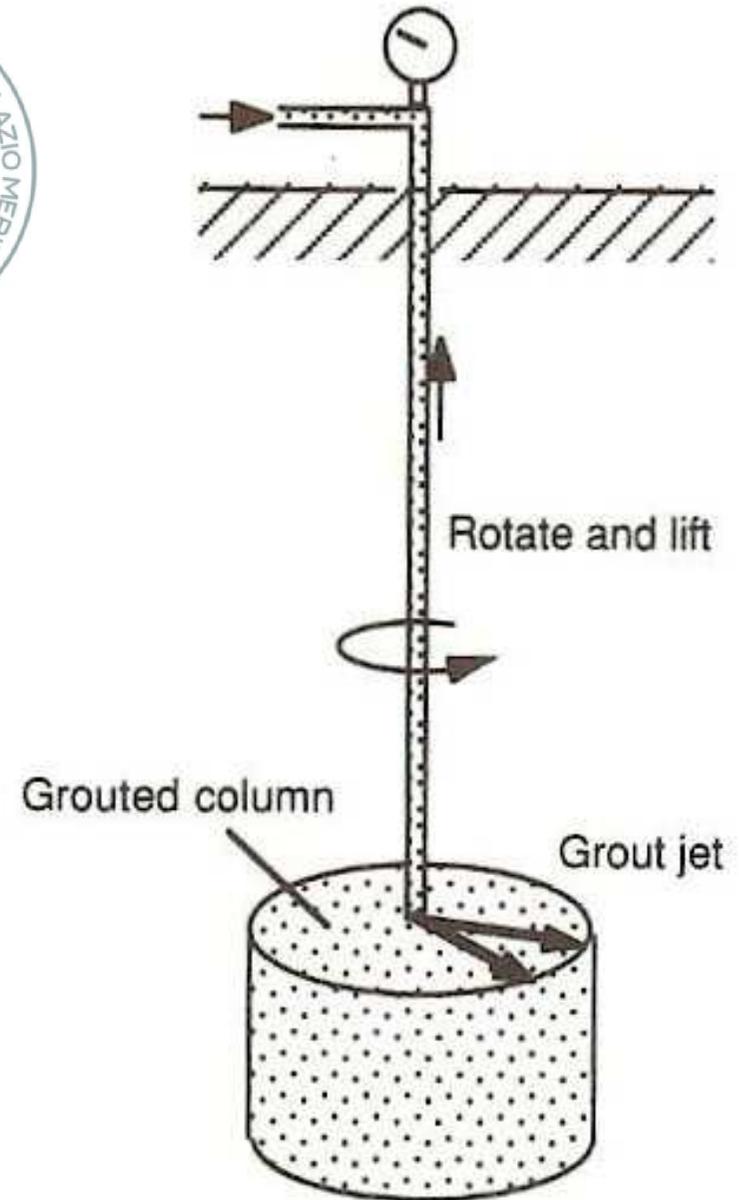


# Terza Parte: Norme, Progetto e Controllo



## JET GROUTING Tecnica - Progetto - Controllo

prof. ing. Paolo Croce  
Imola, 15-16 ottobre 2019



# SOMMARIO

- Normativa Italiana
- Normativa Europea
- Metodo Osservazionale
- Raccomandazioni Tecniche A.G.I.

## Quadro Normativo

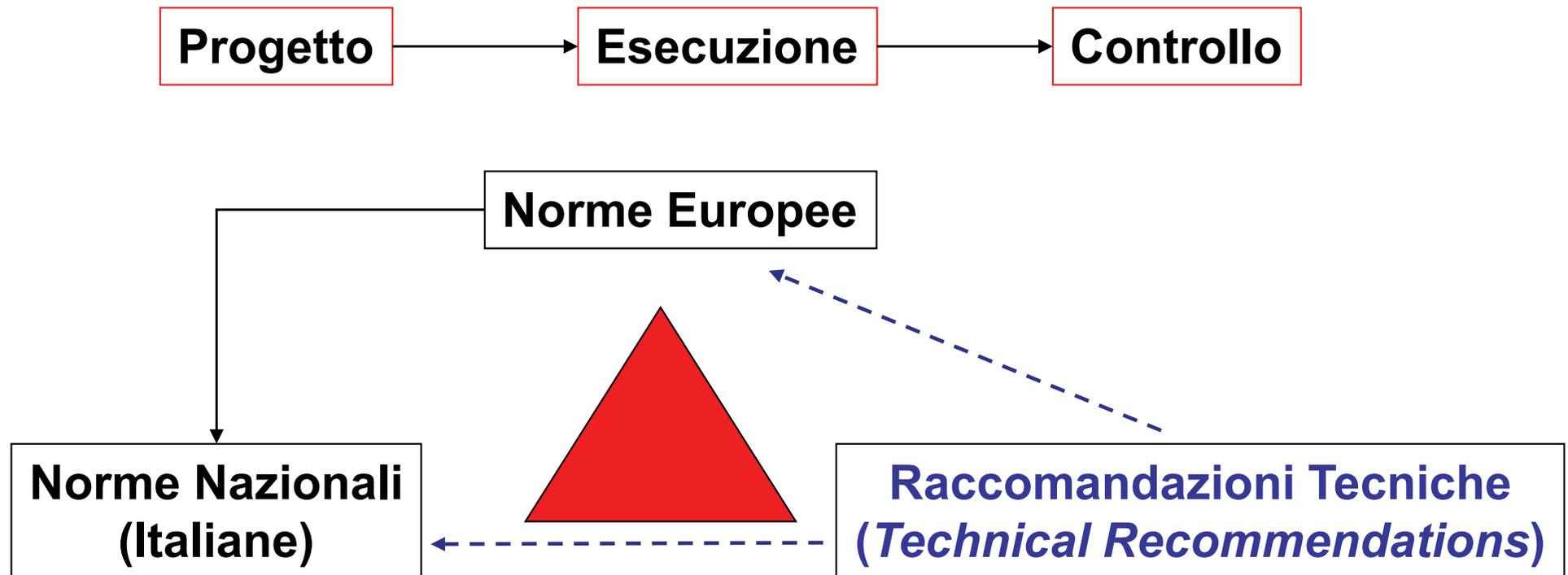
- Obiettivi, funzioni e requisiti di progetto
- Iter progettuale
- Difetti tipici
- Verifiche geometriche
- Verifiche statiche
- Metodi deterministici
- Metodi probabilistici

## Progetto

- Controlli preliminari (Campo prove)
- Controlli durante l'esecuzione dei trattamenti
- Controlli sugli elementi consolidati
- Prove in sito
- Prove di laboratorio

## Controlli

# JET GROUTING: Normativa e Raccomandazioni Tecniche (Miglioramento e Rinforzo dei Terreni e delle Rocce)



**Un processo normativo complesso e in continua evoluzione**

## 6.9 Miglioramento e rinforzo dei terreni e degli ammassi rocciosi

### 6.9.1. SCELTA DEL TIPO DI INTERVENTO E CRITERI GENERALI DI PROGETTO

La scelta del tipo di intervento deve derivare da una caratterizzazione geotecnica dei terreni e degli ammassi rocciosi da trattare e da un'analisi dei fattori tecnici, organizzativi e ambientali.

Gli interventi devono essere giustificati, indicando i fattori geotecnici che ci si propone di modificare e fornendo valutazioni quantitative degli effetti meccanici attesi.

Le indagini geotecniche devono riguardare anche l'accertamento dei risultati conseguiti, avvalendosi di misure e di appositi campi prova. Nel progetto devono essere definiti il dimensionamento degli interventi, le caratteristiche degli eventuali elementi strutturali e dei materiali di apporto, le tecniche necessarie e le sequenze operative.

Il progetto deve indicare le modalità di accertamento dei risultati, specificando le misure e le indagini sperimentali più opportune in relazione alla tipologia ed agli obiettivi dell'intervento di miglioramento e/o rinforzo.

Negli interventi di particolare importanza il progetto deve prevedere una fase preliminare di verifica sperimentale e messa a punto delle modalità esecutive dell'intervento (campi prova).

### 6.9.2. MONITORAGGIO

Il monitoraggio ha lo scopo di valutare l'efficacia degli interventi e di verificare la rispondenza dei risultati ottenuti con le ipotesi progettuali. Ha inoltre lo scopo di controllare il comportamento nel tempo del complesso opera-terreno trattato.

Il monitoraggio deve essere previsto nei casi in cui gli interventi di miglioramento e di rinforzo possano condizionare la sicurezza e la funzionalità dell'opera in progetto o di opere circostanti.

# EUROCODICE 7: SITUAZIONE ATTUALE

## *Eurocode 7: Geotechnical Design (2004)*

### Chapter 5.5 - Ground Improvement and Reinforcement

(1) investigations

(2) design

(3) control

#### 5.5 Ground improvement and reinforcement

(1)P A geotechnical investigation of the initial ground conditions shall be carried out before any ground improvement or reinforcement method is chosen or used.

(2)P The ground improvement method for a particular situation shall be designed taking into account the following factors where appropriate:

- thickness and properties of the ground or fill material;
- magnitude of water pressure in the various strata;
- nature, size and position of the structure to be supported by the ground;
- prevention of damage to adjacent structures or services;
- if the ground improvement is temporary or permanent;
- in terms of anticipated deformations, the relationship between the ground improvement method and the construction sequence;
- the effects on the environment including pollution by toxic substances or changes in ground-water level;
- the long-term deterioration of materials.

(3)P The effectiveness of the ground improvement shall be checked against the acceptance criteria by determining the induced changes in the appropriate ground properties.

**N.B. L'Eurocodice di progettazione geotecnica e le N.T.C. non distinguono le diverse tecniche di miglioramento.**

**Esiste invece una norma europea che tratta specificamente del jet grouting ma solo per quanto concerne gli aspetti esecutivi.**

*Execution of special geotechnical works - Jet grouting  
(European Standard EN-12716, ultimo aggiornamento Dicembre 2018)*

1. Scopo
2. Riferimenti normativi
3. Termini e definizioni
4. Informazioni necessarie
5. Indagini geotecniche
6. Materiali e prodotti
7. Considerazioni progettuali
8. Esecuzione
9. Supervisione, prove e monitoraggio
10. Documentazione esecutiva
11. Requisiti particolari

**N.B. Gli aspetti progettuali sono trattati in modo generico.**

# EUROCODICE 7 (Geotechnical Design): Revisione in corso

## A) Diffused Ground Improvement

### Typical Techniques:

- Grouting
- Deep Vibration
- Ground Freezing

1. Evaluate: Change of Ground Properties
2. Define: Improved Characteristic Values ( cohesion, friction angle, ...)

Follow standard design procedures

## B) Creation of an “Inclusion”

Provided with well defined:

- Geometry
- Mechanical Properties (uniaxial strength, elastic modulus...)

### Typical Techniques:

- Jet Grouting
- Deep Mixing

Develop specific Design Rules

# INCLUSIONS = INCLUSIONI (cosa sono?)

Elementi di geometria prestabilita dotati di rigidità superiore al terreno

Tecniche Costruttive: Trivellazione, Battitura, Iniezione, Miscelazione, Vibrazione, Sostituzione, Compattamento...

(Full Displacement Piles)

FDP

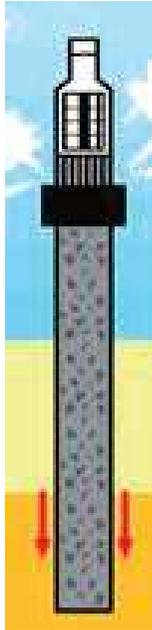
Colonne di Ghiaia

Deep Mixing

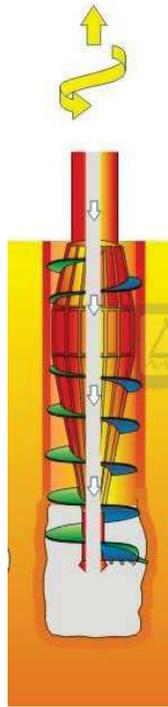


Pali Trivellati

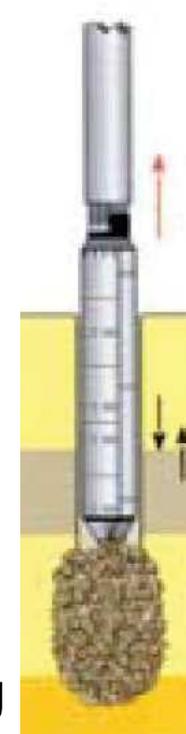
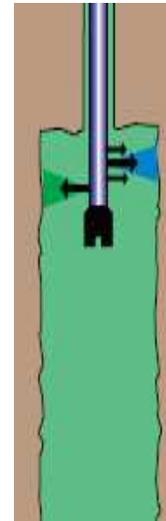
Pali Battuti



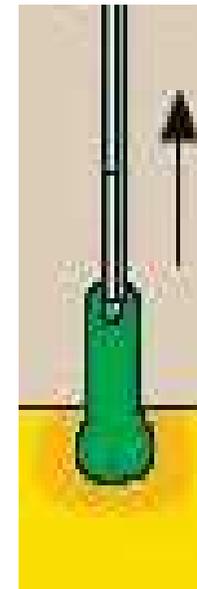
C.F.A.  
(pali a elica)



Colonne di Jet Grouting



Colonne vibro-compattate CVC



# EUROCODICE 7: Revisione in corso

## GROUND IMPROVEMENT DESIGN METHODS

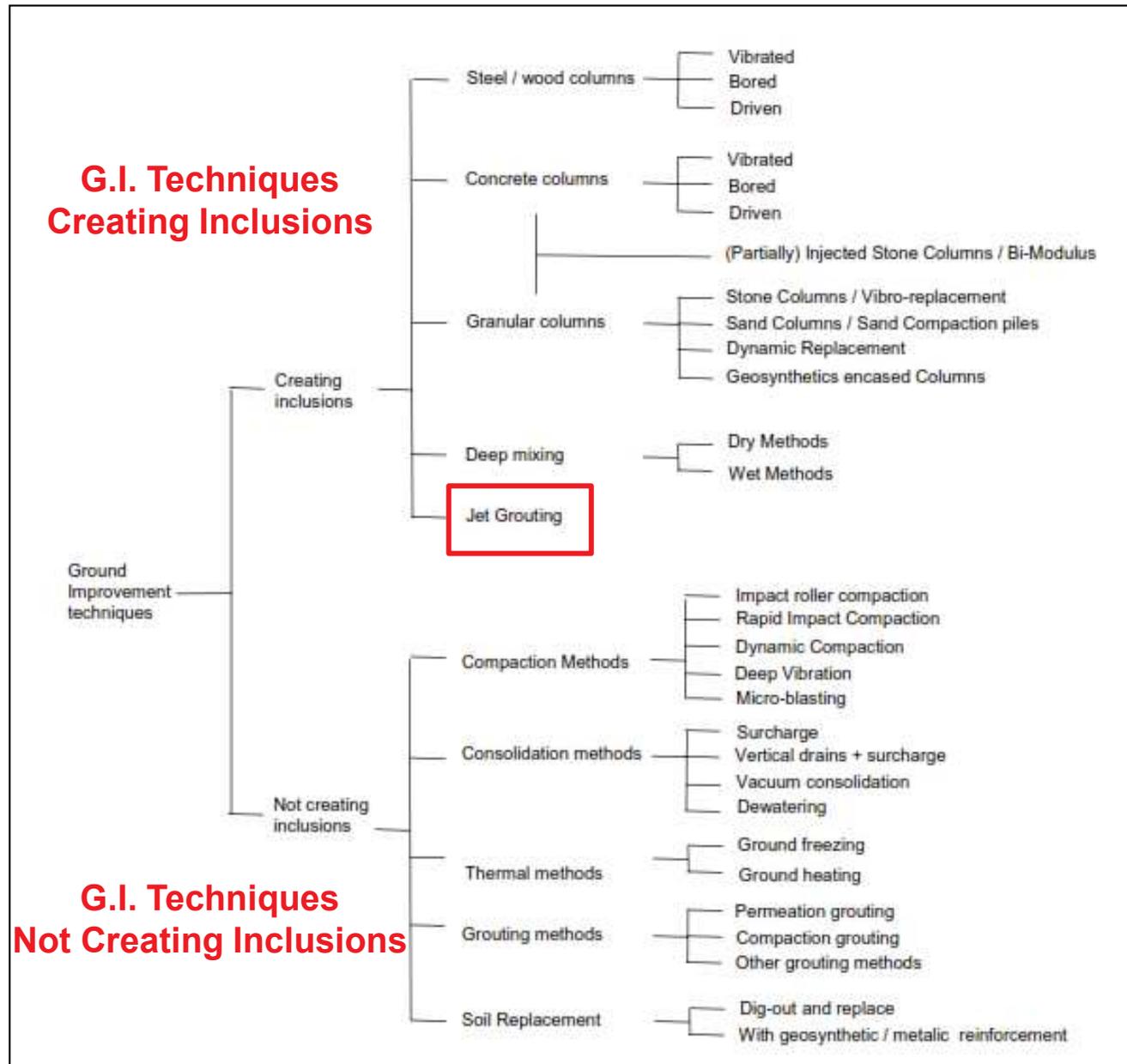
DIFFUSED

DISCRETE

Design of Diffused Ground Improvement. This design method is applicable when the behaviour of the improved ground can be conveniently modelled by conventional soil or rock models. In order to follow this method, the designer should evaluate the change of ground properties (i.e. cohesion, friction angle, permeability, etc.) and should consequently define the **“Improved Characteristic Values”** for the material properties. In such case, design rules for foundations, retaining structures, embankments, slopes etc. are applied according to the relevant sections of the Eurocode. The Improved Characteristic Values are evaluated using testing, empirical methods, comparable experience or analytical/numerical modelling.

Design of Discrete Ground Improvement. This design method can be applied when ground improvement relies on **inclusions**. The overall performance of the improved ground is calculated by considering separately the characteristics of the inclusions, the soil/rock and their interaction. In such case, design rules for foundations, retaining structures, embankments, slopes etc. are applied according to the relevant sections of the Eurocode 7. The addition of a load transfer platform may be required. (Detailed considerations and rules are given in the appendix on inclusions.)

# INCLUSIONI & JET GROUTING



# FOUNDATIONS ON RIGID INCLUSIONS

Asiri National Project – France 2005 - 2011

Fondazioni Superficiali    Fondazioni Profonde (Palificate)    Inclusioni Rigide

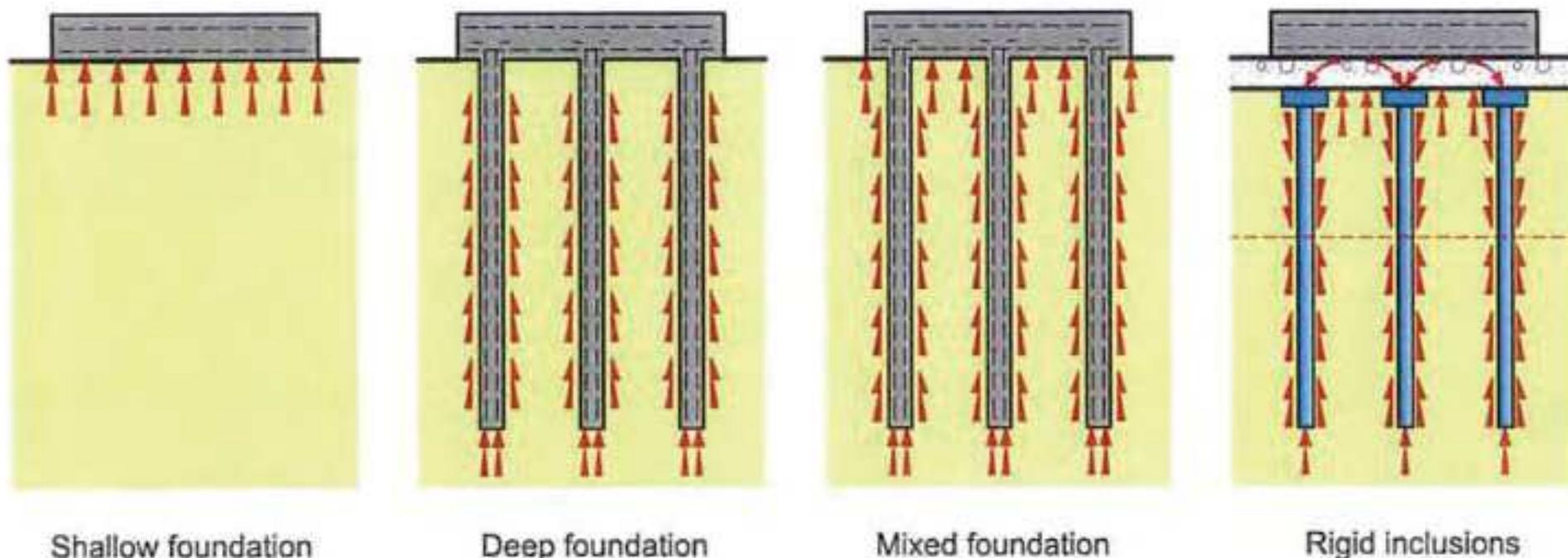


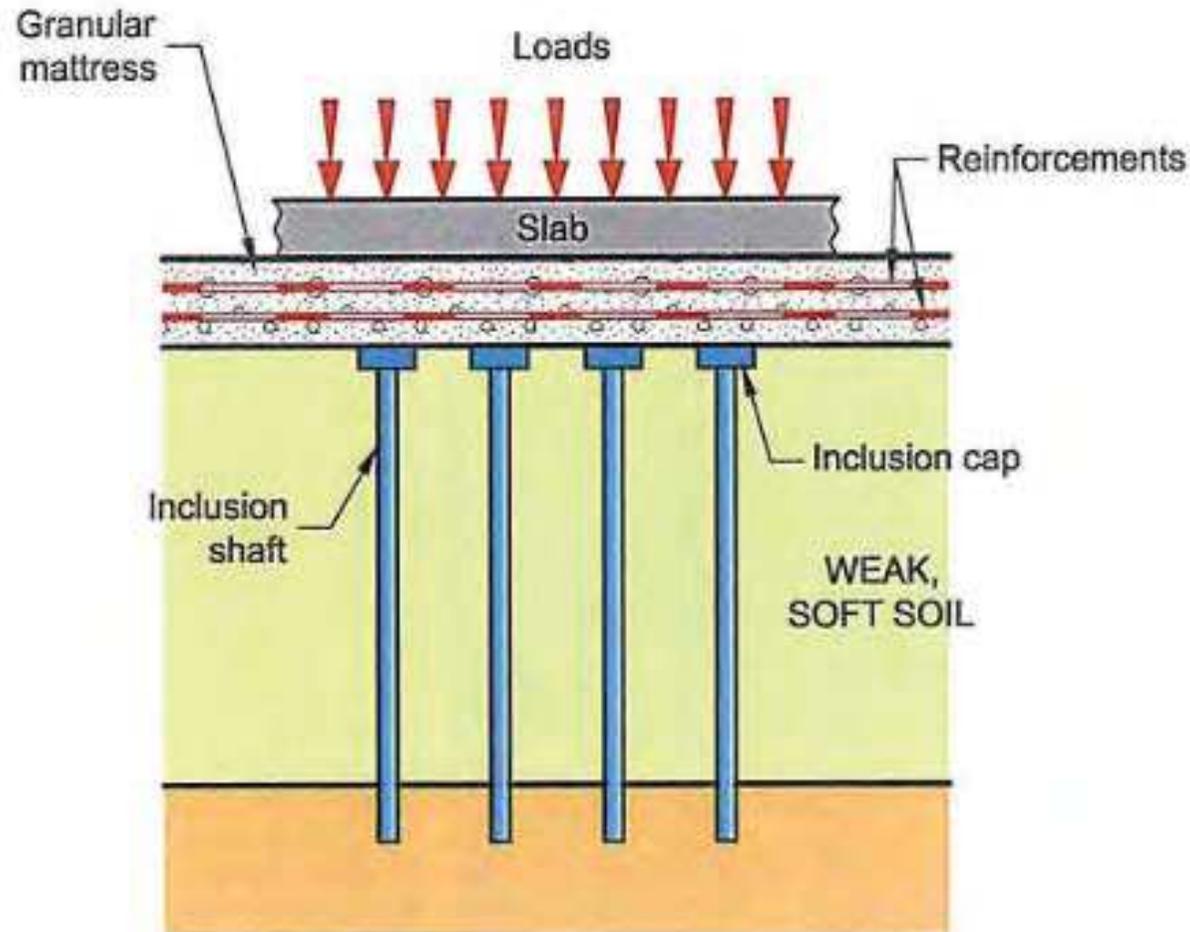
Figure 1.1: The various types of foundations.

- La definizione di inclusione rigida prescinde dalla tecnica utilizzata.
- Le inclusioni rigide non sono strutturalmente connesse alla sovrastruttura.
- Le inclusioni hanno l'obiettivo di ridurre i cedimenti (verifiche S.L.E.)

**N.B. Ma la norma europea è ancora oggetto di discussione.**

# «LOAD TRANSFER PLATFORM»: UN DIBATTITO IN CORSO

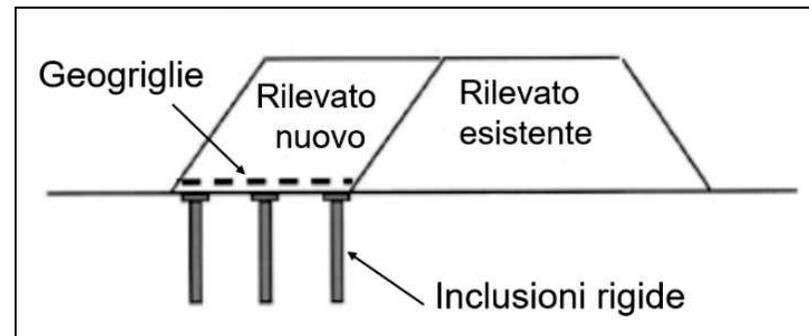
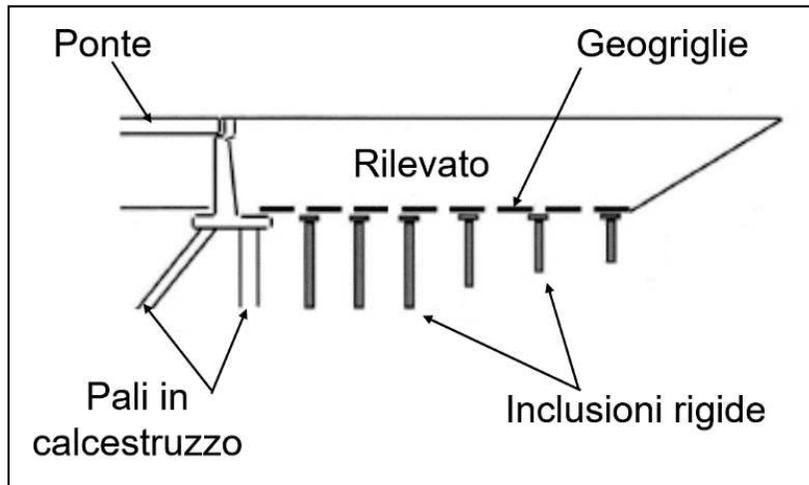
- Load transfer platform is defined as a stratum positioned between the discrete G.I. and the structure, to provide load transfer and/or to modify its distribution as required for the design.



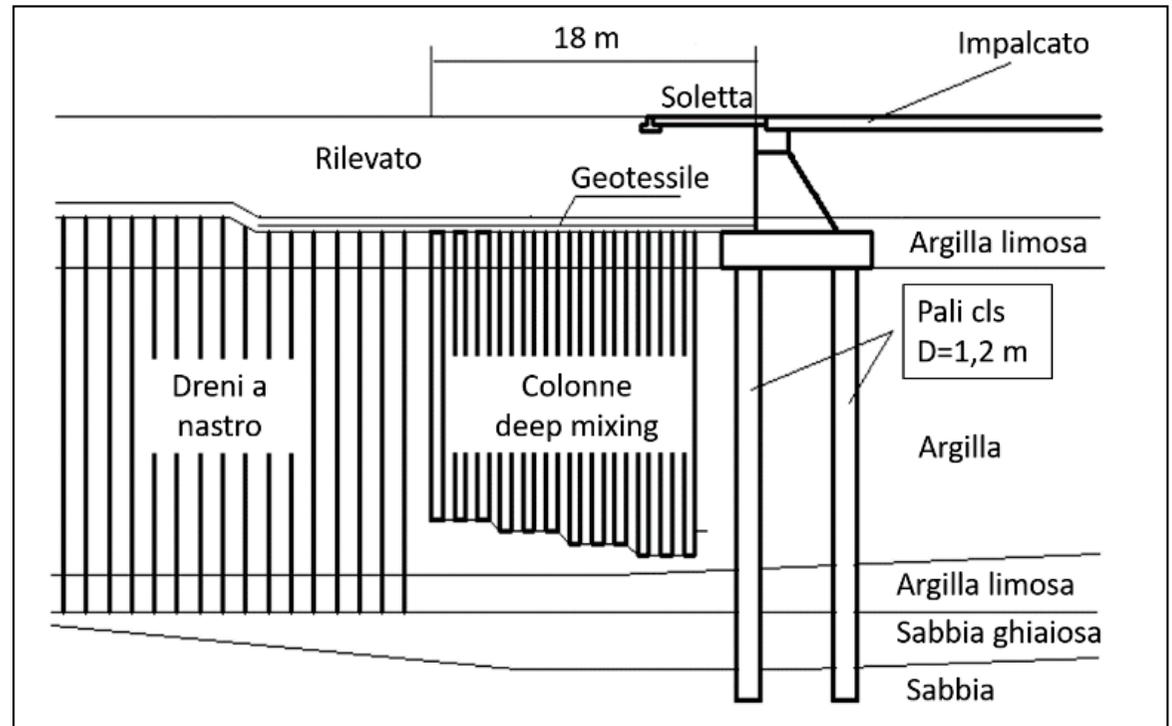
**Figure 1.2:** The four components of a complete foundation on rigid inclusions.

# AMPLIAMENTO DEI RILEVATI SU TERRENI CEDEVOLI

## Mediante Inclusioni



da Han e Gabr, 2002



Jiasha Street, Taiwan  
da Lin e Wong, 1999

# METODO OSSERVAZIONALE (OBSERVATIONAL METHOD)

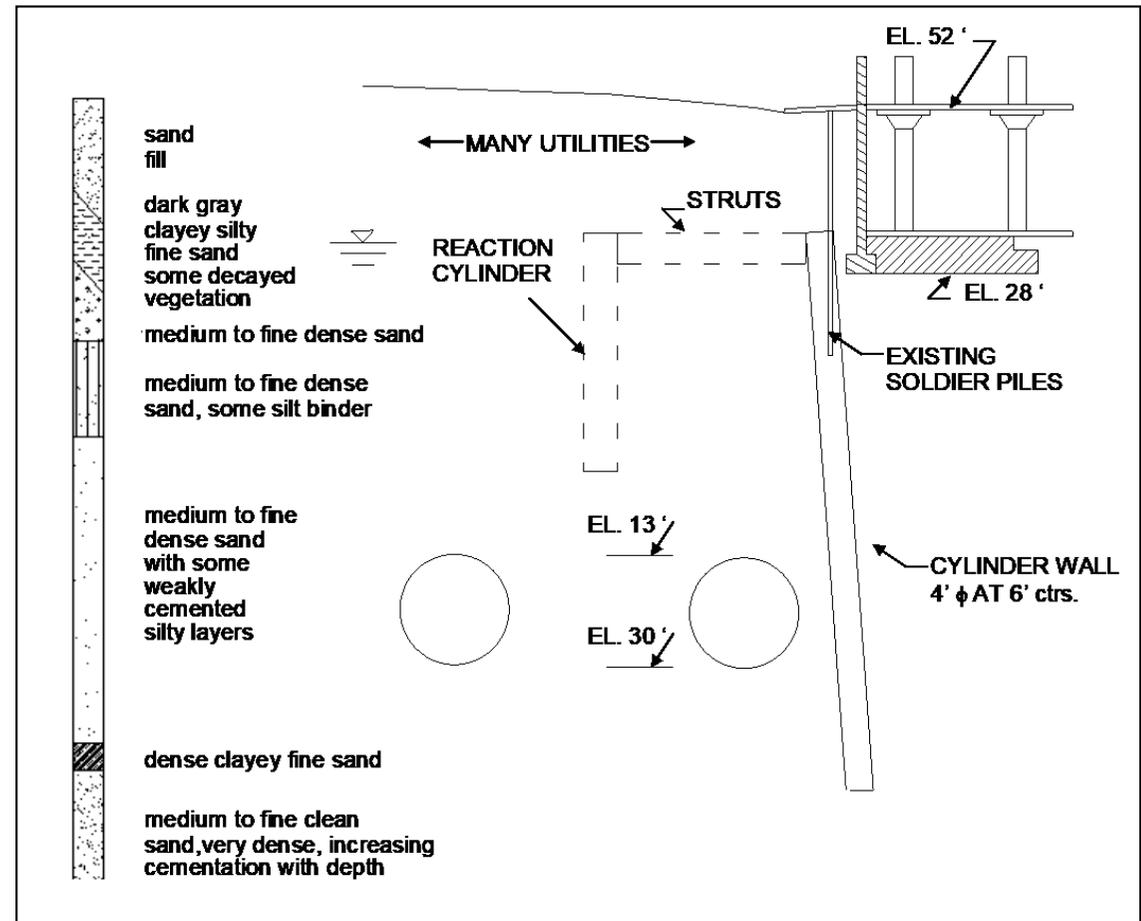
## Peck's Rankine Lecture, 1969

### BEST WAY OUT APPROACH (NO)

"whenever construction has already started and some unexpected development has occurred or whenever a failure or accident threatens or has already taken place"

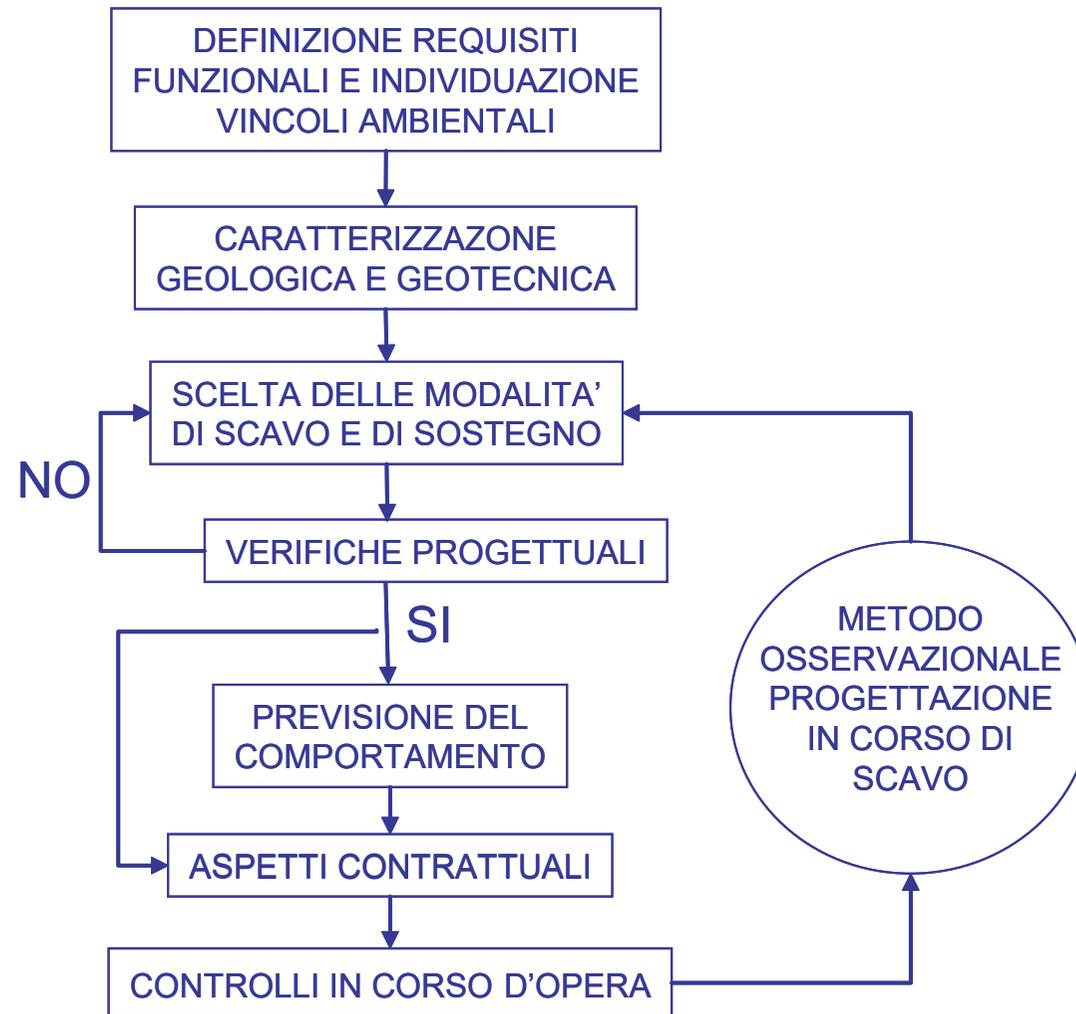
### AB INITIO APPROACH (SI)

"the essential ingredient is the visualization of all possible eventualities and the preparation in advance of courses of action to meet whatever situation develops"



## Bay Area Rapid Transit in San Francisco

# METODO OSSERVAZIONALE SECONDO R. RIBACCHI (1993)



Renato Ribacchi, *Recenti Orientamenti nella Progettazione Statica delle Gallerie*. XVIII Convegno Nazionale di Geotecnica, Rimini, 1993.

