

# **PALI DI FONDAZIONE E PALIFICATE**

**ing. Nunziante Squeglia**

## **7. ANALISI DELLE FONDAZIONI IN CONDIZIONI DI ESERCIZIO**

## ANALISI DEL PALO SINGOLO

### Palo soggetto a forze verticali

- stima attraverso relazioni empiriche
- metodo delle curve di trasferimento
- metodo analitico approssimato
- metodo BEM lineare
- metodo BEM non lineare

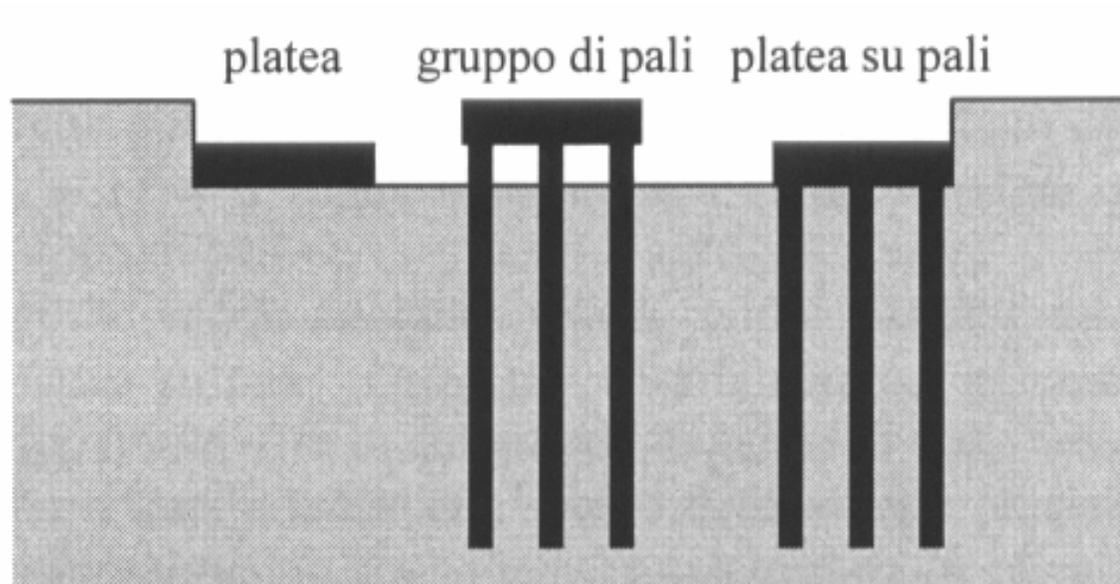
### Palo soggetto a sforzi orizzontali

- metodo di Winkler
- metodo di Reese e Matlock

# ANALISI DELLA FONDAZIONE SU PALI

- Gruppo di pali
  - metodo empirico
  - metodo delle equivalenze
  - winkler
  - metodo dei coefficienti di interazione
  
- Platea su pali
  - metodo PDR

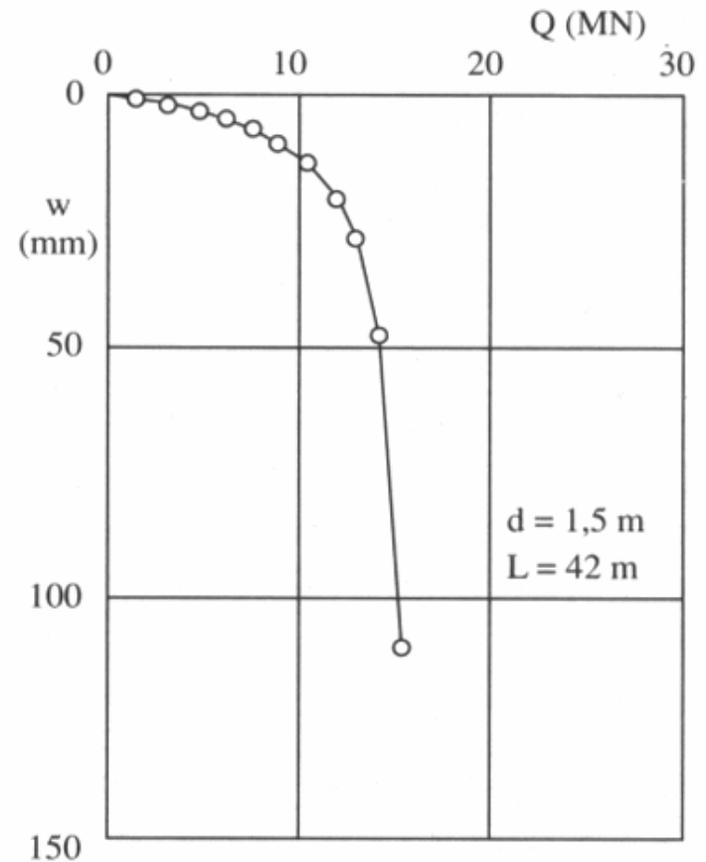
# Definizione dei tipi di fondazione su pali



Le Norme Tecniche (2005) permettono di considerare anche le “platee su pali”

## Non linearità della relazione carichi – cedimenti:

- Concentrazione sforzi
- scorrimenti all'interfaccia



## Relazioni empiriche

$$W_{\text{singolo}} = \frac{Q \cdot d}{\lambda \cdot Q_{\text{lim}}}$$

Tipo di palo	Terreno	Valore di $\lambda$
Battuto	Incoerente	60
	Coesivo	120
Trivellato	Incoerente	40
	Coesivo	100
Trivellato pressato	Incoerente	50
	Coesivo	110

