



# Mejoramiento de Suelos

Geotecnia III - FCEFYN UNC

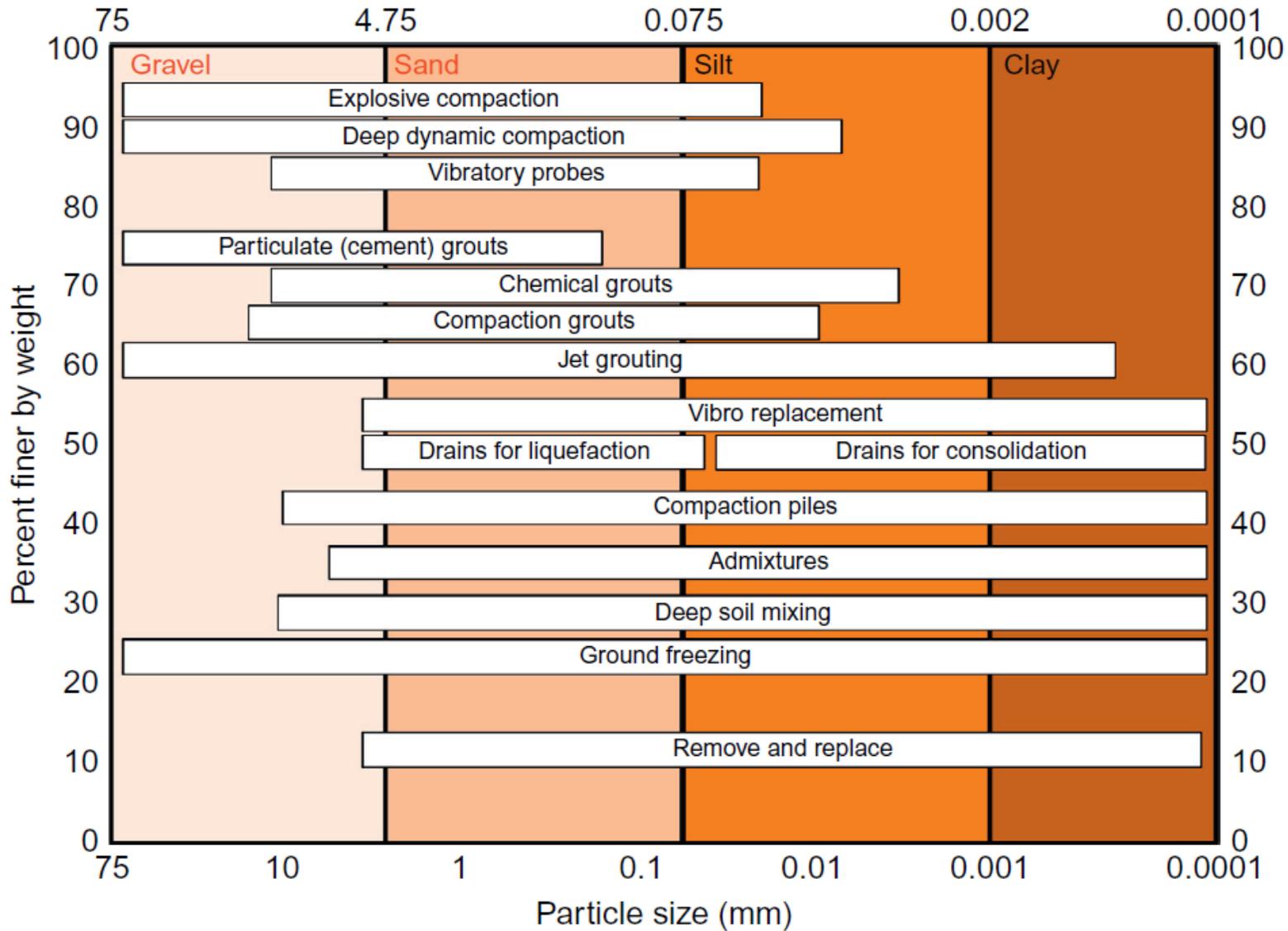


# Introducción

- ▶ Mejoramiento del terreno: modificación de las propiedades físicas y mecánicas de suelos o terrenos poco competentes o “problemáticos” .
- ▶ Mejoramiento es rutinario en suelos blandos, metaestables o rellenos no controlados y heterogéneos.
- ▶ Se puede lograr mediante
  - ▶ Incremento del peso unitario.
  - ▶ Incremento de la presión de preconsolidación.
  - ▶ Cambio de propiedades físicas.
  - ▶ Agregado de cementantes.
  - ▶ Agregado de inclusiones de mayor rigidez.



# Técnicas de Mejoramiento del Terreno





# Costo relativo de las técnicas de mejoramiento

<b>Treatment Method</b>	<b>Cost Basis</b>		
	<b>Volume of Treated Soil (\$ / m<sup>3</sup>)</b>	<b>Surface ( \$ / m<sup>2</sup>)</b>	<b>Length (\$ / m)</b>
Dynamic compaction	0.7 - 3	4.3 - 22	
Vibro-replacement	4 - 12		30 - 52
Vibro-compaction	1 - 7		16 - 39
Excavate-replace	10 - 20		
Slurry grouting	40 - 80		
Chemical grouting	160 - 525		
Compaction grouting	30 - 200		
Jet grouting	100 - 400		82 - 325
Freezing	275 - 650	110 - 160*	

\*Plus \$2 to \$10.75 per sq. meter/week to maintain frozen zones.

(FHWA – Dynamic compaction)



# Clasificación

- ▶ Incremento del peso unitario
  - ▶ Compactación tradicional/reemplazo
  - ▶ Compactación dinámica
  - ▶ Vibro-compactación / Vibro-sustitución
  - ▶ Consolidación/colapso
- ▶ Agregado de Cementantes
  - ▶ Inyecciones
  - ▶ Jet Grouting
- ▶ Agregado de Inclusiones Rígidas



# Clasificación

- ▶ **Incremento del peso unitario**
  - ▶ Compactación tradicional/reemplazo
  - ▶ Compactación dinámica
  - ▶ Vibro-compactación / Vibro-sustitución
  - ▶ Consolidación/colapso
- ▶ Agregado de Cementantes
  - ▶ Inyecciones
  - ▶ Jet Grouting
- ▶ Agregado de Inclusiones Rígidas



# Excavación y recolocación o reemplazo

Retiro de suelos sueltos y recolocación con compactación simultánea o su reemplazo por rellenos importados.

## Ventajas

- ▶ Lo ejecutado es visible
- ▶ Método masivo, varios frente simultáneos
- ▶ Emplea equipos ampliamente disponibles
- ▶ Produce un terreno uniforme, de calidad controlada
- ▶ Elimina riesgos asociados a contaminación y licuación ¿?
- ▶ Reduce la demanda sísmica



# Excavación y recolocación o reemplazo

Retiro de suelos sueltos y recolocación con compactación simultánea o su reemplazo por rellenos importados.

## Limitaciones

- ▶ No es económica para suelos no compactables como
  - ▶ Arenas muy finas, de tamaño uniforme, sin finos
  - ▶ Arcillas de mediana y alta plasticidad blandas
  - ▶ Suelos orgánicos
- ▶ Debe abatirse el nivel freático
- ▶ Los suelos contaminados no pueden ser recolocados y su costo de disposición es grande

# Principios de la compactación



Aplicación de energía



- Reducción de  $e$  → Aumento de  $\gamma$
- Incremento de resistencia
- Rigidización del material
- Reducción de la permeabilidad
- Control de colapso o expansión
- Reducción del potencial de licuación





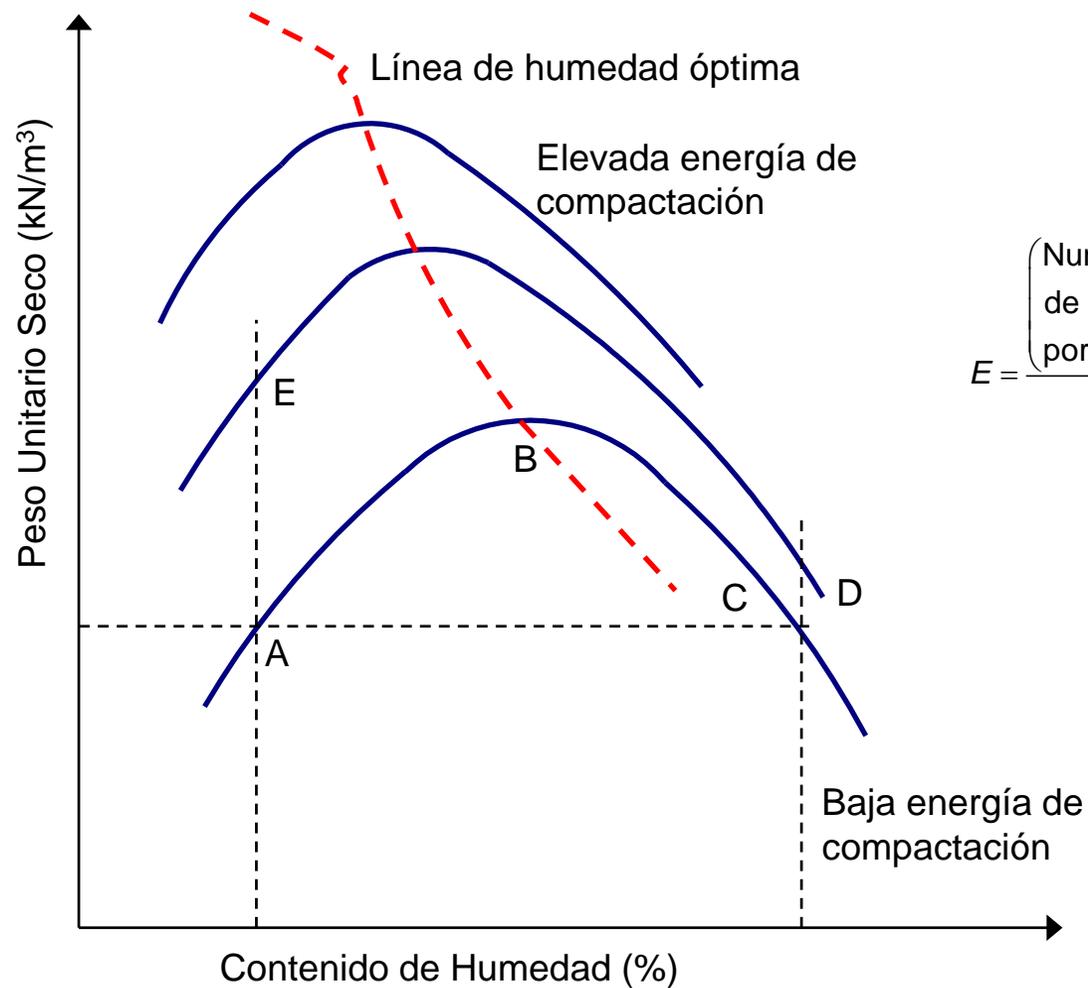
# Factores que influyen en la compactación

- ▶ Contenido de humedad
- ▶ Energía de compactación
- ▶ Tipo de suelo
- ▶ Tipo de energía de compactación



# Factores que influyen en la compactación

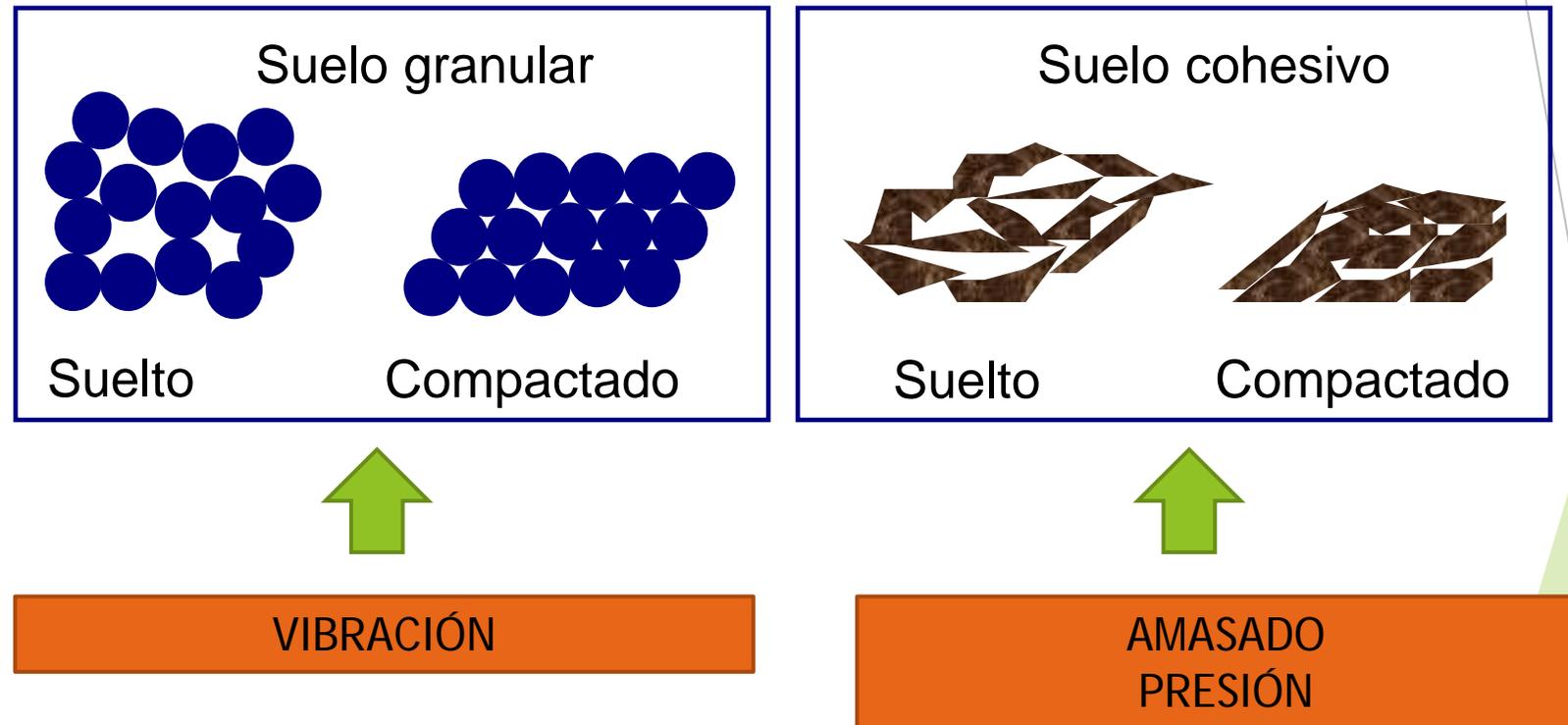
## ■ Contenido de Humedad y Energía de compactación



$$E = \frac{\left( \begin{array}{c} \text{Numero} \\ \text{de golpes} \\ \text{por capa} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{Numero} \\ \text{de capas} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{Peso del} \\ \text{martillo} \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} \text{Altura de} \\ \text{caída del} \\ \text{martillo} \end{array} \right)}{\text{Volumen del molde}}$$



# Factores que influyen en la compactación



■ Tipo de energía de compactación



# Factores que influyen en la compactación

## *Equipos y aplicaciones*



Tipo de equipo	Tipo de suelo de aplicación	Método de compactación
Rodillos pata de cabra	Suelos finos, arcillosos	Amasado
Rodillos vibratorios	Suelos granulares, con finos	Vibración
Platos vibratorios	Suelos granulares con finos	Vibración
Rodillos de tambor liso	Suelos granulares	Presión
Rodillos neumáticos	Suelos granulares y finos	Combinan presión y amasado
Martillos o pisones	Limos y Rellenos	Impacto

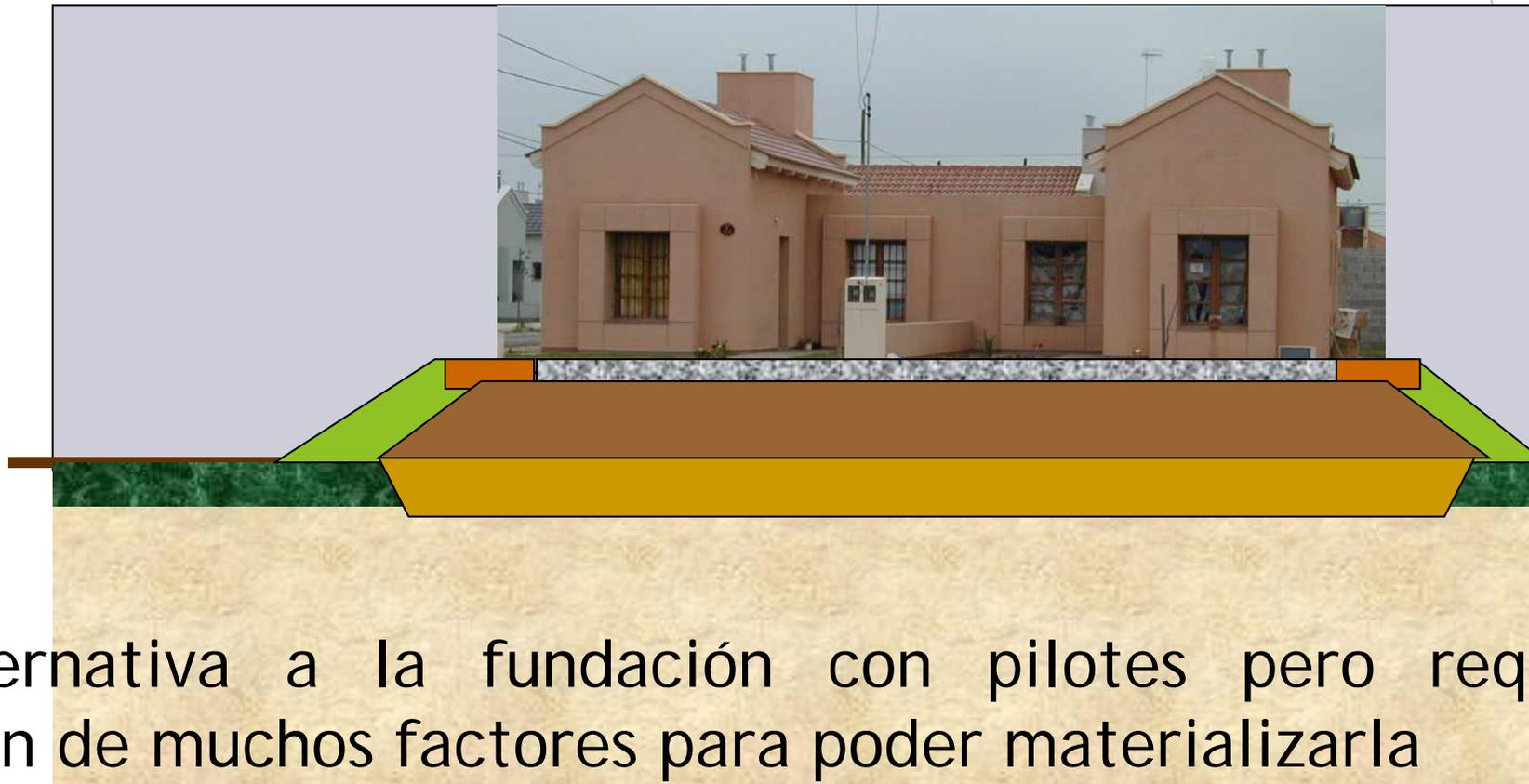
■ Tipo de energía de compactación



# Excavación y recolocación o reemplazo

EJEMPLO VIVIENDA UNIFAMILIAR: Platea sobre relleno mejorado.

En nuestro medio es común utilizar esta solución de fundar con una platea de hormigón sobre un relleno de suelo mejorado y compactado para evitar la influencia de los suelos colapsables.



Es una alternativa a la fundación con pilotes pero requiere la consideración de muchos factores para poder materializarla

# Excavación y recolocación o reemplazo



EJEMPLO VIVIENDA UNIFAMILIAR: Platea sobre relleno mejorado

# Excavación y recolocación o reemplazo



Material granular de aporte



Control de densidad in-situ

EJEMPLO VIVIENDA UNIFAMILIAR: Platea sobre relleno mejorado

# Excavación y recolocación o reemplazo



# Excavación y recolocación o reemplazo



6/2/2020

VIVIENDAS COLECTIVAS

# Excavación y recolocación o reemplazo



VIVIENDAS COLECTIVAS

# Excavación y recolocación o reemplazo



VIVIENDAS COLECTIVAS

# Excavación y recolocación o reemplazo



VIVIENDAS COLECTIVAS

# Excavación y recolocación o reemplazo



VIVIENDAS COLECTIVAS

# Excavación y recolocación o reemplazo



VIVIENDAS COLECTIVAS

# Excavación y recolocación o reemplazo



VIVIENDAS COLECTIVAS

# Excavación y recolocación o reemplazo



VIVIENDAS COLECTIVAS

# Excavación y recolocación o reemplazo



Control de calidad in-situ.  
Ensayo de plato de carga



VIVIENDAS COLECTIVAS



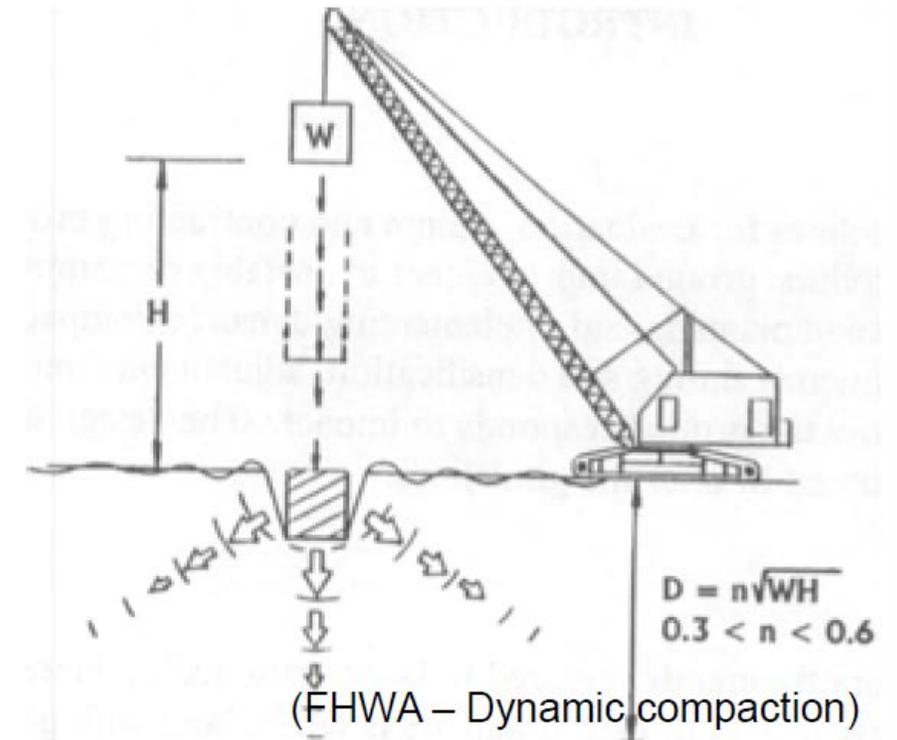
# Clasificación

- ▶ **Incremento del peso unitario**
  - ▶ Compactación tradicional/reemplazo
  - ▶ **Compactación dinámica**
  - ▶ Vibro-compactación / Vibro-sustitución
  - ▶ Consolidación/colapso
- ▶ Agregado de Cementantes
  - ▶ Inyecciones
  - ▶ Jet Grouting
- ▶ Agregado de Inclusiones Rígidas

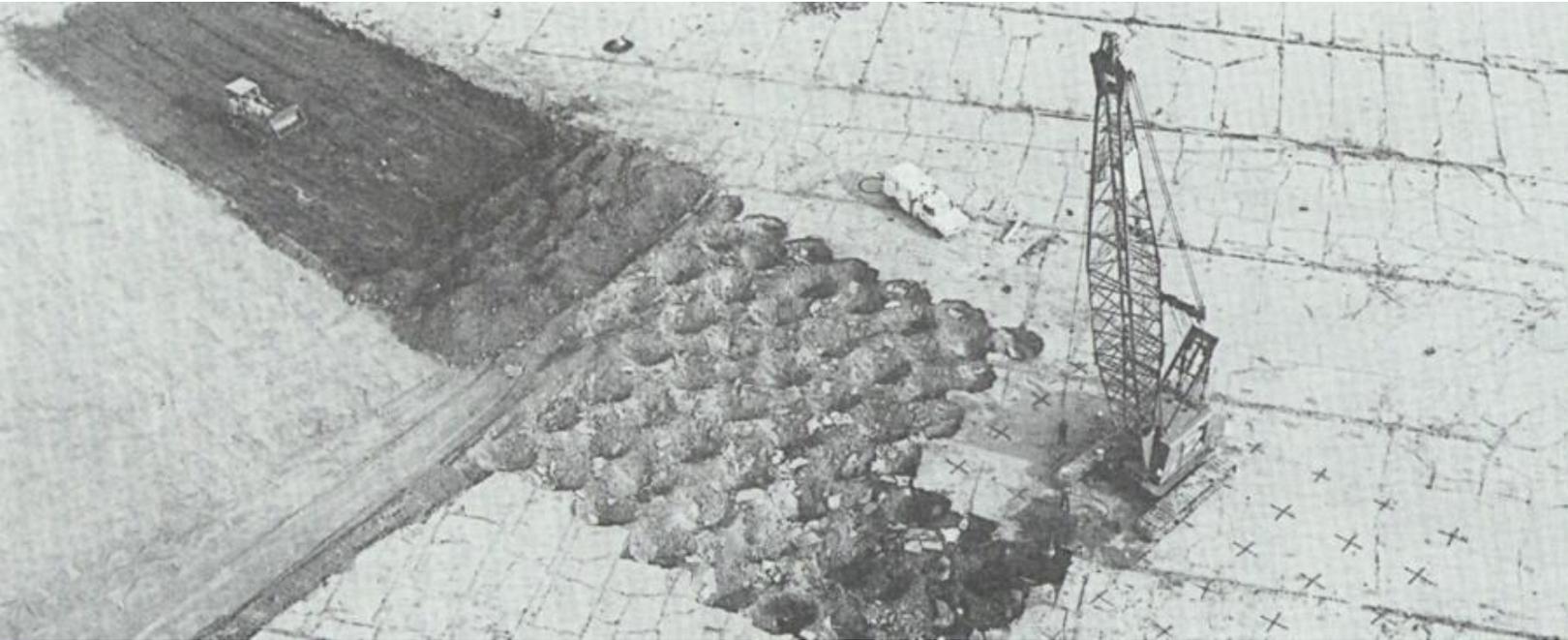


# Compactación Dinámica

- ▶ La compactación dinámica aumenta la densidad del terreno mediante el impacto de una masa que cae de una altura.
- ▶ Las ondas de compresión y corte generadas producen la densificación del suelo.
- ▶ Es una técnica superficial, y por lo tanto insensible a:
  - Nivel freático
  - Contaminación
  - Emplea equipos simples: una grúa grande y palas cargadoras
  - Produce un terreno confiable
  - Elimina riesgo de licuación dentro del espesor activo
  - Reduce la demanda sísmica



# Compactación Dinámica



# Compactación Dinámica



(Soletanche-Bachy)

# Compactación Dinámica

- Profundidad de compactación ( $D$ )

$$D_i = n_c \sqrt{W_t H_d}$$

$D_i$  = depth of improvement (m)

$W_t$  = weight of tamper (ton)

$H_d$  = height of drop (m)

$n_c$  = constant, depending on soil type, degree of saturation, and speed of drop



**Table 3.9 Recommended  $n_c$  Value**

Soil Type <sup>a</sup>	Degree of Saturation	$n_c$
Pervious soil deposits—granular soils	High	0.5
	Low	0.5–0.6
Semipervious deposits—primary silts with PI < 8	High	0.35–0.4
	Low	0.4–0.5
Semipervious deposits—primary clayey soils with PI > 8	High	Not recommended
	Low ( $w < PL$ )	0.35–0.4

<sup>a</sup>PI = plasticity index,  $w$  = moisture content, and PL = plastic limit. For  $W_t H_d = 1\text{--}3 \text{ MJ/m}^2$  and a tamper drop using a single cable.  
 Source: Lukas (1995).



