione piuttosto circoscritti in relazione alla natura del terreno, nel loro insieme sono in grado di garantire soluzioni per tutte le possibili situazioni geotecniche. Naturalmente, nulla vieta, in condizioni tenso-deformative estreme, di utilizzare contemporaneamente più tipi d'interventi per ottenere un'azione mista: protettiva e di rinforzo (fig. 4).

Una volta contrastate efficacemente, attraverso i preconsolidamenti, le deformazioni di estrusione e preconvergenza, se non si vuol perdere a valle del fronte il vantaggio ottenuto a monte rinforzando il nucleo, è necessario regolare la maniera di estrarre del nucleo d'avanzamento, curando con la massima attenzione che la continuità dell'azione esercitata da monte a valle del fronte sia il più possibile costante ed uniformemente distribuita su tutto il perimetro del cavo. Questo si consegue operando la chiusura perimetrale del confinamento del terreno a valle del fronte di scavo il più possibile in prossimità del fronte stesso, per esempio attraverso il getto tempestivo delle murette e dell'arco rovescio.

Seguendo scrupolosamente questi criteri, per la cui corretta messa in pratica è essenziale disporre di un continuo, efficace monitoraggio dei fenomeni deformativi a monte e a valle del fronte, è possibile ricondurre le situazioni di scavo difficili (per es.: fronte instabile) a situazioni facili (fronte stabile) conseguendo per questa via produzioni industriali (figg. 5, 6).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ministero dei LL.PP., "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", aprile 1998
- [2] LUNARDI P. "Progetto e costruzione di gallerie secondo l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli" (articolo in tre parti), Quarry and Construction, March 1994, March 1995, April 1996
- [3] LUNARDI P., "L'importanza del precontenimento del cavo in relazione ai nuovi orientamenti in tema di progetto e costruzione di gallerie", Gallerie e grandi opere sotterranee, n°. 45, anno 1995
- [4] LUNARDI P., "Aspetti progettuali e costruttivi nella realizzazione di gallerie in situazioni difficili: interventi di precontenimento del cavo", Convegno Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo" - Milano, 18-20 marzo 1991
- [5] LUNARDI P., FOCARACCI A., "Tunnelling in soil: design, construction, materials and monitoring", Seminario Russo-Italiano - Central Institute for Advanced Training of Construction Engineers (TSMIPKS), Mosca, 11 marzo 1993
- [6] LUNARDI P., "Evolution des technologies d'excavation en souterrain dans des terrains meubles", Colloque chez le "Comité Marocain des Grands Barrages" - Rabat, 30 settembre 1993

**COMMISSIONE DEL CONSIGLIO SUPERIORE
DEI LAVORI PUBBLICI PER L'AGGIORNAMENTO DEL
D.M. 11 MARZO 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.

INDICE

- A. DISPOSIZIONI GENERALI
- B. ARTICOLAZIONE DEL PROGETTO
- C. OPERE DI FONDAZIONE
- D. OPERE DI SOSTEGNO
- E. OPERE IN SOTTERRANEO
- F. OPERE DI MATERIALI SCIOLTI
- G. STABILITA' DEI PENDII NATURALI E DEI FRONTI DI SCAVO
- H. MIGLIORAMENTO E RINFORZO DEI TERRENI E DELLE ROCCE
- I. CONSOLIDAMENTO GEOTECNICO DI OPERE ESISTENTI
- L. DISCARICHE CONTROLLATE DI RIFIUTI E DEPOSITI DI INERTI
- M. FATTIBILITA' GEOTECNICA DI OPERE SU GRANDI AREE
- N. EMUNGIMENTI DA FALDE IDRICHE
- O. DRENI E FILTRI

**COMMISSIONE DEL CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI PER
L'AGGIORNAMENTO DEL D.M. 11 MARZO 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”.