Validità per  $FS \geq 3$

# **Metodo delle curve di trasferimento**

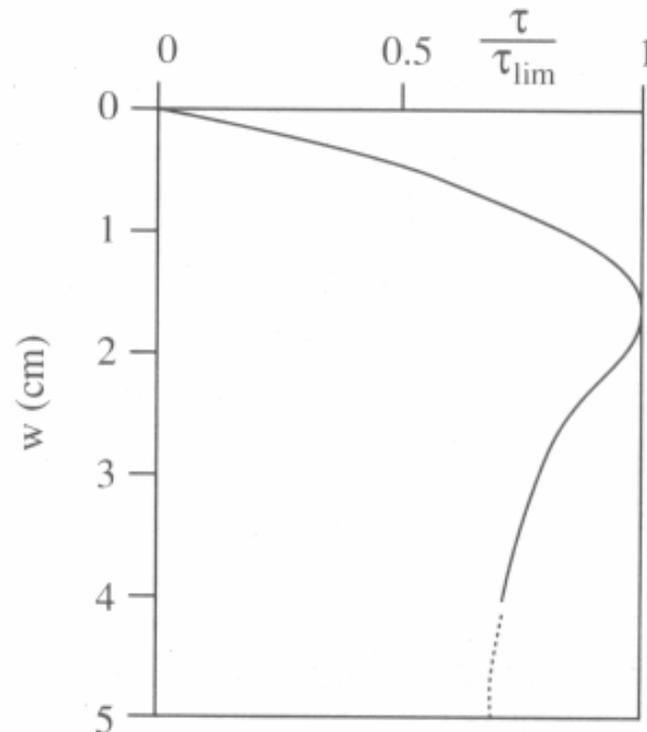
**Scopo:**

**Costruzione della curva carico - cedimento**

# Metodo delle curve di trasferimento

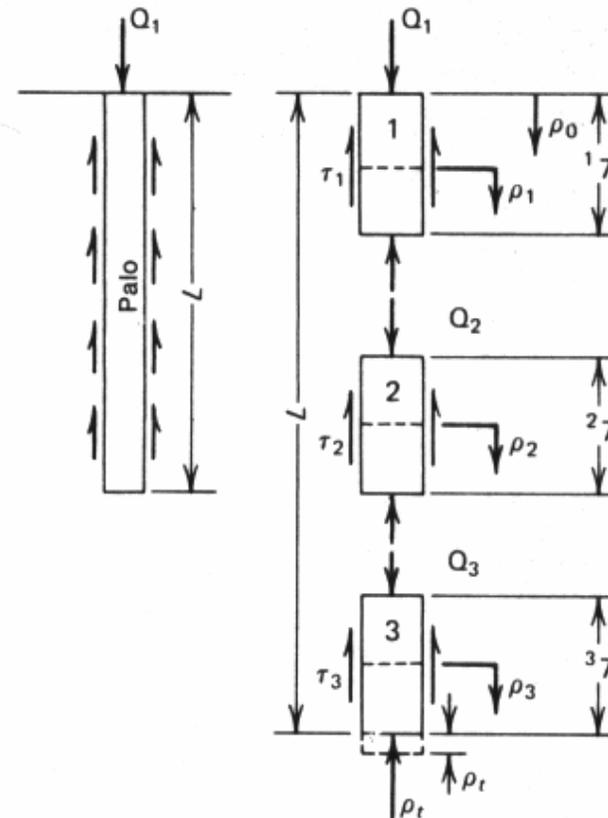
Esempio di  
curva di trasferimento

$\tau_{lim}$ , sforzo tangenziale limite



# Metodo delle curve di trasferimento

Discretizzazione del palo e dell'interfaccia



# Metodo delle curve di trasferimento

## Caratteristiche di base del metodo

- Curve di trasferimento di punta e superficie laterale
- Deformabilità assiale del palo
- calcolo mediante iterazioni → automazione

# Metodo analitico approssimato

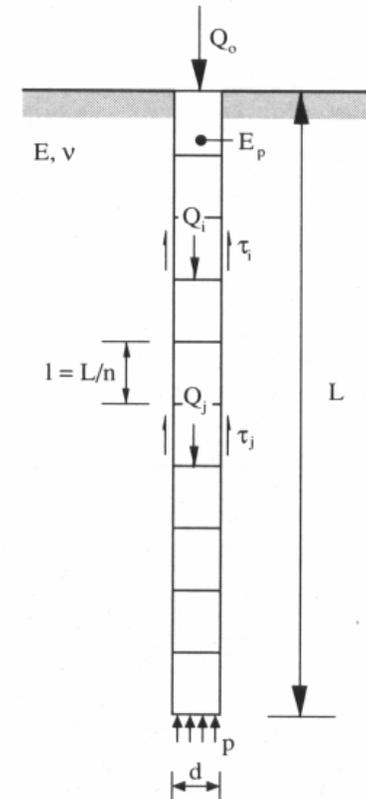
## Caratteristiche di base del metodo

- variazione di  $\tau$  con  $1/r$
- applicazione della teoria dell'elasticità
- introduzione del concetto di distanza di estinzione

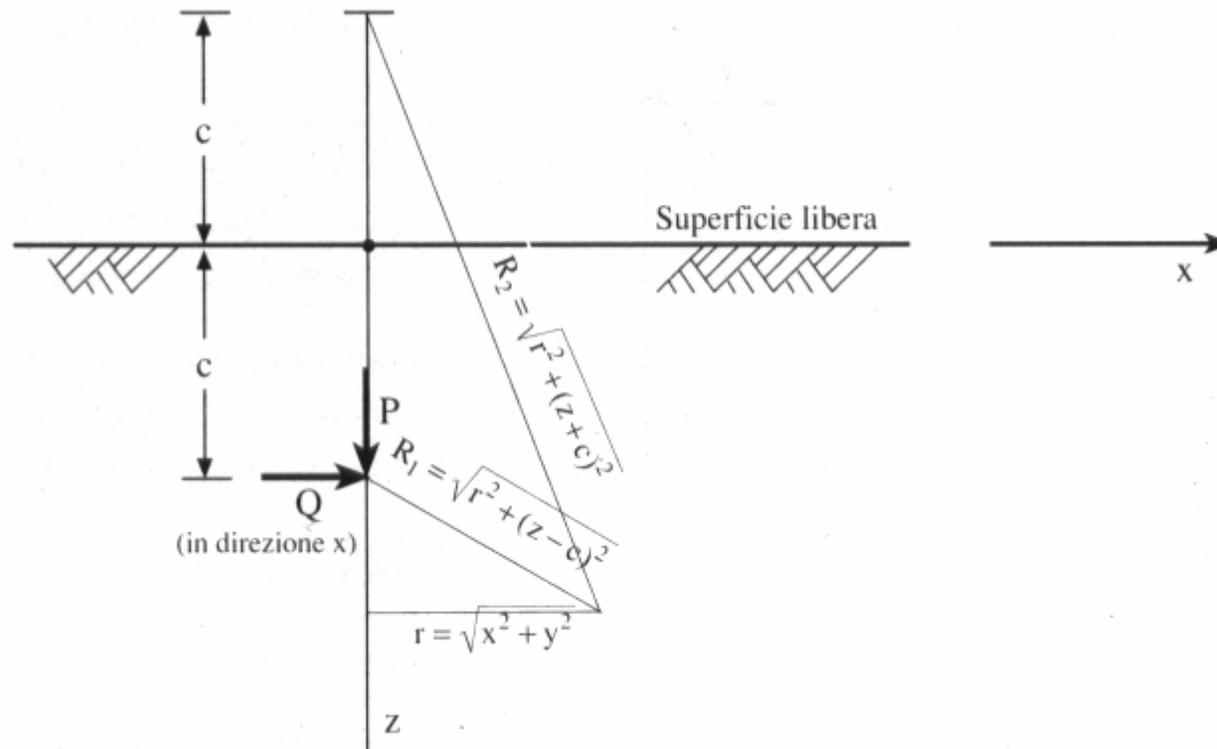
# Metodo agli elementi di contorno

**Basato su soluzioni della teoria dell'elasticità (Mindlin, 1936)**

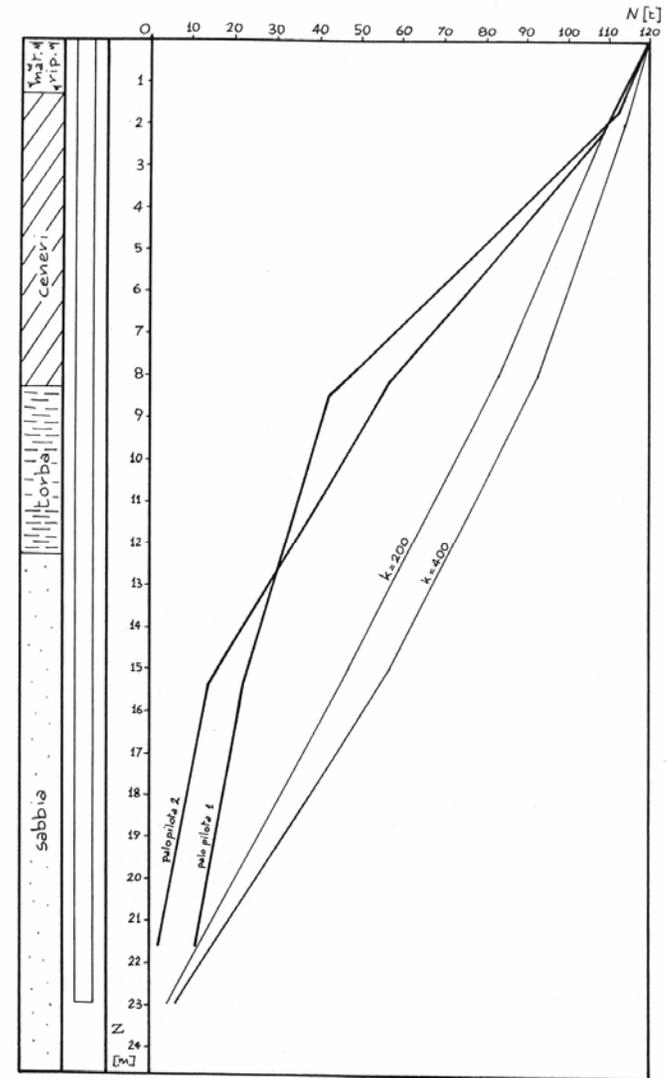
**Adatto all'introduzione di un legame elasto – plastico dell'interfaccia palo - terreno**