# Compactación Dinámica

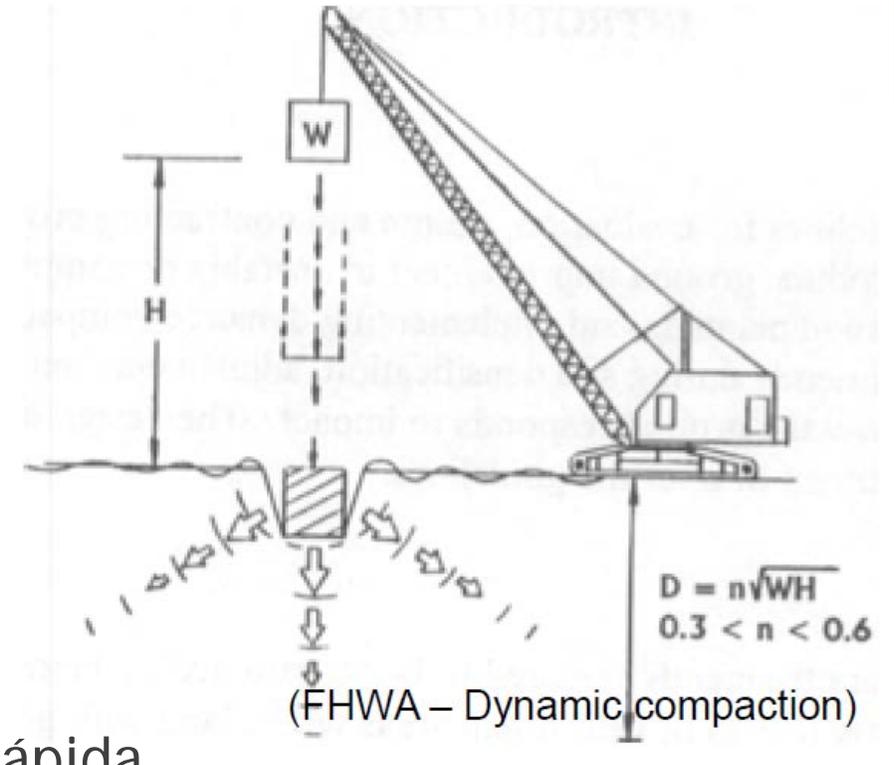
## Limitaciones

- ▶ Rellenos de grano grueso sin finos: 20m
- ▶ Arenas limosas: 12m - 14m
- ▶ Produce vibraciones en el entorno
- ▶ No es viable en áreas pequeñas

Movilización de grúa con malacate de liberación rápida

Fabricación de pisón compactador

Calibración de procedimiento



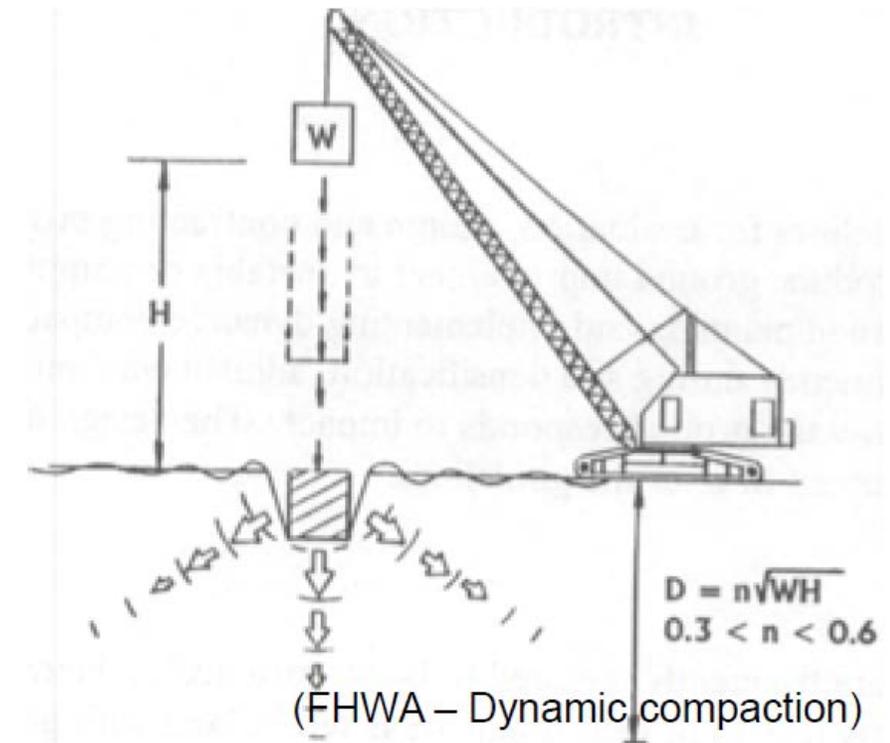


# Compactación Dinámica

Máximo mejoramiento

Soil Type	Maximum Test Value		
	Standard Penetration Resistance (blows / 300 mm)	Static Cone Tip Resistance (MPa)	Pressuremeter Limit Pressure (MPa)
Pervious coarse-grained soil:			
sands & gravels	40 - 50	19 - 29	1.9 - 2.4
Semipervious soil:			
sandy silts	34 - 45	13 - 17	1.4 - 1.9
silts & clayey silts	25 - 35	10 - 13	1.0 - 1.4
Partially saturated impervious deposits:			
clay fill & mine spoil	30 - 40*	N/A	1.4 - 1.9
Landfills	20 - 40*	N/A	0.5 - 1.0

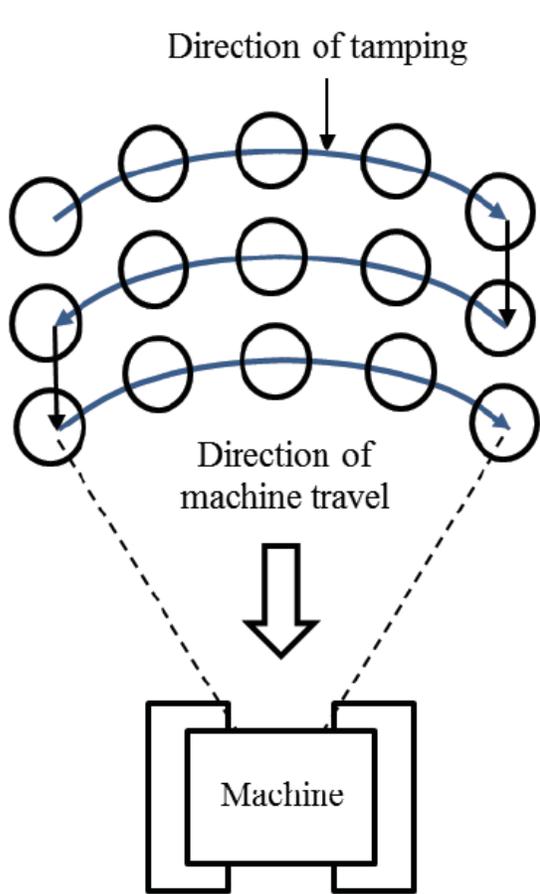
\*Higher test values may occur due to large particles in the soil mass.



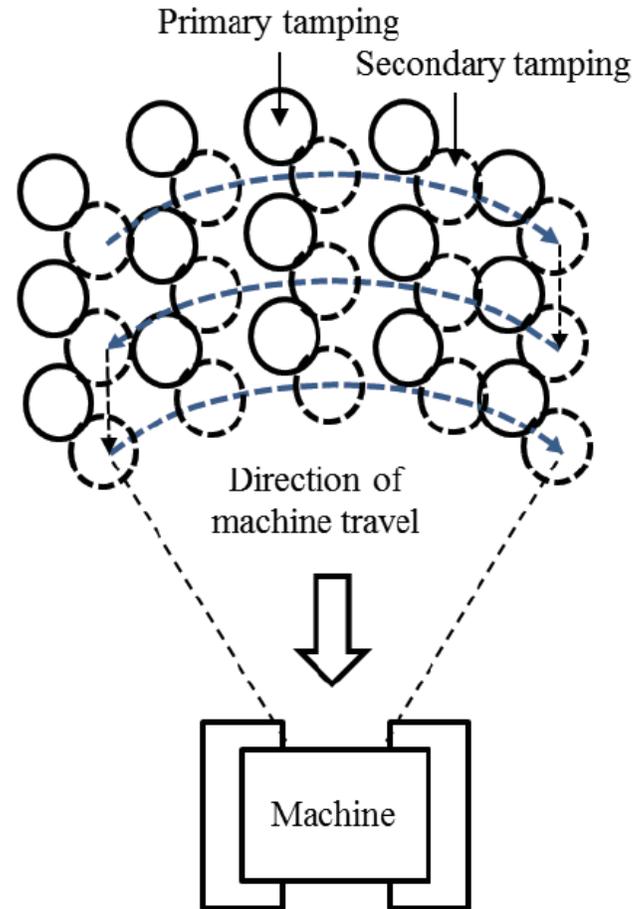


# Compactación Dinámica

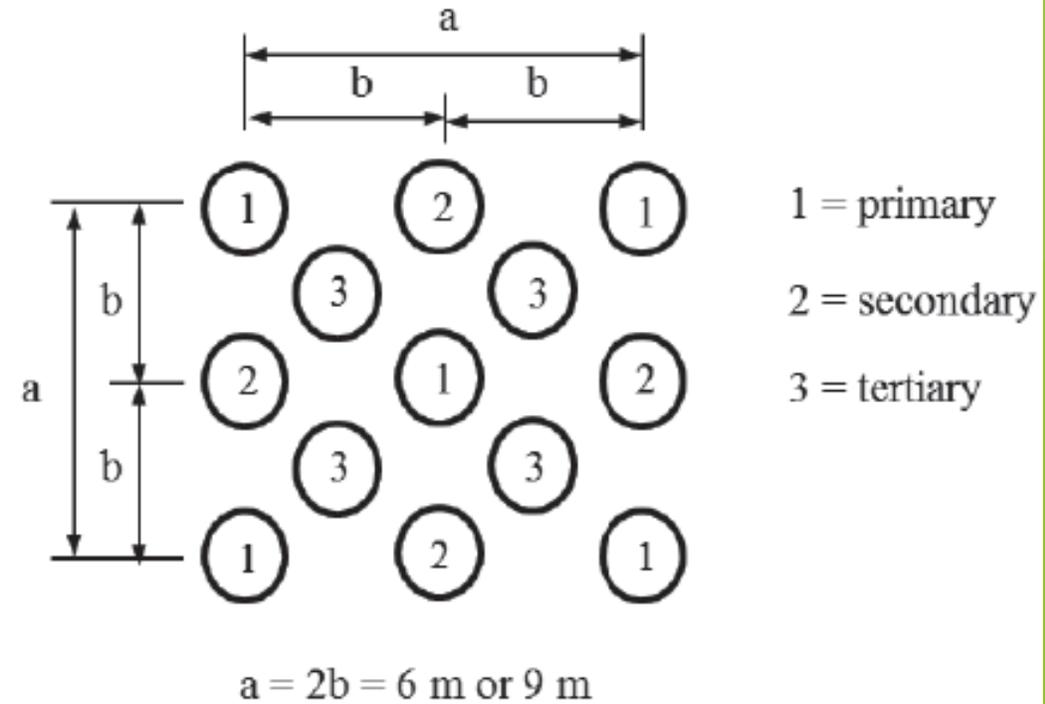
## Configuración en Planta



(a) Primary tamping



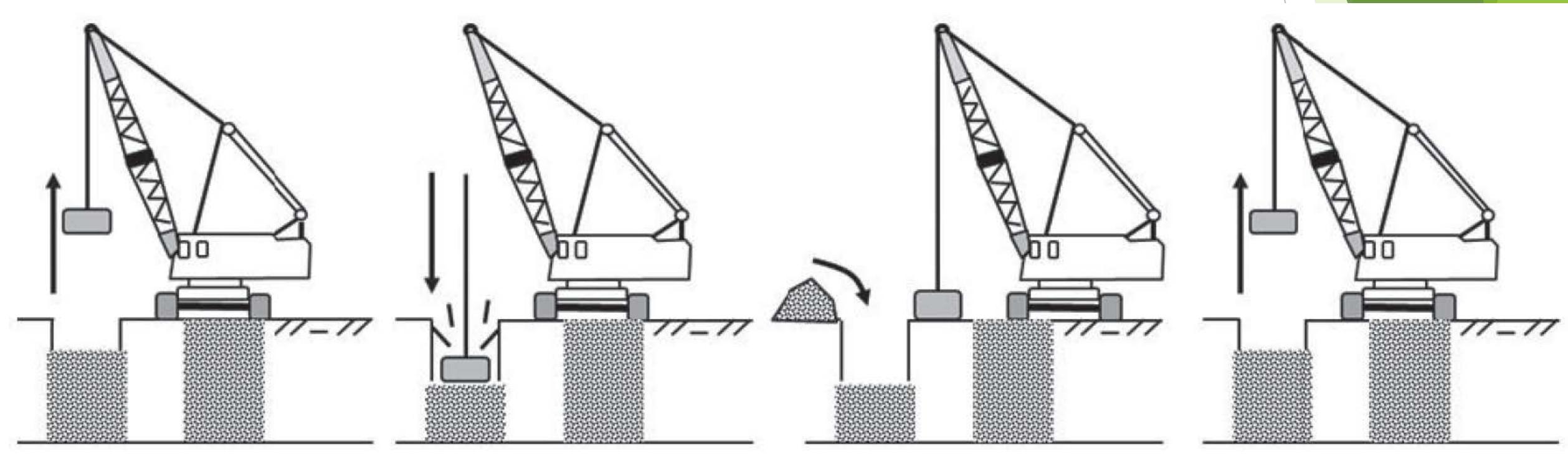
(b) Secondary tamping





## Reemplazo Dinámico

- El reemplazo dinámico se emplea en suelos finos no densificables.
- El mejoramiento del terreno continúa luego de aplicado el impacto por consolidación y drenaje.





# Clasificación

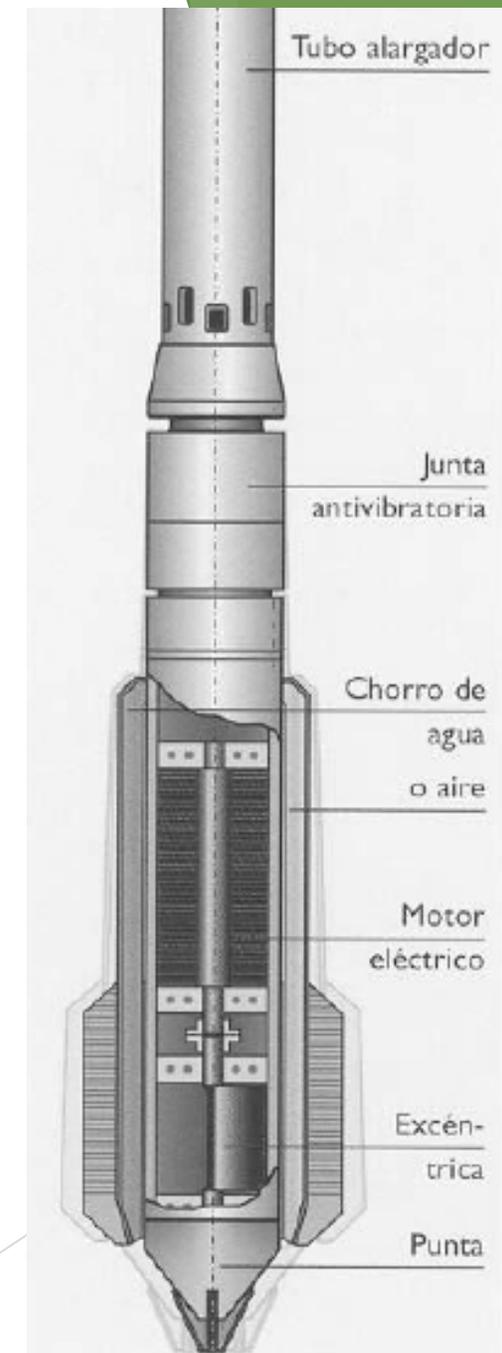
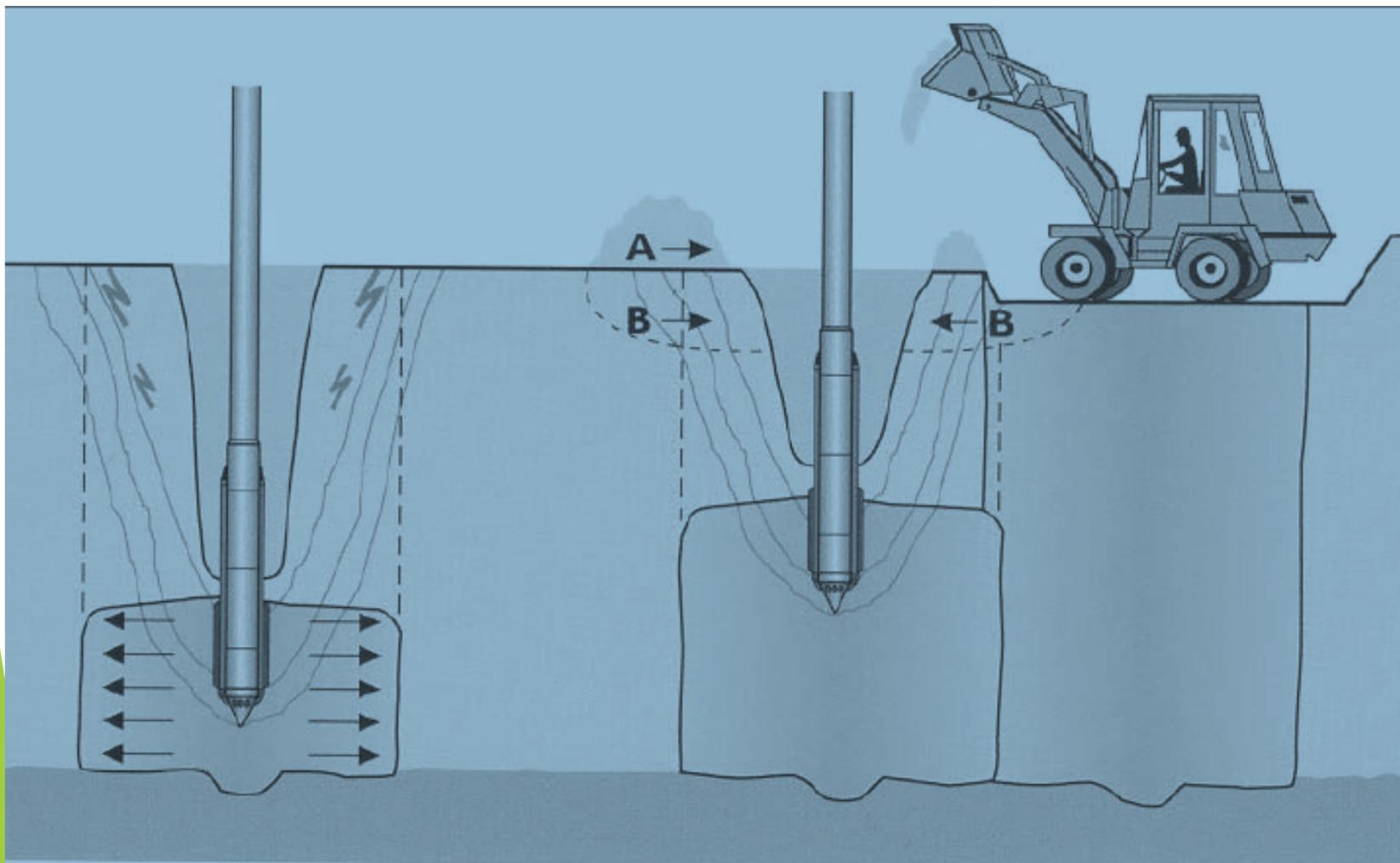
- ▶ **Incremento del peso unitario**
  - ▶ Compactación tradicional/reemplazo
  - ▶ Compactación Dinámica
  - ▶ **Vibro-compactación / Vibro-sustitución**
  - ▶ Consolidación/colapso
- ▶ Agregado de Cementantes
  - ▶ Inyecciones
  - ▶ Jet Grouting
- ▶ Agregado de Inclusiones Rígidas



# Vibrocompactación

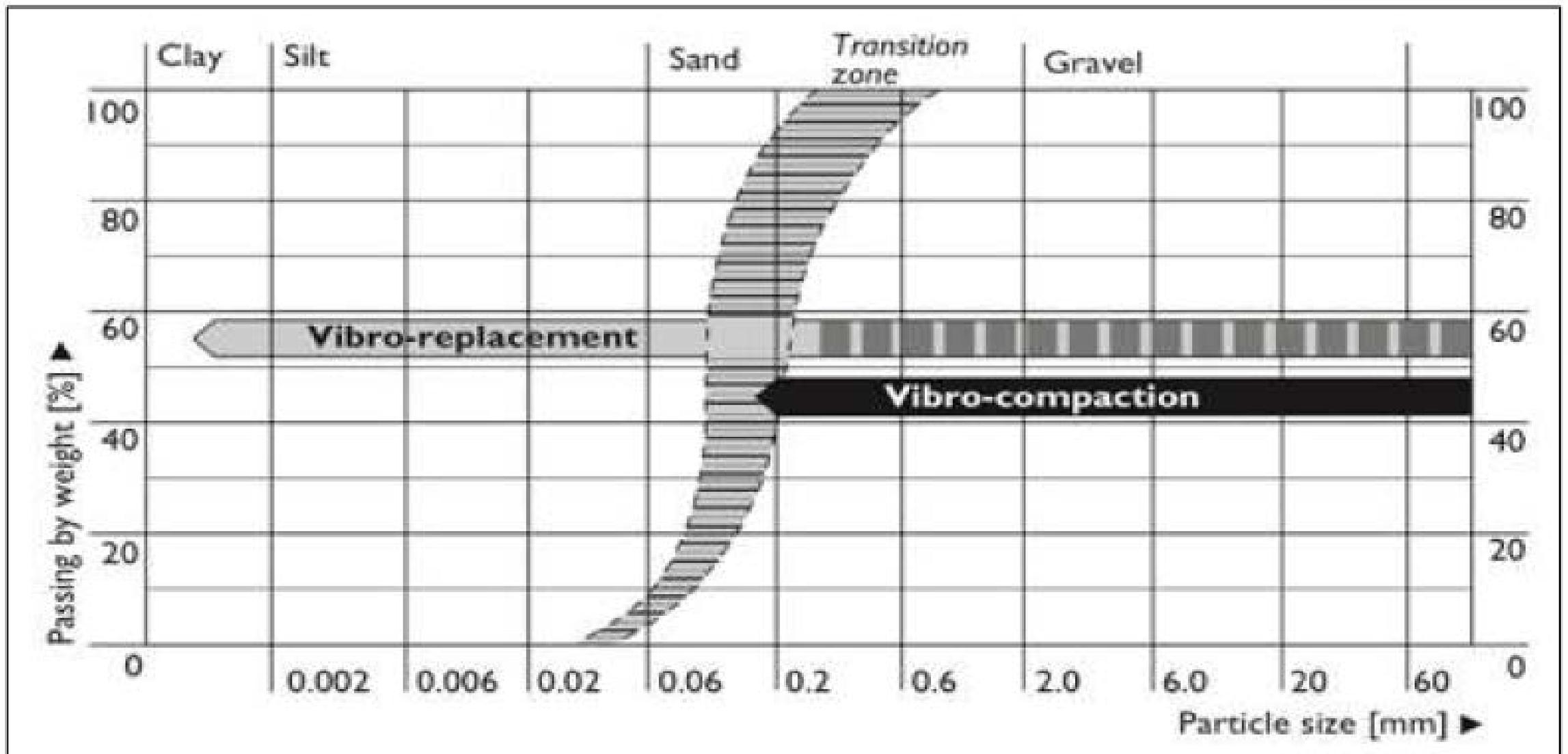
- ▶ Consiste en el hincado de un elemento vibrador colgado de una grúa, que desciende por el efecto combinado del peso propio, inyección de agua y vibración.
- ▶ Luego, este elemento se levanta mientras vibra y el suelo se derrumba llenando la cavidad que se deja al extraer el vibrador.
- ▶ Por pasadas sucesivas de abajo hacia arriba, el suelo se compacta formando cilindros de hasta 5 m de diámetro.
- ▶ En la superficie se forma un cono de hundimiento alrededor del vibrador, por lo cual hay que aportar material para dejar a nivel el terreno.