# PRINCIPLES OF THE OBSERVATIONAL METHOD

## Eurocode 7 Geotechnical Design. Part 1. General Rules

“when prediction of geotechnical behaviour is difficult, it can be appropriate to apply the approach known as the **observational method**, in which the design is reviewed during construction.”

## Nicholson et al. (1999)

“The **observational method** in ground engineering is a continuous, managed, integrated, process of **design, construction control, monitoring and review** that enables **previously defined modifications** to be incorporated during or after construction.”

## Patel et al. (2007)

Geotechnical Uncertainty	Example
Geological	Complex Geology & Hydrogeology
Parameter and Modelling	Undrained Versus Drained Behaviour
Ground Treatment	Grouting, Dewatering
Construction	Complex Temporary Work

## N.T.C. 2018

# IMPIEGO DEL METODO OSSERVAZIONALE

La progettazione può fare ricorso anche al metodo osservazionale, nei casi in cui a causa della particolare complessità della situazione geologica e geotecnica e dell'importanza e impegno dell'opera, dopo estese ed approfondite indagini permangono documentate **ragioni di incertezza risolvibili solo in fase di esecuzione dell'opera.**

Nell'applicazione di tale metodo si deve utilizzare il seguente procedimento:

- devono essere stabiliti i **limiti di accettabilità** dei valori di alcune grandezze rappresentative del comportamento del complesso manufatto-terreno;
- si deve dimostrare che la soluzione prescelta è accettabile in rapporto a tali limiti;
- devono essere previste **soluzioni alternative**, congruenti con il progetto, e definiti i relativi oneri economici;
- deve essere istituito un adeguato **sistema di monitoraggio in corso d'opera**, con i relativi piani di controllo, tale da consentire tempestivamente l'adozione di una delle soluzioni alternative previste, qualora i limiti indicati siano raggiunti.

# METODO OSSERVAZIONALE: N.T.C. 2018

Complessità della situazione geologica e geotecnica.



Incertezza risolvibile solo in fase di esecuzione



## PROCEDIMENTO

- Limiti di accettabilità: es. cedimenti
- Monitoraggio
- Soluzioni alternative

Nicholson et al. (1999)

"The **observational method** in ground engineering is a continuous, managed, integrated, process of **design, construction control, monitoring and review** that enables previously defined modifications to be incorporated during or after construction."

# PALERMO: COLLETTORE FOGNARIO EMISSARIO SUD-ORIENTALE (2006-08)

Design and construction of a sewer tunnel in difficult site conditions

P. Croce

*University of Cassino, Italy*

S. Di Maio, G. Speciale, L. Cassibba

*Sering Ingegneria s.r.l., Italy*



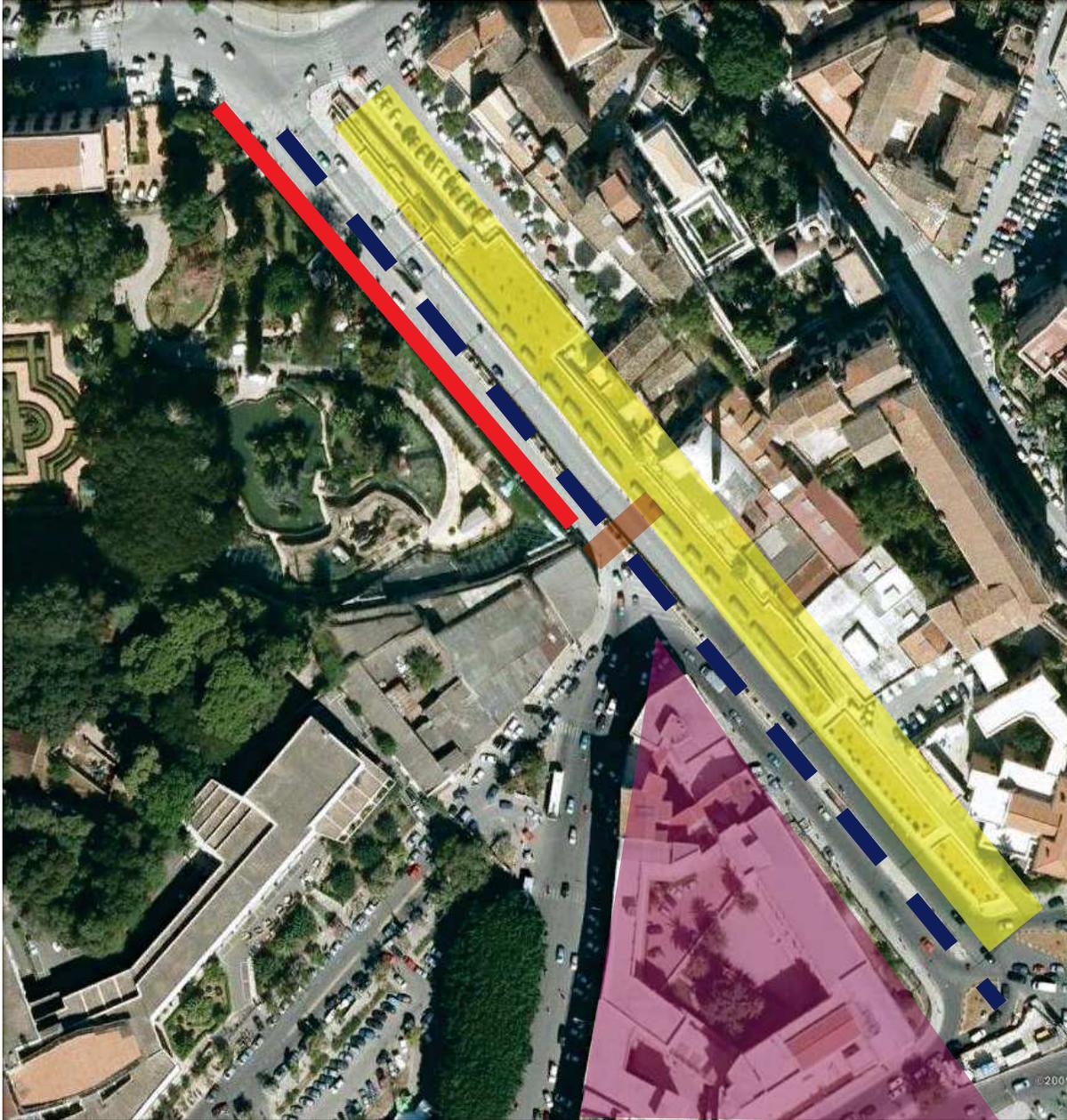
*Città di  
Palermo*



lunghezza=4,8 km  
diametro = 3.80 -  
6.00 m  
copertura = 1 ÷ 9 m

*Geotechnical Aspects  
of Underground Constructions  
in Soft Ground.  
May 2011, A.G.I. Roma*

## TRATTO "CORSO RE RUGGERO"



Lunghezza	350 m
Larghezza	5.40 m
Altezza	6.00 m
Copertura	7 m

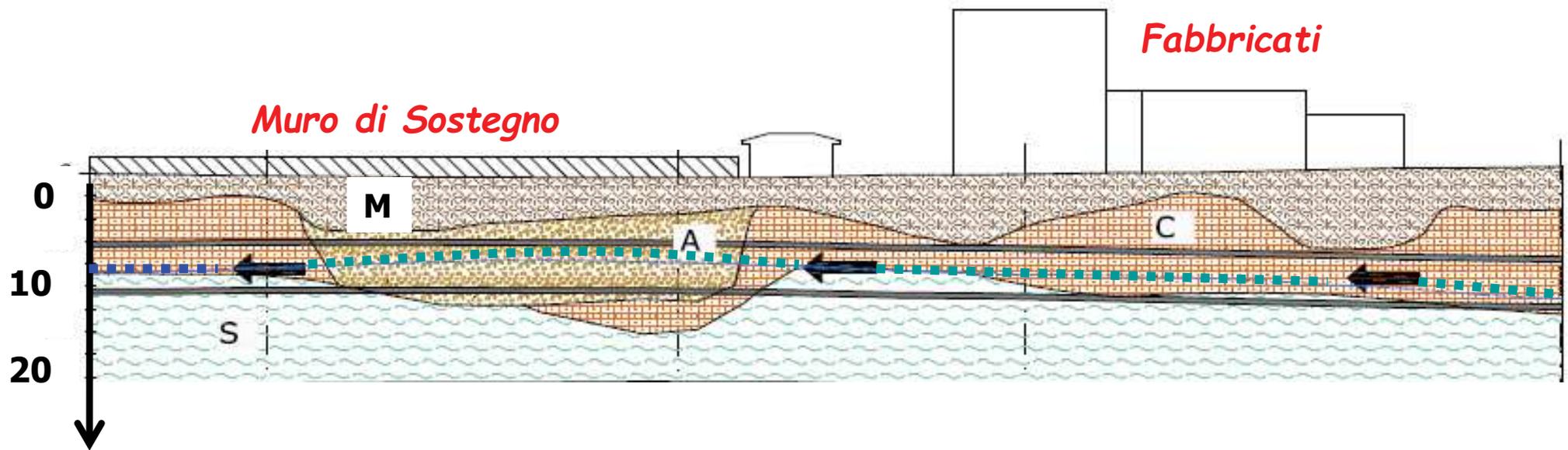
fabbricati

Metropolitana

Muro di Sostegno

Sottopasso Pedonale

# INDAGINI DI PROGETTO: PROFILO GEOTECNICO

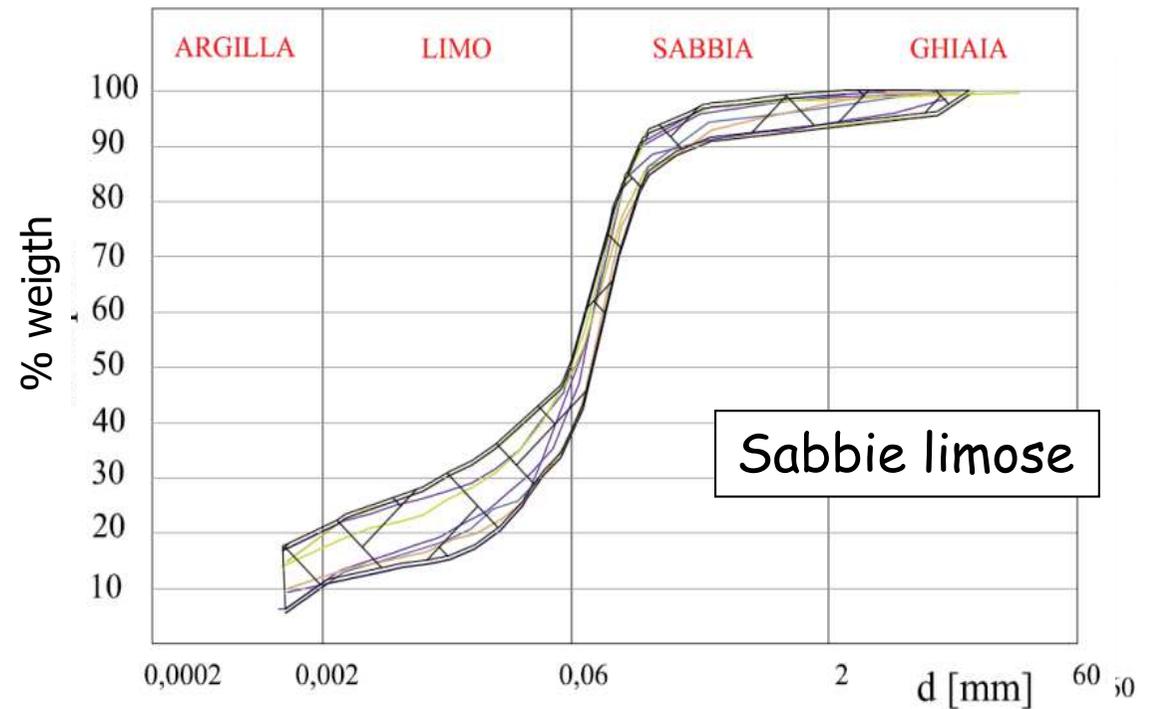


M = riporto

A = terreni alluvionali  
(fiume Kemonia)

C = calcareniti  
(cementazione variabile)

S = sabbie limose  
(dense – uniformi)



# CALCARENITI



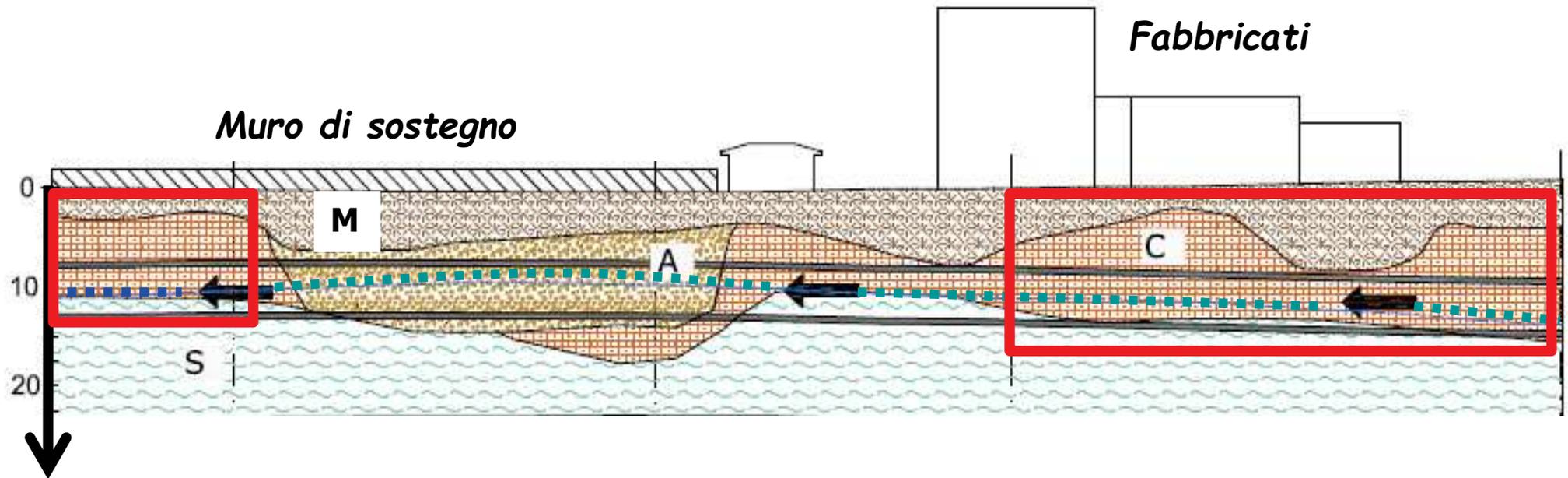
Cementazione Variabile

No Campioni Indisturbati  
(prelievo difficile)

Indagini in sito problematiche



# PROGETTO: SEZIONE TIPO I (INFILAGGI METALLICI)



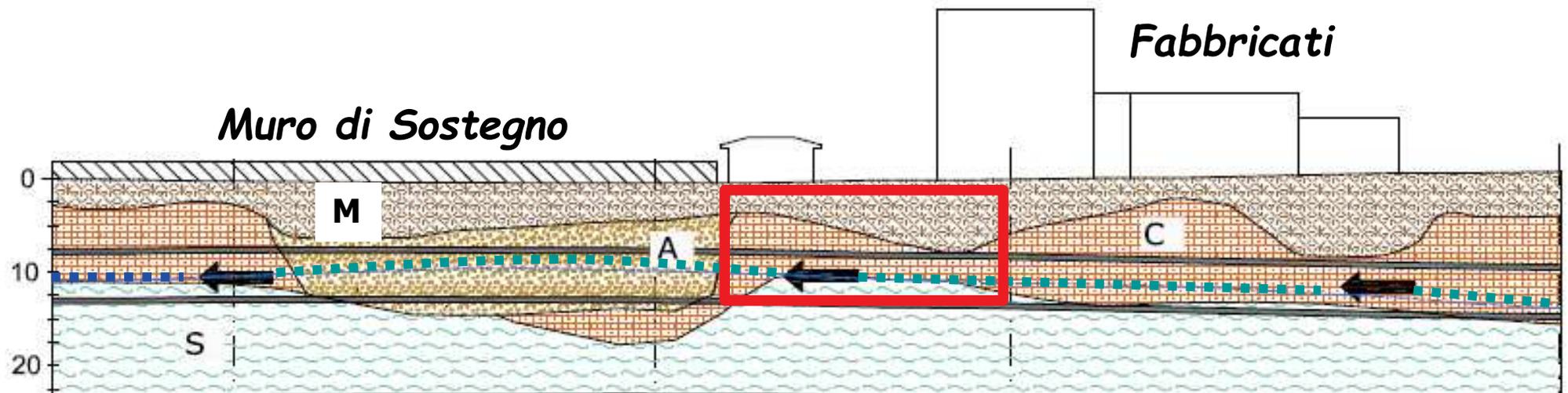
**RIPORTO**

**CALCARENITI**

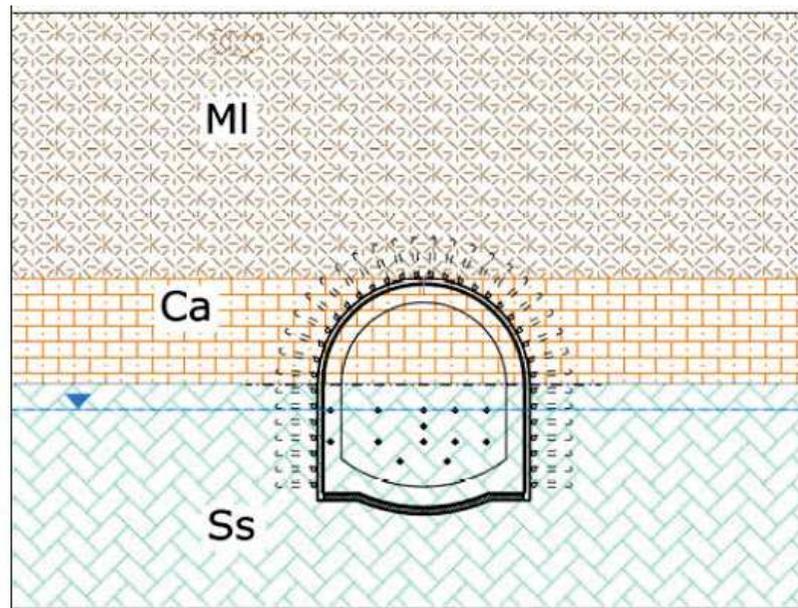
**SABBIE**

CANOPY TYPE I	
Calotta	Infilaggi metallici
Piedr.	—
Arco R	—
Fronte	—
Dreni	3 Dreni orizzontali

# PROGETTO: SEZIONE TIPO II (MICROPALI + VTR)



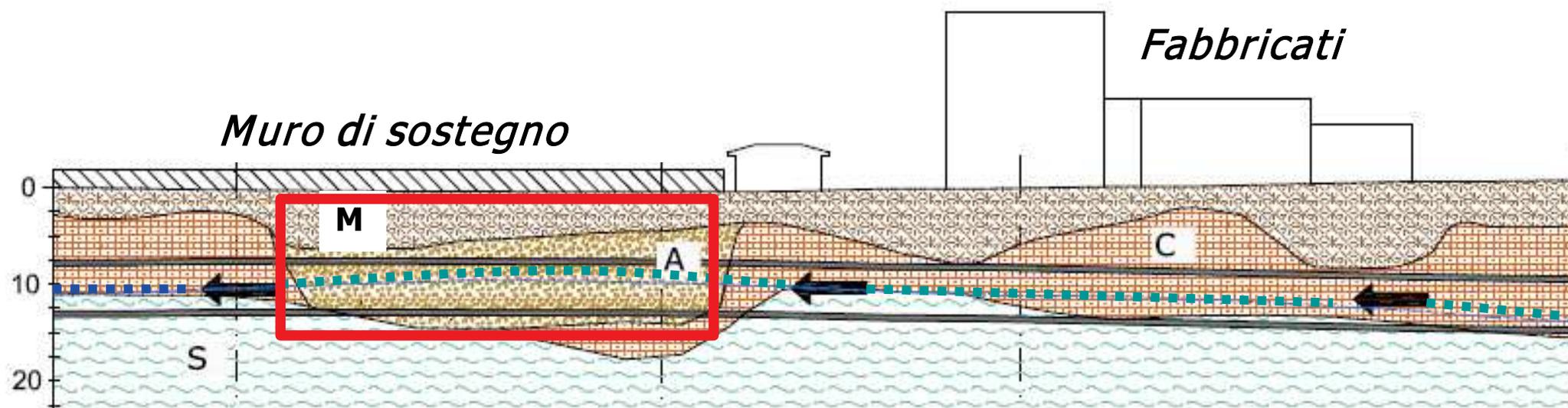
**RIPORTO**  
**CALCARENITI**  
**SABBIE**



## CANOPY TYPE II

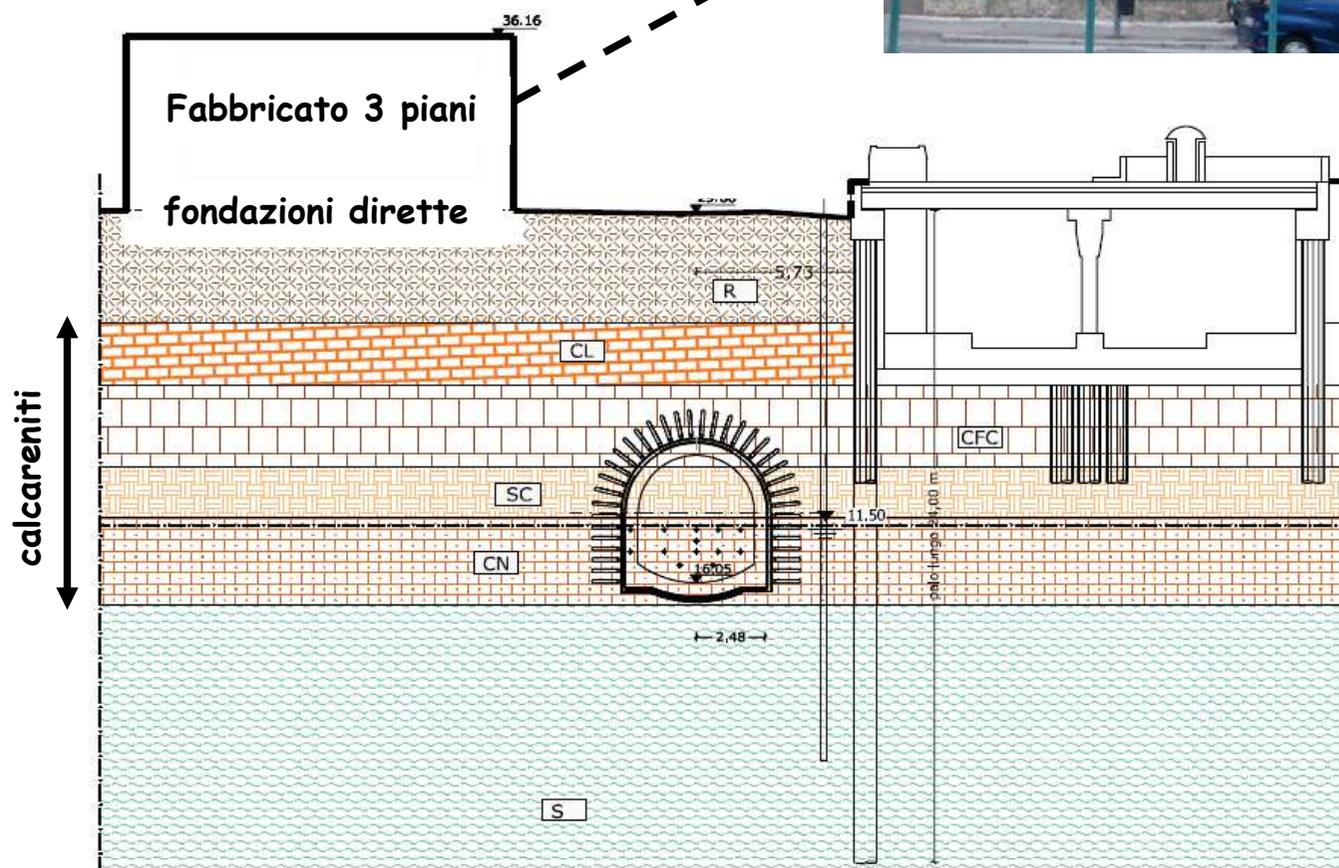
Calotta	22 Infilaggi metallici
Piedr.	10 Infilaggi metallici
Arco R.	—
Fronte	22 Infilaggi VTR
Dreni	3 Dreni orizzontali

# PROGETTO: SEZIONE TIPO III (JET GROUTING)



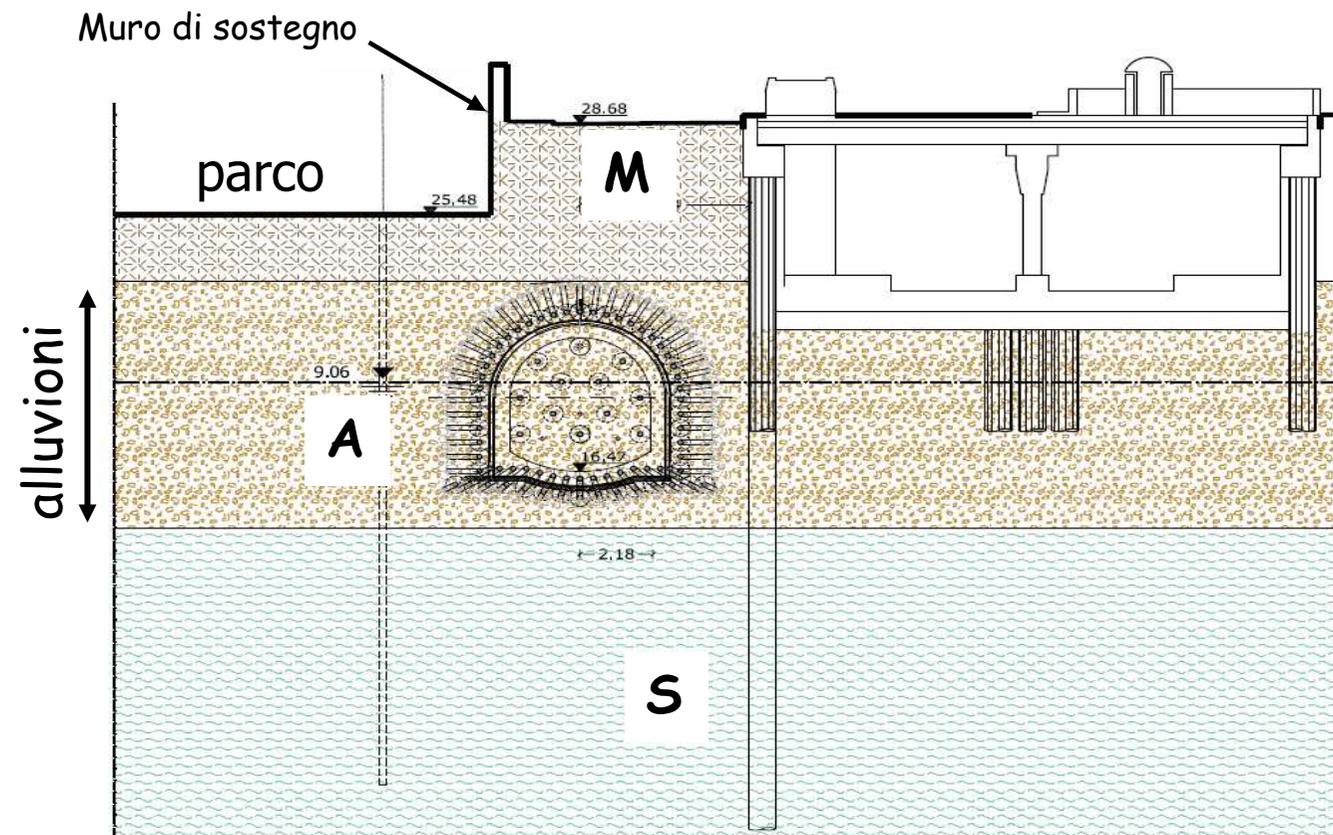
RIPORTO	MI	CANOPY TYPE III	
		Calotta	23 colonne jet.
ALLUVIONI	AI	Piedr.	12 colonne jet.
	SABBIE	Ss	Arco R
			Fronte
		Dreni	3 dreni orizzontali

# TIPICA SEZIONE TRASVERSALE (Sezione Tipo I - micropali)

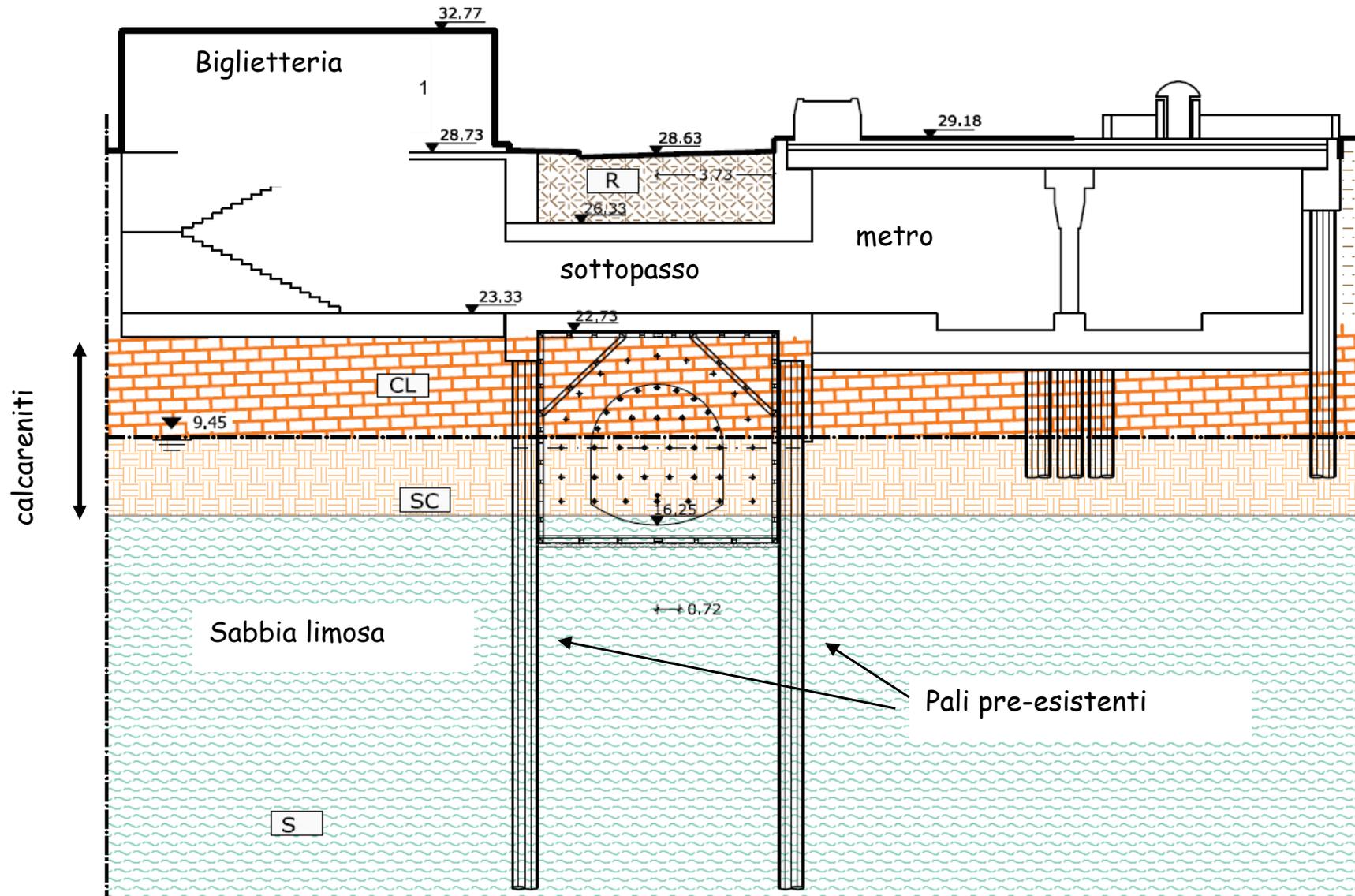




# TIPICA SEZIONE TRASVERSALE (Sezione Tipo III - Jet Grouting)



# SEZIONE SPECIALE: SOTTOPASSO PEDONALE (solo centine)



# PIANO DI MONITORAGGIO

## INTERNO GALLERIA

- sondaggi sub-orizzontali in avanzamento
- rilievi litologici al fronte di scavo
- misure di convergenza del rivestimento provvisorio
- misure di deformazione delle centine con "strain gauges"
- misure di pressione con celle di carico

## ESTERNO

- misure topografiche (fabbricati, strada, muro)
- misure fessurimetriche
- misure inclinometriche
- misure assestometriche
- misure piezometriche

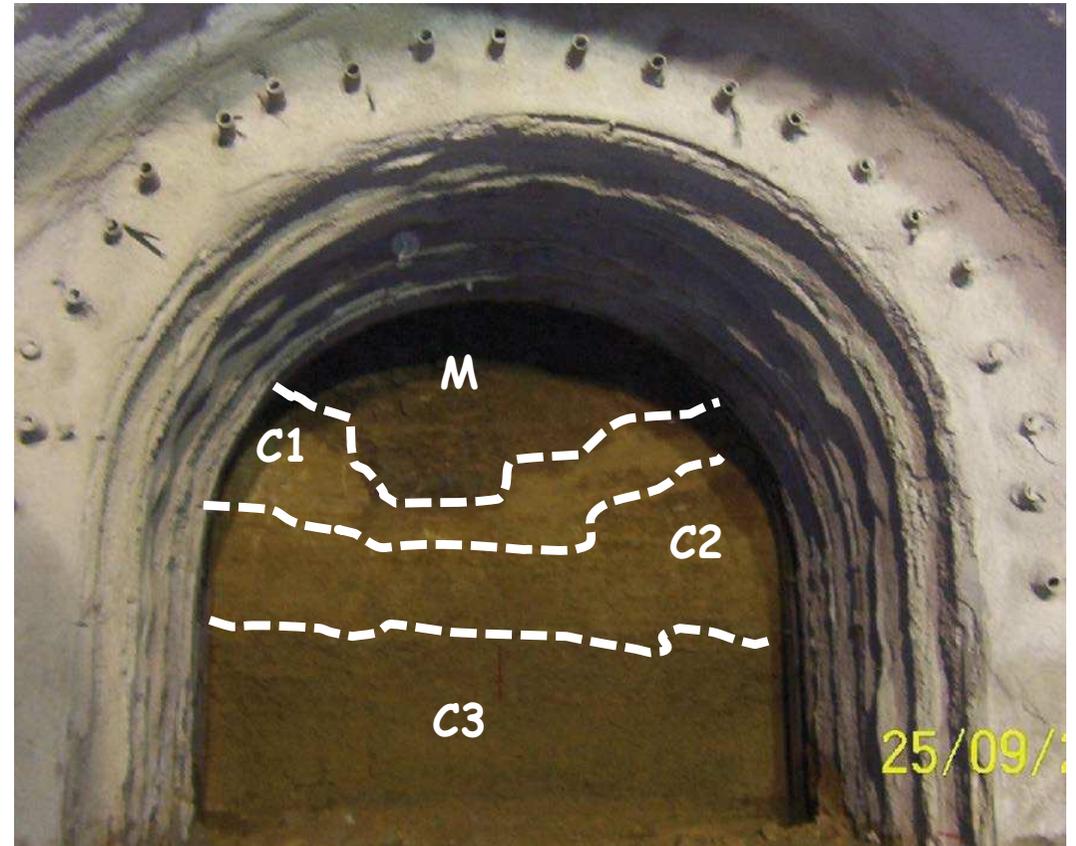
# VERIFICA DELLE CONDIZIONI STRATIGRAFICHE

**M** = RIPORTO

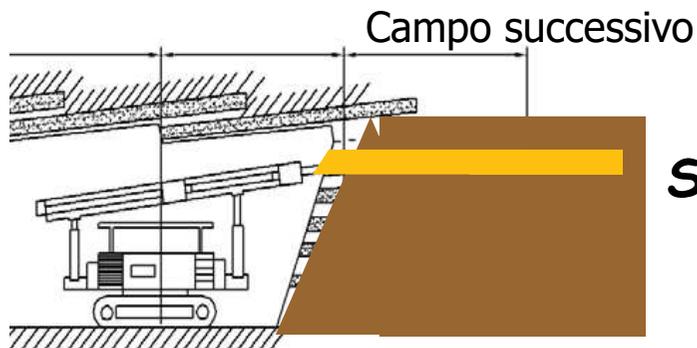
**C1** = calcarenite leggermente cementata

