

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
PEF 3405 - Fundações

Fundações Profundas

Principais Tipos e Métodos Construtivos

Dimensionamento em Planta

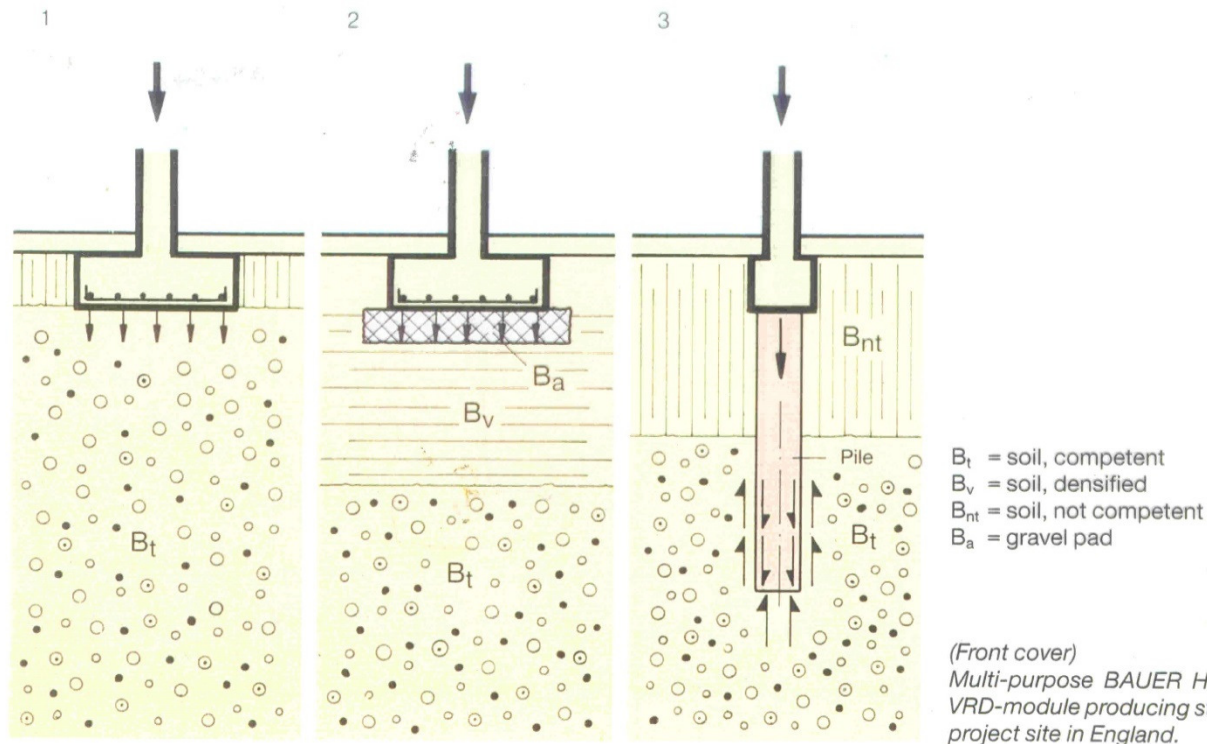
Comprimentos

Luiz Guilherme de Mello

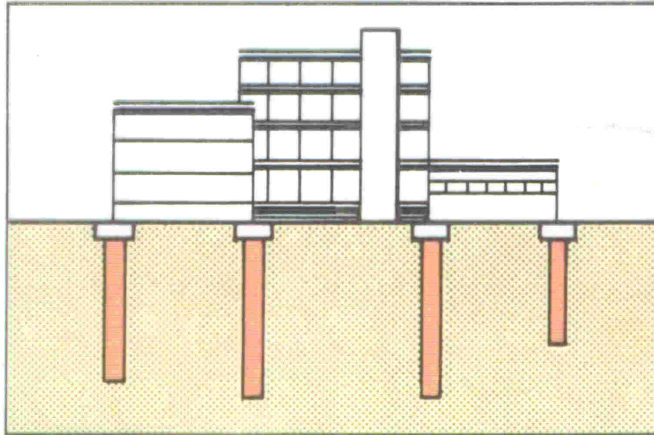
Maurício Abramento

Waldemar Hachich

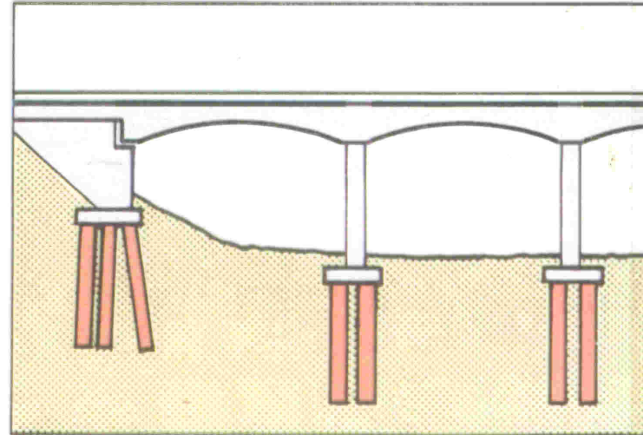
Pedro Wellington Teixeira



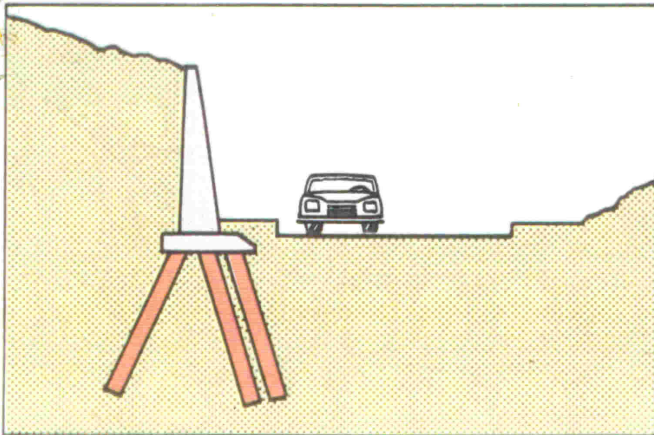
- Transferem esforços axiais de compressão: ponta e lateral
- Carga de ruptura: - ruptura estrutura ou do solo
- $P_r = P_p + P_l$
- Estacas também podem suportar esforços de tração ou horizontais e momentos.



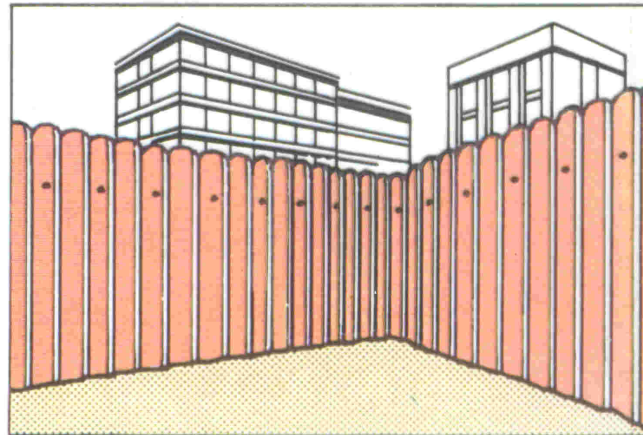
Single piles



Pile groups



Vertical and raked piles



Piled wall

Estacas

- CONCEITO BÁSICO DE PROJETO
- No Brasil, mais comum (NBR 6122/2010)
 - Carga admissível:
 - a) **ELU** - $P_{adm} = Pr / FS$ onde FS de 1,6 a 3,0
 - b) **ELS** - P_{adm} que provoca recalques admissíveis
- Em vários outros países (e no Brasil, como conceito alternativo):
 - LRFD (load and resistance factor design):
 - a) ELU - solicitações majoradas \leq resistências minoradas
 - b) ELS - recalques \leq recalques admissíveis

Tipos de Estacas

- Madeira
- Aço { Perfis metálicos laminados
Perfis de chapas soldadas ou trilhos
- Concreto:
 - Pré-moldadas { Concreto armado (simples/centrifugado)
Concreto protendido
Segmentos (Mega)
 - Moldadas in loco { Broca
Strauss
Franki
Hélice contínua
Escavadas de pequeno diâmetro
Escavadas de grande capacidade (estacões/barretes)

Tipos de estacas

- **Mistas**
 - Madeira-concreto
 - Aço-concreto
 - Concreto pré-moldado/moldado in loco
- **Especiais**
 - Estacas-raíz
 - Estacas-colunas

}	JG
	CCP

Macro Sub-divisão

- Estacas de deslocamento (displacement); estaca desloca o solo lateralmente
 - Grande deslocamento lateral: pré-moldadas, Franki
 - Pequeno deslocamento lateral: metálicas H ou I
- Estacas de substituição (replacement); estaca substitui o solo retirado
 - Estacas sem deslocamento lateral: Strauss, escavadas

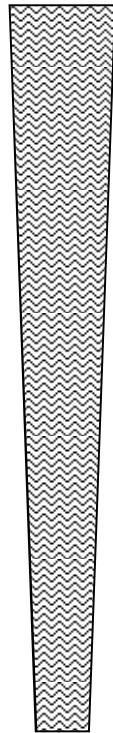
Métodos de Implantação

- Dinâmica
 - Impacto: martelos em queda livre com 15 a 50 kN e $H=0,5$ a 1,0m; simples ou duplo efeito (diesel)
 - Vibração: martelo vibratório (em areias ou argilas moles)
- Estática: por prensagem ou escavação e concretagem in situ

Estacas de Madeira

- Mais antiga
- Constituída por troncos de árvore
- Hoje em declínio
- Madeira usada hoje: eucalipto.

Estacas de Madeira



$d_c=20$ a 25cm

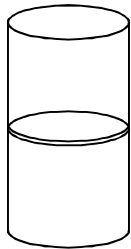
Cargas= 100 a 200 kN

$L=12$ a 15m

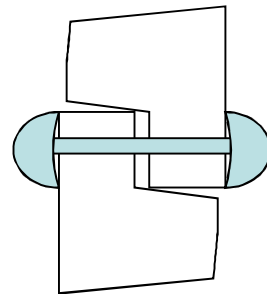
$d_p=15\text{cm}$

Estacas de Madeira

- Vantagens
 - Facilidade de transporte e manuseio
 - Facilidade de cortes e emendas



Luvas de aço



Parafusos/Sambladura

Estacas de Madeira

- Desvantagens

- Dificuldade em encontrar madeira adequada
- Pequenas cargas: 100 a 200 kN
- Durabilidade: ataque de organismos aeróbicos (fungos) ou no mar (moluscos e crustáceos); se estiverem **sempre submersas** não há problema
- Tratamento: pintura com betume, impregnação com creosoto ou revestimento com concreto onde há oscilação de N.A.
- Usos: obras provisórias (cimbramento de pontes ou em estacas mistas)

Estacas de Concreto

- Pré-moldadas em segmentos (Mega)
 - Circulares e ocas
 - diâm. 20, 25 e 40 cm
 - L=0,5; 1,0 e 2,0 m
 - Cravação estática
 - Usos: reforço de fundações e quando não se toleram vibrações
 - Cargas: 300 a 600 kN

Estaca Mega

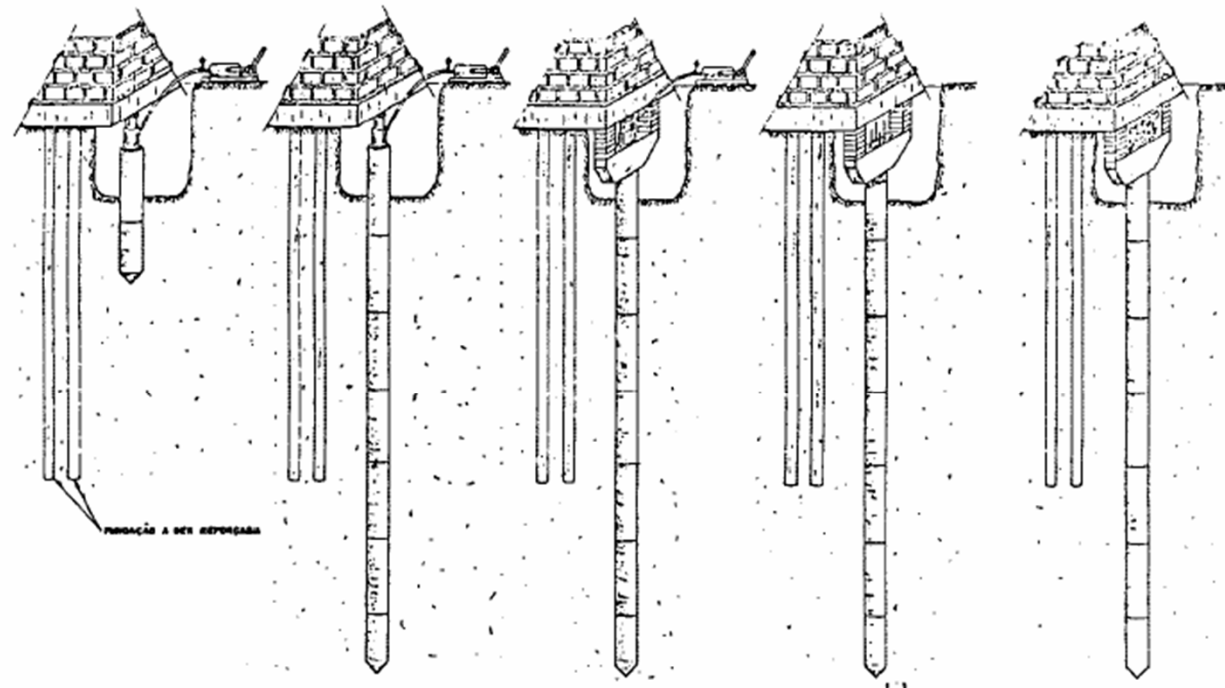


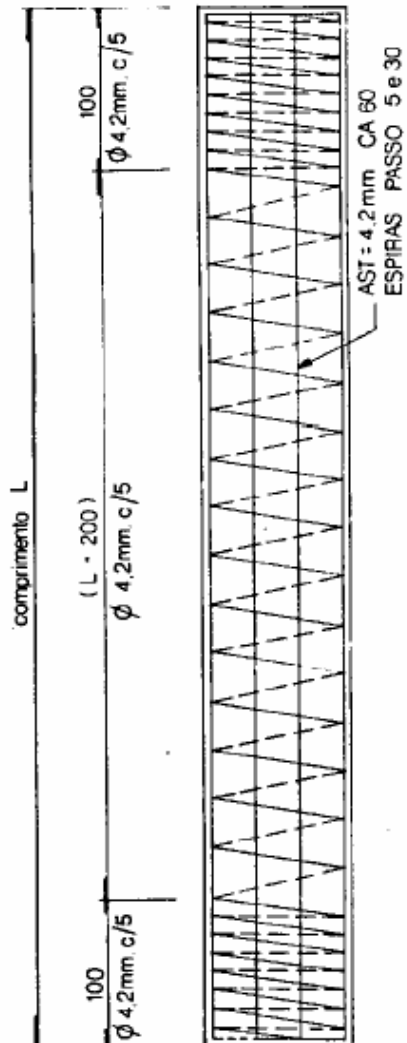
Figura 3.12: Estaca Mega

Estaca pré-moldada cravada

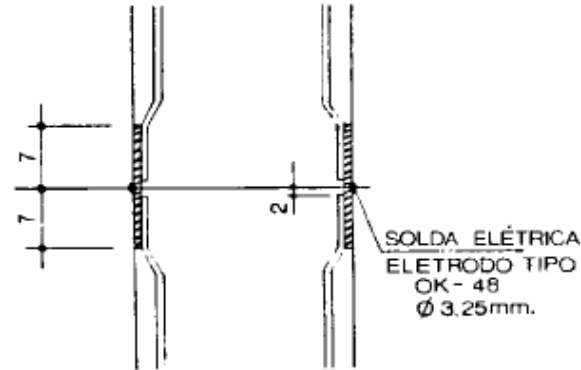
Variações: estacas seção quadrada/ estrela
centrifugadas
tipo de cravação

Pré-moldada concreto

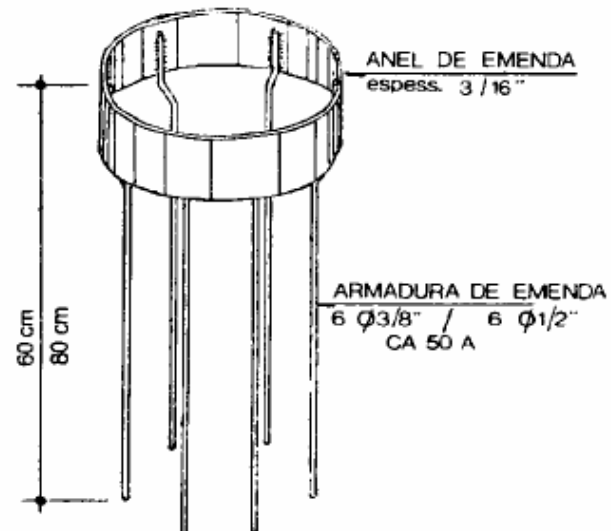
DETALHE DA ESTACA



DETALHE DA EMENDA

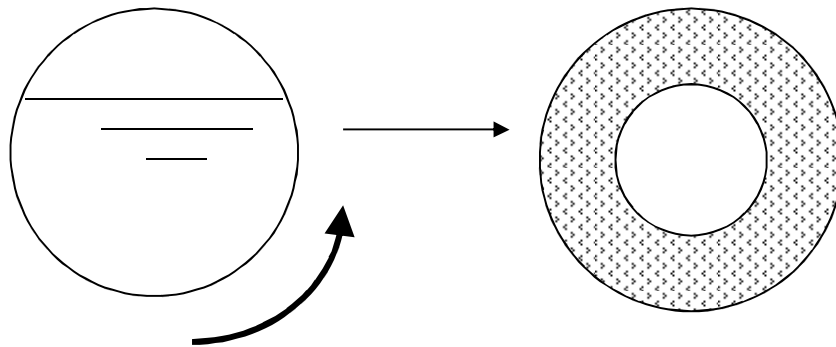


DETALHE DO ANEL



Pré-moldada concreto armado

- Centrifugada:
elementos leves e
occos

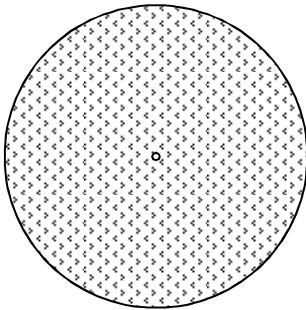


Tensão adm. concreto 10 MPa

Diam (cm)	P nom (kN)
20	250
23	300
26	400
33	600
38	750
42	900
50	1300
70	2300

Pré-moldada concreto armado

- Concreto Maciço

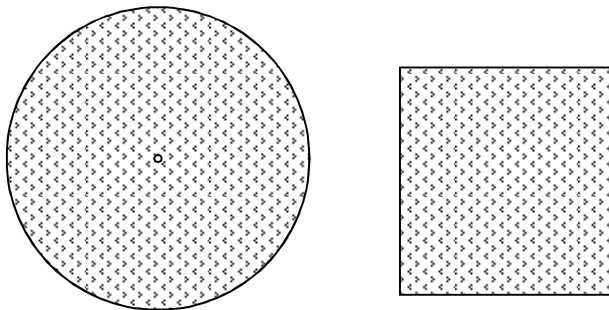


Tensão adm. concreto 5 MPa

Diam (cm)	P nom (kN)
20	200
25	300
30	400
35	500
40	700

Pré-moldada concreto armado

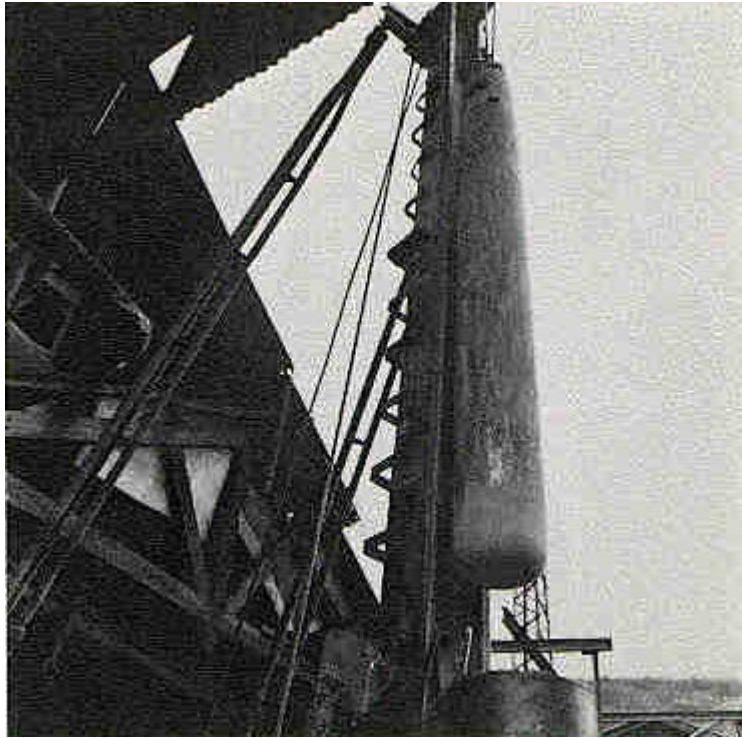
- Concreto Protendido

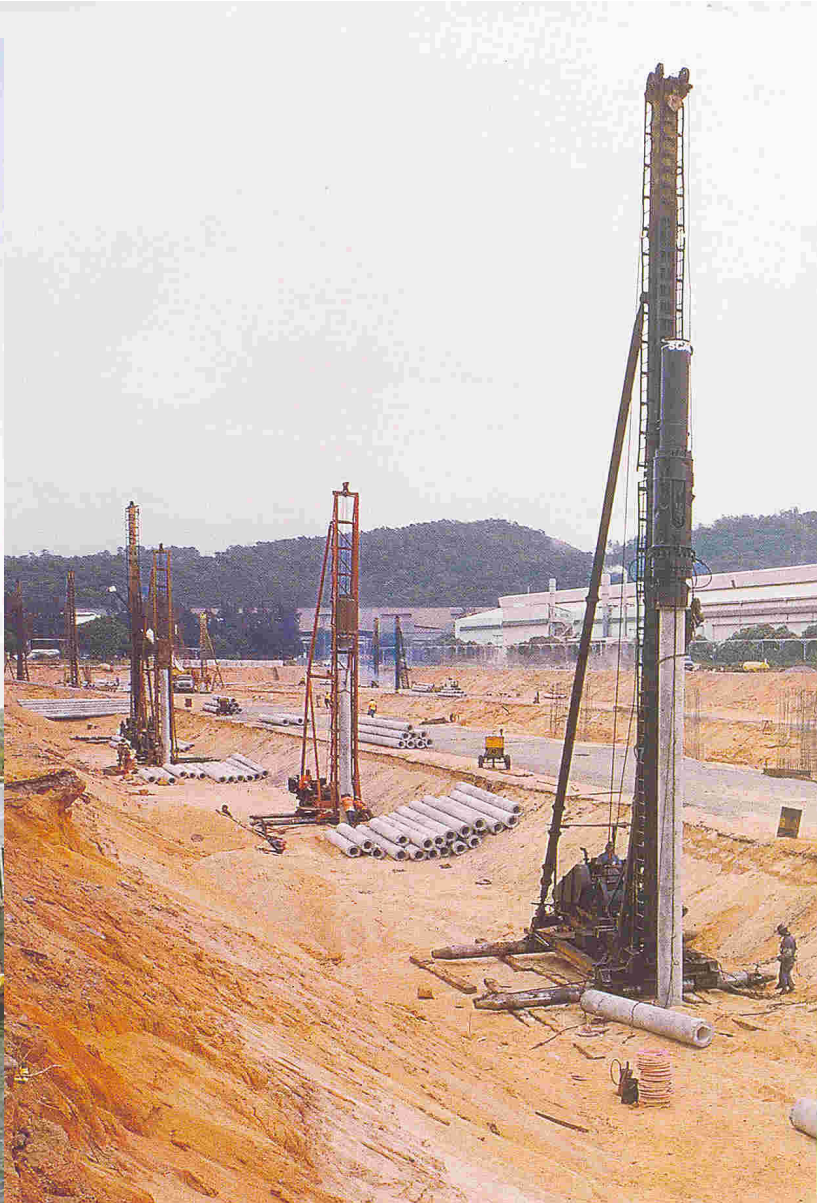


Tensão adm. concreto 5 MPa

Seção (cm)	P nom (kN)
18x18	200
23x23	300
28x28	400
Diam. 36	500
Diam. 42	700
Diam. 50	1000