# Vibrocompactación





# Vibrocompactación





# Vibrocompactación

- ▶ Aplicable en suelo granulares sueltos y con poco contenido de finos
- ▶ Profundidad de tratamiento hasta 25m con record de 50m
- ▶ El suelo circundante mejora su densidad, 2m - 5m
- ▶ Se alcanzan densidades relativas  $D_r > 75\%$ , hasta 85%
- ▶ Presión admisible 250kPa a 500kPa
- ▶ Ángulo de fricción interna, mejora hasta  $+10^\circ$
- ▶ Módulo de deformación mejora +2 a 4 veces
- ▶ Reduce demanda sísmica
- ▶ Lentas densos  $(N_1)_{60} > 20 | 25$  requieren pre-perforación



# Vibrocompactación





# Vibrocompactación





# Vibrocompactación



# Vibrocompactación





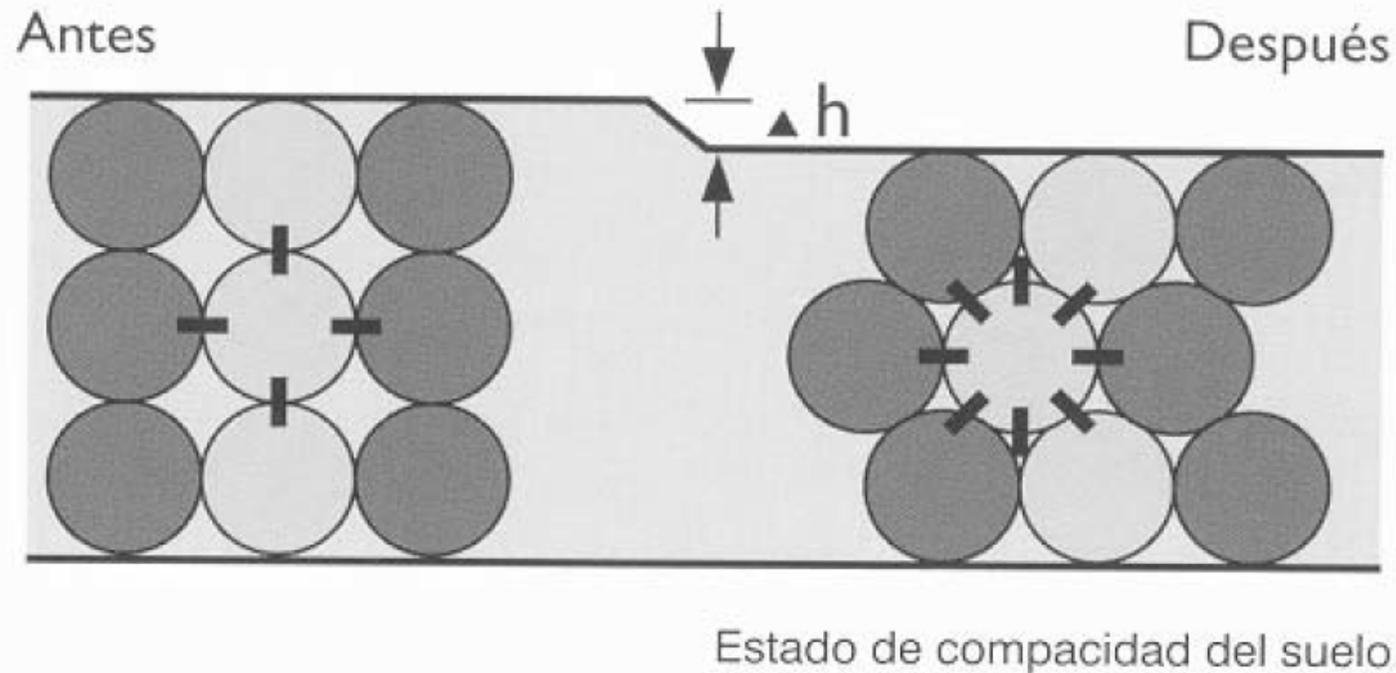
# Vibrocompactación



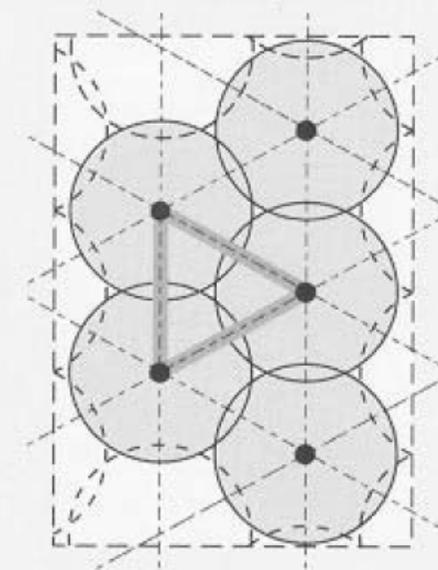


# Vibrocompactación

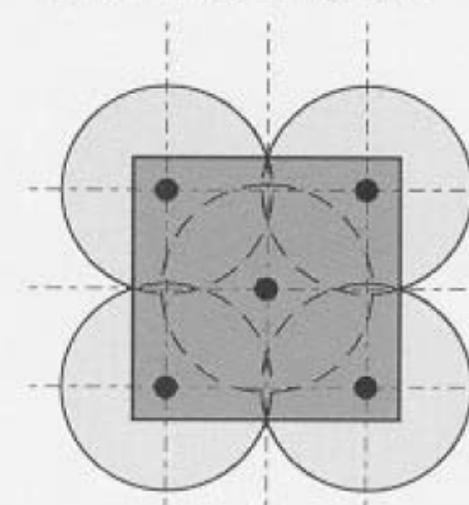
Mecanismo de acomodamiento de partículas



Compactación general  
con malla regular

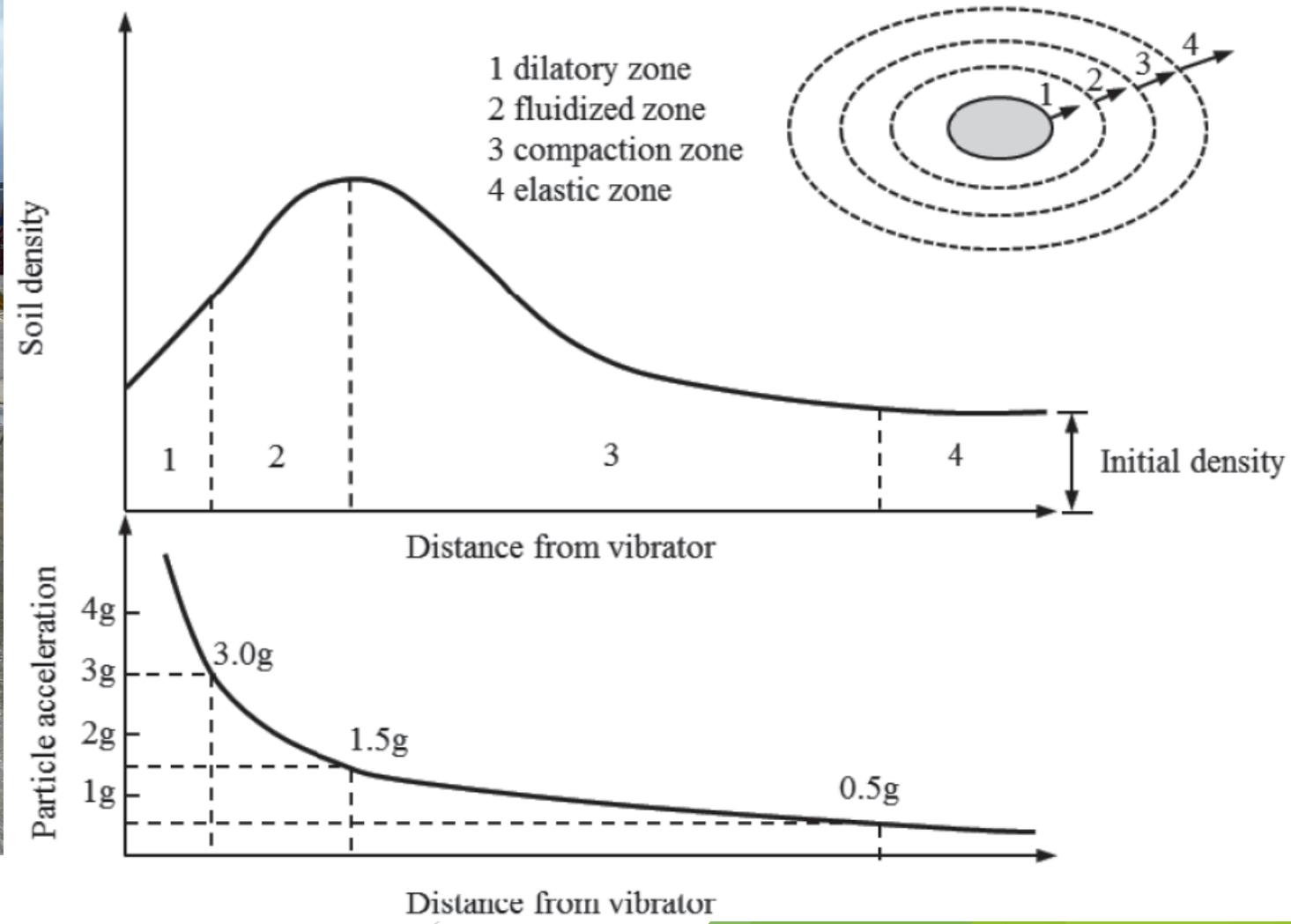


Compactación local  
bajo zapatas





# Vibrocompactación



# Vibrocompactación: control de calidad

SPT previo a la ejecución del mejoramiento

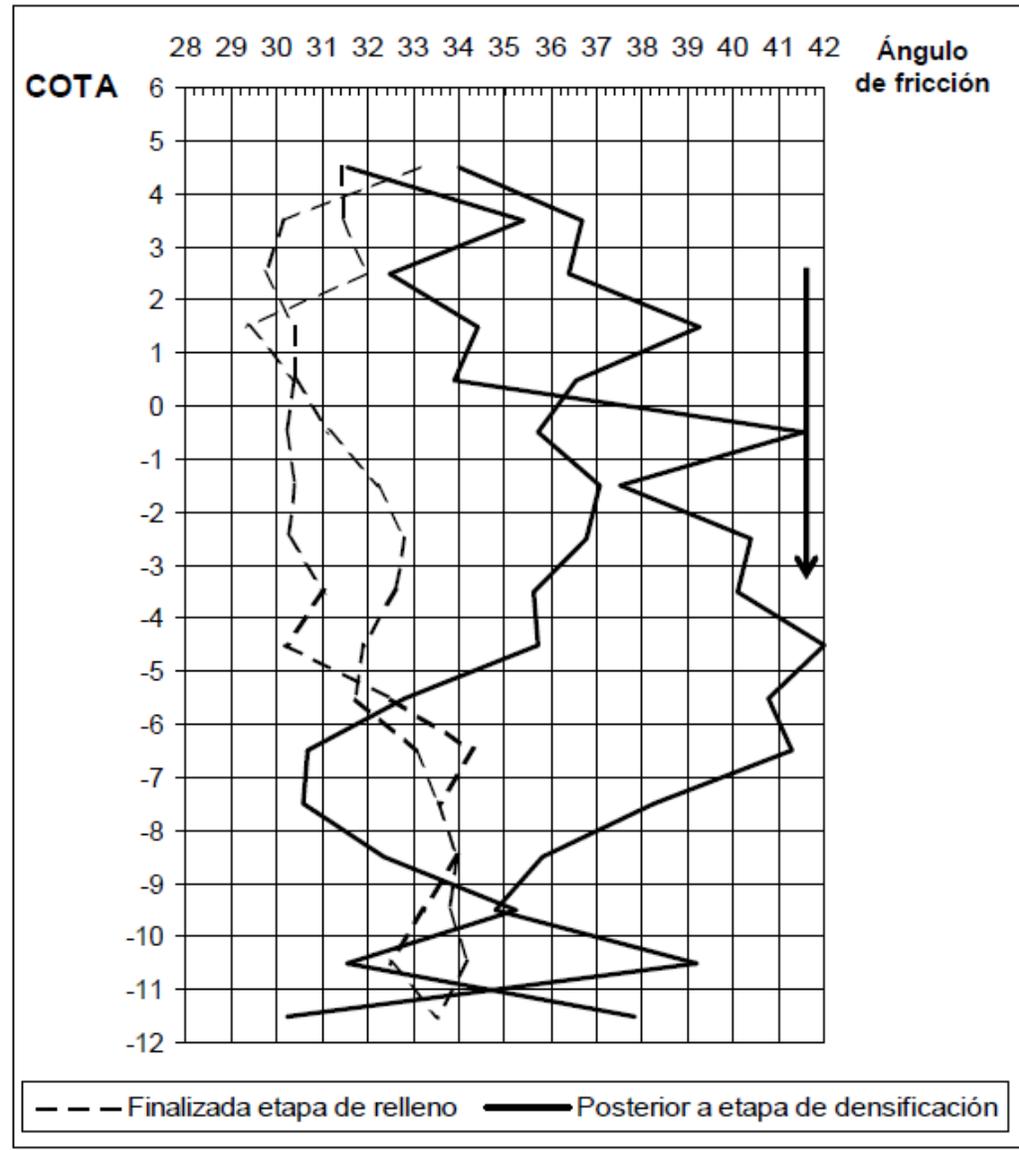


*SPT durante la ejecución del mejoramiento*





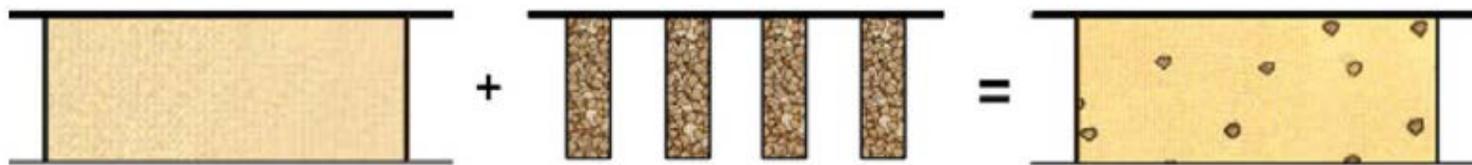
# Vibrocompactación: control de calidad





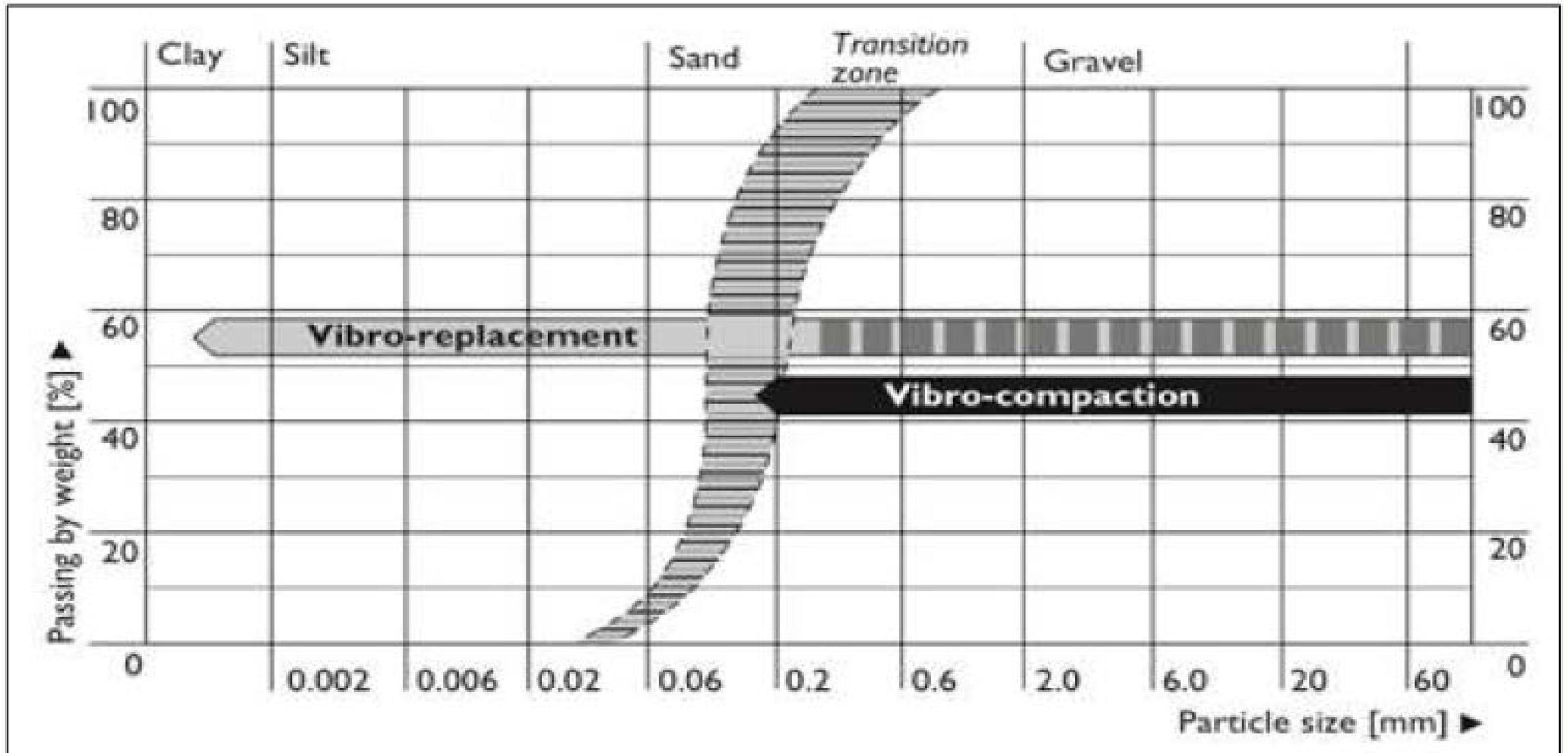
# Vibro-sustitución

- ▶ Consiste en el hincado de un elemento vibrador HUECO colgado de una grúa, que desciende por el efecto combinado del peso propio, inyección de agua y vibración.
- ▶ La cavidad del elemento vibrador está llena de grava.
- ▶ Luego, este elemento se levanta mientras vibra y llena el espacio con la grava de su interior formando columnas de grava de entre 0,6 m a 1,2 m. El suelo no aumenta su densidad, sino que las columnas de grava aportan rigidez (inclusiones).

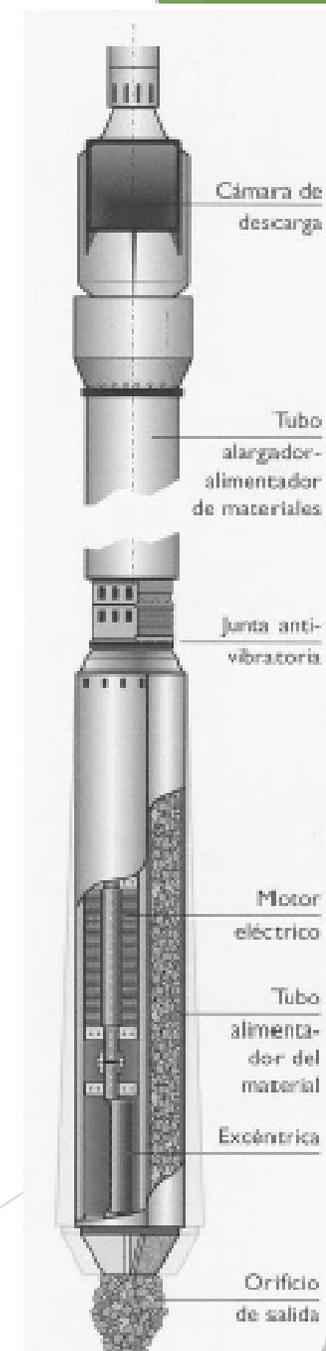
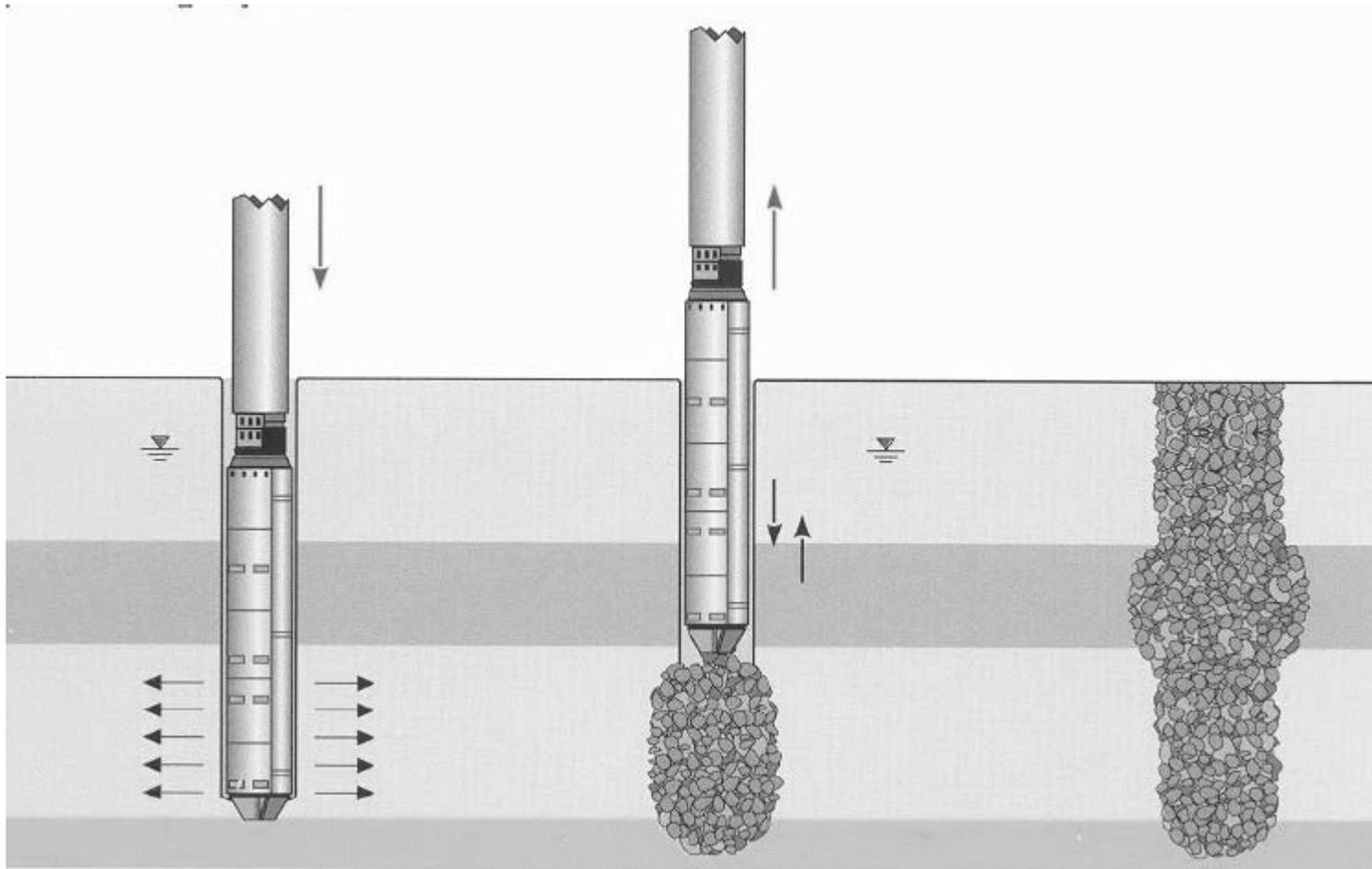