H. MIGLIORAMENTO E RINFORZO DEI TERRENI E DELLE ROCCE

- H.1. Oggetto delle norme
- H.2. Caratterizzazione geologica del sito
- H.3. Indagini geotecniche e caratterizzazione geotecnica dei terreni
- H.4. Scelta dei tipi d'intervento e criteri generali di progetto

H.4.1. Tipi di interventi di miglioramento (agiscono sullo stato o sulla costituzione)

AZIONI SULLO STATO (tensioni, pressioni interstiziali, indice dei vuoti)	AZIONI SULLA COSTITUZIONE (fluido interstiziale, scheletro solido)
<ul style="list-style-type: none">- precarico e drenaggio- compattazione- elettroosmosi- riscaldamento- iniezioni d'idrofratturazione- iniezioni di compattazione	<ul style="list-style-type: none">- iniezioni di permeazione- congelamento- stabilizzazione granulometrica- stabilizzazione chimica- stabilizzazione elettrochimica- stabilizzazione termica

H.4.1. Tipi di interventi di rinforzo (agiscono sulla costituzione)

PER INCLUSIONE		PER CONFINAMENTO
Reagenti a trazione	Non reagenti a trazione	
<ul style="list-style-type: none">- Terra rinforzata- Chiodature- Bulloni- Micropali	<ul style="list-style-type: none">- Pali granulari- Trattamenti colonnari- Jet-grouting	<ul style="list-style-type: none">- Gabbioni- Muri reticolari compositi

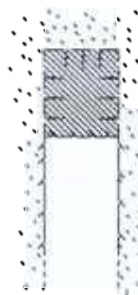
- H.5. Monitoraggio e collaudo

Le CONTRÔLE

de la reponse en deformation se realise
par régulation de la rigidité du noyau
amont du front de taille et par regulation de la façon d'extruder
aval du front même

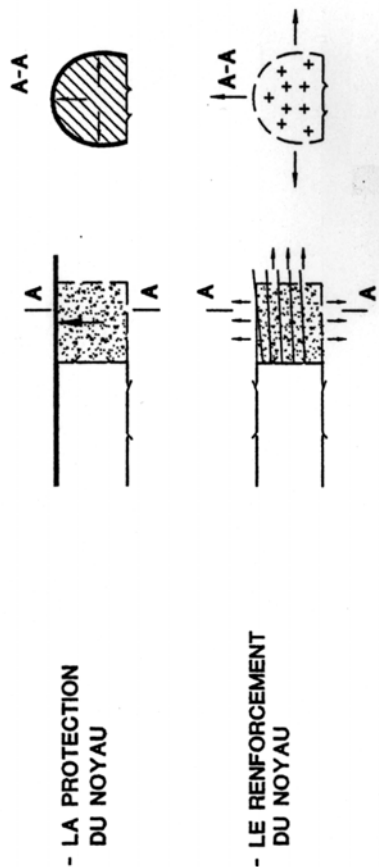
Fig. 1

AMONT DU FRONT DE TAILLE



PAR REGULATION DE LA
RIGIDITE DU NOYAU
D'AVANCEMENT

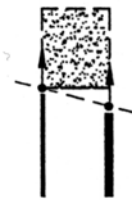
PAR INTERVENTIONS DE PRECONFINEMENT
DE LA CAVITE EN UTILISANT
COMME INSTRUMENT DE CONTROLE