# Schema della soluzione di Mindlin



# Confronto tra sforzo normale calcolato con BEM lineare e sforzo normale misurato



# Palo singolo sotto forze orizzontali

$$E_p J \frac{d^4 y(z)}{dz^4} + k_h \cdot d \cdot y(z) = 0$$

**Reese & Matlock (1956) -**  $k_h = n_h \frac{z}{d}$

**Baguelin et Al (1978) –**  $k_h$  da prove pressiometriche

**Broms (1964) –**  $k_h$  da prove triassiali CIU

$$k_h = 1.67 \frac{q_{\max}}{2 \cdot \varepsilon_{50} \cdot d}$$

## **Palo singolo sotto forze orizzontali**

$$E_p J \frac{d^4 y(z)}{dz^4} + k_h \cdot d \cdot y(z) = 0$$

- 1. Se  $k_h$  è costante, soluzione alla Winkler**
- 2. Se  $k_h$  aumenta con la profondità, soluzioni numeriche**

# Gruppo di pali sotto forze orizzontali Poulos & Davis (1980)

<b>Due pali</b>	<b><math>0.50 k_h</math></b>
<b>Tre o quattro pali</b>	<b><math>0.33 k_h</math></b>
<b>Cinque o più</b>	<b><math>0.25 k_h</math></b>

# FONDAZIONI SU PALI

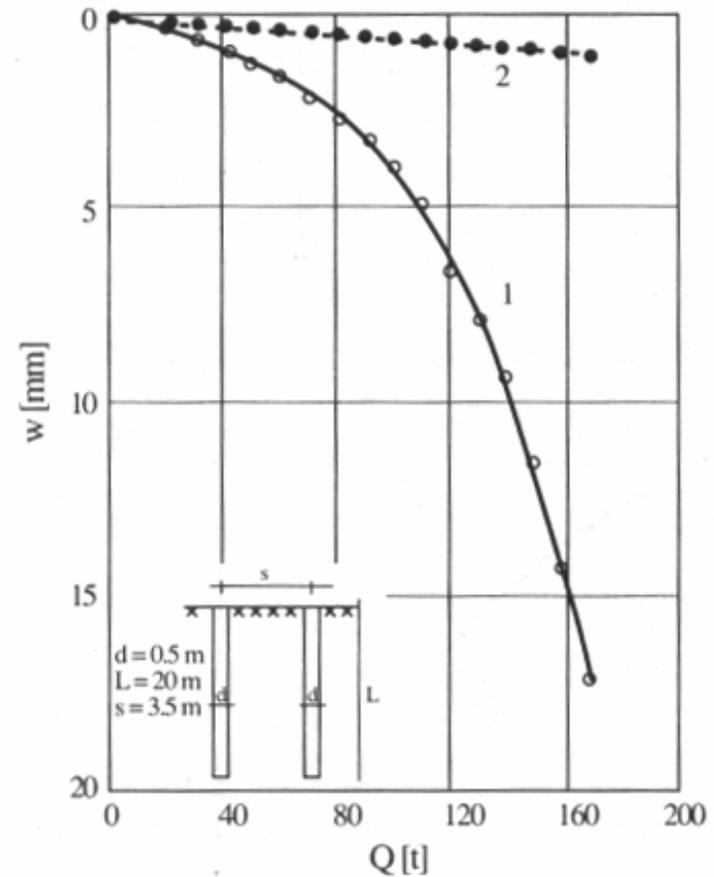
Problematiche:

- Cedimento medio e differenziale
- Distribuzione dei carichi tra i pali
- Sollecitazioni nella struttura di collegamento