# Vibrocompactación/Vibro-sustitución

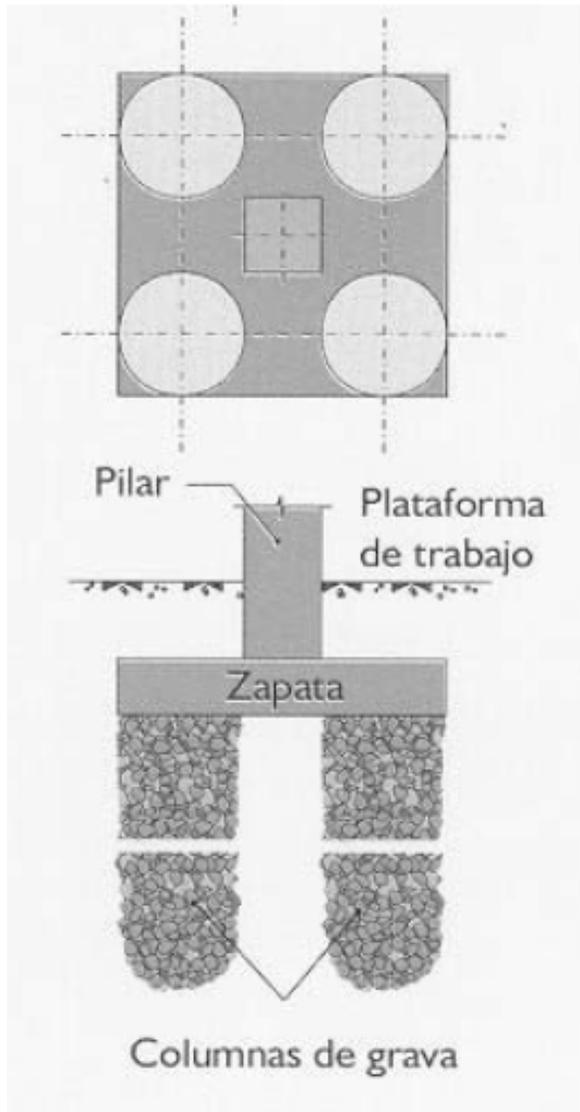


# Vibro-sustitución





# Vibro-sustitución





# Clasificación

- ▶ **Incremento del peso unitario**
  - ▶ Compactación tradicional/reemplazo
  - ▶ Compactación dinámica
  - ▶ Vibro-compactación / Vibro-sustitución
  - ▶ **Consolidación/colapso**
- ▶ Agregado de Cementantes
  - ▶ Inyecciones
  - ▶ Jet Grouting
- ▶ Agregado de Inclusiones Rígidas



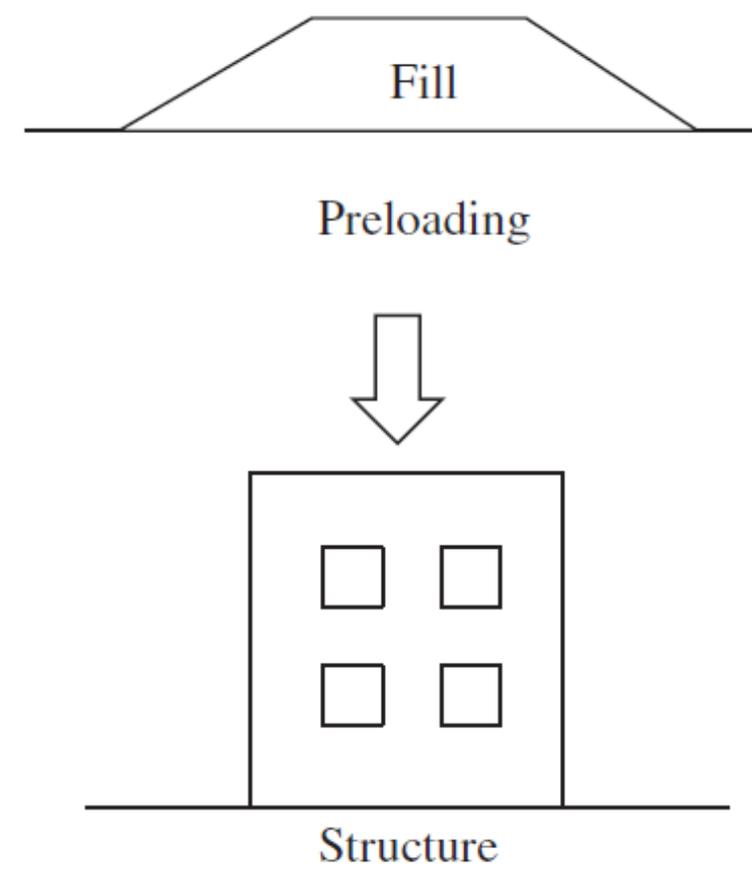
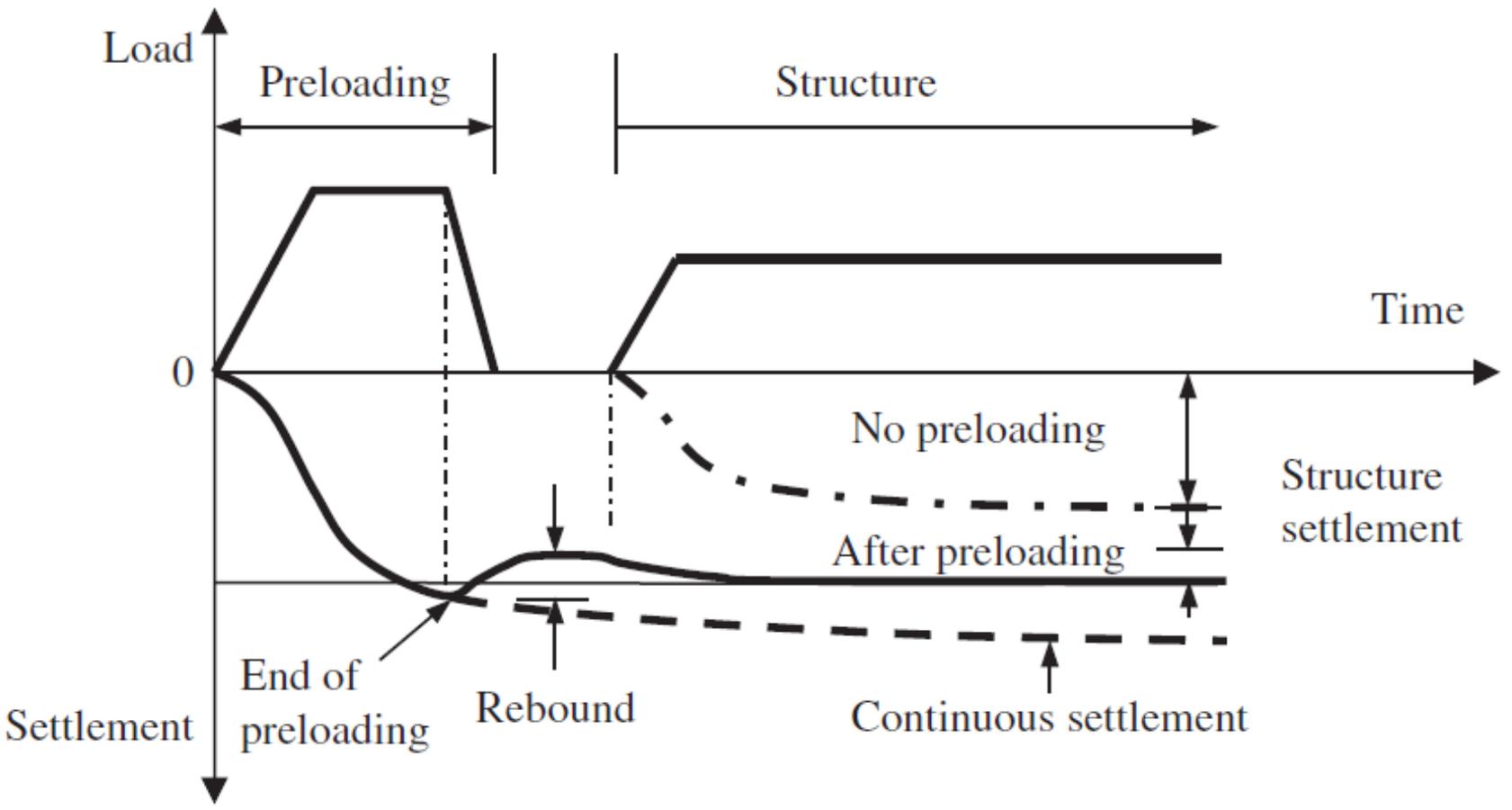
# Consolidación/Precarga

Se aplica una carga sobre un depósito de suelos finos blandos para inducir consolidación.

- ▶ Aumento de presión de preconsolidación
- ▶ Reducción de relación de vacíos
- ▶ Aumento de resistencia al corte
- ▶ Reducción de permeabilidad



# Consolidación/Precarga



# Consolidación/Precarga

La precarga requiere plazos prolongados que pueden disminuirse mediante el empleo de drenes y/o vacío.

Fig. 1 Sin drenes verticales

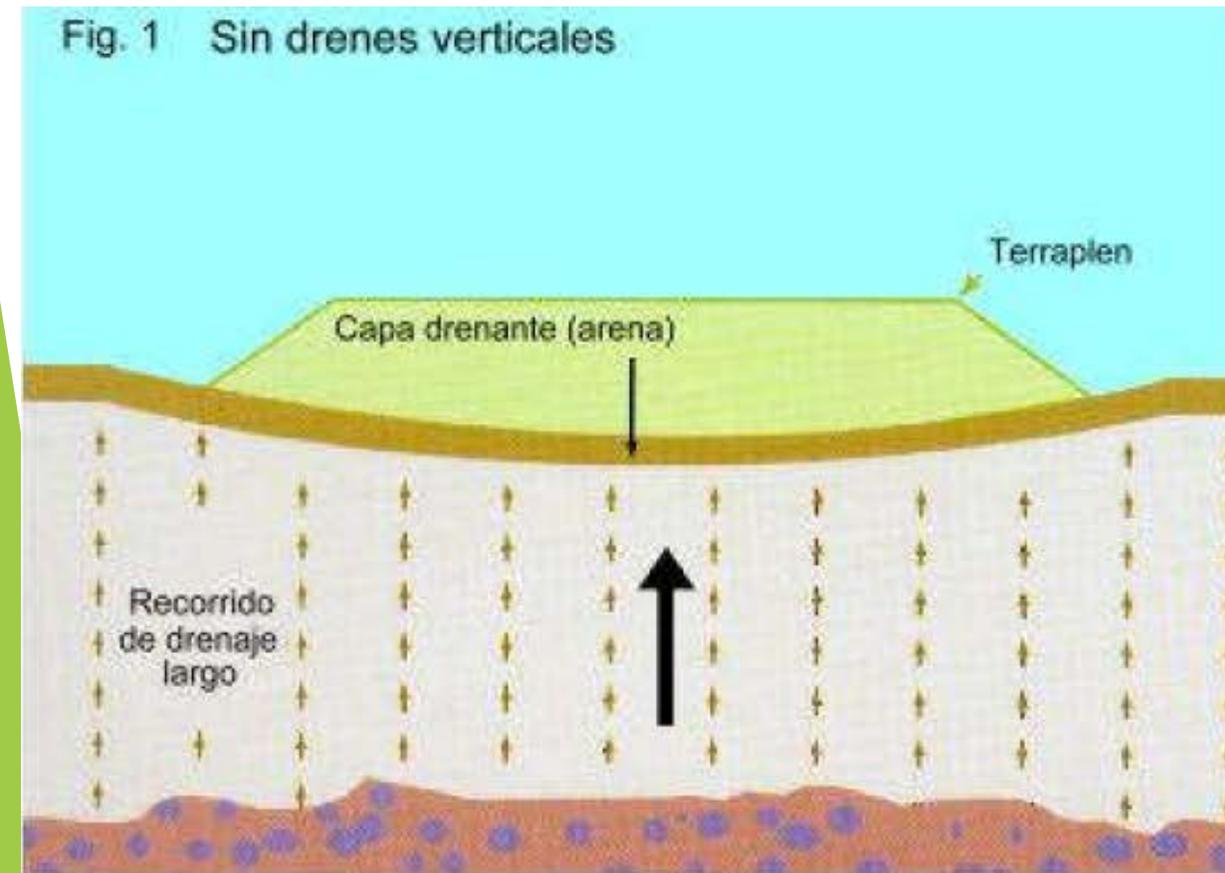
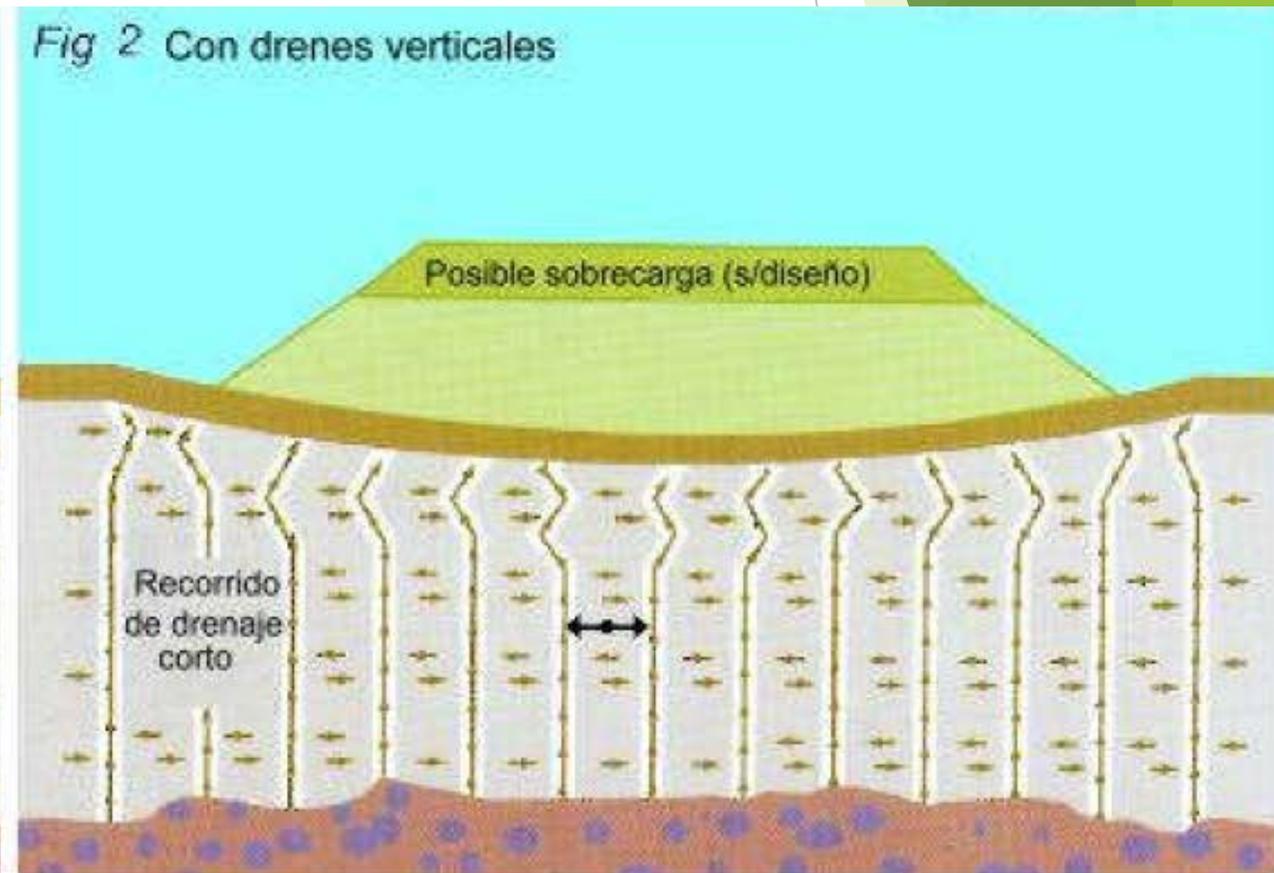


Fig. 2 Con drenes verticales



# Consolidación/Precarga

La instalación de drenes verticales es muy eficiente.

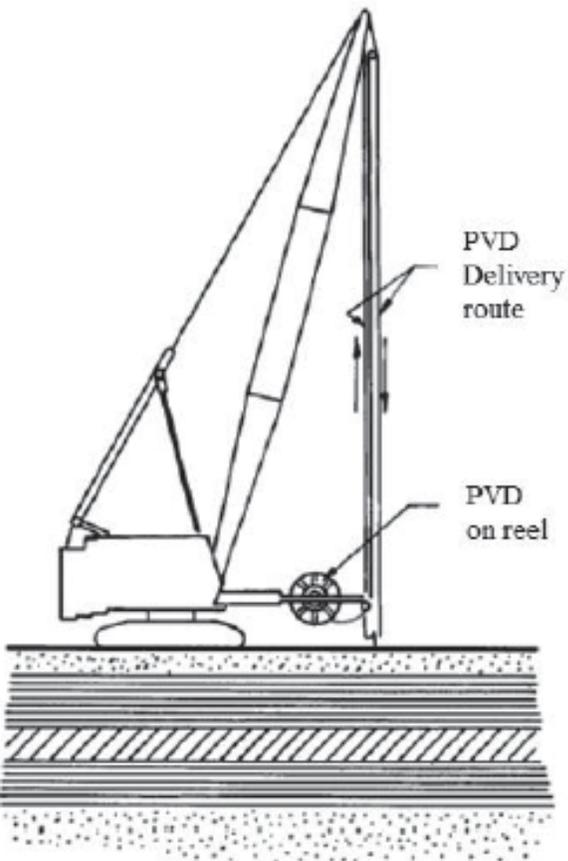
- ▶ 2500m por equipo y día
- ▶ 15 a 50m de profundidad



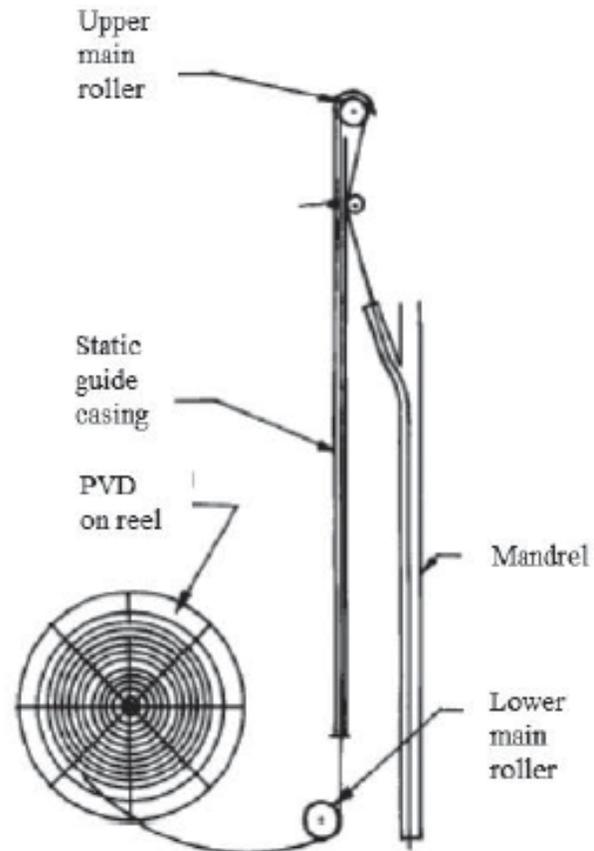


# Consolidación/Precarga

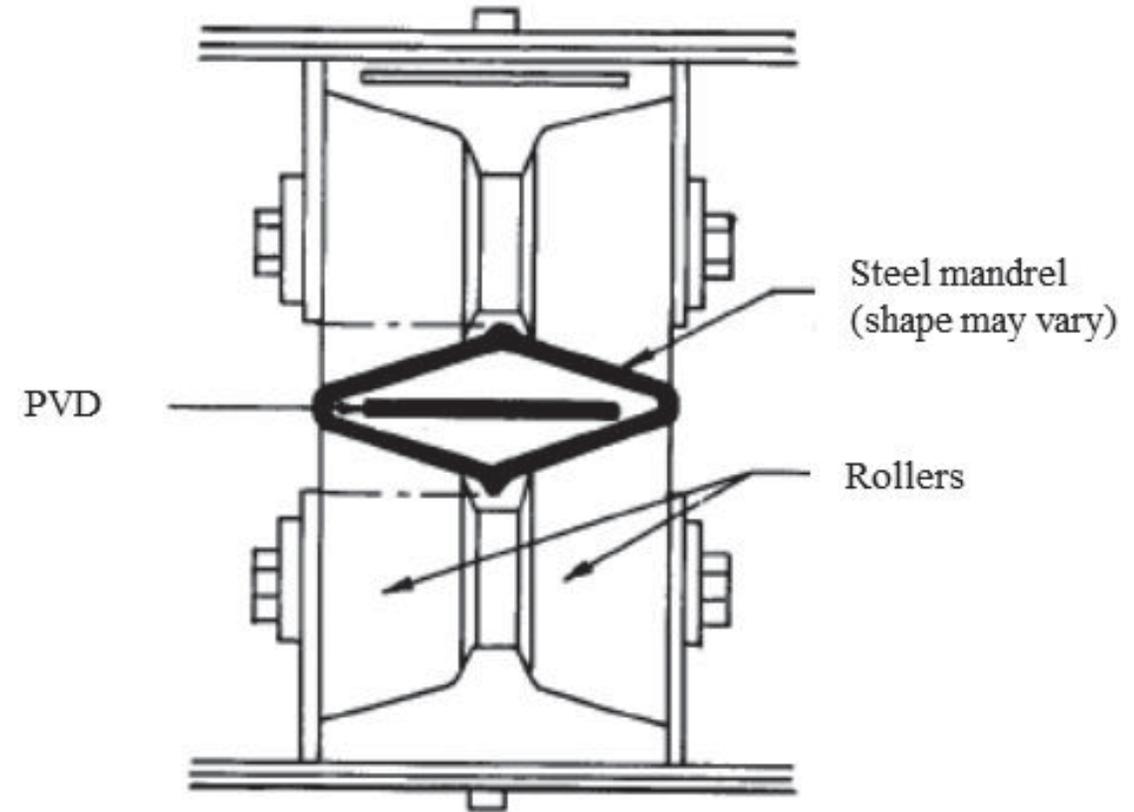
La instalación de drenes verticales es muy eficiente.



