



INCONTRI SU TEMI DELL'INGEGNERIA CIVILE PER L'AMBIENTE ED IL TERRITORIO

Venerdì 08 ottobre 2010 – PIACENZA (Italy)

18<sup>a</sup> Mostra Internazionale delle Tecnologie ed attrezzature per la Ricerca, Estrazione e Trasporto dei Fluidi sotterranei

**Geofluid 2010**

Drilling & Foundations

Sala "B"

**"INNOVAZIONE TECNOLOGICA E GESTIONE  
INNOVATIVA DI SISTEMI GEOTECNICI COMPLESSI"**

**CONSOLIDAMENTO DELLE FONDAZIONI DI  
RILEVATI STRADALI E FERROVIARI**

*Giuseppe Modoni  
Università di Cassino*



Croce P., Modoni G. (2010).  
**Consolidamento delle  
fondazioni di rilevati stradali e  
ferroviari**, Rivista Italiana di  
Geotecnica, vol.4/2010, pp.31-  
46



[modoni@unicas.it](mailto:modoni@unicas.it)



## CONSOLIDAMENTO DELLE FONDAZIONI DI RILEVATI STRADALI E FERROVIARI

Croce P., Modoni G.

Università degli Studi di Cassino

### SOMMARIO

La progettazione dei rilevati stradali e ferroviari su terreni cedevoli è fortemente condizionata dalla necessità di contenere i cedimenti entro limiti accettabili. Questo problema è particolarmente avvertito nei tratti adiacenti le spalle di viadotti e nell'impulso di rilevati preesistenti. In alternativa alle tecniche tradizionali, mirate ad accelerare il decorso dei cedimenti mediante densi ed precarichi, si è progressivamente affermata la pratica di consolidare i terreni con l'inserimento di elementi cilindrici. Prendendo spunto da alcuni casi costruttivi, nella presente nota si passano in rassegna le diverse tecnologie disponibili per questa particolare applicazione (pali, deep mixing, jet grouting, stone columns). Per ciascuna tecnica si esaminano i metodi di analisi proposti per le verifiche progettuali, soffermandosi sull'intenzione e gli elementi consolidati, il rilievo ed il terreno circostante. Avvalendosi di un codice di calcolo numerico agli elementi finiti si presenta infine un'analisi parametrica con l'obiettivo di confrontare l'efficacia delle diverse tipologie di rinforzo cilindrici.

Parole chiave: rilevati, cedimenti, consolidamento, pali, jet grouting, deep mixing, stone columns.

### 1. INTRODUZIONE

La costruzione dei rilevati su terreni cedevoli rappresenta un classico problema di ingegneria geotecnica sul quale si sono orientate diverse generazioni di ricercatori. Le scarse proprietà meccaniche dei terreni di fondazione, unitamente ai carichi imposti derivanti dal peso proprio del rilevato possono infatti indurre fenomeni di instabilità oppure dare luogo a cedimenti elevati e prolungati nel tempo, in grado di compromettere la funzionalità dell'opera.

La soluzione tecnica tradizionale prevede l'impiego di densi verticali, eventualmente combinata con l'applicazione di un precarico, finalizzata ad accelerare la dissipazione delle sovrappressioni interstiziali e quindi il decorso dei cedimenti. Più recentemente sono state proposte soluzioni alternative che mirano ad incrementare la rigidità dei terreni di fondazione mediante interventi di consolidamento. Quest'ultimo approccio progettuale prevede la realizzazione di elementi cilindrici relativamente rigidi, costituiti da pali o da colonne consolidate, per contenere entro valori ammissibili l'ammontare dei cedimenti. Il vantaggio dal punto di vista costruttivo risiede nella possibilità di realizzare il rilevato in una sola fase, senza sovrapporre tempi di attesa eccessivamente lunghi per la posa in opera della pavimentazione stradale o dell'armamento ferroviario. Se tutti i numeri di soluzioni economicamente onere ed il loro impiego viene quindi limitato a situazioni particolari.

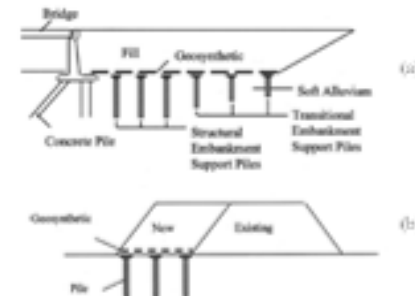


Figura 1. Tipici interventi di consolidamento delle fondazioni di rilevati stradali (a, rilevato adiacente alla spalla di un viadotto; b, ampliamento di un rilevato esistente) (da Han e Gabr, 2002).

Figure 1. Typical solutions for the reinforcement of road embankment foundations (a, viaduct abutment; b, enlargement of existing embankment) (Han & Gabr, 2002).

Le applicazioni più frequenti riguardano i tratti di rilevato adiacenti alle spalle di ponti o viadotti (Fig. 1.a) ed i rilevati di ampliamento della piattaforma stradale (Fig. 1.b), dove risulta indispensabile limitare i cedimenti differenziali per non compromettere la

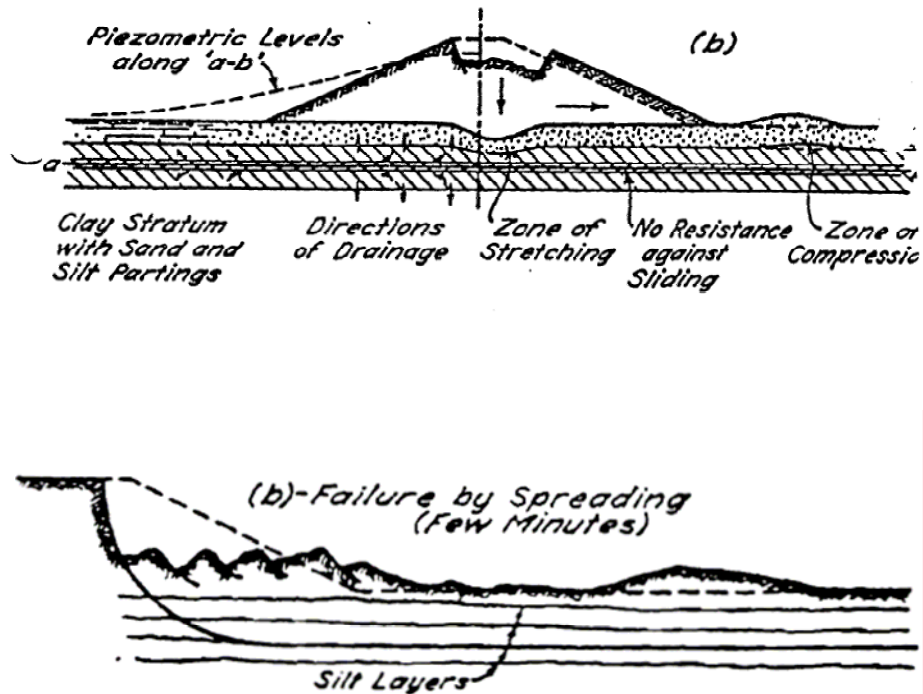
# **CONSOLIDAMENTO DELLE FONDAZIONI DI RILEVATI STRADALI E FERROVIARI**

- 1. INTRODUZIONE**
- 2. TECNICHE DI CONSOLIDAMENTO**
- 3. ANALISI E PROGETTAZIONE**
- 4. MONITORAGGIO**
- 5. CONCLUSIONI**

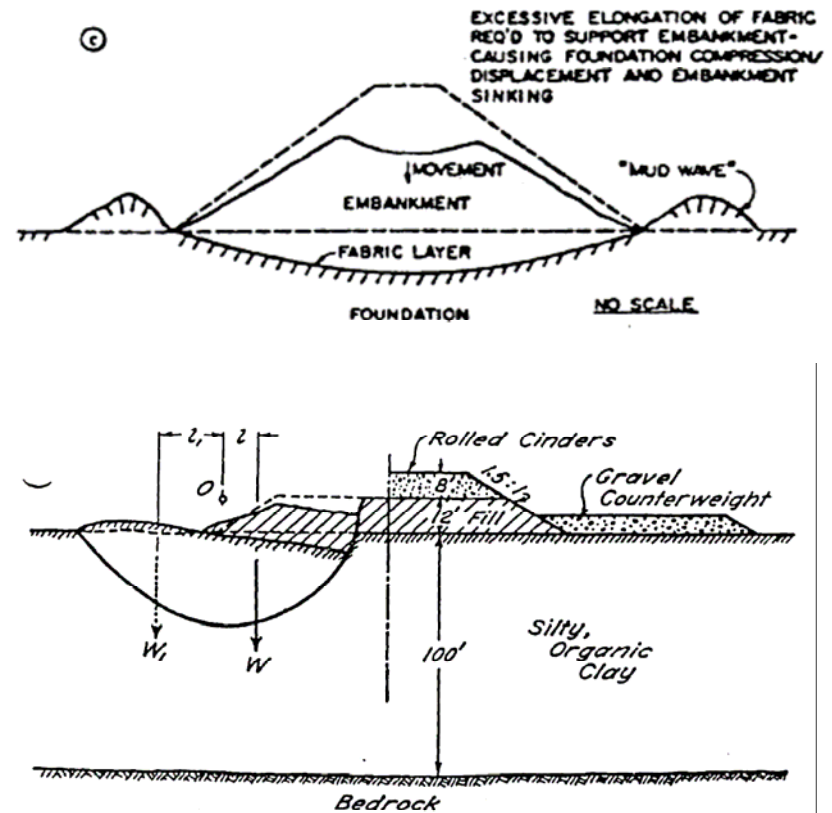
# TERRENI MOLTO COMPRIMIBILI E POCO RESISTENTI

(Argille N.C. o poco O.C., Terreni Organici...)

## POSSIBILE INSTABILITÀ



Terzaghi e Peck (1967)

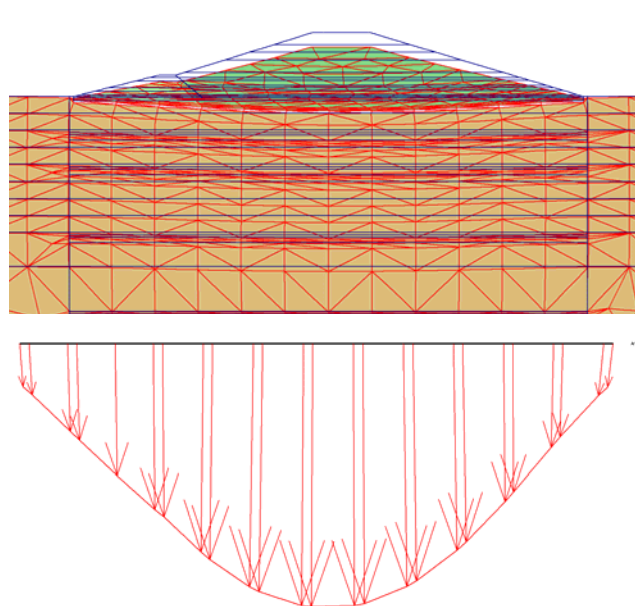


Halibarton et al. (1978)

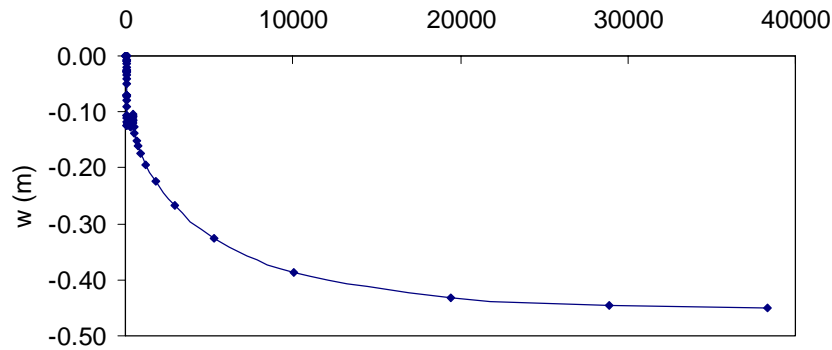
# TERRENI MOLTO COMPRIMIBILI E POCO RESISTENTI

(Argille N.C. o poco O.C., Terreni Organici...)

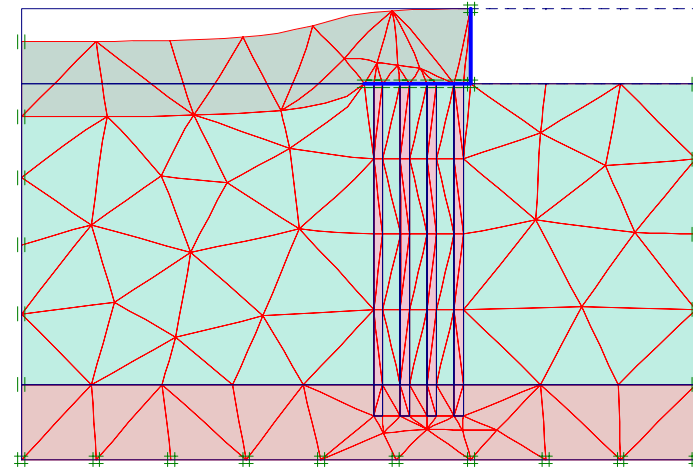
**CEDIMENTI ELEVATI E PROTRATTI NEL TEMPO**



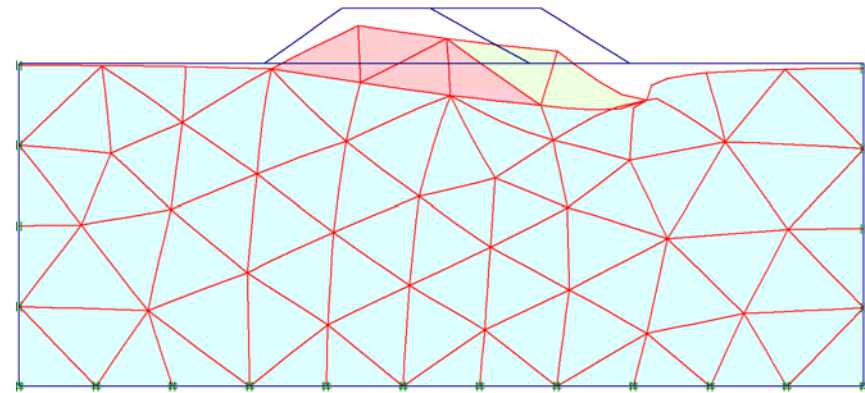
tempo (giorni)



Approccio alle spalle di ponti e viadotti



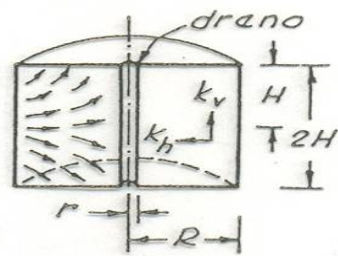
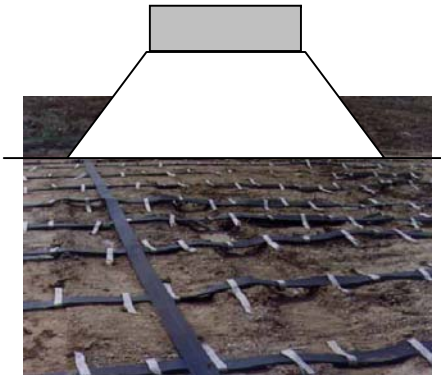
Ampliamento di rilevati esistenti



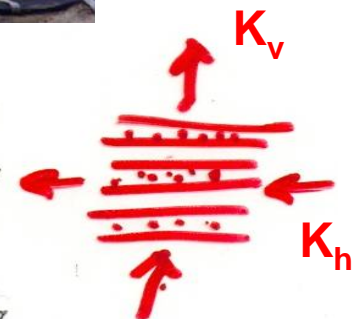
# SOLUZIONI TECNICHE

## Controllo della consolidazione:

- precarico
- dreni verticali
- .....