# FONDAZIONI SU PALI

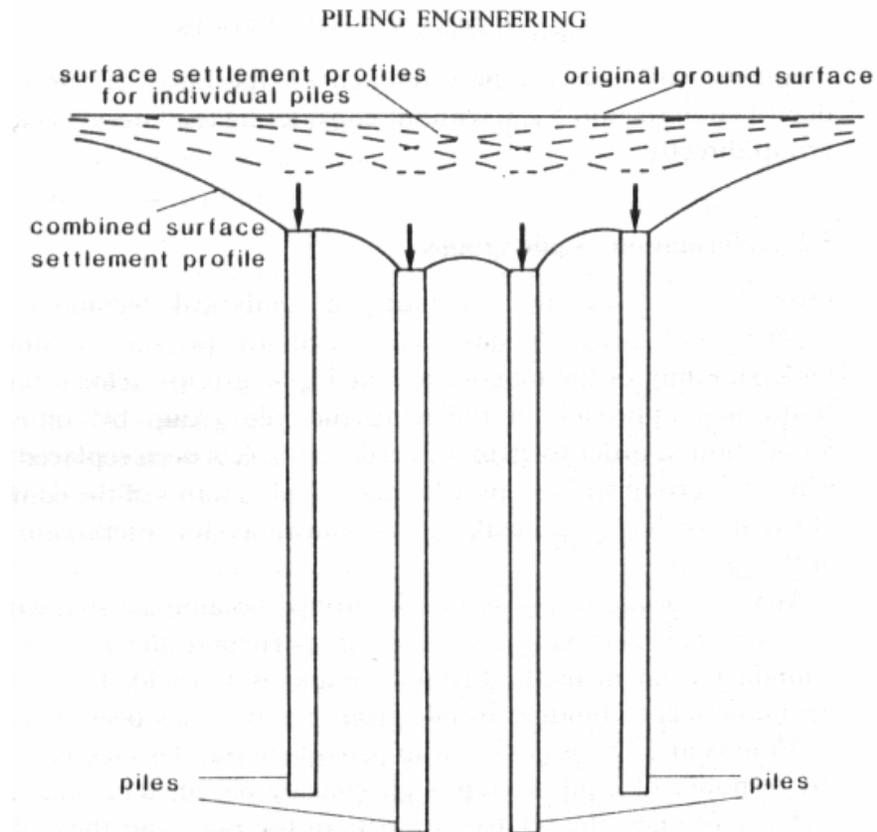
## Fenomeni di base

**Palo 1 – Caricato**  
**Palo 2 – Scarico**



# FONDAZIONI SU PALI

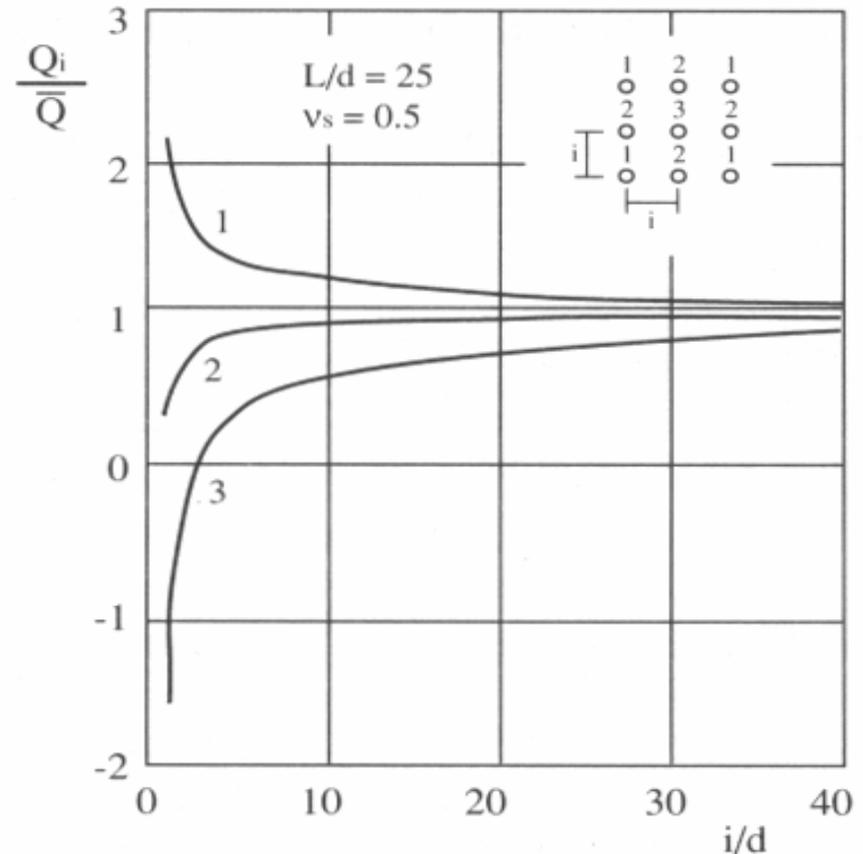
## Fenomeni di base



# FONDAZIONI SU PALI

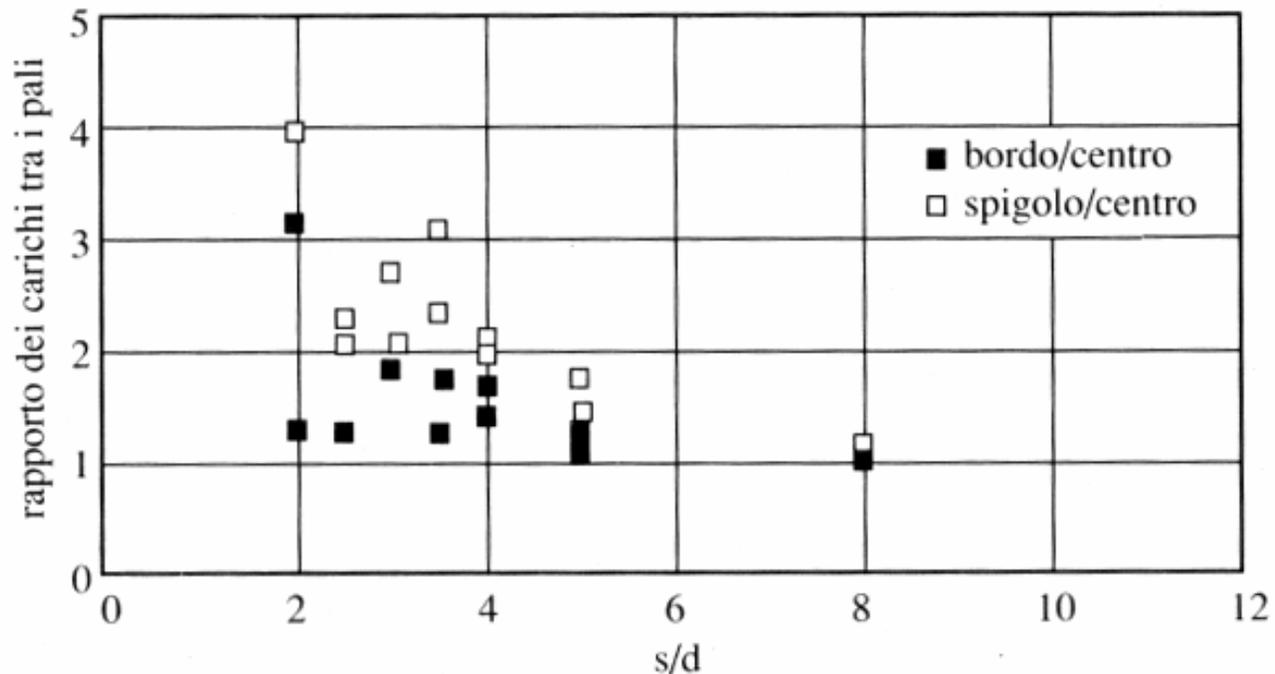
## Fenomeni di base

**Distribuzione teorica tra i  
pali di un gruppo 3 x 3**



# FONDAZIONI SU PALI

## Fenomeni di base



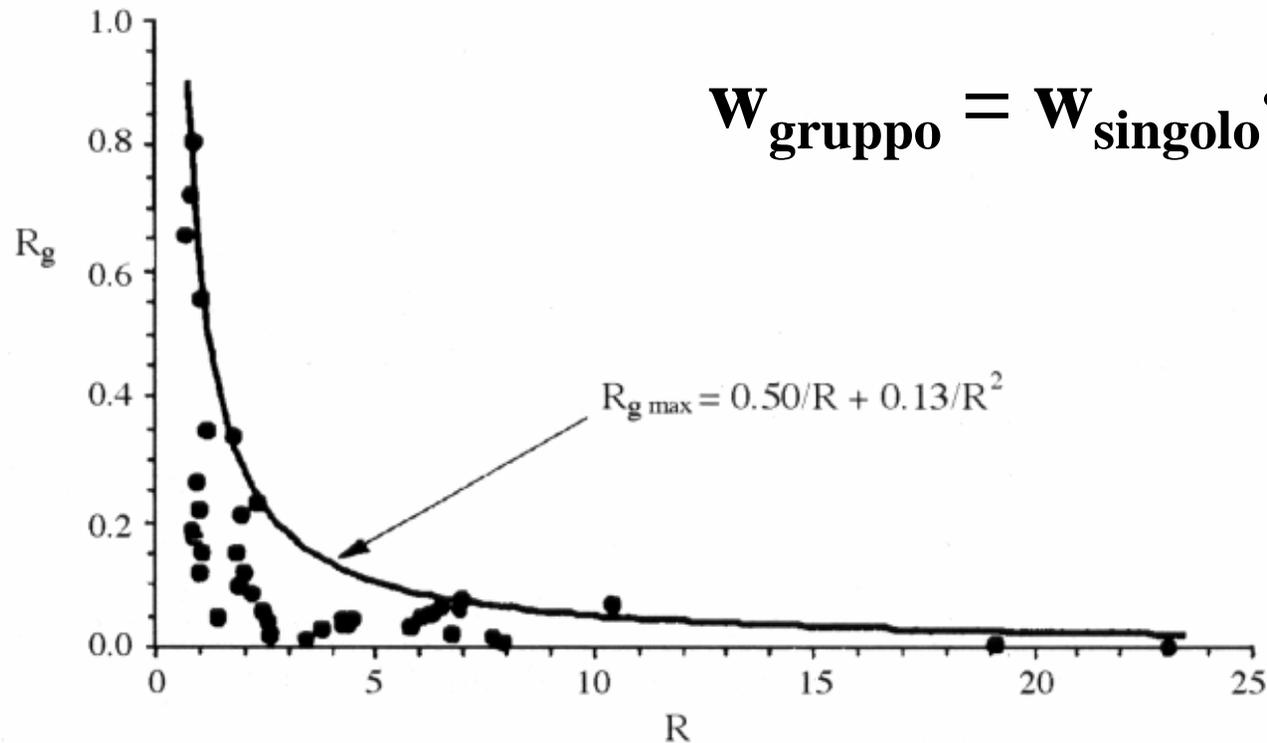
**Distribuzione misurata tra i pali di un gruppo**