(a)



(b)



PVD

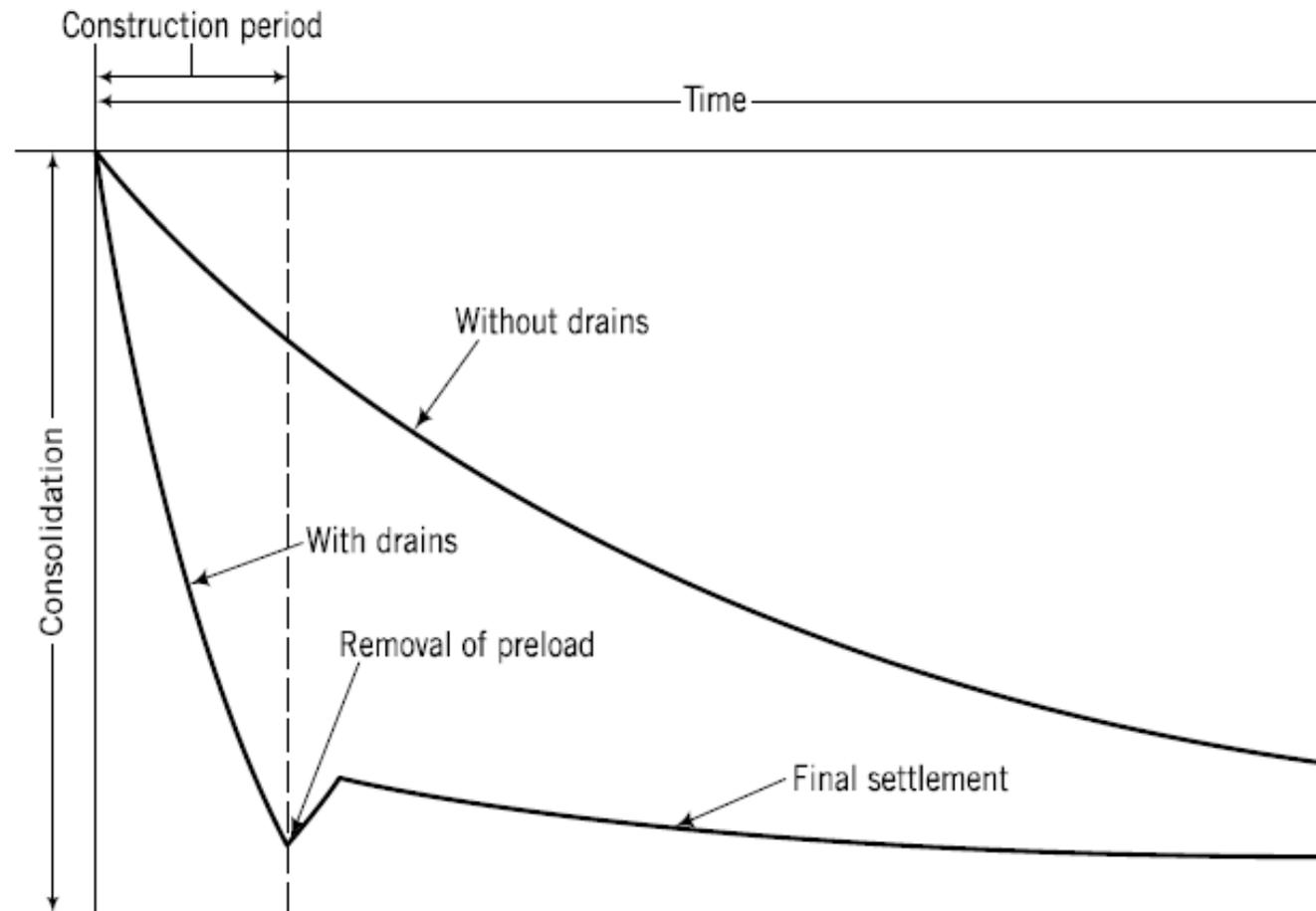
Steel mandrel  
(shape may vary)

Rollers



# Consolidación/Precarga

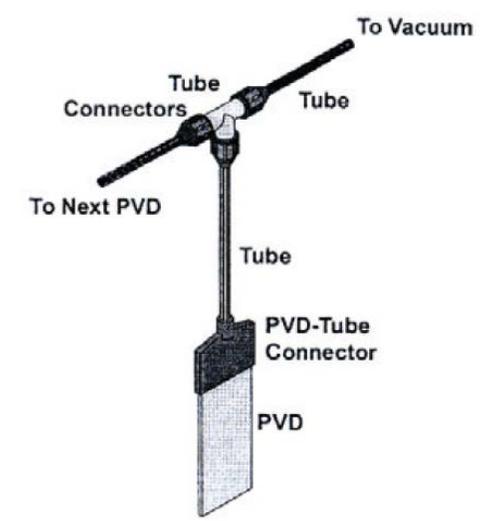
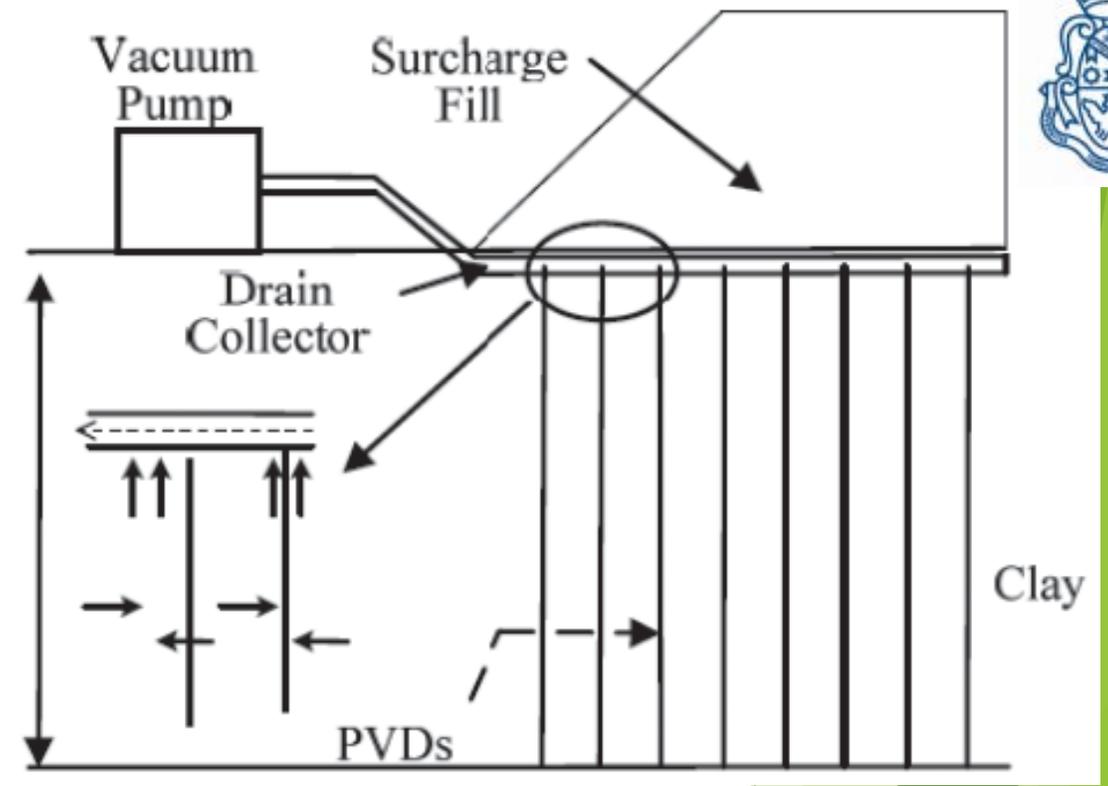
La instalación de drenes verticales es muy eficiente.





# Consolidación/Precarga

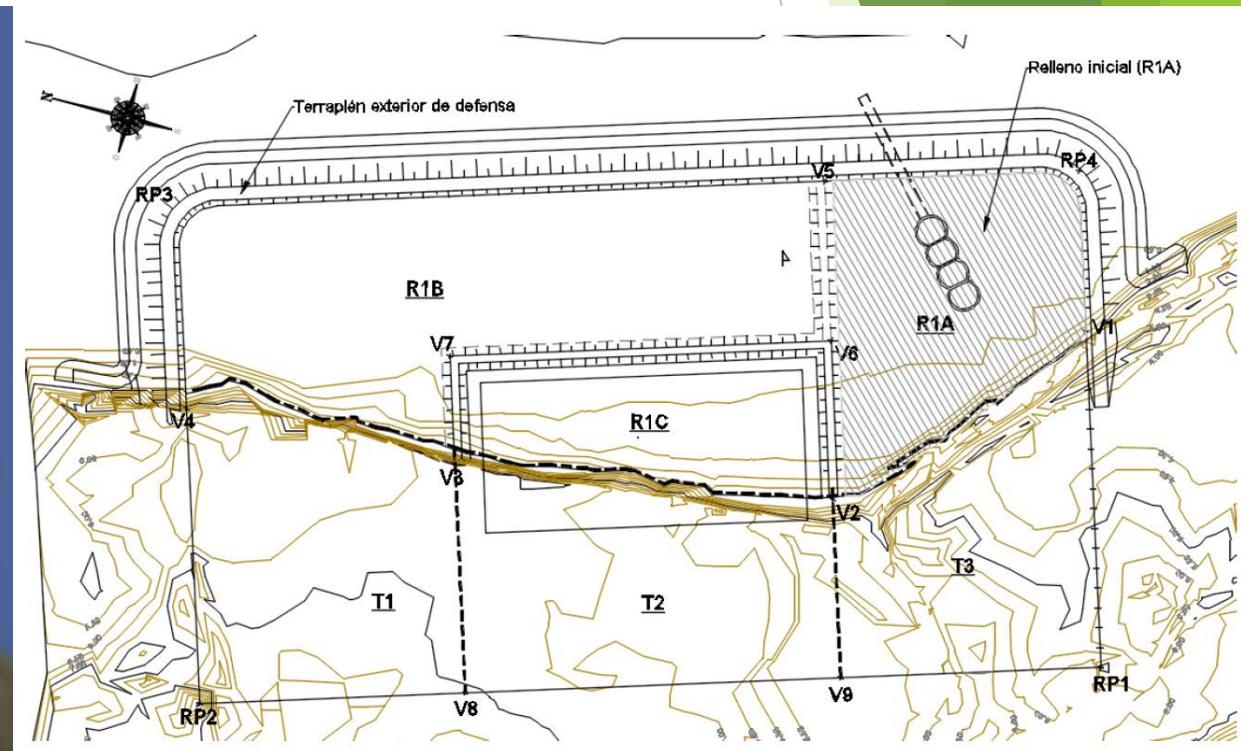
Aplicación de Vacío (Alternativa)





# Consolidación/Precarga

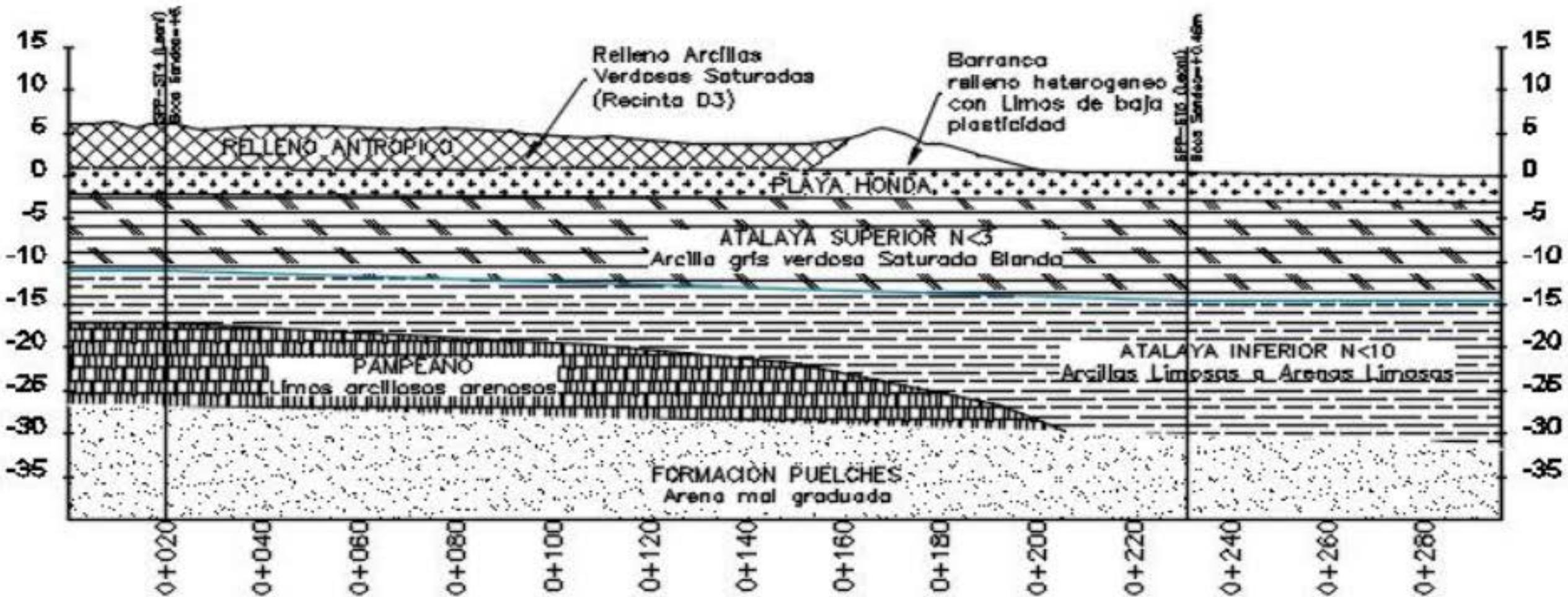
Caso de obra: Lote 3, Sistema Riachuelo





# Consolidación/Precarga

Caso de obra: Lote 3, Sistema Riachuelo





# Consolidación/Precarga

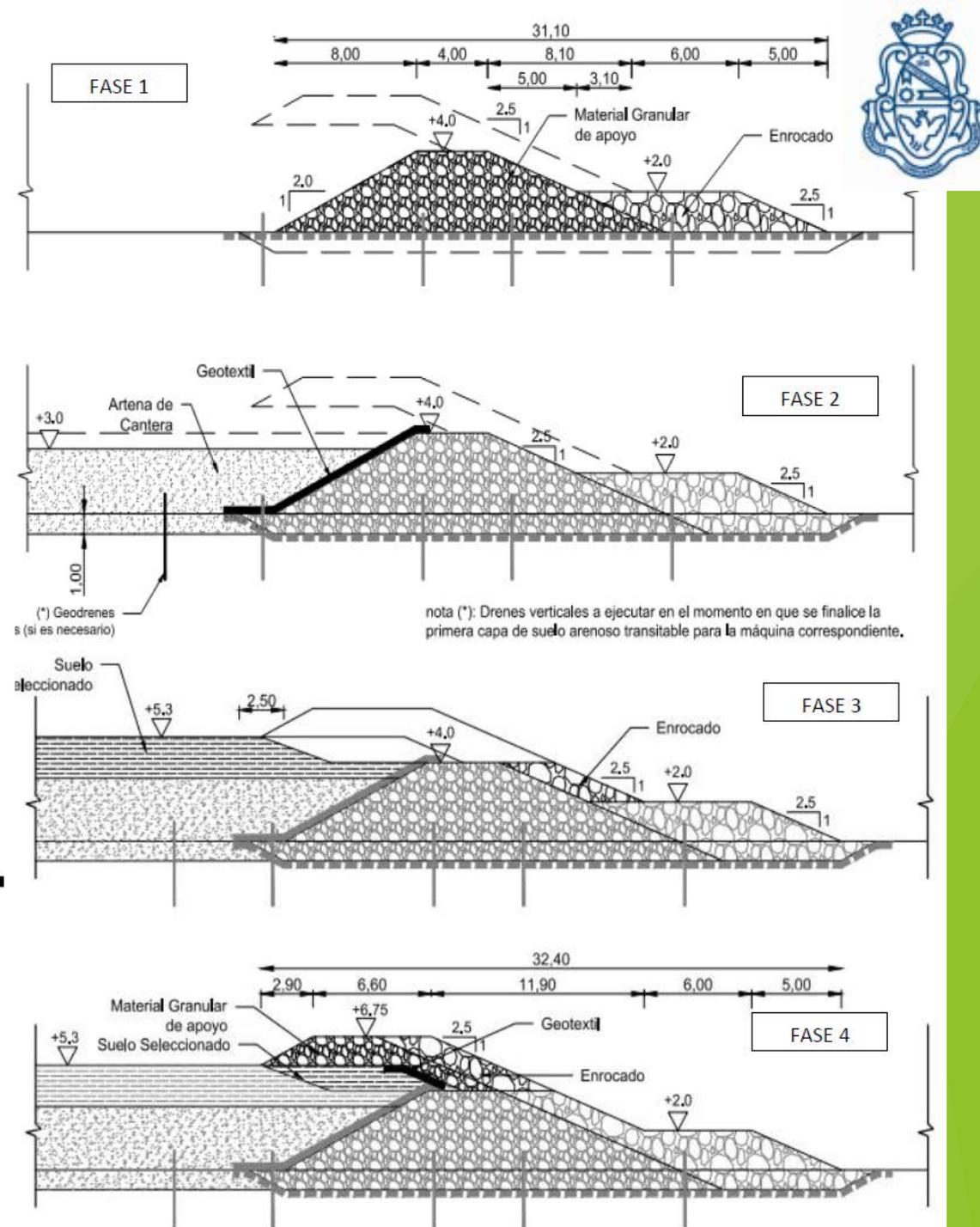
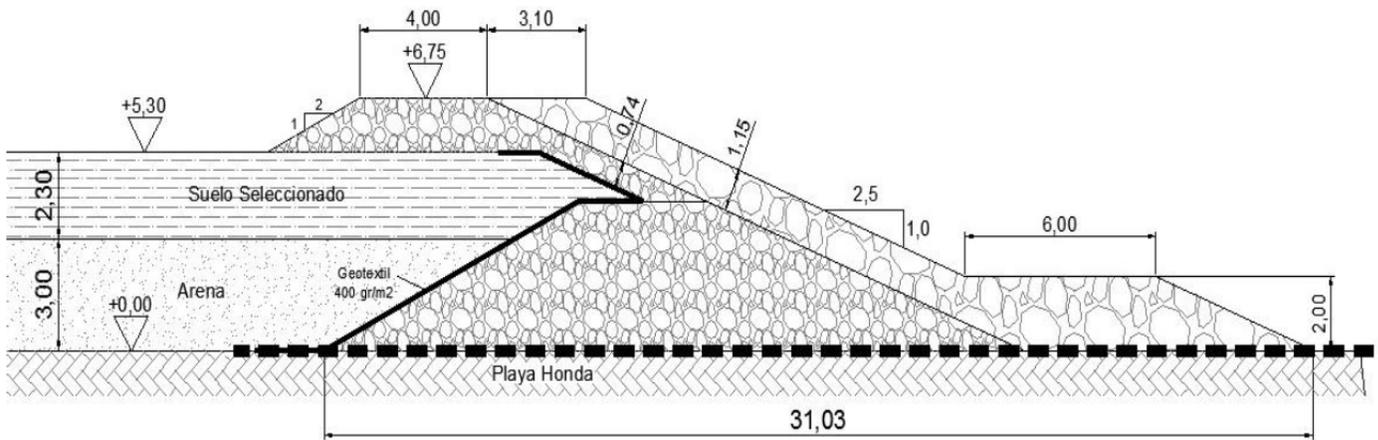
Caso de obra: Lote 3, Sistema Riachuelo



# Consolidación/Precarga

Caso de obra: Lote 3, Sistema Riachuelo

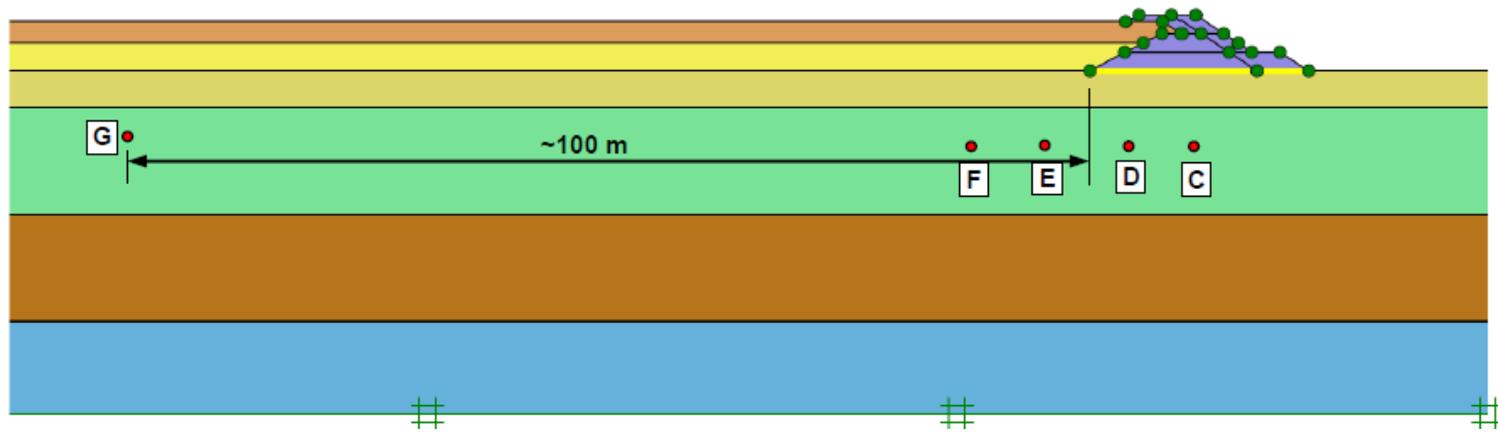
Sección obra de protección costera



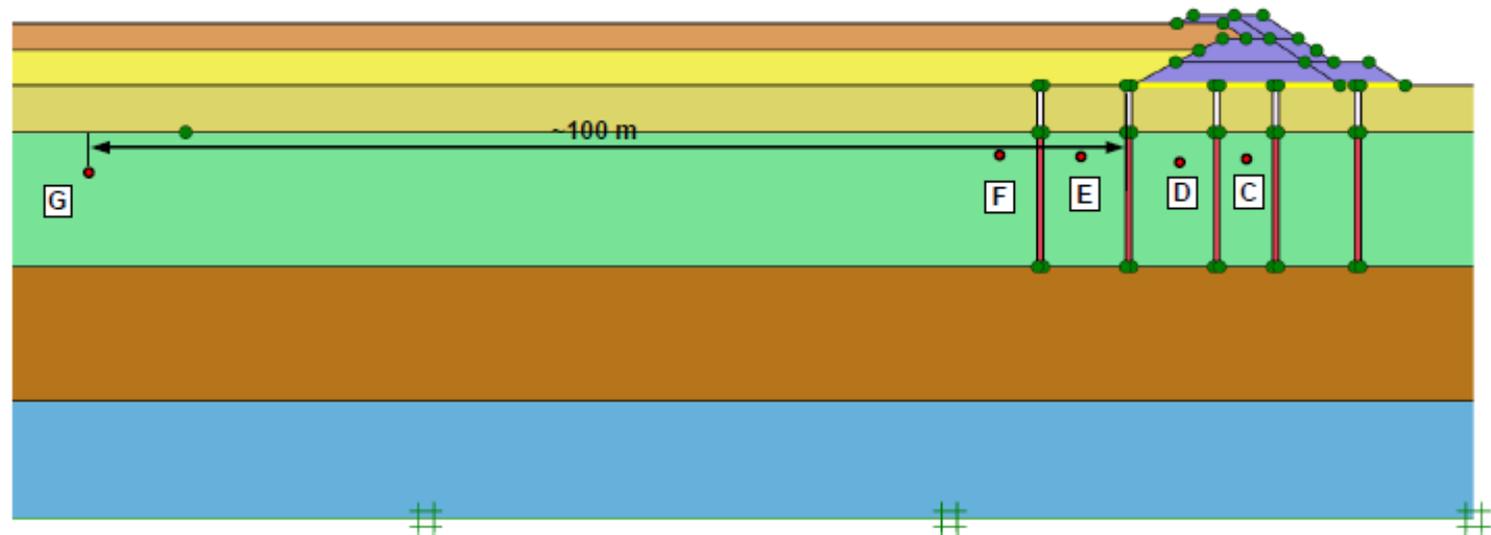


# Consolidación/Precarga

Caso de obra: Lote 3, Sistema Riachuelo. Modelaciones Numéricas



Modelo sin drenes verticales



Modelo con drenes verticales



# Consolidación/Precarga

Caso de obra: Lote 3, Sistema Riachuelo. Solución sin drenes verticales

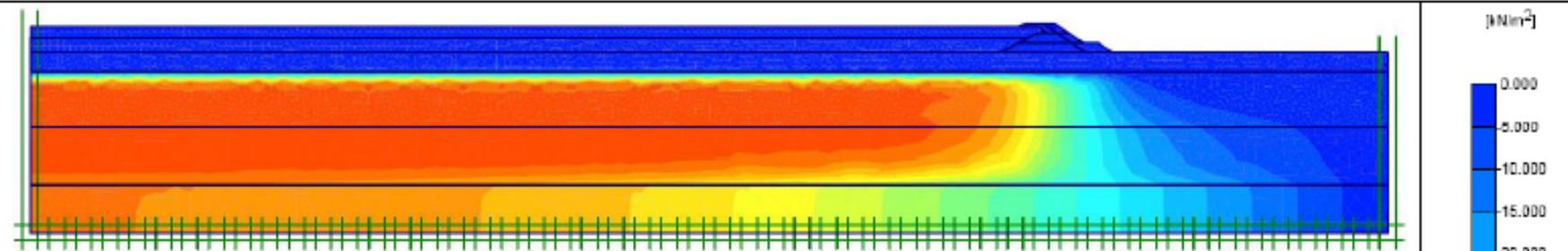


Figura A2.2.16. Distribución de los excesos de presiones de poros al inicio de la Fase 4 (t = 181 días).

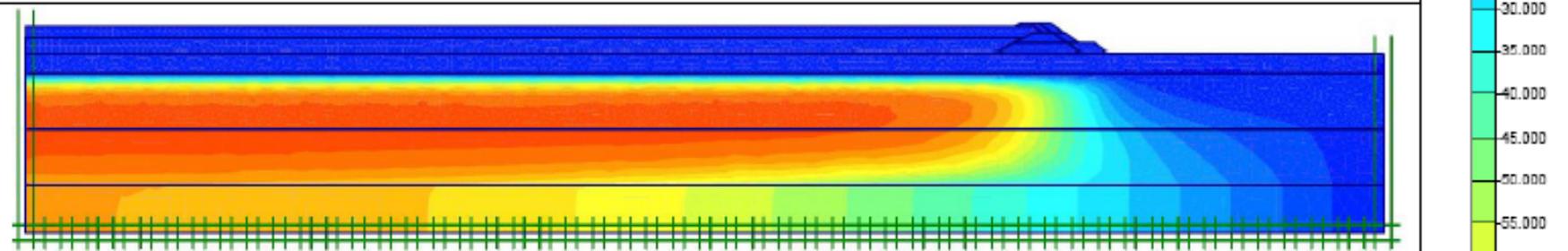


Figura A2.2.17. Distribución de los excesos de presiones de poros al finalizar la Fase 4 (t = 285 días).