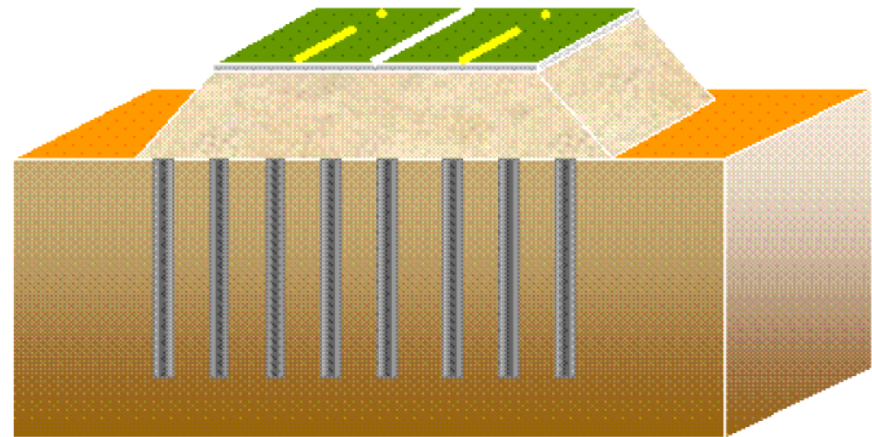


c) sezione a-a



## Controllo dei cedimenti :

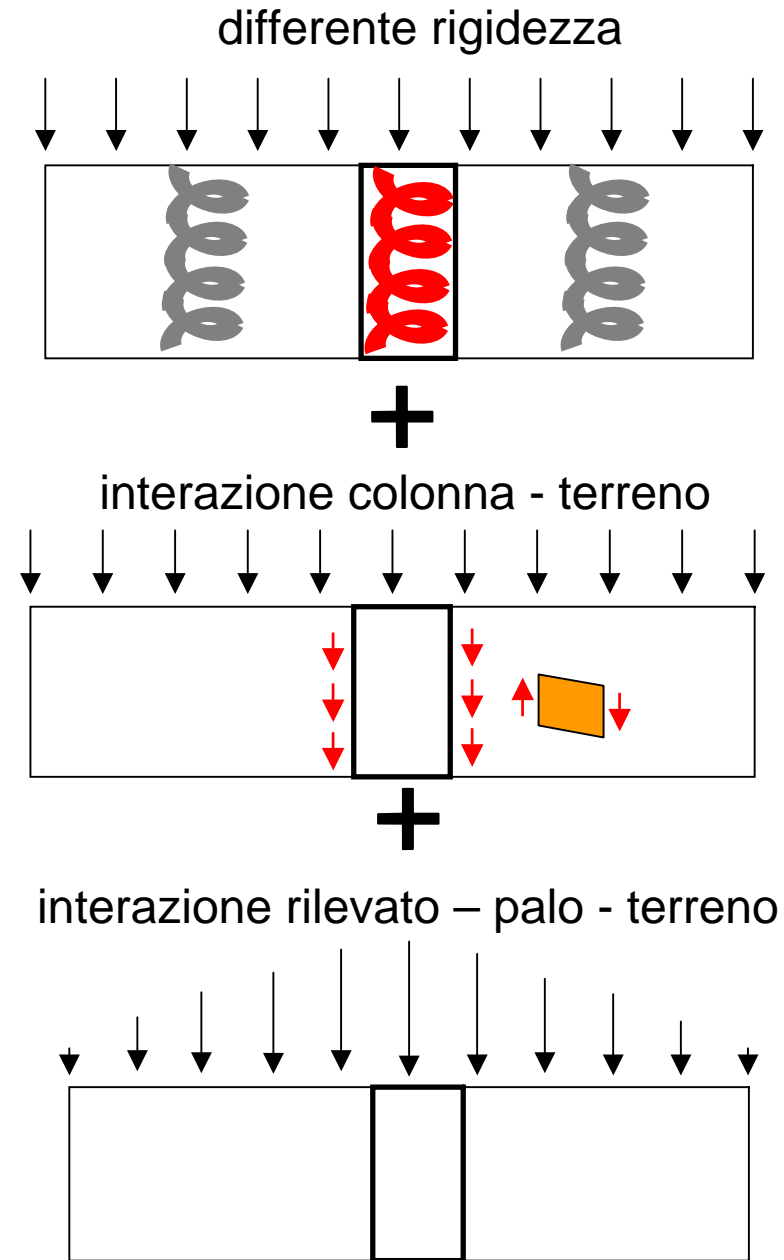
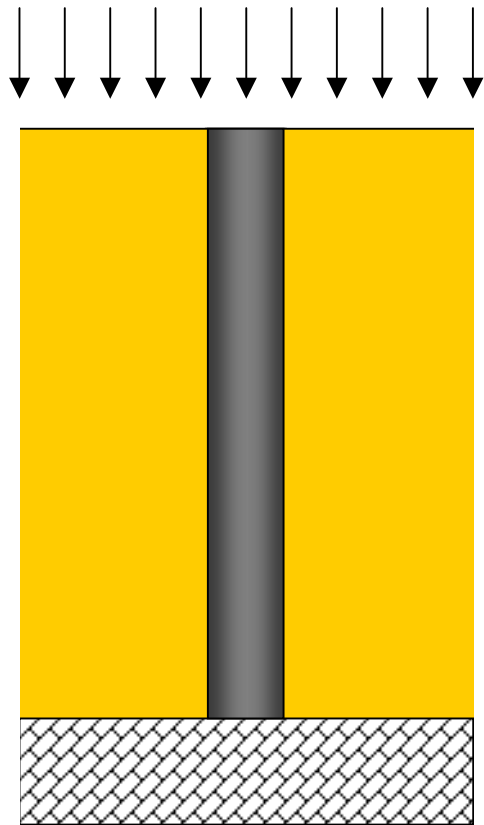
- alleggerimento dei rilevati
- **consolidamento dei terreni di fondazione**
- rinforzo dei rilevati (stabilizzazione a calce, inserimento di geosintetici etc.)



Rinforzo con elementi colonnari  
(Column Supported Embankments)

# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO



# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

Pali battuti

Pali in calcestruzzo

Pali costruiti fuori opera

Pali in legno

I primi tipi caratteristici

- resistenza e rigidezza molto elevate (armatura)
- controllo piuttosto accurato del prodotto
- forte addensamento dei terreni circostanti

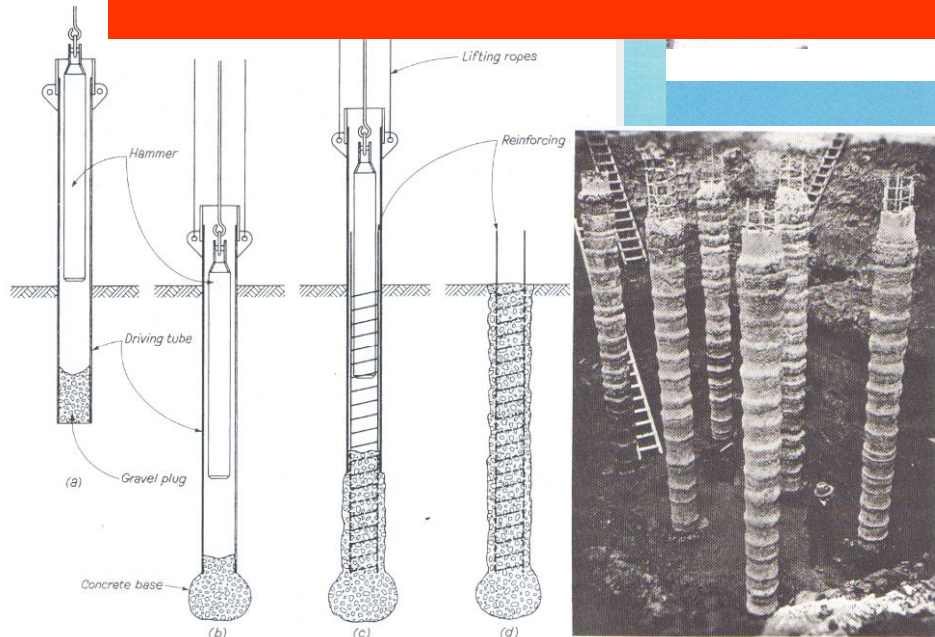


Fig. 2.27 Stages in installing a Franki pile  
 (a) Driving piling tube (b) Placing concrete in piling tube  
 (c) Compacting concrete in shaft (d) Completed pile

(Parsons, 1950)  
 (Palo RAINBOW)

Piloti in più elementi

Piloti lubrificati

Pali cilindrici ad elementi

Pali gettati in opera con tubo forma recuperabile

Palo Simplex

Palo Franki

Pali Express

Pali Vibro

Pali VibroTrevi

Pali gettati in opera con lamierino a perdere

Palo Lacor

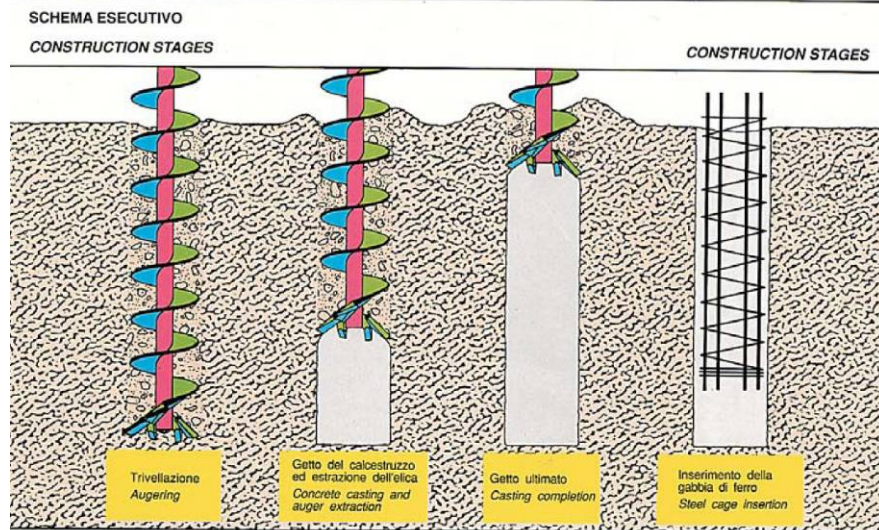
Palo Trevicor

Palo Multiton

# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

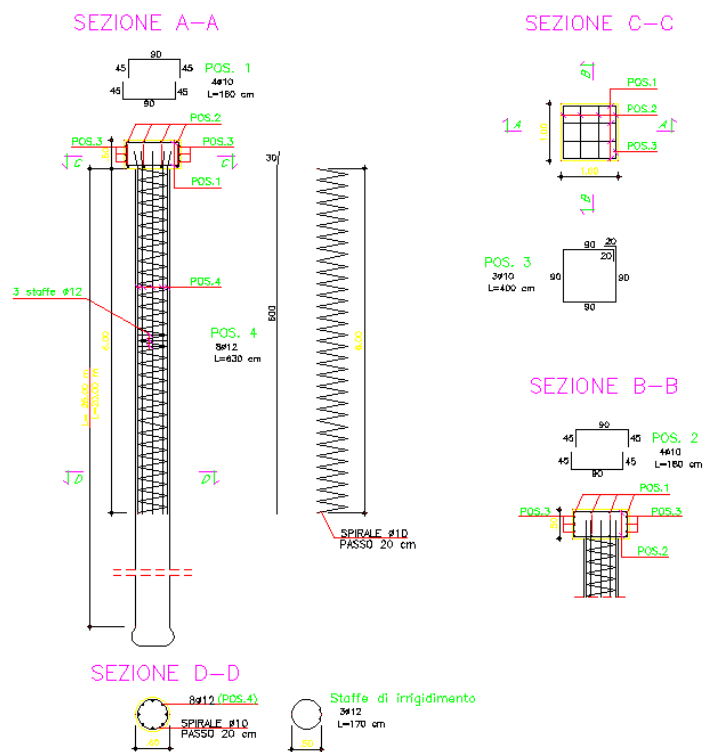
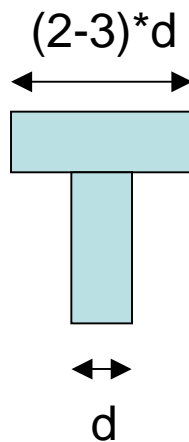
## Pali trivellati ad elica continua

- resistenza e rigidezza elevate (armatura)
- discreto controllo del prodotto
- trivellazione e getto contribuiscono ad addensare il terreno circostante



# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

**DADO IN TESTA (pile cap)**



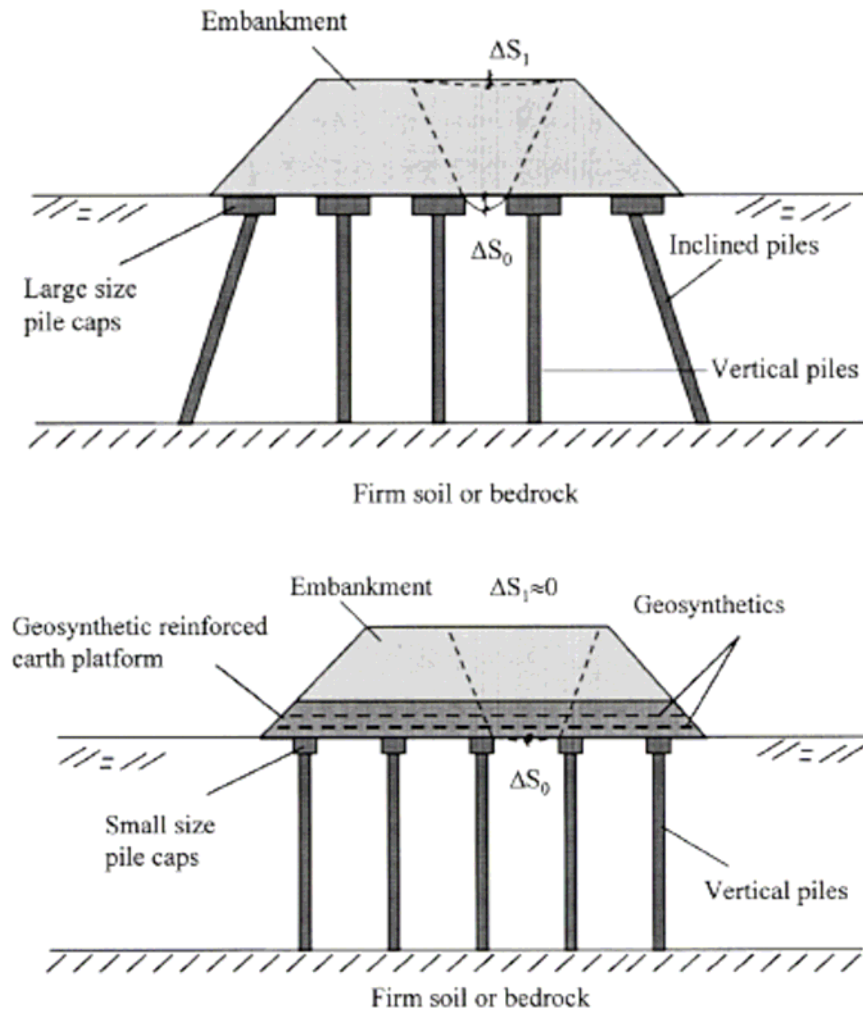
Tangenziale di Forlì (2006)



Lord Delaware bridge, Virginia - U.S.A.(Hoppe e Hite, 2006)

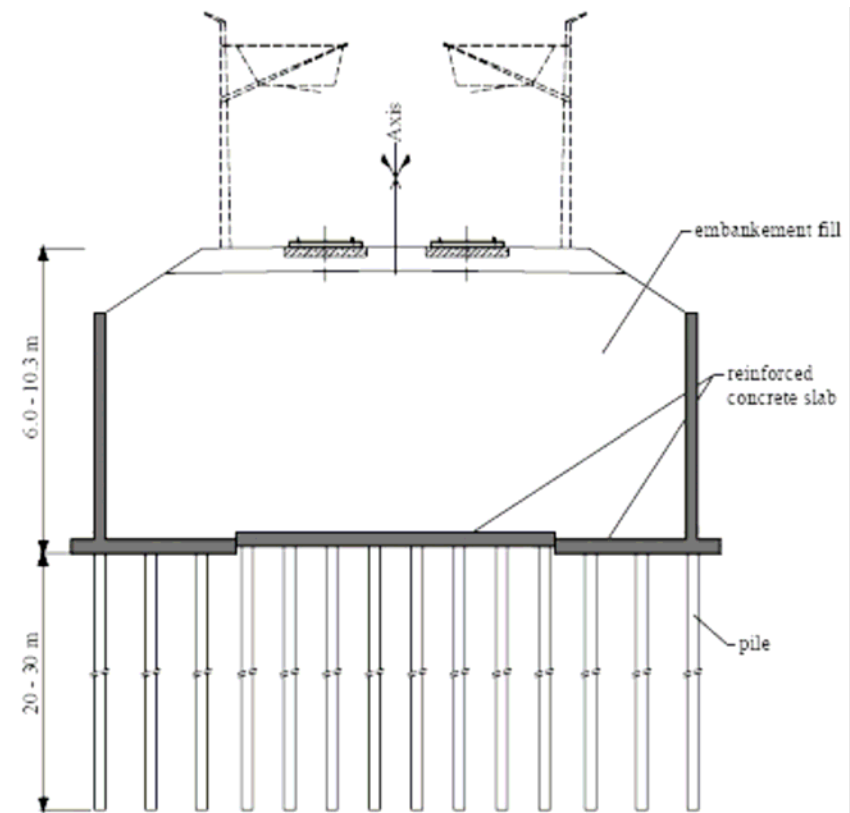
# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## Pali battuti



(Han & Gabr, 2002)

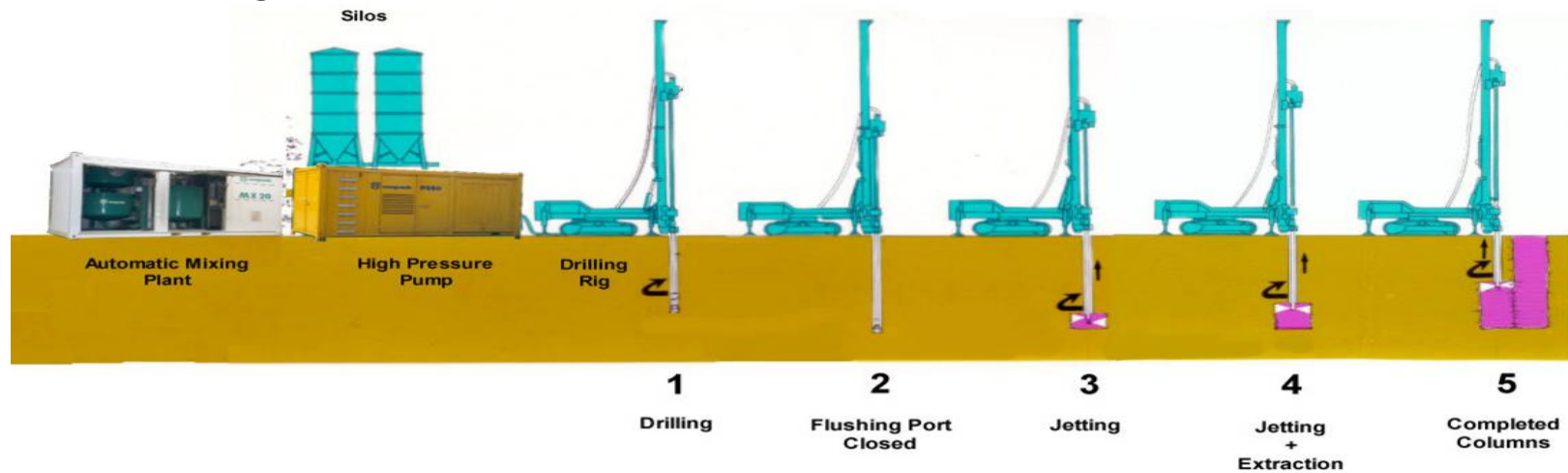
## Pali ad elica continua



(Raithel et al. 2008)

# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

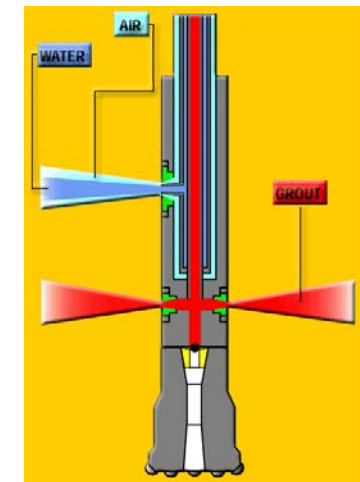
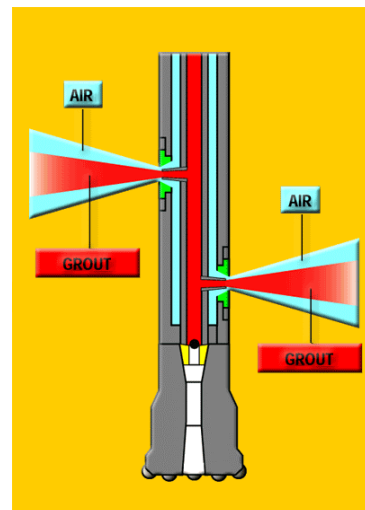
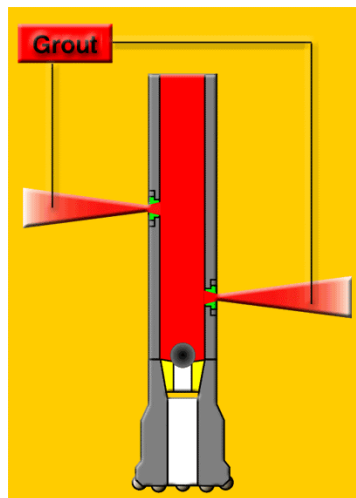
## Jet Grouting



**Monofluido:** disgregazione e cementazione mediante boiaccia di cemento.

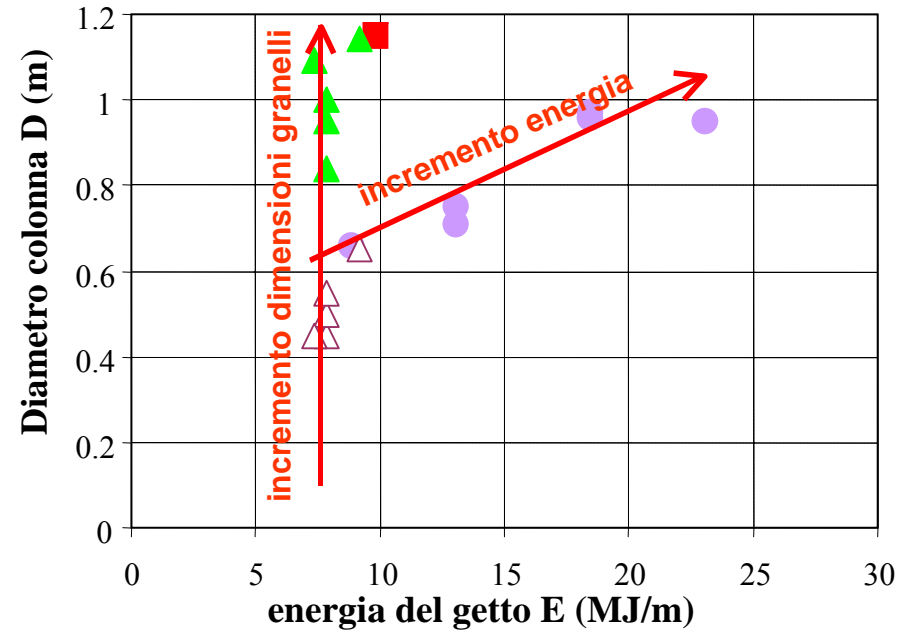
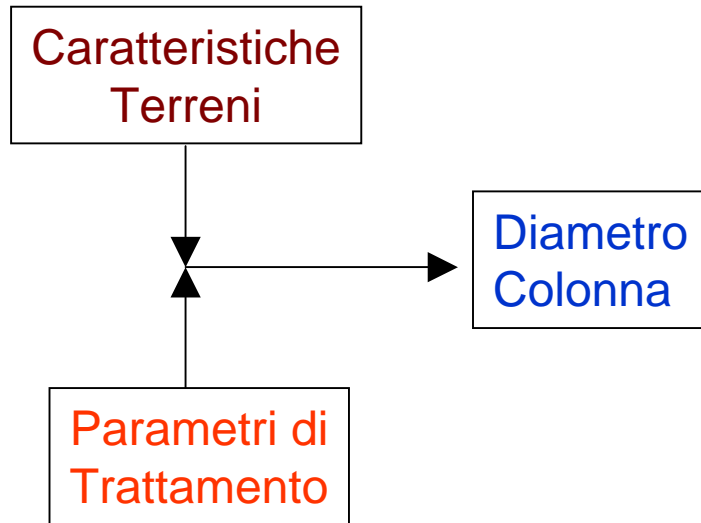
**Bifluido:** disgregazione e cementazione mediante aria e boiaccia.

**Trifluido:** disgregazione mediante acqua e aria + cementazione mediante boiaccia.



# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## Jet Grouting



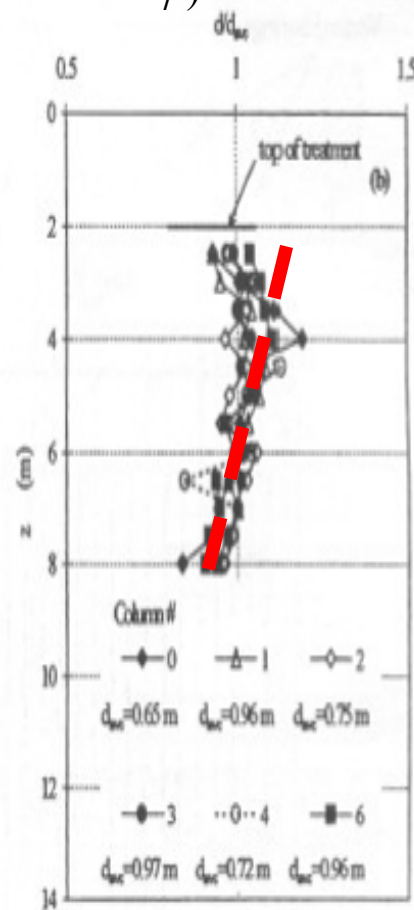
Terreno	Diametro Colonna (m)			Resistenza $\sigma_c$ (MPa)	Rigidezza E (MPa)
	Sistema Monofluido	Sistema Bifluido	Sistema Trifluido		
Ghiaia	0.7-1.1	1.0-1.5	2.0-2.4	5-30	2500-15000
Sabbia ghiaiosa	0.5-1	0.7-1.5	1.5-2.0	5-20	2500-10000
Sabbia limosa	0.5-0.9	0.7-1.3	1.2-1.6	5-15	2500-7500

# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## Jet Grouting

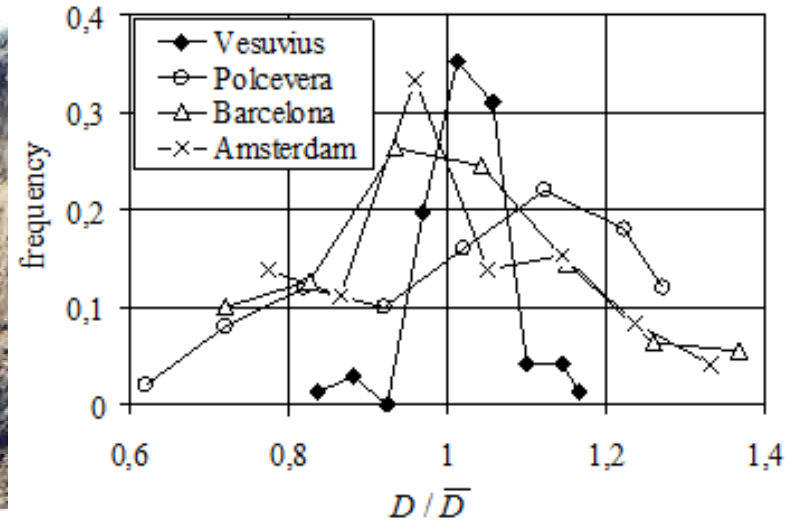
*Variazione sistematica*

$$D = 0.54 * (c' + \sigma' \tan \varphi)^{-0.39} * J_s^{0.66}$$



(Croce, Flora & Modoni, 2001)