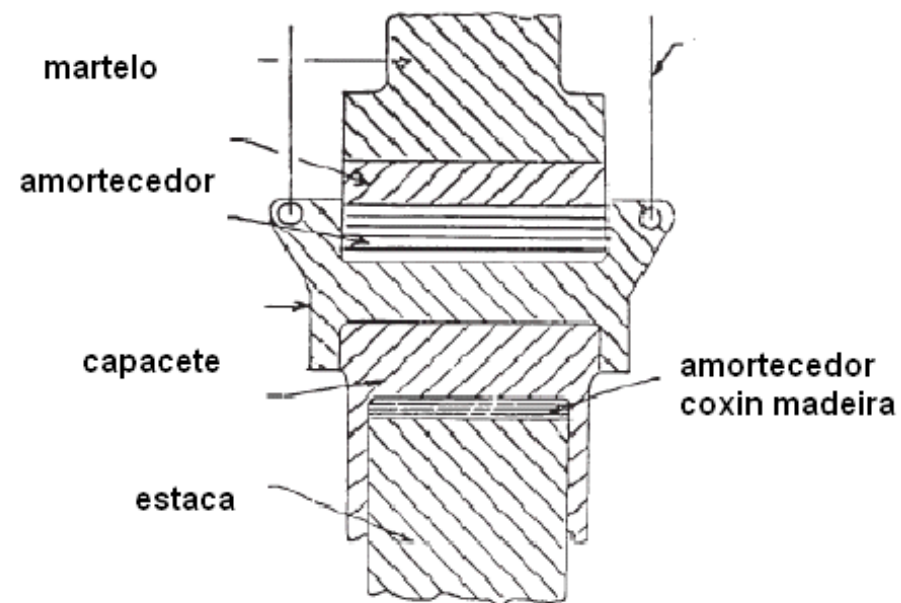
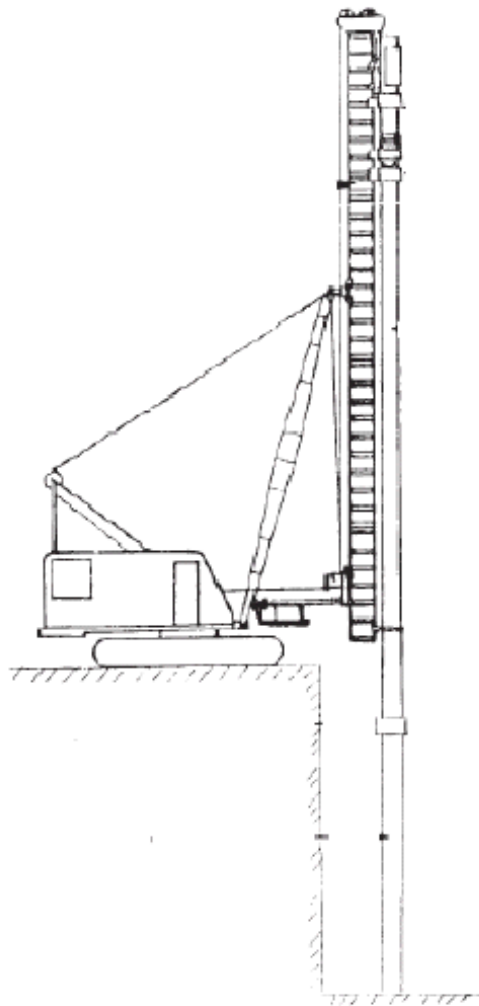




Pré-moldada concreto armado

- Comprimentos dos segmentos: 3 a 14 m
- Cravação ideal: transferência pela ponta e lateral da estaca.
- Solução mínimo custo: **$P_{adm} = P_{nom}$**
- Controle de cravação através de nega: penetração da estaca nos últimos 10 golpes do martelo para uma certa energia por golpe.
- Serve para confirmar o subsolo e também uniformizar a estacaria.

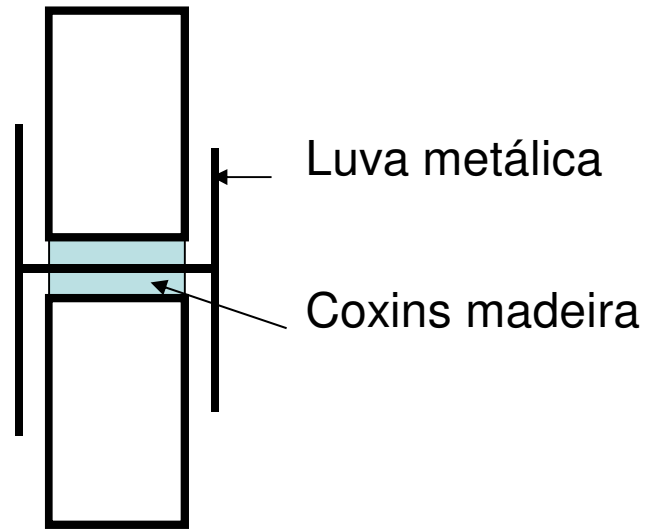
Cravação estaca



Pré-moldada concreto armado

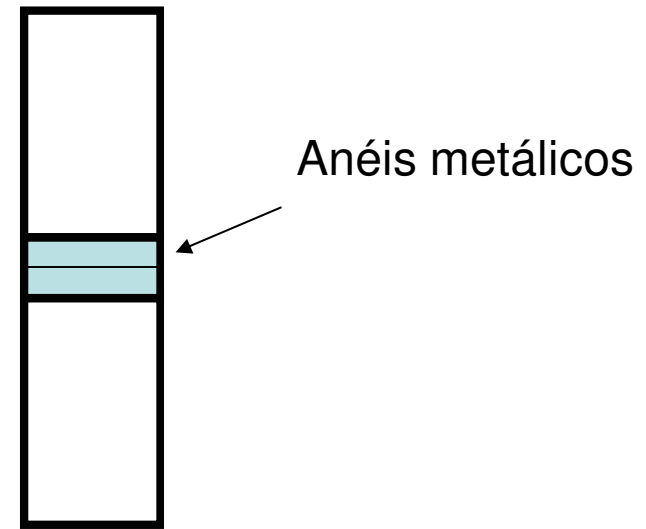
- Desvantagens:
 - Dificuldade de transporte e manuseio
 - Pré-fixação de comprimento: emendas e cortes
 - Dificuldades de execução de cortes e emendas

Emendas



Luvas (em desuso):

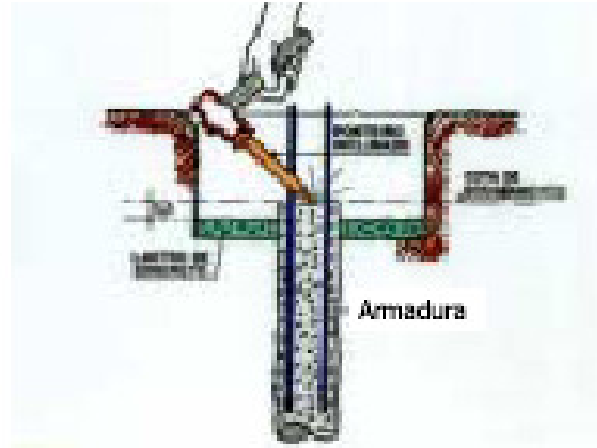
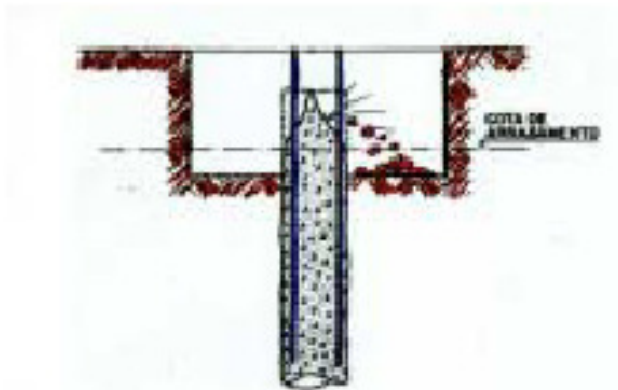
- Somente uma emenda/estaca
- L pequenos
- Só compressão



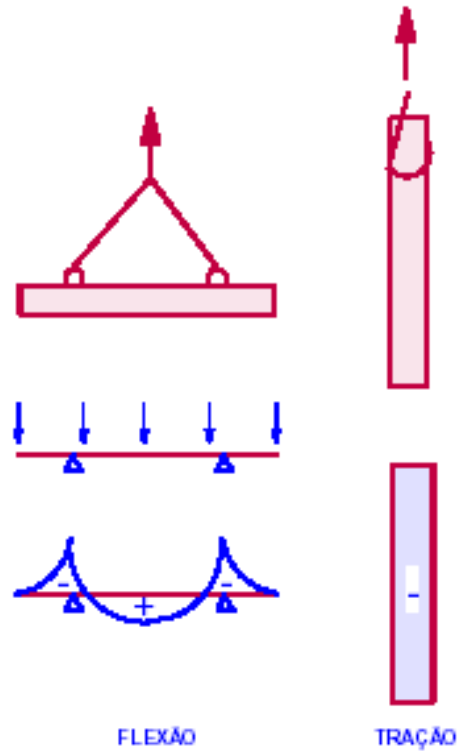
Anéis de aço com solda:

- Mais de uma por estaca
- Maiores L
- Esforços tração/flexão

Preparo do bloco



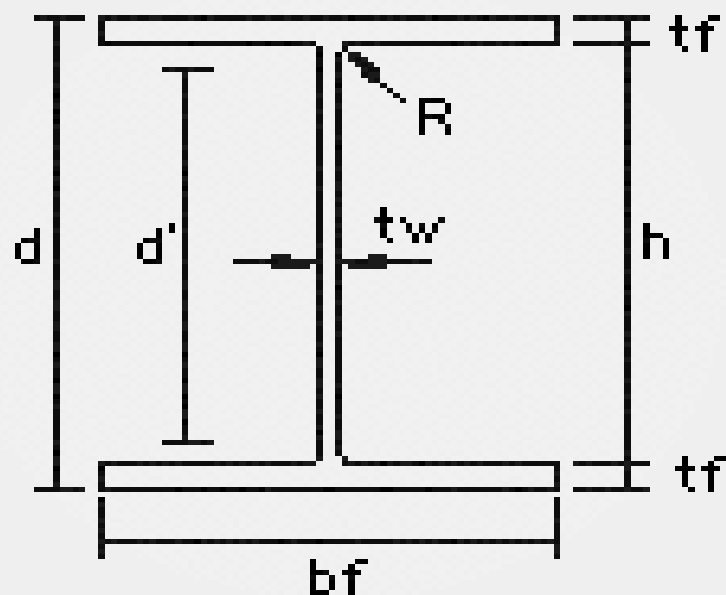
Pré-moldadas concreto – transporte e manuseio



Pré-moldada concreto armado

- Contra-indicações típicas
 - Terrenos muito heterogêneos
 - Presença de matacões
 - Vibrações indesejadas
 - Presença de águas agressivas ao aço (fissuras concreto)

Estacas de aço ou metálicas



Perfis I e H

d = altura externa do perfil

d' = altura livre da alma

h = altura interna

bf = largura da aba

tf = espessura da aba

tw = espessura da alma

R = raio da concordância

Estacas de aço ou metálicas

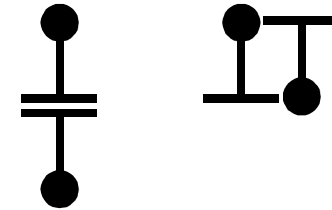
Perfil	Tipo	Dim.	Peso kgf/m	Padm kN
Simples	H	6"x6"	37	350
	I	10"x4 _{5/8} "	37,5	350 a 400
	I	12"x5 _{1/4} "	60	600
Duplo	2I	10"x4 _{5/8} "	75	700 a 800
	2I	12"x5 _{1/4} "	120	1200

Metálicas – trilhos soldados

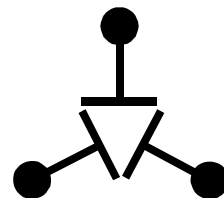
- Peso de 25 a 57kgf/m
- Um trilho: $P_{adm}=50$ kN



- Dois trilhos: $P_{adm}=300$ kN



- Três trilhos
 - 2x25: 600 kN
 - 3x32: 800 kN
 - 3x37: 1000 kN



Metálicas

- Obs.: trilhos usados desconta-se 10% da área (desgaste)
- **Vantagens**
 - Não provocam vibração
 - Grande capacidade de carga
 - Facilidade de transporte e manuseio
 - Facilidade de cortes e emendas
 - Comprimentos elevados (80m)
 - Facilidade de cravação
 - Resistência à flexão
- **Desvantagens**
 - Custo elevado
 - Corrosão em trechos desenterrados (para o trecho enterrado sempre ok, independente do N.A. Soluções: pintura epóxi, proteção catódica ou encamisamento).

Metálicas



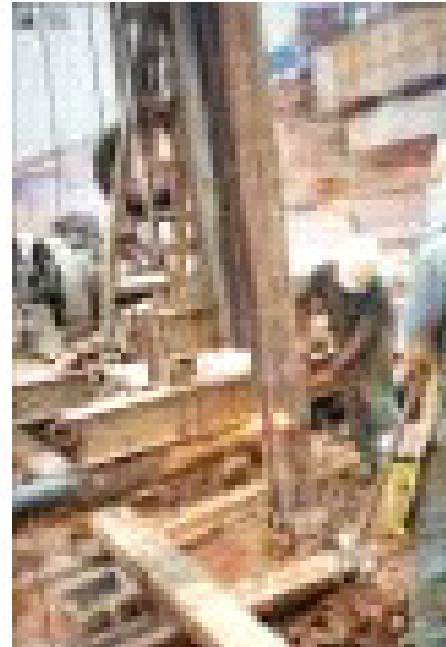
Guia para cravação



açamento

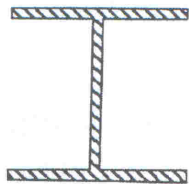


Metálica - emenda

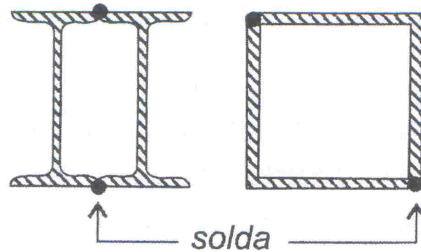


Seção transversal perfis metálicos

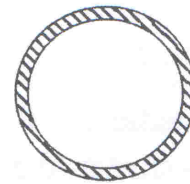
Perfil de chapa soldada



Cantoneira soldada

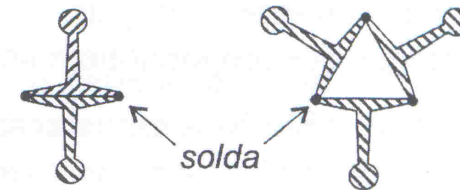


Perfil laminado soldado



Tubos

Trilhos soldados

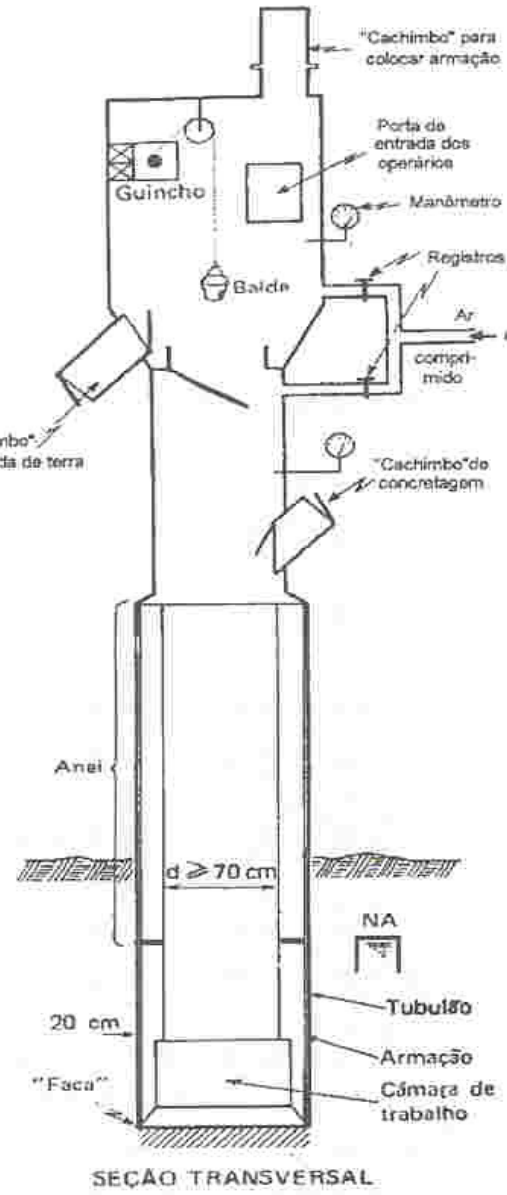
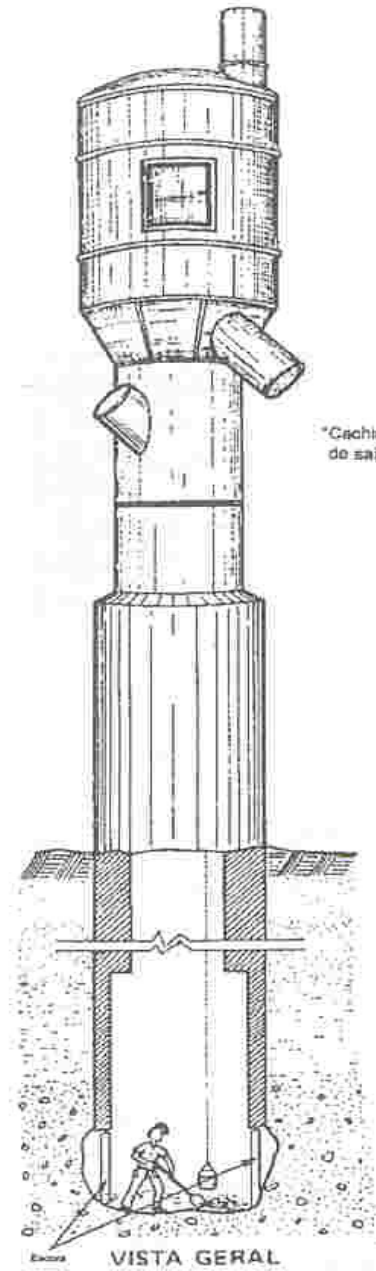


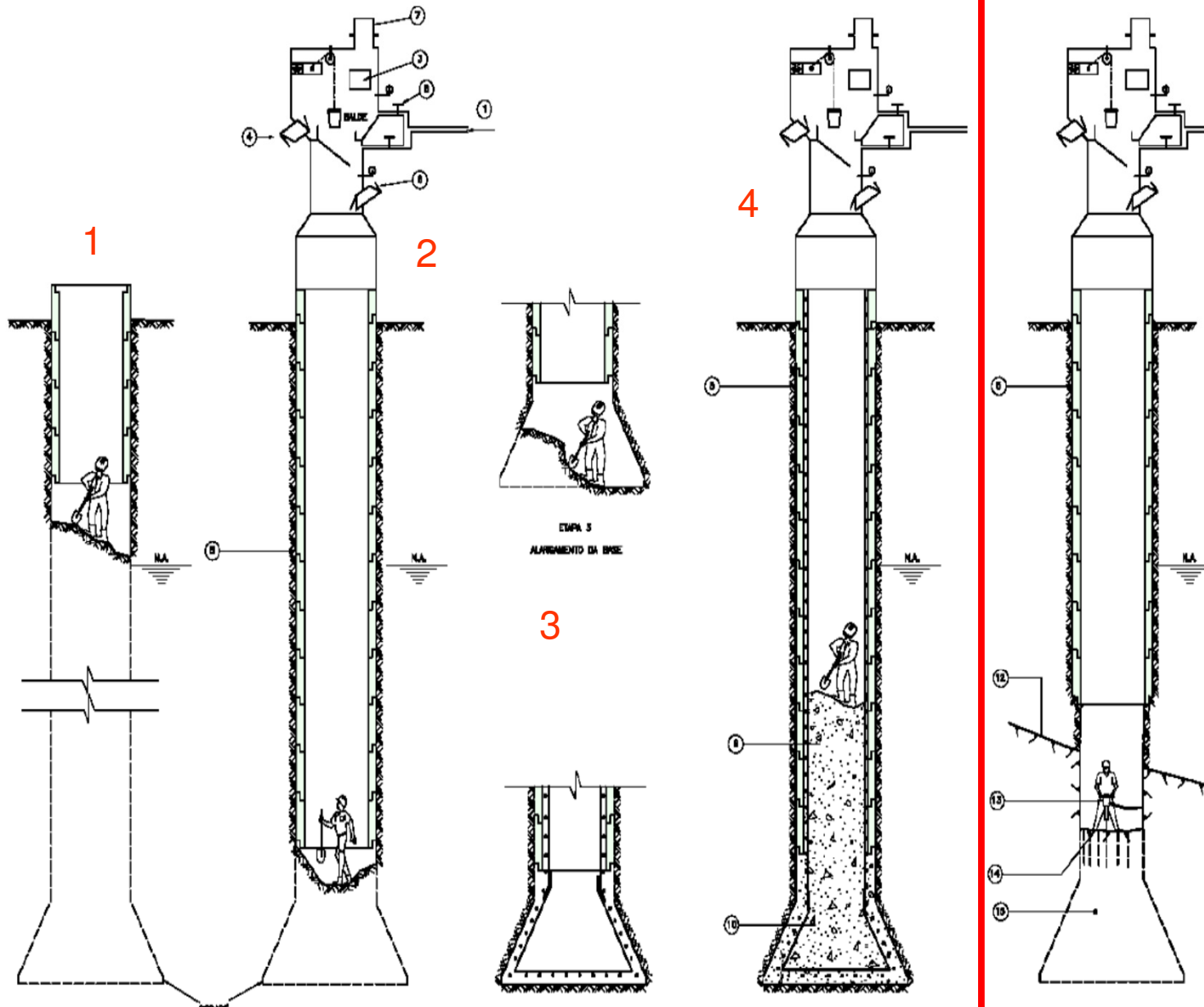


Tubulão

(céu aberto ou ar comprimido)

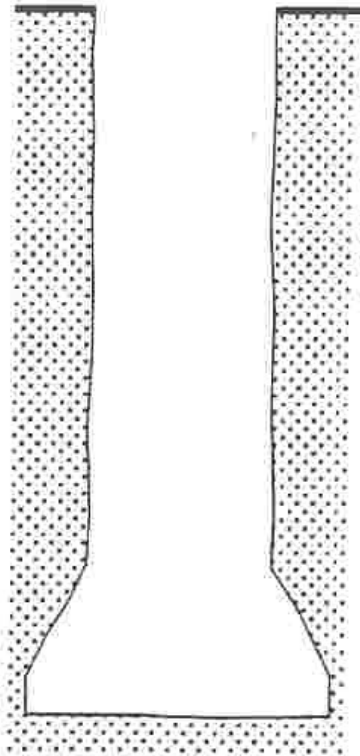
Similares a estacas de grande diâmetro
Diferença: no tubulão sempre há escavação
manual em profundidade em algum momento
da execução (vide figuras a seguir)



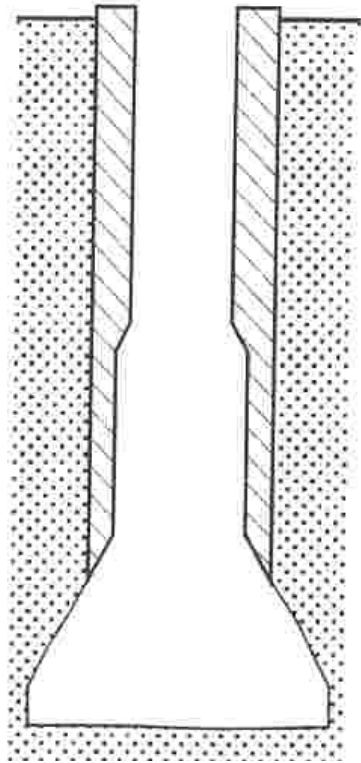


Em solo

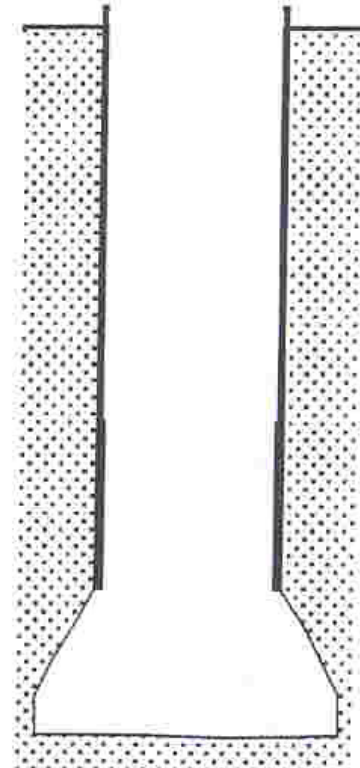
Em solo e rocha



**Sem
revestimento**



**Com
revestimento de
concreto**



**Com
revestimento
metálico**

Estacas concreto moldadas in loco

Brocas

- Rudimentares, escavadas sem revestimento, manualmente (trado)
- Quase sempre restritas a muros, guaritas, edículas, etc. (pequenas cargas)