# **PALI IN CONDIZIONI DI ESERCIZIO**

## **Gruppo di pali: Cedimento**

- **metodo empirico**
- **metodi delle equivalenze (palo equiv., piastra eq.)**
- **winkler**
- **metodi dei coefficienti di interazione**

# Metodo empirico (Mandolini et Al., 1997)



$$W_{\text{gruppo}} = W_{\text{singolo}} \cdot n \cdot R_g$$

$$R = (n \cdot s / L)^{0.5}$$

# Metodo empirico (Mandolini et Al., 1997)

## Cedimento differenziale

$$R_{ds} = \frac{\Delta w}{w_{\text{gruppo}}}$$

$$R_{ds,\text{max}} = 0.36 \cdot R^{0.32}$$

# Metodo delle equivalenze

**Randolph (1994) – piccoli gruppi ( $R < 2$ )**  
**Palo Equivalente**

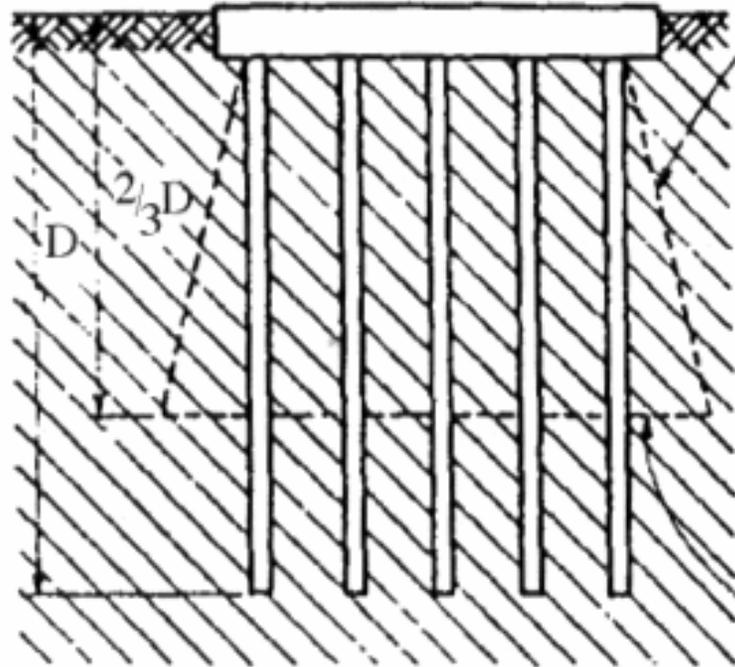
$$d_e = 1.13\sqrt{A_g}$$

$$E_{eq} = E + (E_p - E)\frac{A_p}{A_g}$$

# Metodo delle equivalenze

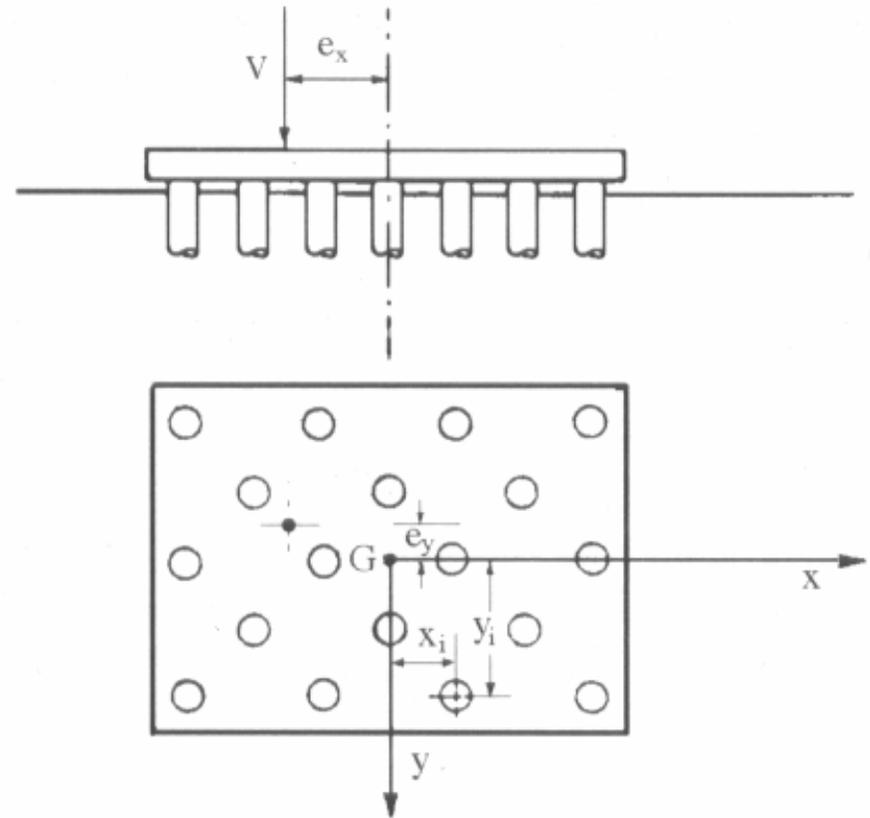
Tomlinson (1981) – grandi gruppi ( $R > 4$ )

Piastra Equivalente



## Pali come molle elastiche indipendenti (tipo Winkler)

$$Q_i = \frac{V}{n} + \frac{V \cdot e_x}{\sum_{i=1}^n x_i^2} x_i + \frac{V \cdot e_y}{\sum_{i=1}^n y_i^2} y_i$$



# Metodo dei coefficienti di interazione

## Piastra infinitamente rigida

$$w_i = \sum_{j=1}^n w_{1,i} Q_j \alpha_{ij}$$

$$V = \sum_{i=1}^n Q_i$$

$$V \cdot e_x = \sum_{i=1}^n x_i Q_i$$

$$V \cdot e_y = \sum_{i=1}^n y_i Q_i$$

$$\sum_{j=1}^n w_{1,i} Q_j \alpha_{ij} = w_0 + \delta_x y_i + \delta_y x_i$$

Piastra infinitamente flessibile  $\Rightarrow$  valore di  $Q_i$  noto

# Metodo dei coefficienti di interazione

## Determinazione degli $\alpha_{ij}$

- analisi con metodo BEM della coppia di pali
- mezzo elastico lineare (anche stratificato)
- distanza di estinzione ( $\alpha_{ij} = 0$  se  $d_{ij} > r_m$ )
- sovrapposizione degli effetti
- effetto irrigidente dei pali non considerato