**C2** = calcarenite debolmente cementata

**C3** = calcarenite cementata

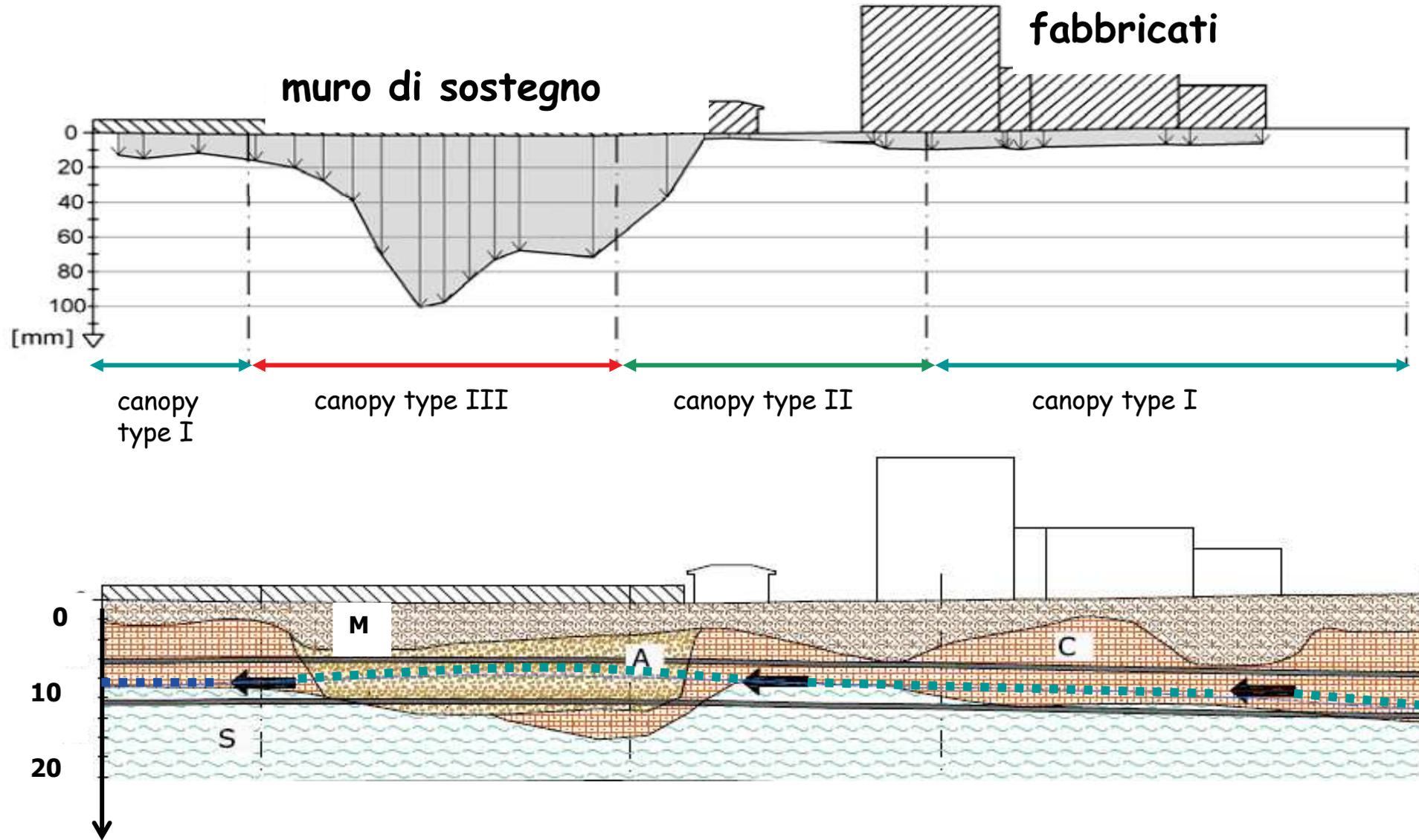


Rilievi litologici al fronte



Sondaggio orizzontale

# CEDIMENTI FINALI



# MODIFICHE IN CORSO D'OPERA

Jet Grouting armato



Infilaggi VTR



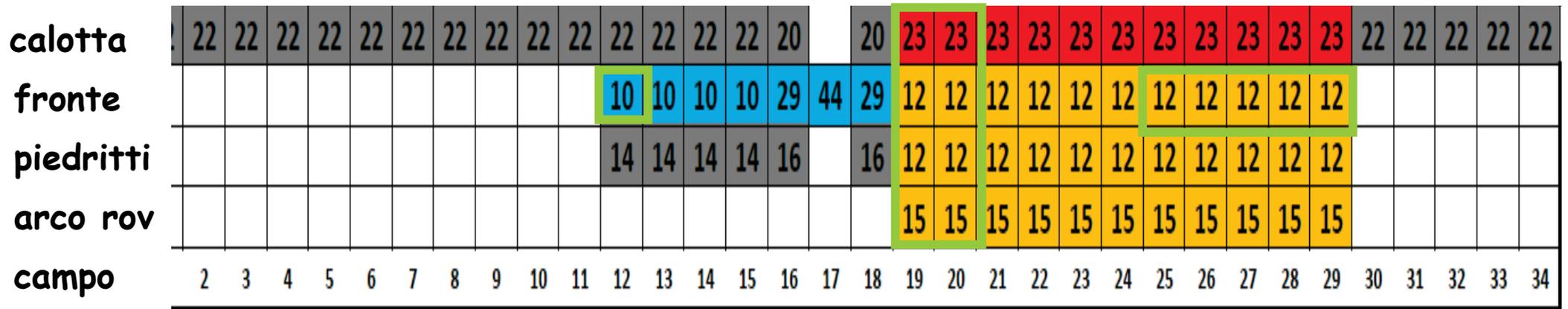
Jet Grouting



Micropali



## PROGETTO

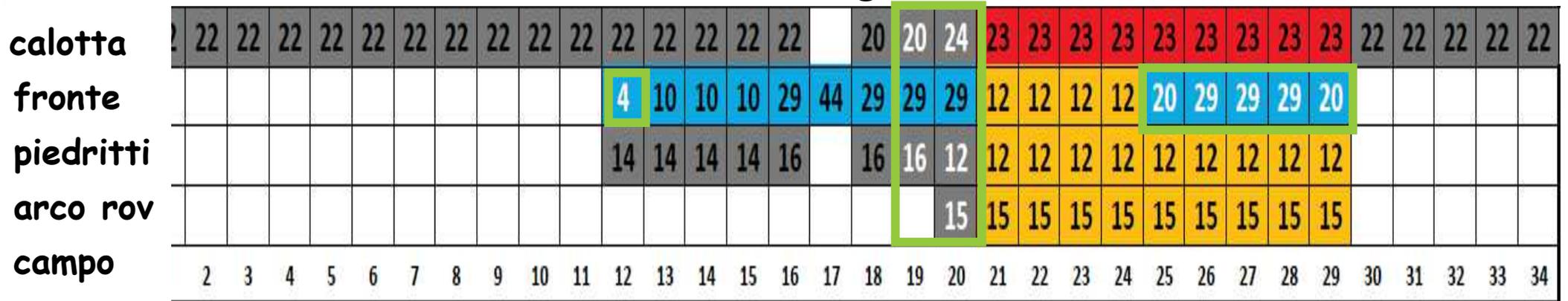


## AS BUILT

dettaglio costruttivo

problemi organizzativi

affinamento tecnico



# JET GROUTING: RACCOMANDAZIONI TECNICHE A.G.I.

Associazione Geotecnica Italiana

## **JET GROUTING** Raccomandazioni

Edizione provvisoria giugno 2012

EDIZIONI - AGI  
ROMA

## INDICE

1. OGGETTO
2. TECNOLOGIA
3. EFFETTI DEI TRATTAMENTI
4. APPLICAZIONI
5. PROGETTO
6. CONTROLLI

# JET GROUTING: RACCOMANDAZIONI TECNICHE A.G.I.

1. OGGETTO
2. TECNOLOGIA
  - 2.1. Modalità esecutive
  - 2.2. Sistemi di trattamento
    - 2.2.1 *Sistema Monofluido*
    - 2.2.2 *Sistema Bifluido*
    - 2.2.3 *Sistema Trifluido*
  - 2.3. Pretaglio
  - 2.4. Spurgo e sostegno del foro
  - 2.5. Attrezzature
    - 2.5.1 *Impianto di confezionamento della miscela cementizia*
    - 2.5.2 *Pompe e compressore*
    - 2.5.3 *Perforatrici*
    - 2.5.4 *Batteria di aste*
    - 2.5.5 *Monitor*
  - 2.6. Miscele d iniezione
  - 2.7. Parametri di trattamento
3. EFFETTI DEI TRATTAMENTI
  - 3.1. Principio di funzionamento
  - 3.2. Energia del getto
  - 3.3. Interazione getto-terreno
  - 3.4. Diametro medio delle colonne consolidate
  - 3.5. Variabilità geometriche
    - 3.5.1 *Variazione del diametro*
    - 3.5.2 *Variazione della direzione*
  - 3.6. Caratteristiche fisico-meccaniche del materiale consolidato
    - 3.6.1 *Resistenza*
    - 3.6.2 *Rigidezza*
    - 3.6.3 *Permeabilità*
    - 3.6.4 *Peso dell'unità di volume*

# JET GROUTING: RACCOMANDAZIONI TECNICHE A.G.I.

## 4. APPLICAZIONI

4.1. Finalità degli interventi

4.2. Fondazioni

4.2.1 *Fondazioni dirette*

4.2.2 *Fondazioni a pozzo*

4.2.3 *Consolidamento di fondazioni preesistenti*

4.3. Opere di sostegno

4.4. Gallerie

4.4.1 *Trattamenti dall'esterno della galleria*

4.4.2 *Trattamenti dall'interno della galleria*

4.5. Diaframmi

4.6. Tamponi di fondo

## 5. PROGETTO

5.1. Riferimenti normativi

5.2. Sequenza progettuale

5.3. Calcoli di verifica

5.3.1 *Caratteristiche geometriche delle colonne consolidate*

5.3.2 *Caratteristiche meccaniche del materiale cementato*

5.4 Campo prove

5.4.1 *Misure dell'esito dei trattamenti*

5.4.2 *Ottimizzazione del sistema di trattamento*

5.4.3 *Misura degli effetti sull'ambiente circostante*

5.4.4 *Messa a punto del sistema di controllo e monitoraggio*

# JET GROUTING: RACCOMANDAZIONI TECNICHE A.G.I.

## 6. CONTROLLI

### 6.1 Premessa

### 6.2 Riferimenti normativi

### 6.3 Controlli sui materiali

#### 6.3.1 *Leganti idraulici*

#### 6.3.2 *Additivi*

#### 6.3.3 *Armature*

#### 6.3.4 *Acqua*

#### 6.3.5 *Miscela cementizia*

### 6.4 Controlli delle modalità esecutive

#### 6.4.1 *Controlli sulle attrezzature e sul processo produttivo*

#### 6.4.2 *Controlli della posizione dell'asse di trattamento*

### 6.5 Controlli finali sul prodotto

#### 6.5.1 *Controlli prestazionali*

##### 6.5.1.1 *Prove di carico*

##### 6.5.1.2 *Prove di permeabilità*

#### 6.5.2 *Controlli delle caratteristiche degli elementi consolidati*

##### 6.5.2.1 *Prove in sito*

###### 6.5.2.1.1 *Osservazione diretta degli elementi consolidati*

###### 6.5.2.1.2 *Sondaggi a carotaggio continuo*

###### 6.5.2.1.3 *Perforazioni strumentate*

###### 6.5.2.1.4 *Carotaggio sonico*

###### 6.5.2.1.5 *Cross-hole*

###### 6.5.2.1.6 *Tomografia sonica*

###### 6.5.2.1.7 *Altre indagini in sito*

##### 6.5.2.2 *Prove in laboratorio*

###### 6.5.2.2.1 *Prove di compressione semplice*

###### 6.5.2.2.2 *Prove di compressione triassiale e di taglio diretto*

### 6.6 Controlli sui manufatti circostanti

# OBIETTIVI PROGETTUALI

stabilire le caratteristiche geometriche e meccaniche degli elementi di terreno consolidato, necessarie per adempiere i compiti richiesti dall'intervento

indicare le modalità di trattamento più opportune per ottenere le suddette caratteristiche

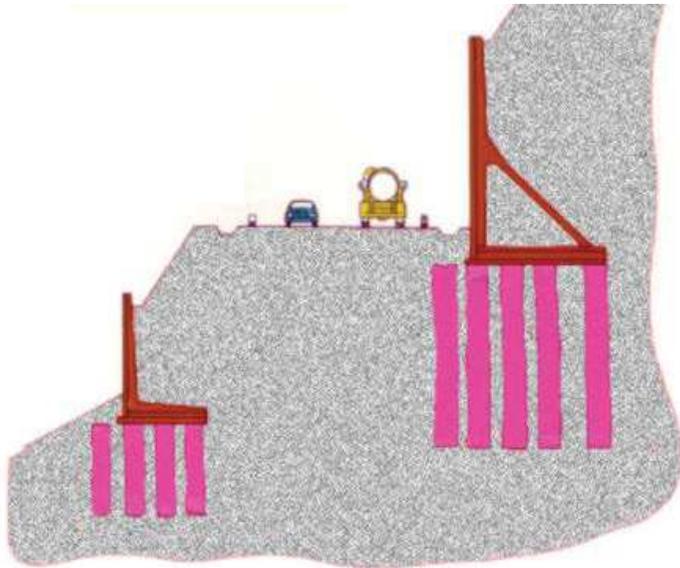
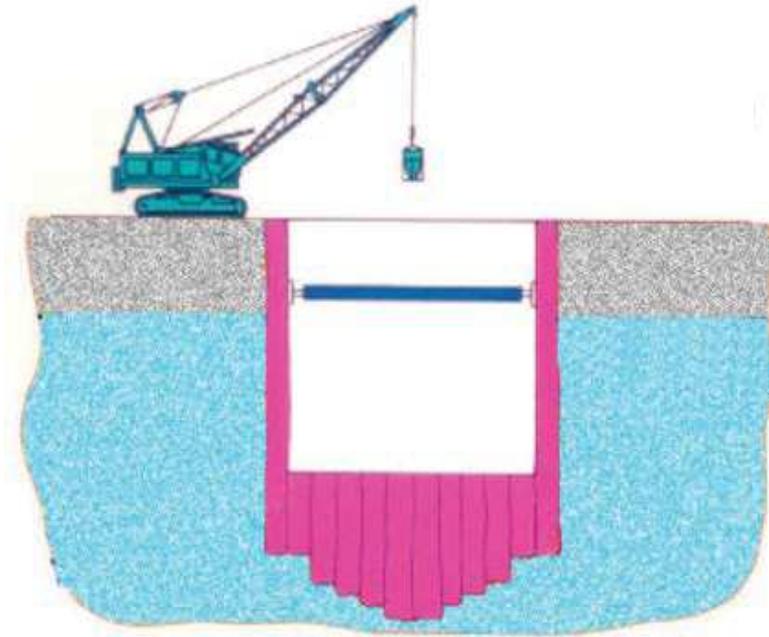
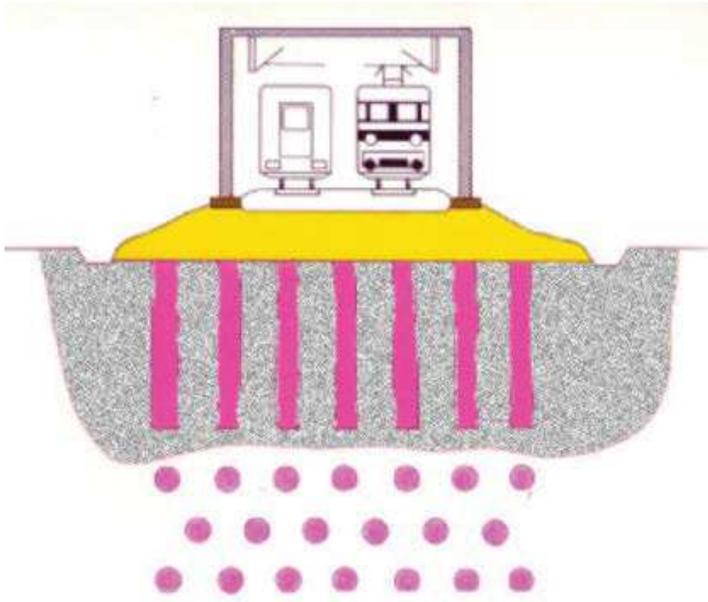
evitare effetti indesiderati dei trattamenti sulle costruzioni preesistenti e sull'ambiente circostante.

## AVVERTENZA

necessario valutare la variabilità delle proprietà geometriche e meccaniche degli elementi consolidati,  
da considerare come un carattere fisiologico del jet grouting

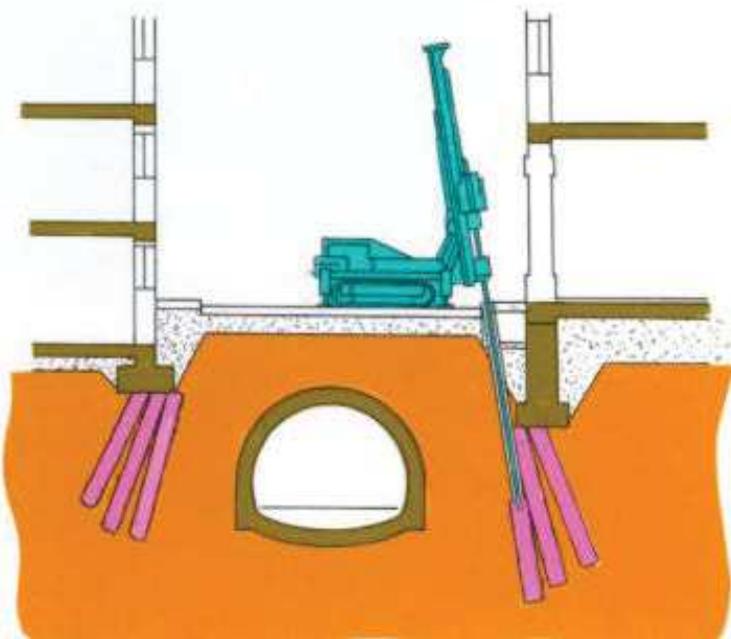
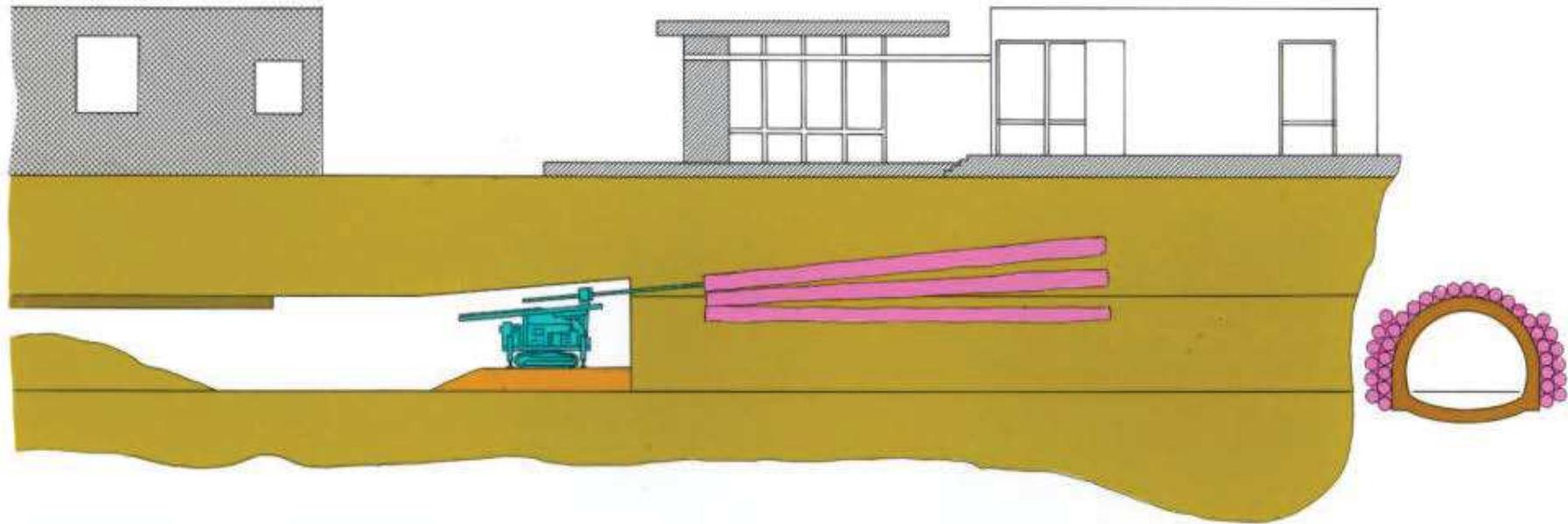
# CARATTERISTICHE TIPOLOGICHE

**CARATTERISTICHE GEOMETRICHE VARIABILI:  
COLONNE ISOLATE - COMPENETRATE**



**DIVERSE FUNZIONI PROGETTUALI  
STATICA - TENUTA IDRAULICA**

# FUNZIONE PERMANENTE O PROVVISORIALE

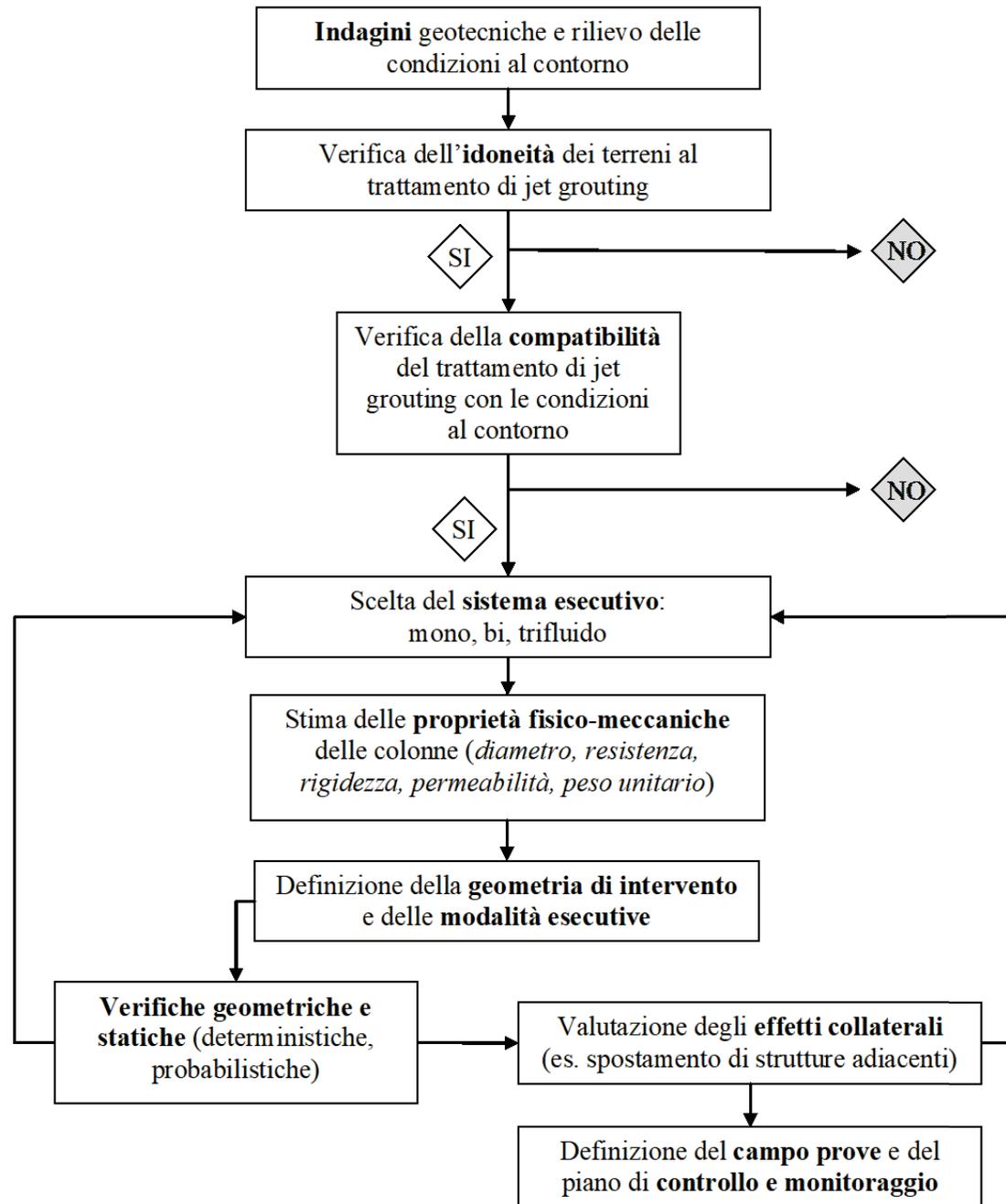


**CONDIZIONI DI LAVORO**  
**all'aperto - in sotterraneo, ecc.**

# REQUISITI PROGETTUALI

TIPOLOGIA DI INTERVENTO	Funzioni del jet grouting	Caratteristiche intervento	Requisiti fondamentali	Caratteristiche materiale cons.
FONDAZIONI	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incremento della capacità portante</li> <li>- Riduzione dei cedimenti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Colonne isolate</li> <li>- Elementi massivi (colonne adiacenti o compenstrate)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adeguate dimensioni delle colonne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevata resistenza</li> <li>- Elevata rigidità</li> </ul>
OPERE DI SOSTEGNO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contenimento della spinta dei terreni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elementi bidimensionali eventualmente armati e/o rinforzati con tiranti</li> <li>- Trattamenti massivi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adeguate dimensioni delle colonne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevata Resistenza</li> <li>- Elevata rigidità</li> </ul>
SCAVO DI GALLERIE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sostegno dei terreni sul contorno</li> <li>- Rinforzo del fronte di scavo</li> <li>- Impermeabilizzazione dello scavo</li> <li>- Riduzione della spinta sul rivestimento definitivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interventi in avanzamento realizzati sul contorno (calotte continue) e/o sul fronte di scavo, eventualmente armati</li> <li>- Interventi dall'alto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compenetrazione delle colonne contigue</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bassa permeabilità</li> <li>- Elevata resistenza</li> <li>- Elevata rigidità</li> </ul>
DIAFRAMMI DI TENUTA IDRAULICA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Barriera al passaggio dei fluidi (acqua, fanghi, fluidi contaminanti etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elementi bidimensionali continui</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compenetrazione delle colonne contigue</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bassa permeabilità</li> </ul>
TAMPONI DI FONDO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impermeabilizzazione degli scavi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elementi continui, bidimensionali o massivi, eventualmente ancorati</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compenetrazione delle colonne contigue</li> <li>- Resistenza alla sottospinta idraulica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bassa permeabilità</li> </ul>
CONSOLIDAMENTO DI OPERE PREESISTENTI	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sottofondazione</li> <li>- Riduzione della spinta a tergo di opere di sostegno</li> <li>- Integrazione/riparazione di altri interventi di consolidamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Colonne isolate o elementi continui (bi-tridimensionali)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adeguate dimensioni delle colonne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevata resistenza</li> <li>- Elevata rigidità</li> <li>- Bassa permeabilità</li> </ul>

# IER PROGETTUALE



# INDAGINI E VERIFICHE SPERIMENTALI

## Geotecniche

*Vengono condotte con gli usuali mezzi di indagine geotecnica (in sito e/o in laboratorio) ed hanno lo scopo di:*

- *verificare l'idoneità dei terreni al trattamento di jet grouting*
- *stimare le caratteristiche delle colonne consolidate (diametro, resistenza...)*

## Campo Prove

*Consiste nell'esecuzione e controllo dell'efficacia del trattamento, prima di eseguire l'intervento.*

### *Obiettivi*

- *ottimizzare la tecnica esecutiva (sistema e parametri di trattamento)*
- *ottimizzare le procedure di controllo in corso d'opera*
- *verificare le previsioni di progetto ed effettuare eventuali modifiche (M. Osservaz.)*

**N.B. Di norma il Campo Prove si esegue in cantiere, dopo la consegna dei lavori.**

# SCHEMATIZZAZIONE DELLE COLONNE CONSOLIDATE

Le colonne di jet-grouting possono essere considerate come pali di medio-grande diametro (elementi cilindrici molto resistenti), ma:

La resistenza media e la rigidezza del materiale consolidato sono più basse del calcestruzzo

Le caratteristiche geometriche e meccaniche delle colonne ( $d$ ,  $\sigma_c$ ,  $E$ ) sono molto variabili

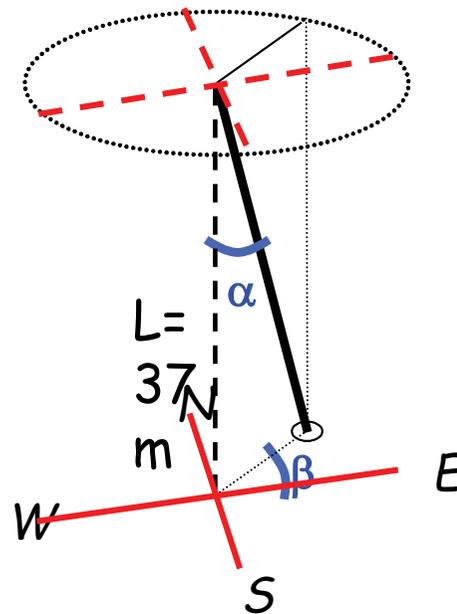
La posizione delle colonne può divergere da quella teorica di progetto

# DIFETTI TIPICI DELLE COLONNE CONSOLIDATE

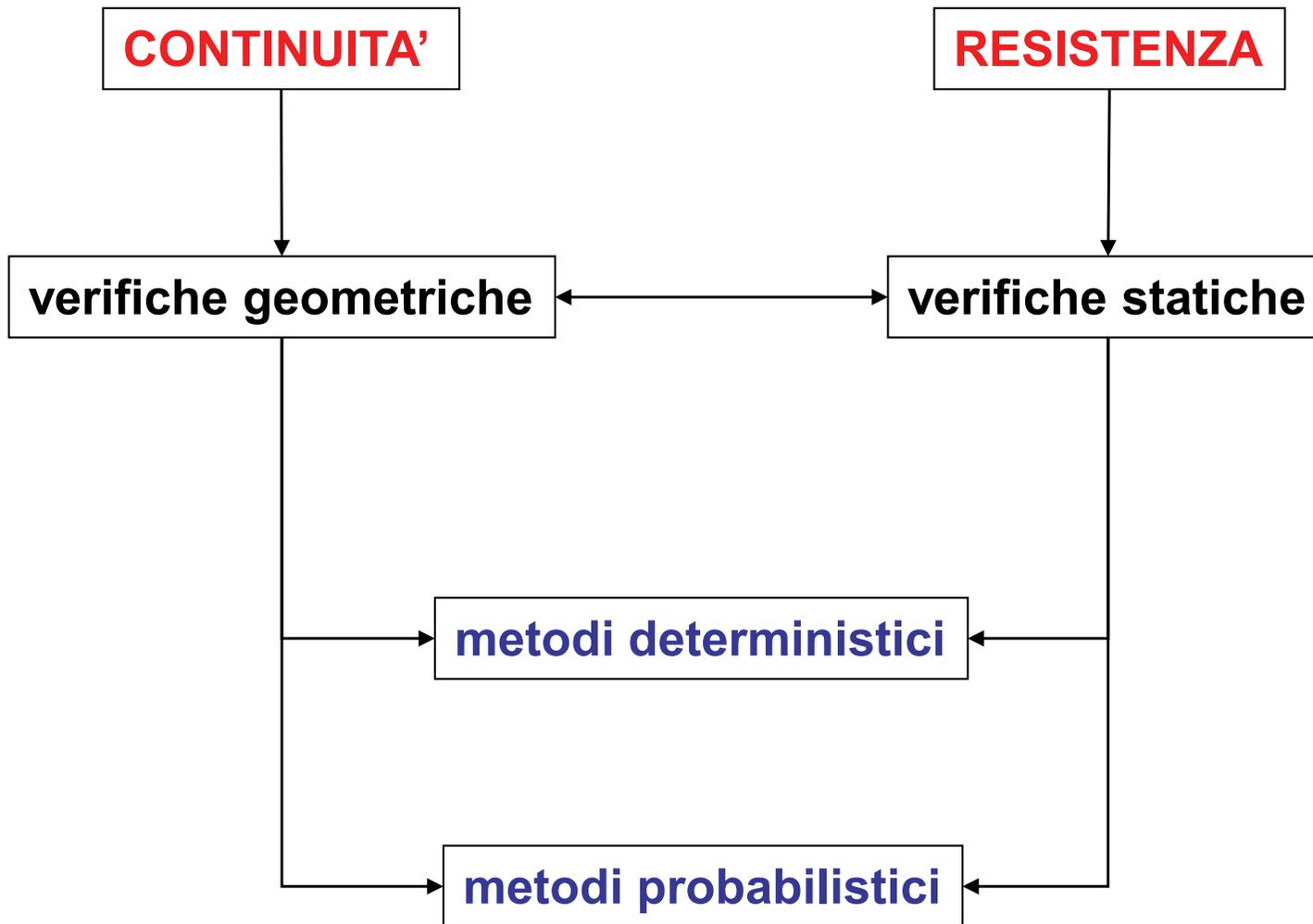
variabilità delle caratteristiche  
**geometriche** e **meccaniche**  
degli elementi consolidati

deviazione degli  
**assi di trattamento**

Variabilità di  
**resistenza** e **rigidezza**  
del terreno consolidato



# VERIFICHE DEGLI ELEMENTI CONSOLIDATI



# VARIABILITA' GEOMETRICA DEGLI ELEMENTI CONSOLIDATI (SIMULAZIONE PROBABILISTICA)

Configurazioni geometriche prevedibili alla distanza di 10m da boccaforo, in funzione della variabilità del diametro ( $D$ ) e dell'inclinazione delle colonne ( $\beta$ ).

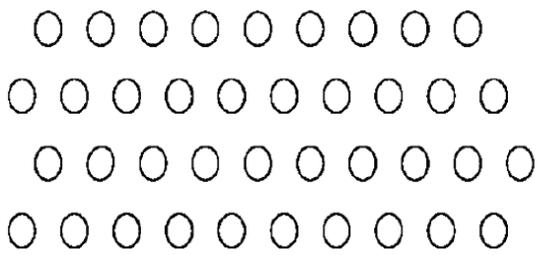
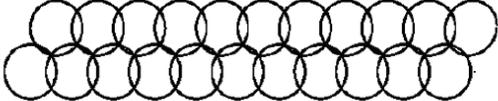
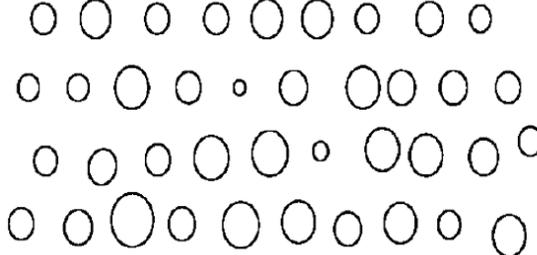
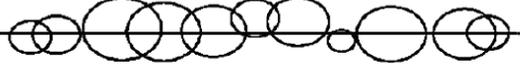
	Single elements	Single row	Double row
(a)			
(b)			

Figure 6.6 (a) Typical layouts of jet-grouted elements: (a) no variability (ideal condition); (b) with variability ( $SD(\beta) = 1^\circ$ ;  $CV(D) = 0.2$ ).