Diam (cm)	Padm (kN)
25	60
30	80

Estacas concreto moldadas in loco

Brocas

- **Vantagens**
 - Facilidade construtiva
 - Custo reduzido
 - Ausência de vibração
- **Desvantagens**
 - Baixas cargas
 - Concreto sem controle
 - Profundidade limitada (5 m)
 - Limitada a solos coesivos

Estacas concreto moldadas in loco

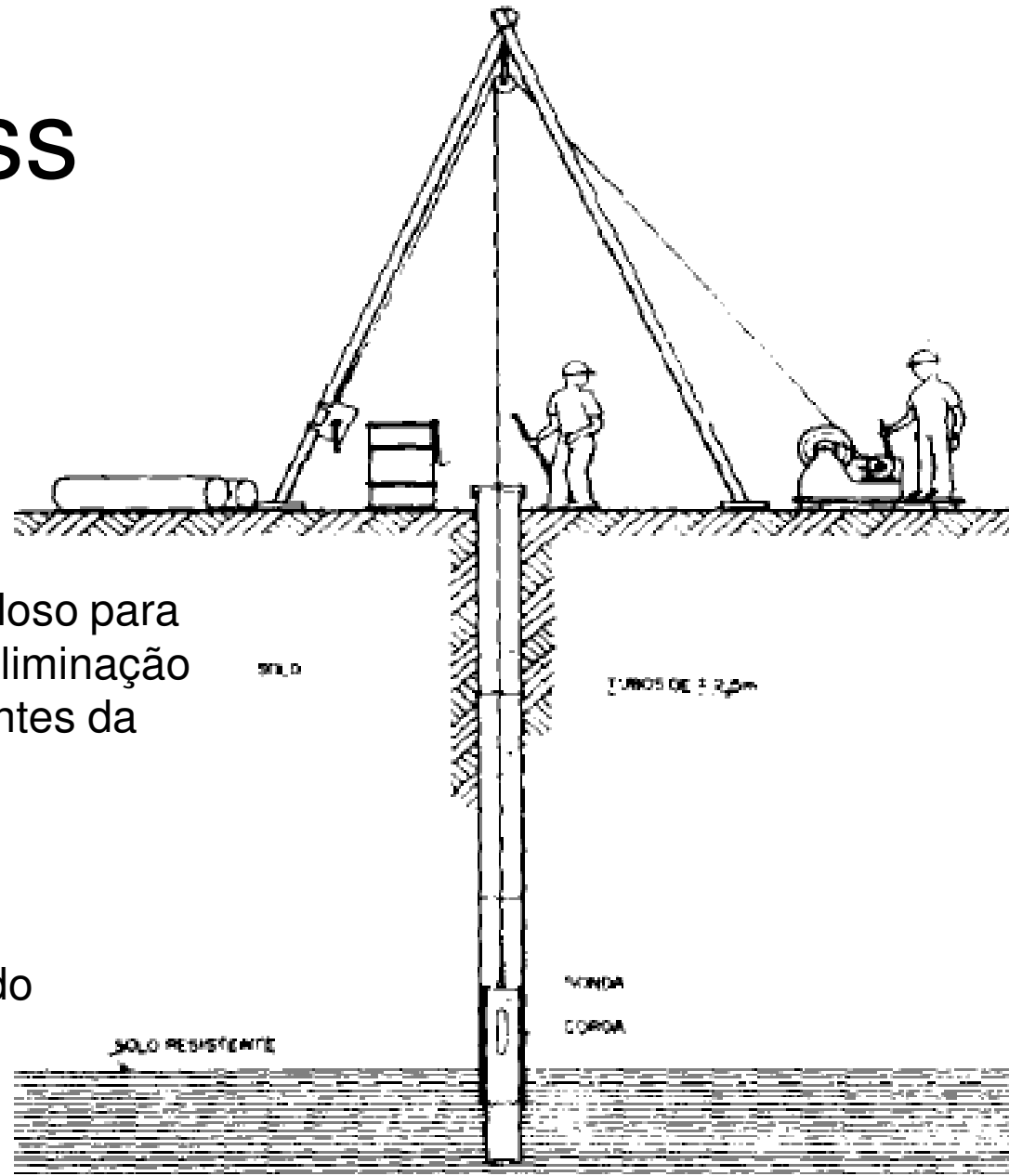
Tipo Strauss

- Executada com tubo de revestimento posteriormente recuperado.
- Escava-se dentro do tubo com piteira.
- Auxílio de água para facilitar escavação.

Diam (cm)	Padm (kN)
25	200
32	300
38	400
45	600

Tensão adm. concreto
4000 kPa = 4 MPa

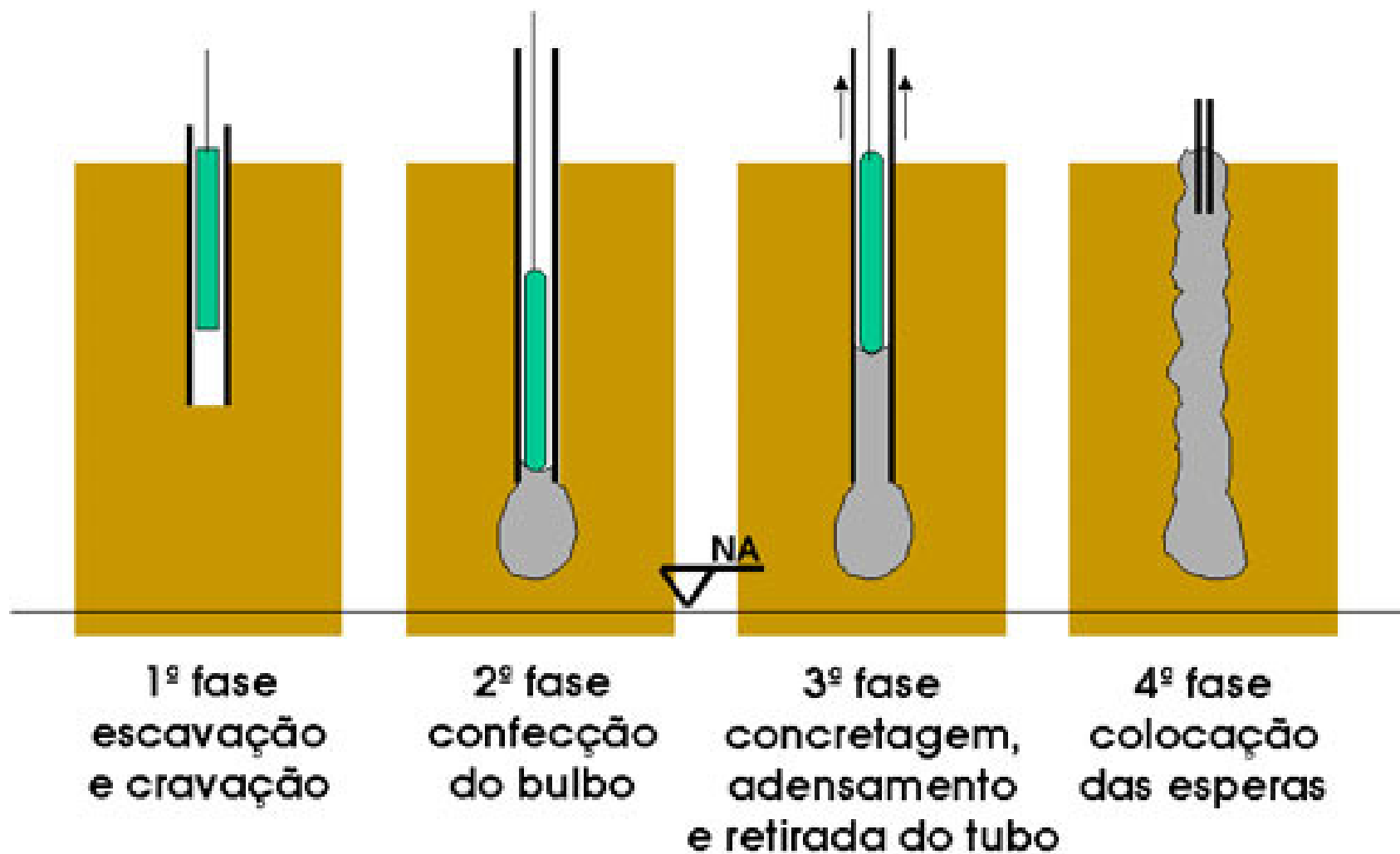
Strauss



Sempre parar em solo argiloso para permitir lavagem do furo (eliminação de restos de escavação) antes da concretagem

Tecnicamente rudimentar

Qualidade final nas mãos do executor



Obs.: raramente há bulbo





Estacas concreto moldadas in loco

Tipo Strauss

- Vantagens
 - Pequena vibração
 - Execução em locais difícil acesso devido a ajuste do tripé
 - Profundidades variáveis (15m)
 - Superfície irregular concreto (atrato)
 - Custo reduzido.

Estacas concreto moldadas in loco

Tipo Strauss

- Desvantagens
 - Eventual estrangulamento do fuste com velocidade de retirada da camisa.
 - Atrito elevado camisa-concreto: concreto sobe com camisa.
 - Deslocamentos devido ao apiloamento de estacas vizinhas.
 - Concreto deve ser bem executado em águas agressivas.
 - Contra-indicações: espessas camadas de argila orgânica mole (estrangulamento), areias finas fofas, matacões.

Estaca Franki

Variações: com camisa metálica
 com bulbos intermediários

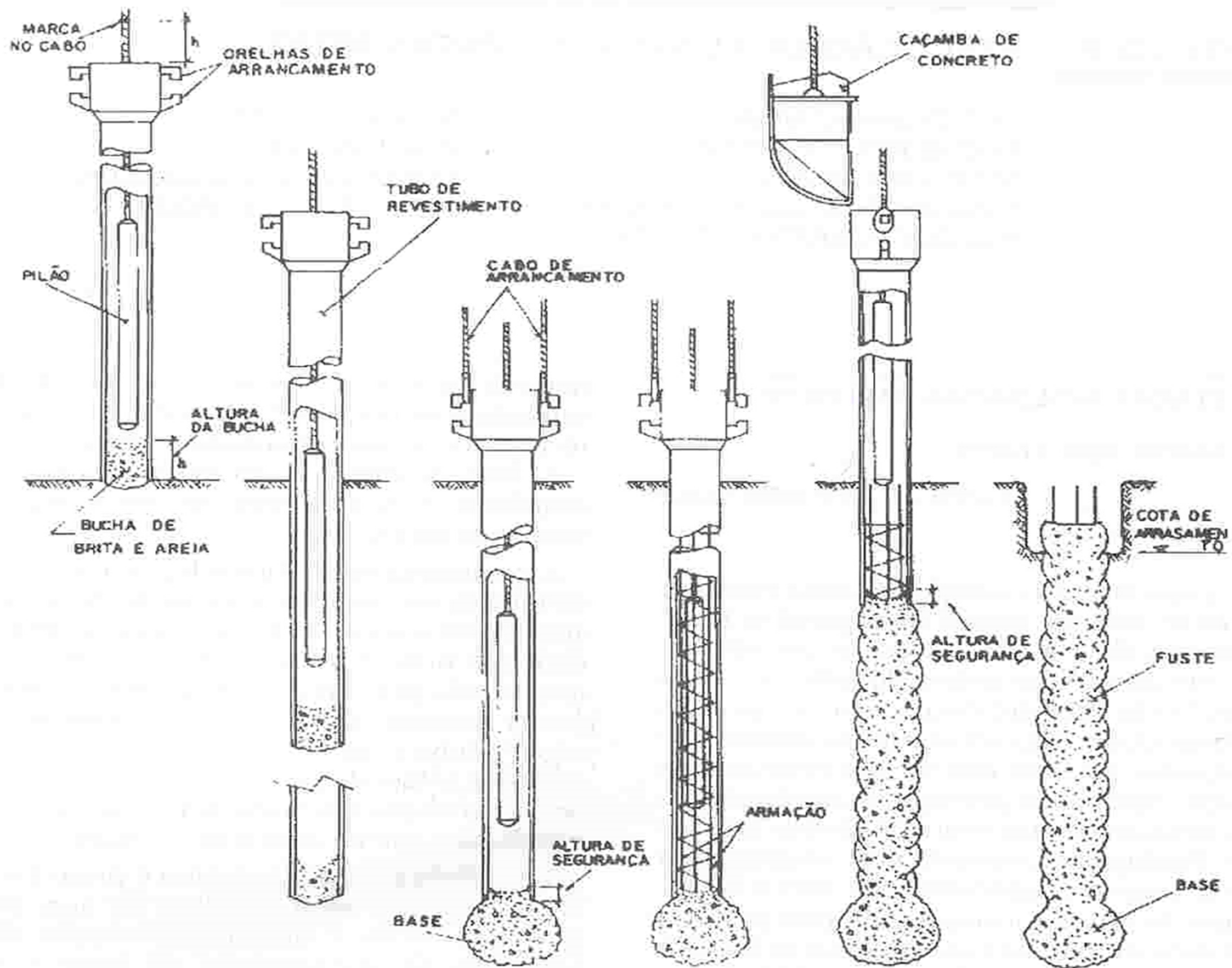
Estaca moldada in loco - Franki

- Cravada com ponta fechada
- Bucha seca de 1m na ponta do tubo
- Base alargada

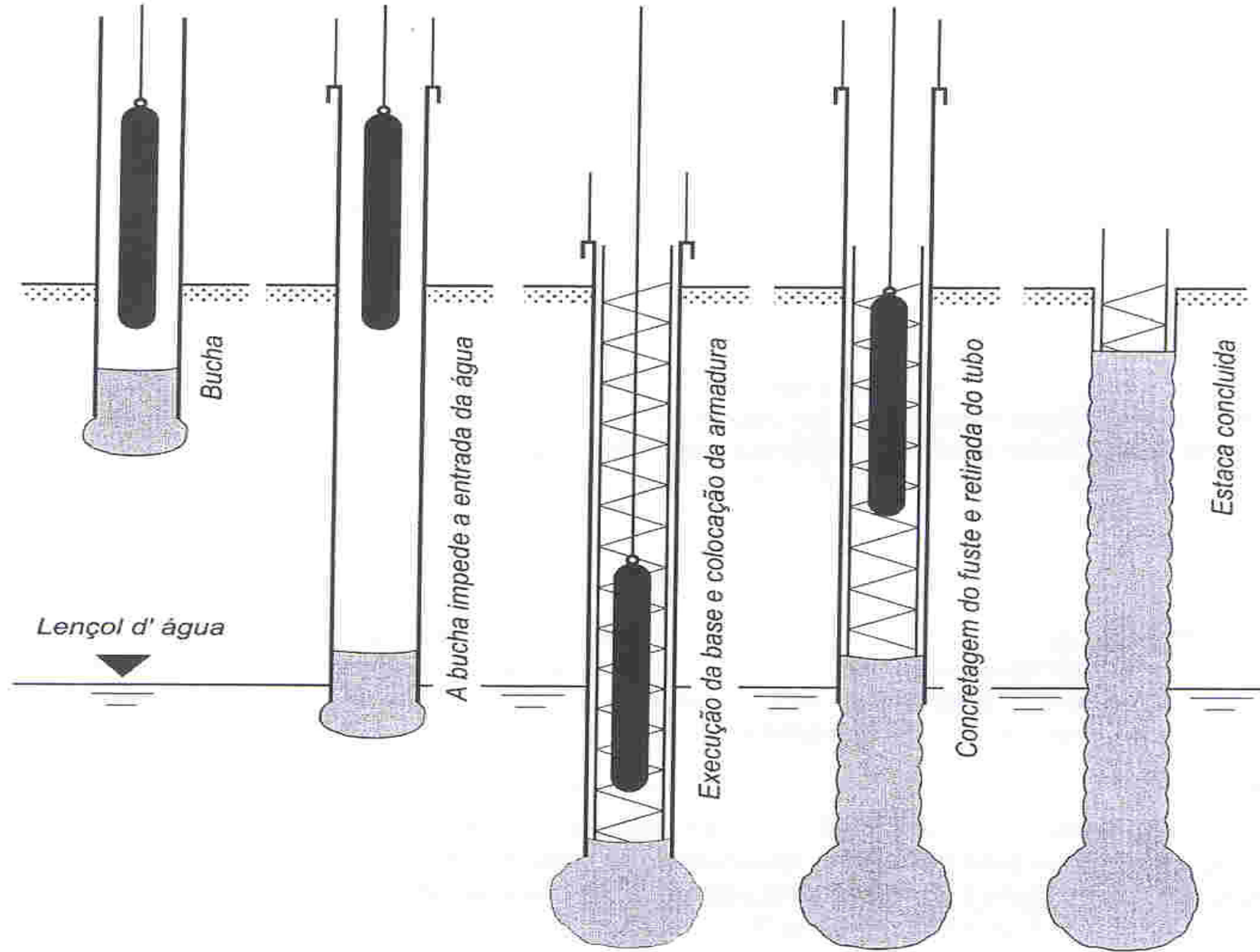
Tensão adm. concreto
6 MPa

Diam (cm)	Padm (kN)
35	550
40	700
52	1300
60	1700

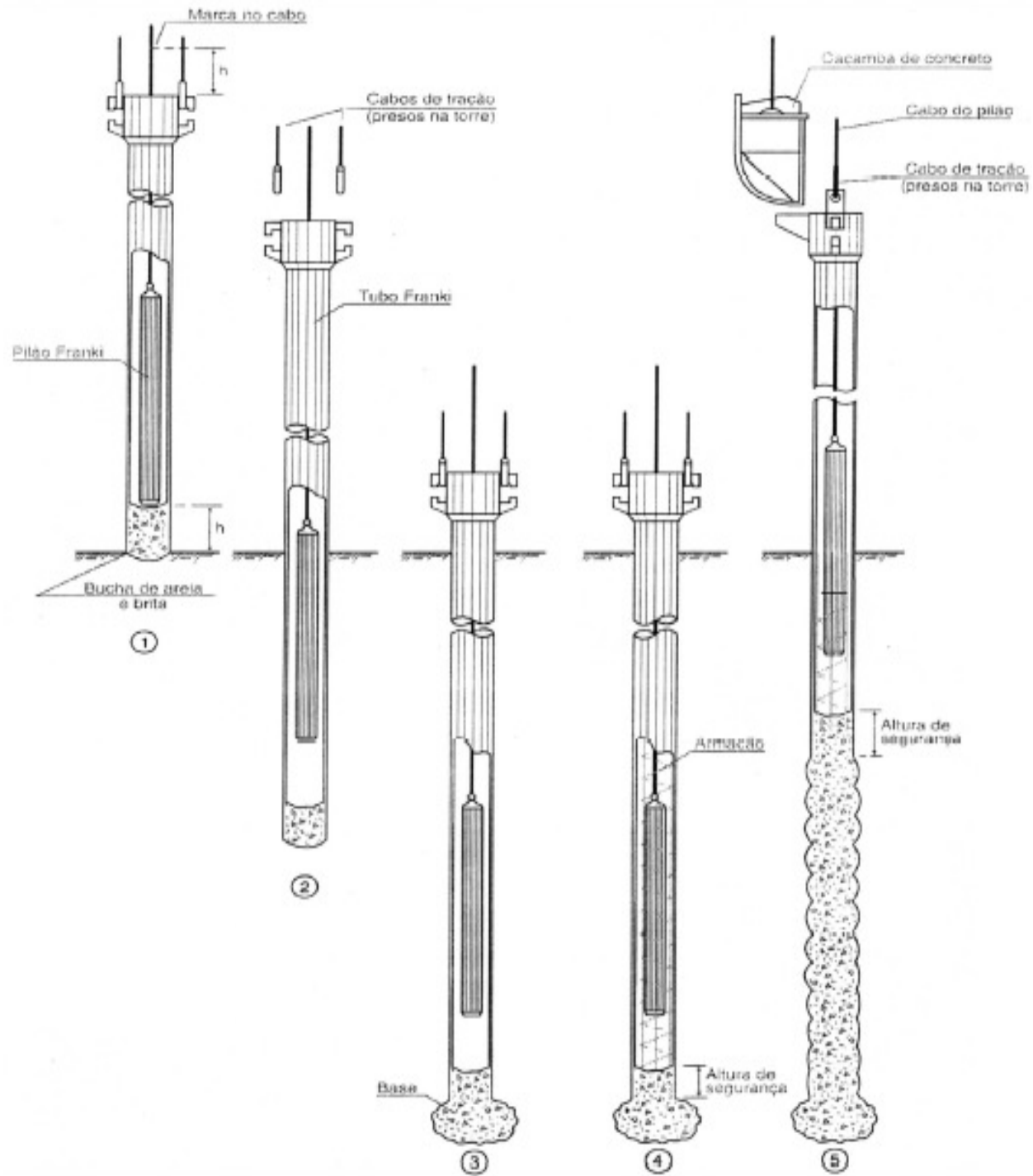
Seqüência construtiva típica estaca Franki



Seqüência construtiva típica estaca Franki padrão

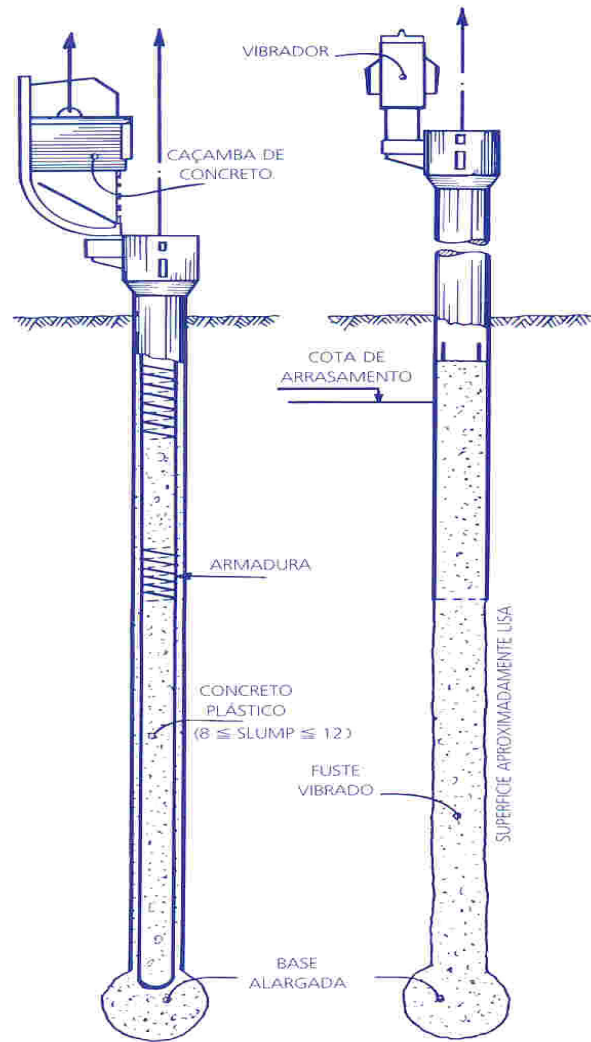


Franki

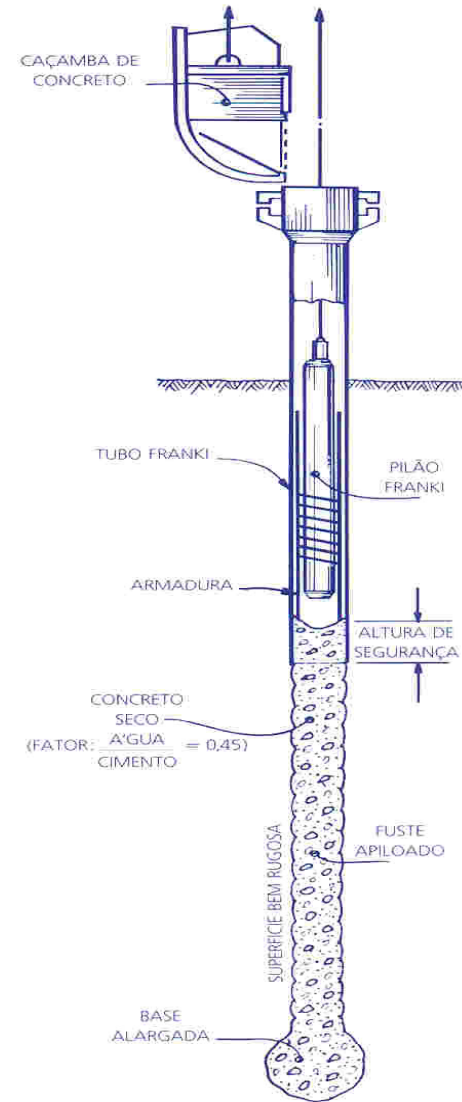


CONCRETAGEM DO FUSTE

VIBRADO



APILOADO







Franki - vantagens

- Grande capacidade de carga
- Grandes comprimentos 35m
- Sem desperdício concreto (nega)
- Grande atrito solo-estaca
- Base alargada-melhor distribuição cargas