- LA PROTECTION
DU NOYAU

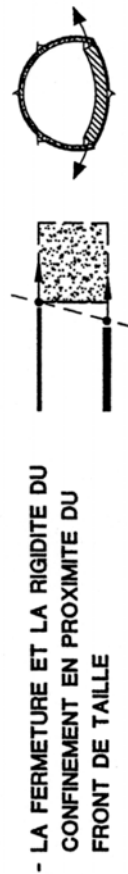
- LE RENFORCEMENT
DU NOYAU

AVAL DU FRONT DE TAILLE



PAR REGULATION DE LA
FAÇON D'EXTRUDER
DU NOYAU

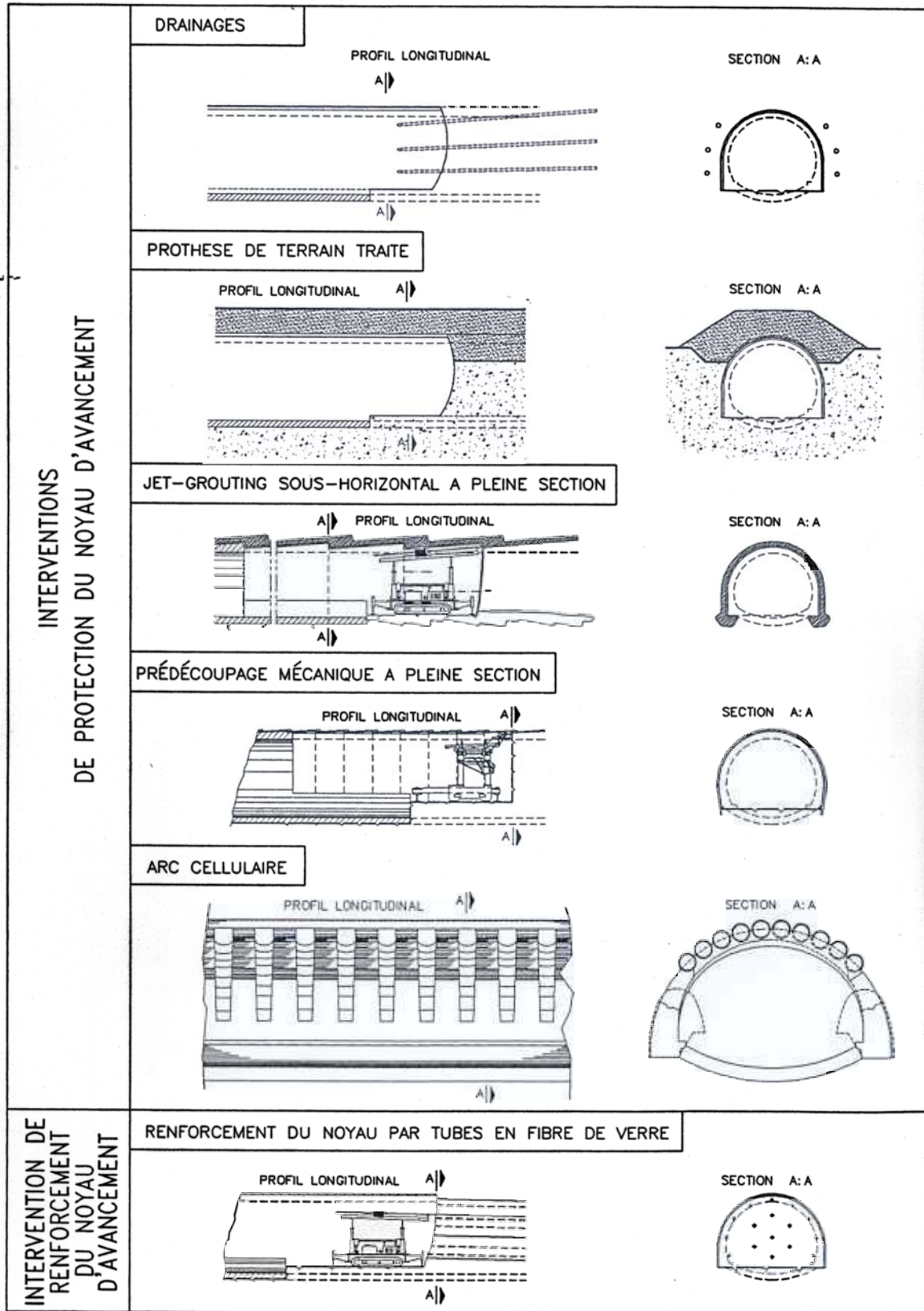
PAR INTERVENTIONS DE CONFINEMENT
DE LA CAVITE EN UTILISANT
COMME INSTRUMENT DE CONTROLE