*Variazione casuale*

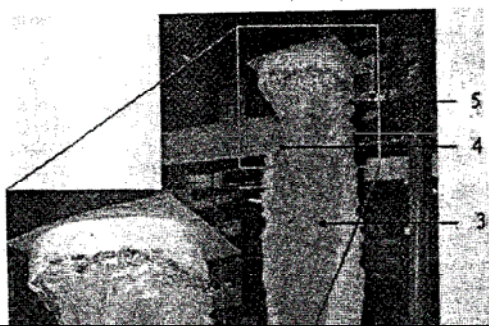


Case study	Soil	Reference	Nr. of columns	Nr. of data	K.S. test results
Vesuvius	silty sand	Croce and Flora (1998)	6	71	0.09 (0.13)
Polcevera	sandy gravel	Croce et al., (1994)	4	50	0.12 (0.15)
Barcelona	sandy clay	Arroyo et al., (2007)	37	97	0.06 (0.11)
Amsterdam	sandy clay	Langhorst et al., (2007)	4	72	0.10 (0.13)

(Croce & Modoni, 2002)

# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

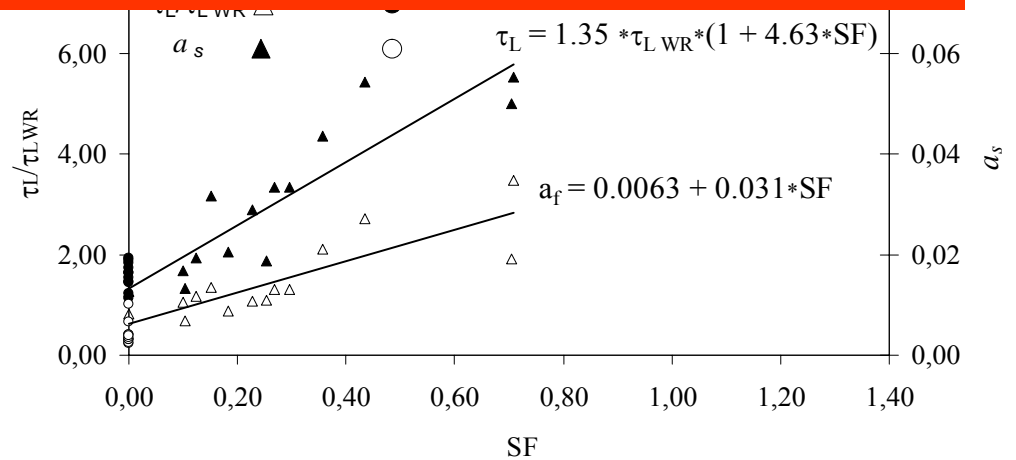
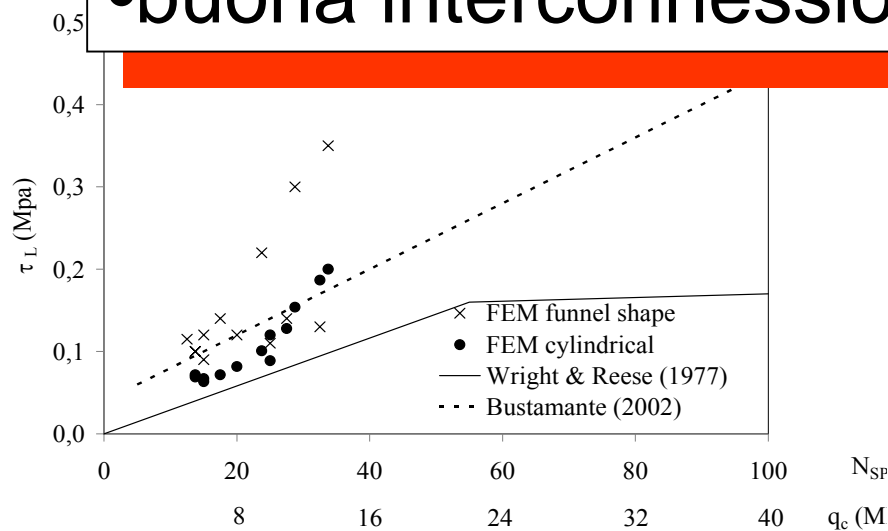
## Jet Grouting



## Evidenze sperimentali



- resistenza e rigidezza mediamente elevate
- controllo del prodotto non eccellente
- buona interconnessione tra colonne e terreno



Modoni & Bzòwka (2010)

# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## Deep Mixing

miscelazione meccanica con calce e/o cemento

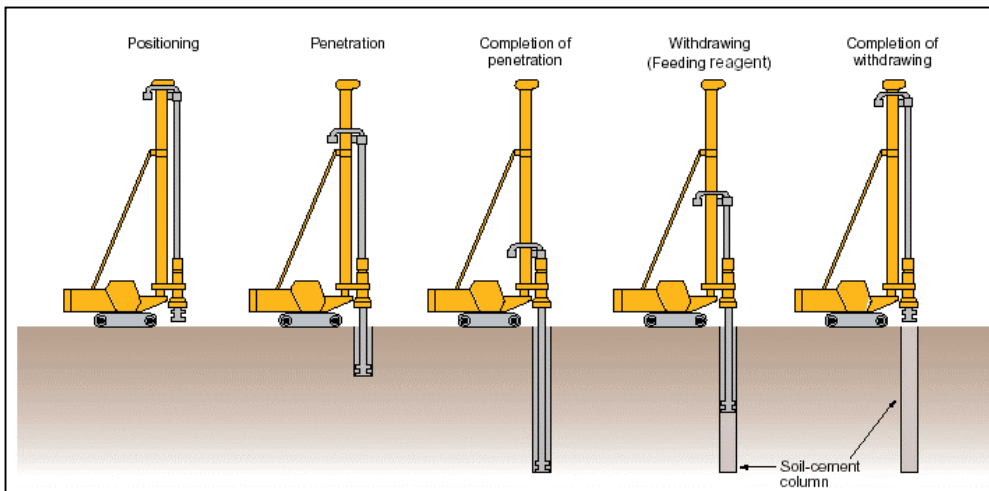
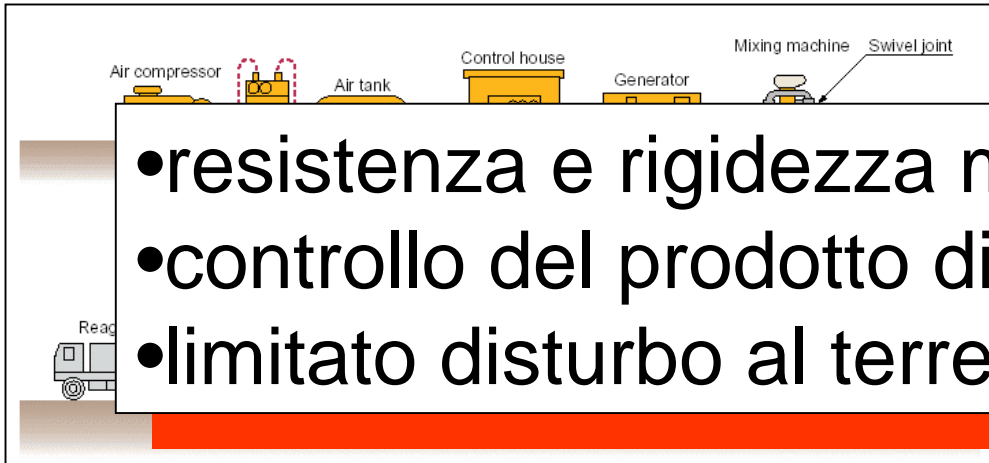
dry mixing  $w_{nat} > 20\%$

wet mixing

$\Phi = 400 - 800 \text{ mm}$

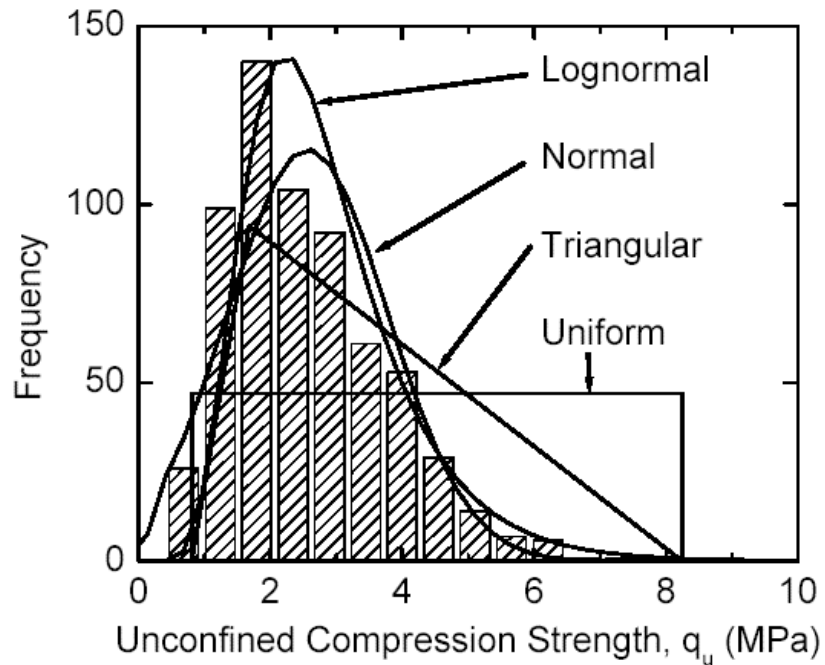
$L_{max} = 15 \text{ m}$

- resistenza e rigidezza mediamente elevate
- controllo del prodotto discreto
- limitato disturbo al terreno

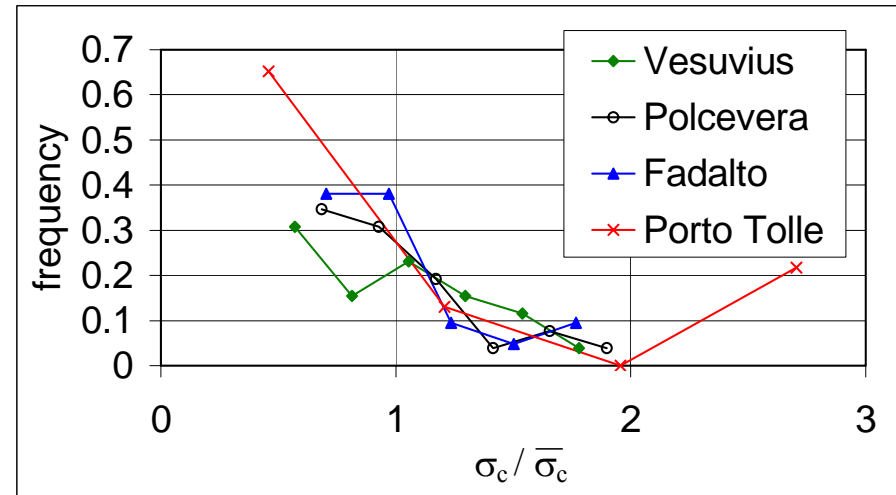


# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE COLONNE CONSOLIDATE



**Deep Mixing**  
(Filz e Navin, 2006)



Case study	Number of data	$\bar{\sigma}_c$ (MPa)	CV( $\sigma_c$ )
Vesuvius	26	8.14	0.39
Polcevera	26	10.49	0.36
Fadalto	30	24.03	0.77
Porto Tolle	23	6.82	1.00

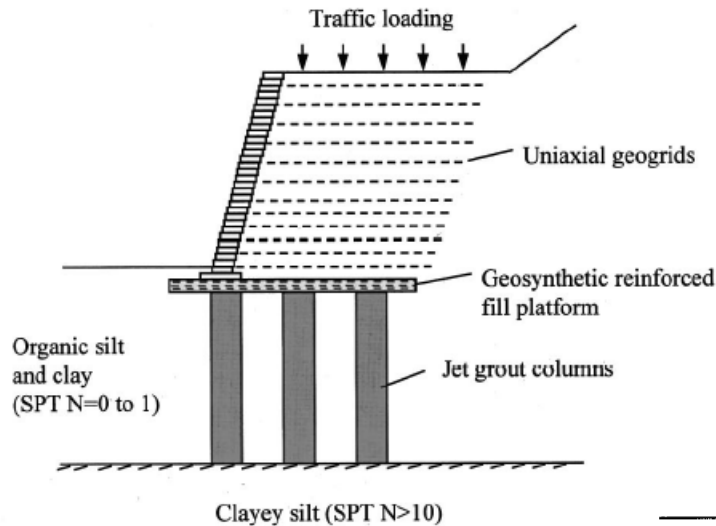
**Jet Grouting**  
(Croce e Modoni, 2001)

Modulo di Rigidezza:

**Deep Mixing  $E=300 \cdot q_u$**

**Jet Grouting  $E=500 \cdot q_u$**

# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI



(Alzamora et al. , 2000)

DEEP MIXING  
Cina Meridionale

$\Phi=500$  mm

Interasse = 1100 mm

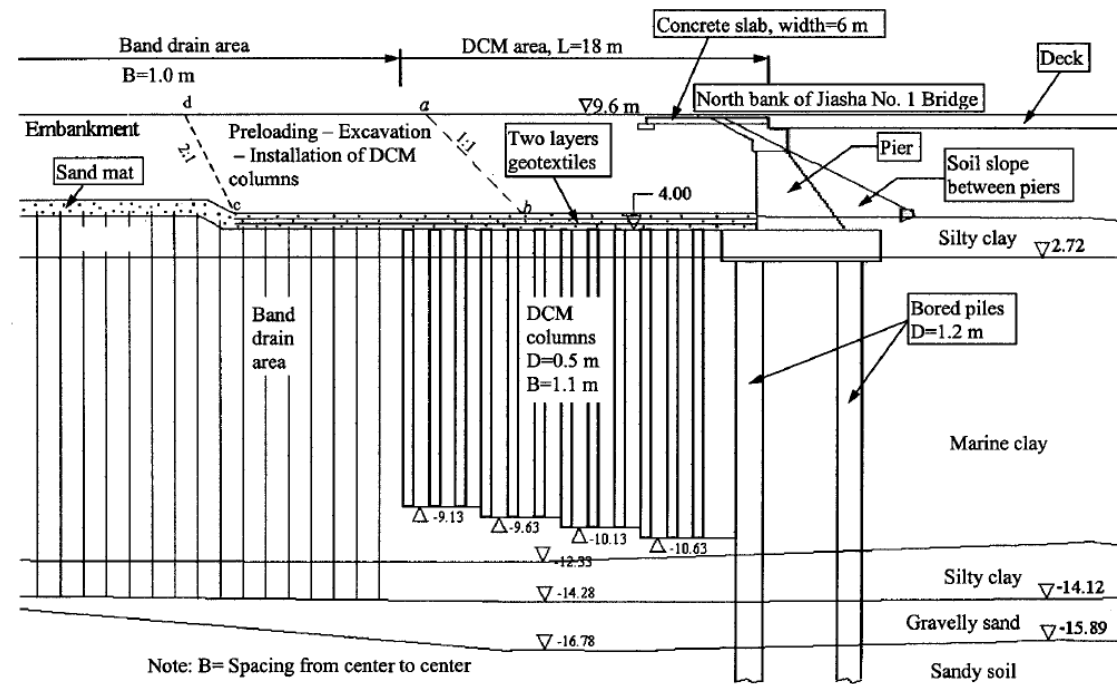
L= 20 m

JET GROUTING  
San Paolo del Brasile

$\Phi =120$  cm

Interasse = 300 cm

L= 9 m



(Lin e Wong, 1999)

# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

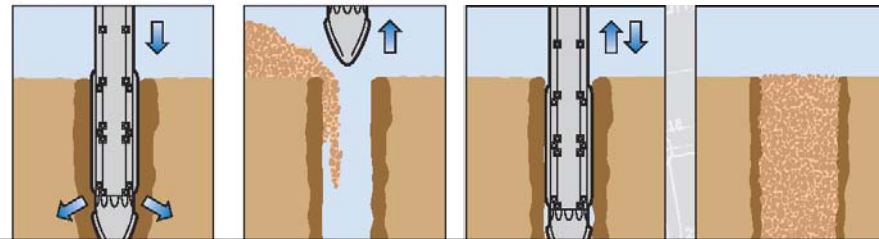
## STONE COLUMNS

$\Phi = 750 - 1100 \text{ mm}$

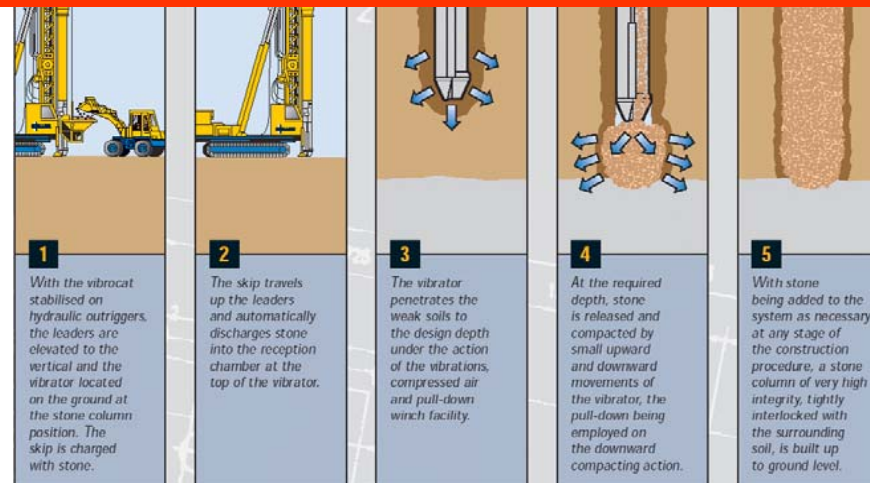
$L_{\max} = 25 \text{ m}$



Construction Sequence - Top Feed



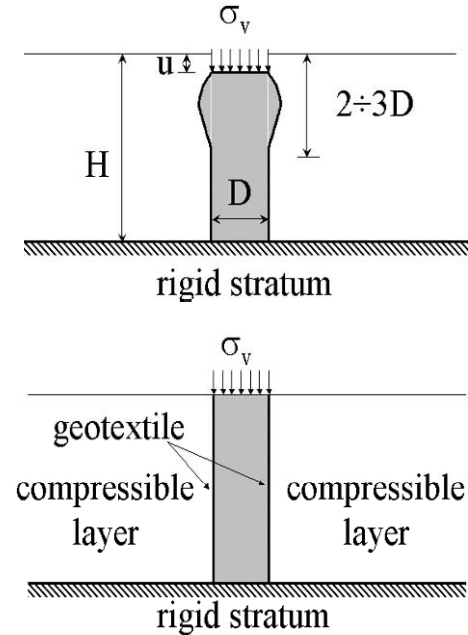
- resistenza e rigidità non elevate
- controllo del prodotto discreto
- compattamento del terreno circostante
- capacità di drenaggio



**BOTTOM  
FEED**

# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## COLONNE DI GHIAIA/SABBIA RINFORZATE (GEOTEXTILE ENCASED COLUMNS - GEC)

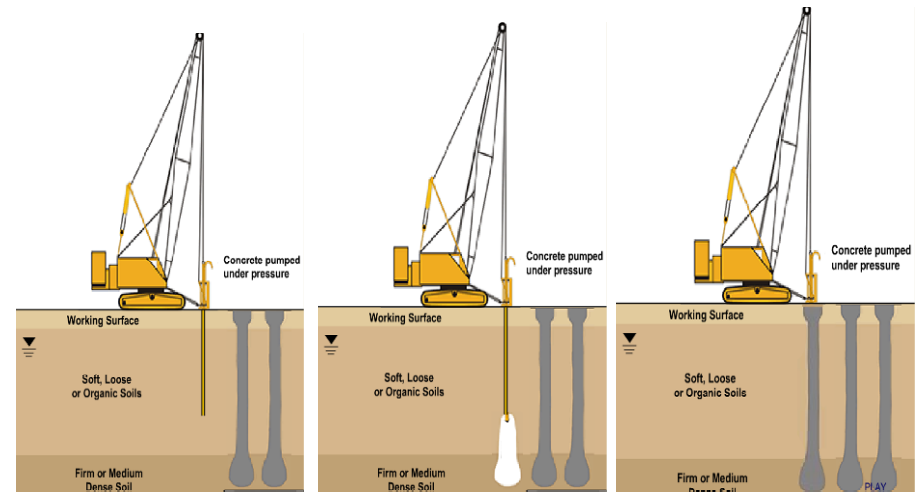


Effetti:

- Confinamento
- Filtro

(Di Prisco et al. 2006)

## VIBRO CONCRETE COLUMNS (VCC)



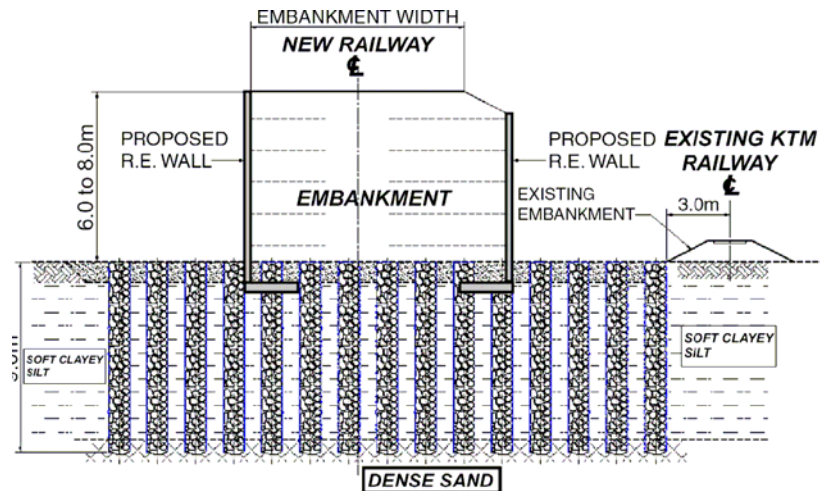
Effetti:

- Aumento della rigidezza
- Maggiori dimensioni alla base (bulbo)

(Bell et al., 1994)

# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## STONE COLUMNS

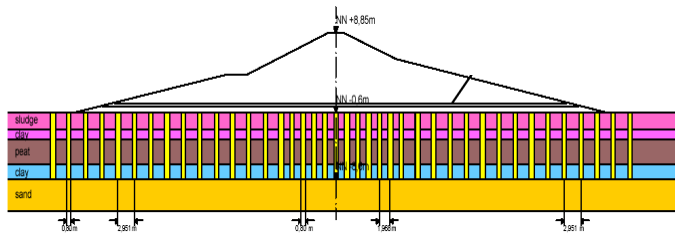


Raju e Hoffmann (1996)  
Malesia Settentrionale

$\Phi = 100 \text{ cm}$

$L = 9 \text{ m}$

## GEOTEXTILE ENCASED COLUMNS

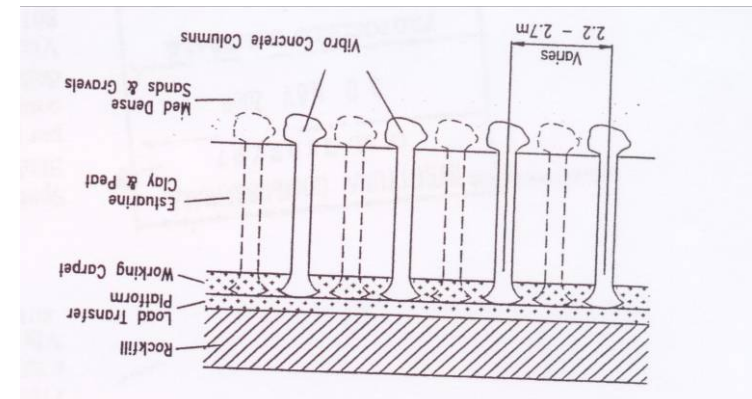


(Raithel et al. 2002) - Amburgo

$\Phi = 80 \text{ cm}$

$L = 8 - 14 \text{ m}$

## VIBRO CONCRETE COLUMNS

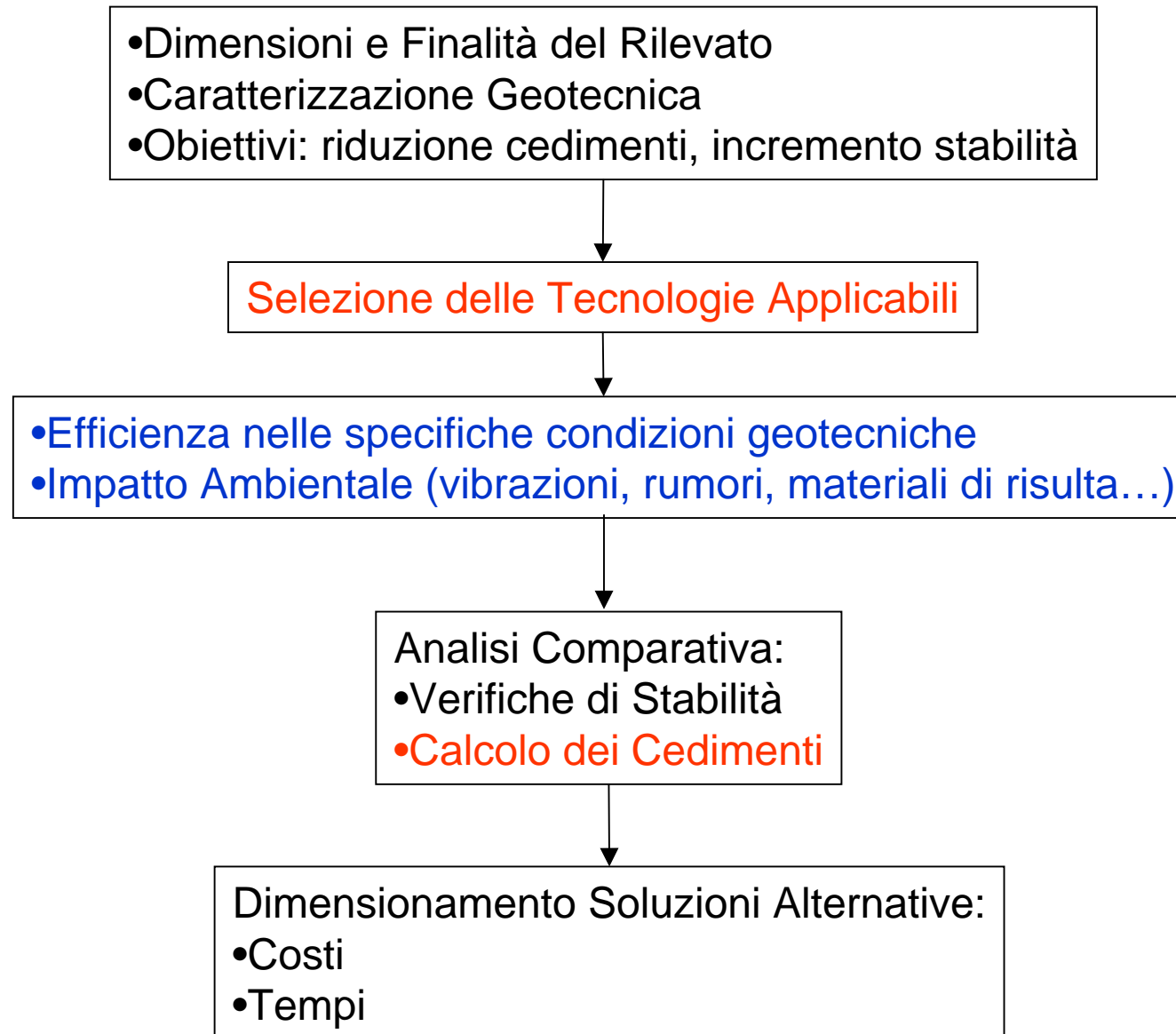


(Bell et al., 1994) - Gran Bretagna

$\Phi = 40 \text{ cm} - L = 6 \text{ m}$

# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

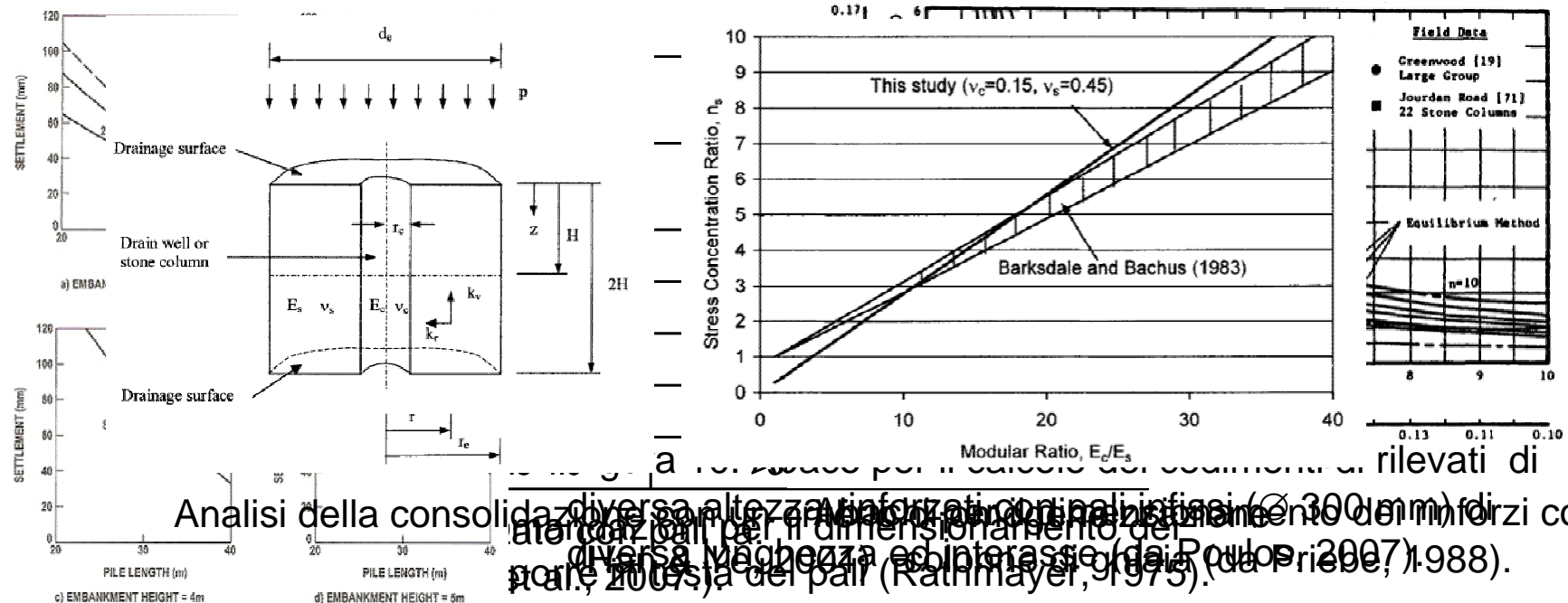
## PROGETTAZIONE



# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## METODI PER IL DIMENSIONAMENTO E LA VERIFICA

- **Empirici** (es. Rathmayer, 1975)
- **Criteri di omogeneizzazione** (es. Han & Ye, 2001; Balaam e Booker, 1981; Schweiger e Pande, 1986; Canetta e Nova, 1989)
- **Metodi analitici** (es. Priebe, 1988; Chen et al., 2007)
- **Metodi numerici FEM-BEM** (es. Poulos, 2007; Raithel e Kempfert, 2000; Plomteux e Spaulding, 2003)



# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## ELEMENTI COLONNARI

- pali battuti
- pali ad elica continua (CFA)
- jet grouting
- deep mixing
- colonne di ghiaia-sabbia (*stone-sand columns*)
- colonne rinforzate con geosintetici (*geotextile encased columns - GEC*)
- .....

## Caratteristiche delle Colonne (dimensioni – materiali):

### a) PALI

#### Calcestruzzo e/o Acciaio

- Pali Battuti
- Pali ad Elica Continua (CFA)

### b) COLONNE CONSOLIDATE

#### Terreno + Cemento/Calce (*soilcrete*)

- Jet Grouting
- Deep Mixing

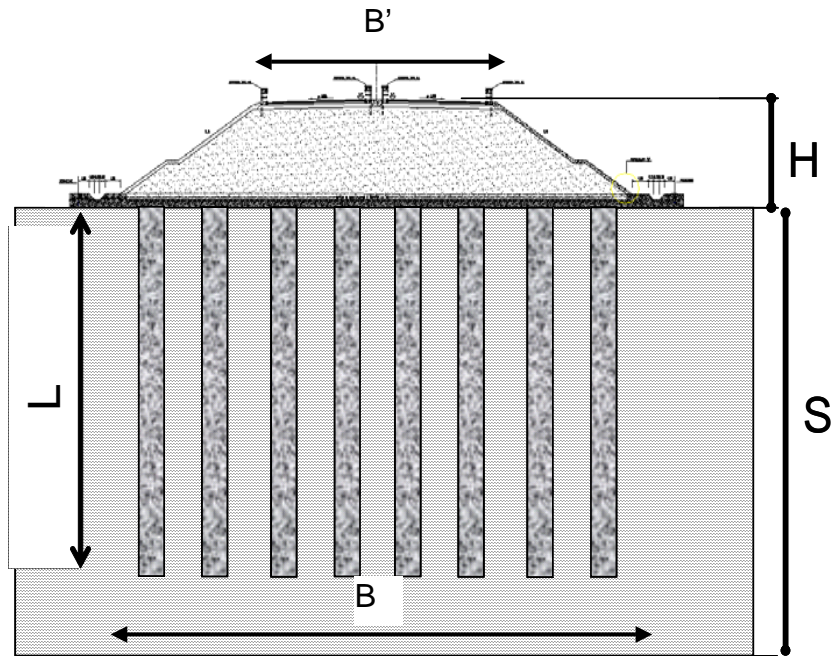
### c) STONE COLUMNS

#### Ghiaia e/o Sabbia

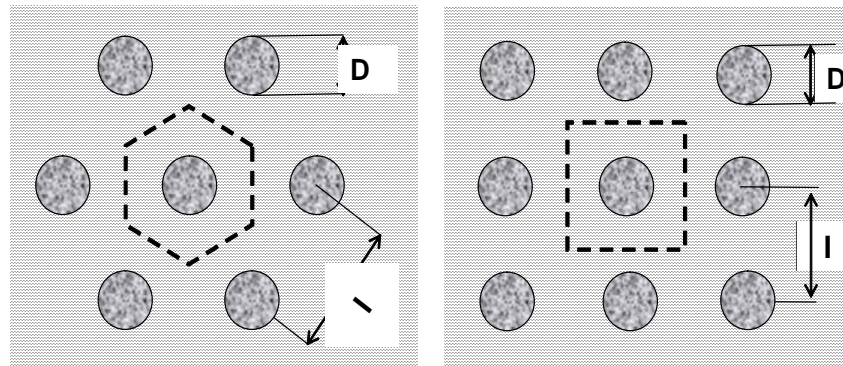
- Colonne di Ghiaia-Sabbia
- Colonne Rinforzate (con geosintetici)

# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## UN ESEMPIO PROGETTUALE



(a)



(b)

$$D = 0.60 \text{ m}$$

$H$

$S$

$I/D$

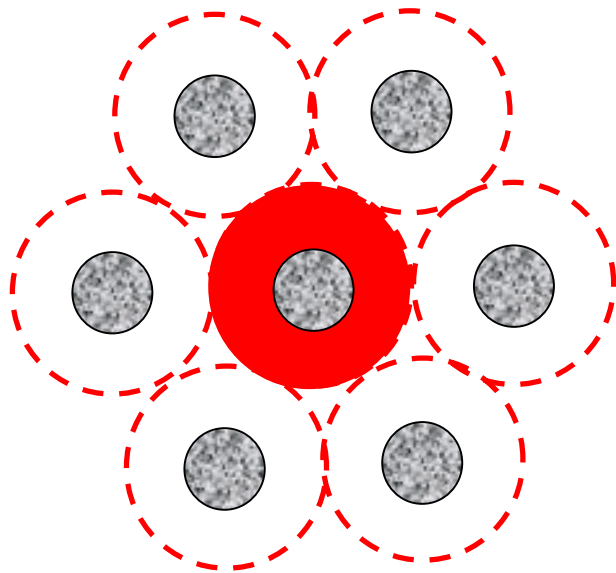
Proprietà delle  
colonne

**Variabili**

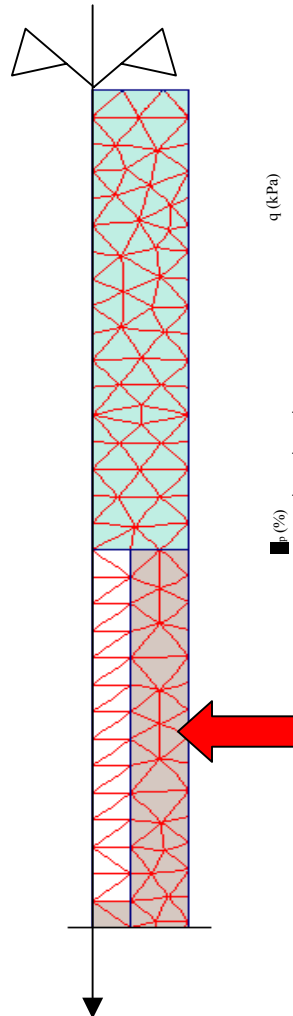
# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## UN ESEMPIO PROGETTUALE

Schema  
assialsimmetrico

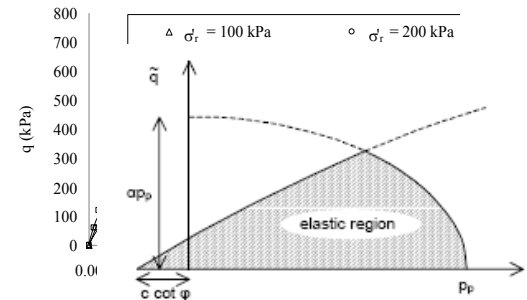


Calcolo FEM  
(PLAXIS vers. 8.2)

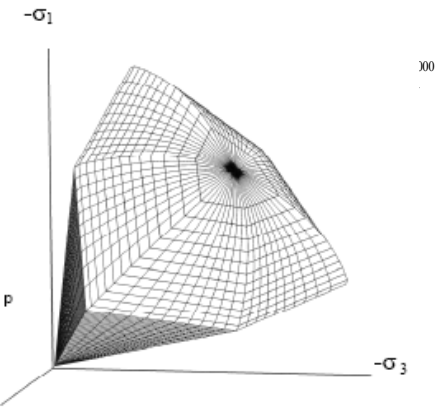


Modelli costitutivi  
Hardening Soil

Prove triassiali



Prova edometrica

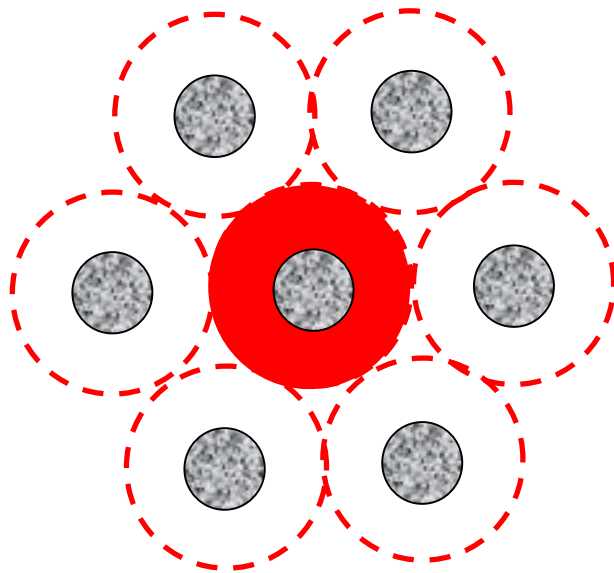


$\gamma_{sat}$ ( $kN/m^3$ )	$\gamma_{unsat}$ ( $kN/m^3$ )	$c'$ ( $kPa$ )	$\phi'$ ( $^\circ$ )	$\psi$ ( $^\circ$ )	$K$ (m/s)
21	16	30	19	1	$6.15 \cdot 10^{-11}$
$E_{50}^{ref}$ ( $kPa$ )	$E_{ed}^{ref}$ ( $kPa$ )	$E_{ur}^{ref}$ ( $kPa$ )	$m$	$v_{ur}$	$p_{ref}$ ( $kPa$ )
9796	5578	30080	0.85	0.3	100

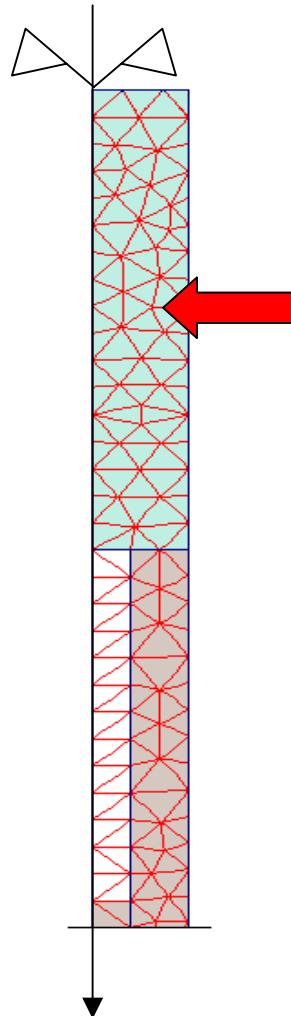
# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## UN ESEMPIO PROGETTUALE

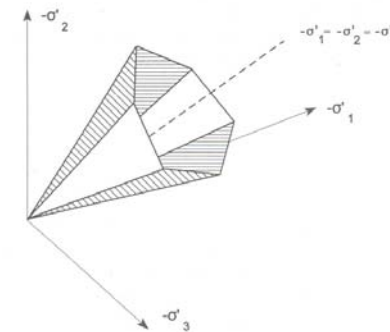
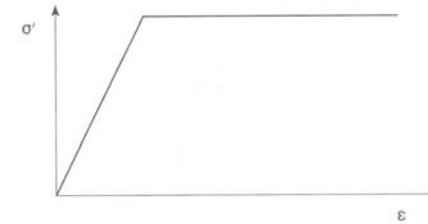
Schema  
assialsimmetrico



Calcolo FEM  
(PLAXIS)



Modelli costitutivi  
*Mohr - Coulomb*



Rilevato: MOHR COULOMB

$E=100 \text{ MPa}$        $\nu = 0.2$

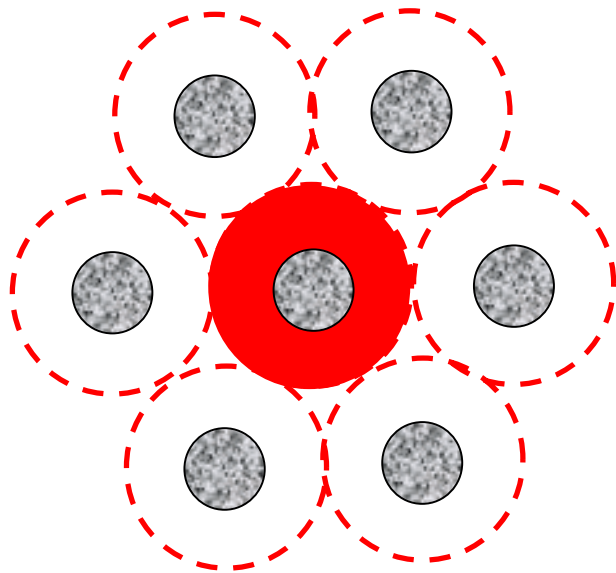
$\gamma_{\text{nat}} = 19.5 \text{ kN/m}^3$

$\phi' = 42^\circ$      $c' = 0$      $\psi = 12^\circ$

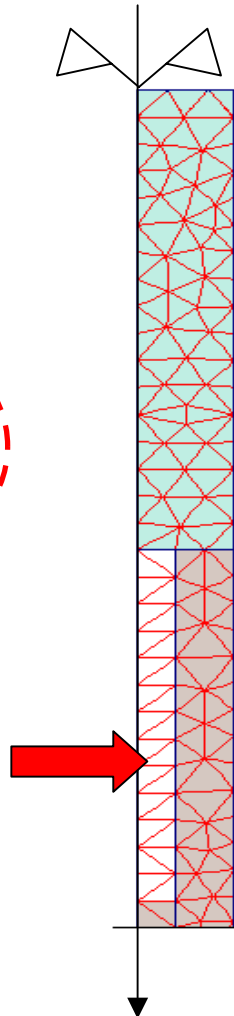
# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## UN ESEMPIO PROGETTUALE