Franki - desvantagens

- Grande trepidação e ruído
- Estrangulamento fuste solos moles
- Empolamento em argilas rijas e duras
- Ataque de águas agressivas
- Contra-indicações: camadas espessas de solos moles ou areias finas, argilas rijas, matacões, vizinhos em más condições

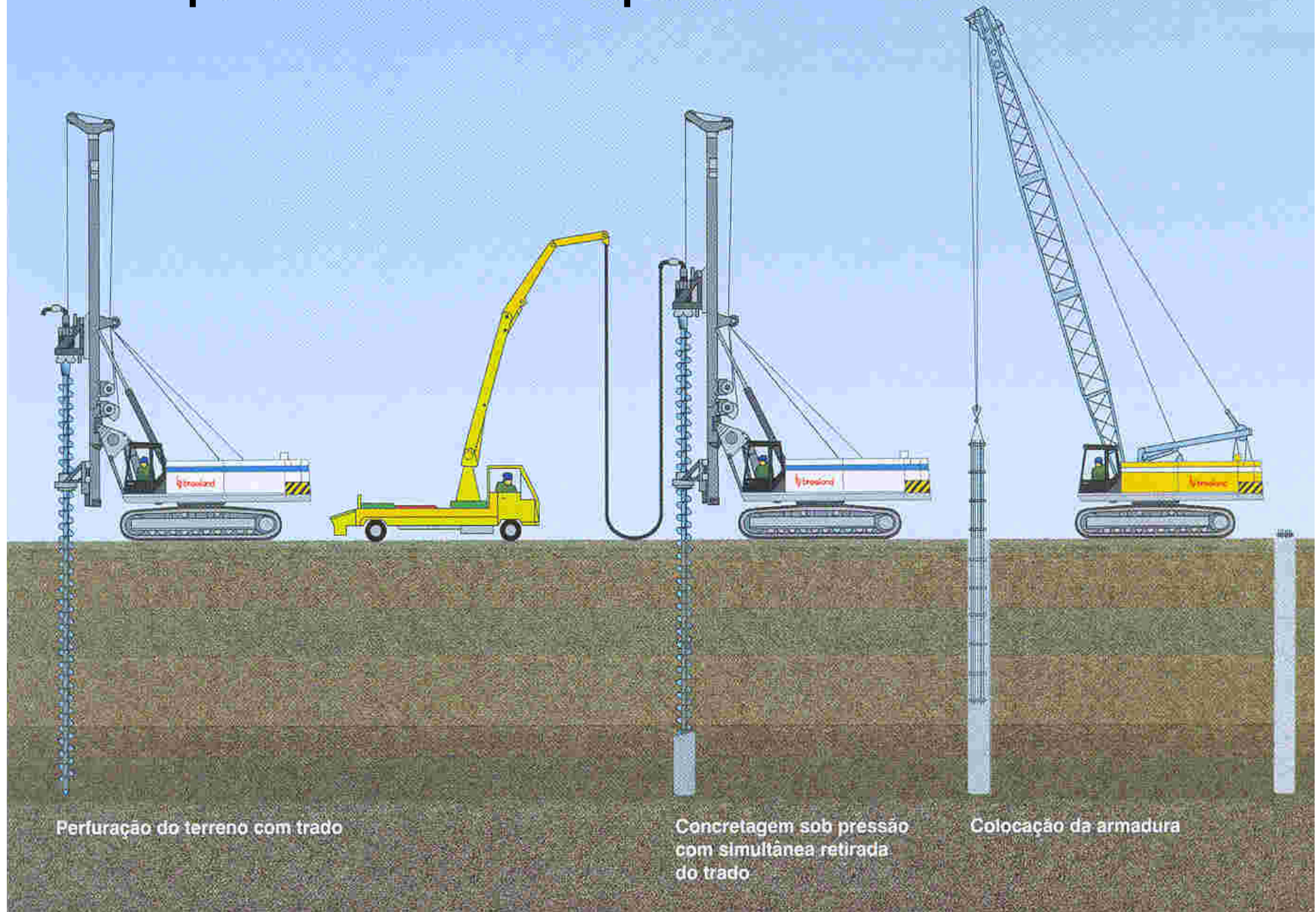
Hélice contínua

- $P_{max}=4000$ kN
- Diam. max= 100 cm
- $L_{max}=24$ m
- Baixo ruído e vibração
- Escavada com hélice mecânica
- Concretagem simultânea à retirada da hélice
- Limpeza da hélice
- Colocação da armadura

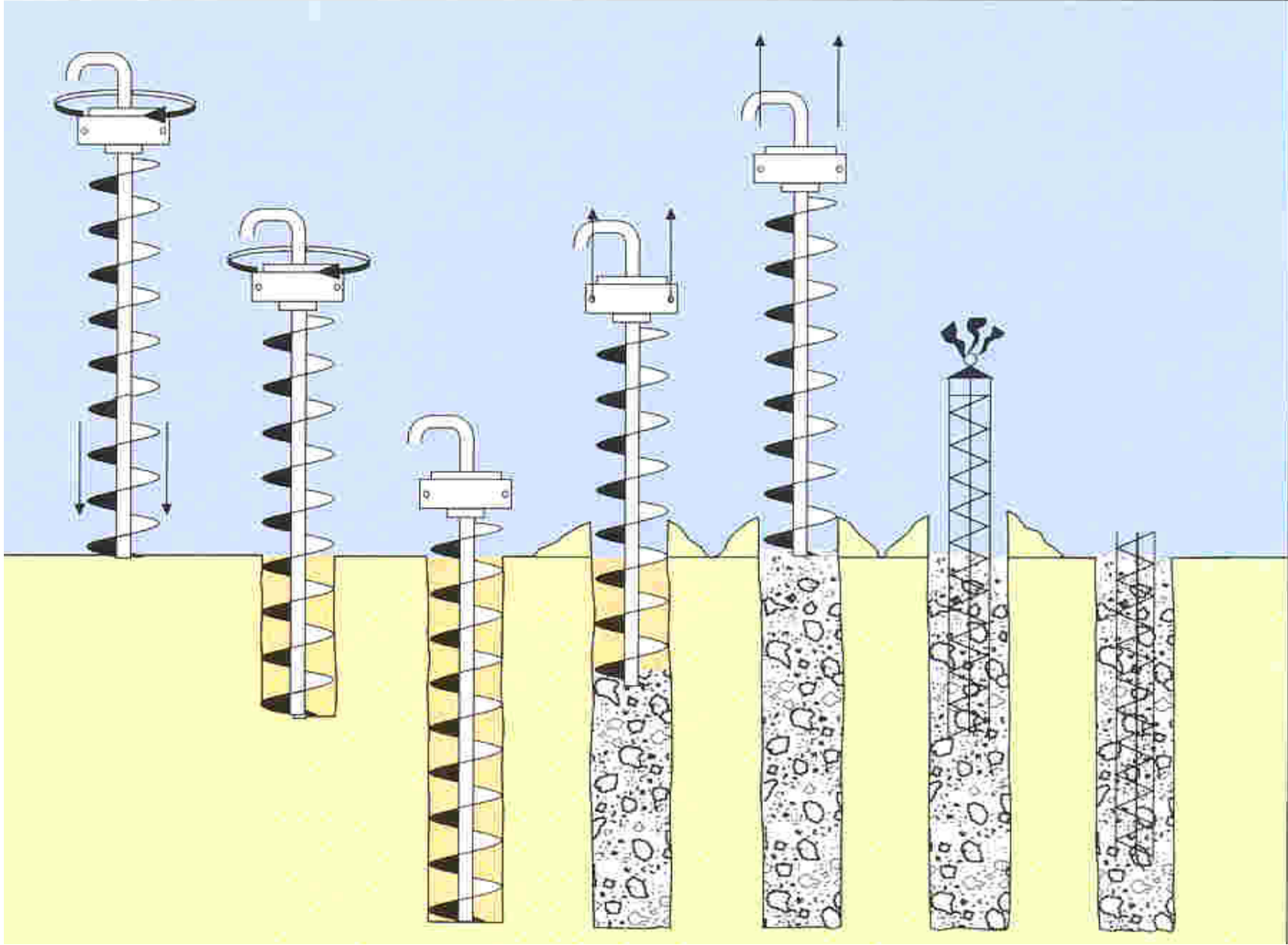
Estacas Hélice Continua



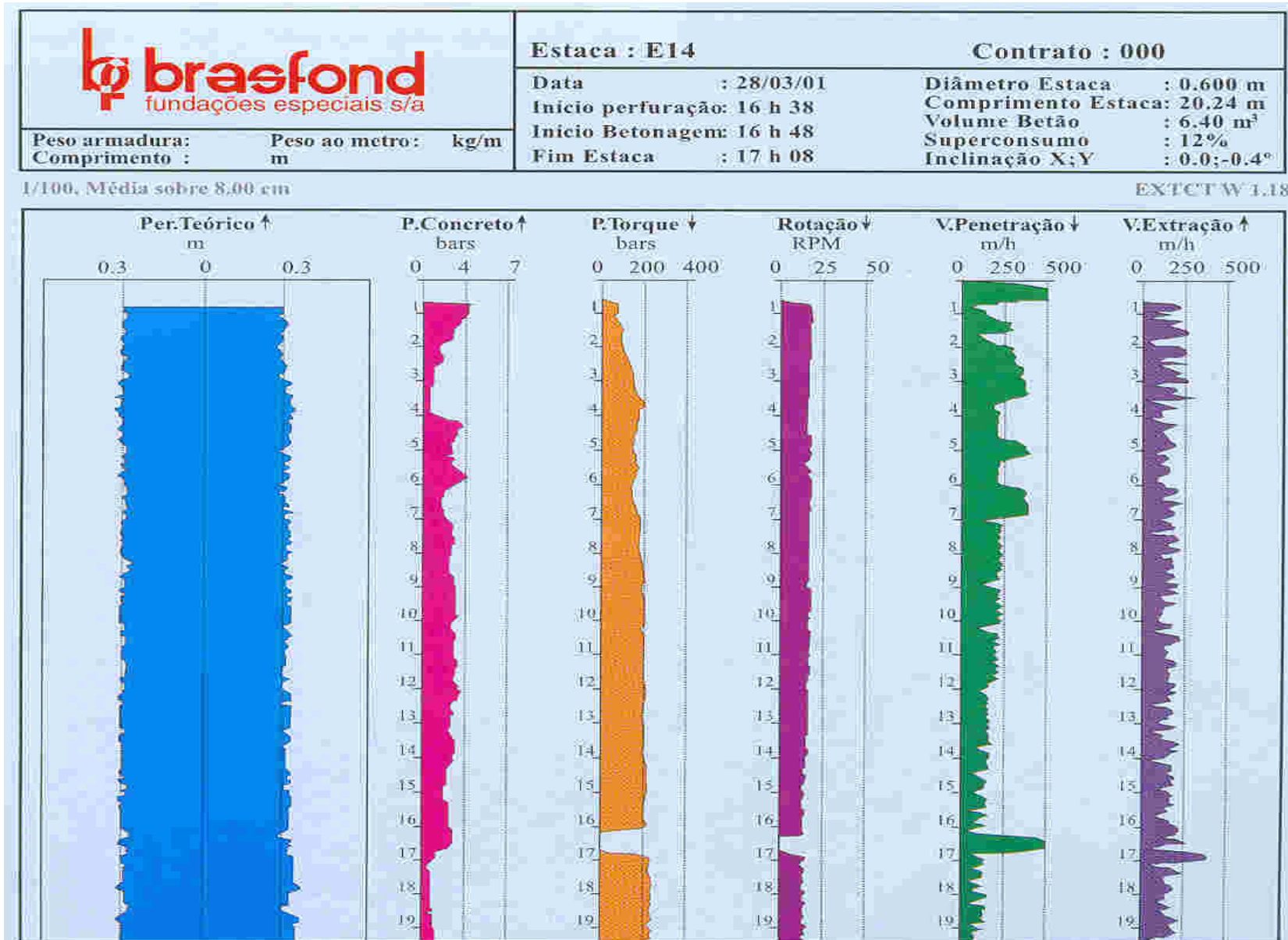
Seqüência construtiva típica estaca Hélice Contínua







Acompanhamento e controle durante a execução da estaca Hélice Contínua



Estaca Ômega

Estacas escavadas com grande capacidade de carga

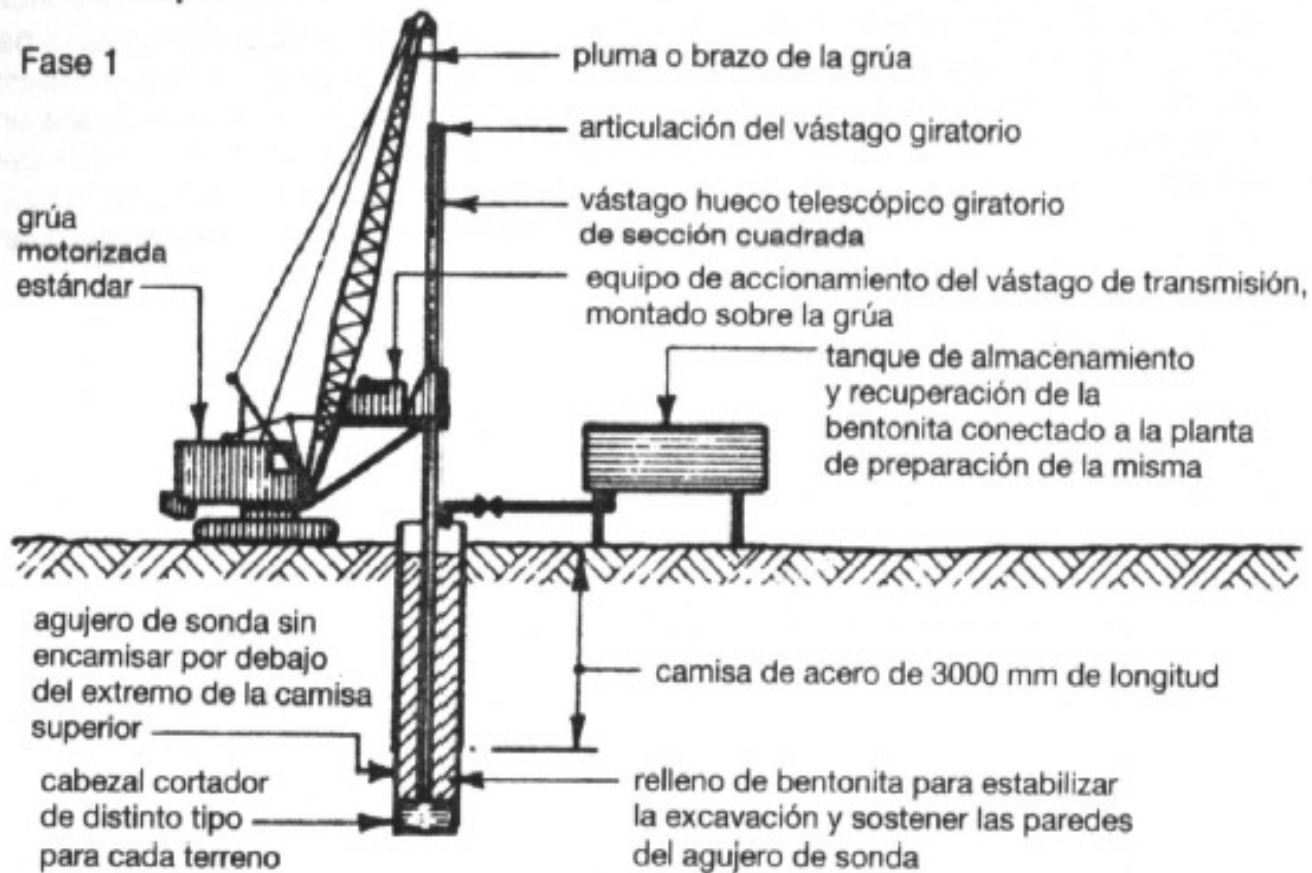
Estação

- Cilíndricas ou grande diâmetro
- Escavação mecânica com trado helicoidal, caçamba ou perfuração com circulação de água
- Diam. de 70 até 300cm
- Camisa Metálica
- Abaixo do N.A.: lama bentonítica ou polimérica

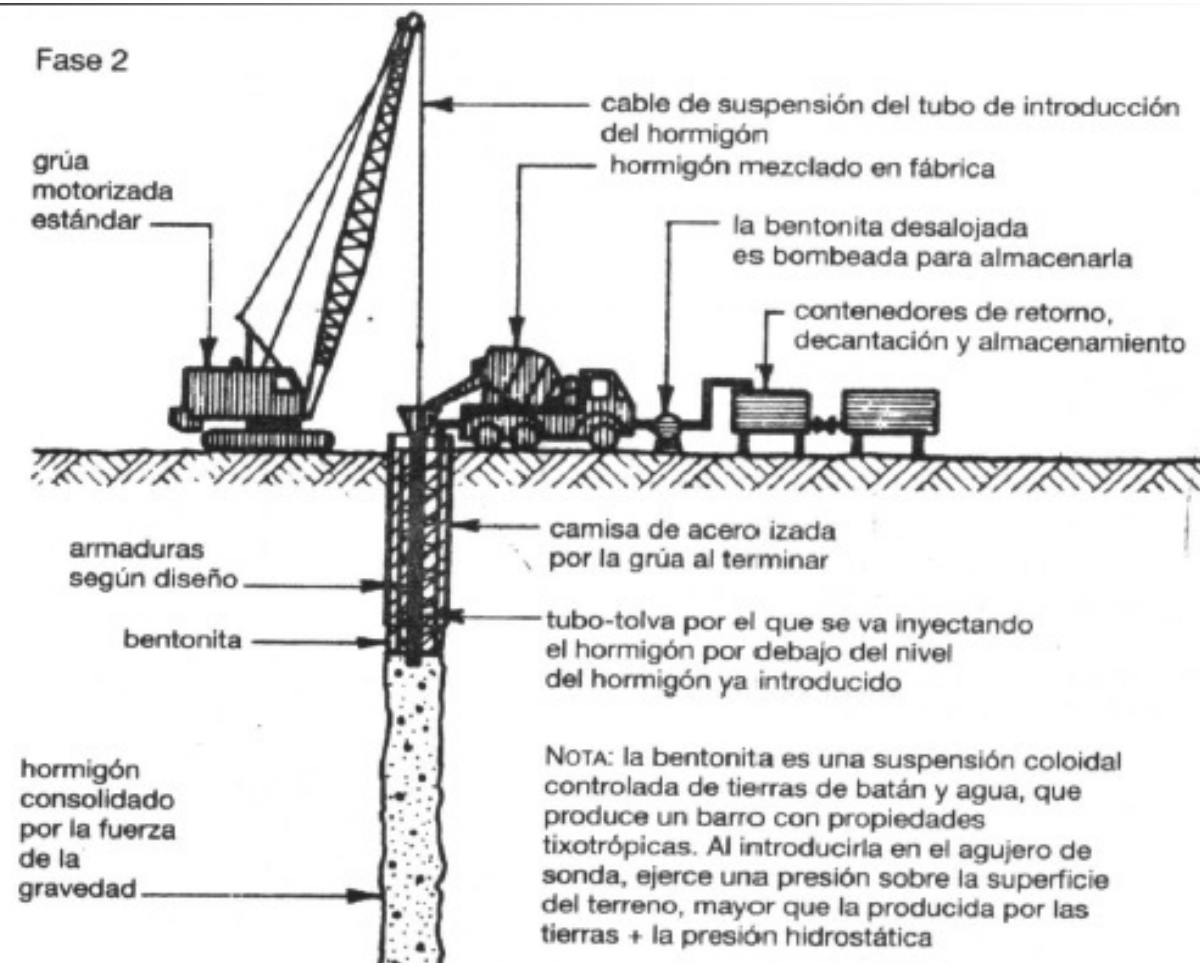
Estacão

Detalles tipo:

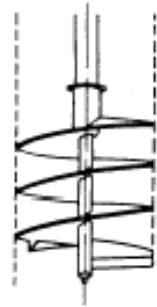
Fase 1



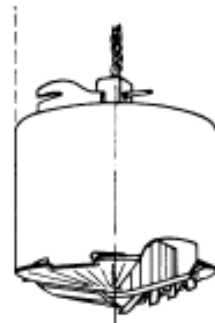
Estacão



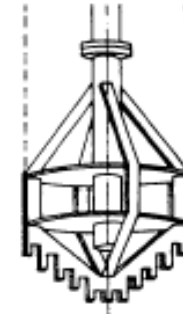
Estacão



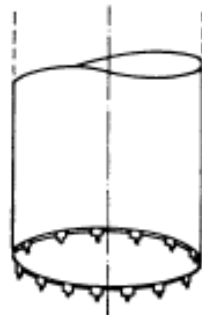
a) Trado helicoidal



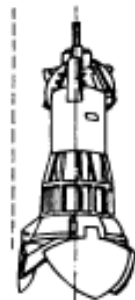
b) Caçamba



c) Ferramenta cortante dentada



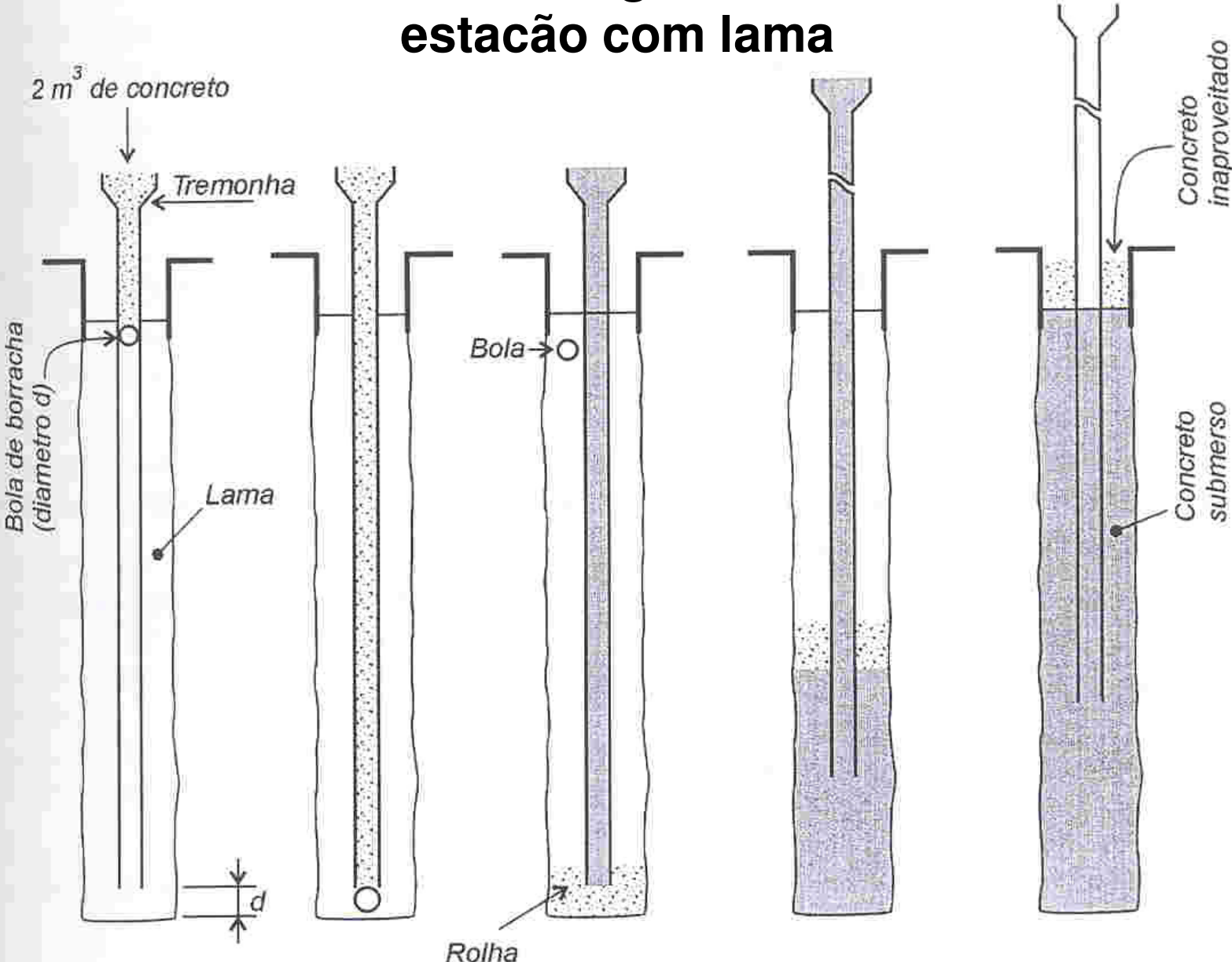
d) Coroa rotativa



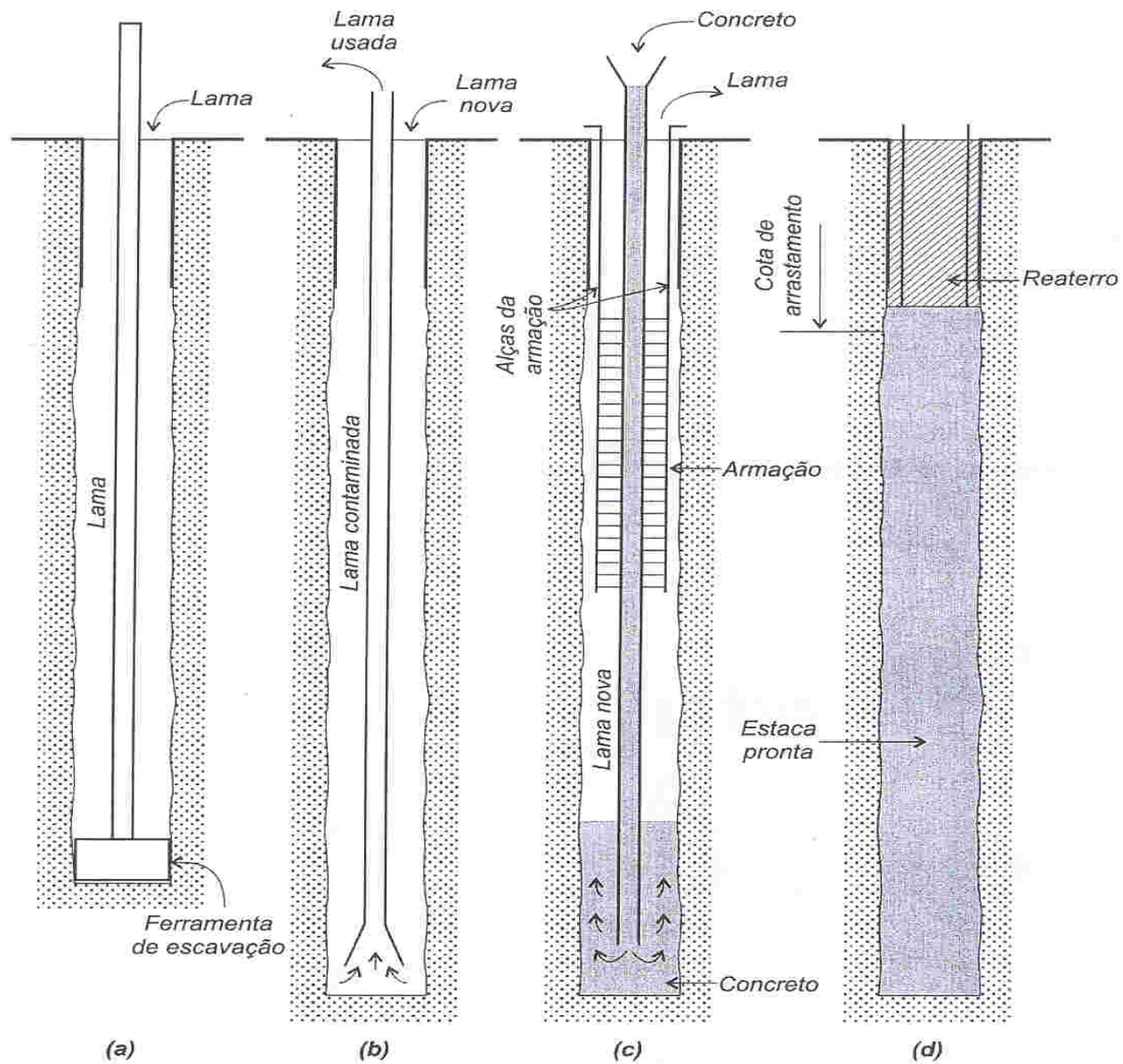
e) Martelo - piteira

-2

Concretagem com tubo tremonha – estação com lama



Concretagem estacão



Estacas escavadas - vantagens

- Grande capacidade de carga
- Possível execução abaixo do N.A.
- Grandes profundidades
- Ausência de vibrações

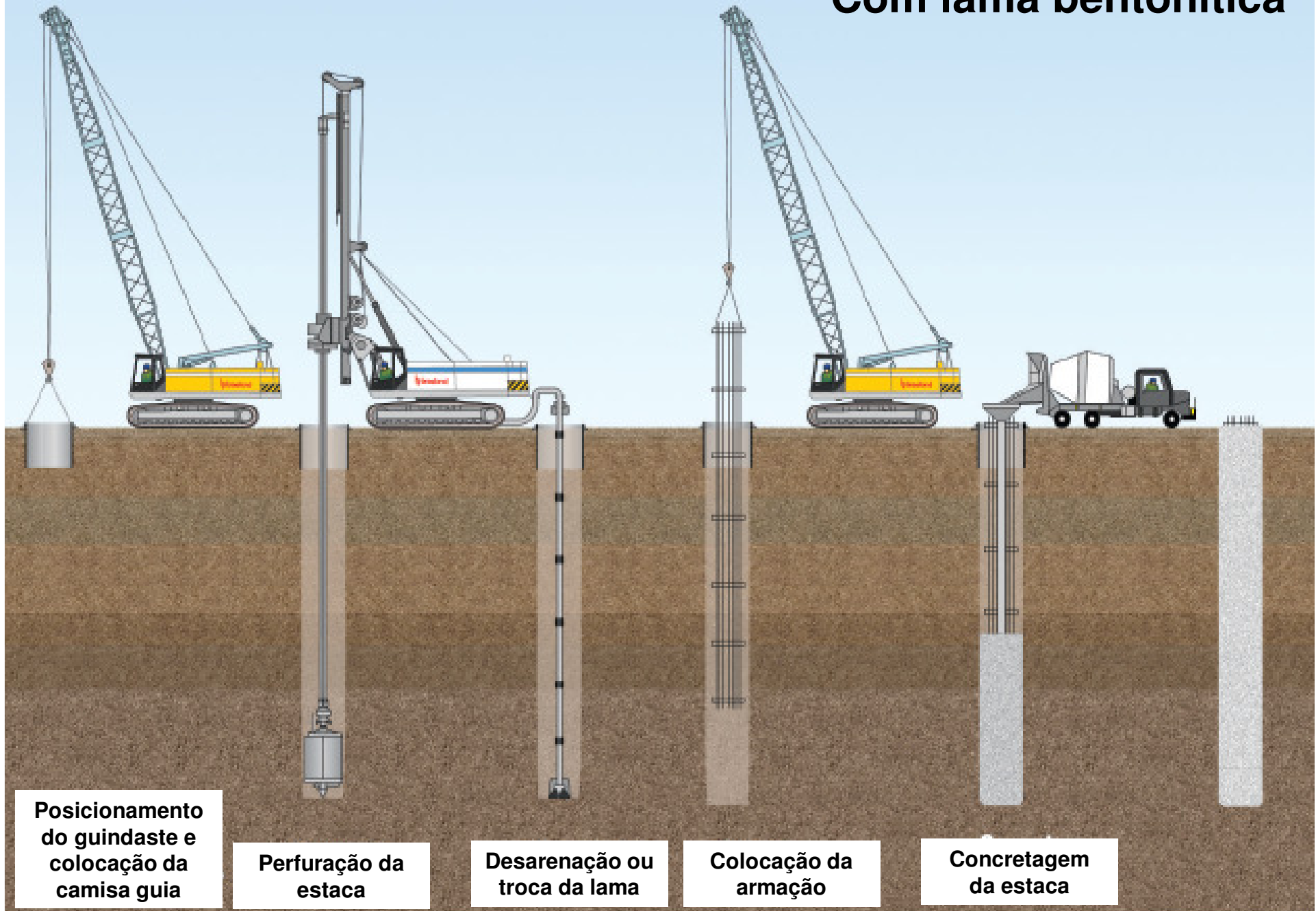
Estacas escavadas - desvantagens

- Aderência entre armadura e concreto prejudicada quando a lama é densa.
- Limpeza da ponta
- Custo elevado

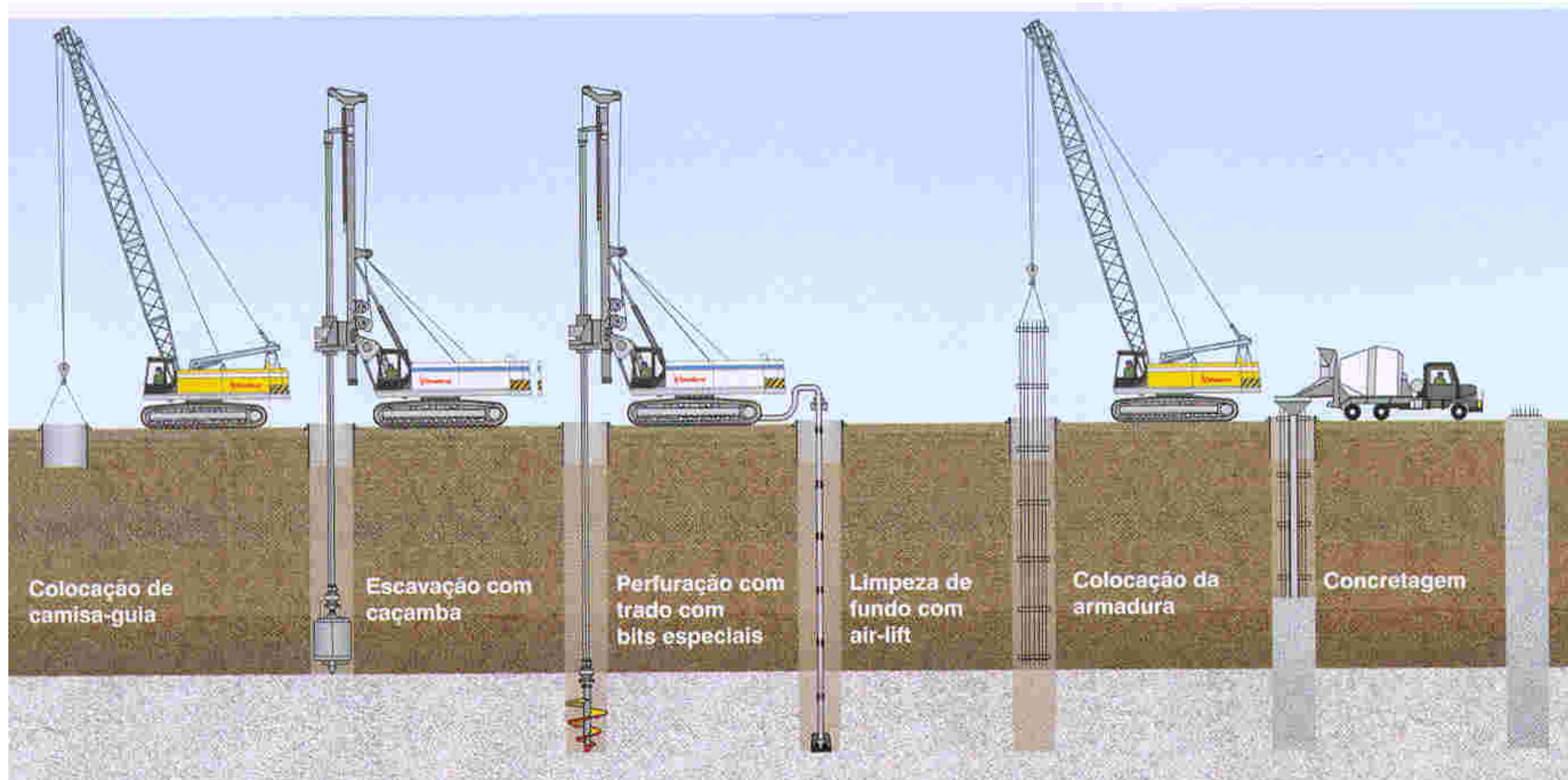
Concretagem de estação com camisa metálica



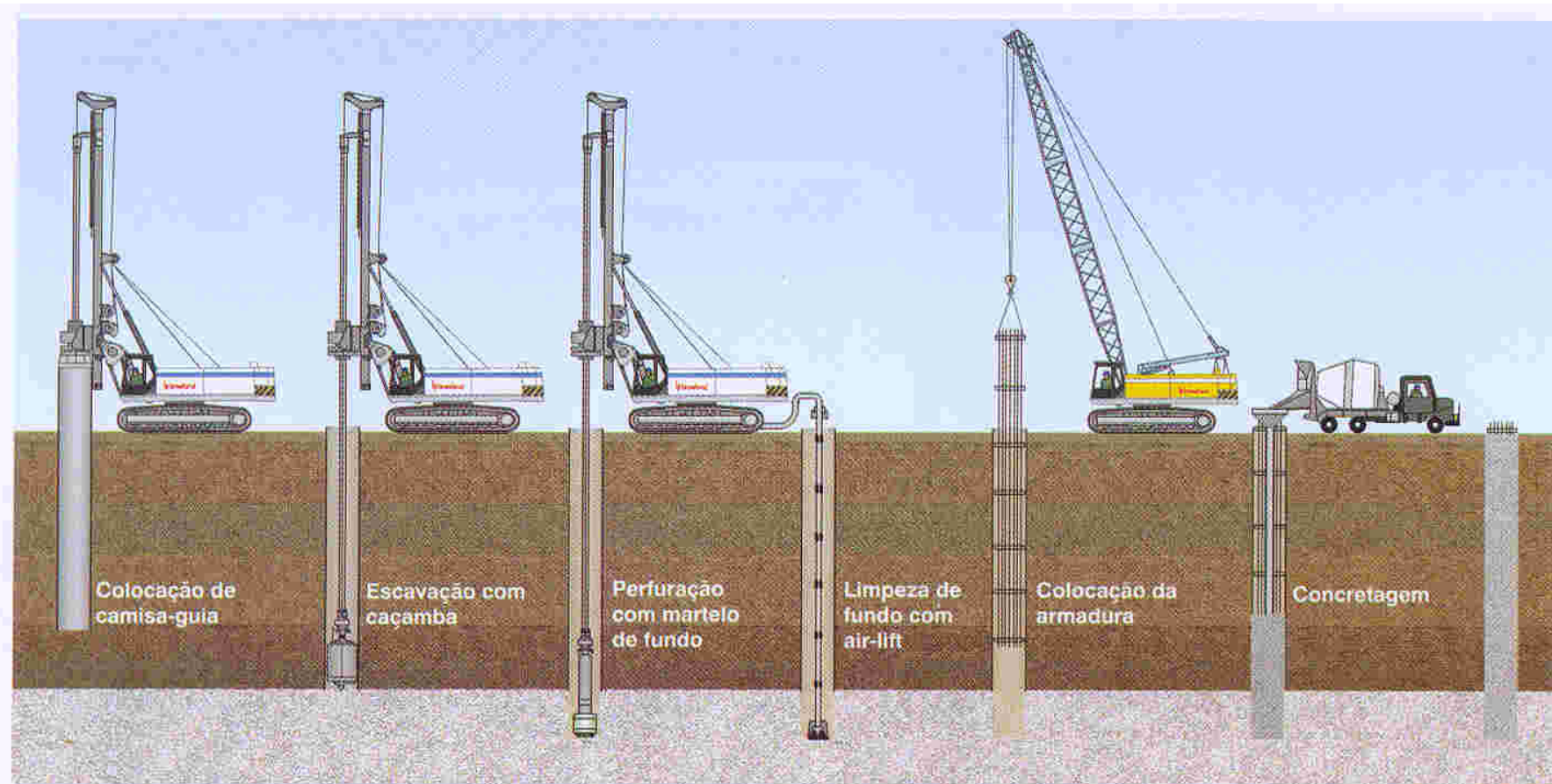
Com lama bentonítica



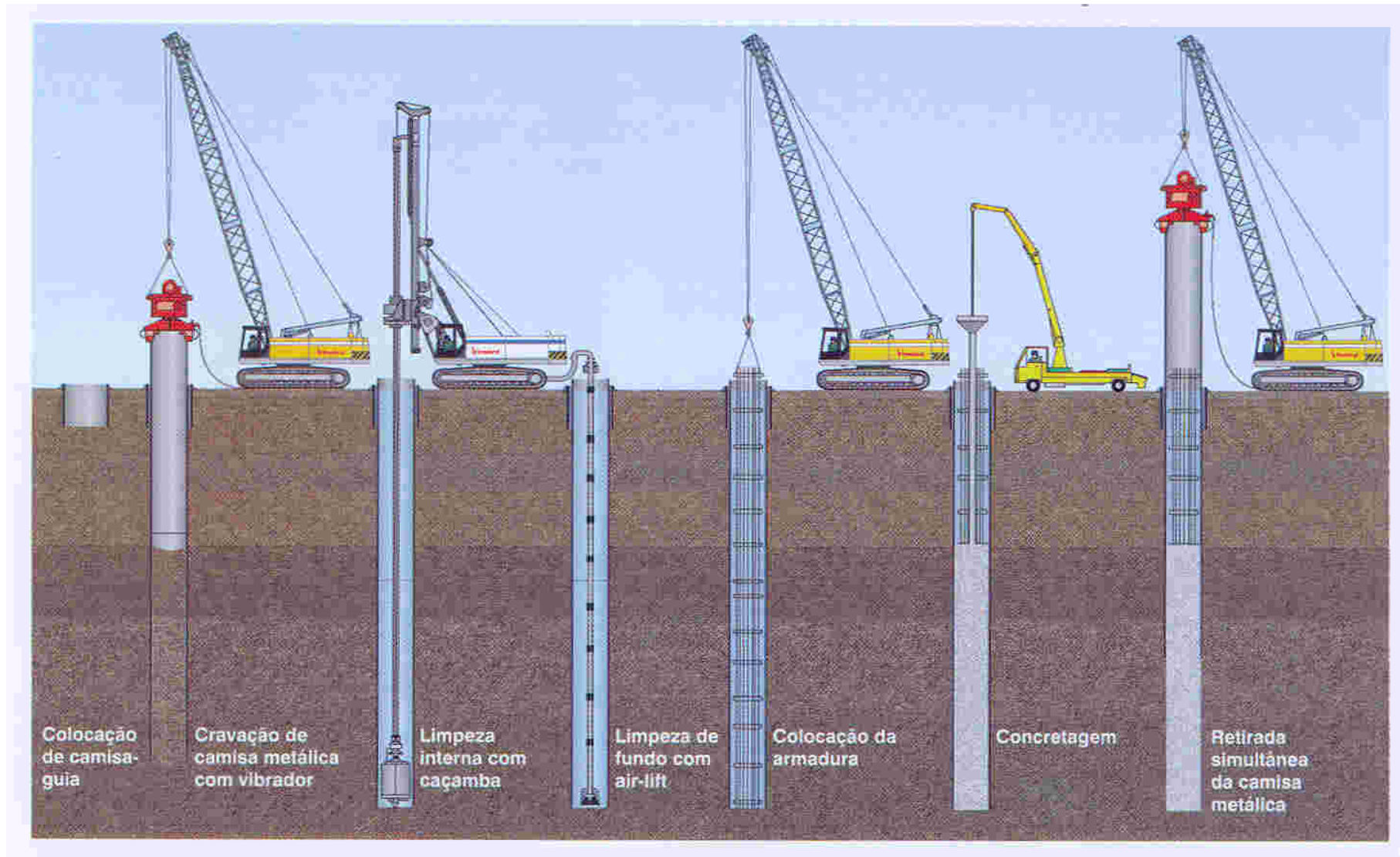
Com ponta em rocha



Camisa metálica definitiva



Camisa metálica recuperada

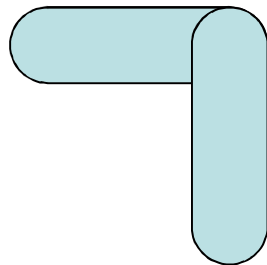
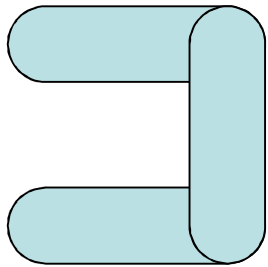


Estacas escavadas – barrette

Paredes Diafragma



Lamelas com espessura de 40 até 120cm
Usual de 60 a 80cm
Largura máxima de 400cm.



Parede diafragma

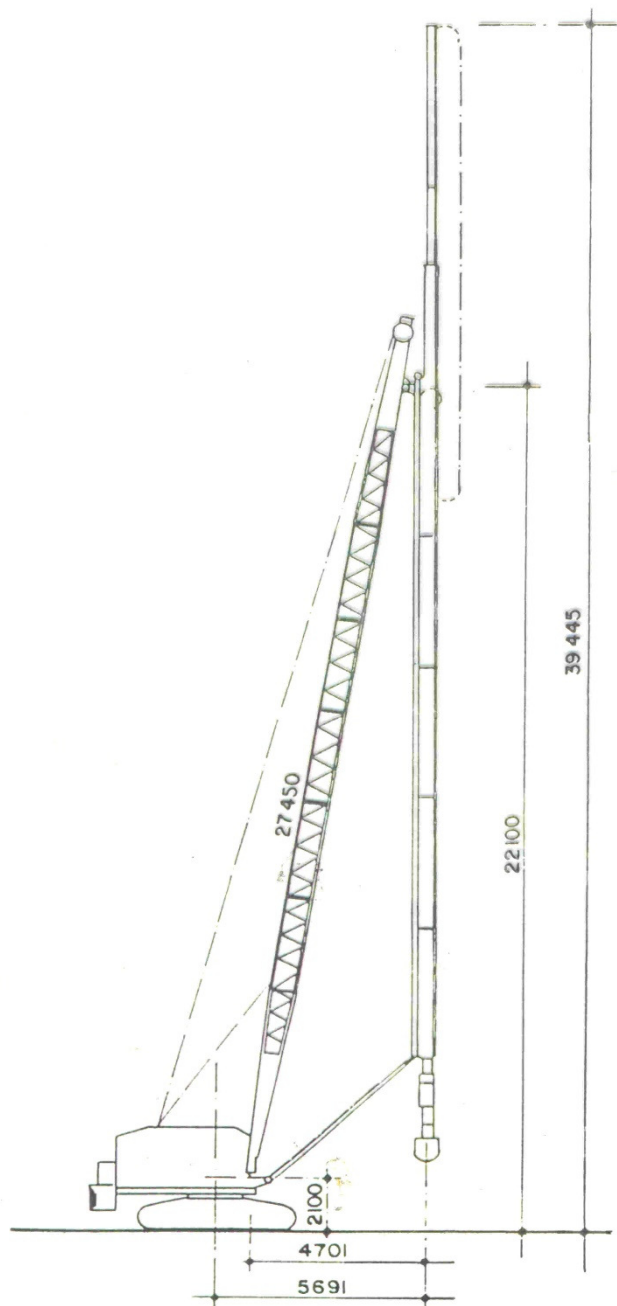
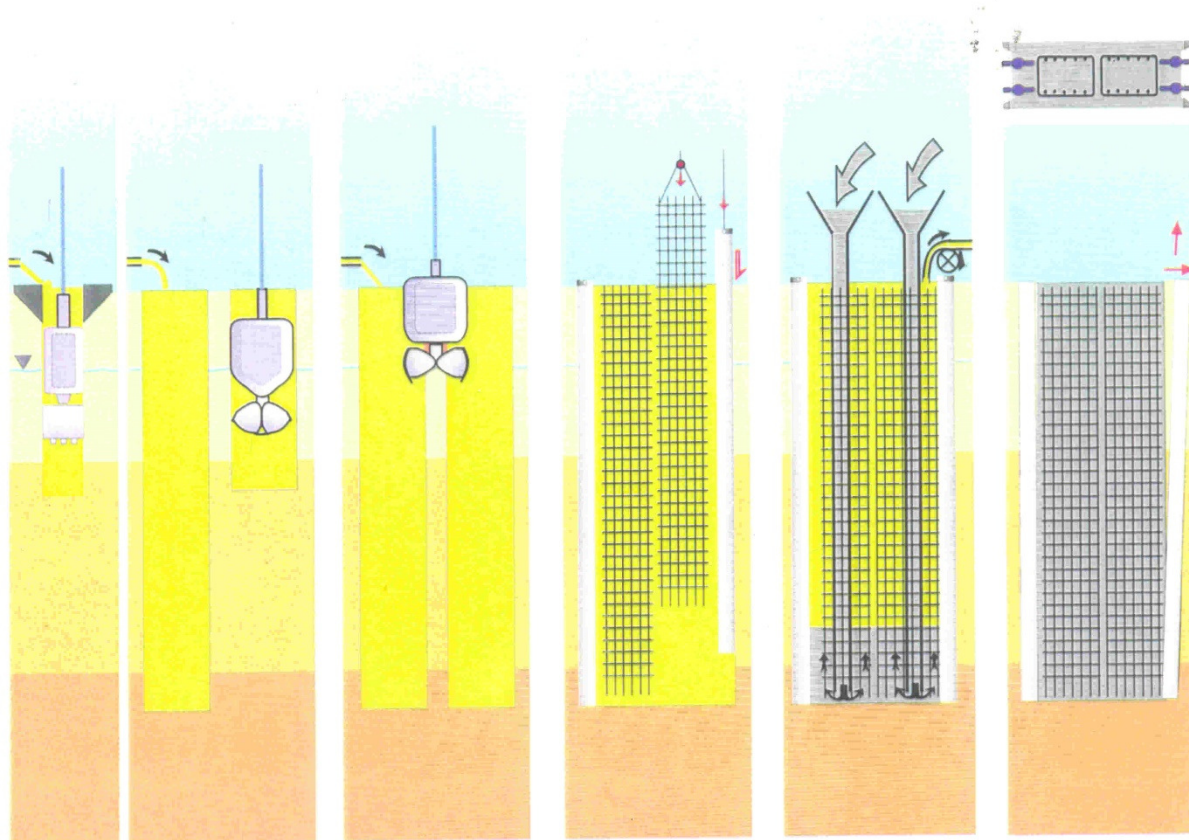


FIG. 27



- 0 réalisation des murets guides
- 1 excavation des passes primaires
- 2 excavation du merlon entre deux ouvertures
- 3 équipement d'un panneau : armature, tulie joint
- 4 bétonnage
- 5 extraction du tube joint, détail joints double waterstop

Estacas escavadas - barrette

- Vantagens: mesmo que escavadas, além de dispensar blocos de coroamento e também absorve grandes momentos fletores.