# VARIABILITA' GEOMETRICA DEGLI ELEMENTI CONSOLIDATI (SIMULAZIONE PROBABILISTICA)

Configurazioni geometriche prevedibili alla distanza di 10m da boccaforo, in funzione della variabilità del diametro ( $D$ ) e dell'inclinazione delle colonne ( $\beta$ ).

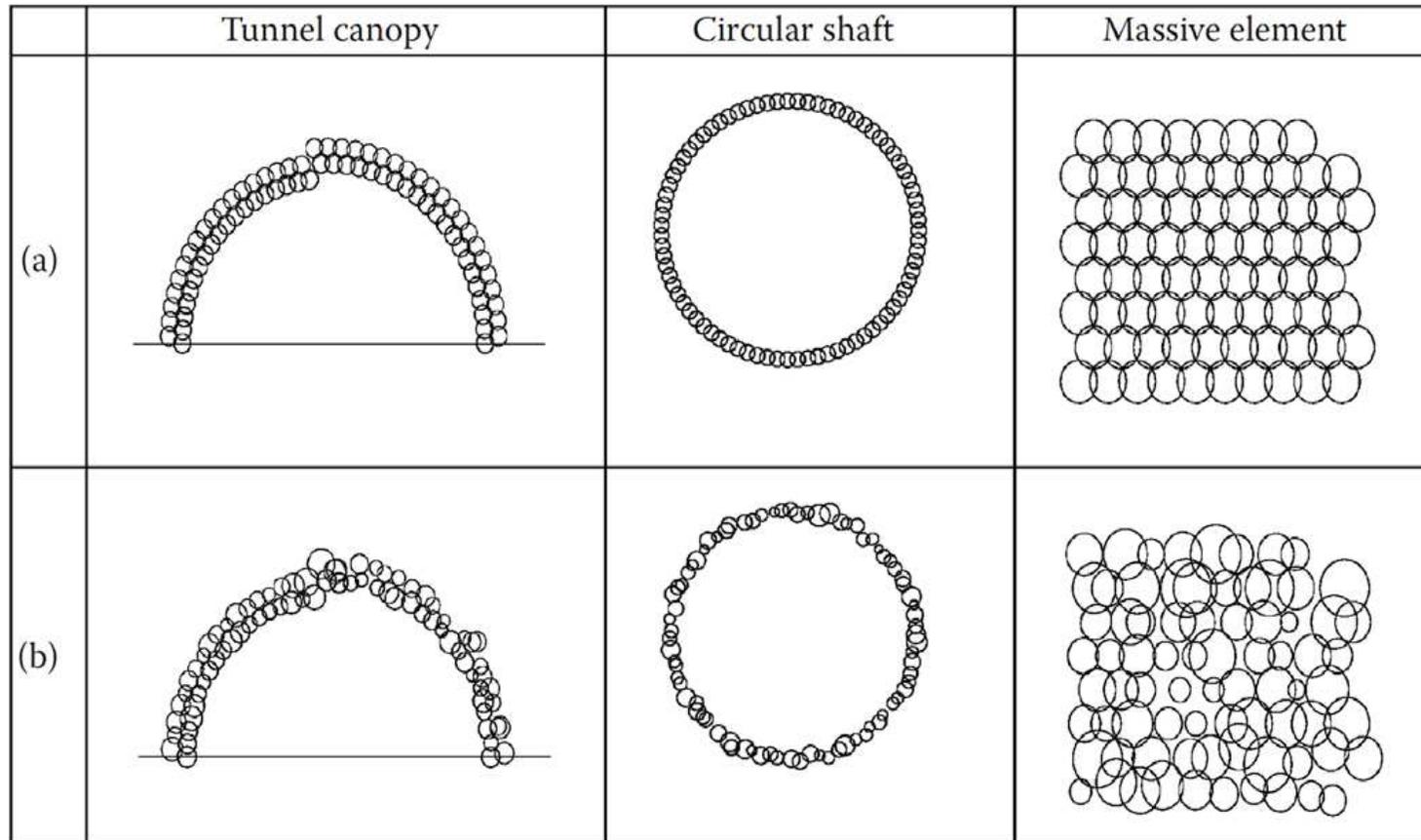


Figure 6.6 (a) Typical layouts of jet-grouted elements: (a) no variability (ideal condition); (b) with variability ( $SD(\beta) = 1^\circ$ ;  $CV(D) = 0.2$ ).

# VERIFICHE DETERMINISTICHE

## a) Stima del valore caratteristico del diametro $D_k$

**Tabella 3.1** – Valori orientativi dei diametri medi delle colonne consolidate.

SISTEMA DI TRATTAMENTO	Diametro delle colonne (m)			
	Argille mediamente consistenti	Limi e argille poco consistenti	Sabbia limosa	Sabbia e/o Ghiaia
Monofluido	S <sup>(*)</sup>	0.4 – 0.8	0.6 - 1.0	0.6 - 1.2
Bifluido	0.5 - 1.0	0.6 - 1.3	1.0 - 2.0	1.2 - 2.5
Trifluido	0.8 - 1.5	1.0 - 1.8	1.2 - 2.5	1.5 - 3.0

<sup>(\*)</sup> S = *sconsigliato*.

## b) Scelta del valore di progetto $D_d$

$$D_d = \frac{D_k}{\gamma_D}$$

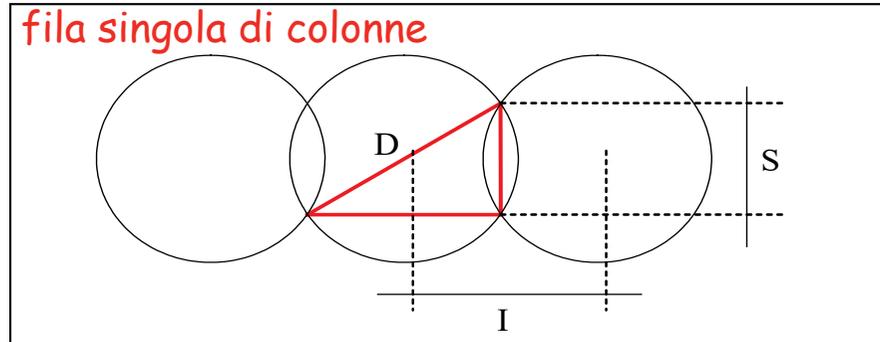
	ARGILLA	SABBIA	GHIAIA
$\gamma_D$	1.1	1.2	1.3

**N.B. valori orientativi suggeriti per  $\gamma_d$  in assenza di indicazioni normative**

## c) Stima della divergenza $\Delta\alpha$ tra colonne contigue

**valori orientativi suggeriti per  $\Delta\alpha = 0,4^\circ \div 0,8^\circ$**

# VERIFICHE DI CONTINUITA': es. DIAFRAMMI

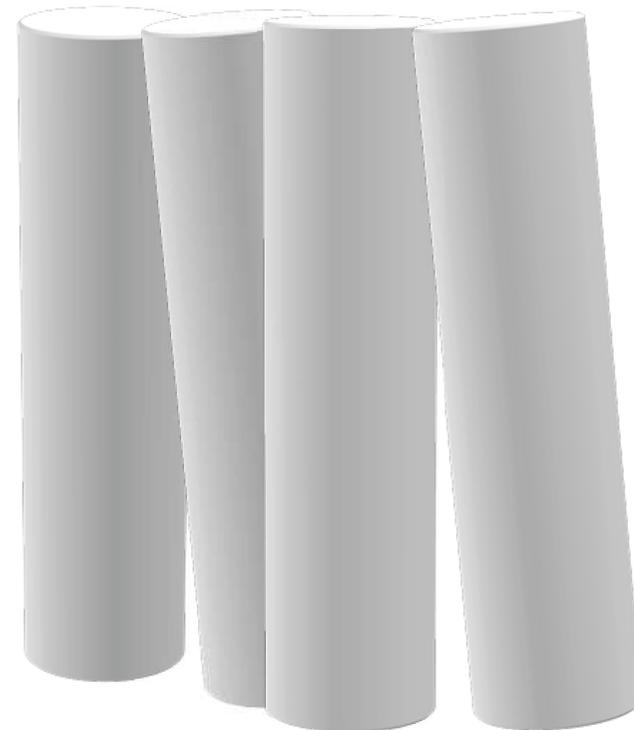
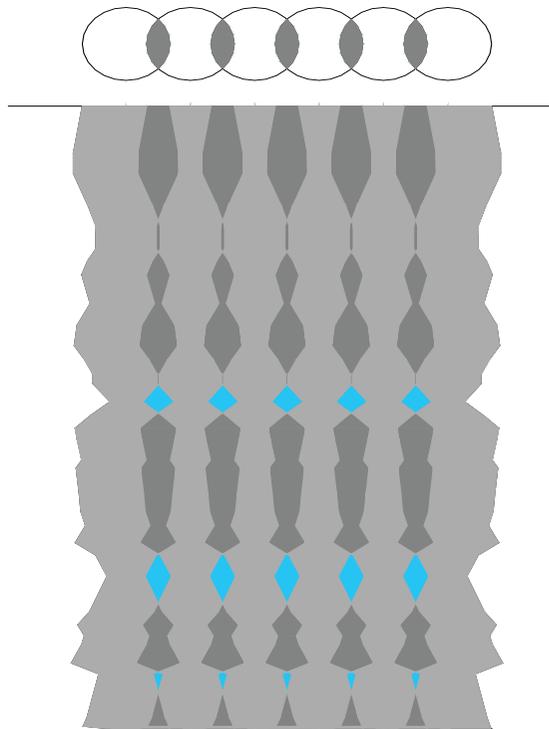


$$S^2 = D^2 - I^2$$

*la continuità dei diaframmi di jet grouting può essere compromessa dalla variabilità di:*

*Diametro delle Colonne*

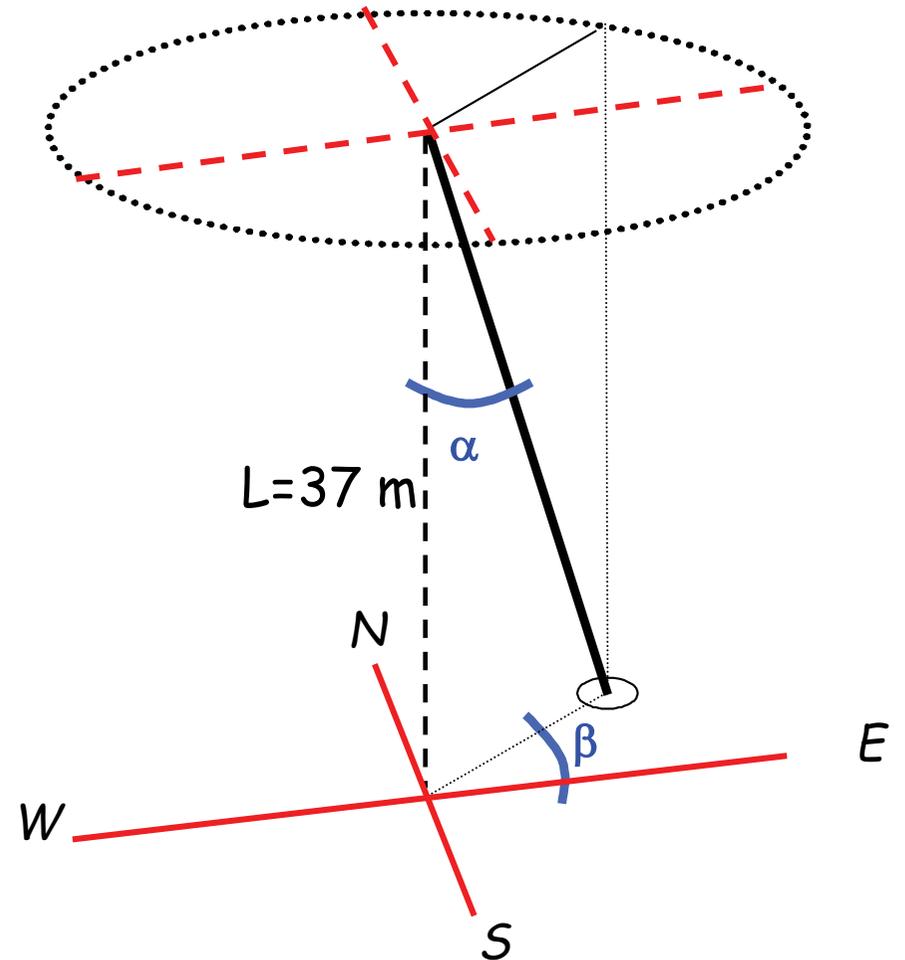
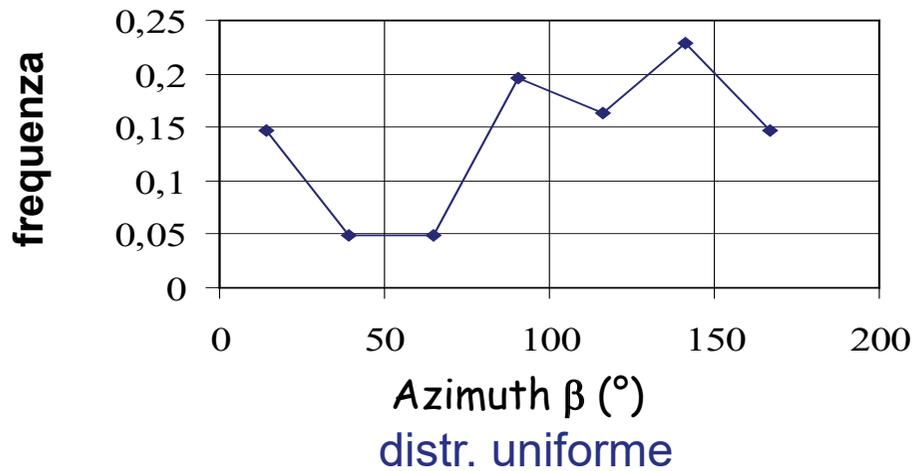
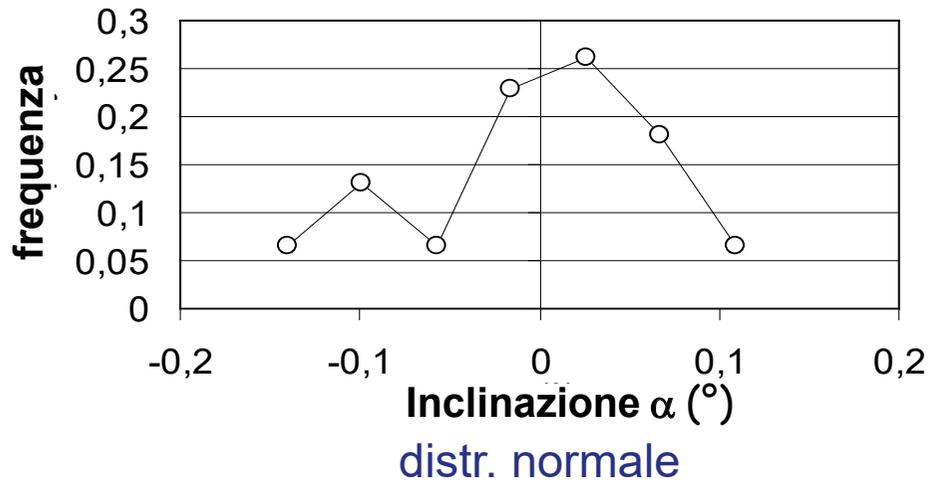
*Inclinazione dei Trattamenti*



# INCLINAZIONE ASSIALE

## Dati Traversa Isola Serafini

Inclinazione  $\alpha$  – Azimuth  $\beta$



# VERIFICA DELLA CONTINUITA' DEL DIAFRAMMA

## Dati di progetto

Profondità del diaframma (L)

Distribuzione planimetrica delle colonne (in superficie)

Diametro delle colonne (D - valore nominale di progetto)

Interasse dei trattamenti in superficie ( $I_0$ )

Minimo spessore accettabile del diaframma ( $S^*$ )

## Verificare se:

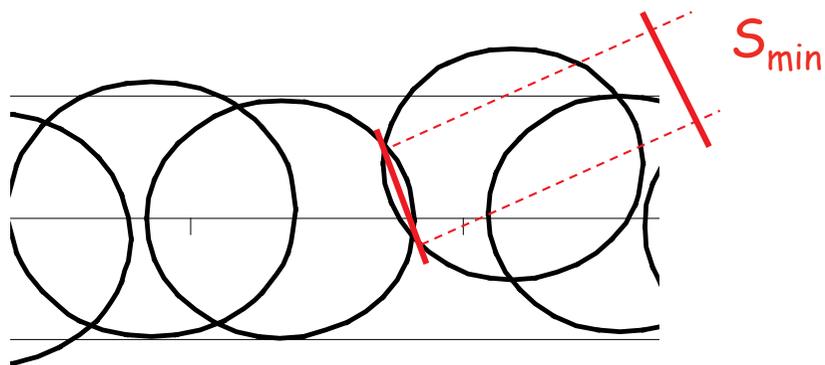
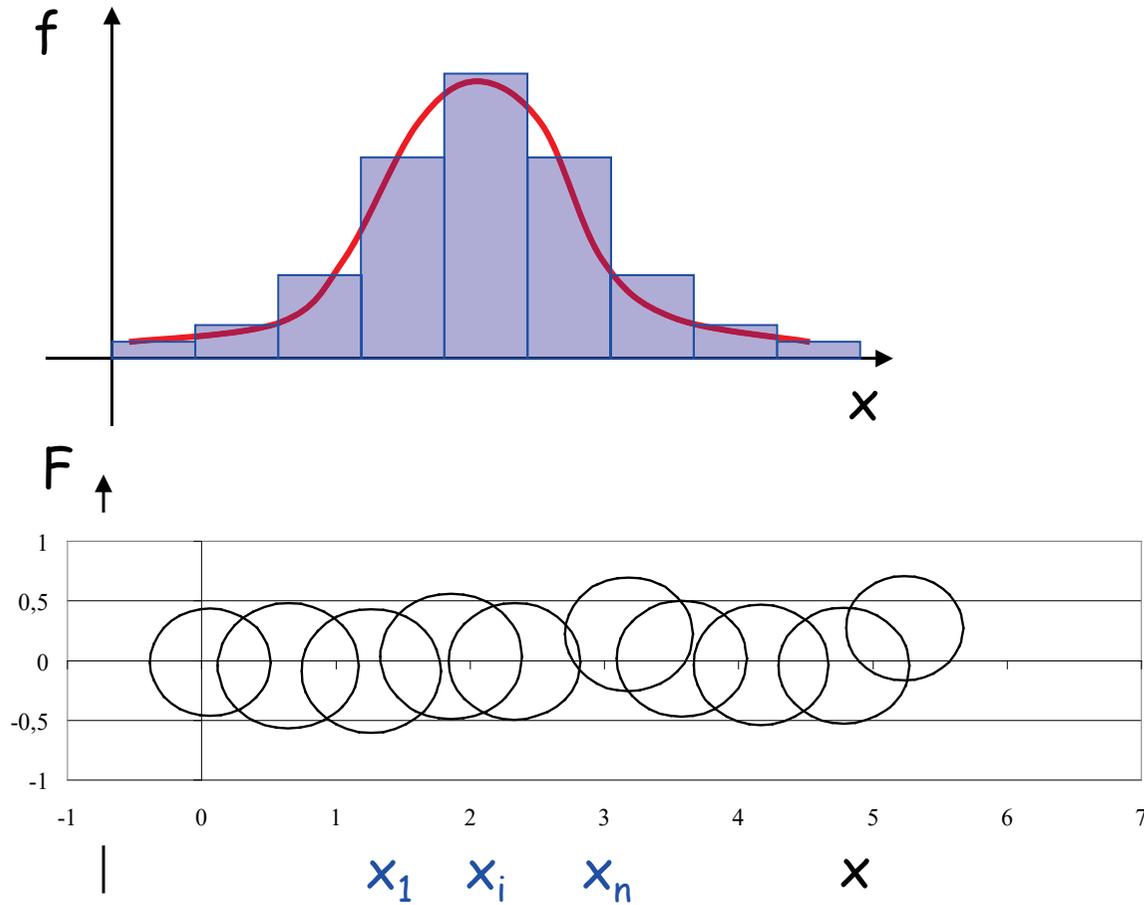
$$S(z) \geq S^*$$

Calcolare il valore dello spessore effettivo del diaframma

al variare della profondità  $S(z)$  fino alla massima profondità L

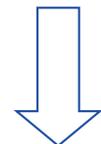


# VERIFICA PROBABILISTICA

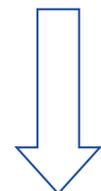


ASSEGNARE LE DISTRIBUZIONI DI PROBABILITA'

$D - \alpha - \beta$



GENERARE CAMPIONI STAT. (Monte Carlo)



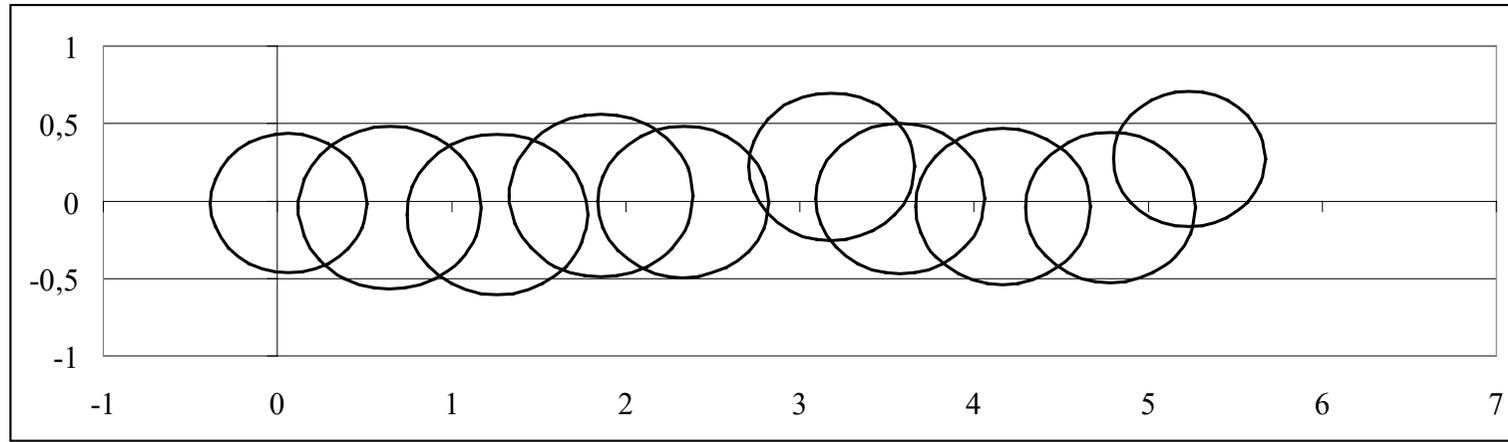
SIMULARE DIAFRAMMA



CALCOLARE SPESSORE MINIMO  $S_{min}(z)$

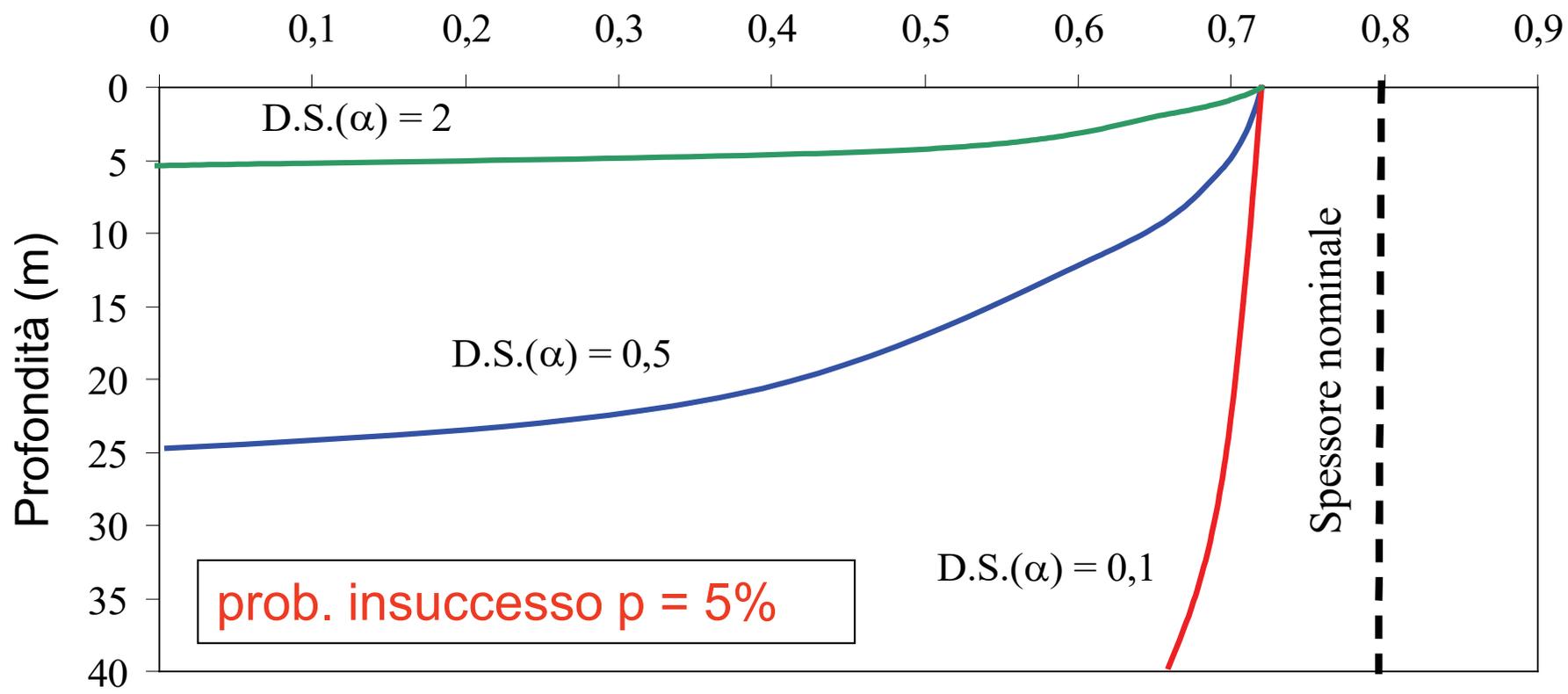


# Simulazione Probabilistica - metodo Monte Carlo - $D_o = 1 \text{ m}$ - $I_o = 0.6 \text{ m}$



Z = 20 m

### Spessore minimo del diaframma (m) per $CV(D) = 0,05$

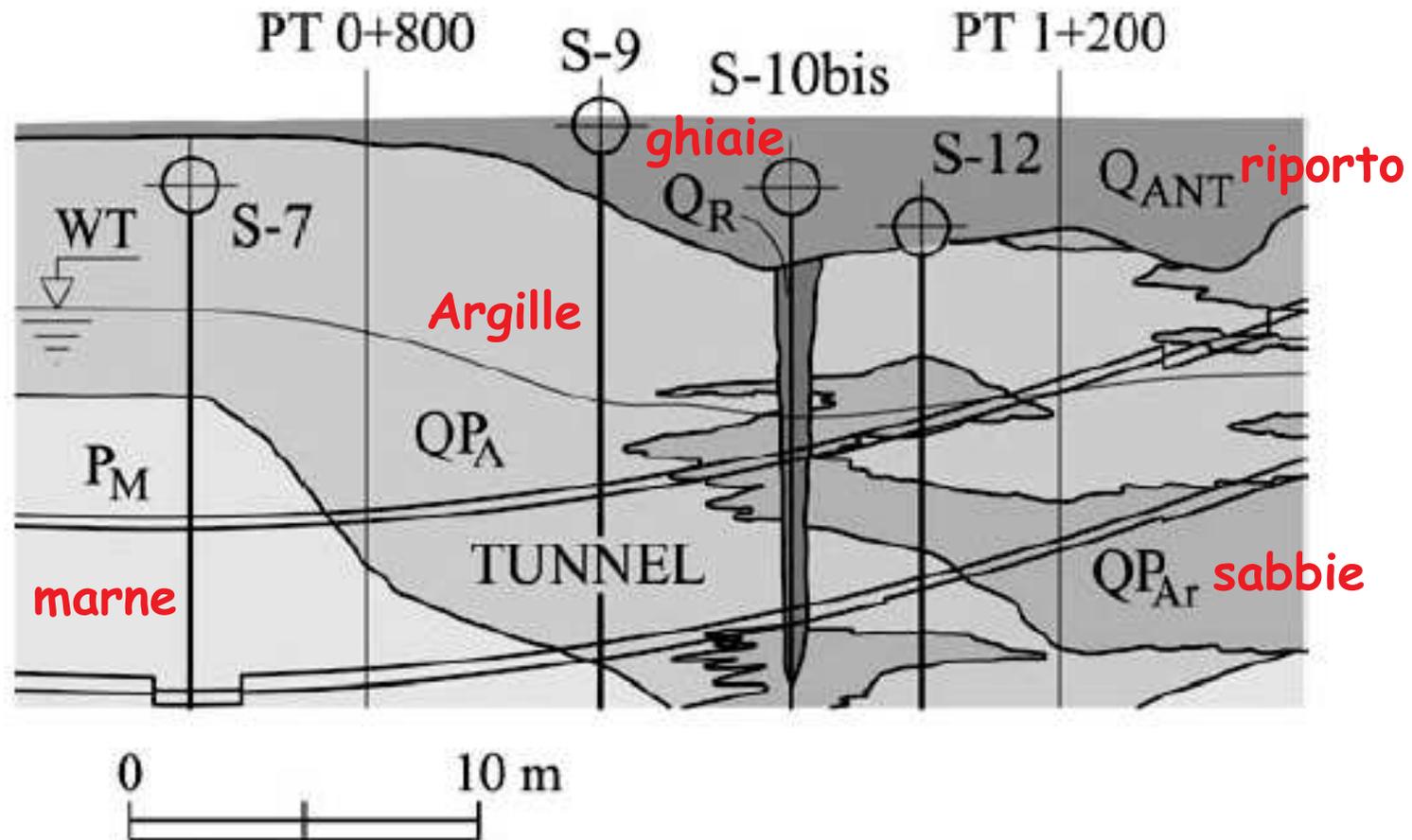


# ALTA VELOCITA' FERROVIARIA GALLERIA PER L'ATTRAVERSAMENTO DI BARCELONA (2006 ÷ 2007)



Figure 1. Plan view of the High Speed Railway Link south entrance to Barcelona.

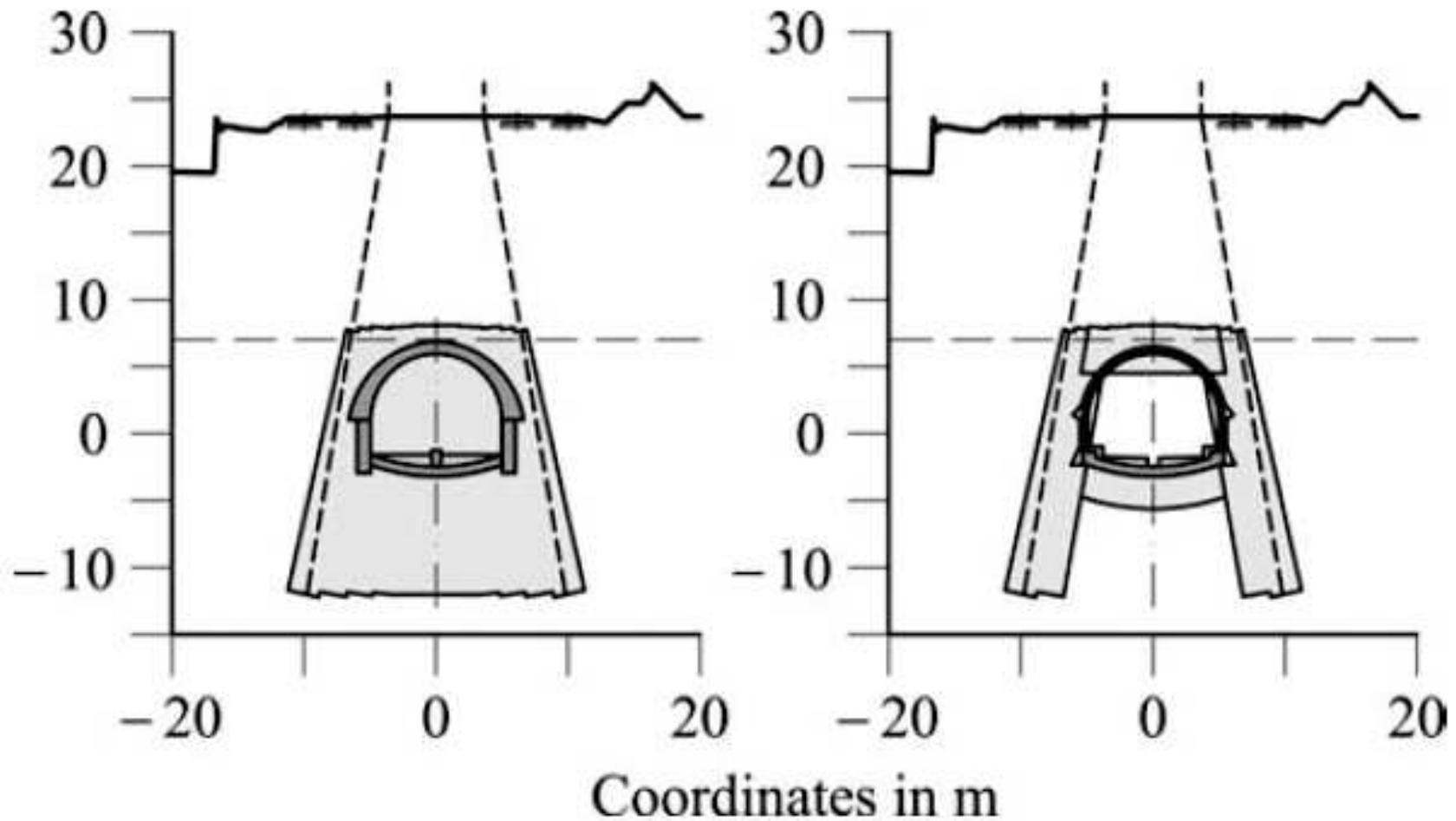
## PROFILO GEOTECNICO



Vertical scale

Figure 2. Geotechnical profile alongside the central part of the tunnel. P<sub>M</sub> stiff tertiary marl; QP<sub>A</sub> medium stiff clay-dominated quaternary deposits; QP<sub>Ar</sub> sand-dominated quaternary deposits; Q<sub>R</sub> gravel-dominated quaternary deposits; Q<sub>ANT</sub> made ground.

## TRATTAMENTI DALL'ALTO



(a)

(b)

Figure 3. Typical treatment configurations where surface access was available.