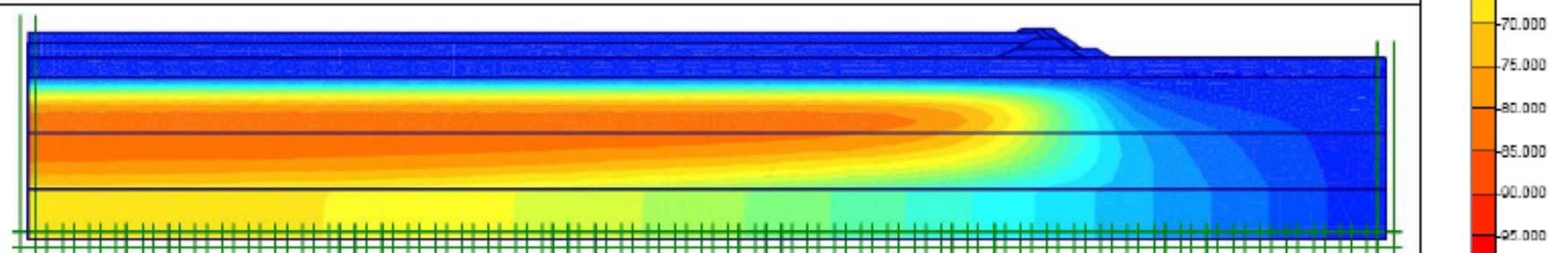


Figura A2.2.18. Distribución de los excesos de presiones de poros a 1 año del inicio de la construcción.

Excesos de  
Presiones de Poro



# Consolidación/Precarga

Caso de obra: Lote 3, Sistema Riachuelo. Solución con drenes verticales

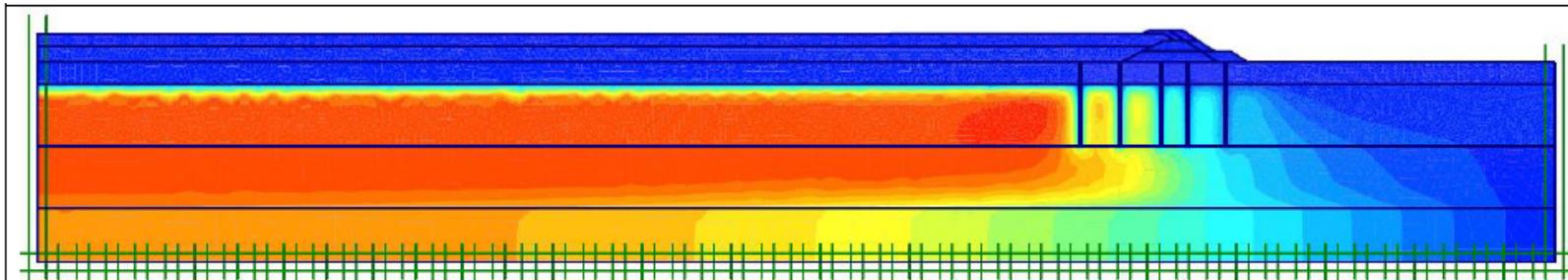


Figura A2.3.12. Distribución de los excesos de presiones de poros al inicio de la Fase 4 (t = 181 días).

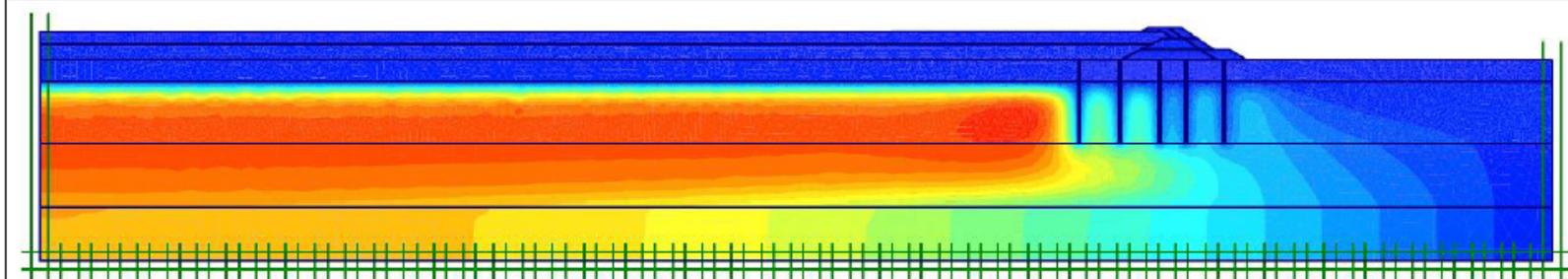


Figura A2.3.13. Distribución de los excesos de presiones de poros al finalizar la Fase 4 (t = 285 días).

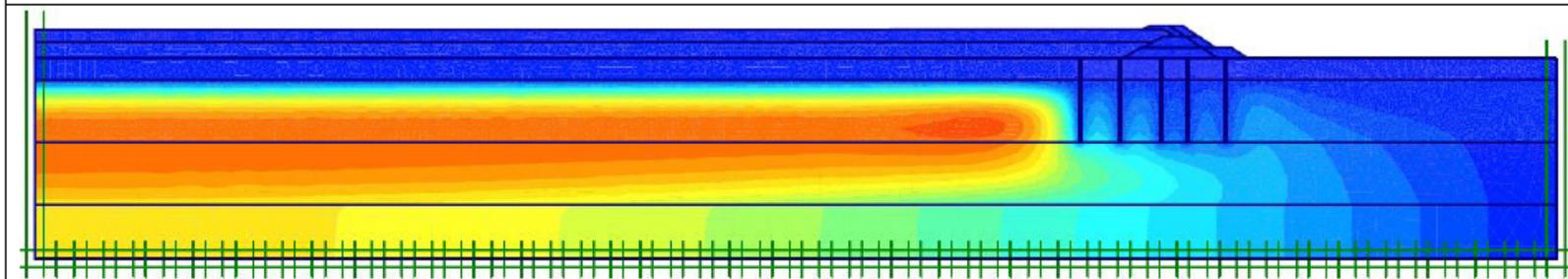
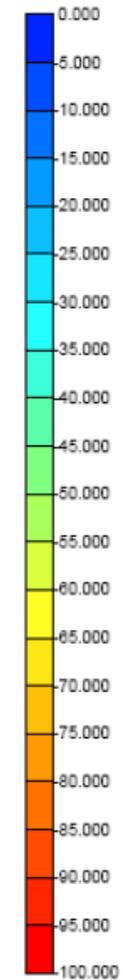


Figura A2.3.14. Distribución de los excesos de presiones de poros a 1 año del inicio de la construcción.

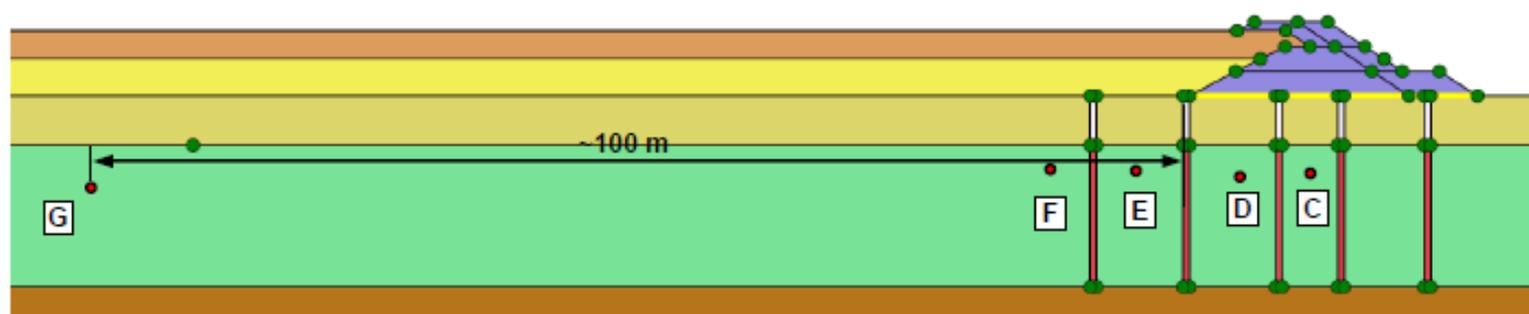
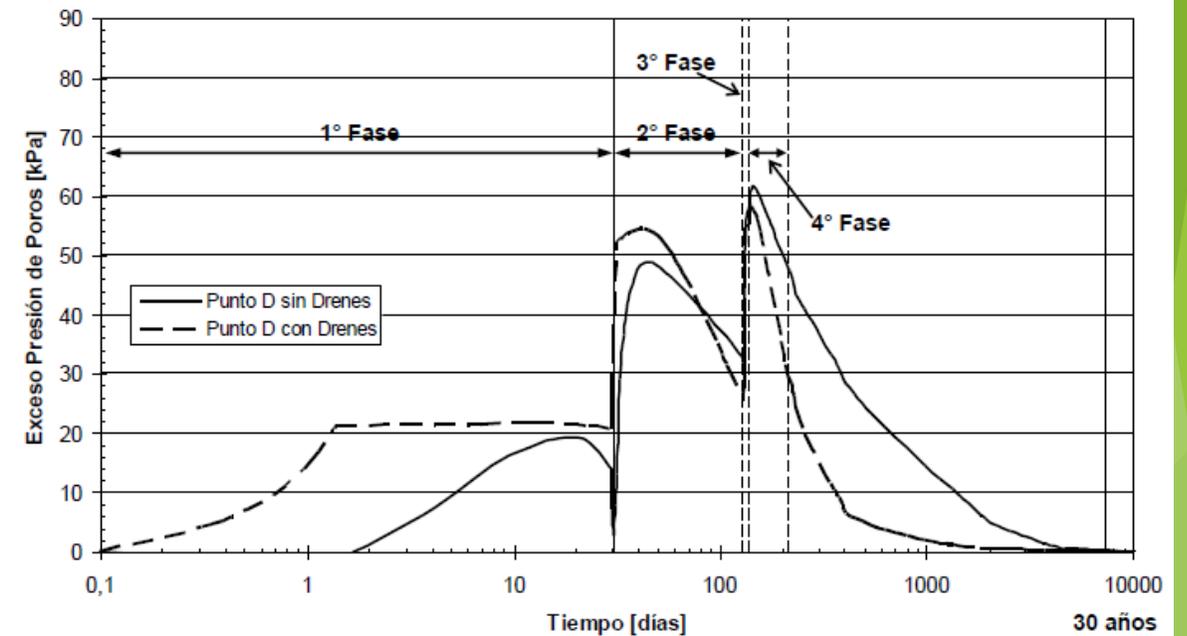
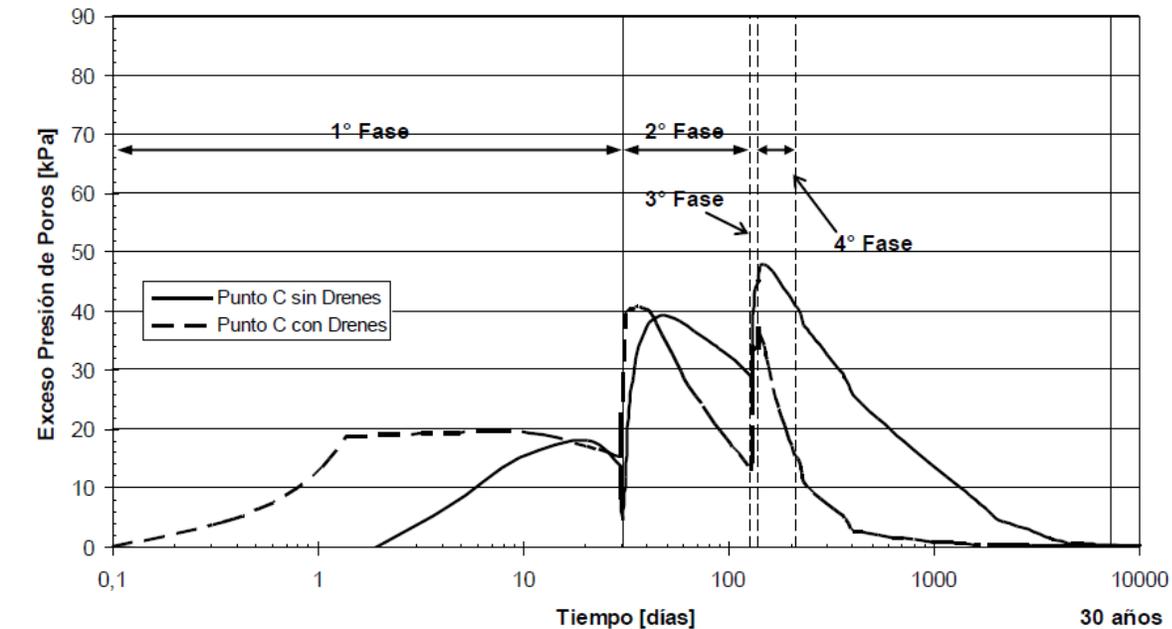
[kNm<sup>2</sup>]



Excesos de  
Presiones de Poro

# Consolidación/Precarga

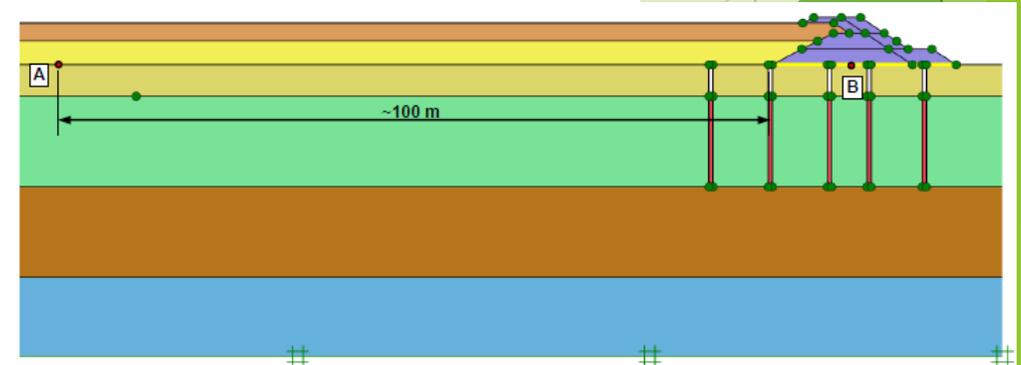
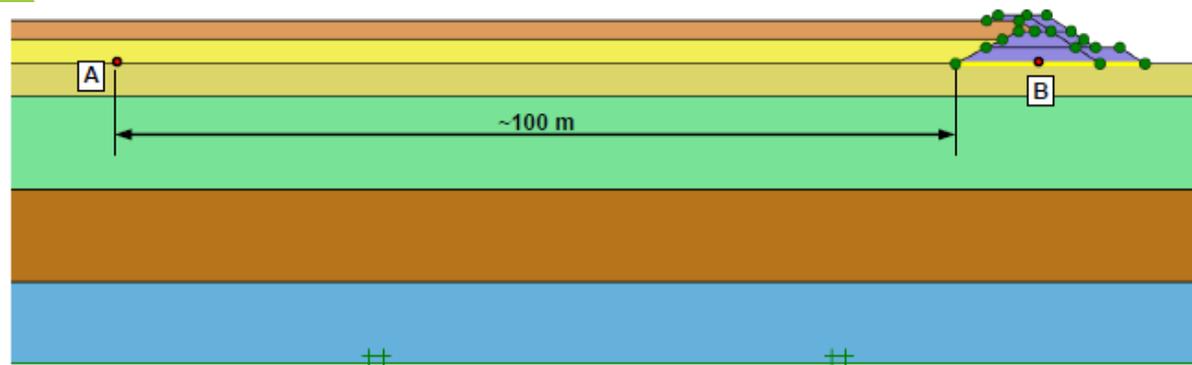
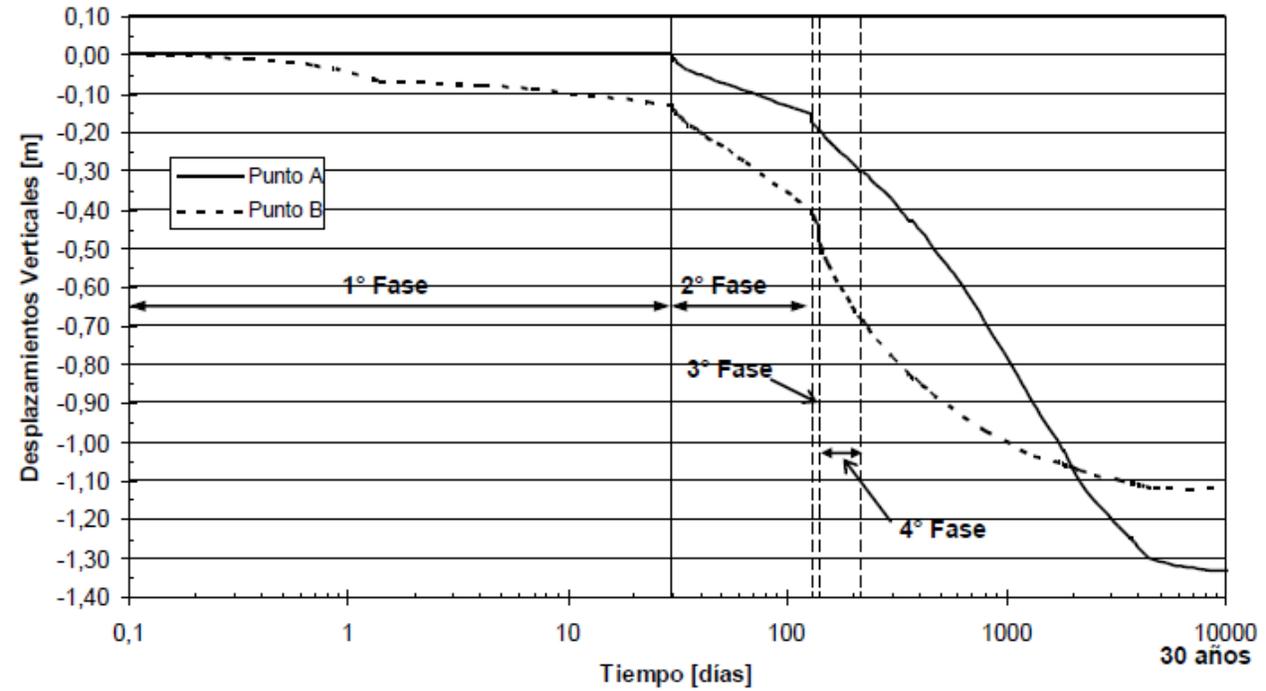
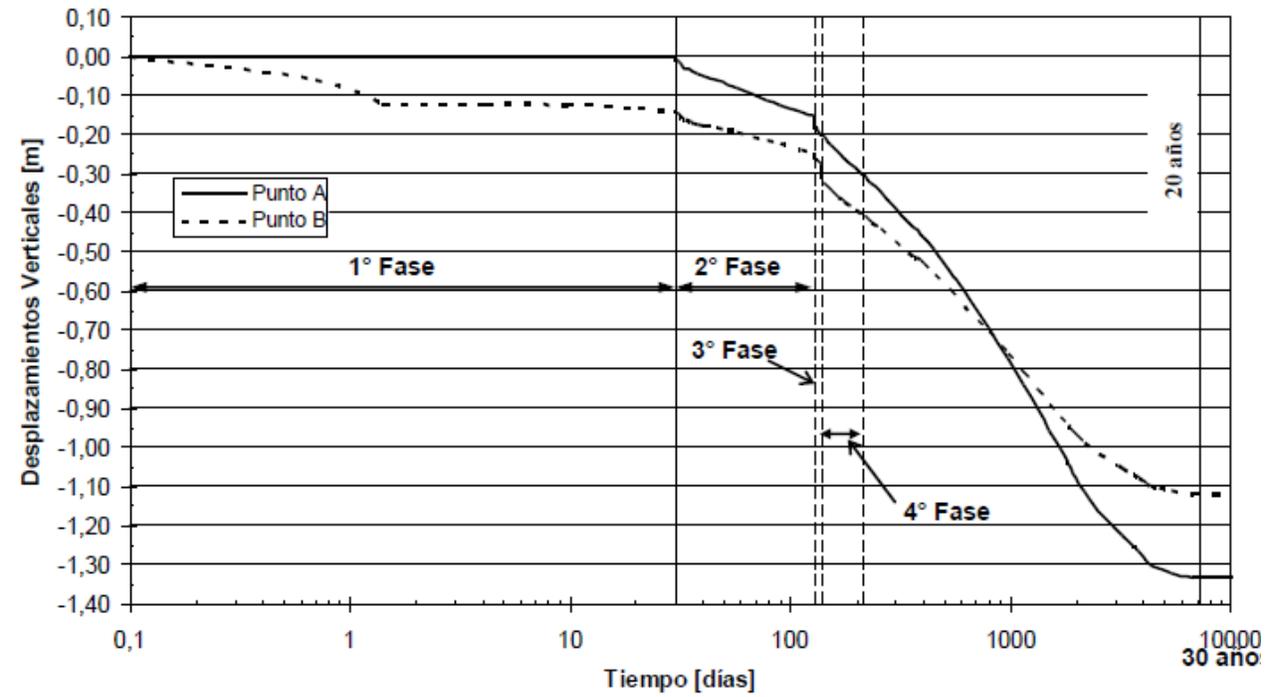
Caso de obra: Lote 3, Sistema Riachuelo. Solución con drenes verticales





# Consolidación/Precarga

Caso de obra: Lote 3, Sistema Riachuelo. Asentamientos

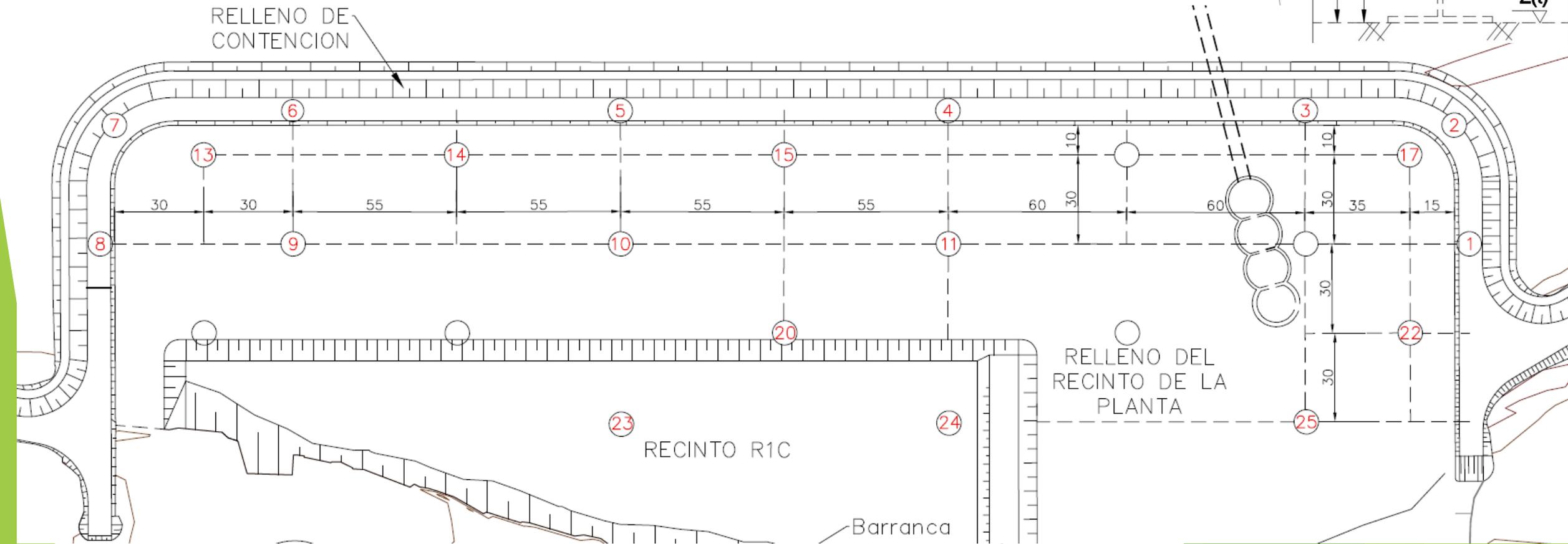
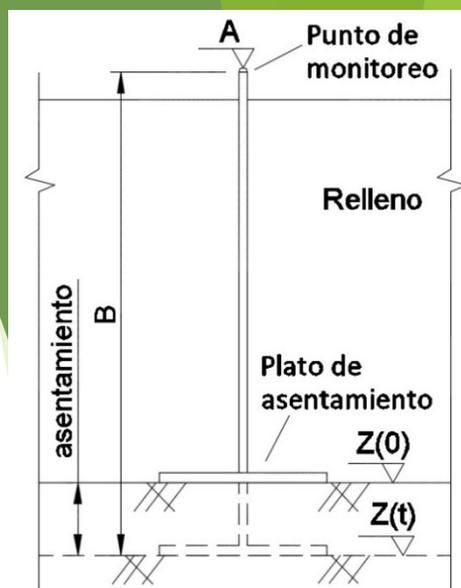