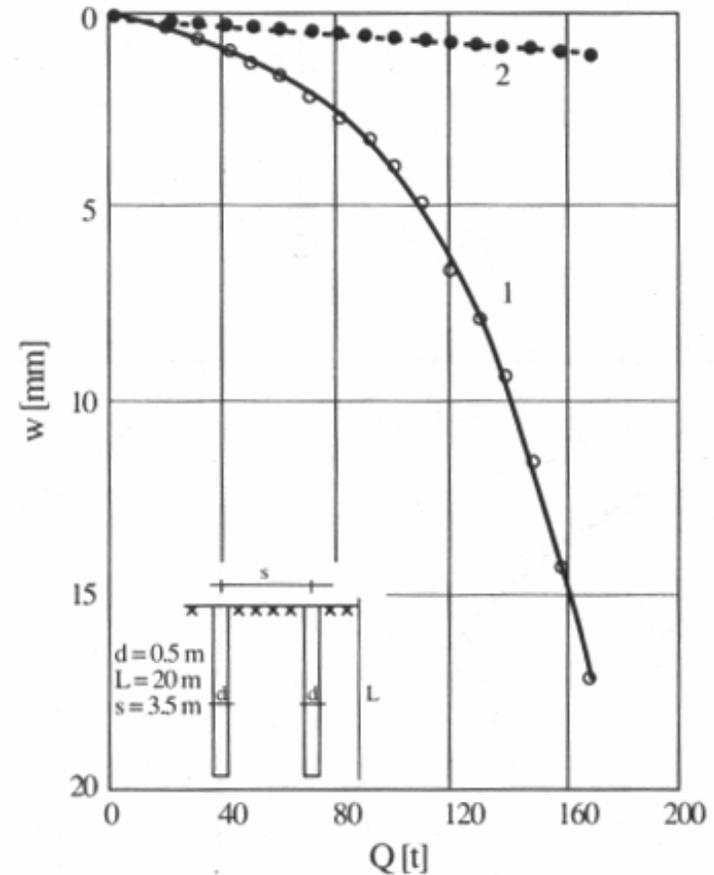
$$\alpha_{ij} = \frac{W_j}{W_i}$$

# Metodo dei coefficienti di interazione

## Linearità o non linearità?

$$\alpha_{ij} = \frac{W_j}{W_i}$$

$\alpha_{ij}$  è costante  
o variabile ?

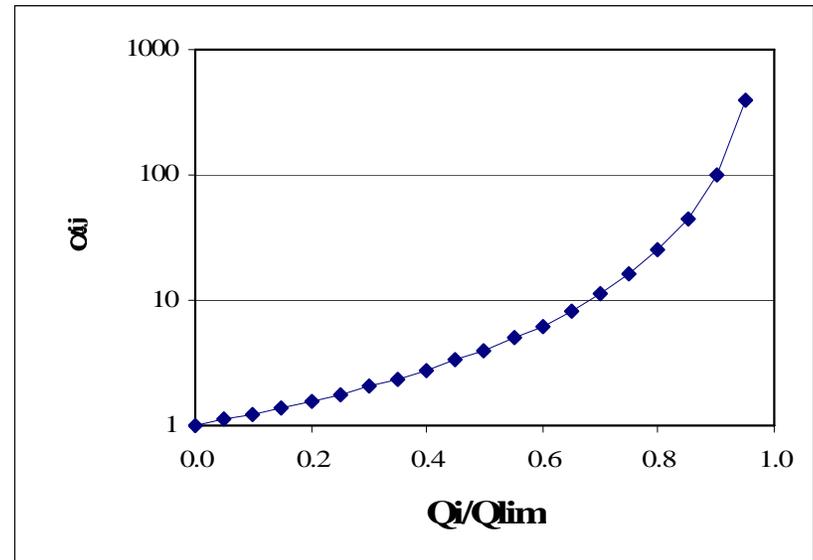


# Metodo dei coefficienti di interazione

## Linearità o non linearità?

- non linearità concentrata all'interfaccia palo – terreno
- $\alpha_{ij}$  è costante per  $i \neq j$
- $\alpha_{ii}$  varia con il livello di carico (analisi incrementale):

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{\left(1 - \frac{Q_i}{Q_{lim}}\right)^2}$$



# **PALI IN CONDIZIONI DI ESERCIZIO**

## **Gruppo di pali: metodo dei coefficienti di interazione**

- calcolo del cedimento medio
- calcolo del cedimento differenziale
- sollecitazioni nella struttura una volta noti  $Q_i$

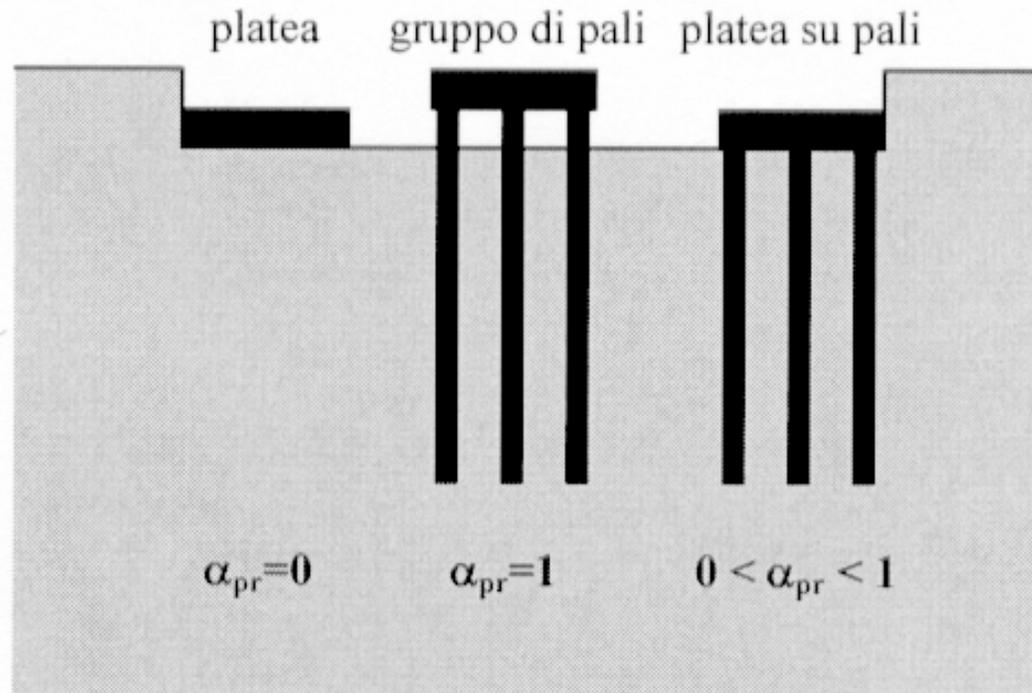
## Corso di Pali di Fondazione e Palificate

---

GRUPPI DI PALI			
PGROUP	Banerjee & Driscoll (1976)	BEM con analisi completa del continuo lineare elastico	Semispaio elastico
PILGPI	O'Neill et al. (1977)	Metodo ibrido non lineare (curve di trasferimento + Mindlin)	Stratificato
DEFPIG	Poulos (1980)	Metodo lineare ai coefficienti di interazione (BEM semplificato per il palo singolo e per l'interazione fra pali)	Stratificato
	Chow (1986)	Metodo ibrido non lineare (curve di trasferimento + Mindlin)	Stratificato
PIGLET	Randolph (1987)	Metodo lineare ai coefficienti di interazione (soluzioni analitiche approssimate per il palo singolo e per l'interazione fra pali)	Gibson
GRUPPALO	Mandolini (1994)	Metodo non lineare ai coefficienti di interazione (BEM semplificato per il palo singolo e per l'interazione fra pali; distanza di estinzione)	Stratificato
MAP	Guiducci (1997)	Metodo non lineare ai coefficienti di interazione	Doppio strato o Gibson