# TRATTAMENTI IN AVANZAMENTO

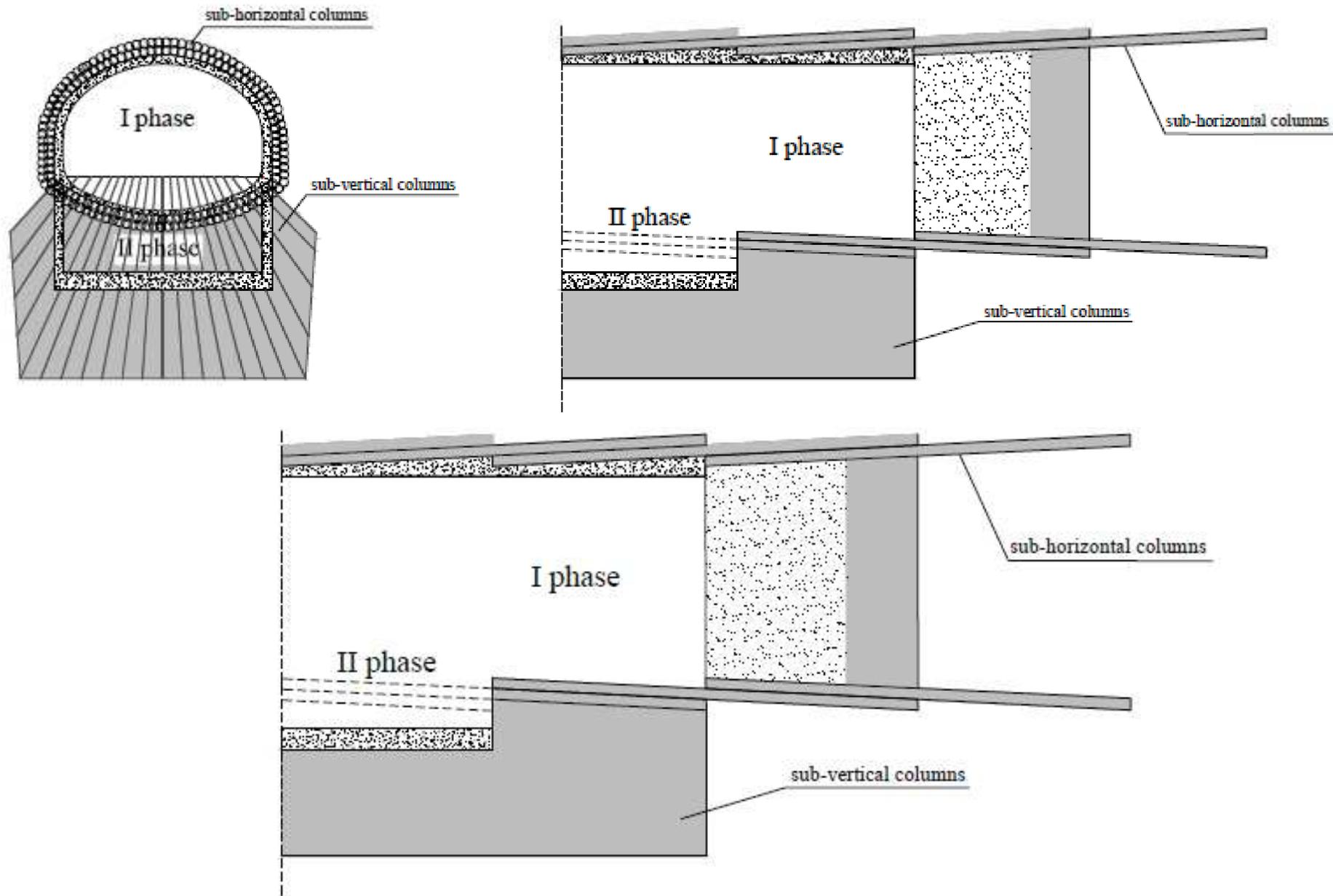


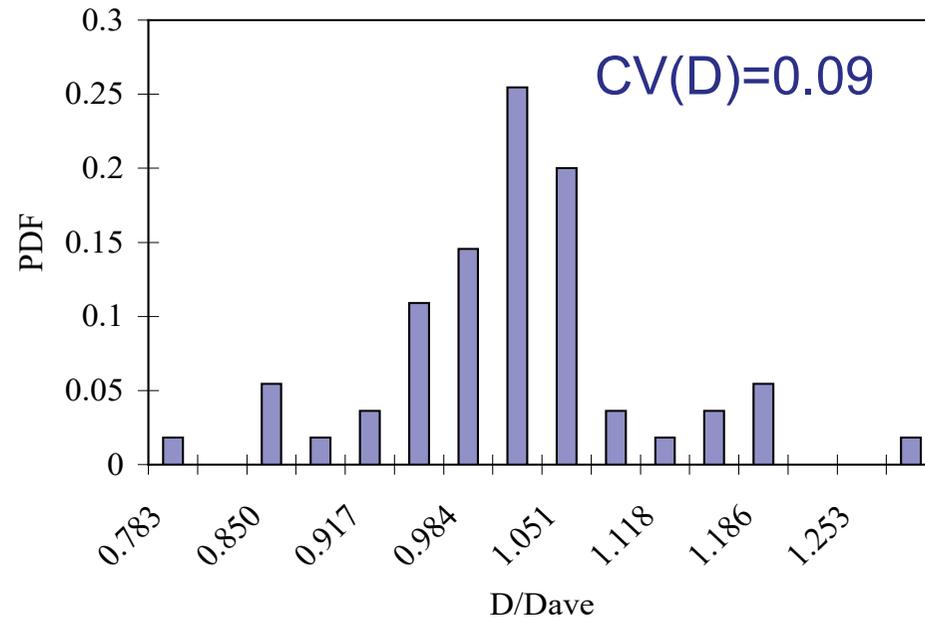
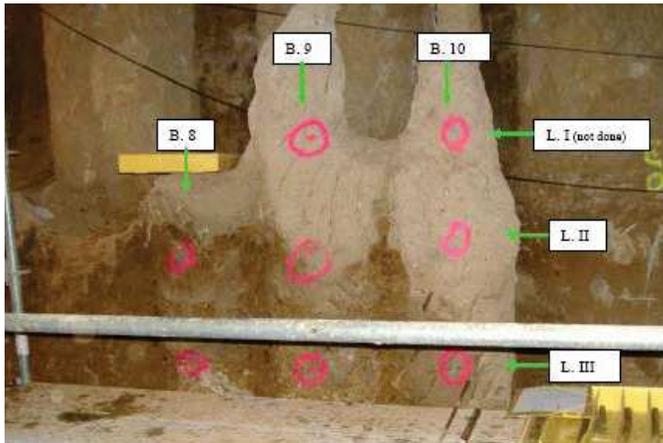
Figure 4. Typical configuration for treatment from within the tunnel (transverse and longitudinal sections).

# VERIFICA CONTINUITA': GALLERIA T.A.V. BARCELONA

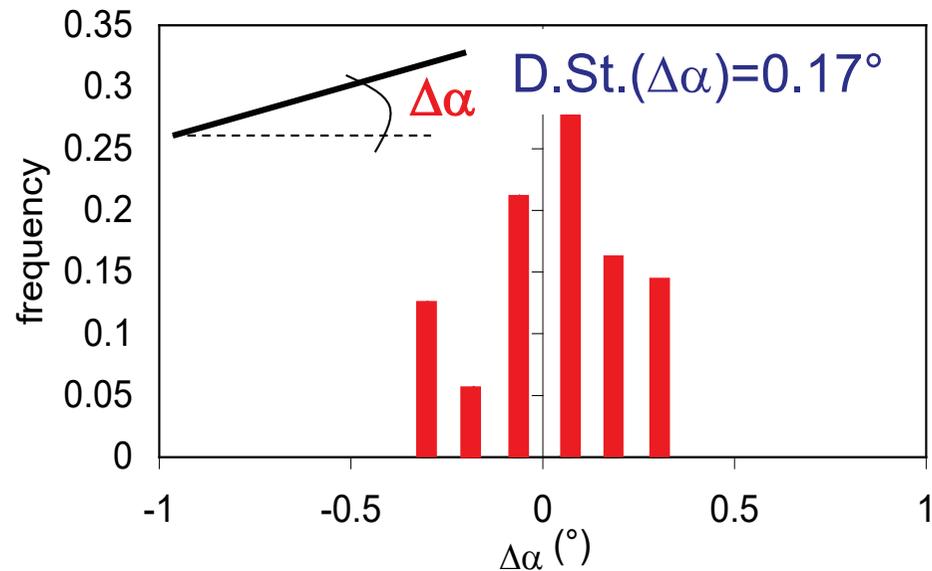
## Campi Prove

$D_{\text{medio}} \approx 0,80\text{m}$

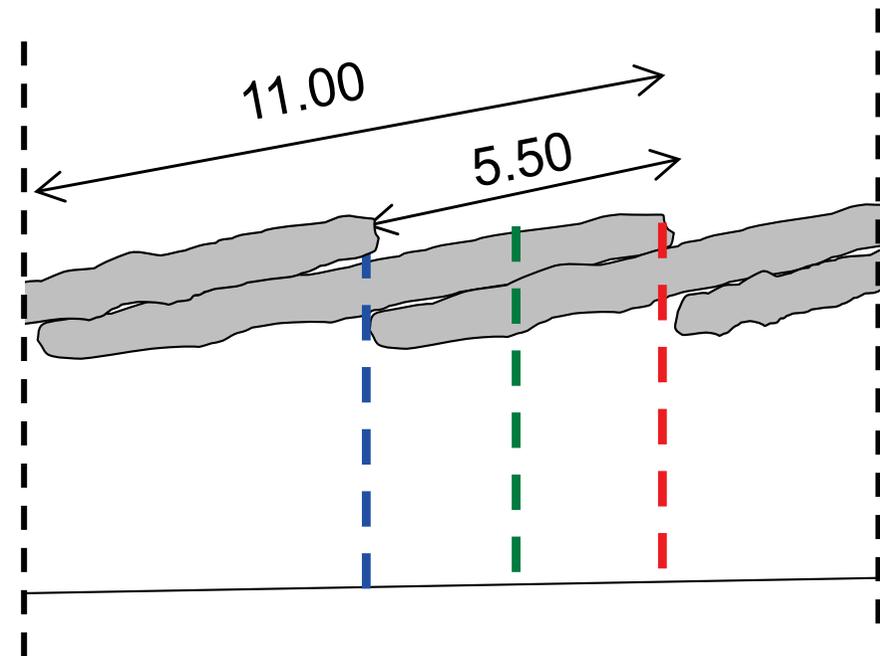
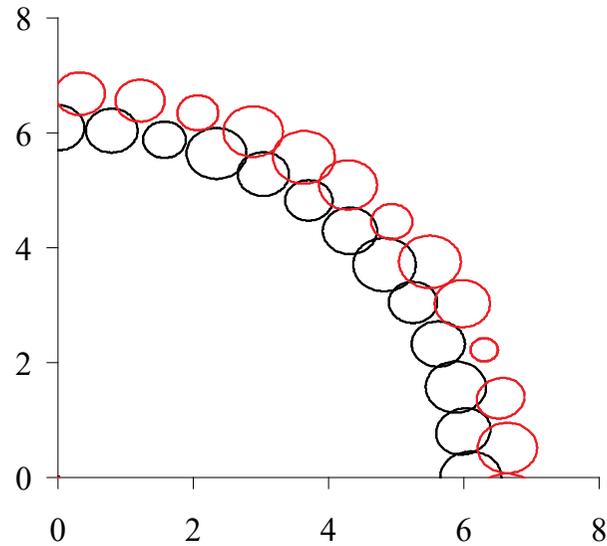
### TRATTAMENTI VERTICALI



### TRATTAMENTI ORIZZONTALI



# ANALISI PROBABILISTICA



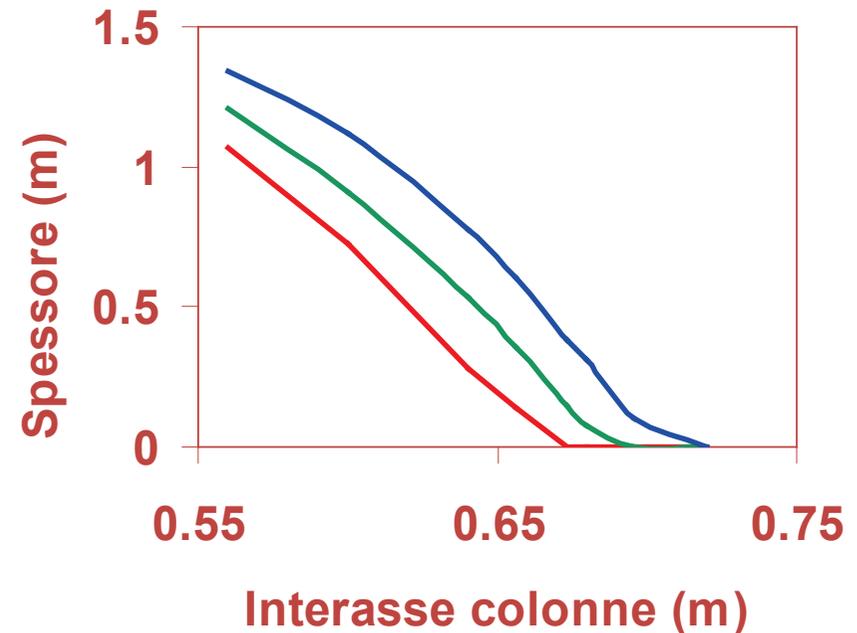
Metodo Monte Carlo

$D_{\text{medio}} = 0.80 \text{ m}$      $CV(D) = 0.09$

Dev. St. ( $\Delta\alpha$ ) =  $0.17^\circ$

Fattore di rischio = 5%

Scelta dell'interasse



# VERIFICHE STATICHE (SLU & SLE come da NTC 2018)

## Stati limite di resistenza terreno (GEO) & resistenza struttura (STR)

Occorre definire anche la resistenza del materiale consolidato

a) Stima del valore caratteristico  $\sigma_k$

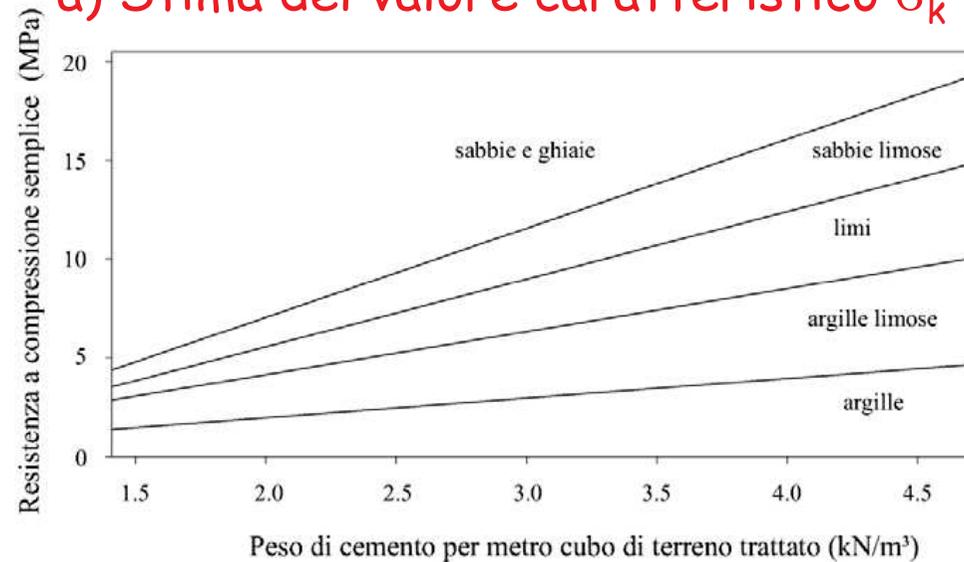


Figura 3.4 - Campi di valori di resistenza a compressione semplice per diversi tipi di terreno.

b) Scelta del valore di progetto  $\sigma_d$

Tabella 5.4 - Coefficienti di sicurezza parziale per la resistenza a compressione semplice del materiale cementato.

$$\sigma_d = \frac{\sigma_k}{\gamma_\sigma}$$

	ARGILLA	SABBIA	GHIAIA
$\gamma_\sigma$	1.4	1.5	1.6

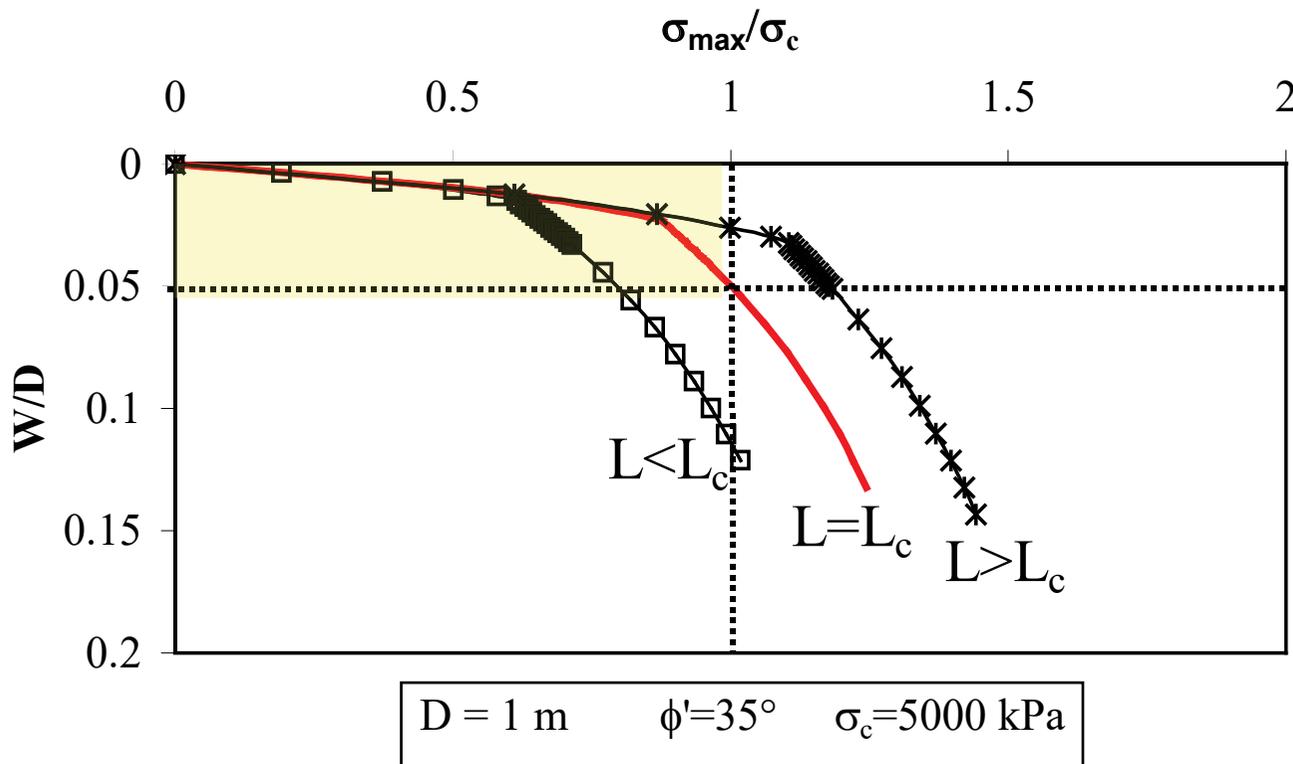
**N.B. valori orientativi suggeriti per  $\gamma_\sigma$  in assenza di indicazioni normative**

# CAPACITA' PORTANTE DI UNA COLONNA SINGOLA: analisi deterministica $D=\text{cost.}$ $\sigma_c=\text{cost.}$

$Q_1$ : carico limite corrispondente a cedimenti elevati ( $W/D = 0.05$ )

$Q_2$ : carico limite corrispondente al collasso del materiale ( $\sigma_{max}/\sigma_c=1$ )

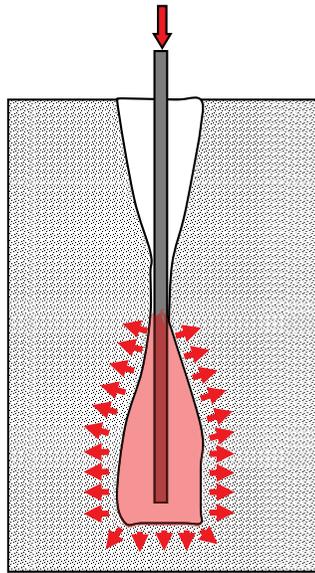
$L_c = \text{Lunghezza critica} = L(Q_1=Q_2)$



$L < L_c$  cedimenti elevati

$L > L_c$  collasso soilcrete

# EFFETTI COLLATERALI: SPOSTAMENTI DEL TERRENO E DELLE STRUTTURE PREESISTENTI



« *claquage* »

Si verifica normalmente per:

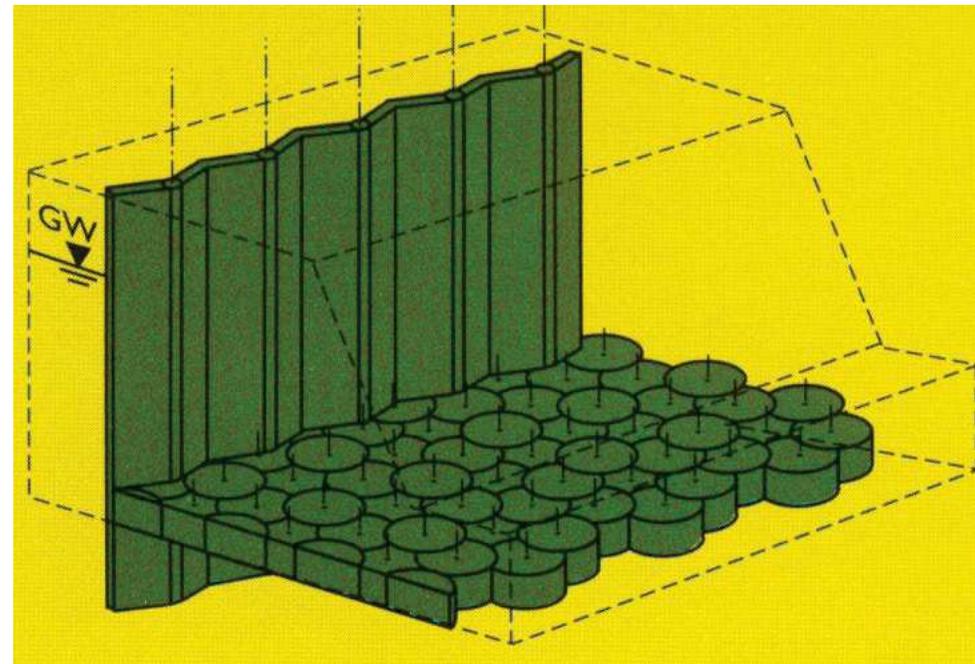
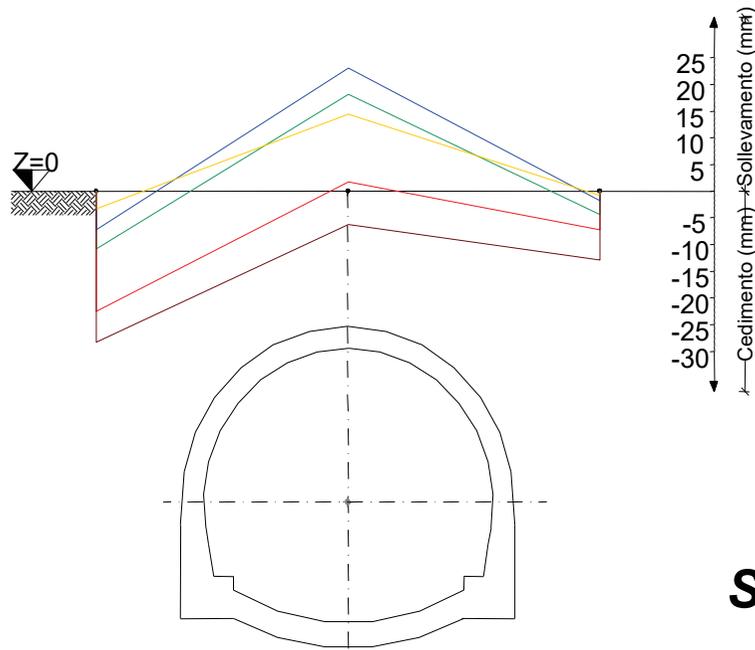
**a) terreni a grana fina**

**b) trattamenti ripetuti**

• interasse ridotto

• bassa velocità di estrazione

## Caso galleria A.V. Firenze



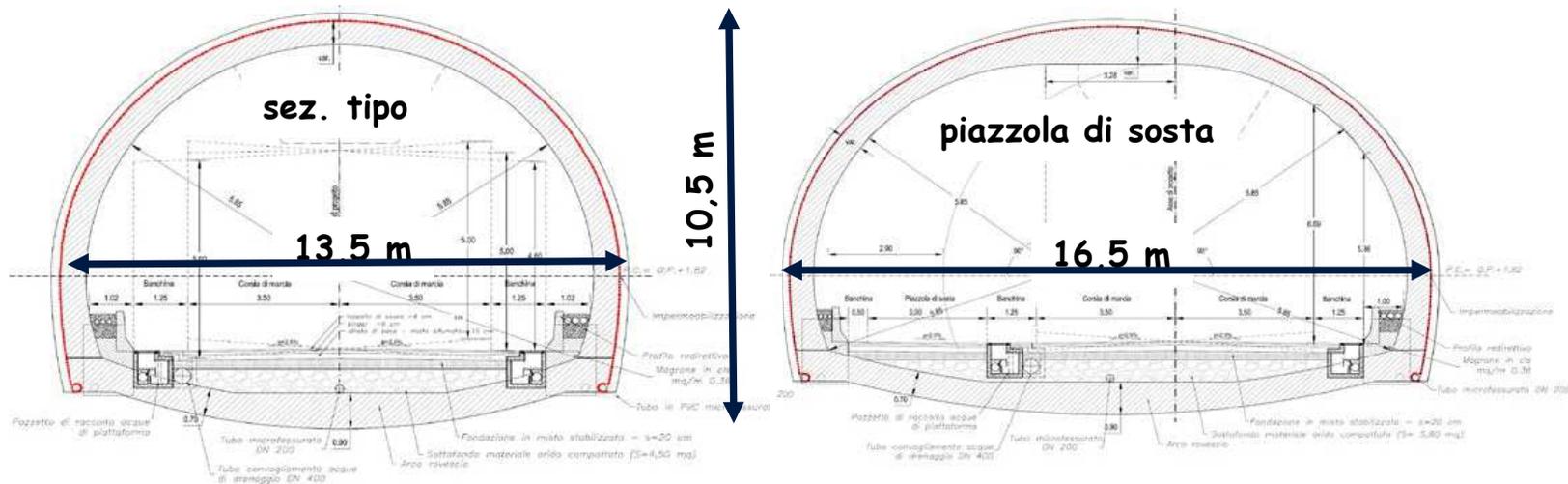
## Stazione Conca D'Oro Metropolitana linea B Roma

## ACCORGIMENTI TECNICI PER EVITARE IL "RIGONFIAMENTO" DEL TERRENO

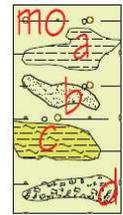
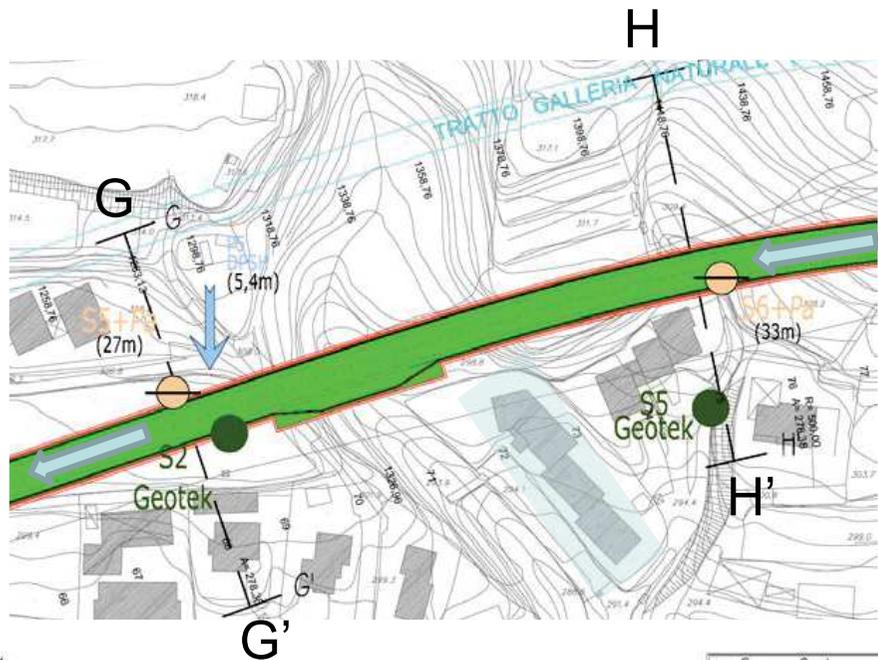
- EFFETTUARE TRATTAMENTI PRELIMINARI CON ACQUA ("PRETAGLIO" )
- INCREMENTARE LA VELOCITA' DI RISALITA DEL MONITOR
- REALIZZARE PERFORAZIONI CONTIGUE PER CONSENTIRE LO "SPURGO"

**MONITORAGGIO DEGLI SPOSTAMENTI IN TEMPO REALE**

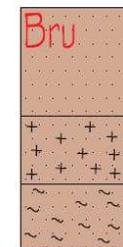
# S.S. 639 Variante di Pusiano (2014)



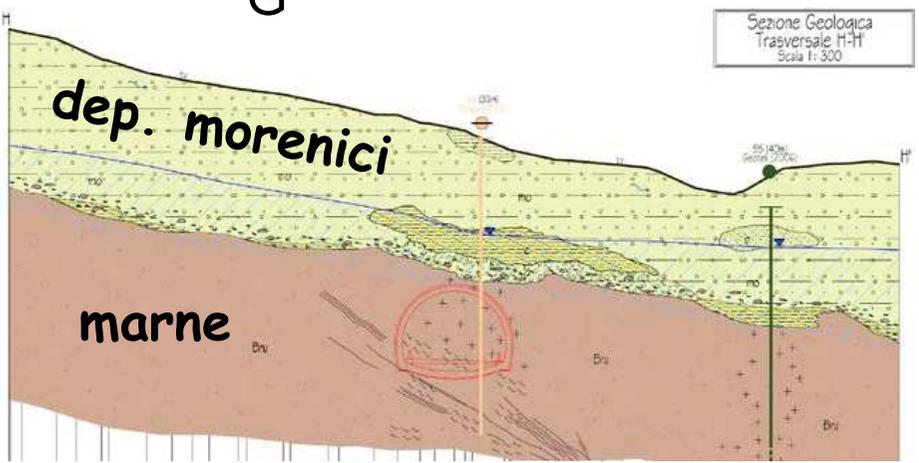
# Galleria Pusiano: Sezioni Geologiche



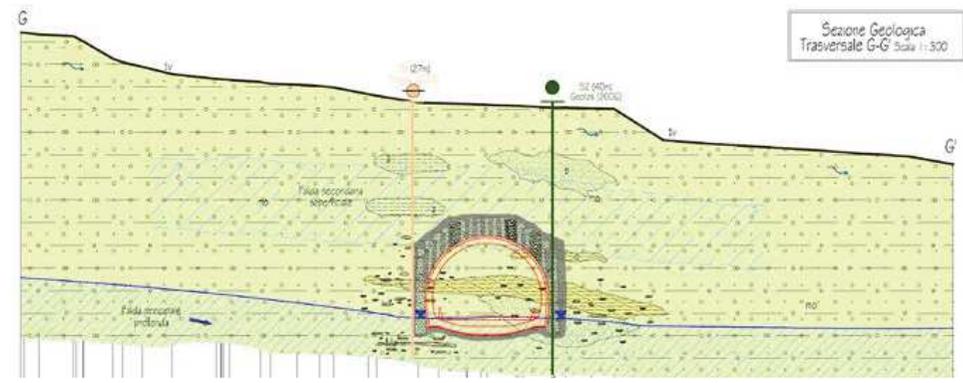
(mo) Depositi morenici costituiti da sedimenti eterogenei di detrito, ghiaia, ghiaia con sabbia di natura poligenica immersi in abbondante matrice limo argillosa e talora sabbiosa. a) livelli con prevalenza di ghiaia con sabbia. b) livelli con prevalenza di sabbia e sabbia limosa. c) intercalazioni di orizzonti limo-sabbiosi. d) livelli morenici cementati.



(Bru) Formazione delle Marne di Bruntino: marne e marne calcaree da grigio scuro a rosso violacee, in strati sottili e medi; verso l'alto seguono arenarie sottilmente stratificate e calcari marnosi in banchi.  
 Livelli calcareo marnosi compatti di colore grigio scuro.  
 Livelli prettamente marnosi sottilmente stratificati e mediamente irtratturati.

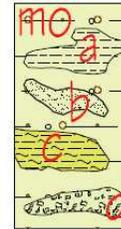


Sez. H-H'



Sez. G-G'

# Eterogeneità dei Depositi Morenici



(mo) Depositi morenici costituiti da sedimenti eterogenei di detrito, ghiaia, ghiaia con sabbia di natura poligenica immersi in abbondante matrice limo argillosa e talora sabbiosa. a) livelli con prevalenza di ghiaia con sabbia. b) livelli con prevalenza di sabbia e sabbia limosa. c) intercalazioni di orizzonti limo-sabbiosi. d) livelli morenici cementati.