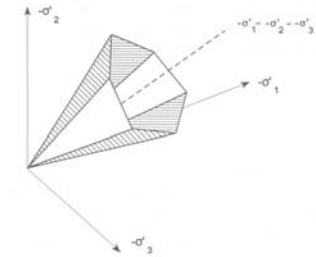
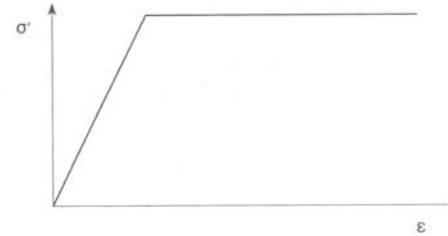
Schema  
assialsimmetrico



Calcolo FEM  
(PLAXIS)



Modelli costitutivi  
Mohr - Coulomb

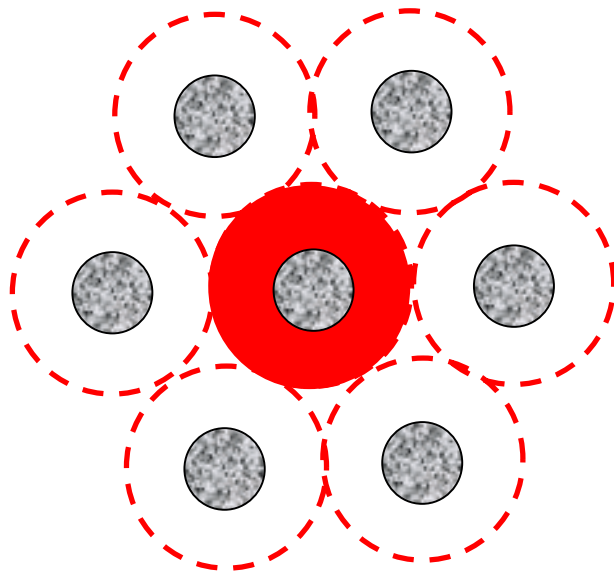


Colonne	A calcestruzzo	B Terreno cementato	C Ghiaia
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	25	20	20
E (MPa)	$1.5 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^2$
$\nu$	0.2	0.2	0.15
c (kPa)	$1.25 \cdot 10^4$	1500	0
$\phi$ (°)	0	0	42
$\psi$ (°)	0	0	0
K (m/s)	-	-	0.01

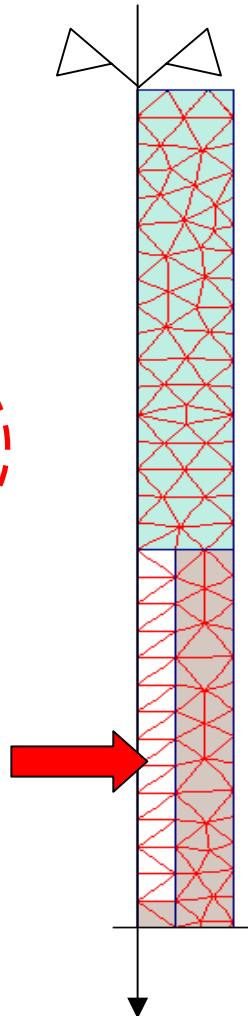
# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## UN ESEMPIO PROGETTUALE

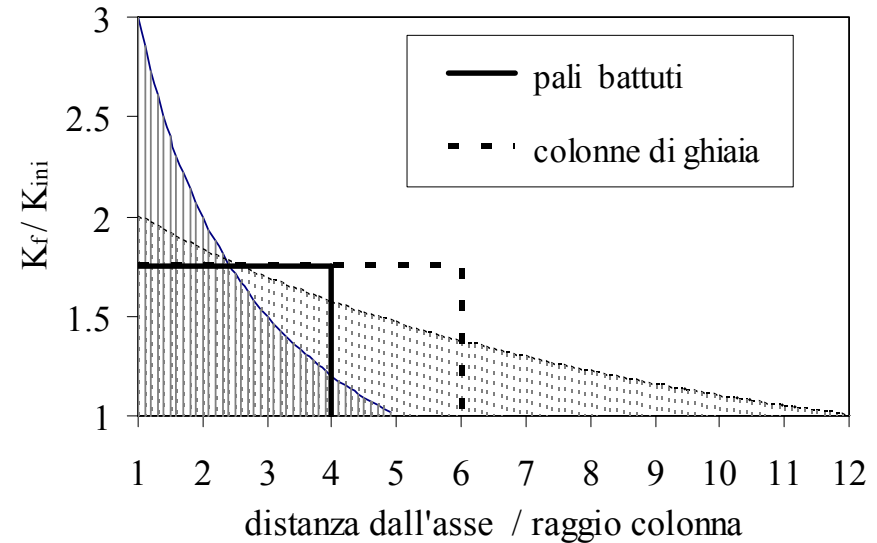
**Schema  
assialsimmetrico**



**Calcolo FEM  
(PLAXIS)**



**Modelli costitutivi  
Interfaccia**



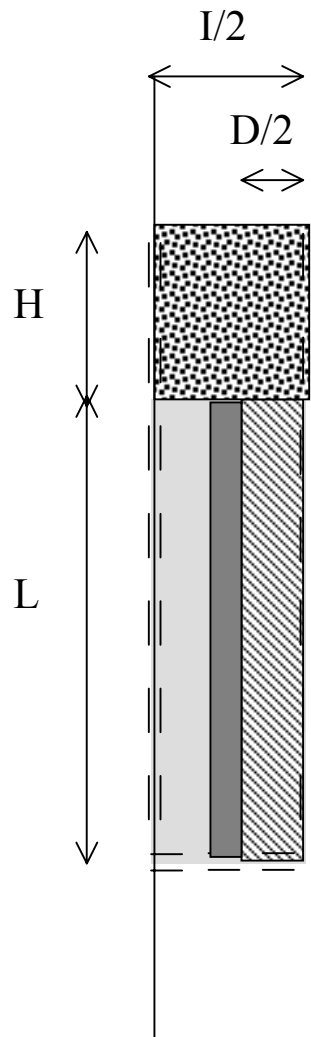
**Pali battuti** - (Van Weele, 1988; Peiffer & Van Impe, 1993; Viggiani, 1993)

**Colonne di terreno cementato**  
- (Modoni & Bzòwka, 2010)

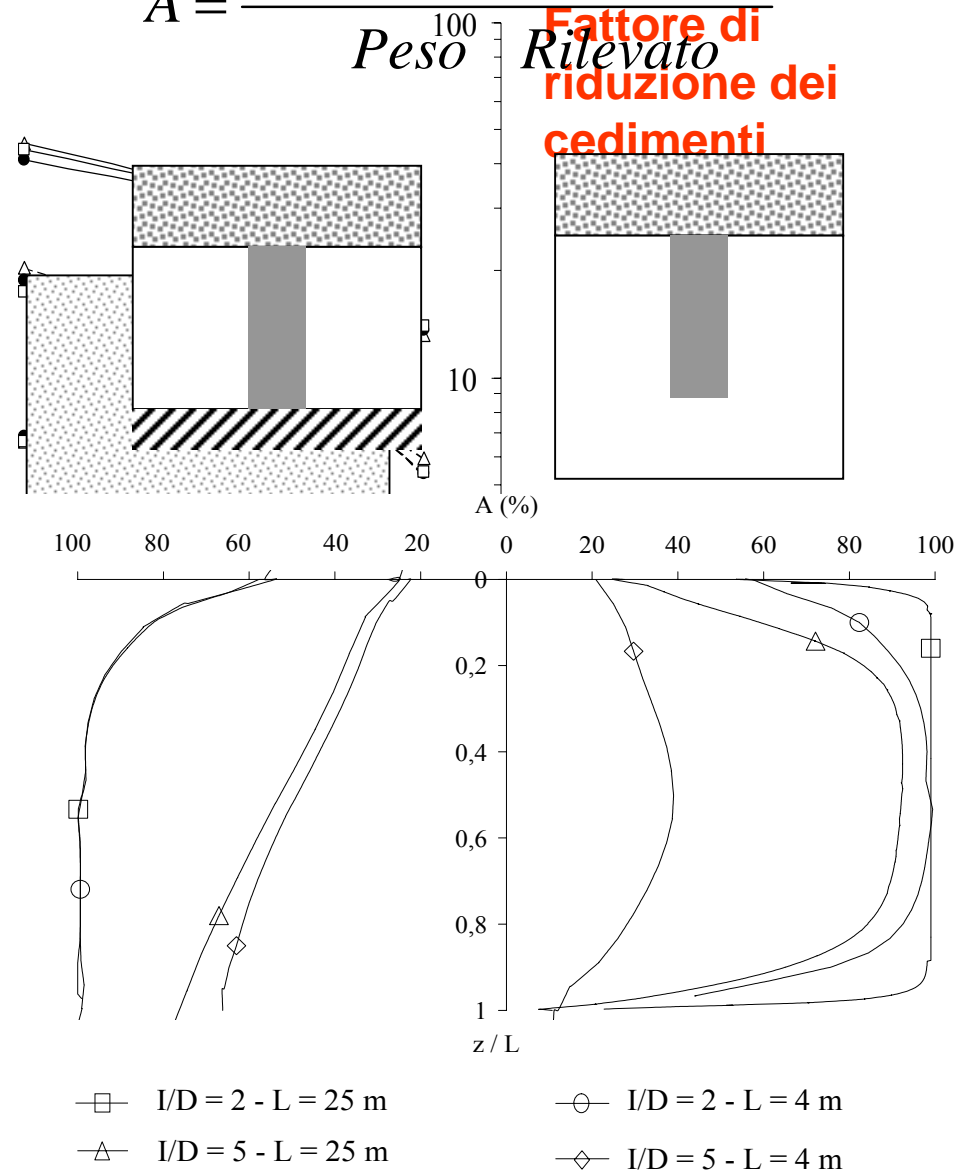
**Colonne di ghiaia** - Kirsch (2006)

# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## UN ESEMPIO PROGETTUALE

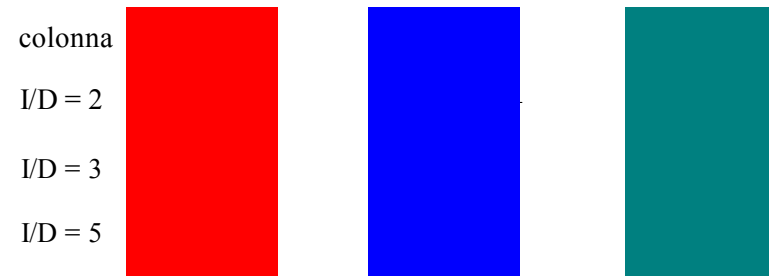
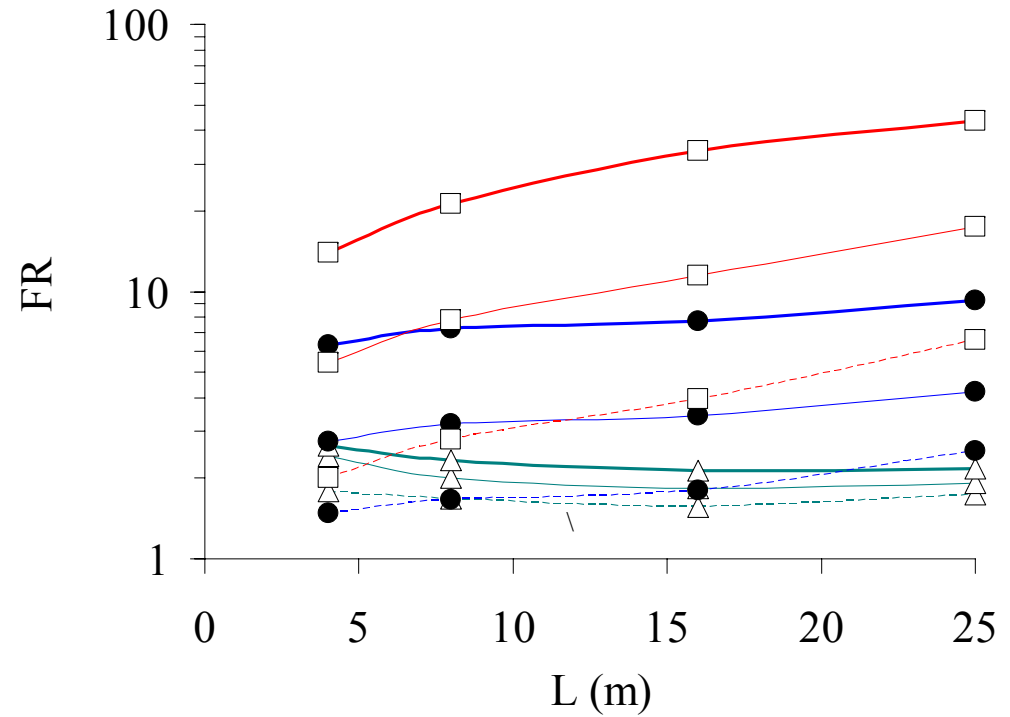
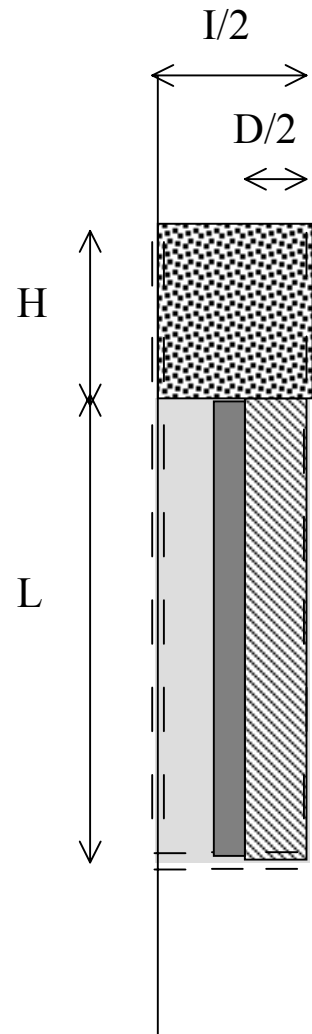


$$A = \frac{\text{Carico assiale colonna}}{\text{Peso}^{100}} \text{ Fattore di riduzione dei cedimenti}$$