Metrô Linha 2 Estação Klabin - São Paulo / SP



Estaca Barrete de 7,00 x 1,00 x 48,00 m de profundidade (funcionando também como pilar) - Metrô Linha 2 Estação Klabin - São Paulo / SP

Estaca raiz / Estacas escavadas injetadas

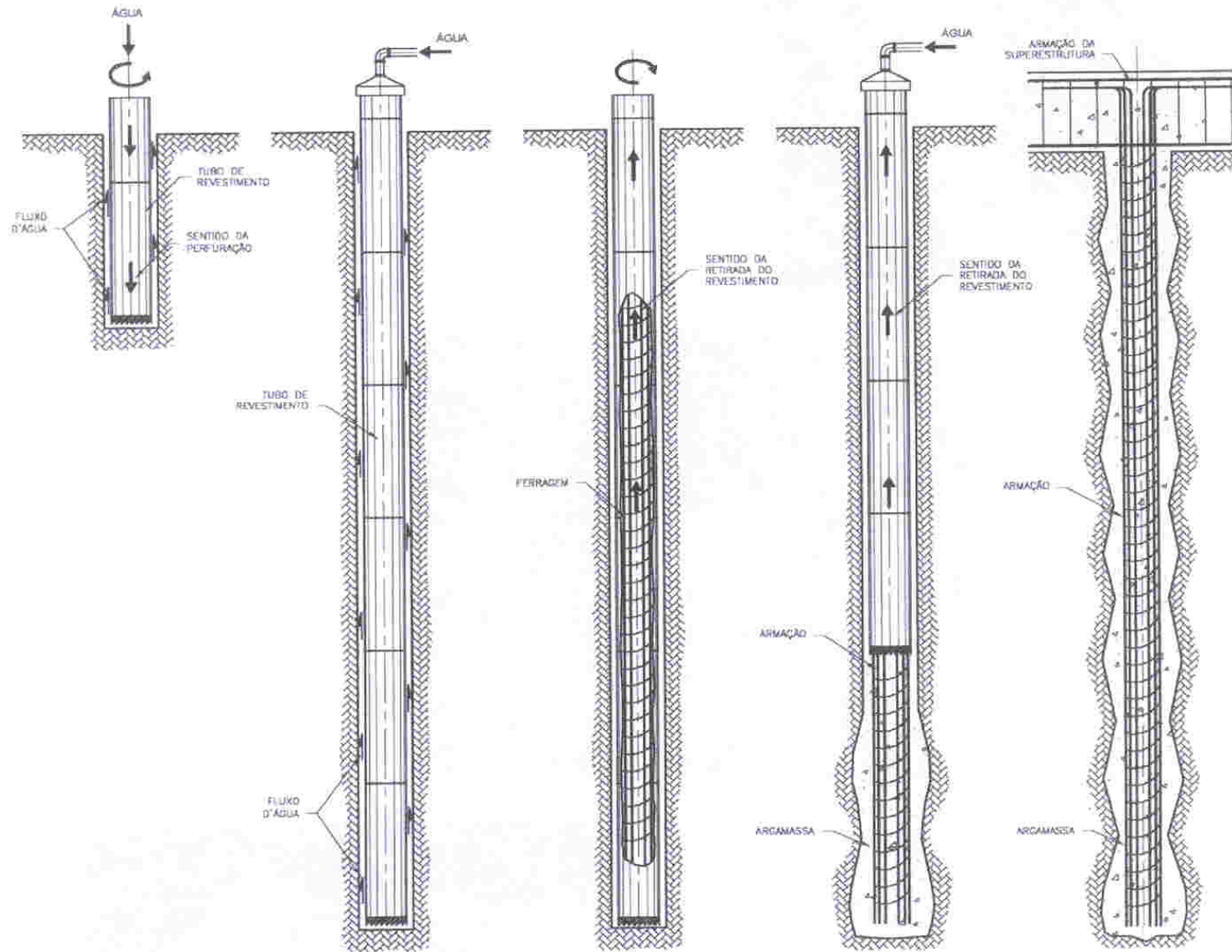
Variações: micro estaca

Estaca raiz

- Injeção de calda de cimento ou argamassa a grandes pressões (4000 a 5000 kPa)
- Melhora o terreno natural
- Reforço de fundações

Diam (cm)	Pnom (kN)
10	100
12	150
14	200
15	250
20	500
25	700
31	1000
40	1300

Seqüência típica de execução de estacas raiz



1ª FASE

Perfuração rotativa com lavagem utilizando sistema de estabilização das paredes do furo por revestimento.

2ª FASE

Instalação da armação da estaca no interior do revestimento.

3ª FASE

Instalação da armação.

4ª FASE

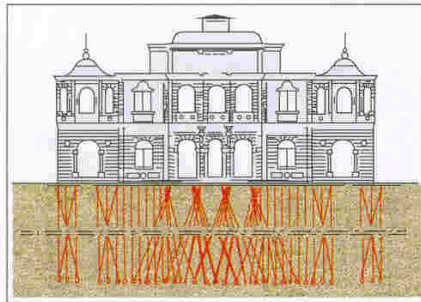
Injeção da argamassa de baixo para cima com retirada simultânea do revestimento, caso tenha sido utilizado. Injeção de argamassa com pressão de até 7 atm, conforme projeto.

5ª FASE

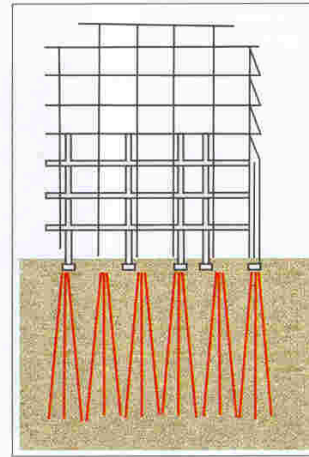
Ligação da estaca com a superestrutura.

Perfuração de estaca raiz com martelo de fundo (ponta em rocha)

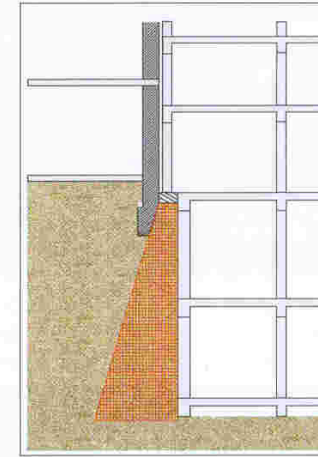




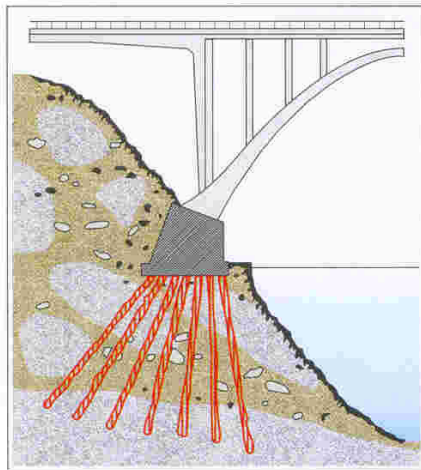
Reforço de Fundações de Monumentos Históricos
Ex.: Palácio da Liberdade - Belo Horizonte - MG



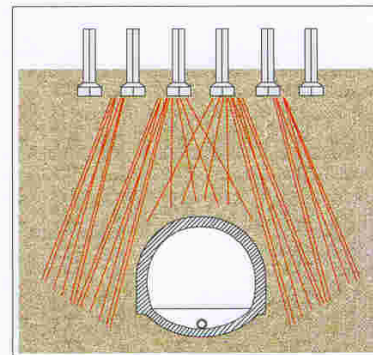
Aplicação de estacas-raiz na construção de andares em edifícios existentes.



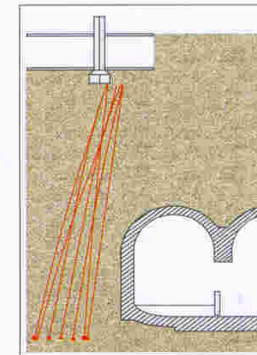
Esquema de estrutura de contenção



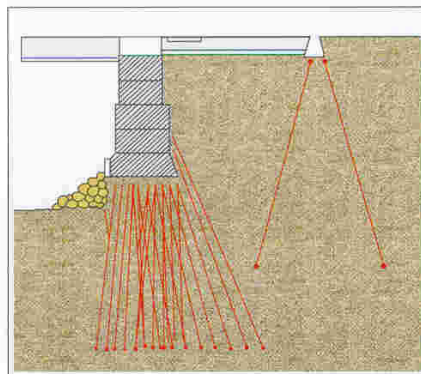
Consolidação dos blocos de fundação de ponte



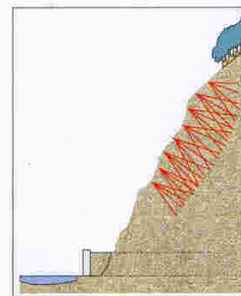
Estrutura reticular tridimensional de estacas-raiz para sub-fundação de edifício



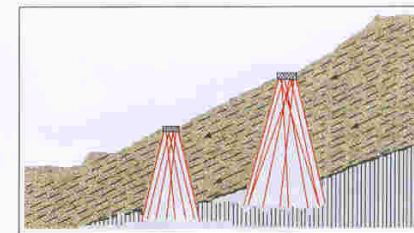
Sub-fundação de edifício com reticulado de estacas-raiz para prevenir recalques decorrentes de escavação de galerias de metrô



Reforço de cais de atracação

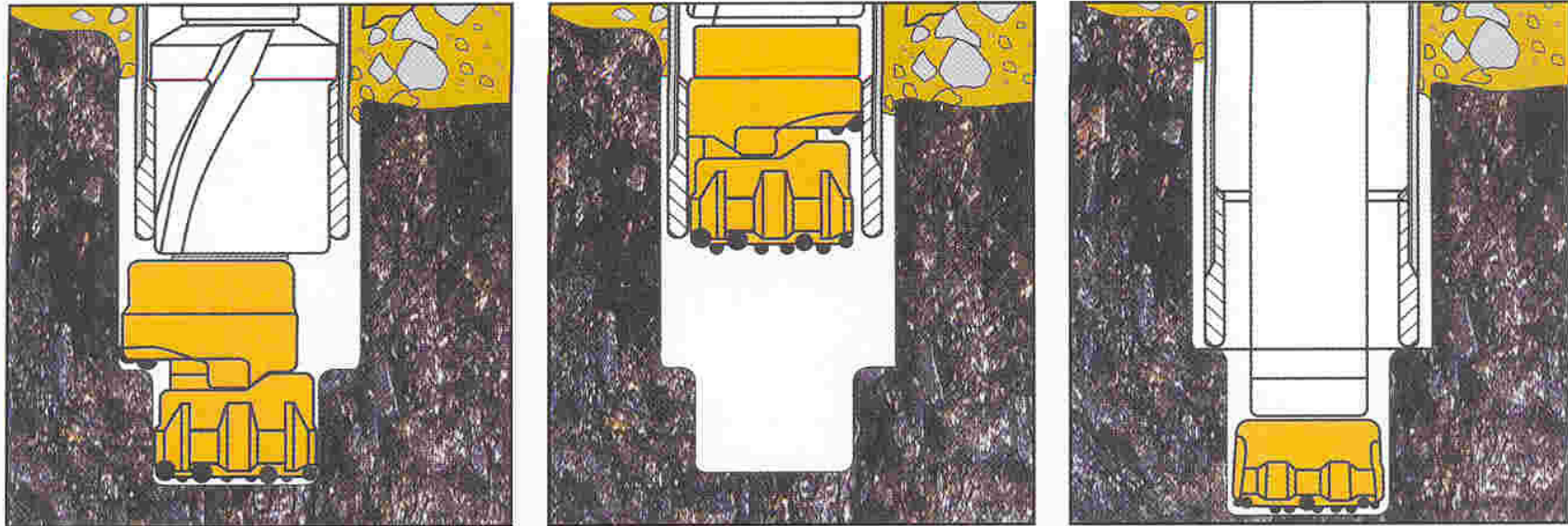


Estrutura reticular em formação rochosa

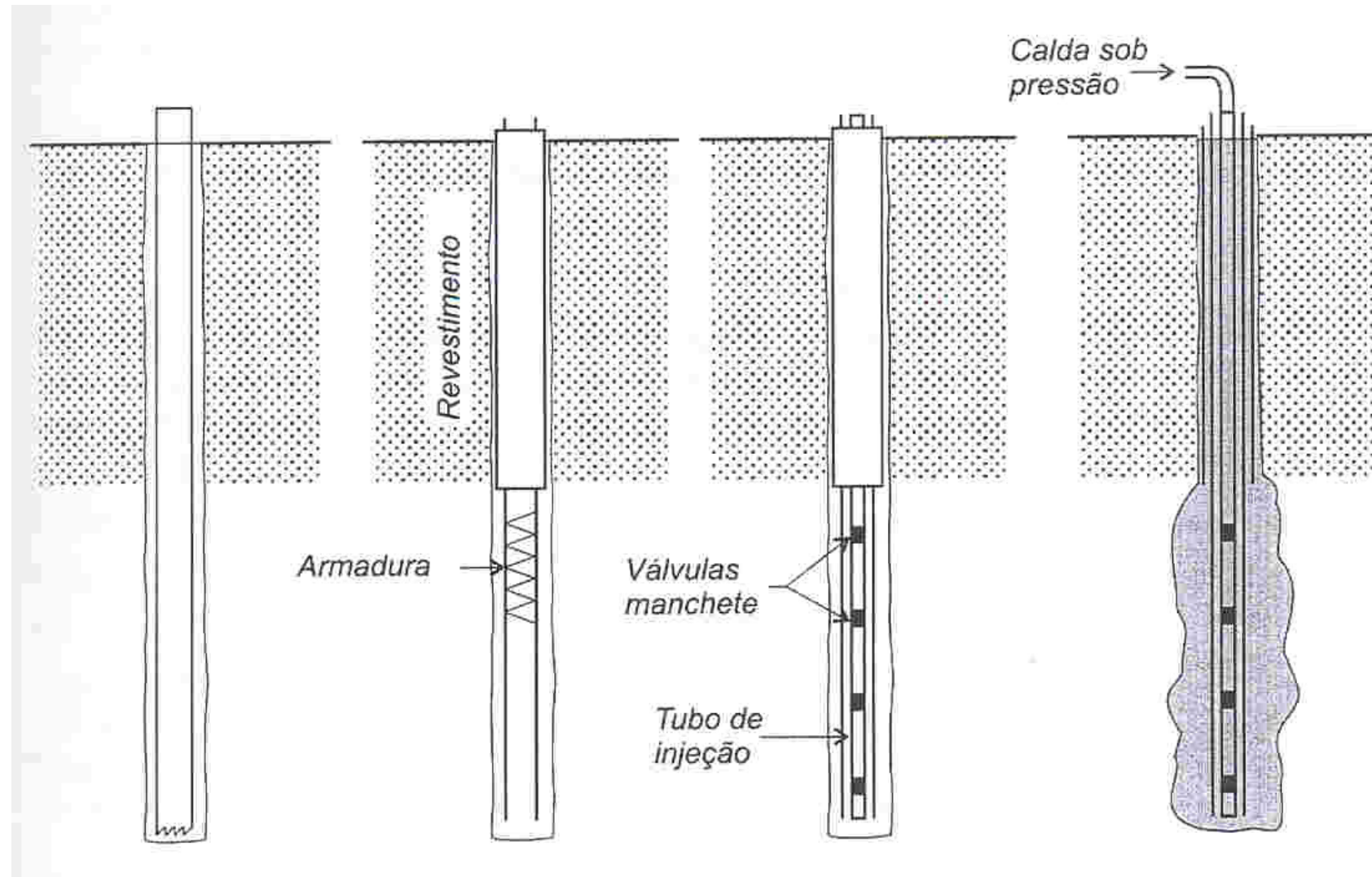


Consolidação de taludes em terrenos soltos

Martelo de fundo excêntrico para perfuração de matacões



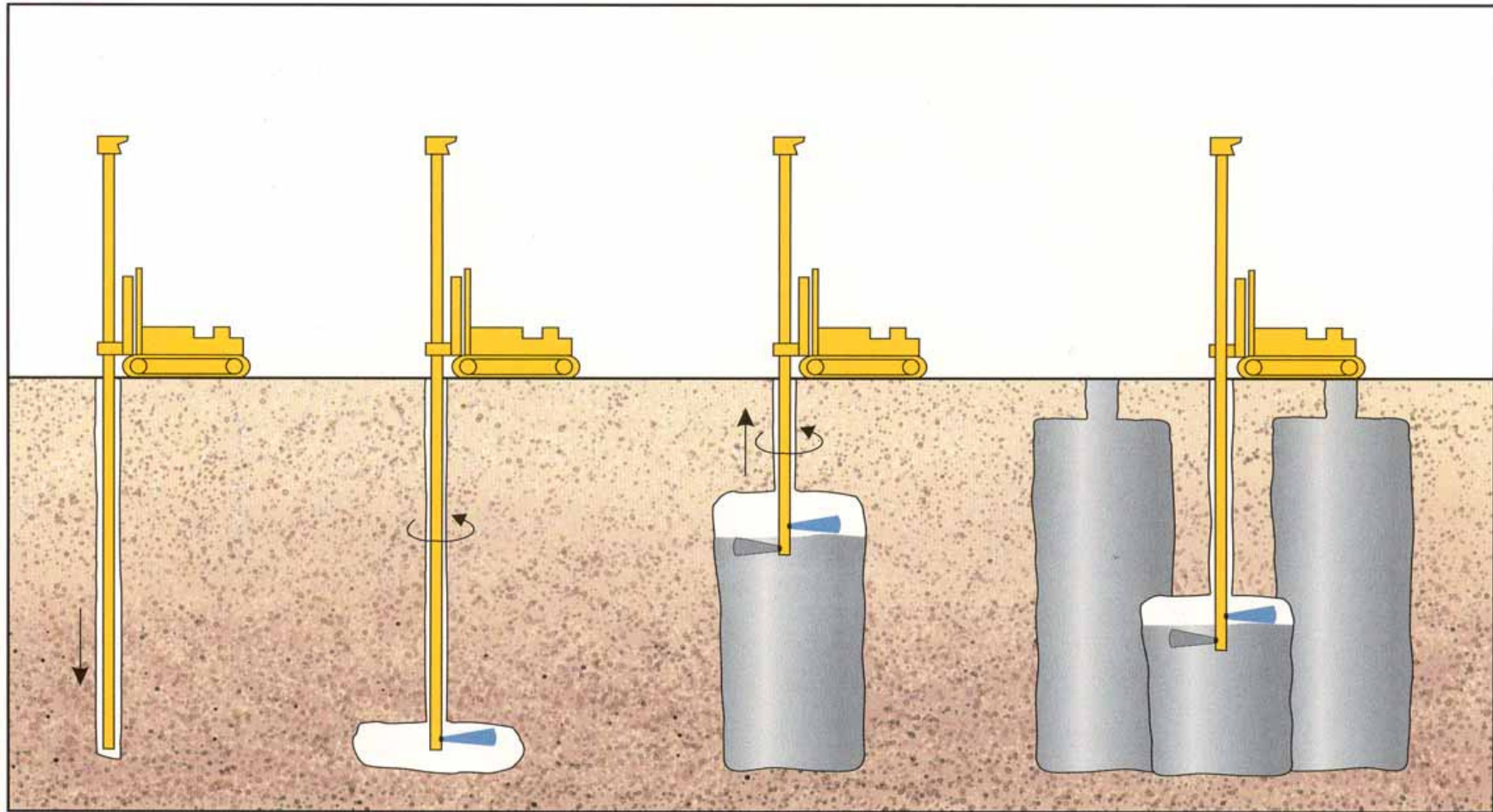
Micro estaca



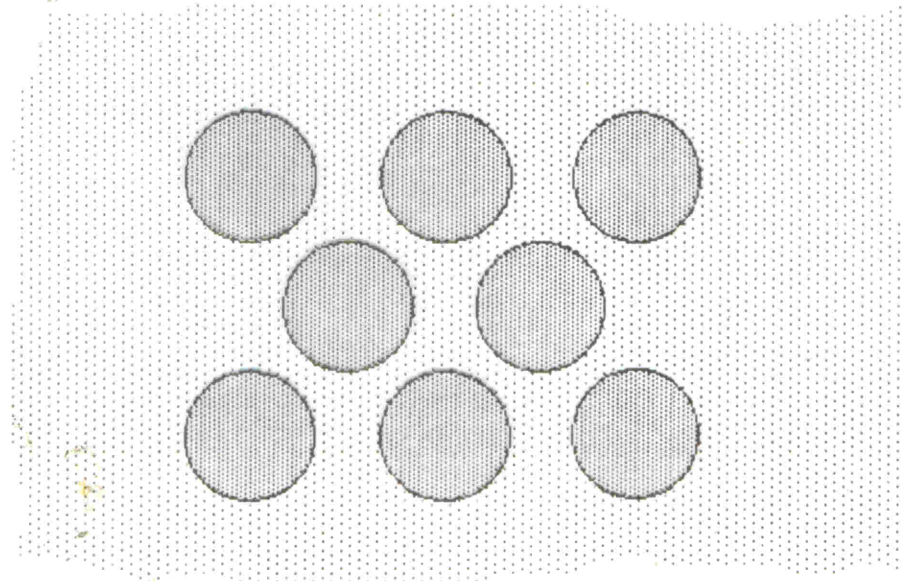
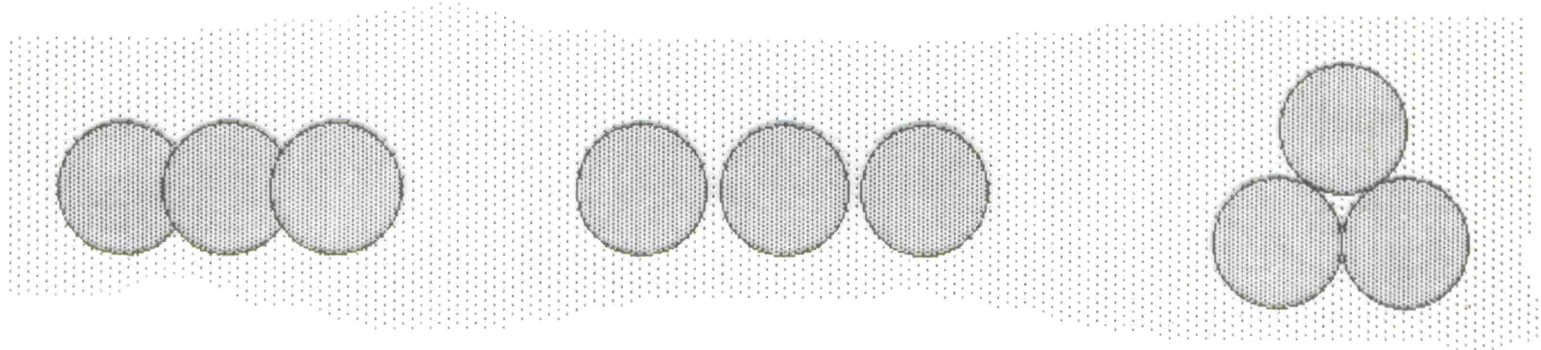
CCP/Jet Grouting