**SONDAGGIO S3: Cassetta n.4 da 15,00 m a 20,00 m**

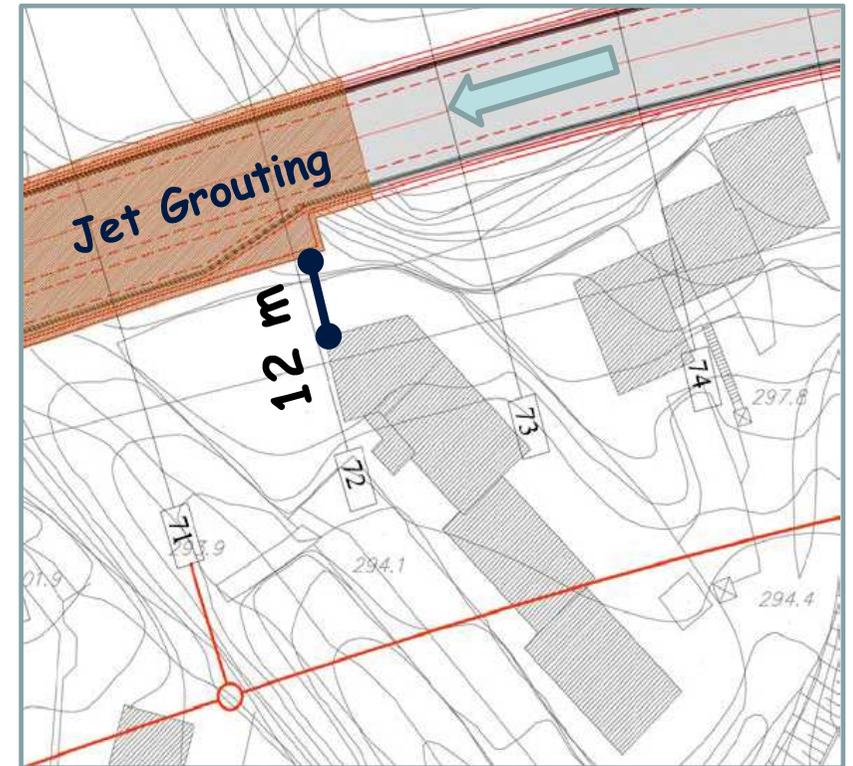
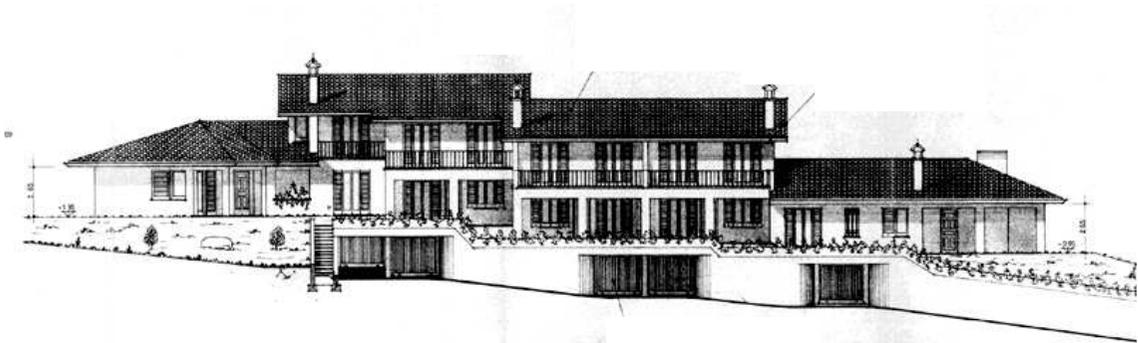
*Depositi morenici con prevalenza di ghiaia e ciottoli in matrice limo-argillosa (da 15 a 18 m, parte alta della cassetta) e termini con prevalenza di sabbia ghiaiosa di colore giallastro (da 18 a 20 m , parte bassa)*



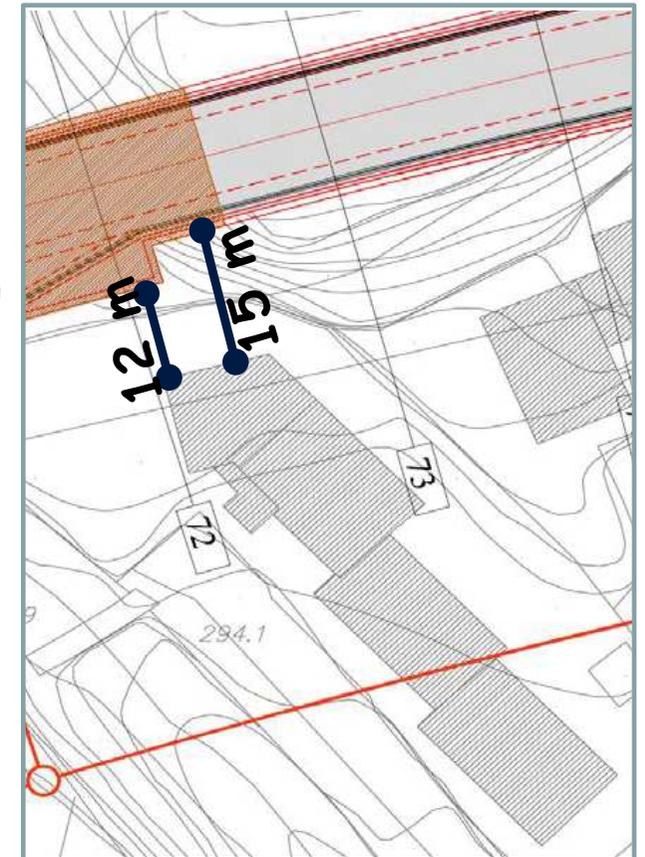
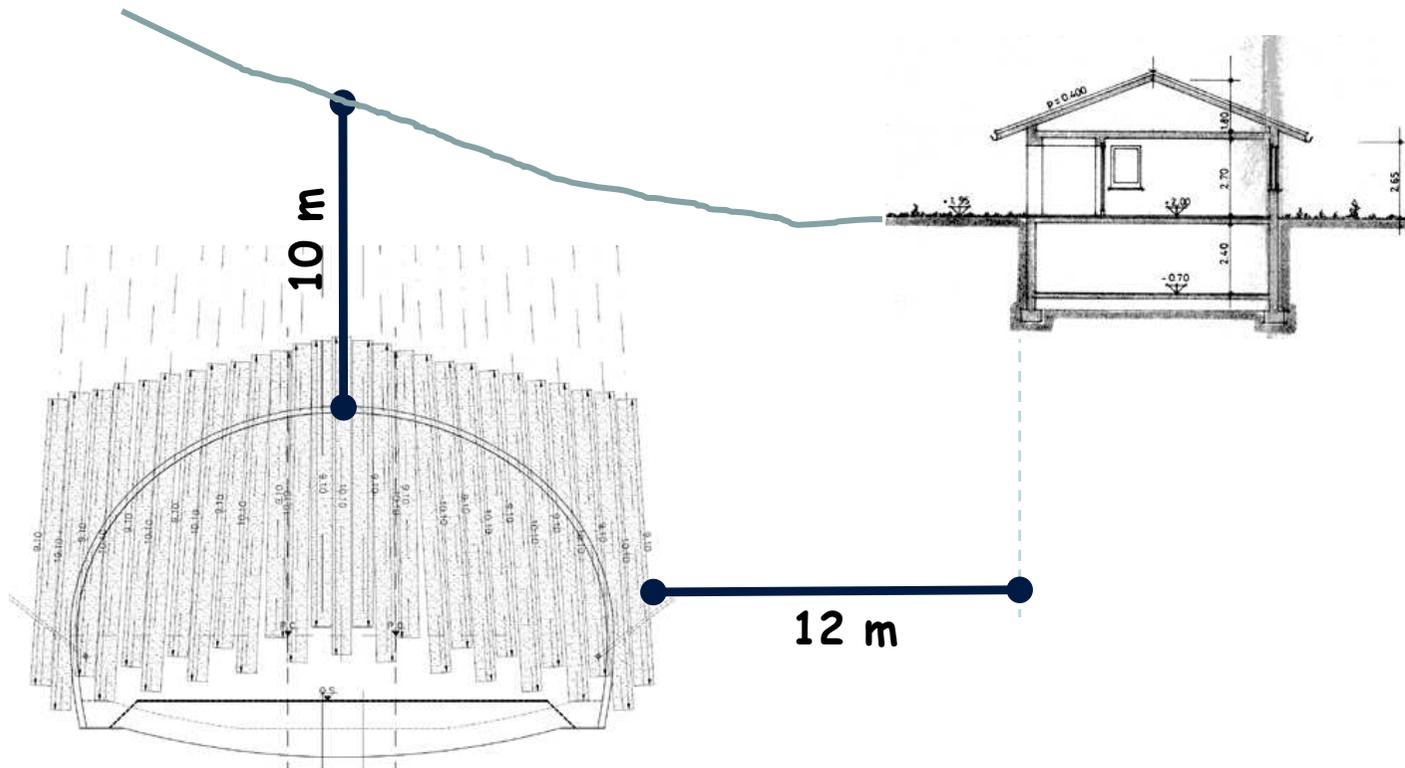
**SONDAGGIO S6: Cassetta n.3 da 10,00 m a 15,00 m**

*Depositi morenici: livelli di limo sabbioso marrone chiaro (da 10 a 13 m, parte alta della cassetta) e termini conglomeratici cementati (da 13 a 15 m , parte bassa)*

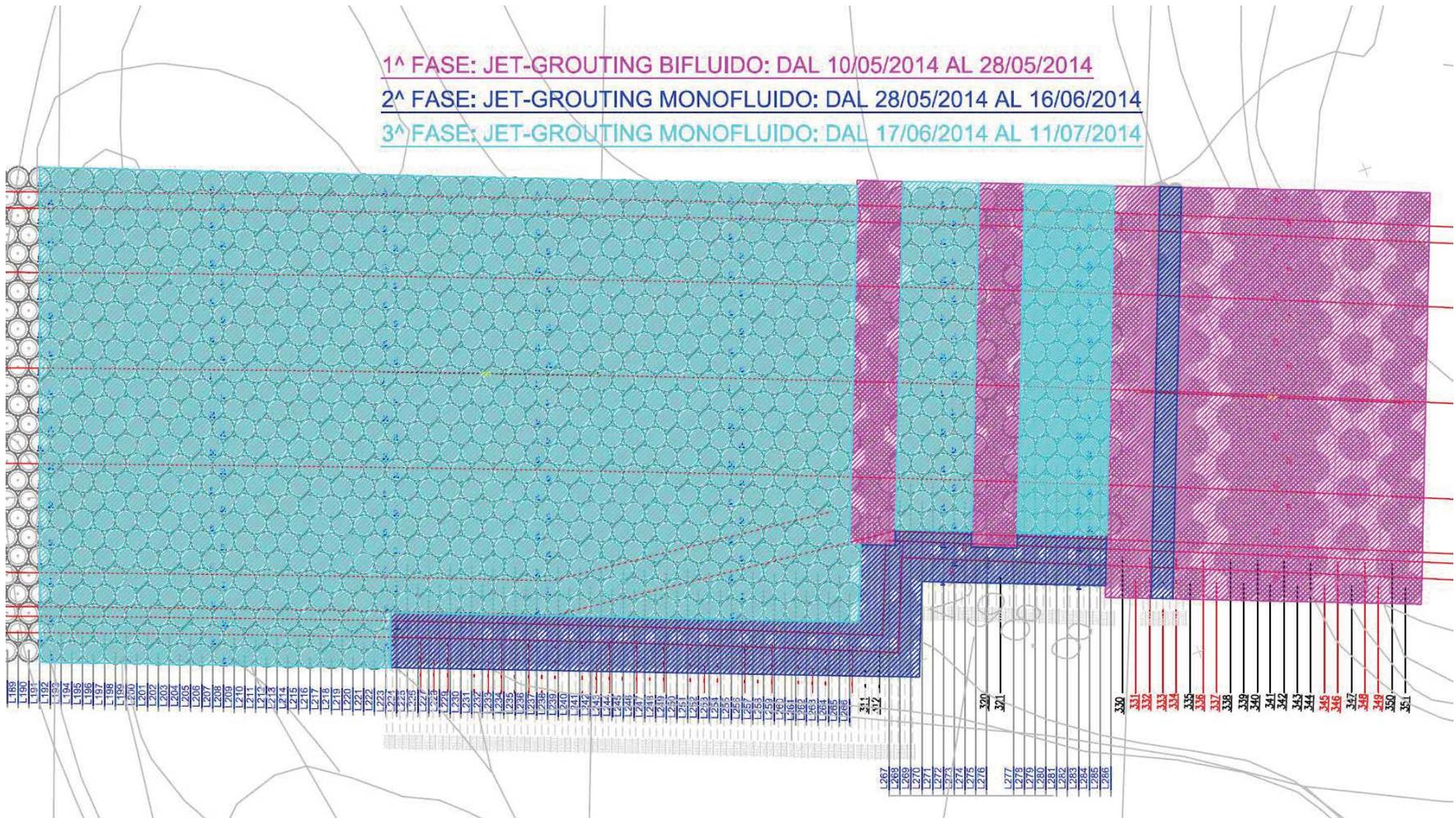
# Villette a Schiera



# Consolidamento dall'alto mediante Jet-grouting



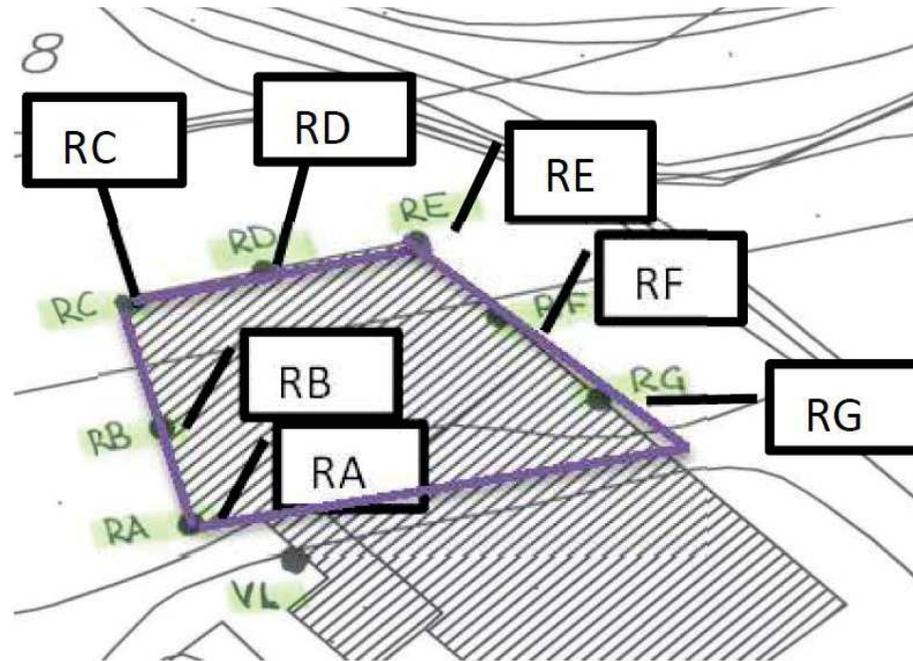
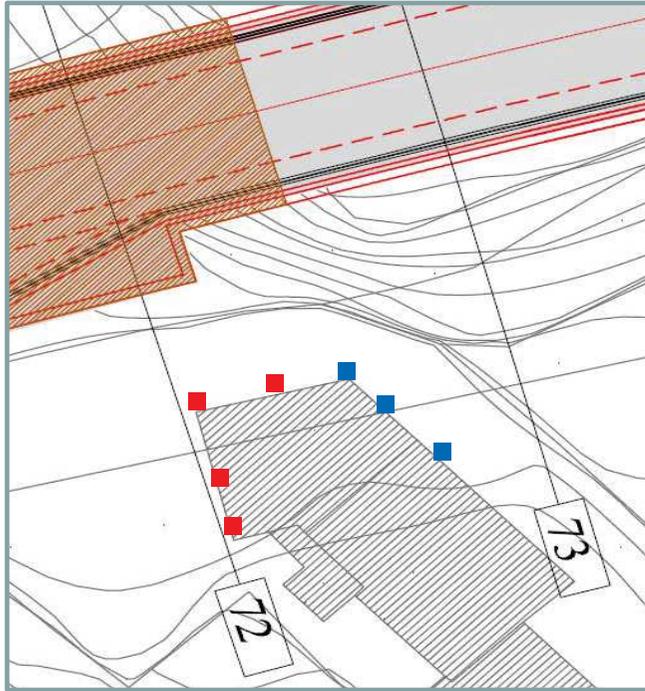
# Pianta dei Consolidamenti



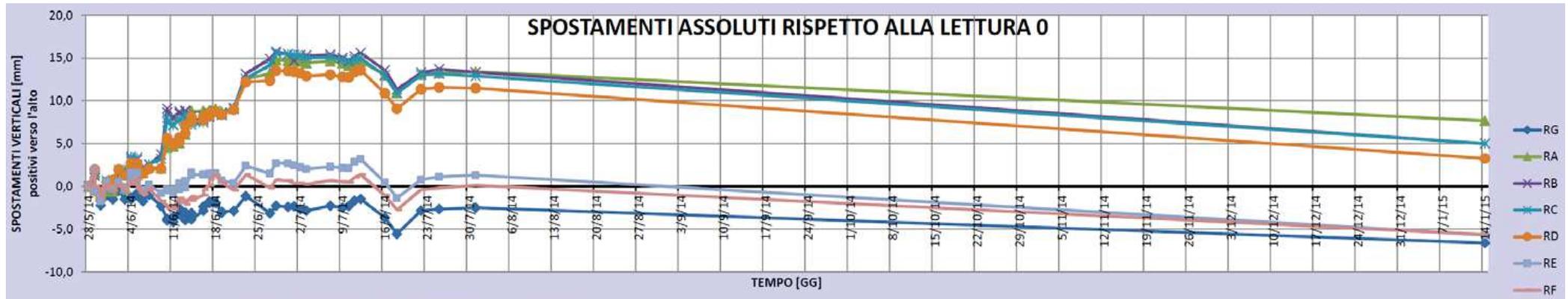
## Effetti «collaterali» del jet-grouting



# Monitoraggio dei Cedimenti (prima villetta)

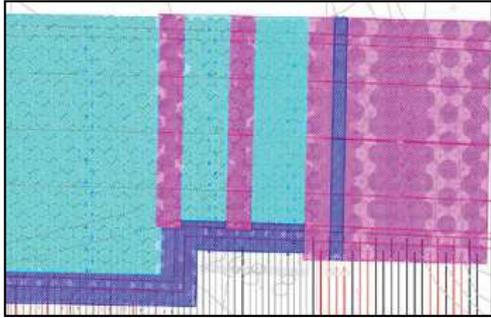


**A, B, C, D  
si sollevano**

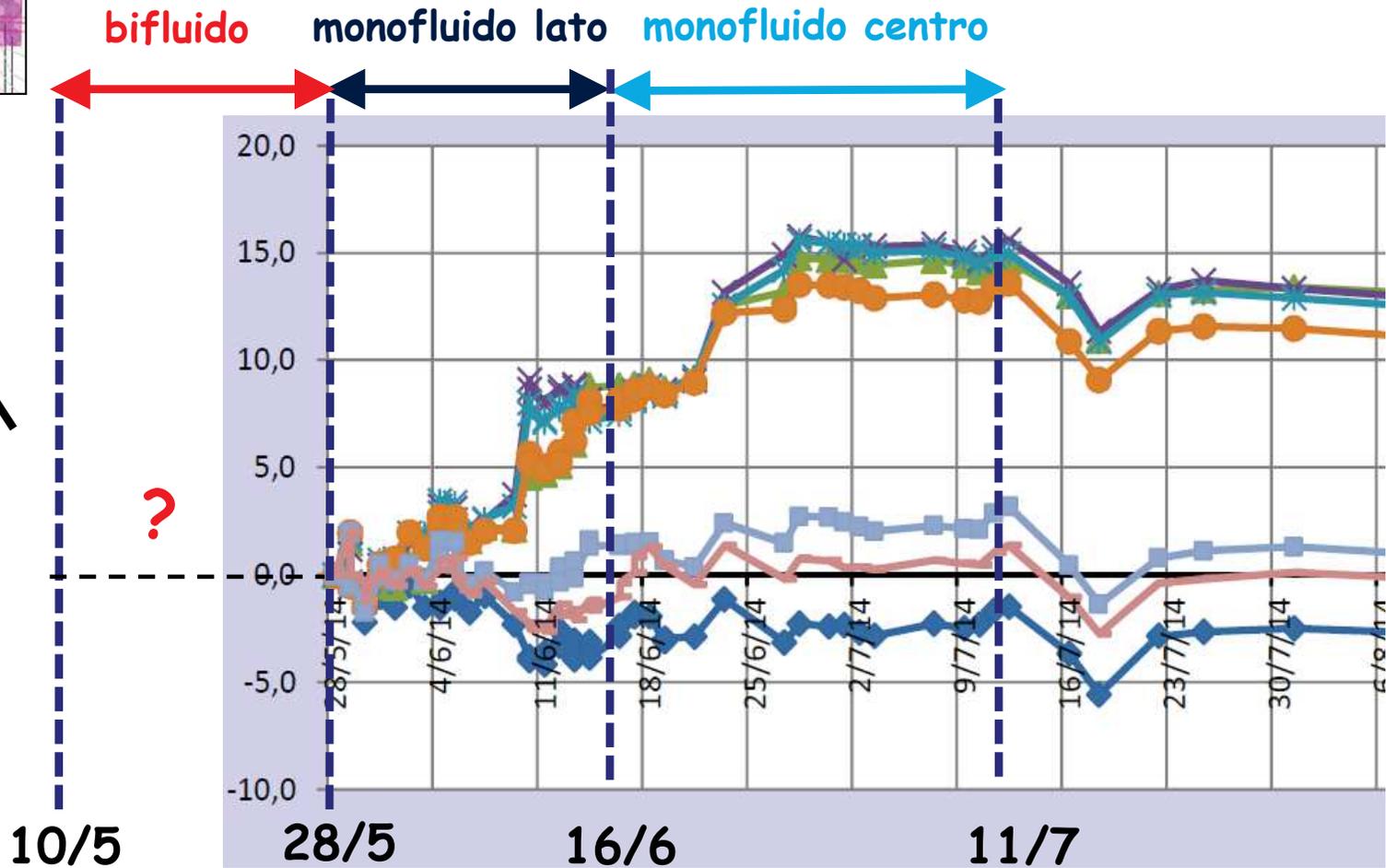
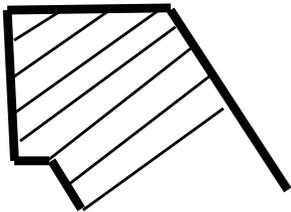


# Correlazione temporale Consolidamenti - Cedimenti

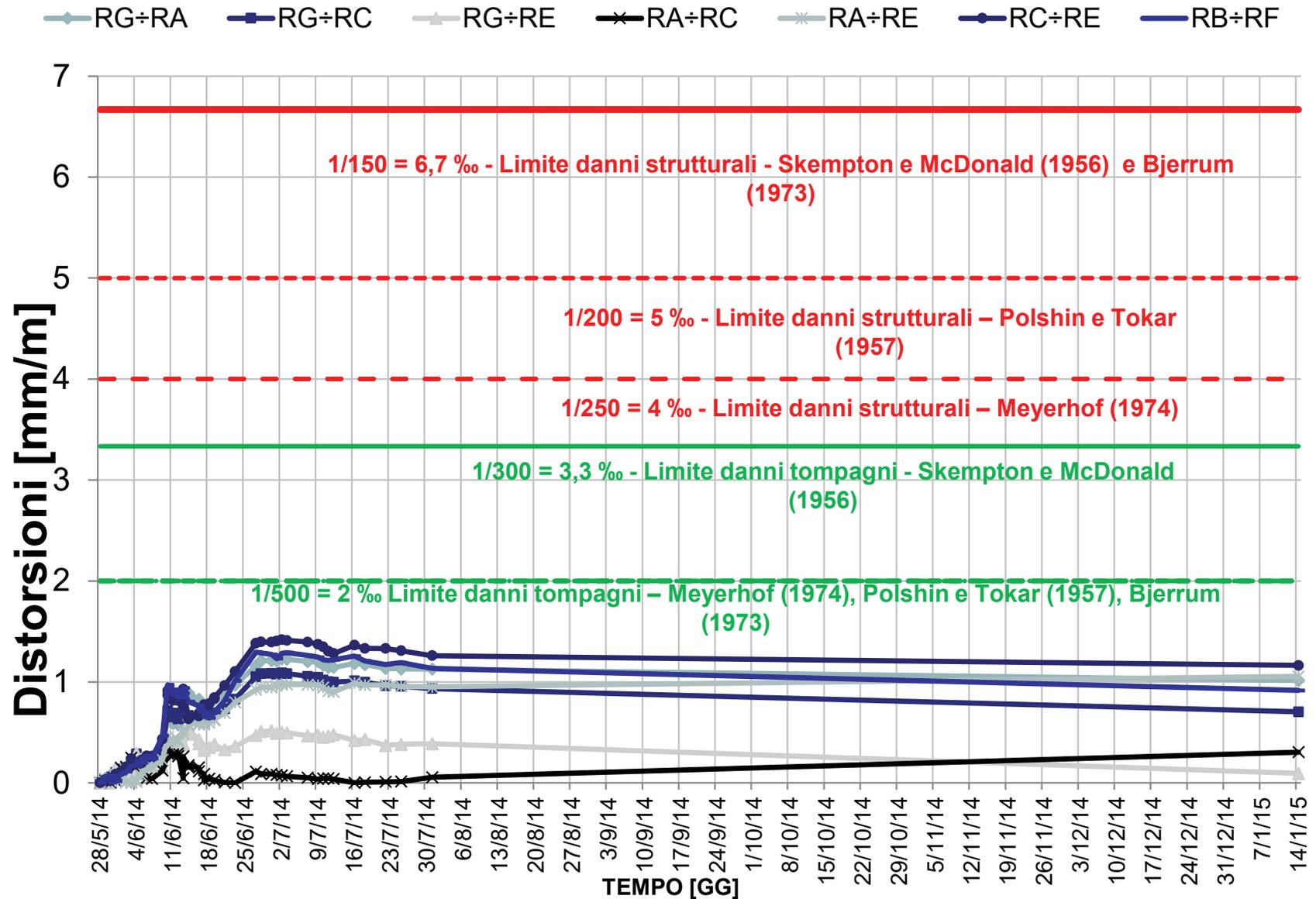
pianta trattamenti



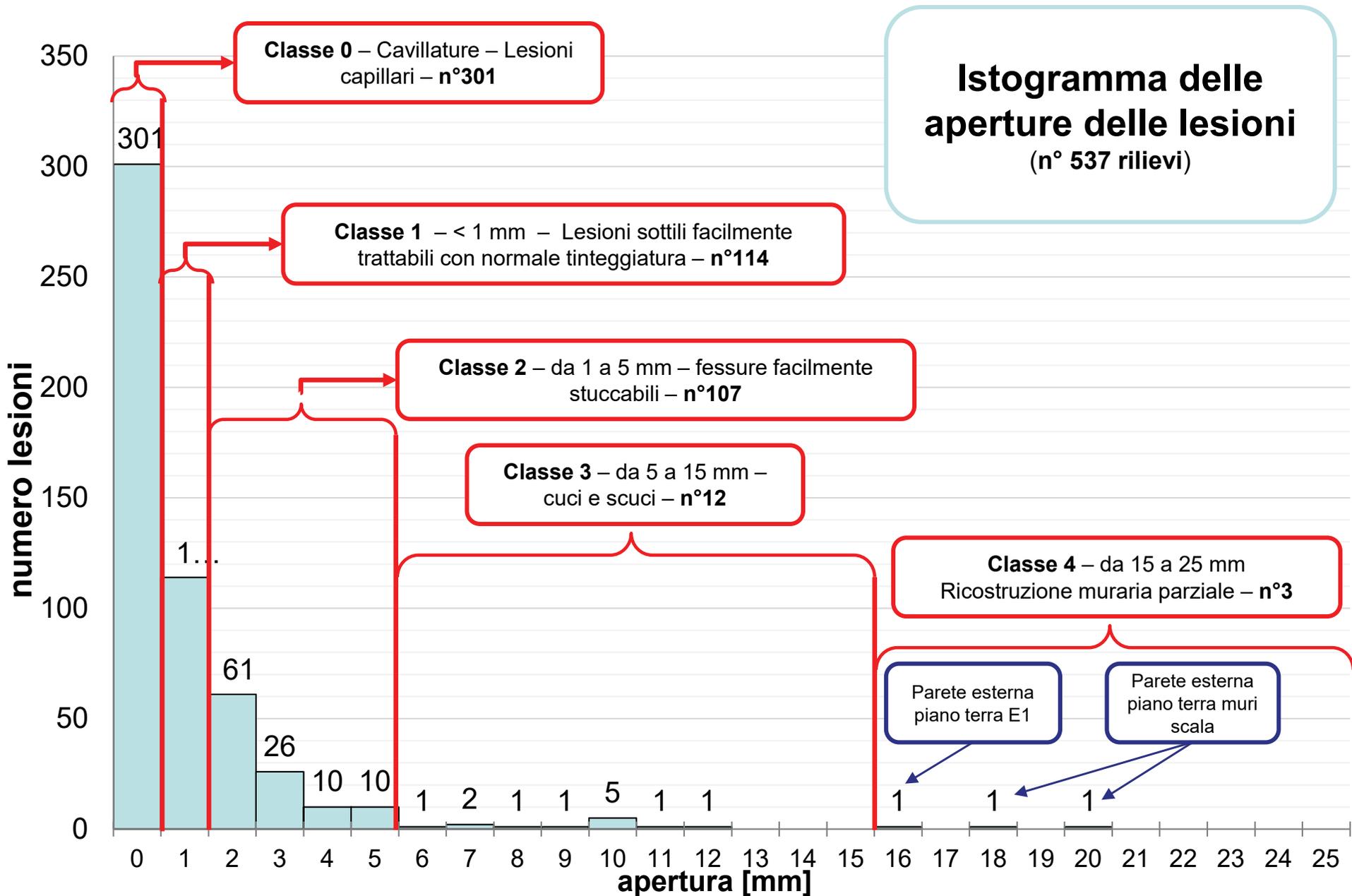
villetta



## Distorsioni angolari $\beta = \Delta/L$ (cedimento differenziale/distanza orizzontale)



# Quadro Fessurativo e Classe di Danno: prima villetta) (Boscardin & Cording, 1989)

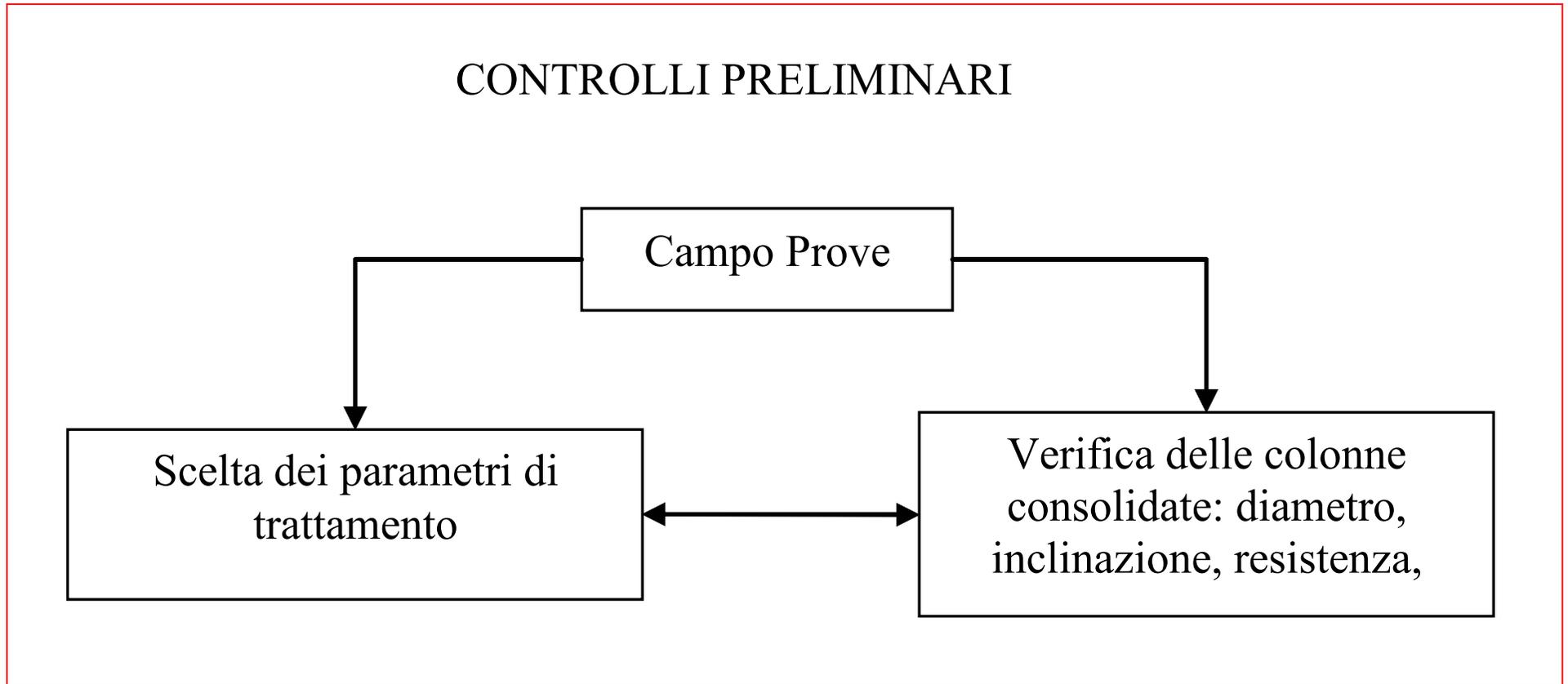


# CONTROLLI

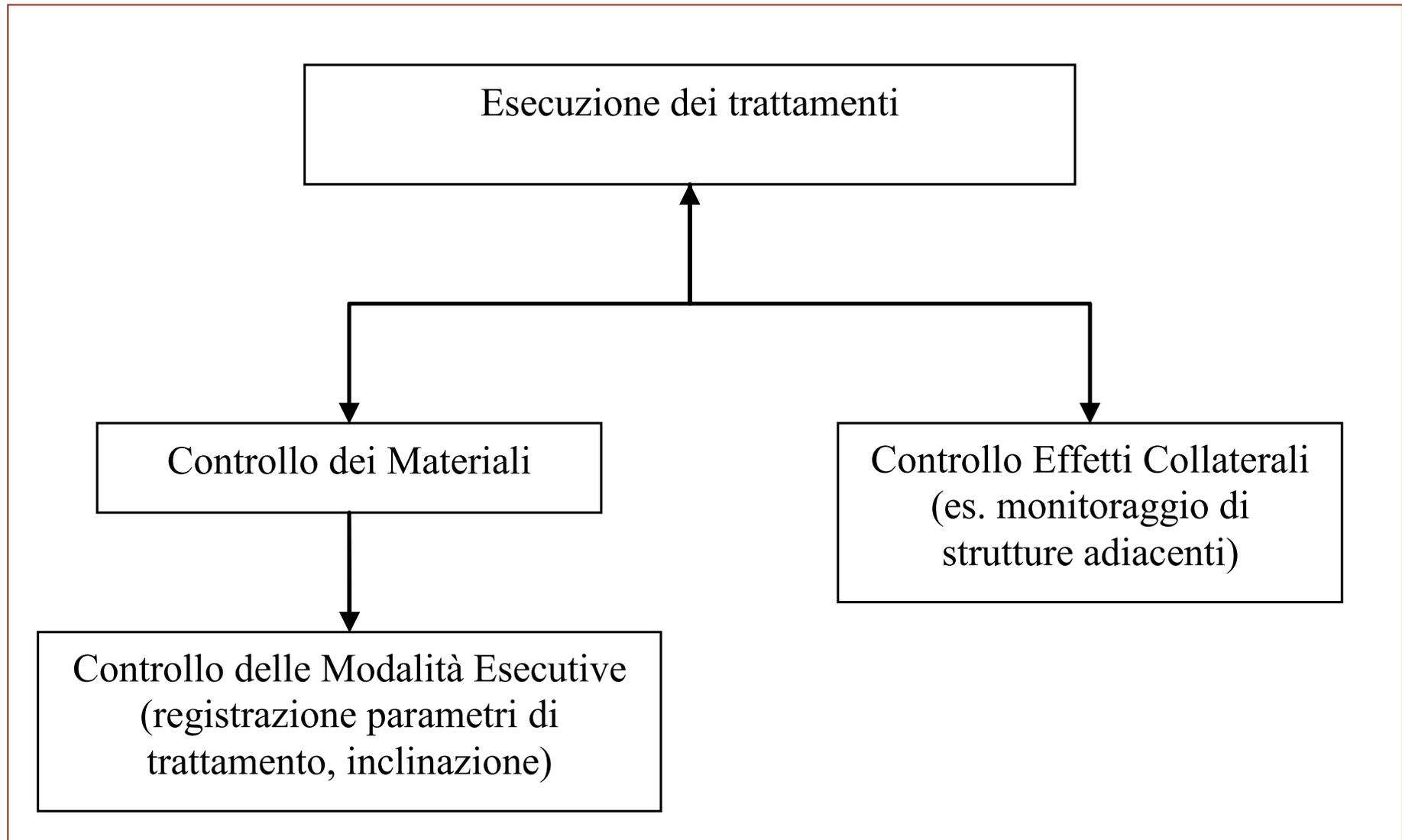
## CONTROLLI PRELIMINARI (CAMPO PROVE)

- CONTROLLI DURANTE L'ESECUZIONE DEI TRATTAMENTI  
(controlli di processo)
- CONTROLLI SUGLI ELEMENTI CONSOLIDATI  
(controlli di prodotto)