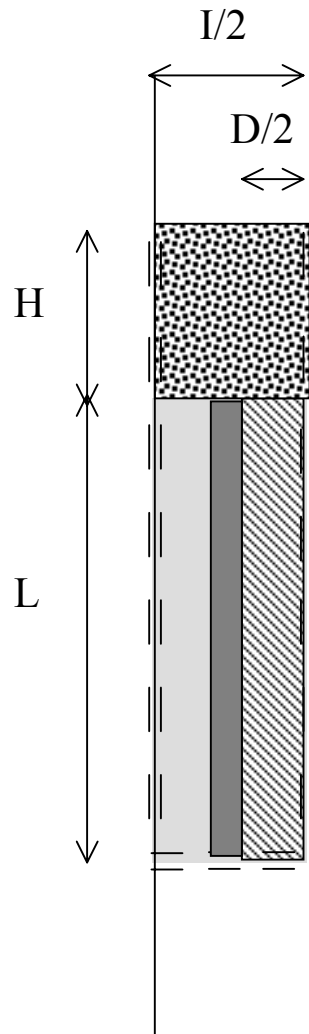
# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## UN ESEMPIO PROGETTUALE

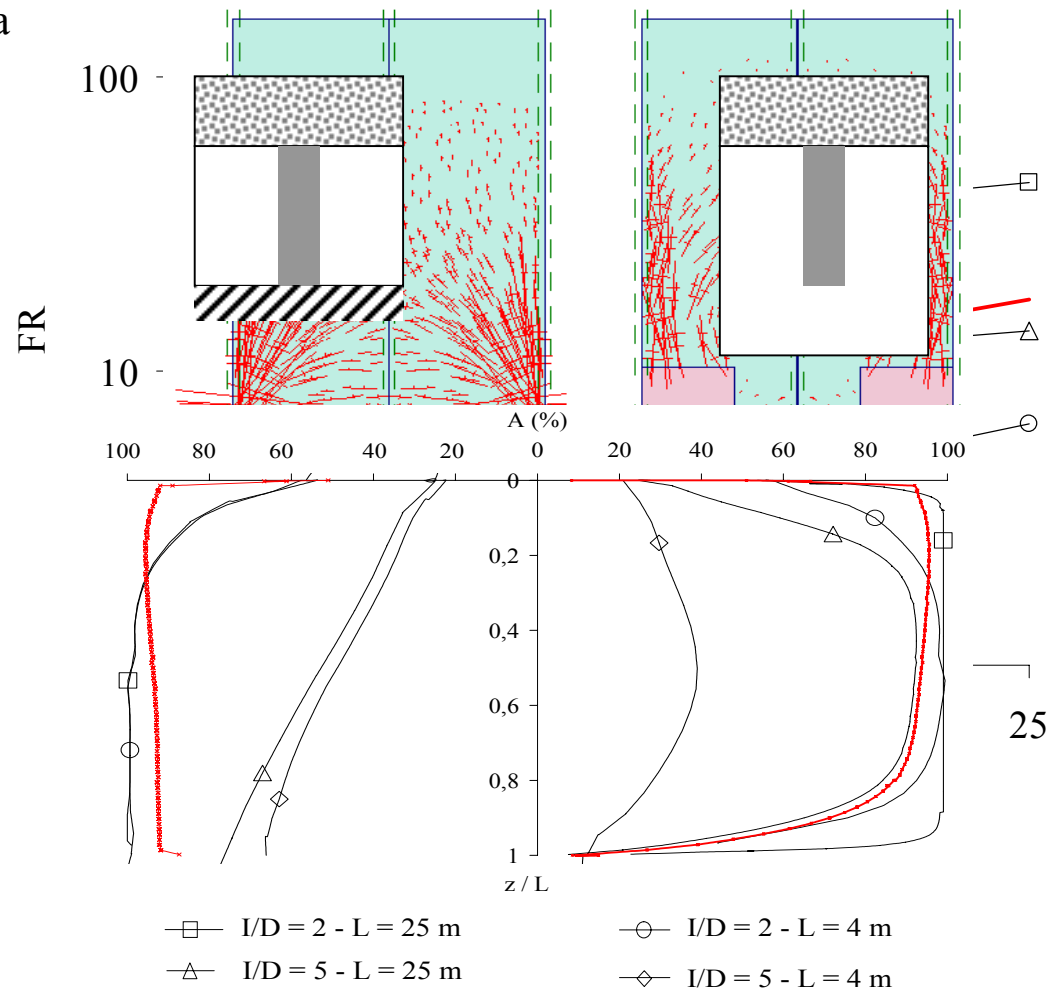


# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## UN ESEMPIO PROGETTUALE



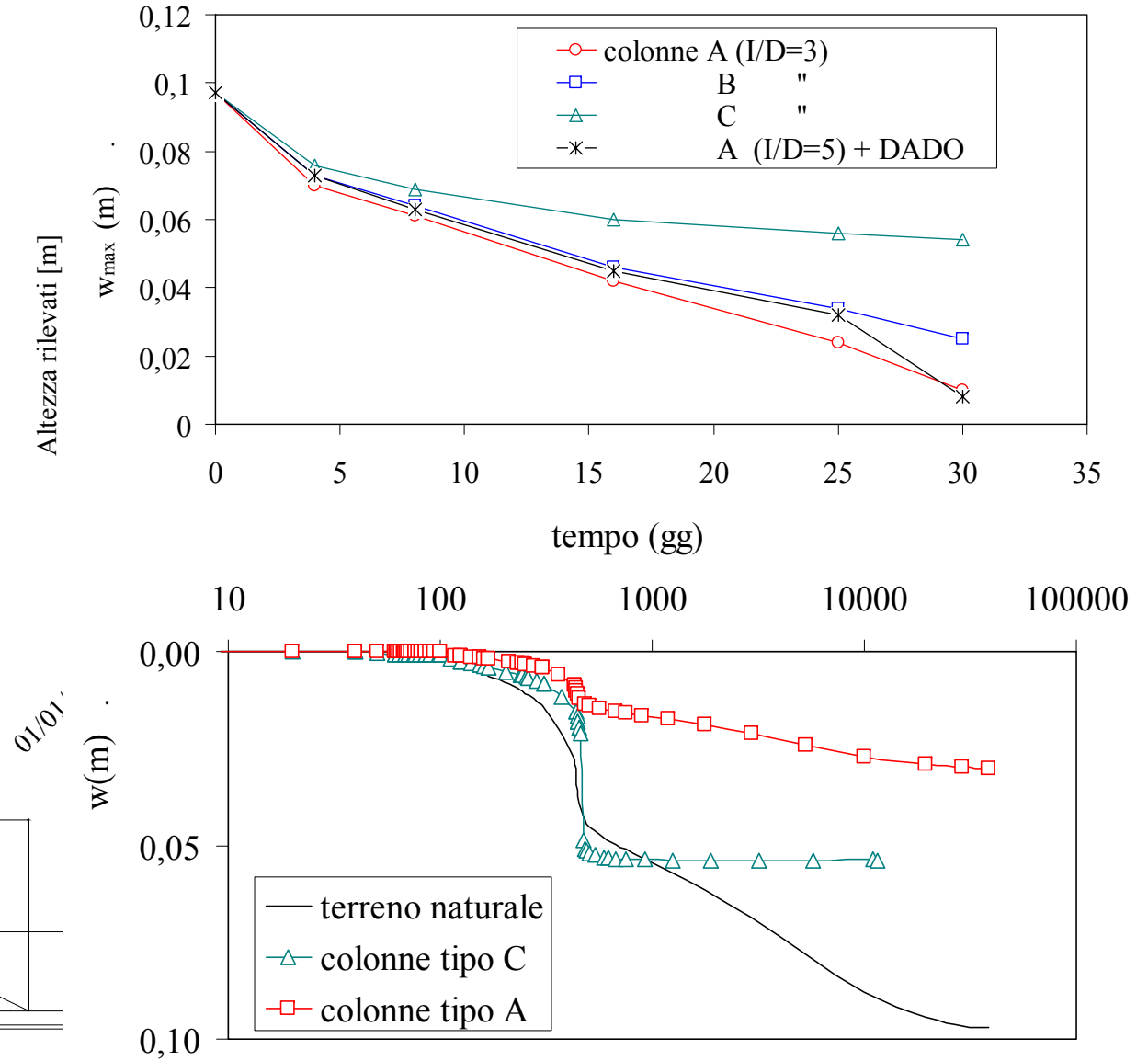
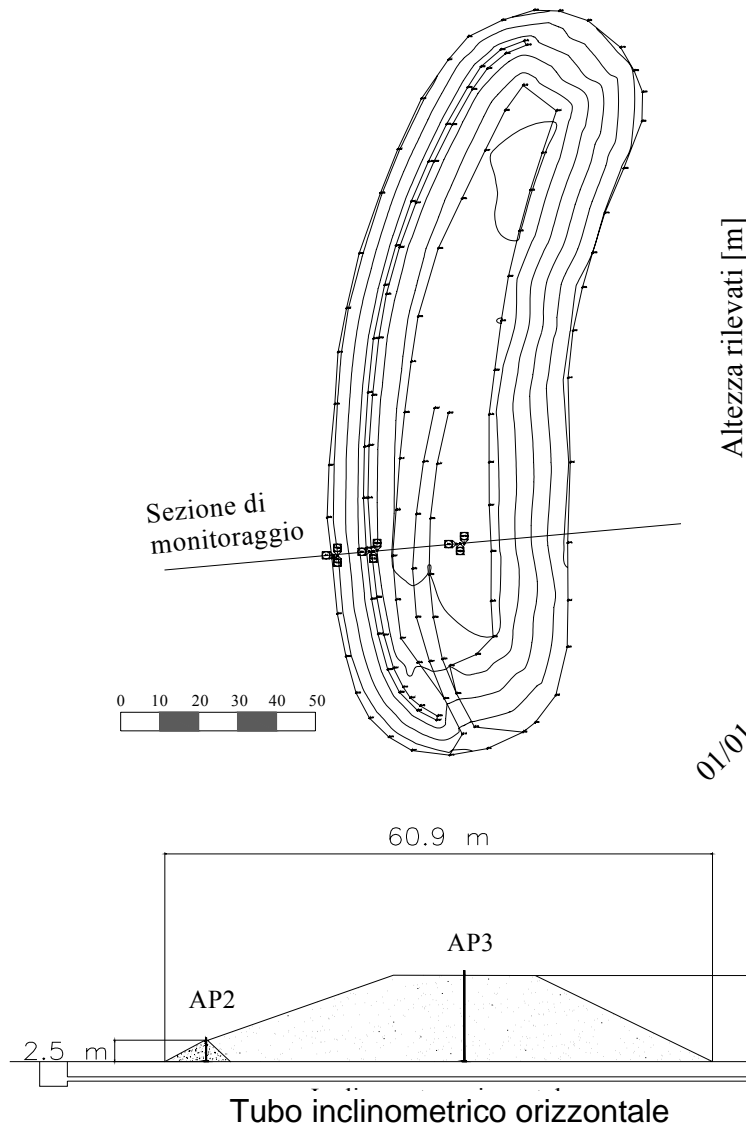
$$A = \frac{\text{Carico assiale colonna}}{\text{Peso Rilevato}}$$



**I/D = 5 - L = 25 m con dado in testa**

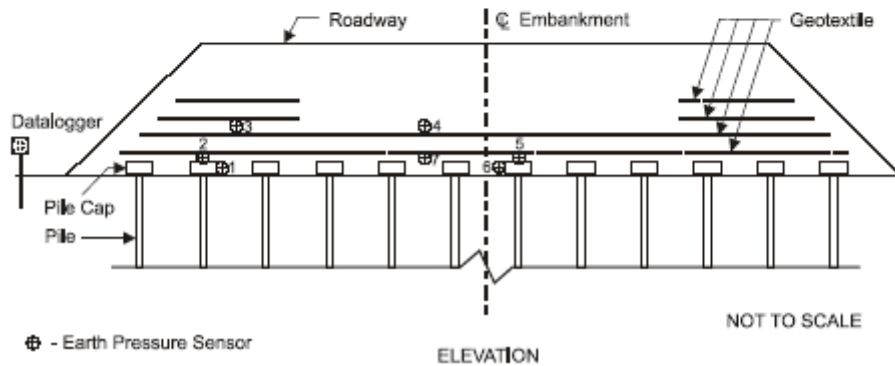
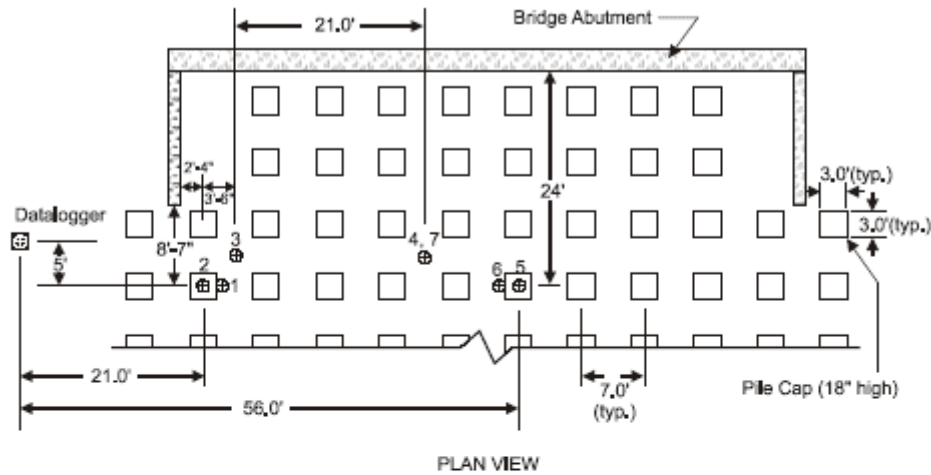
# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## UN ESEMPIO PROGETTUALE



# RINFORZO MEDIANTE INSERIMENTO DI ELEMENTI COLONNARI

## MONITORAGGIO



(Hoppe e Hite, 2006)



Celle di Pressione



Assestimetri

# CONCLUSIONI

1. Il consolidamento delle fondazioni di rilevati può essere attuato con diverse tecniche, raggruppabili sinteticamente nelle seguenti tre categorie :
  - Colonne di calcestruzzo (Pali)
  - Colonne di terreno cementato
  - Colonne di ghiaia
3. La modellazione numerica del comportamento tenso-deformativo ha evidenziato l'influenza di alcuni importanti fattori :
  - lunghezza (*pali attestati su sottofondo rigido o sospesi*), Interasse/Diametro
  - caratteristiche meccaniche dei materiali (colonne, terreno, rilevato)
  - capacità di drenaggio (*stone columns*)
4. Un contributo significativo alla riduzione dei cedimenti è dato dall'inserimento di un dado in testa ai pali. Effetti analoghi possono essere ottenuti mediante rinforzo del rilevato (compattamento, geosintetici, piastra di base, stabilizzazione a calce etc.).
5. E' necessario sviluppare la ricerca sperimentale attraverso il monitoraggio di opere in vera grandezza.