- LA FERMETURE ET LA RIGIDITE DU
CONFINEMENT EN PROXIMITE DU
FRONT DE TAILLE

CONCEPTION ET EXECUTION DES TUNNELS
SYSTEME ADECO-RS

INTERVENTIONS DE CONSERVATION



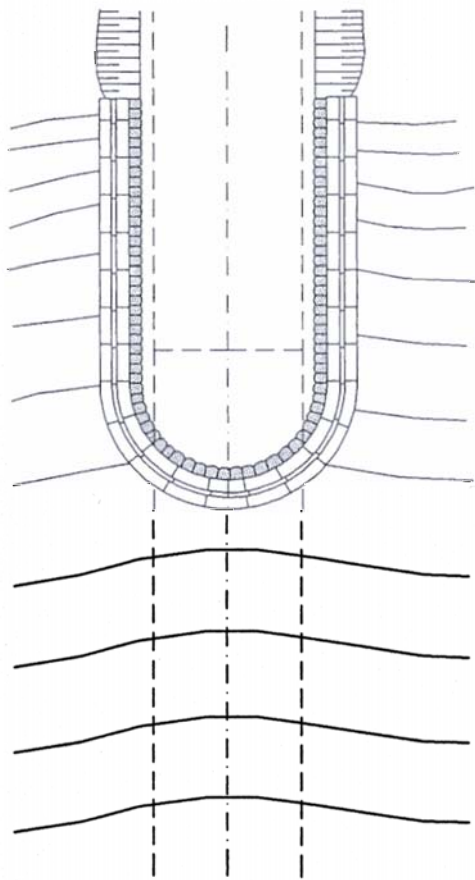
P.LUNARDI - MILANO

Fig. 2

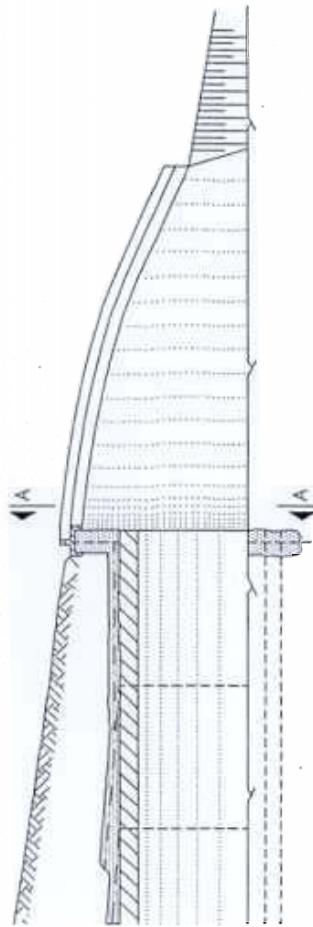
CONCEPTION ET EXECUTION DES TUNNELS
SYSTEME ADECO-RS

ATTAQUE DU TUNNEL PAR JET-GROUTING VERTICAL

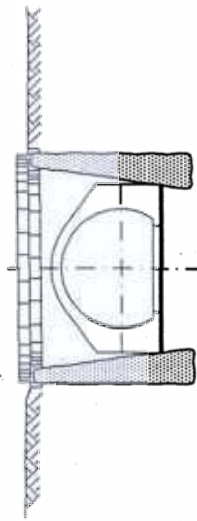
PLANIMÉTRIE



PROFIL LONGITUDINAL

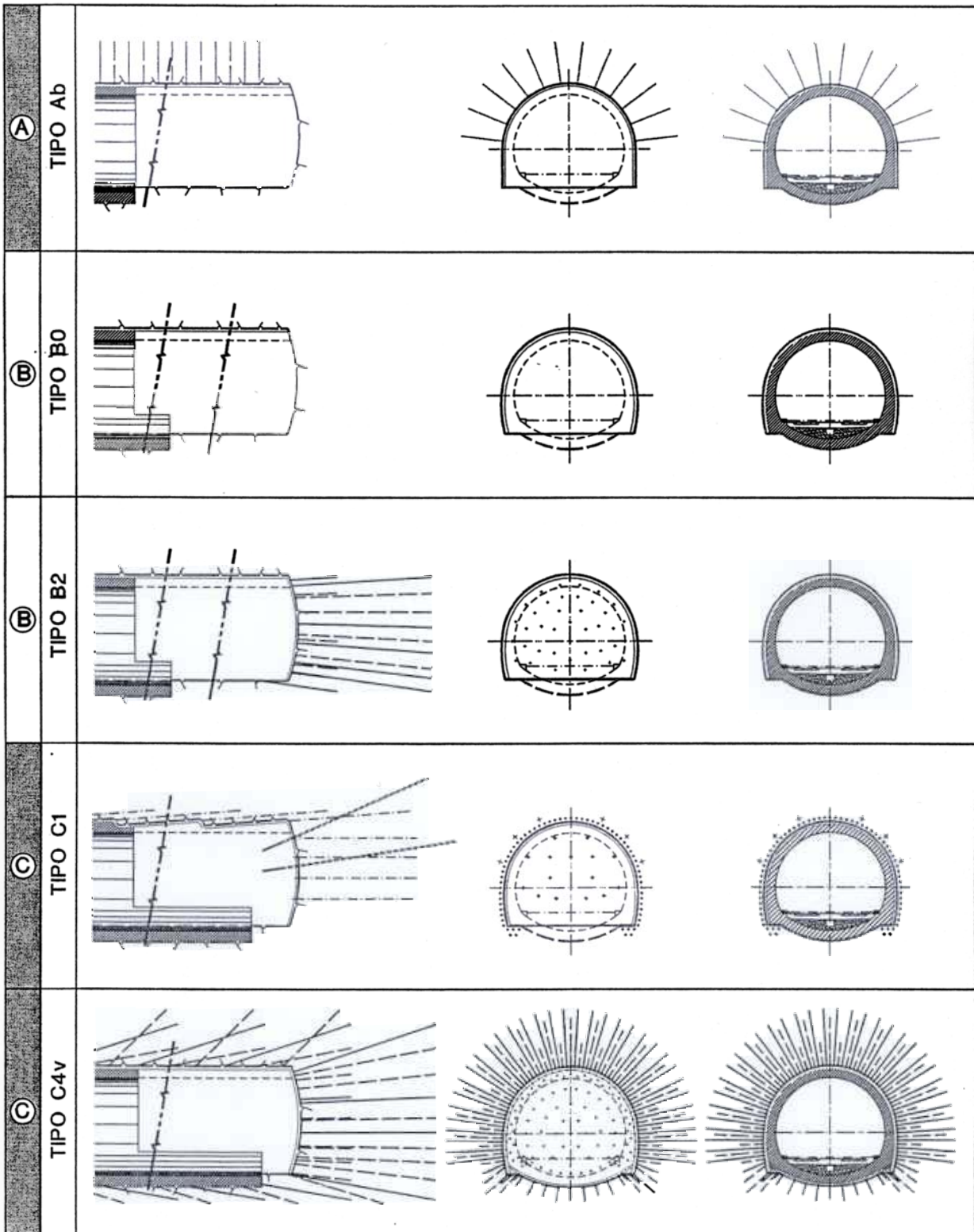


SECTION A:A