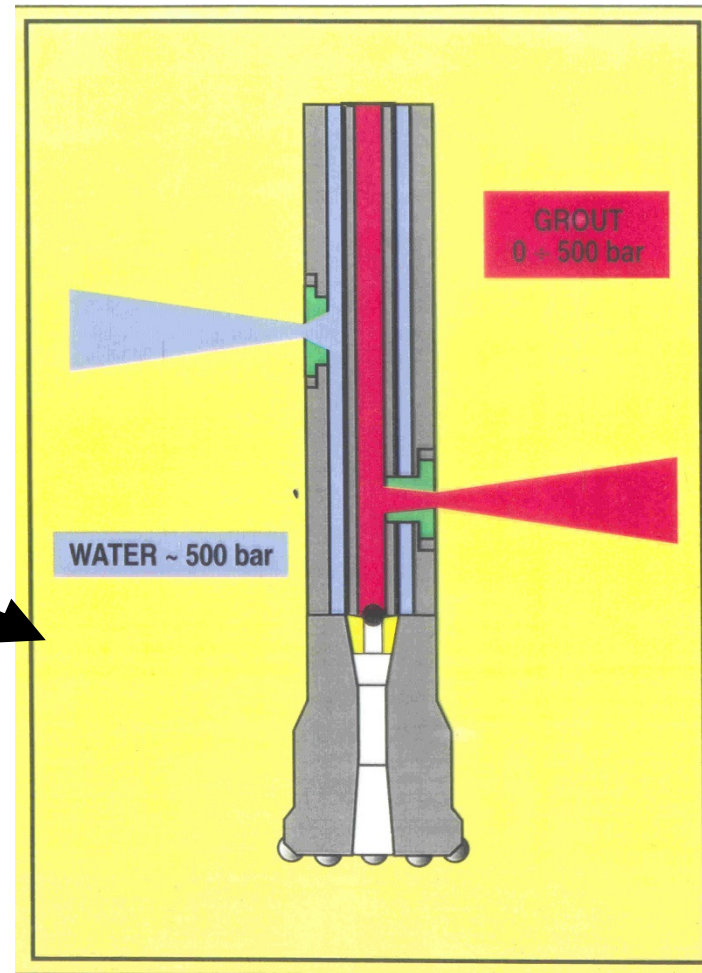
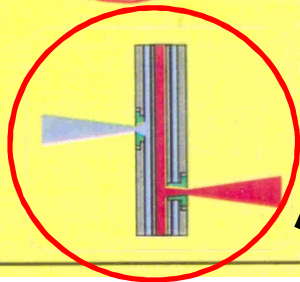
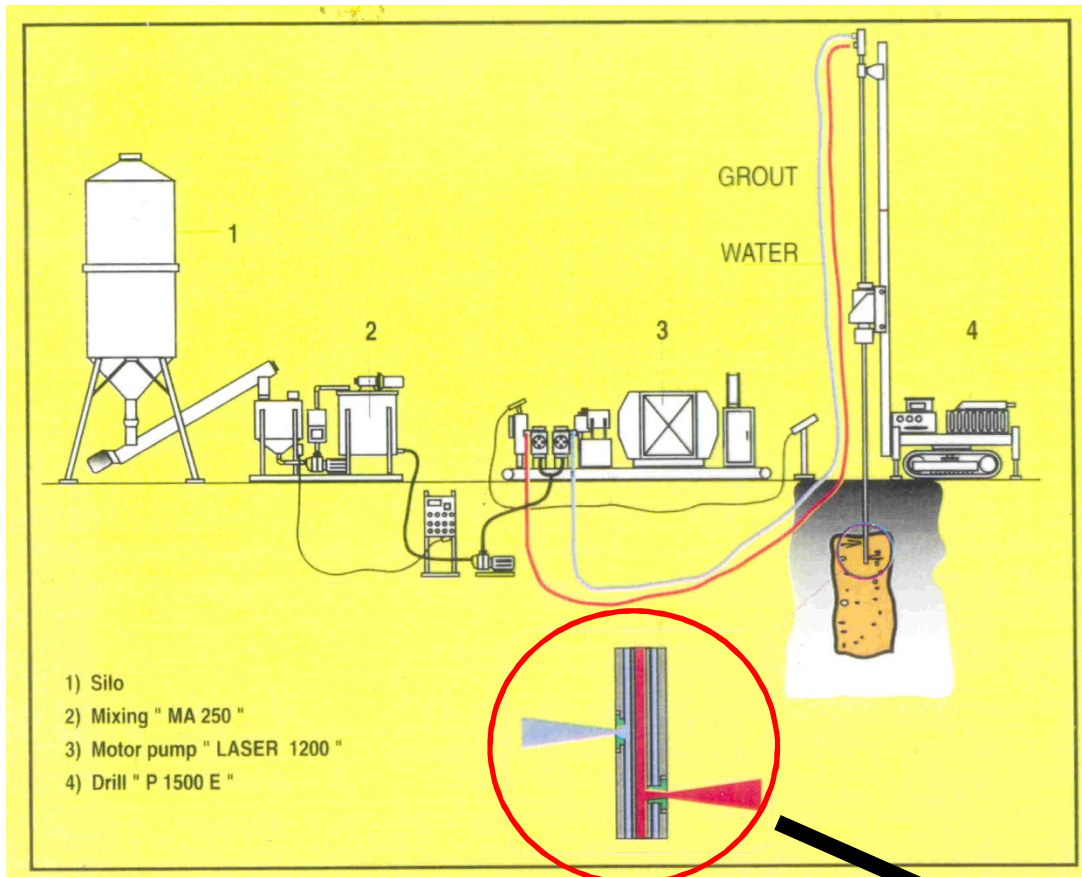
- Injeção de nata de cimento a 30000 kPa
- Haste 6cm diam. para jateamento
- Melhoram o terreno, executando colunas de solo-cimento no local

Jet grouting – seqüência construtiva típica



Configurações de conjuntos de colunas

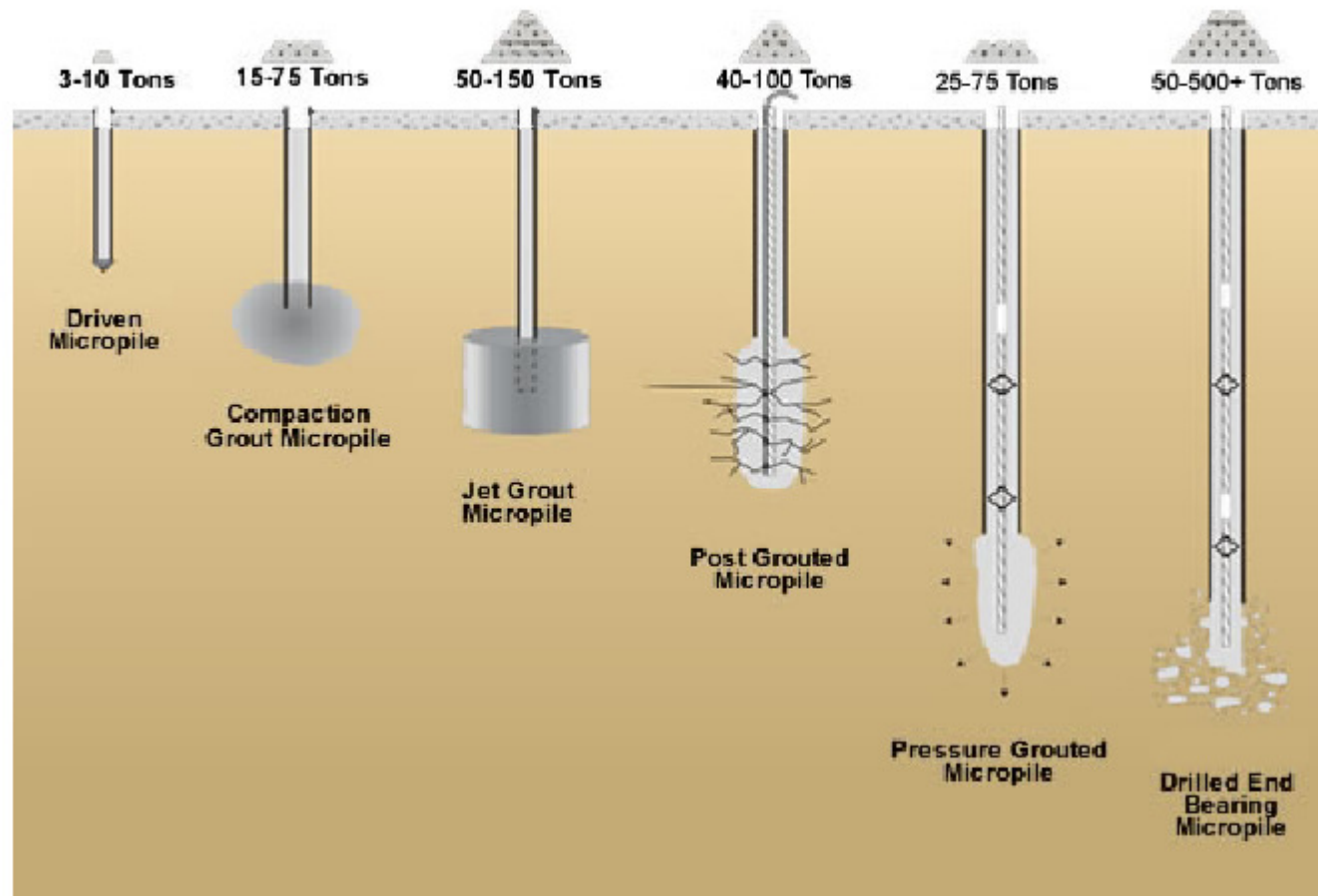




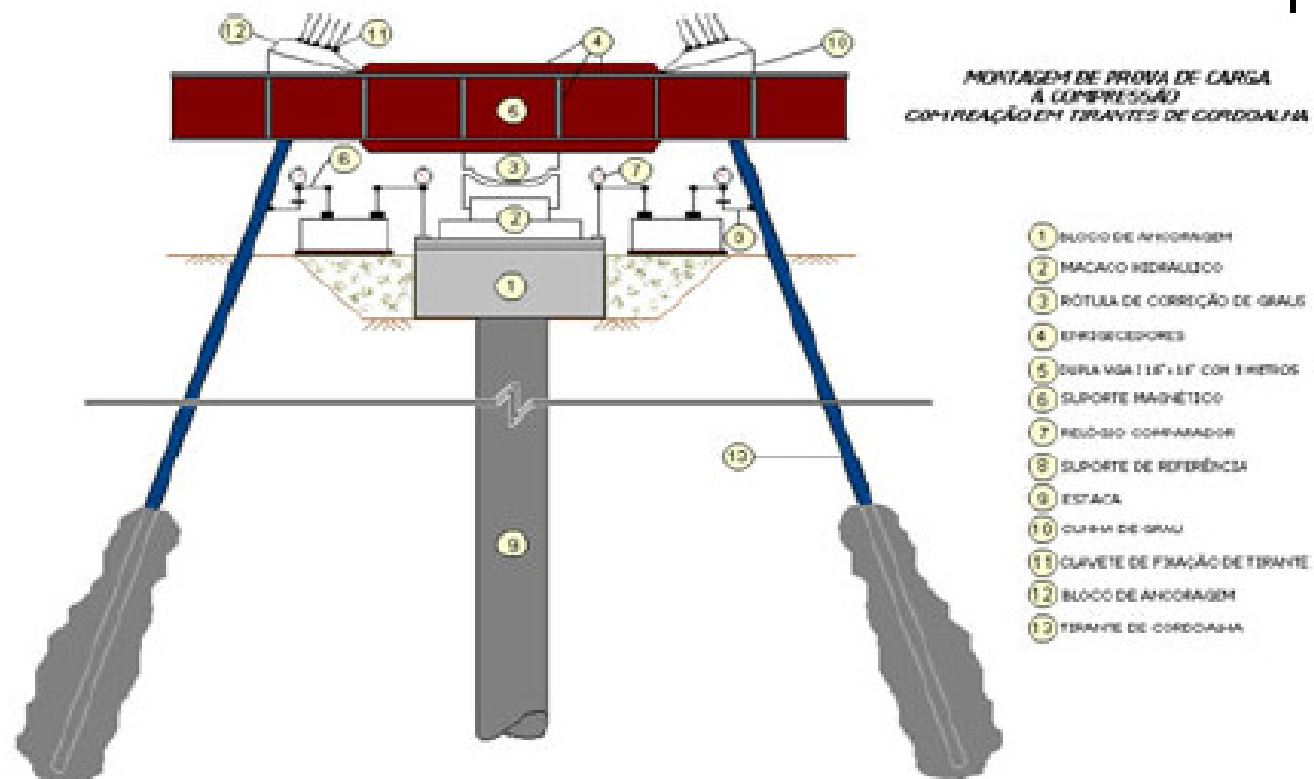




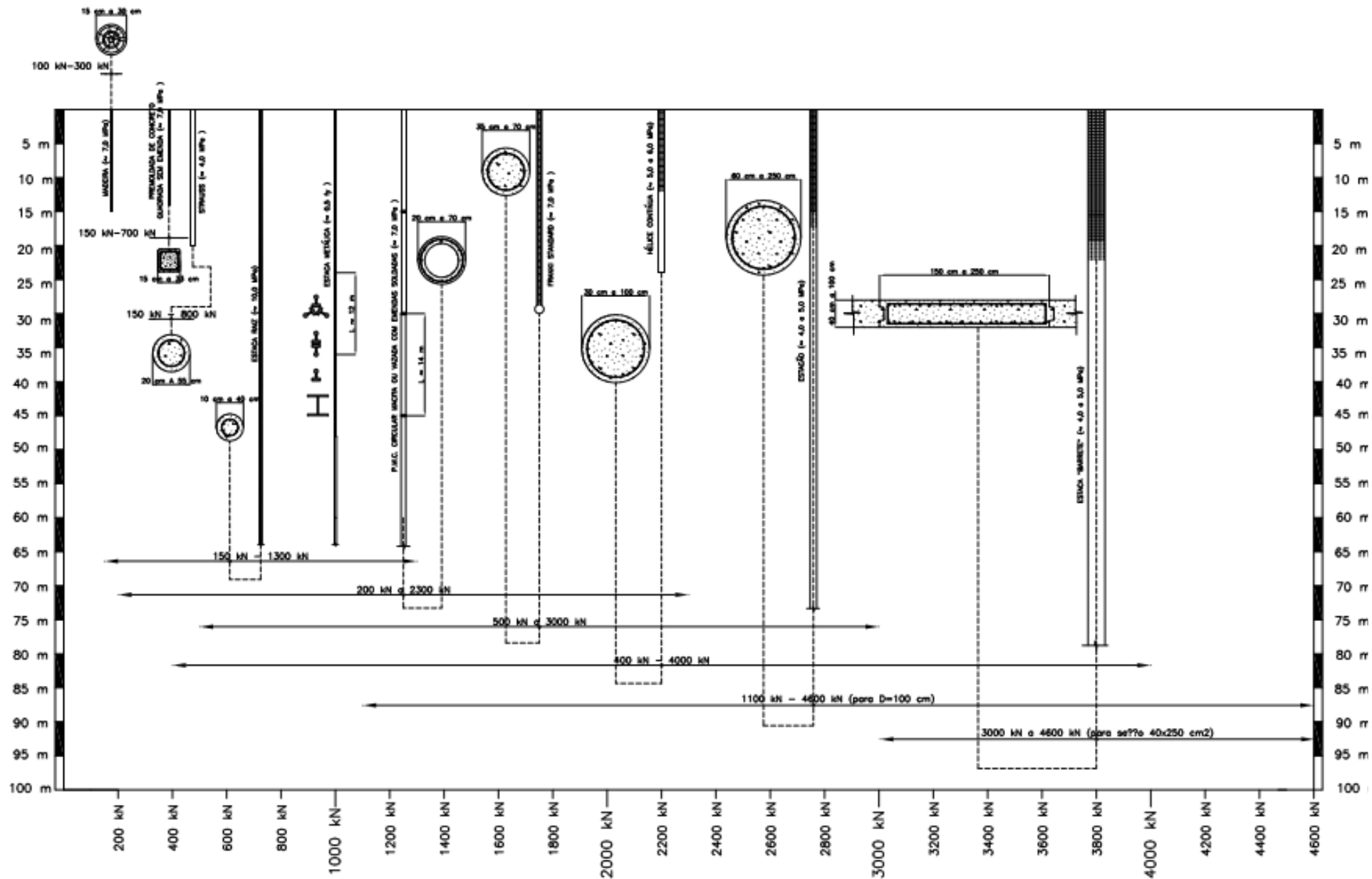
Estacas especiais

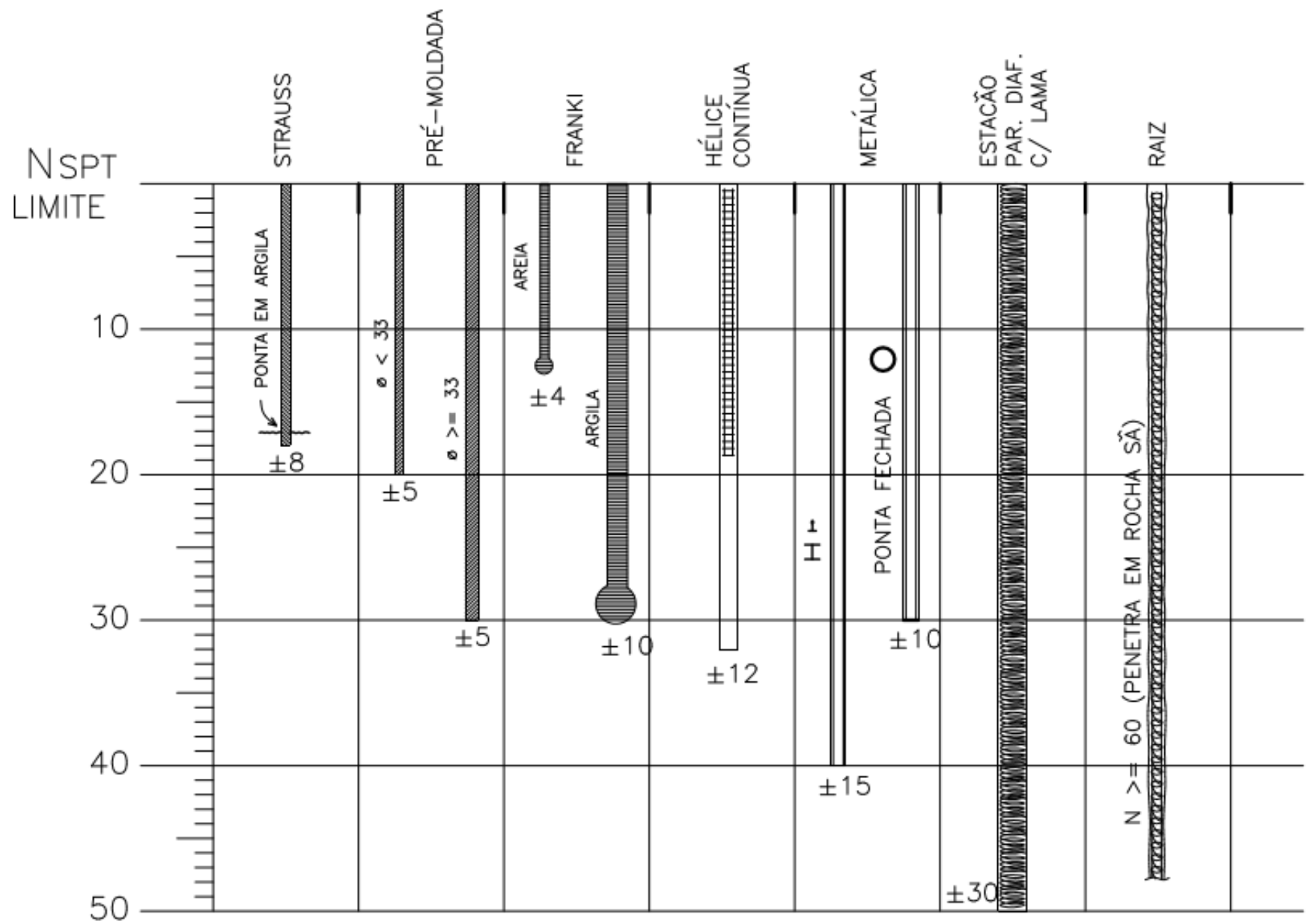


Prova de carga



PEF 3405 – AUXILIAR PARA ESCOLHA DE ESTACA SUJEITA A COMPRESSÃO
 (USAR JUNTAMENTE COM TABELAS DOS PRINCIPAIS TIPOS DE ESTACAS)

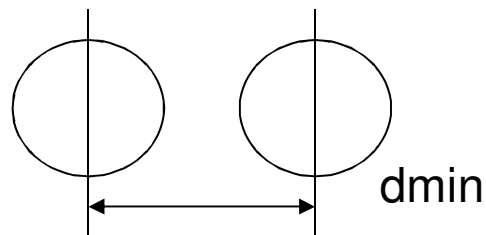




FONTE: CINTRA & AOKI, 2010 – P. 48

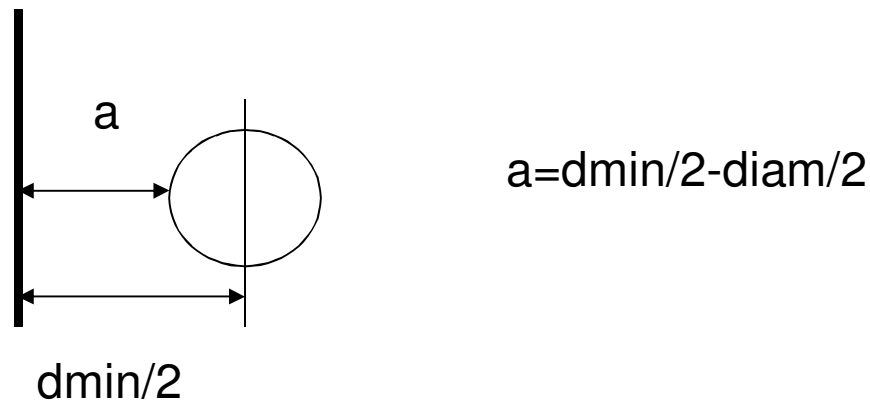
Dimensionamento de estacas em planta

- Número=carga pilar/ P_{nom} estaca
- $CC=CG$
- Mesmo tipo e diâmetro em um bloco
- Espaçamento:
 - pré-moldadas: $d_{min}=2,5$ diam.
 - Moldadas in loco: $d_{min}=3,0$ diam.