# PALI IN CONDIZIONI DI ESERCIZIO

## Platea su pali



$$Q_{PR} = Q_P + Q_G = Q_P + \sum_{i=1}^n Q_{palo,i}$$
$$\alpha_{pr} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{palo,i}}{Q_{PR}}$$

# PALI IN CONDIZIONI DI ESERCIZIO

## Platea su pali: metodo PDR, definizioni

- $K_P$ , rigidezza della fondazione a platea
- $Q_{P,lim}$ , carico limite della fondazione a platea
- $K_G$ , rigidezza del gruppo di pali
- $Q_{G,lim}$ , carico limite del gruppo di pali
- $K_{PR}$ , rigidezza della platea su pali
- $Q_{PR,lim}$ , carico limite della platea su pali

# PALI IN CONDIZIONI DI ESERCIZIO

## Platea su pali: metodo PDR, fasi

1 – valutazione della capacità portante

$$Q_{PR,lim} = \min \{ Q_{G,blocco} + Q_{P,ext} ; Q_{G,lim} + Q_{P,lim} \}$$

2 – valutazione della curva carico - cedimento

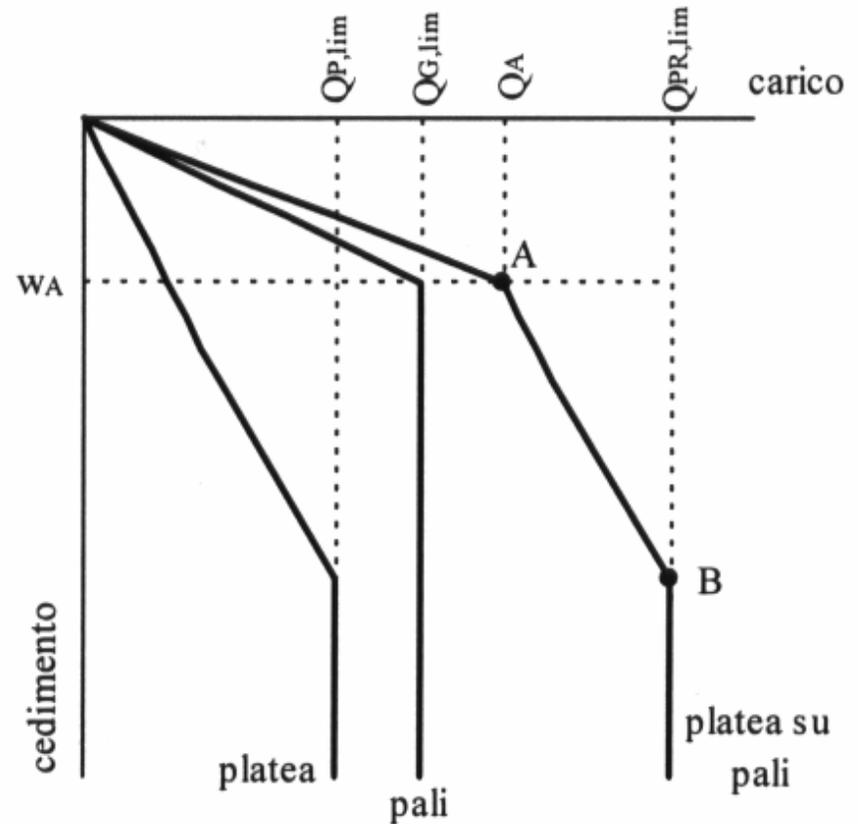
Comportamento elastico lineare – perfettamente  
plastico della platea e del gruppo di pali

# PALI IN CONDIZIONI DI ESERCIZIO

## Platea su pali: metodo PDR, curva carico - cedimento

$$K_{PR} = X \cdot K_G$$

$$X = \frac{1 - 0.60 \cdot \left( \frac{K_P}{K_G} \right)}{1 - 0.64 \cdot \left( \frac{K_P}{K_G} \right)}$$