FASE DI
TERAPIA

LINEA FERROVIARIA AD ALTA VELOCITÀ BOLOGNA-FIRENZE
Sezioni tipo per le gallerie



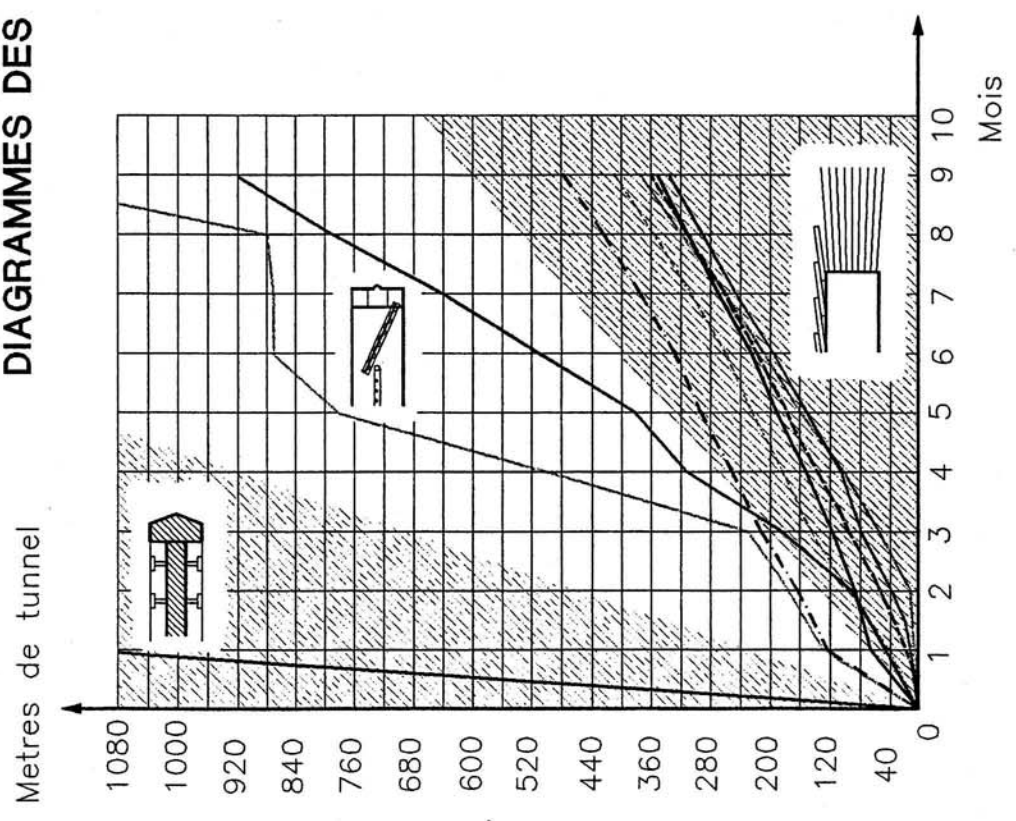
P.LUNARDI - MILANO

Fig. 4

**CONCEPTION ET EXECUTION DES TUNNELS
SYSTEME ADECO-RS**

**CREUSEMENT MECANISE
DIAGRAMMES DES PRODUCTIONS MENSUELLES**

PHASE OPERATIONNELLE



TRAVAIL	Ø [m]	TERRAIN	TECHN. DE CREUS.	PRODUCT. [m/j]	
				MOYENNE	MAX
— T. PRATO TIRÉS [F.S.]	3.5	PORPHIRE	TBM	35	80
— LIGNE FERROV. DU METRO DE MILAN [F.S.]	8	SABLE ET GRAVIER	BOUCLIER EPB	5.3	22
— METRO DE ROME	10.64	HETEROGENE DE LES SABLE A LE ARGILES	BOUCLIER HDS	4.0	5.5
— T. CAMPIOLO [F.S.]	12.20	EBOUILIS DE PENTE	J.G.H.	1.7	2.5
— TUNNELS LIGNE FERROV. SIBARI [F.S.] COSENZA	10.50	ARGILE	PREDECOUPAGE MECANIQUE	2.3	3.2
— TUNNELS LIGNE FERROV. FLORENCE AREZZO	12.20	ARGILE	PREDECOUPAGE + VTR	2.0	3.2
— T. S. VITALE [F.S.]	12.50	ARGILE	VTR + VTR	1.6	2.4
— T. VASTO [F.S.]	12.20	SABLE LIMONEUSE LIMON ARGILEUX	JG + VTR	1.8	2.3
— T. TARTAGUILLE [SNCF]	15.00	ARGILE MARNEUSE	VTR	1.4	1.9