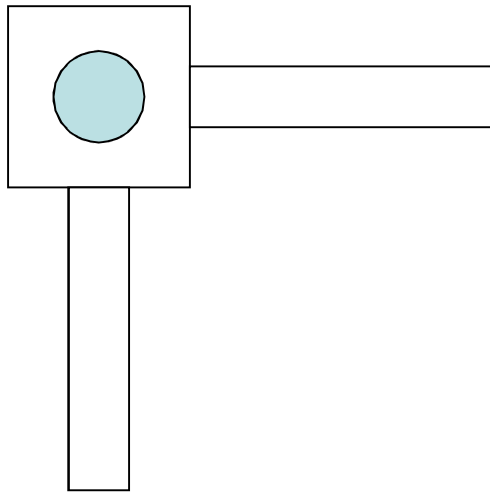
Dimensionamento de estacas em planta

- Distância à divisa
 - pré-moldadas: $d_{min}=2,5 \text{ diam.}$
 - Moldadas in loco: $d_{min}=3,0 \text{ diam.}$

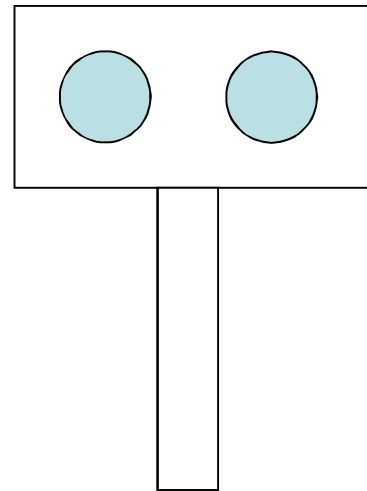


Dimensionamento de estacas em planta

- Disposição

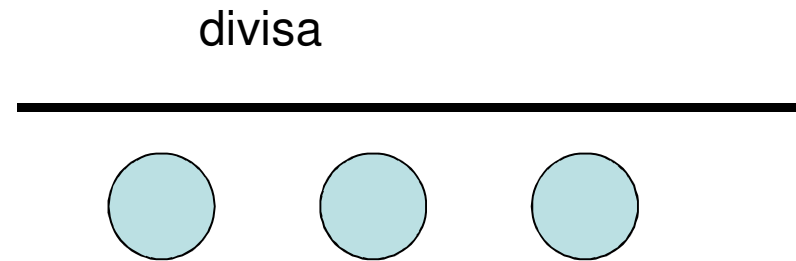
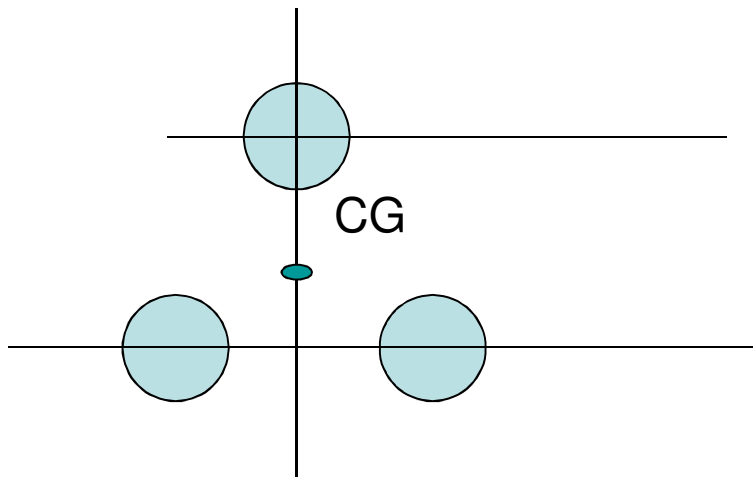


Viga baldrame



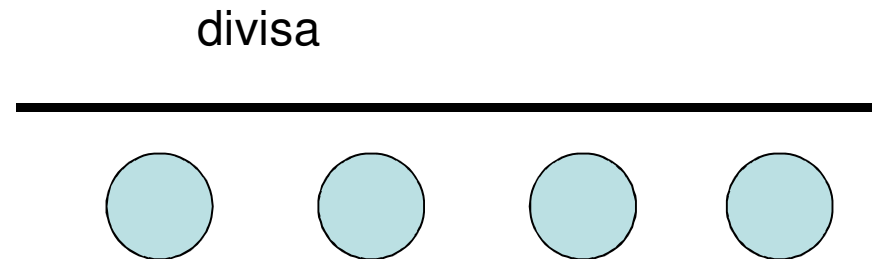
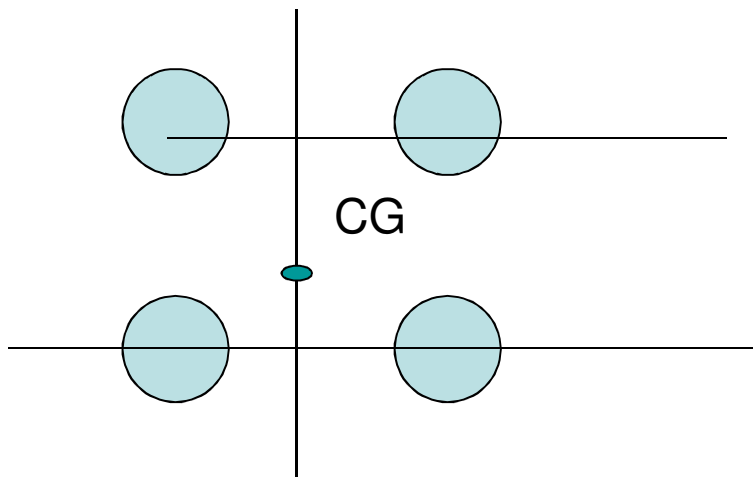
Dimensionamento de estacas em planta

- Disposição



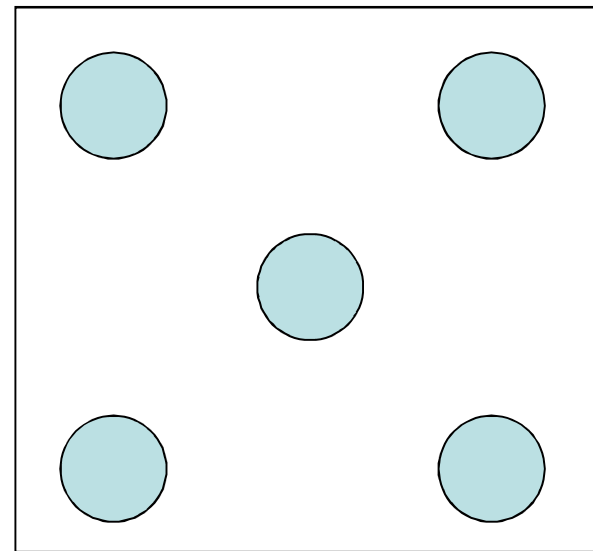
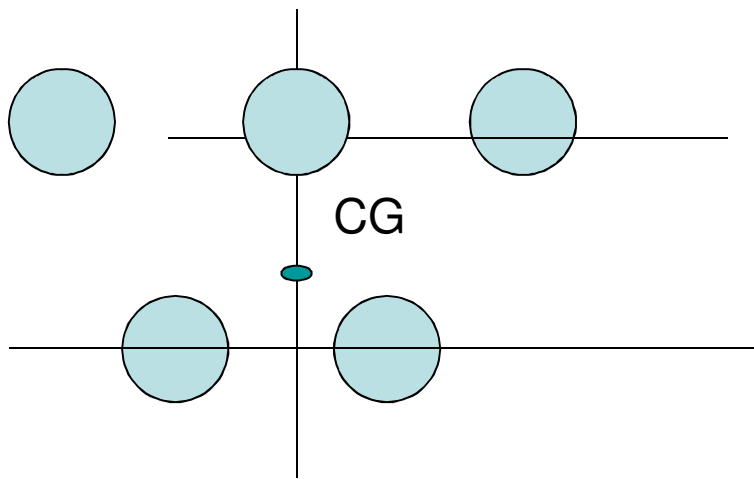
Dimensionamento de estacas em planta

- Disposição

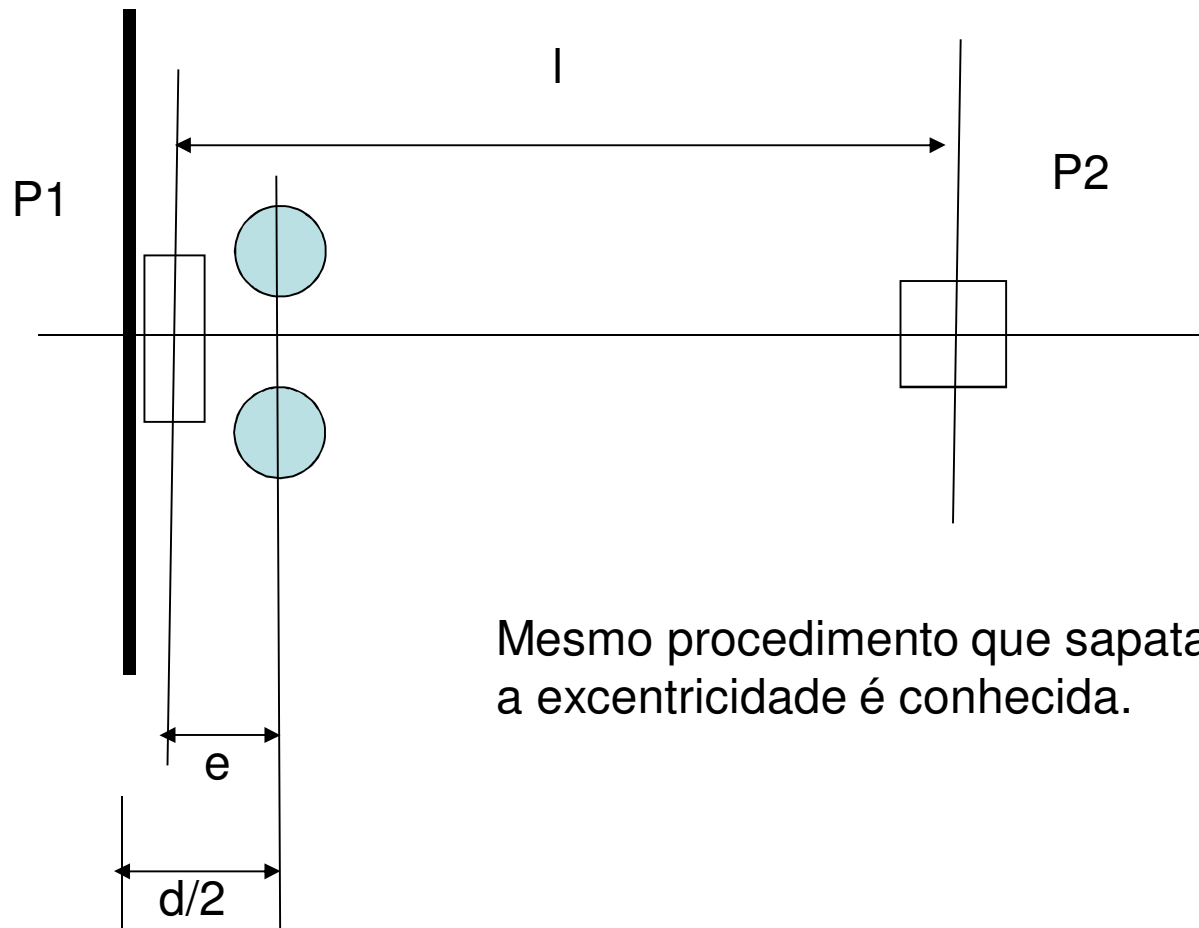


Dimensionamento de estacas em planta

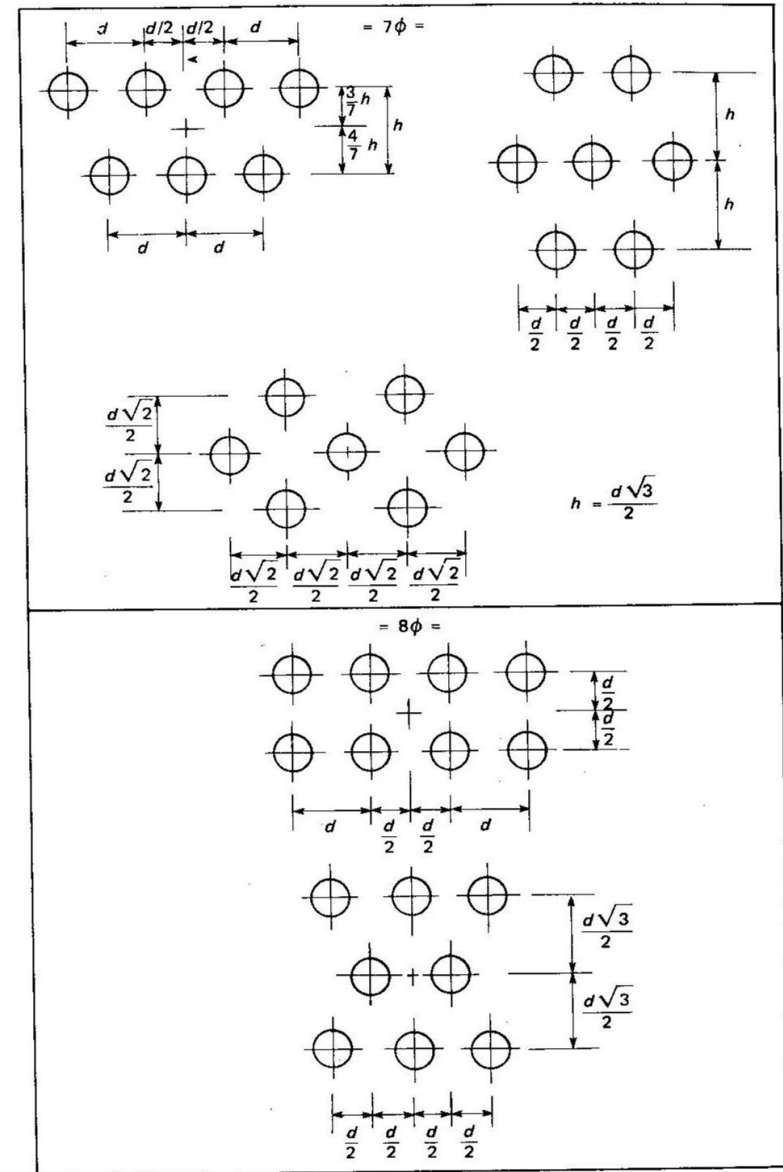
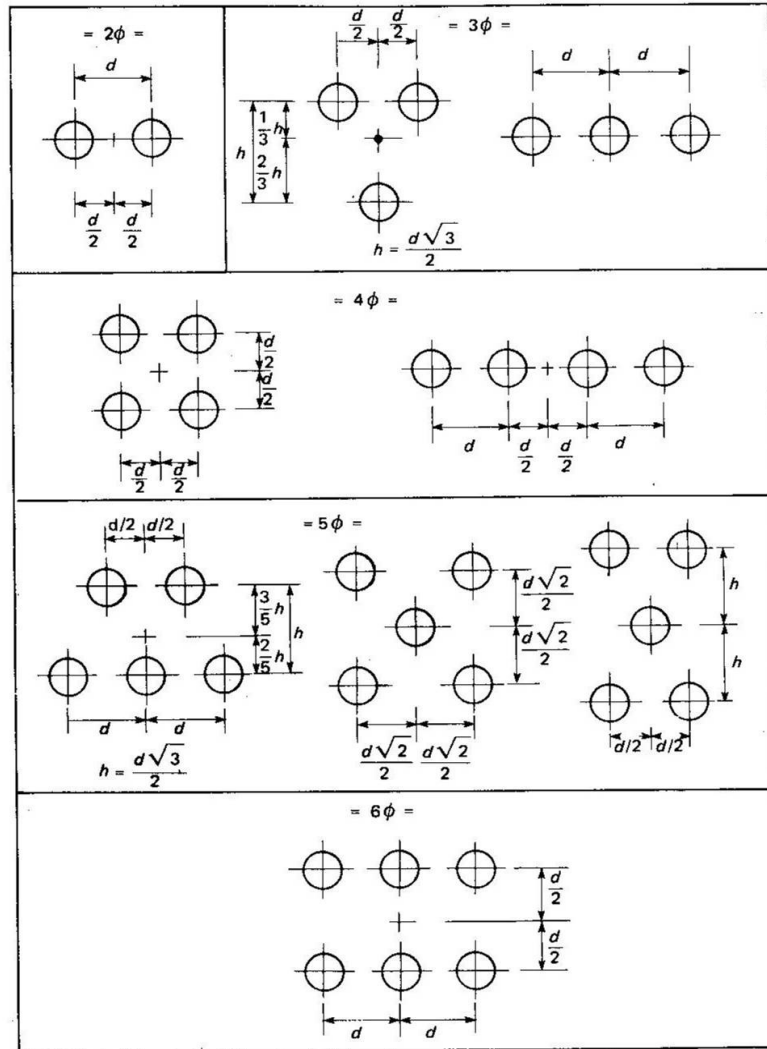
- Disposição



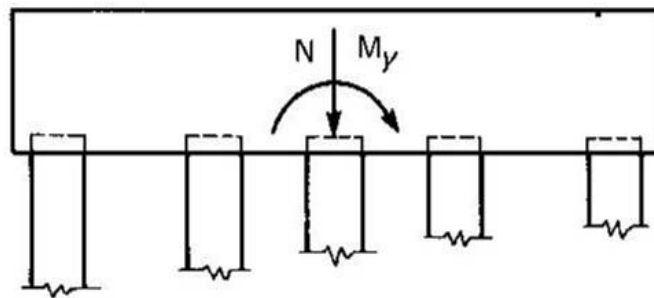
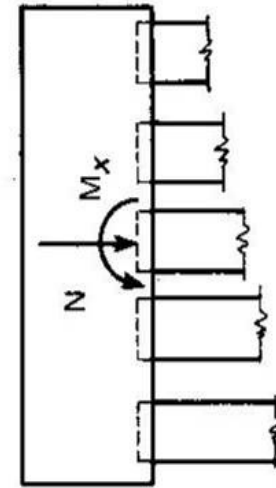
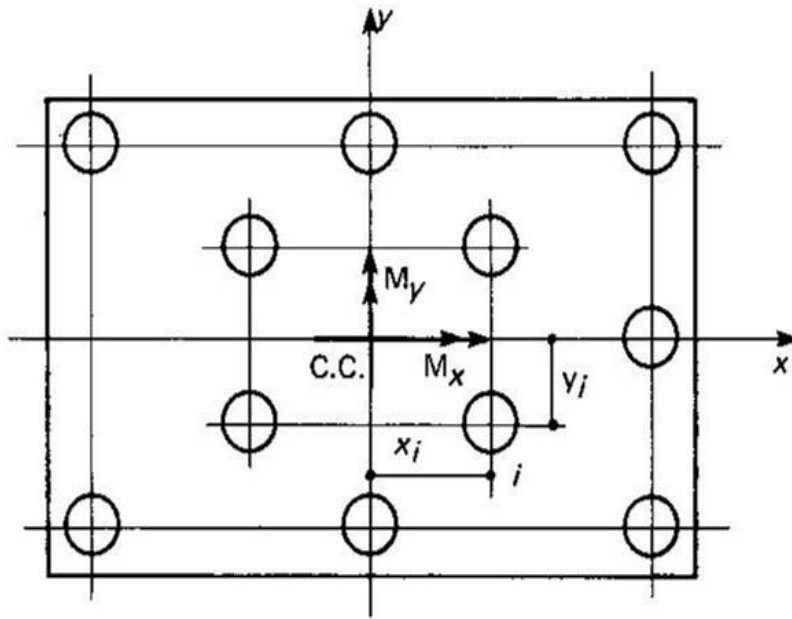
Pilares de divisa



3.1.1. A distribuição das estacas em torno do centro de carga do pilar deve ser feita *sempre que possível* de acordo com os blocos padronizados indicados na Fig. 3.1.



Blocos com momento

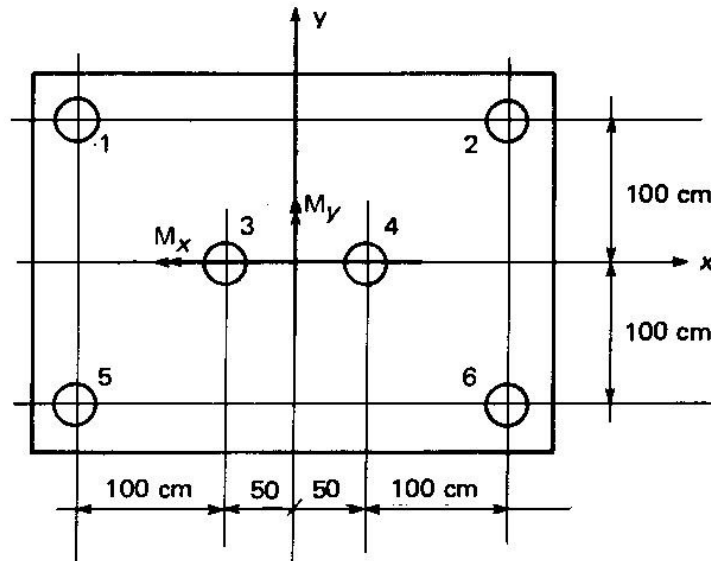


$$P_i = \frac{N}{n} \pm \frac{M_y x_i}{\sum x_i^2} \pm \frac{M_x y_i}{\sum y_i^2}$$

Exercício: Calcular a carga atuante nas estacas do bloco abaixo, sabendo-se que no mesmo atuam as seguintes cargas (consideradas na cota de arrasamento):

$$\begin{aligned} N &= 2\,000 \text{ kN} \\ M_x &= -500 \text{ kN} \cdot \text{m} \\ M_y &= +400 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Desprezar o peso próprio do bloco



Solução: $\Sigma x_i^2 = 4 \times 1,5^2 + 2 \times 0,5^2 = 9,5 \text{ m}^2$
 $\Sigma y_i^2 = 4 \times 1^2 = 4 \text{ m}^2$

Carga nas estacas

$$P_i = \frac{N}{n} \pm \frac{M_y x_i}{\Sigma x_i^2} \pm \frac{M_x y_i}{\Sigma y_i^2}$$

$$P_1 = \frac{2\,000}{6} - \frac{400 \times 1,5}{9,5} + \frac{500 \times 1}{4} = 395 \text{ kN}$$

$$P_2 = \frac{2\,000}{6} + \frac{400 \times 1,5}{9,5} + \frac{500 \times 1}{4} = 521 \text{ kN}$$

$$P_3 = \frac{2\,000}{6} - \frac{400 \times 0,5}{9,5} = 312 \text{ kN}$$

$$P_4 = \frac{2\,000}{6} + \frac{400 \times 0,5}{9,5} = 354 \text{ kN}$$

$$P_5 = \frac{2\,000}{6} - \frac{400 \times 1,5}{9,5} - \frac{500 \times 1}{4} = 145 \text{ kN}$$

$$P_6 = \frac{2\,000}{6} + \frac{400 \times 1,5}{9,5} - \frac{500 \times 1}{4} = 271 \text{ kN}$$

Estimativa de Comprimento e capacidade de carga de estacas

Estimativa preliminar: Fórmulas de V. Mello:

- Estacas de ponta

$$N_{\text{SPT-ponta}} = 0,5\sigma_c \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

- Estacas de ponta e atrito lateral

$$\sum N_{\text{SPT-fuste}} = 1,5\sigma_c \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

Onde σ_c = tensão admissível à compressão do concreto armado

Método de Décourt-Quaresma

- $P_r = R_p + R_l = K' \cdot N_p \cdot A_p + p (1 + N_l/3) L$ (tf/m²)

Onde:

K' =tabela

N_p =SPT da ponta

A_p =área da ponta da estaca

p =perímetro da estaca

N_l =SPT médio lateral (<50)

L =comprimento da estaca

Método de Décourt-Quaresma

Tipo de solo	K' (tf/m ²)	
	Estacas pré-moldadas de concreto, metálicas, Strauss, Franki, Raiz	Estacas escavadas com lama bentonítica
Argilas	12	10
Siltes argilosos	20	12
Siltes arenosos	25	14
Areias	40	20

Método de Aoki-Veloso

- $P_r = K \cdot N_p \cdot A_p / F_1 + (p / F_2) \sum (\beta \cdot N_l \cdot \Delta l)$ (tf/m²)

Onde:

F₁, F₂, K e β=tabela

N_p=SPT da ponta

A_p=área da ponta da estaca

p=perímetro da estaca

N_l=SPT médio lateral (<50)

Δl=comprimento dos segmentos

Método de Aoki-Veloso

Solo		K (kgf/cm ²)	β (kgf/cm ²)
Argila	-	2,0	0,085
	Siltosa	2,2	
Silte	Argiloso	2,3	
Argila	Arenosa	3,5	0,120
Silte	-	4,0	
	Arenoso	5,5	
Areia	Argilosa	6,0	0,160
	Siltosa	8,0	
	-	10,0	

Método de Aoki-Veloso

Tipo de estaca	F1	F2
Franki	2,5	5,0
Aço	1,75	3,5
Pré-moldada concreto	1,75	3,5
Escavada	3,5	6,0

Fatores de Segurança

- Pequeno diâmetro ($d \leq 50\text{cm}$): global
 $P_{adm} = P_r / FS$ onde $2 \leq FS \leq 3$

- Grande diâmetro ($d > 50\text{cm}$): parciais
 $P_{adm} = P_p / F_{Sp} + R_l / F_{Sl}$ onde:

$$4 \leq F_{Sp} \leq 5 \text{ e}$$

$$1,3 \leq F_{Sl} \leq 1,5$$