# Consolidación/Precarga

Caso de obra: Lote 3, Sistema Riachuelo. MONITOREO

## Asentímetros

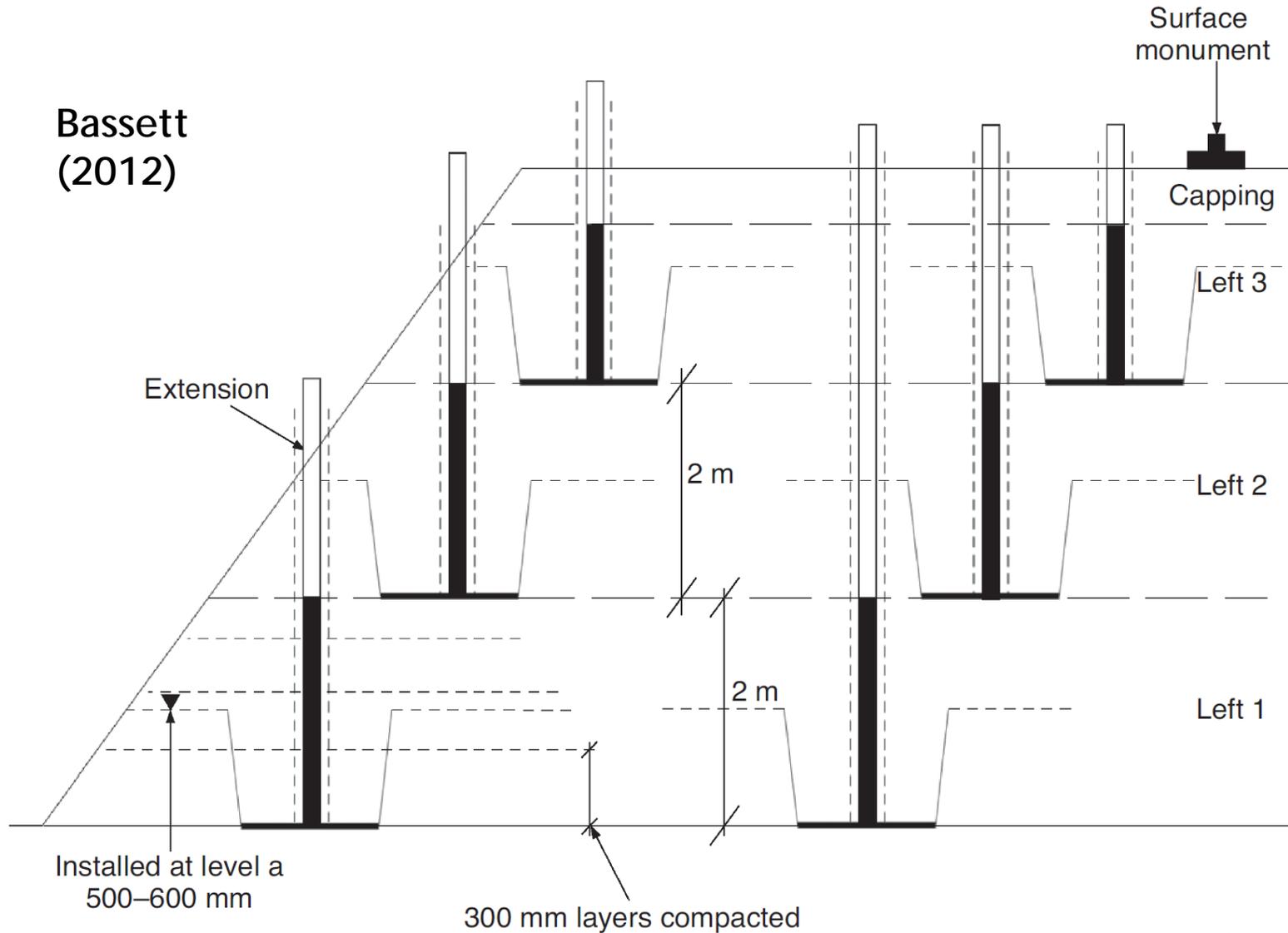
- ▶ Se instalaron 25 puntos de medición de asentamientos (AS)





# Placas de Asentamiento

Bassett  
(2012)



Geokon (2018)



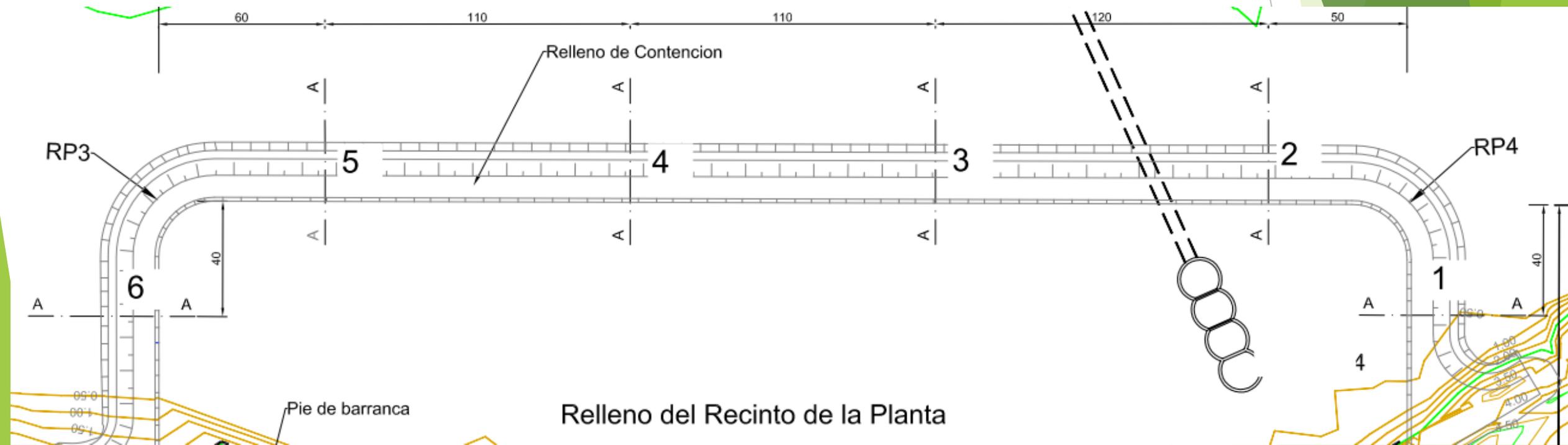
# Consolidación/Precarga



Caso de obra: Lote 3, Sistema Riachuelo. MONITOREO

## Puntos de Control Superficiales

- ▶ Se instrumentaron seis secciones con tres puntos de control (PC) cada una



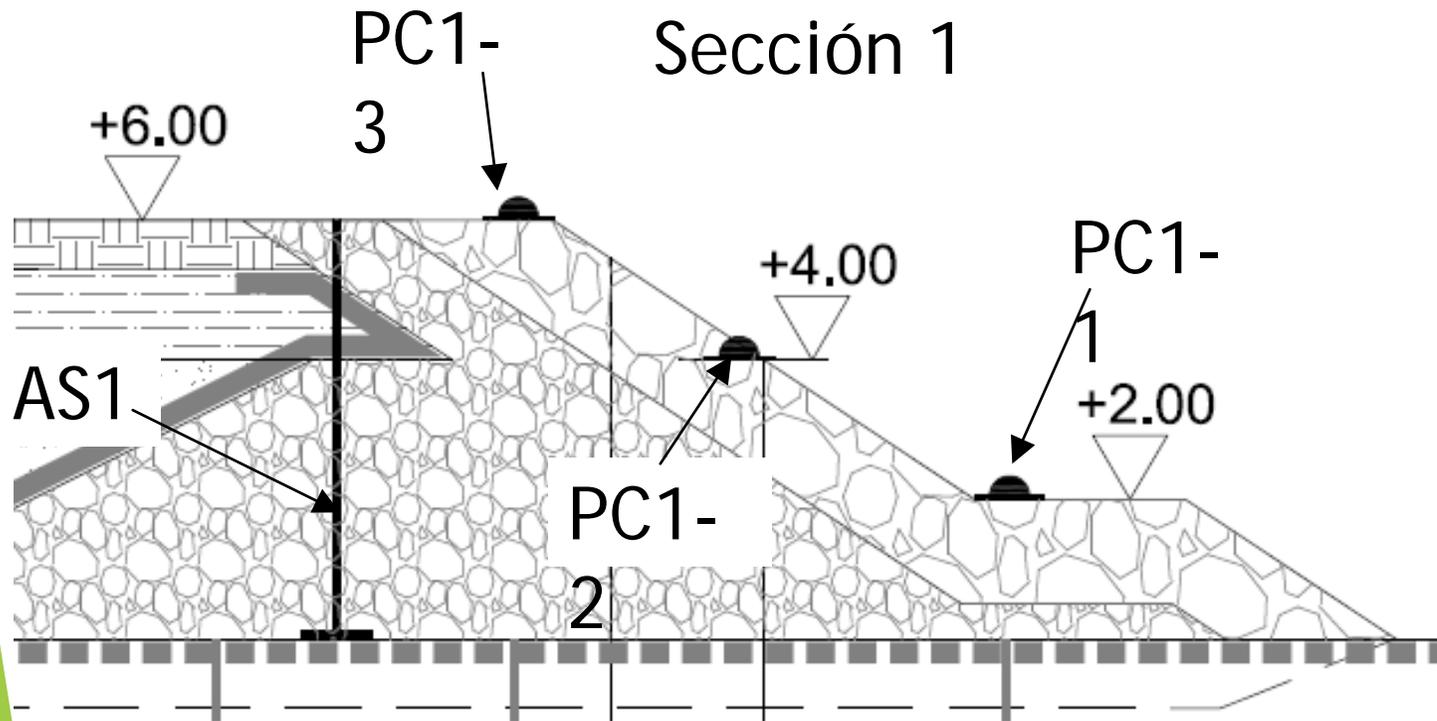
# Consolidación/Precarga



Caso de obra: Lote 3, Sistema Riachuelo. MONITOREO

## Puntos de Control Superficiales

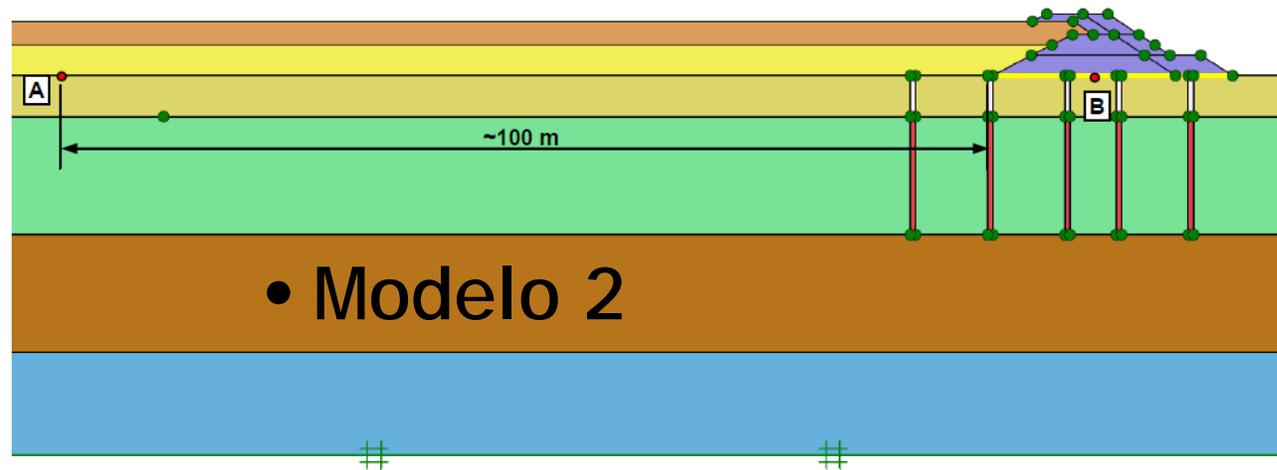
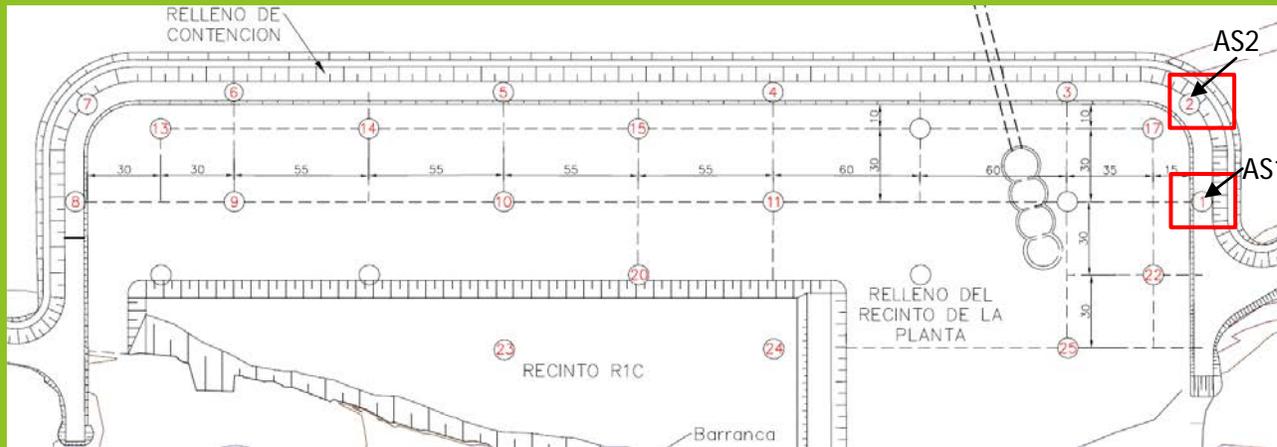
- ▶ Se instrumentaron seis secciones con tres puntos de control (PC) cada una. Ejemplo de la Sección 1



# Comparación entre estimación y relevamiento



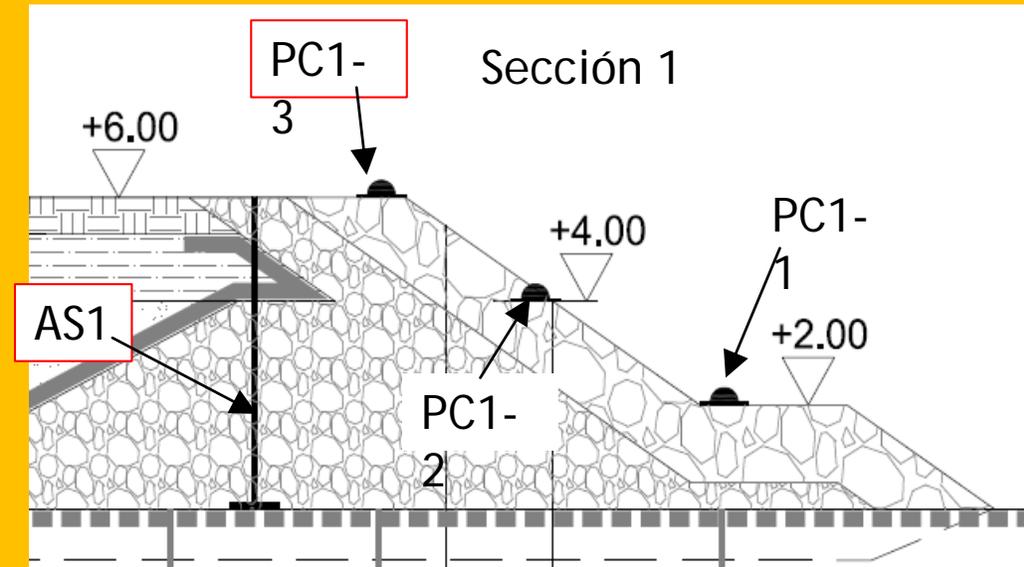
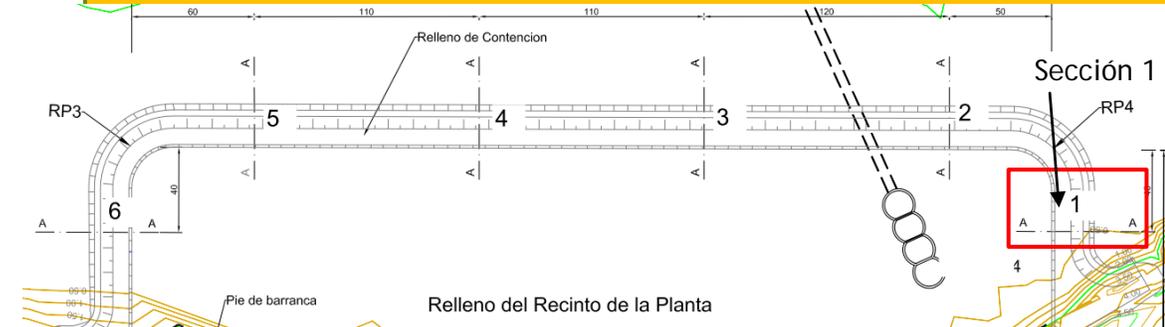
## Asentímetros



## • Modelo 2

Figura A2.3.2. Puntos considerados en la modelación numérica para evaluar asentamientos.

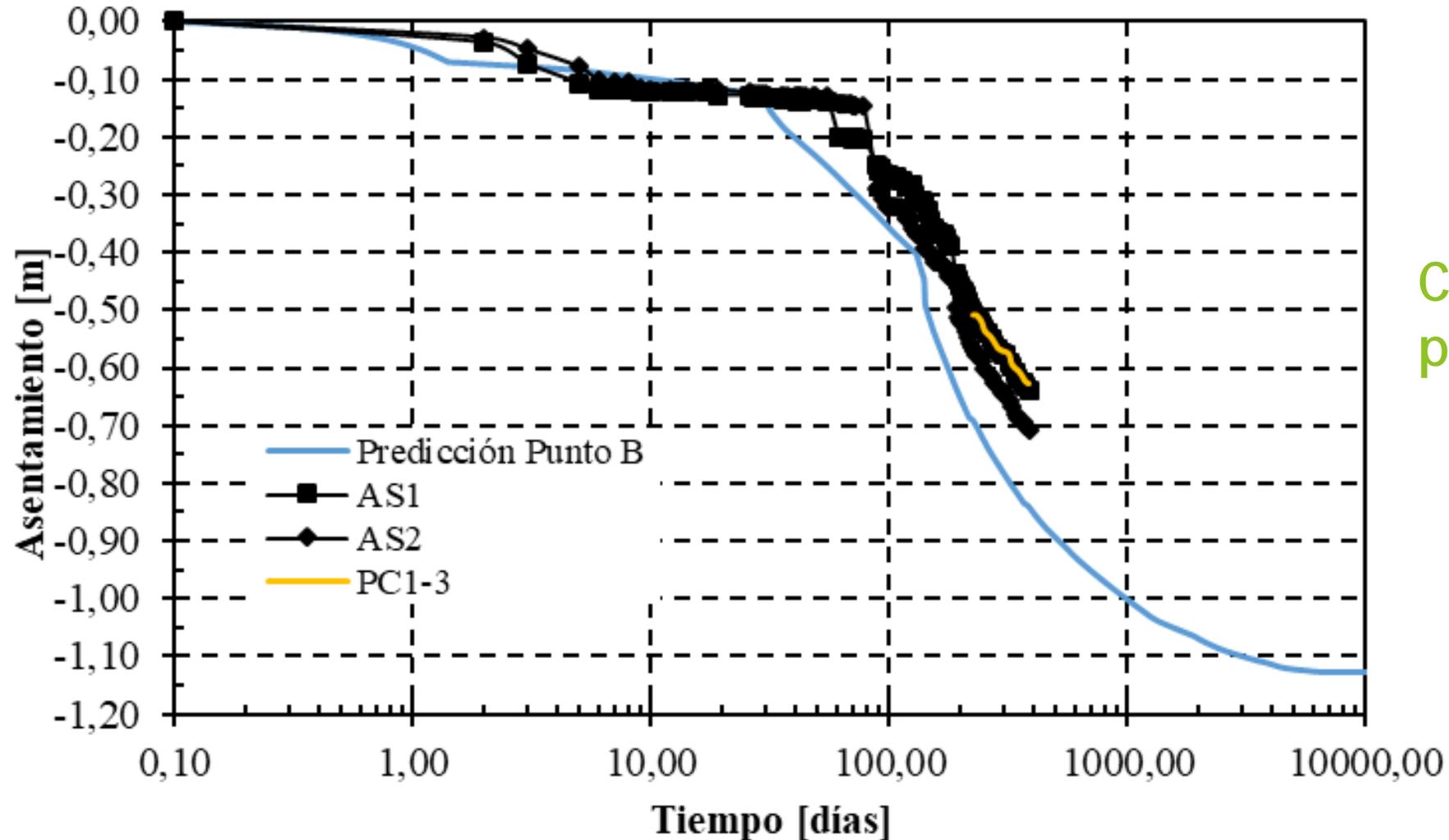
## • Puntos de Control Superficiales



# Consolidación/Precarga



Caso de obra: Lote 3, Sistema Riachuelo. MONITOREO



Comparación entre predicción y relevamiento

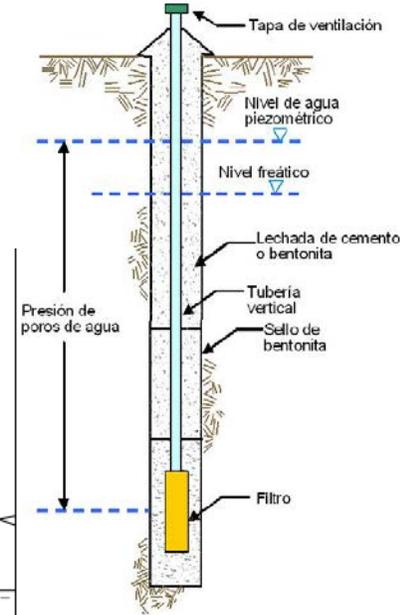
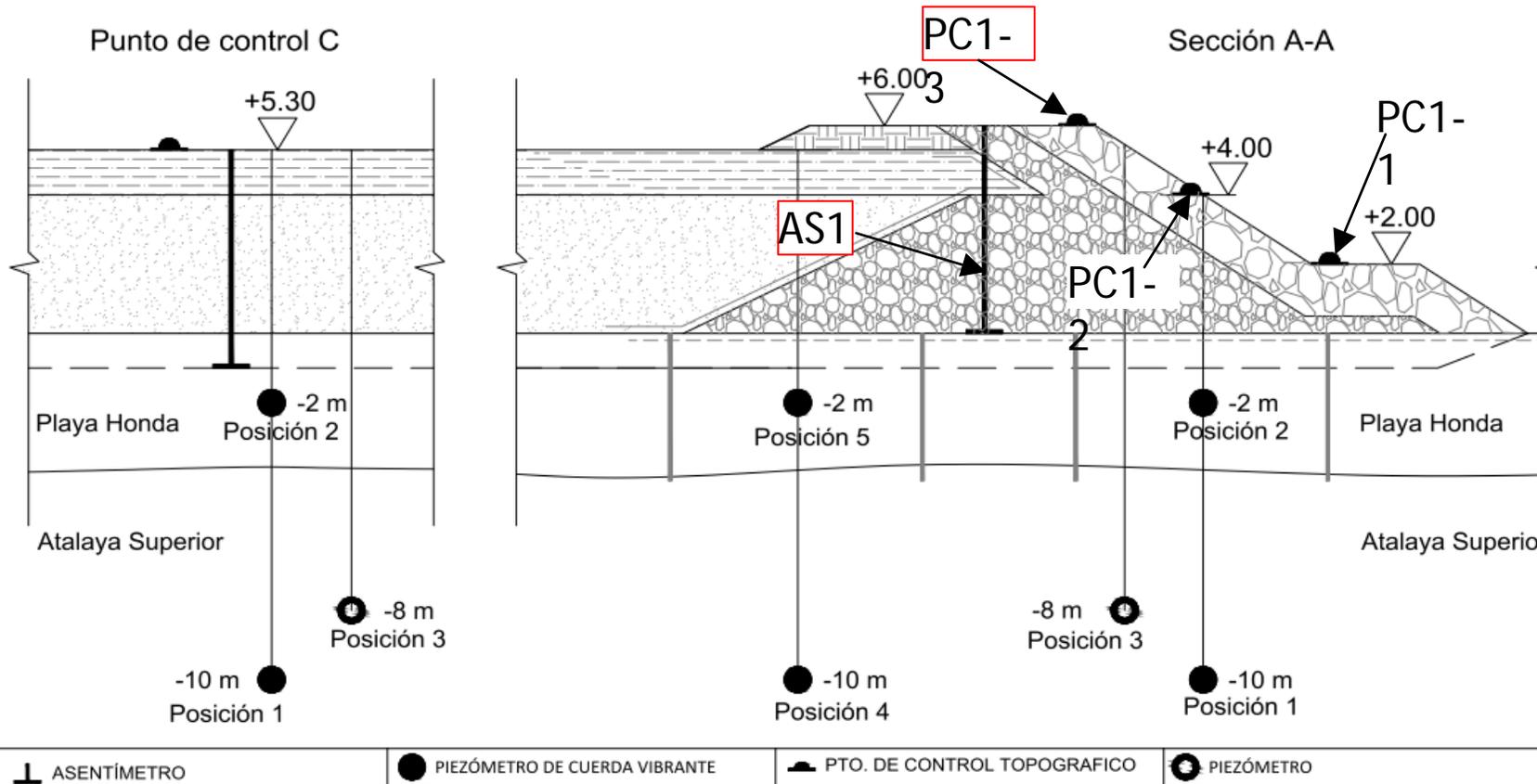
# Consolidación/Precarga



Caso de obra: Lote 3, Sistema Riachuelo. MONITOREO

Tipo Casagrande

## Piezómetros



## De Cuerda Vibrante





# Clasificación

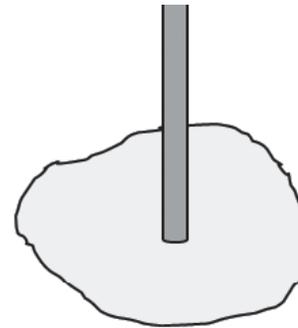
- ▶ Incremento del peso unitario
  - ▶ Compactación tradicional/reemplazo
  - ▶ Compactación dinámica
  - ▶ Vibro-compactación / Vibro-sustitución
  - ▶ Consolidación/colapso
- ▶ **Agregado de Cementantes**
  - ▶ **Inyecciones**
  - ▶ Jet Grouting
- ▶ Agregado de Inclusiones Rígidas



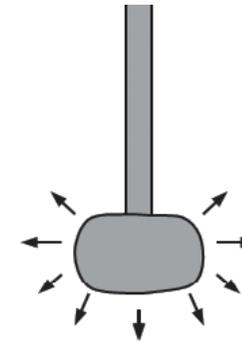
# Agregado de Cementantes. INYECCIONES

- ▶ Se utilizan para modificar las propiedades del suelo en forma temporal durante la construcción de la obra o de forma permanente con el objetivo de mejorar su resistencia y deformabilidad.
- ▶ También se puede utilizar para disminuir la permeabilidad.
- ▶ Tipos de inyecciones:

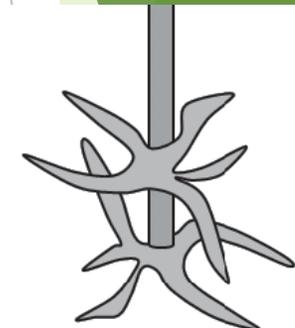
1. Por IMPREGNACIÓN
2. De COMPACTACIÓN
3. Por FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO
4. COMPENSACIÓN
5. JET GROUTING



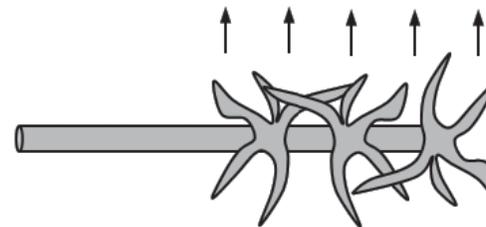
(1) Permeation grouting



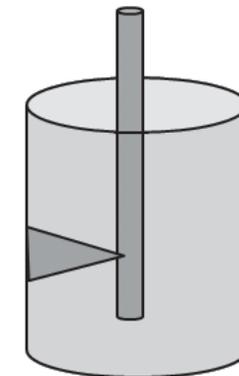
(2) Compaction grouting



(3) Hydro-fracture grouting



(4) Compensation grouting



(5) Jet grouting



# Agregado de Cementantes. INYECCIONES USOS

- ▶ Rocas
  - ▶ Relleno de fracturas
  - ▶ Impermeabilización
  
- ▶ Suelos
  - ▶ Compactación/densificación
  - ▶ Control de asentamientos
  - ▶ Impermeabilización
  - ▶ Cementación (refuerzo/recalce de estructuras existentes/protección de estructuras)
  - ▶ Compensación (levantamiento de estructuras asentadas)
  - ▶ Inclusiones rígidas (poco eficientes).
  - ▶ Mitigación de riesgo de licuación.