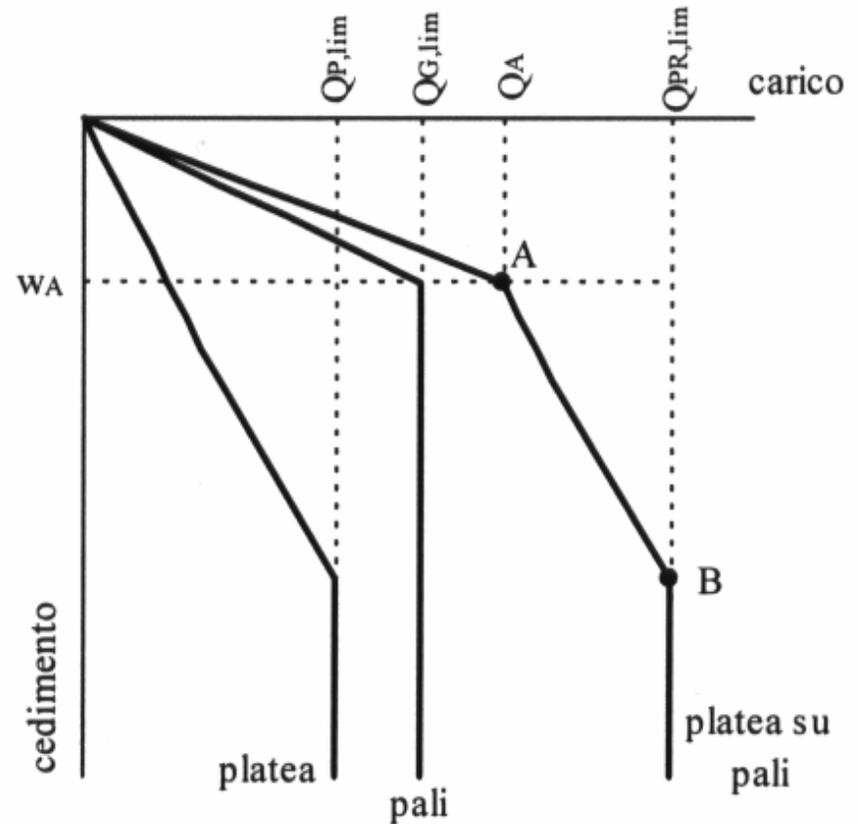


# PALI IN CONDIZIONI DI ESERCIZIO

## Platea su pali: metodo PDR, curva carico - cedimento

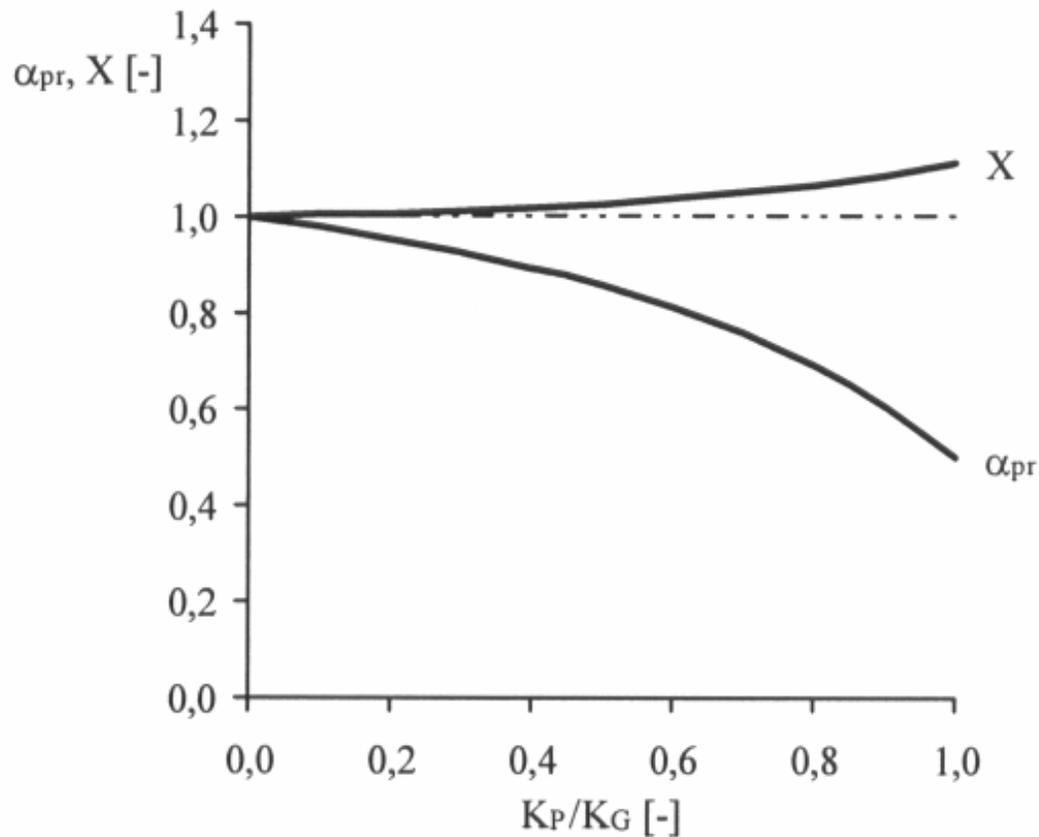
$$\alpha_{pr} = \frac{1}{1 + \beta}$$

$$\beta = \frac{0.2}{1 - 0.8 \cdot \left( \frac{K_P}{K_G} \right)} \cdot \frac{K_P}{K_G}$$



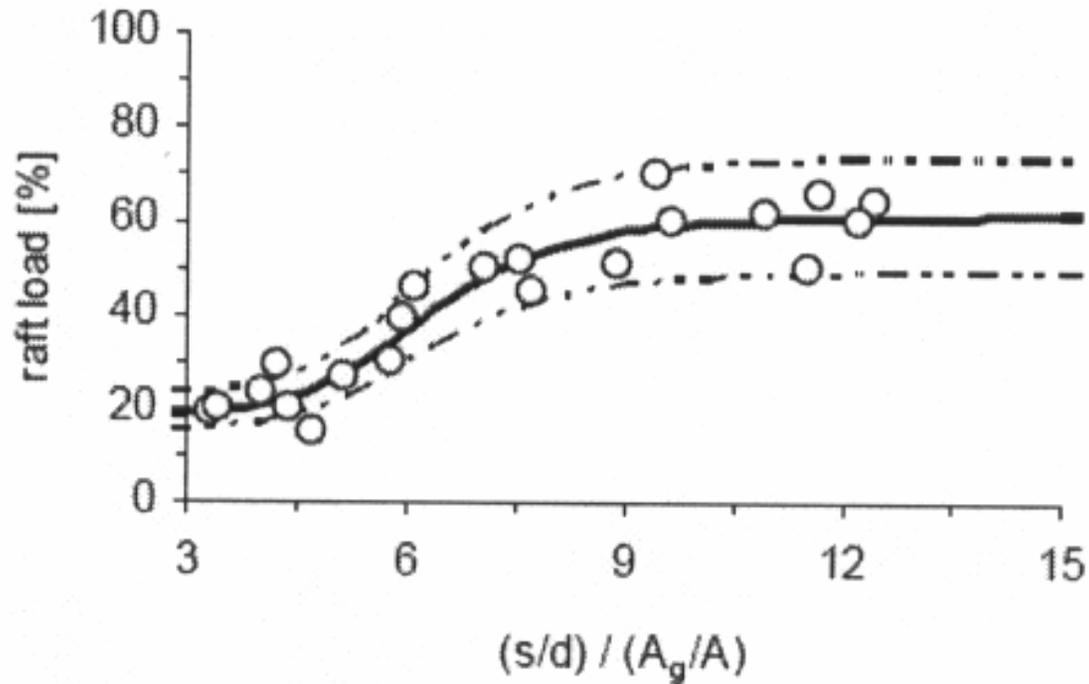
# Platea su pali: metodo PDR

## Rigidezza e ripartizione del carico



# Platea su pali: Ripartizione del carico

## Dati sperimentali



## Esempio di applicazione del metodo PDR

- platea quadrata di lato 15 m
- carico verticale e centrato  $Q = 47 \text{ MN}$
- terreno a grana fine con:  
 $c_u = 100 \text{ kPa}$ ,  $G = 10 \text{ MPa}$ ,  $\nu' = 0.2$

# Esempio di applicazione del metodo PDR

Capacità portante platea

$$Q_{P,\text{lim}} = 1.2 \cdot (2 + \pi) \cdot c_u \cdot B^2 = 138.8 \text{ MN}$$

La verifica secondo DM 1988 ( $FS > 3$ ) è soddisfatta

# Esempio di applicazione del metodo PDR

Calcolo del cedimento  
(teoria dell'elasticità)

$$K_{P,U} = 706 \text{ MN/m} \rightarrow w_0 = 47/706 = 0.067 \text{ m}$$

$$K_{P,D} = 441 \text{ MN/m} \rightarrow w_f = 47/441 = 0.107 \text{ m}$$

Il cedimento è eccessivo!

# Esempio di applicazione del metodo PDR

Si ricorre ai pali:  $L = 25$  m,  $D = 1$  m

$$Q_{\text{lim,sing}} = 5 \text{ MN}$$

Secondo l'approccio tradizionale (DM 1988):

$$n = \frac{FS \cdot Q}{Q_{\text{lim,sing}}} = 23.5 \rightarrow 25 = 5^2$$

# Esempio di applicazione del metodo PDR

Calcolo del cedimento  
(metodo analitico approssimato)

$$K_{G,U} = 1812 \text{ MN/m} \rightarrow w_0 = \frac{47}{1812} = 0.026 \text{ m}$$

$$K_{G,D} = 1612 \text{ MN/m} \rightarrow w_f = \frac{47}{1612} = 0.029 \text{ m}$$

Il cedimento è eccessivamente piccolo!

# Esempio di applicazione del metodo PDR

Calcolo della rigidezza della platea su pali

$$K_{PR} = X \cdot K_G$$

$$X = \frac{1 - 0.60 \cdot \left( \frac{K_P}{K_G} \right)}{1 - 0.64 \cdot \left( \frac{K_P}{K_G} \right)}$$

$$K_{PR,U} = 1849 \text{ MN/m}$$

$$K_{PR,D} = 1634 \text{ MN/m}$$

$$FS_{PR} = \frac{139 + 125}{47} = 5.62$$

## Esempio di applicazione del metodo PDR

Cosa accade se riduciamo il numero di pali?

Consideriamo 16 pali (-36%)

$$K_{G,U} = 1449 \text{ MN/m} \quad K_{PR,U} = 1490 \text{ MN/m} \rightarrow w_0 = 0.032 \text{ m}$$

$$K_{G,D} = 1290 \text{ MN/m} \quad K_{PR,D} = 1313 \text{ MN/m} \rightarrow w_f = 0.036 \text{ m}$$

$$FS_{PR} = \frac{139 + 80}{47} = 4.65$$

## Metodo PDR: commenti

- non linearità del comportamento di platea e gruppo di pali
- effetto della sovraconsolidazione dovuta allo scavo