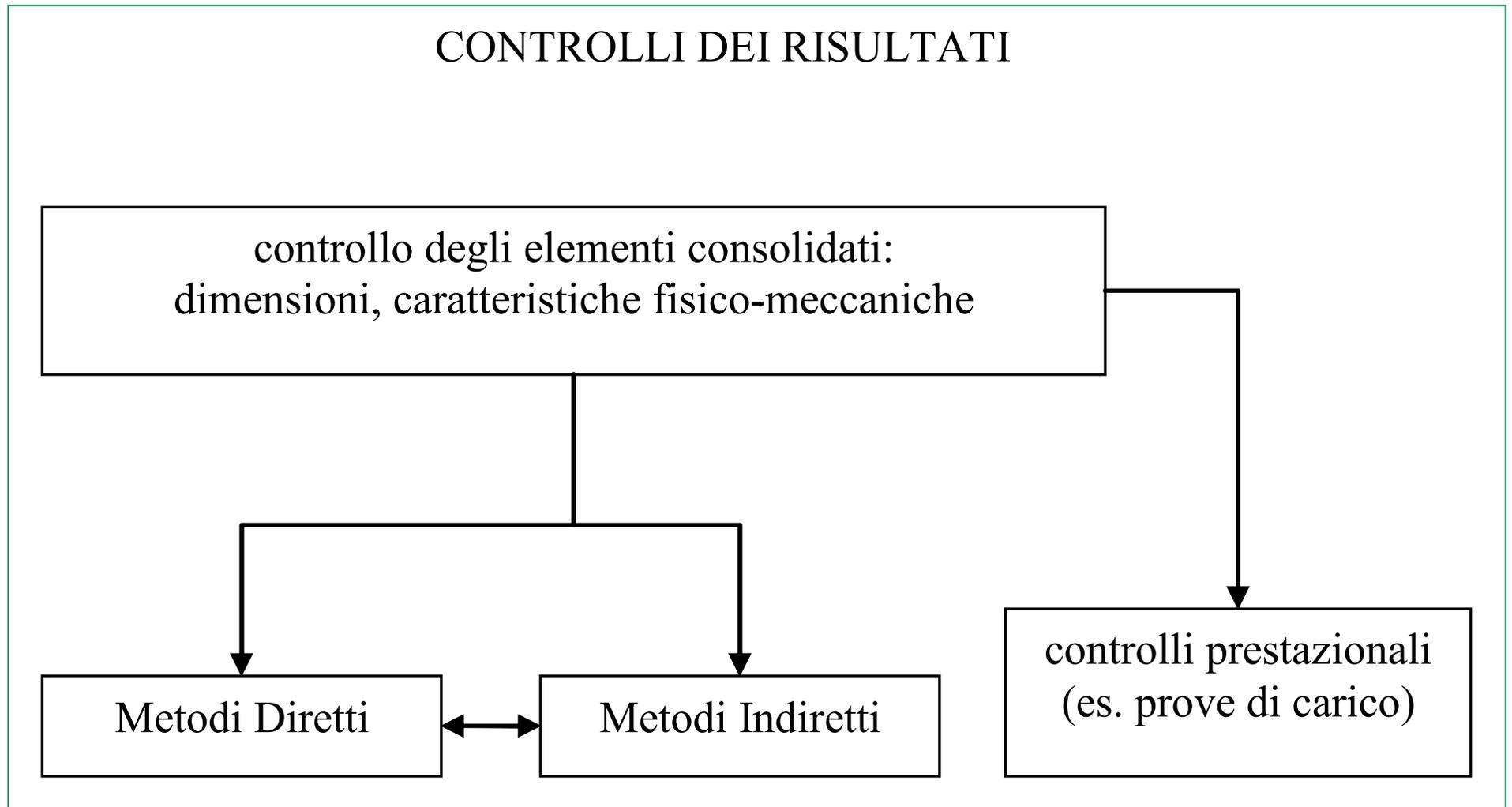
# CONTROLLI PRELIMINARI



# CONTROLLI DURANTE L'ESECUZIONE DEI TRATTAMENTI (controlli di processo)



# CONTROLLI SUGLI ELEMENTI CONSOLIDATI (controlli di prodotto)



# CONTROLLI DURANTE L'ESECUZIONE DEI TRATTAMENTI

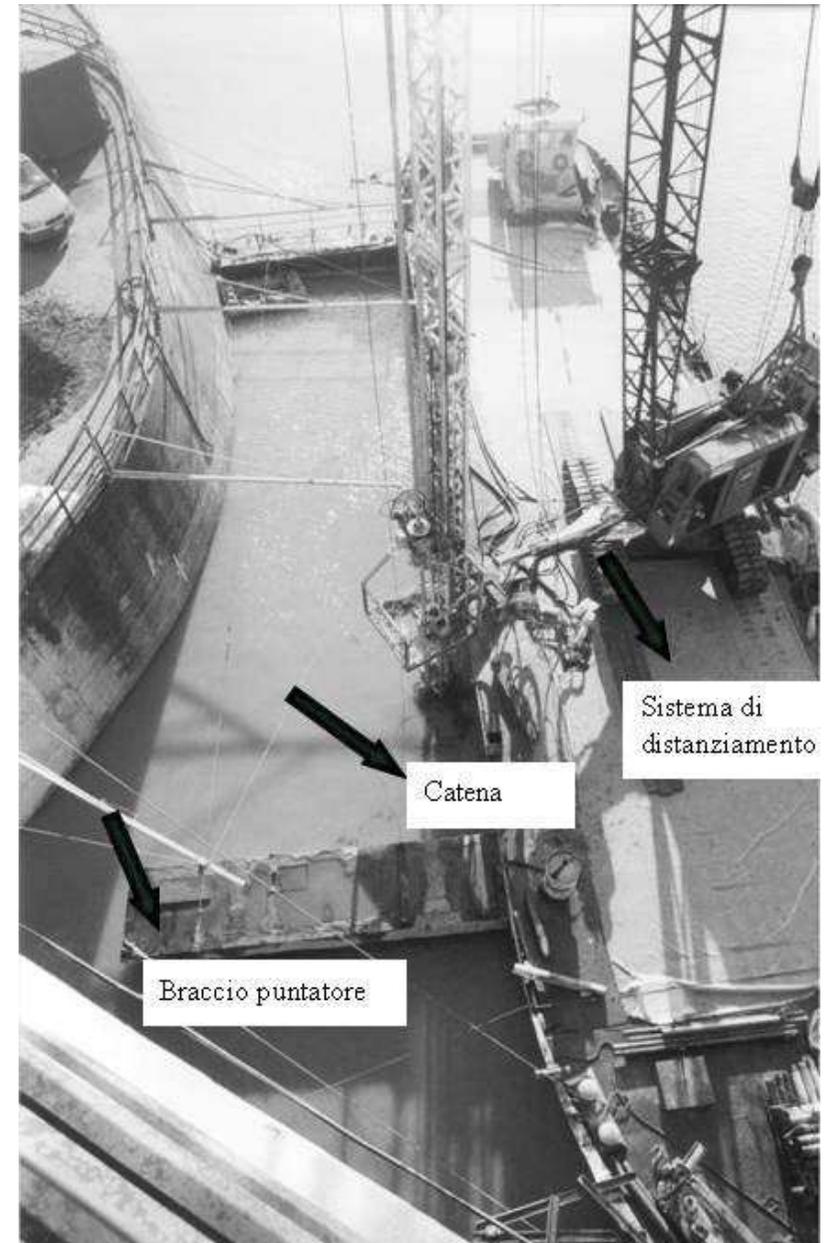
## Materiali impiegati

- *Cemento*
- *Acqua*
- *Additivi*
- *Armature*
- *Miscele*

## Modalità di trattamento

- *Posizione delle colonne (testa, inclinazione, azimuth)*
- *Pressione di iniezione*
- *Portata iniettata*
- *Portata rifluita a piano campagna (spurgo)*
- *Contenuto di cemento*
- *Densità miscela*

# POSIZIONE DELLE COLONNE (Testa Foro, Inclinazione, Azimuth)



# REGISTRAZIONE DEI PARAMETRI DI TRATTAMENTO

Pressioni, Portate, Velocità di estrazione, Velocità di rotazione

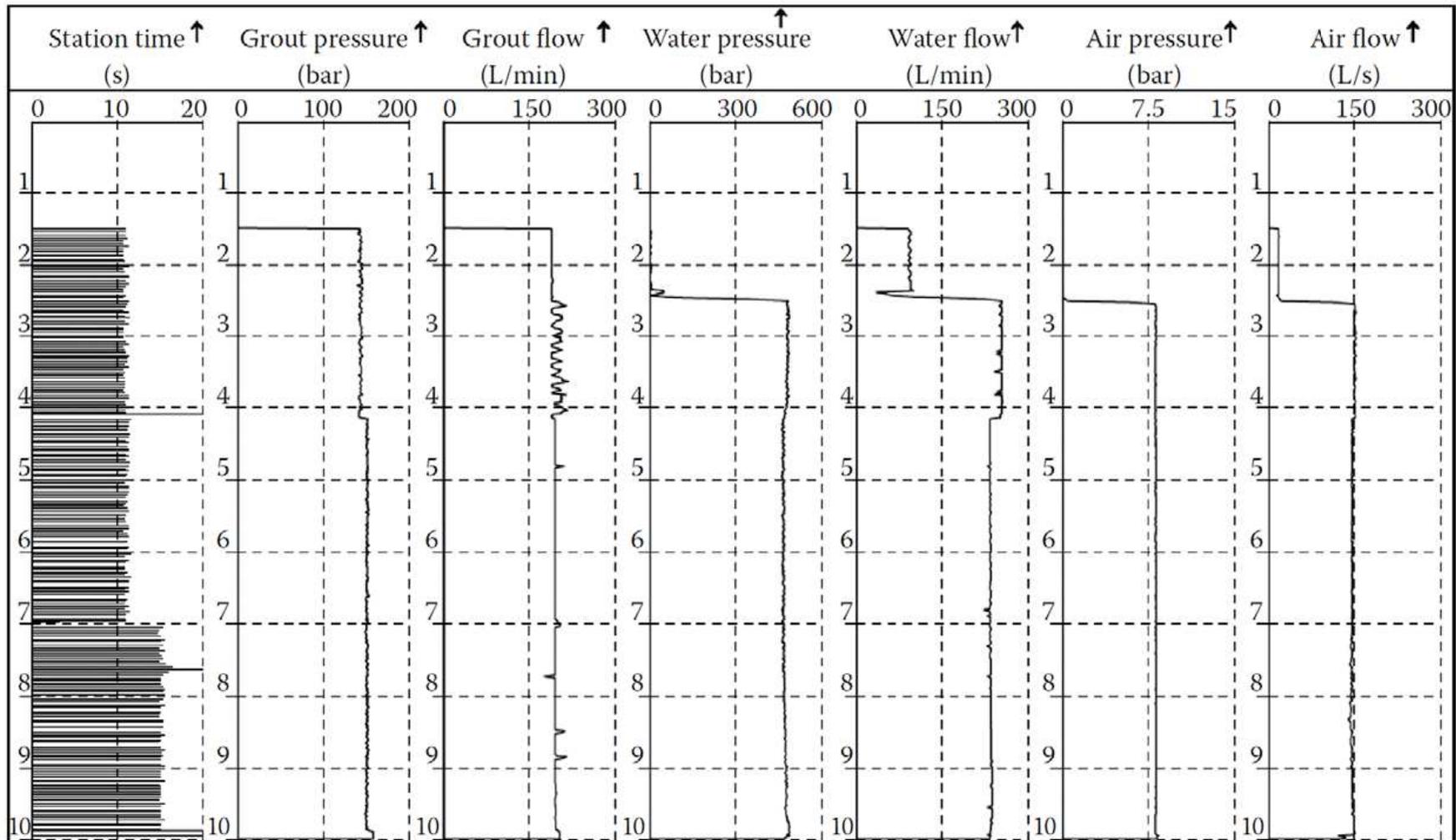
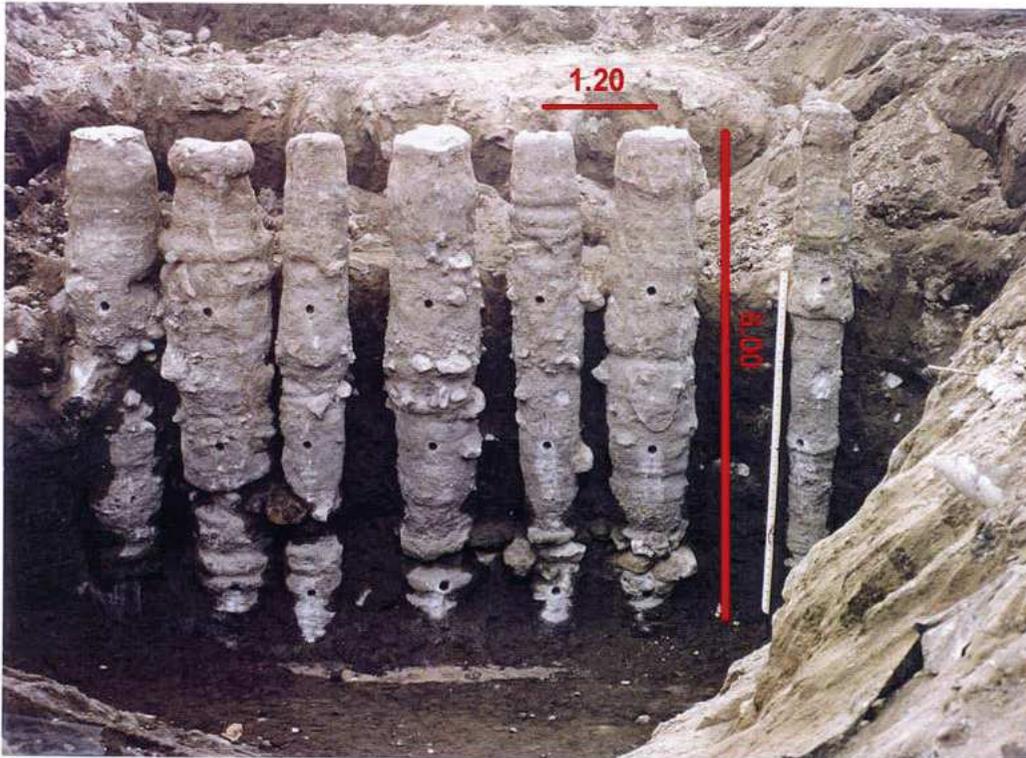


Figure 8.6 Representative log of treatment parameters for triple-fluid jet grouting. (Courtesy of Trevi.)

## CONTROLLI SUGLI ELEMENTI CONSOLIDATI

- Prove in sito
- Prove di laboratorio
- Controlli prestazionali

## Prove in sito: scavi e trincee di esplorazione



Costituiscono il metodo più attendibile per verificare la riuscita dei trattamenti (in termini di dimensione delle colonne e resistenza del soilcrete)

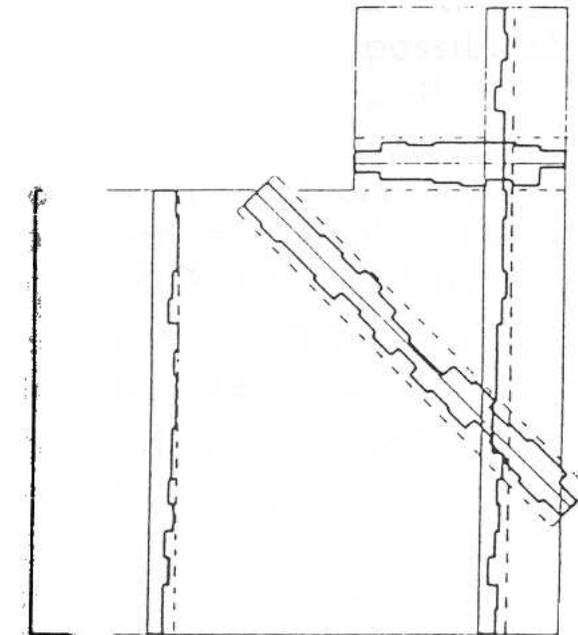
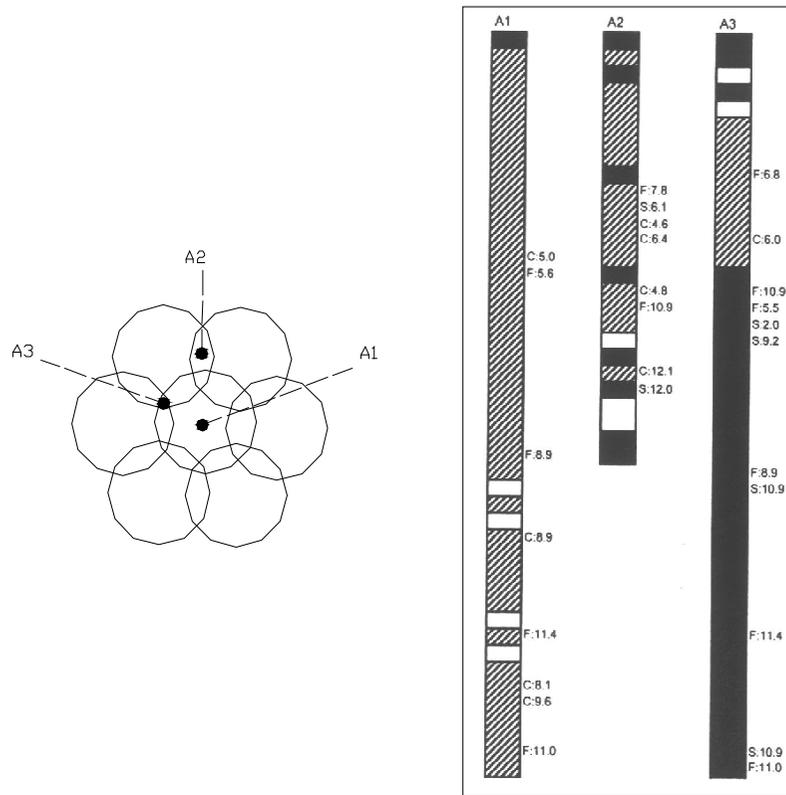
- Profondità Limitata
- Problemi di spazio

# MISURA DIRETTA DEL DIAMETRO

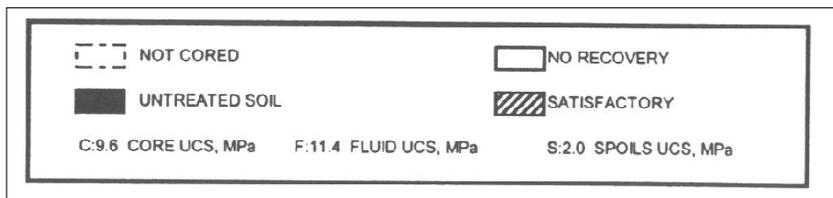


# Prove in sito: Carotaggi

per valutare la continuità dei trattamenti

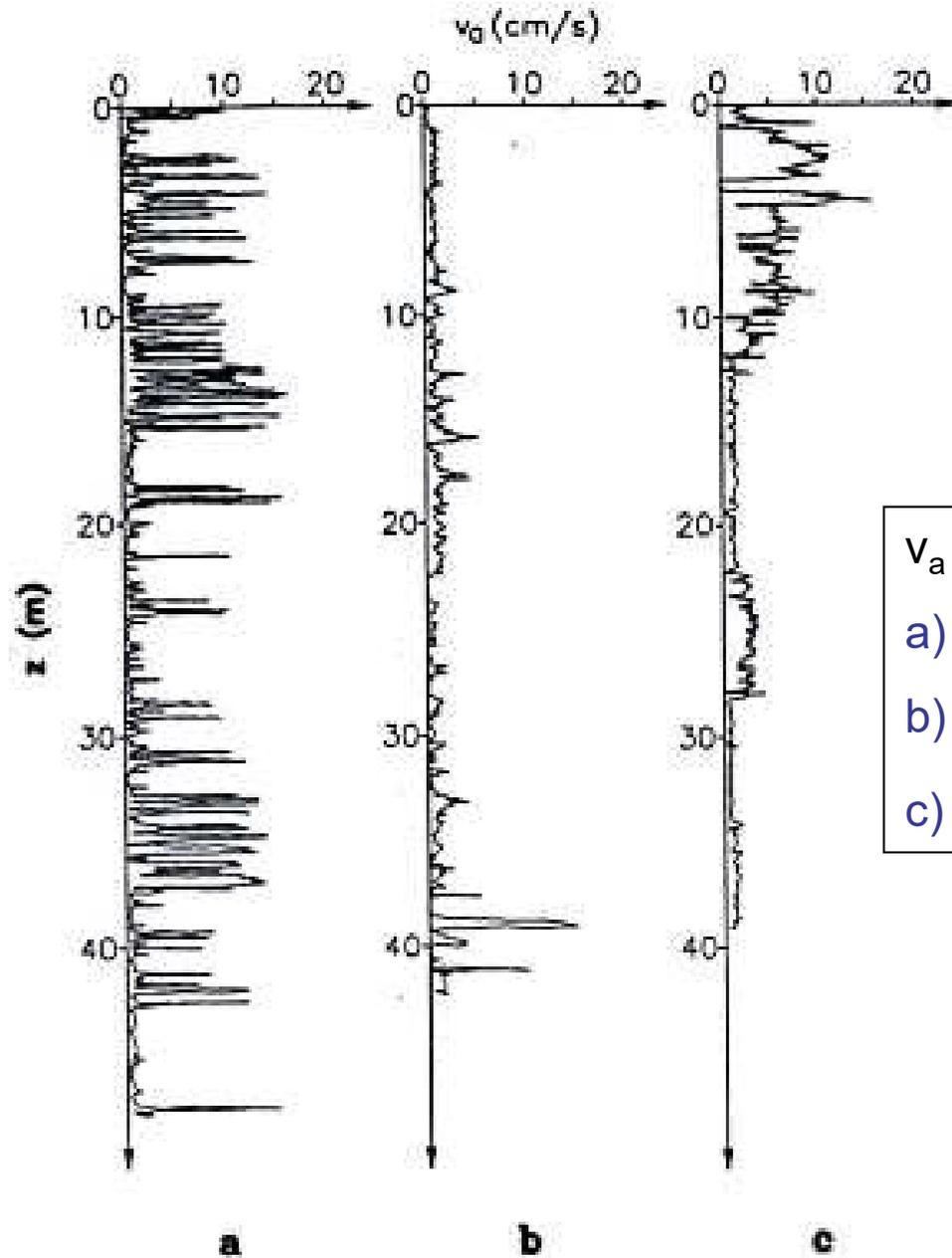


- asse sondaggio
- RQD misurato
- RQD = 100%



Risultati non sempre facili da interpretare

## Prove in sito: **Perforazioni strumentate**



per valutare il grado di cementazione

$v_a$  : velocità di avanzamento durante la perforazione

a) terreno naturale,

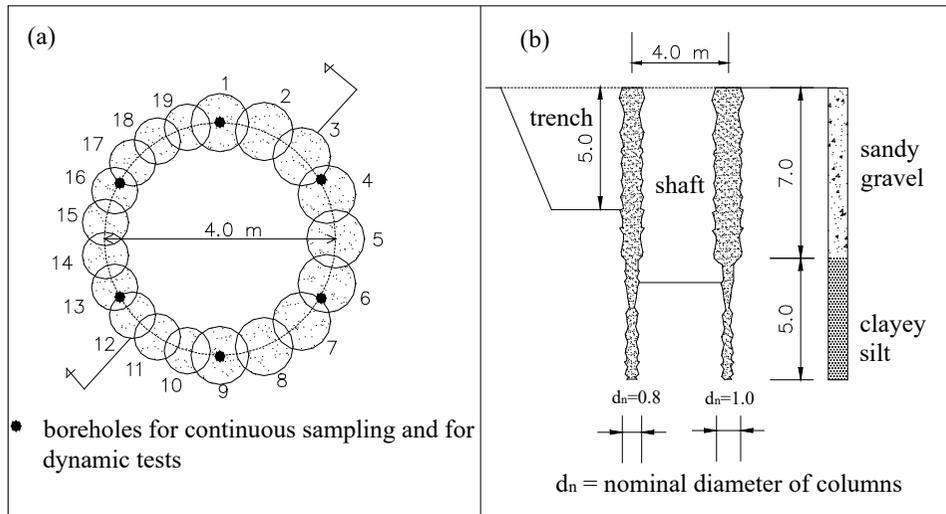
b) terreno cementato con continuità

c) terreno con grado di cementazione variabile

**N.B. Risultati solo qualitativi**

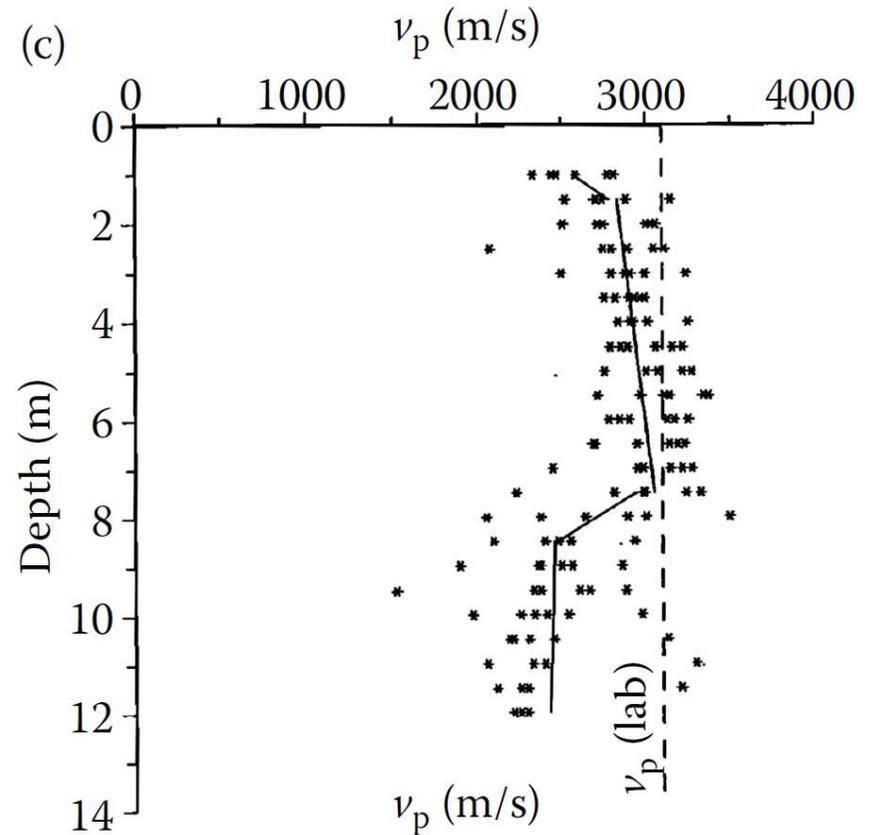
# PROVE IN SITO: **cross-hole; carotaggi sonici**

Campo prove sul torrente Polcevera (GE)

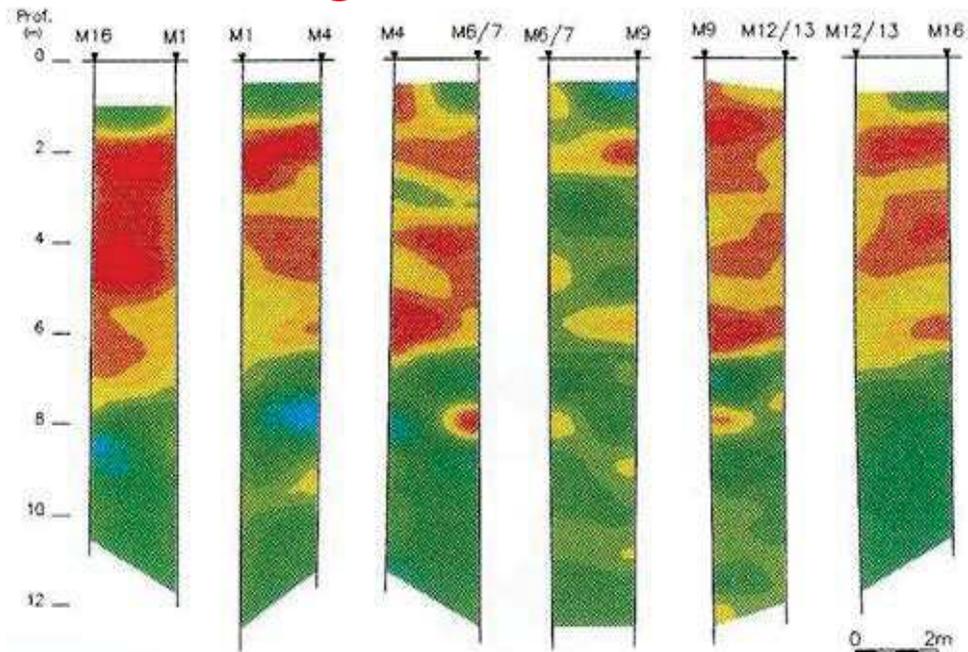


per verificare la continuità dei trattamenti e la qualità del materiale

## **carotaggi sonici**

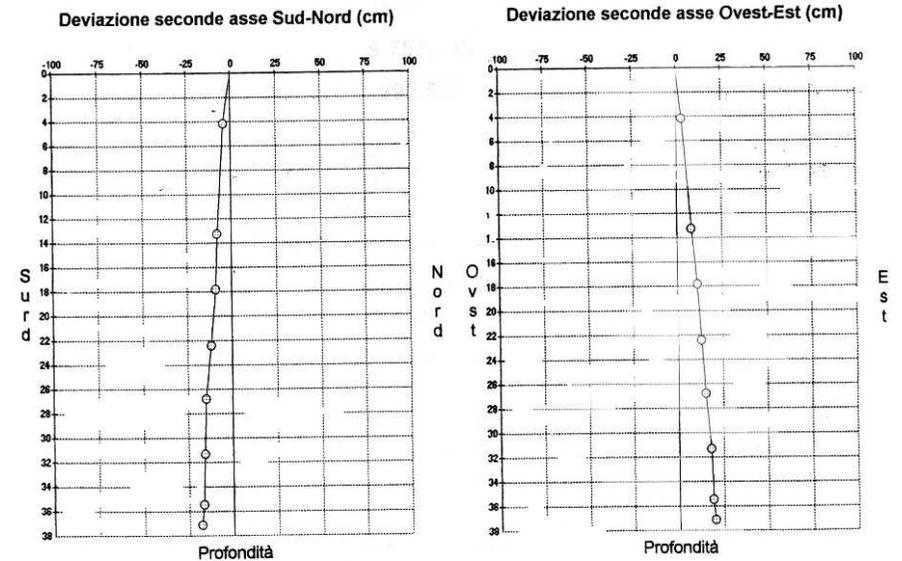
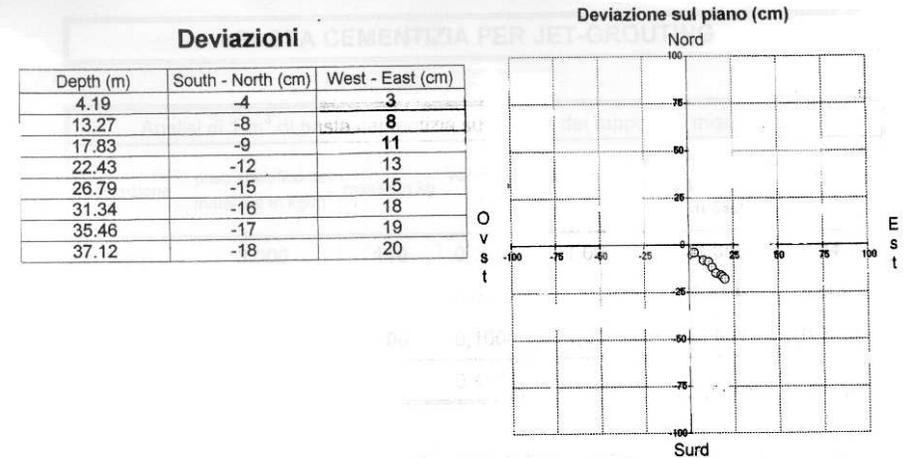


## **Tomografia da cross-hole**



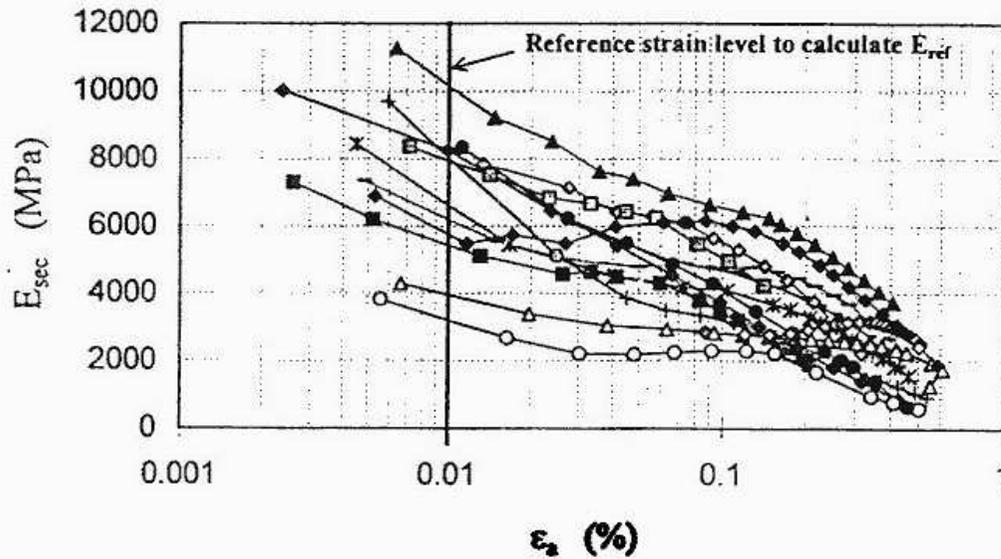
# MISURE DI INCLINAZIONE DELLE PERFORAZIONI

Per controllare l'allineamento delle colonne



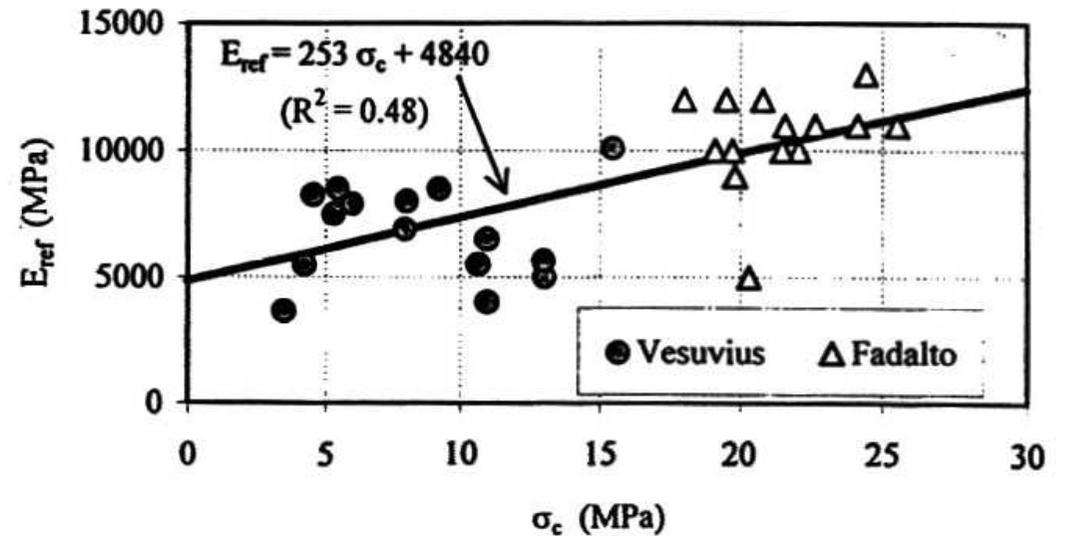
# PROVE IN LABORATORIO: prove di compressione uniassiale

per verificare le proprietà meccaniche del materiale



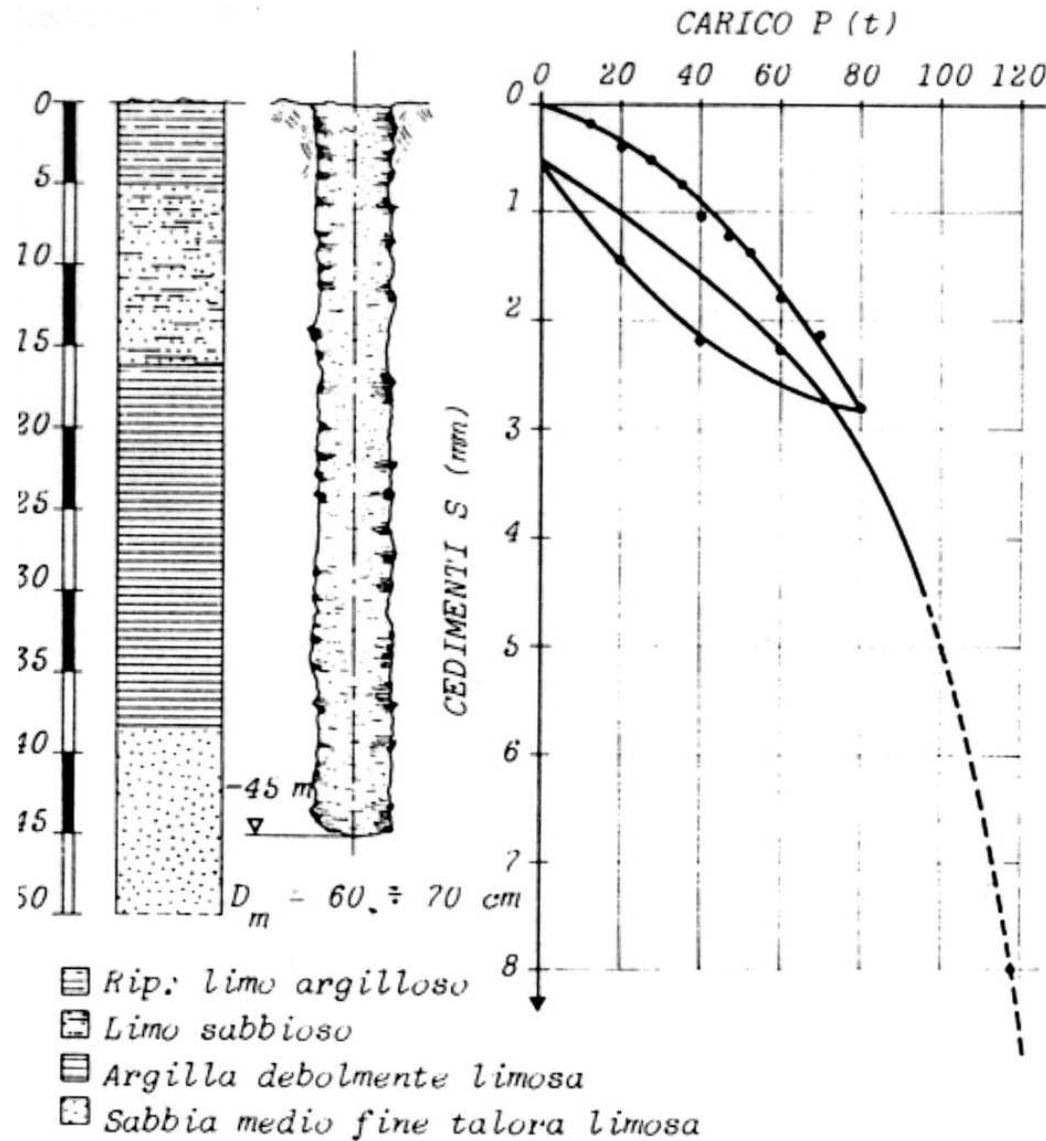
Curve di decadimento dei moduli di rigidità