Fig. 5

BOLOGNA TO FLORENCE HIGH SPEED RAILWAY TUNNEL CONSTRUCTION - MONTHLY PACES

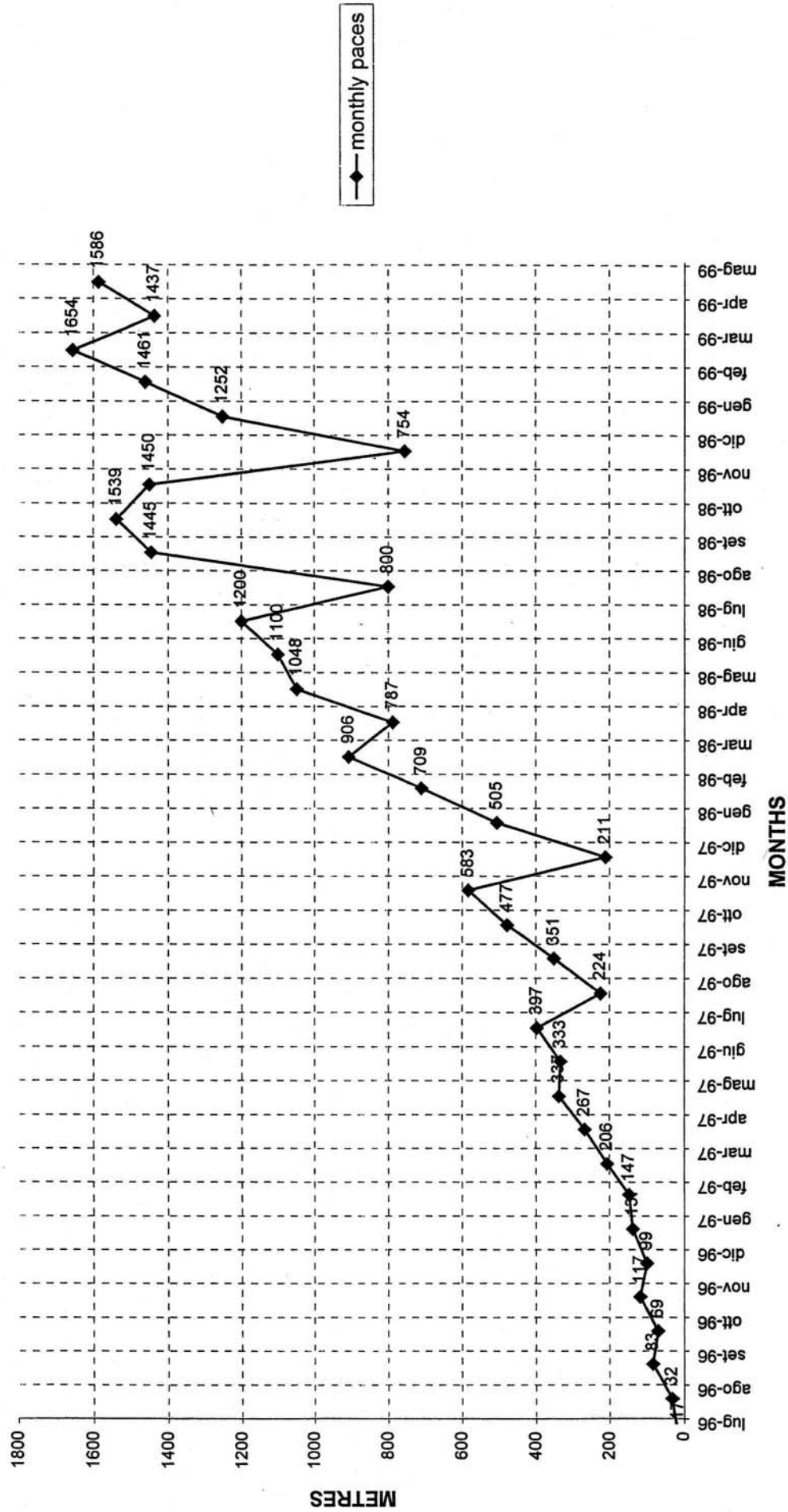


Fig. 6