moduli di rigidità -  
resistenza a compressione

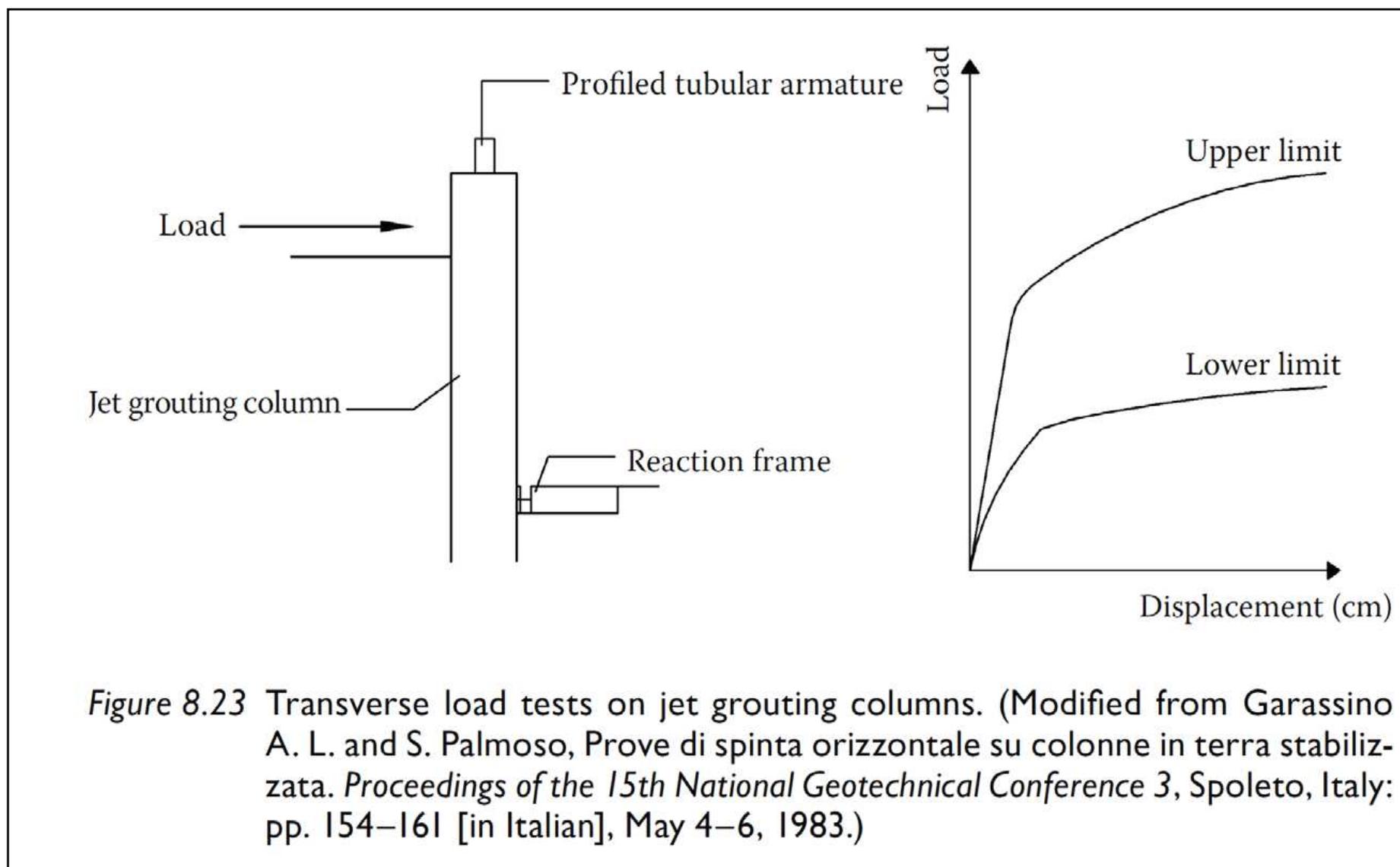


# CONTROLLI PRESTAZIONALI: PROVE DI CARICO VERTICALE

per verificare la risposta meccanica complessiva delle colonne

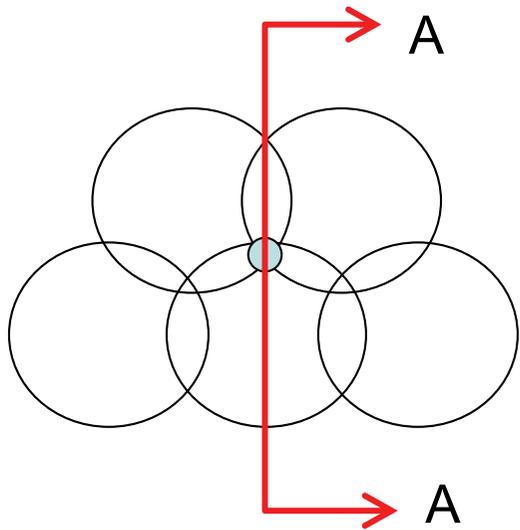


## CONTROLLI PRESTAZIONALI: PROVE DI CARICO ORIZZONTALE

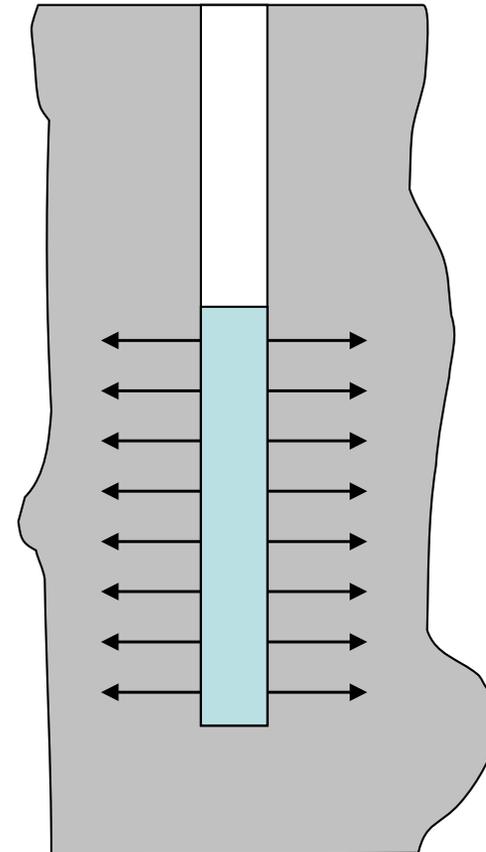


# CONTROLLI PRESTAZIONALI: PROVE DI PERMEABILITÀ IN SITO

per verificare la tenuta idraulica

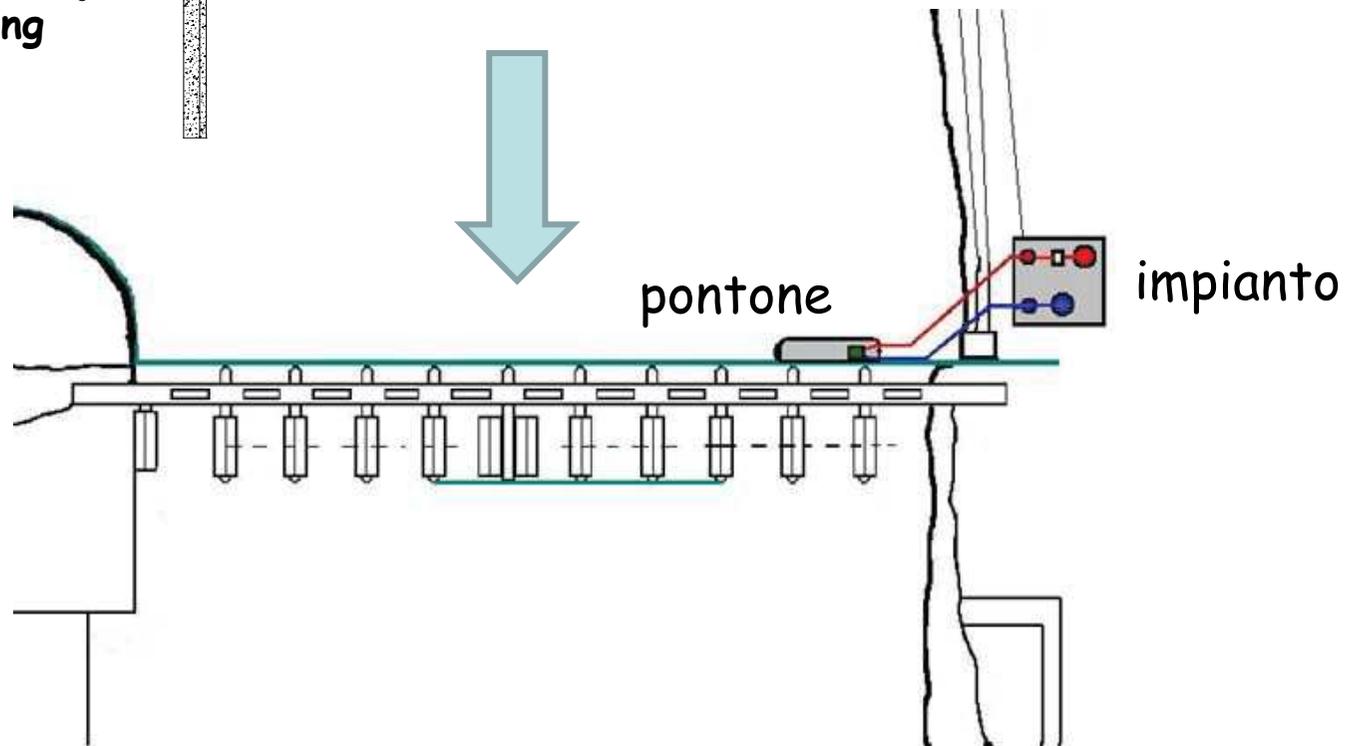
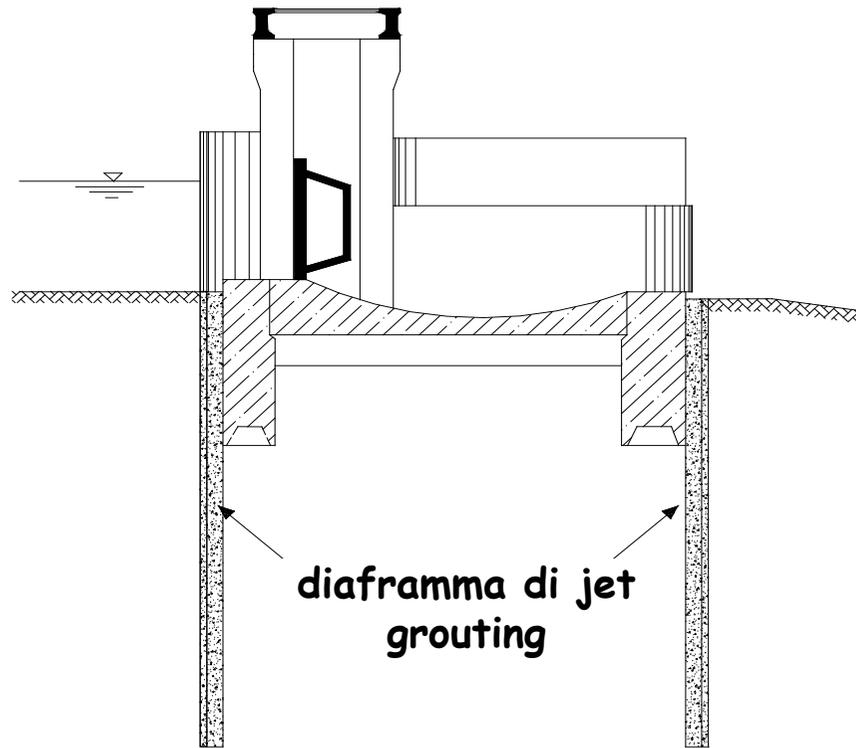


Vista in pianta

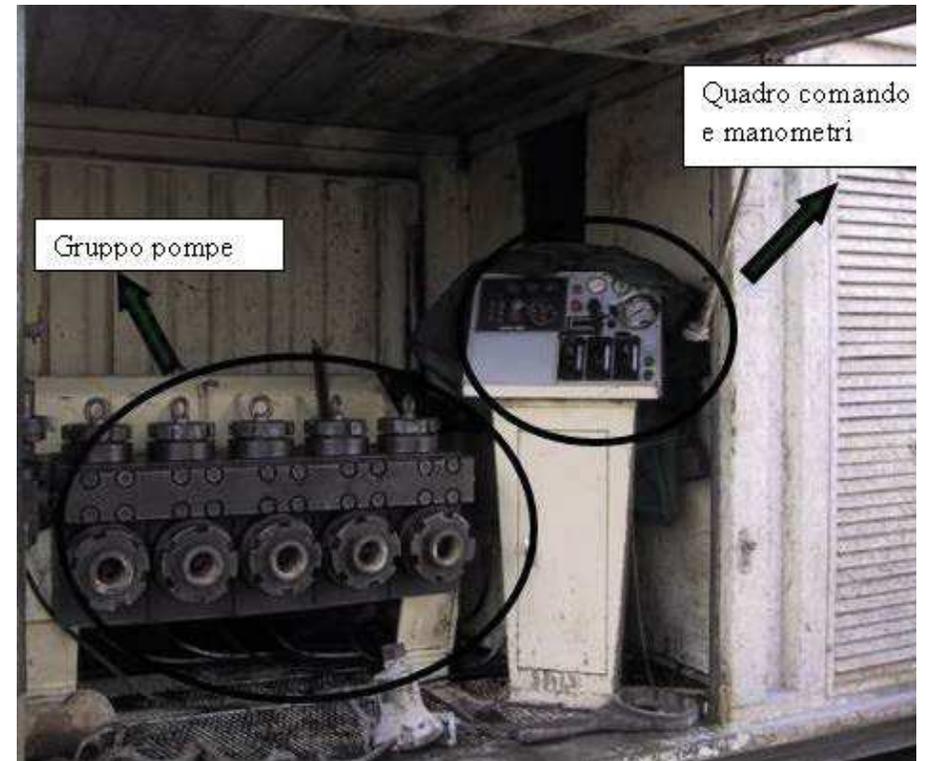
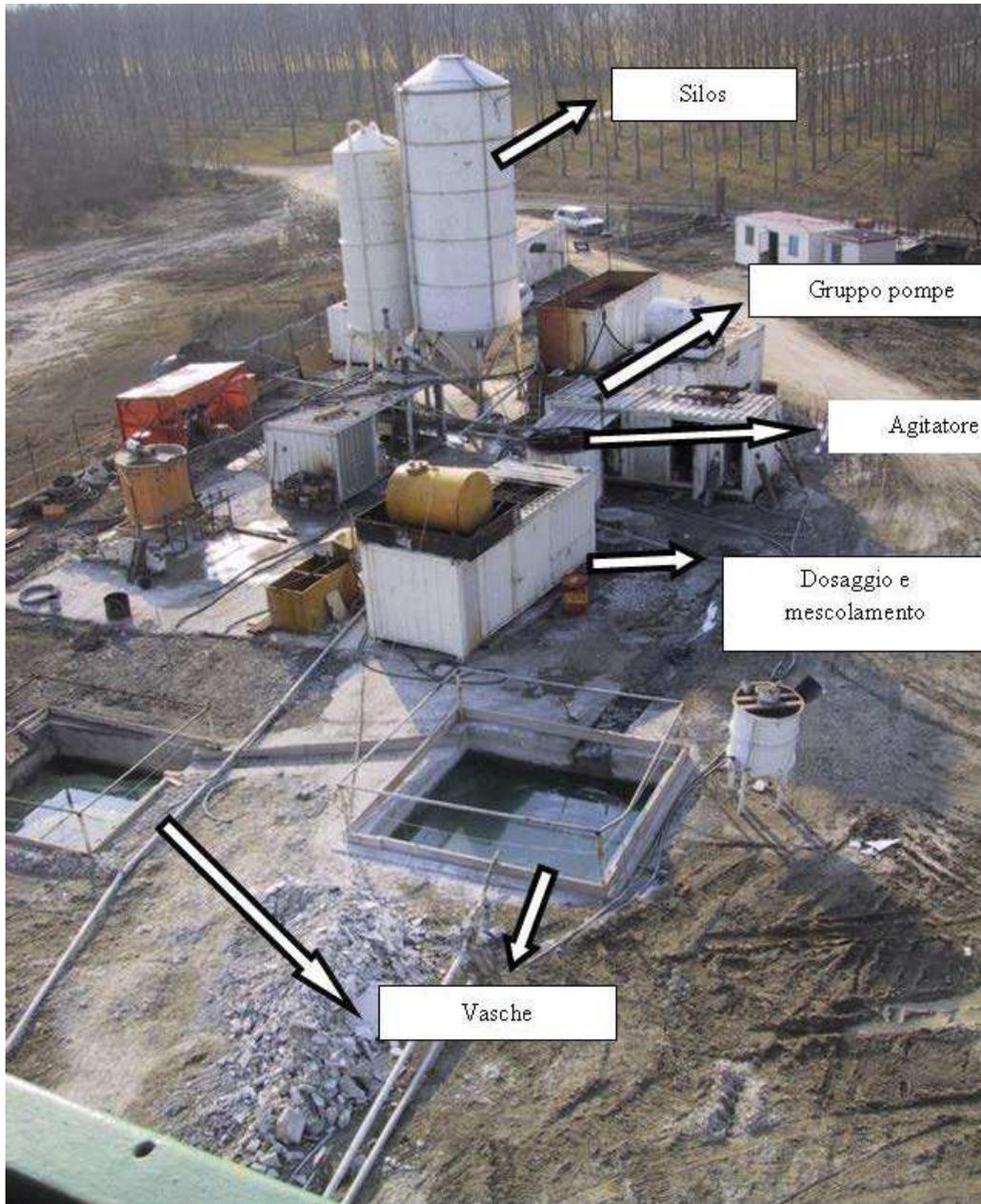


Sezione A-A

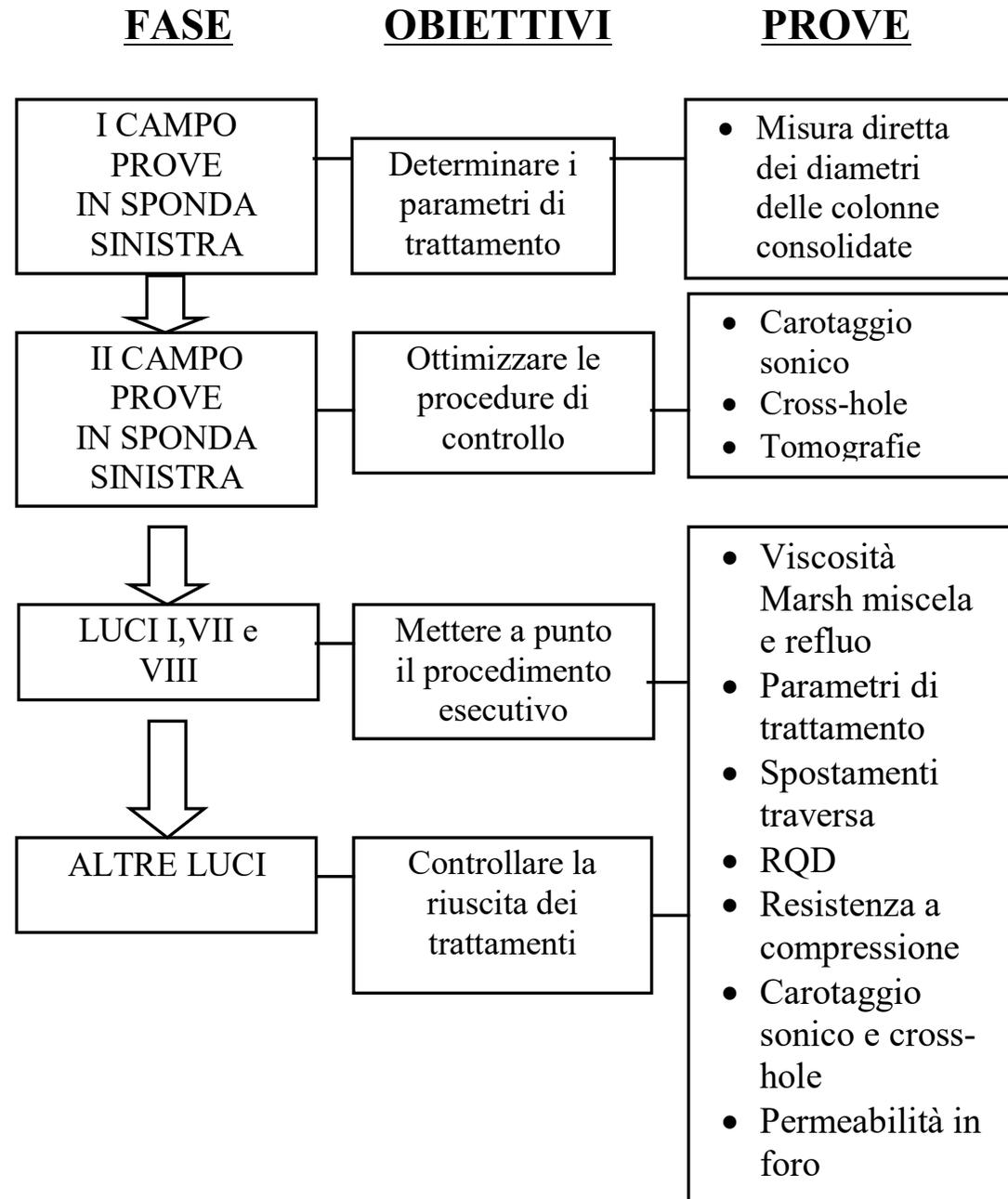
# CAMPO PROVE IL CASO DI ISOLA SERAFINI



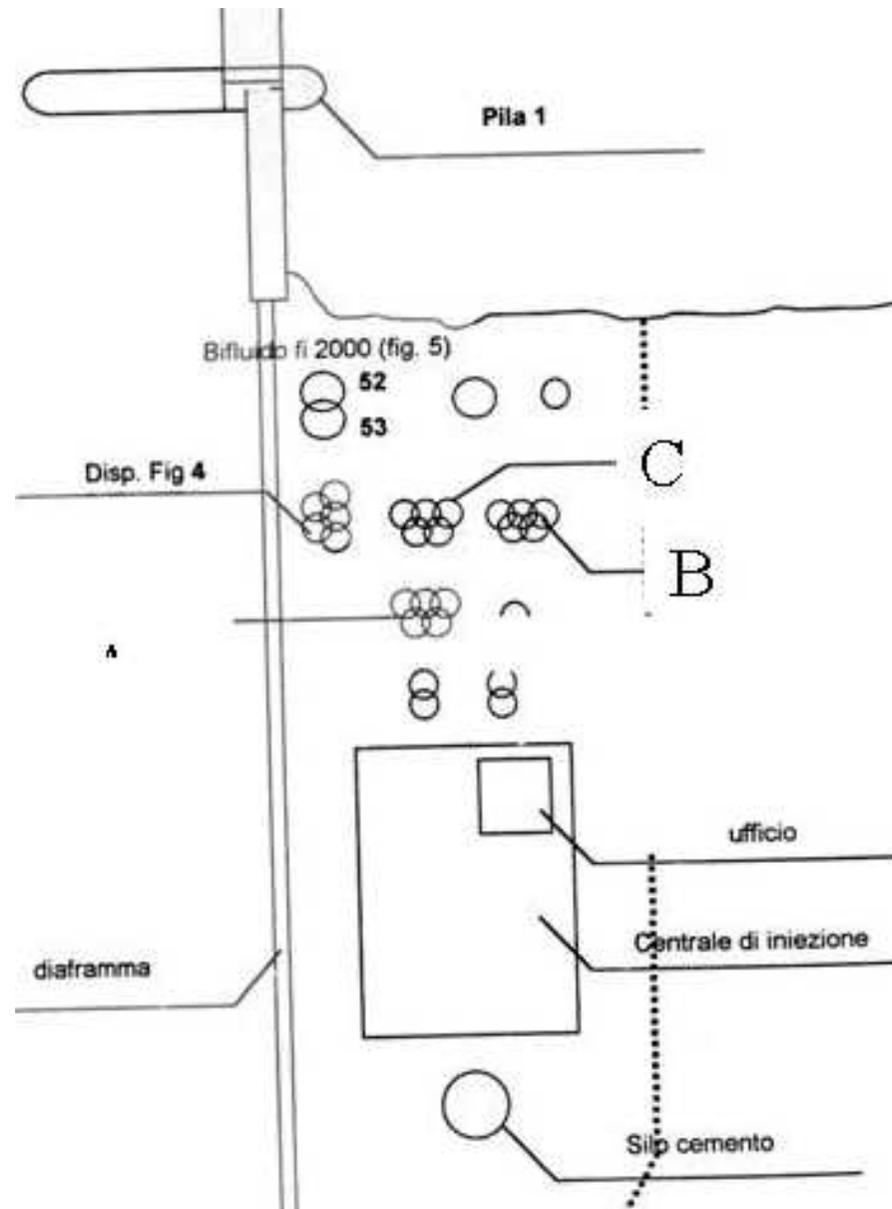
## IMPIANTO (sponda sinistra)



# CONTROLLI (TRAVERSA DI ISOLA SERAFINI)



# PRIMO E SECONDO CAMPO PROVE in sponda sx.



## PRIMO CAMPO PROVE

Tab.I. Parametri utilizzati per la realizzazione della serie di colonne A

$P_{\text{aria}}$ (bar)	Ugelli acqua	$P_{\text{acqua}}$ (bar)	$Q_{\text{acqua}}$ (l/s)	A/C	Ugelli boiaccia	$P_{\text{boiaccia}}$ (bar)	$Q_{\text{boiaccia}}$ (l/s)	$V_{\text{risalita}}$	D reso (mm)
9-10	2  x  2 mm	390	107	1	1  x  6mm	125	187	4cm/7s	da 1000-  a 1400

Tab.II. Parametri utilizzati per la realizzazione della serie di colonne B

$P_{\text{aria}}$ (bar)	Ugelli acqua	$P_{\text{acqua}}$ (bar)	$Q_{\text{acqua}}$ (l/s)	A/C	Ugelli boiaccia	$P_{\text{boiaccia}}$ (bar)	$Q_{\text{boiaccia}}$ (l/s)	$V_{\text{risalita}}$	D reso (mm)
9-10	2  x  3 mm	300  390	169  195	1	2  x  3.5mm	125	137	4cm/15s  4cm/12s	da 1400  a >1600.

## PRIMO CAMPO PROVE

Tab.III. Parametri utilizzati per la realizzazione della serie di colonne C

$P_{\text{aria}}$ (bar)	Ugelli acqua	$P_{\text{acqua}}$ (bar)	$Q_{\text{acqua}}$ (l/s)	A/C	Ugelli boiaccia	$P_{\text{boiaccia}}$ (bar)	$Q_{\text{boiaccia}}$ (l/s)	$V_{\text{risalita}}$	D reso (mm)
9-10	2	300	169	1	2	125	137	4cm/15s	1200-
	x	390	195		x			4cm/12s	1500
	3 mm				3.5mm				

Tab.IV. Parametri utilizzati per la realizzazione della serie di colonne D

$P_{\text{aria}}$ (bar)	Ugelli acqua	$P_{\text{acqua}}$ (bar)	$Q_{\text{acqua}}$ (l/s)	A/C	Ugelli boiaccia	$P_{\text{boiaccia}}$ (bar)	$Q_{\text{boiaccia}}$ (l/s)	$V_{\text{risalita}}$	D reso (mm)		
9-10	2	390	110	1	1	110	174	4cm/23s	1900		
	x				x				180	189	2200
	2 mm								5mm		

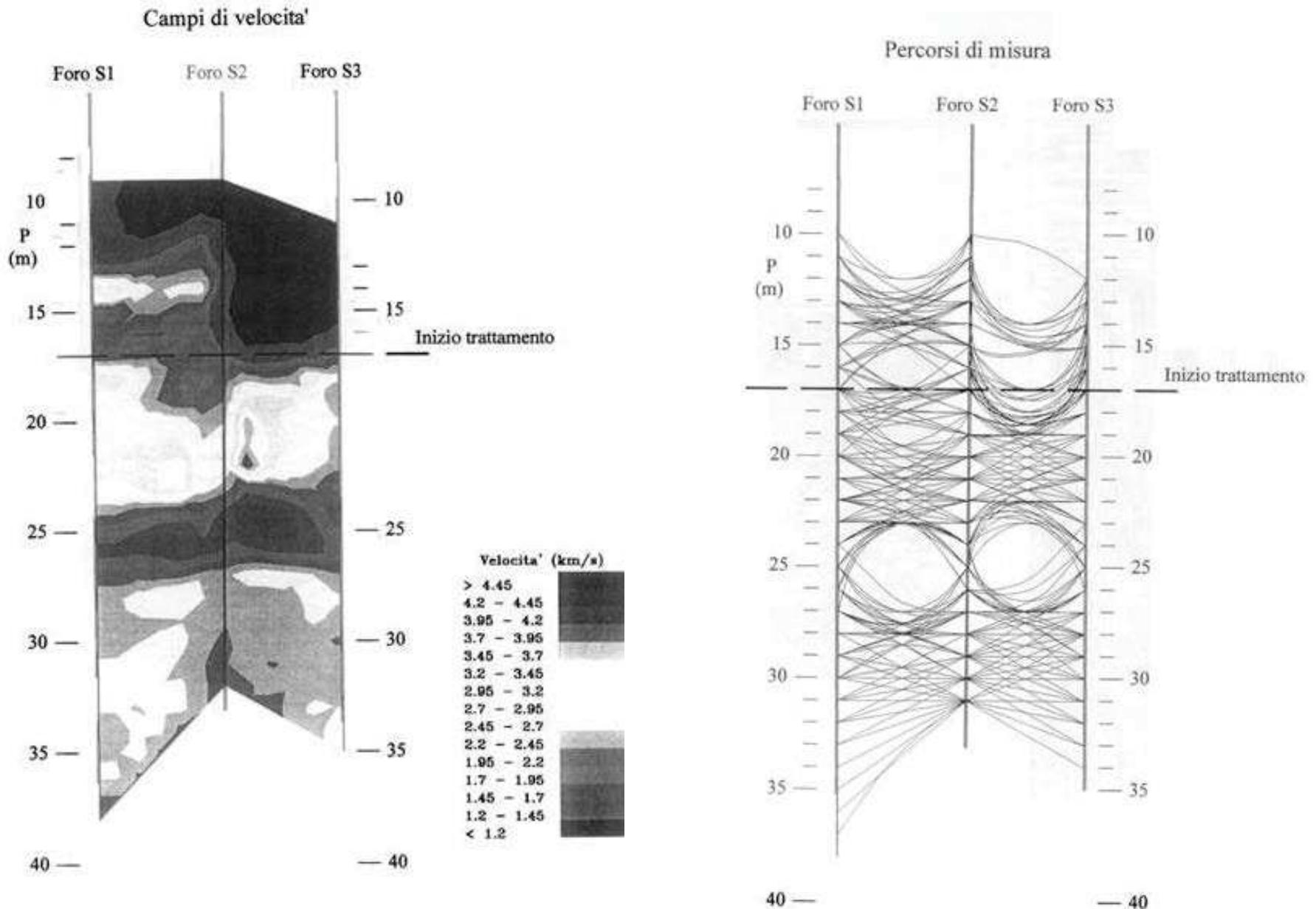
# SCELTA DEI PARAMETRI DI TRATTAMENTO

In seguito ai risultati del campo prova si è scelta la soluzione di eseguire trattamenti con colonne di  $\Phi 1200$  adottando i seguenti parametri di trattamento:

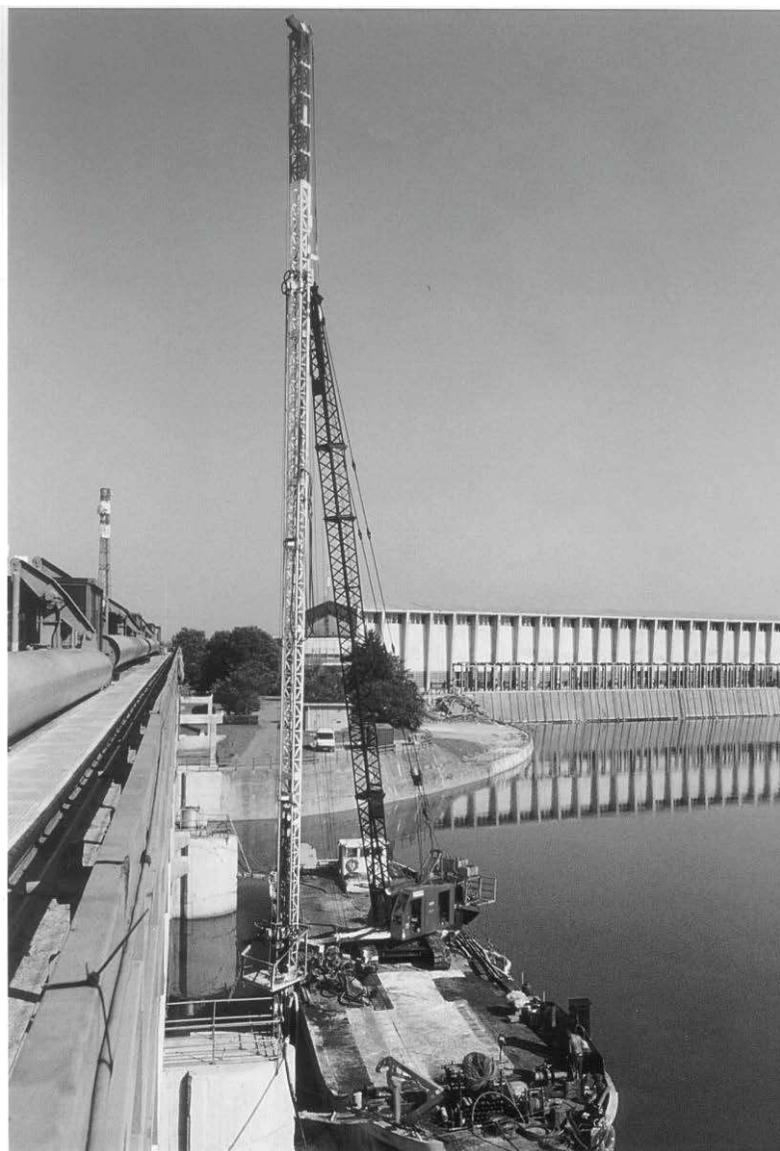
- Aria                      pressione al compressore    0.6 Mpa;
- Acqua:                    ugelli                              2 x  $\Phi$  2mm  
                                  pressione alla pompa        42-45 Mpa;  
                                  portata                            110 l/min;
- Boiaccia:                ugello                              1 x  $\phi$  6 mm  
                                  Densità indicativa            1.50 t/m<sup>3</sup>;  
                                  Pressione alla pompa        14-17 MPa  
                                  portata                            200 l/min;
- Trattamento            vel. di risalita del rotary    0.35 m/min;  
                                  n° di giri/min del rotary    6

# SECONDO CAMPO PROVE: luci I VII e VII

## Tomografia sonora



# CONTROLLI LUCI I - VII E VIII



Tab.V. Risultati delle indagini eseguite sulle luci I, VII e VIII.

Luce	N° Colonne Progetto + aggiuntive	Deviazione dalla verticale Media Max (%)	Spessore minimo diaframma (cm)	%recupero carote e RQD	K (m/s) medio max	$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> ) media minima
I	67	0.77	87	96.2	9.4 E-08	5.77
	+ 2	1		81	1 E-07	2.03
VII	62	0.7	85			
	+ 3	1				
VIII	63	0.6	86	95.7	1 E-07	8.24
	+ 1	0.9		83	1.2 E-07	3.67

# CONTROLLO SPOSTAMENTI DELLA TRAVERSA