# Agregado de Cementantes. INYECCIONES

## VENTAJAS Y LIMITACIONES

- ▶ No se necesita la remoción ni reemplazo de suelo.
- ▶ Son efectivas para recalce de estructuras.
- ▶ Los equipos de inyección pueden acceder a sectores de trabajo con poco espacio.
- ▶ Bajo costo de movilización.
  
- ▶ La cantidad o volumen a inyectar es de difícil estimación.
- ▶ La eficiencia en algunas aplicaciones no es fácil de estimar.
- ▶ El área o volumen de sector afectado por el mejoramiento es difícil de estimar.
- ▶ Las inyecciones pueden causar desplazamientos en el terreno y afectar estructuras colindantes.
- ▶ Contaminación del subsuelo con algunos tipos de cementantes.
- ▶ Mano de obra especializada.



# Agregado de Cementantes. INYECCIONES MEZCLAS CEMENTICIAS

- ▶ Mezclas inestables: C/A 0.3-1.0.
  - ▶ Inyección de Fisuras:
- ▶ Mezclas estables (con fluidificantes): C/A 1.3 - 2.0
  - ▶ Inyección de fisuras
  - ▶ Inyección de impregnación de aluviones
- ▶ Mezclas estables (con bentonita): C/A 0.3 - 0.6
  - ▶ Inyección de fisuras
  - ▶ Inyección de impregnación de aluviones
- ▶ Mezclas de Fraguado Rápido (con silicatos): C/A 1.3 - 2.0
  - ▶ Sellado de fisuras con agua ingresante
  - ▶ Impregnación de enrocados muy abiertos



# Inyecciones por impregnación

- ▶ Consiste en el llenado de vacíos con lechada a través de inyección.

# Inyecciones para impermeabilización

- ▶ Tienen como objetivo reducir la permeabilidad del terreno.
- ▶ Se emplean en excavaciones en general, cuando estas se realizan por debajo del nivel freático.
- ▶ El proceso depende del tipo de terreno y de los requerimientos del tratamiento. Se emplean técnicas de inyección en retirada, por tramos y mediante tubo manguito.
- ▶ Suelen emplearse tanto lechadas como los geles de silicato.
- ▶ Existen procesos de inyección de colmatación de huecos, mediante arenas (sin cementos). Control de la permeabilidad permitiendo drenaje (Fracking en petróleo).

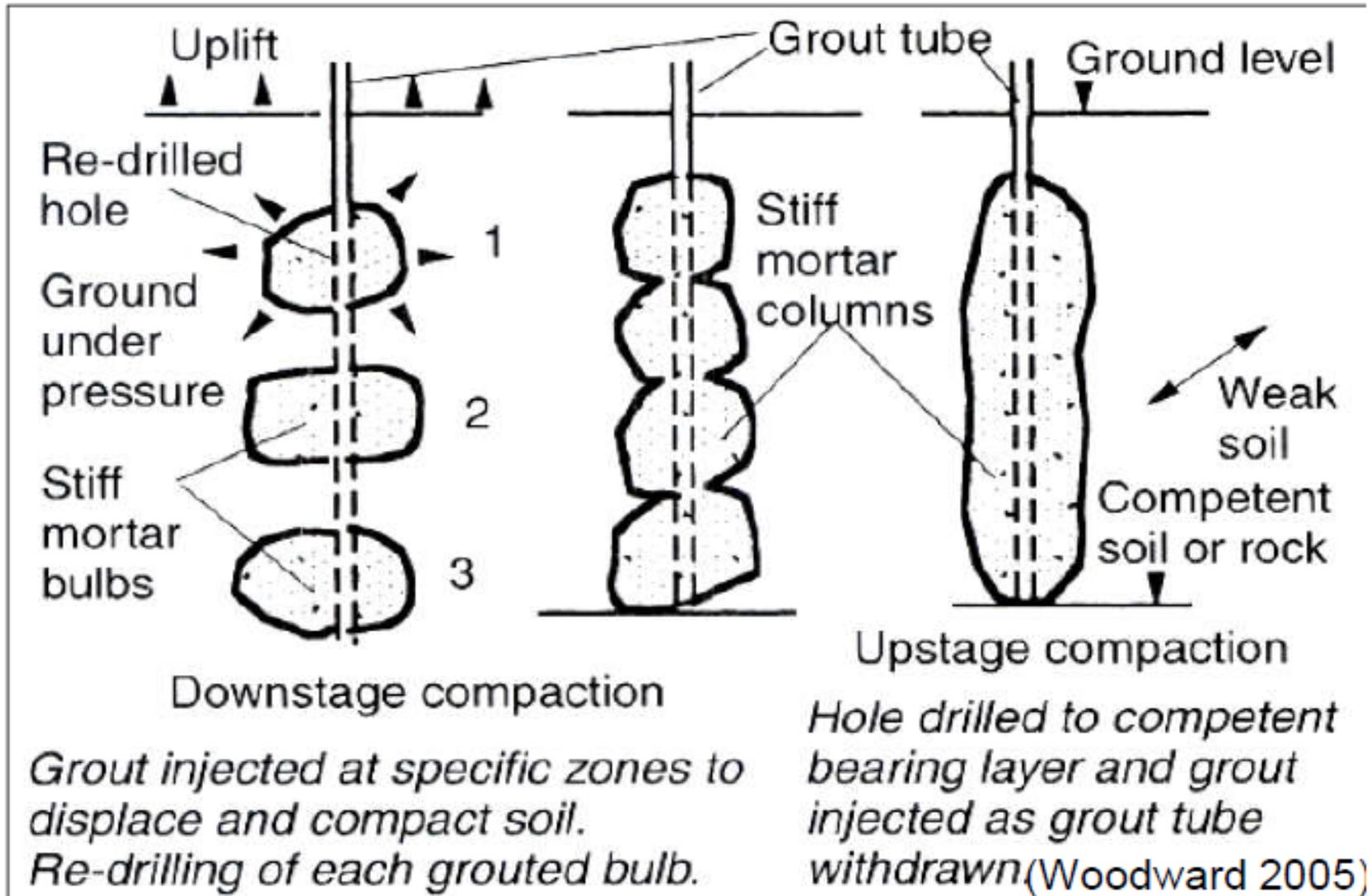


# Inyecciones de Compactación

- ▶ Se inyecta un mortero de baja movilidad (alta viscosidad) que forma bulbos y cilindros, rellena fisuras y compacta el terreno tratado.
- ▶ Es una inyección que se efectúa por desplazamiento del suelo, sin penetración, el propósito principal es que una mezcla muy viscosa se expanda en una cavidad originada por la perforación de un barreno y a su vez el suelo circundante sea densificado.
- ▶ El mortero se inyecta formando bulbos y cilindros, rellena fisuras y compacta el terreno a tratar.
- ▶ Técnicas
  - ▶ Ascendente: perforación en toda la profundidad (espesor a mejorar) con caño camisa, se inyecta el mortero a una velocidad pre-fijada mientras se retira la camisa.
  - ▶ Descendente: aprovecha la mejora superficial para lograr mayores presiones de inyección por debajo.



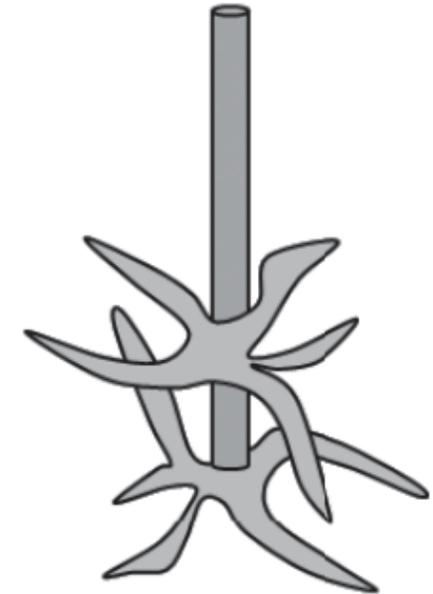
# Inyecciones de Compactación





# Inyecciones de Fracturamiento

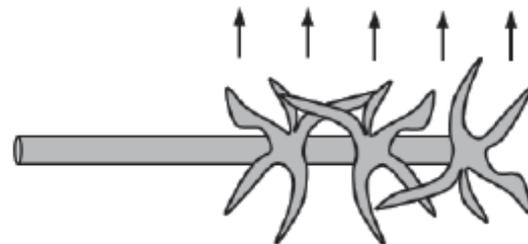
- ▶ La lechada entra en las fisuras naturales del suelo, o produce una serie de fracturas hidráulicas que se rellenan con mortero y rodean a los fragmentos (clastos); o simplemente se extienden como conductos cementicios que al fraguar producen un conjunto suelo - cemento muy resistente.
- ▶ La inyección por fracturamiento Hidráulico implica la inyección de partículas de alta movilidad a velocidades relativamente altas y presiones que provocan el fracturamiento del suelo. Los lentes y masas de lechada formada por la inyección son utilizados para incrementar los esfuerzos totales en la masa del suelo, rellenar los vacíos, consolidar localmente o densificar la masa de suelo y proporcionar un tipo de membrana impermeable.
- ▶ El proceso es difícil de controlar y puede conducir a un comportamiento no deseado del suelo o desperdicios de mezclas de inyección.





# Inyecciones de Compensación

- ▶ Se realizan con el objetivo de inducir movimientos controlados en el terreno, que compensen los producidos por otras causas.
- ▶ Se emplean en túneles urbanos, recalces, rutas, etc.
- ▶ El proceso de inyección debe ser sumamente controlado, con apoyo de instrumentación de control y de monitoreo.
- ▶ En túneles, se suele ejecutar en tres fases:
  - ▶ Pretratamiento: consolidación previa a la excavación.
  - ▶ Concurrente: durante la excavación, evitando asentamientos mientras se construye.
  - ▶ Observacional: para asentamientos diferidos y corrección y ajuste final.





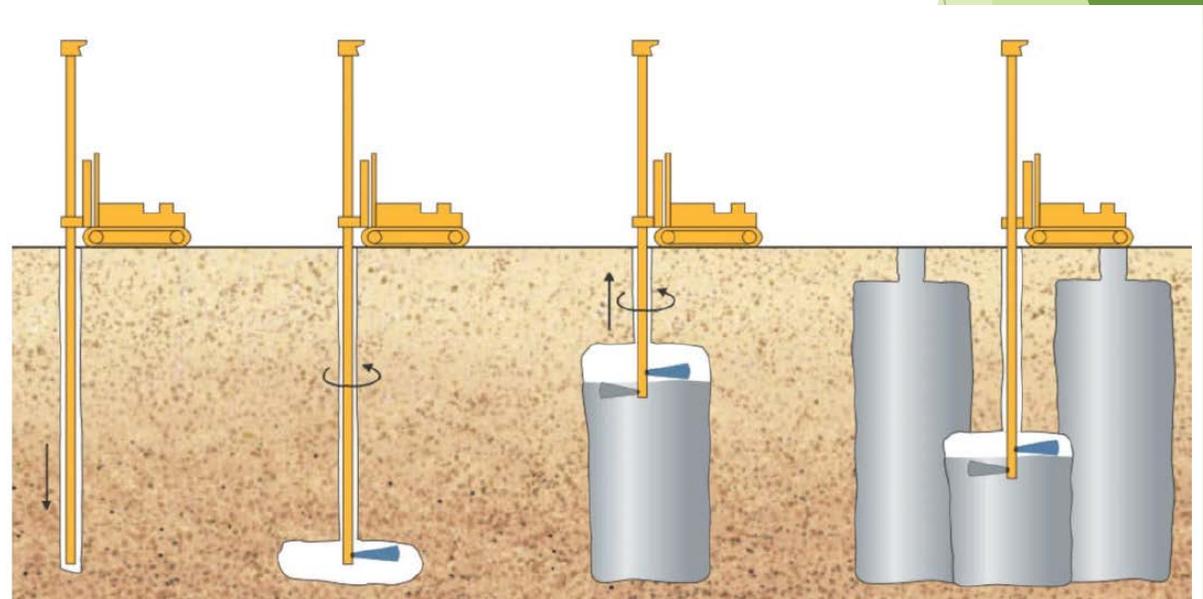
# Clasificación

- ▶ Incremento del peso unitario
  - ▶ Compactación tradicional/reemplazo
  - ▶ Compactación dinámica
  - ▶ Vibro-compactación / Vibro-sustitución
  - ▶ Consolidación/colapso
- ▶ Agregado de Cementantes
  - ▶ Inyecciones
  - ▶ **Jet Grouting**
- ▶ Agregado de Inclusiones Rígidas



# Jet Grouting

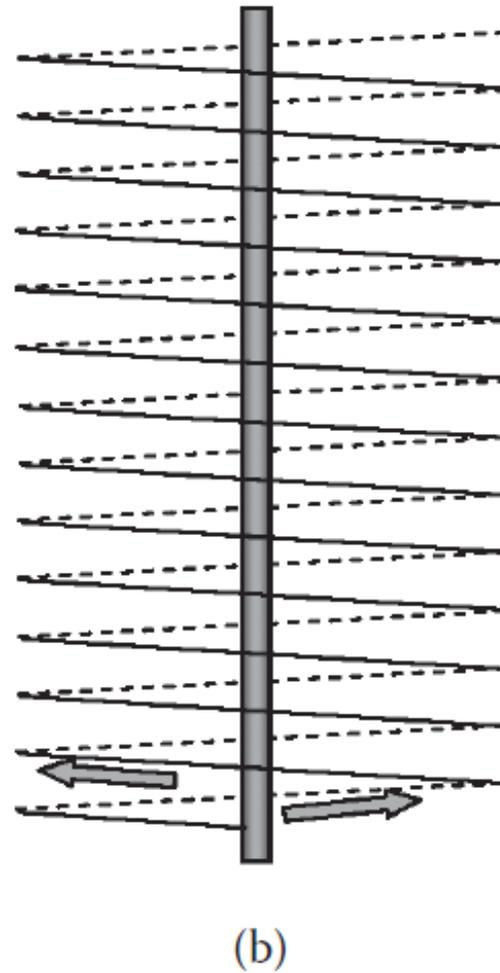
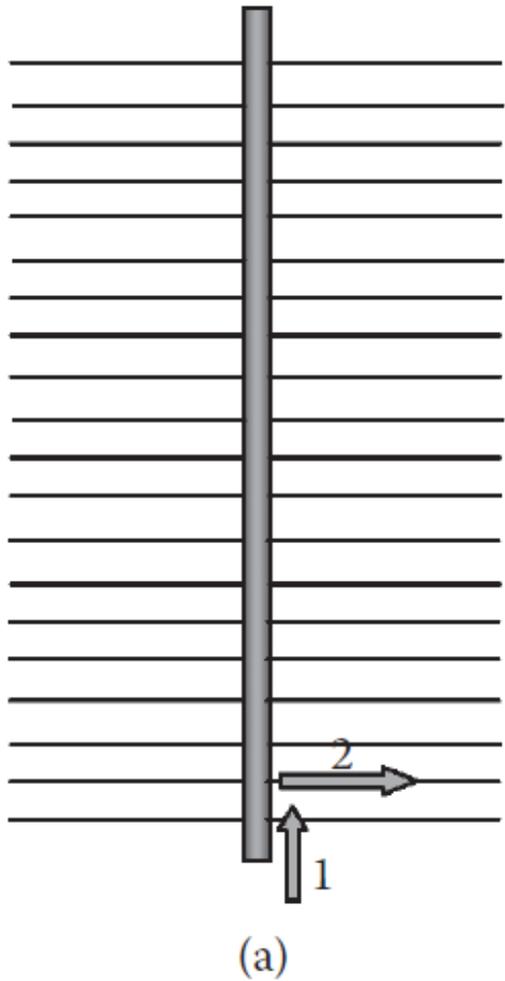
- ▶ El Jet Grouting es un método para mejoramiento del terreno a profundidad, mediante la mezcla de este mismo con una lechada que se introduce en la masa de suelo.
- ▶ Esta técnica mejora las características mecánicas y el comportamiento hidráulico del terreno, el método consiste en la inyección de un material consolidante, a muy alta velocidad a través de una o más boquillas de diámetro muy pequeño, lo cual permite obtener un tratamiento homogéneo y continuo del terreno, destruyendo su estructura primitiva y creando un nuevo elemento estructural con características determinadas en función del terreno de origen.
- ▶ Secuencia
  - ▶ Perforación
  - ▶ Generación de la columna de jet-grouting





# Jet Grouting

► Posibles movimientos



- a) 1- Izado; 2- Inyección
- b) Continuo (trayectoria en espiral)

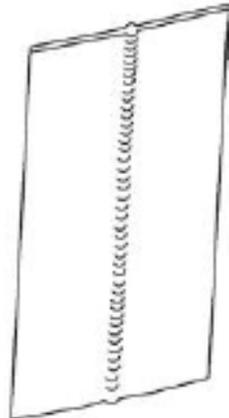


# Jet Grouting

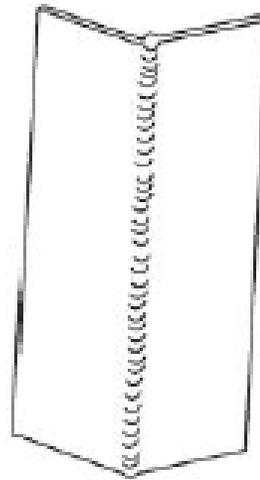
- Posibles forma de los cuerpos cementados (según el movimiento)



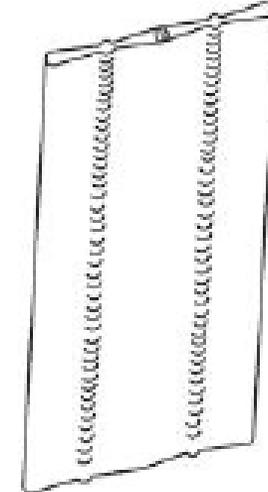
(a)



(b)



(c)



(d)

- a) Columnas
- b) Panel
- c) V-shape
- d) Candy-shape



# Jet Grouting

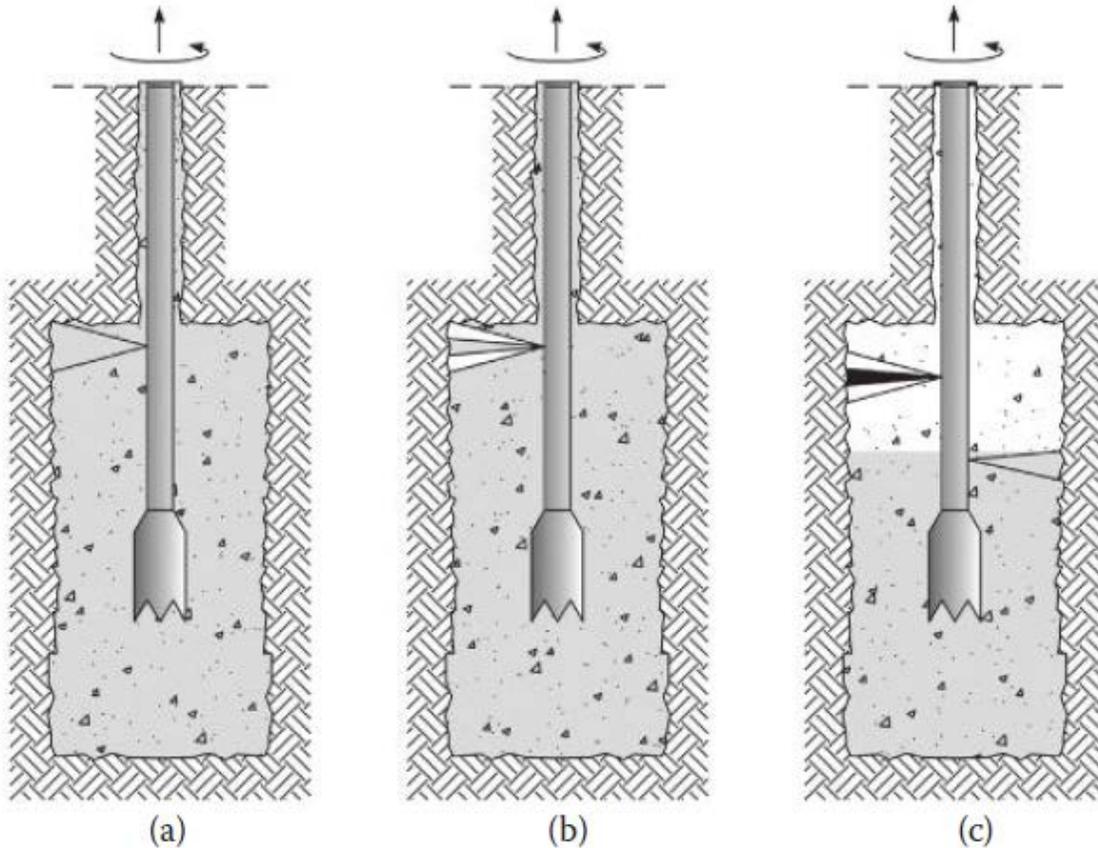
- ▶ Formas de columnas y Candy-shape



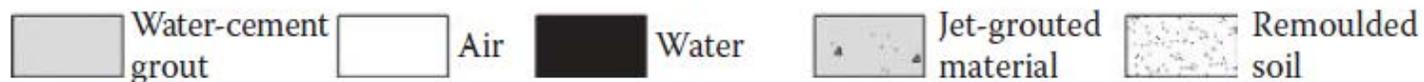


# Jet Grouting

## ► Sistemas



a)	Fluido Simple:	0.4-0.8m	250kg/m-400kg/m
b)	Doble Fluido:	0.6-2.0m	500kg/m-1500kg/m
c)	Triple Fluido:	1.2-2.5m	800kg/m-1500kg/m
d)	Super-Jet:	2.0-5.0m	1000kg/m-8000kg/m

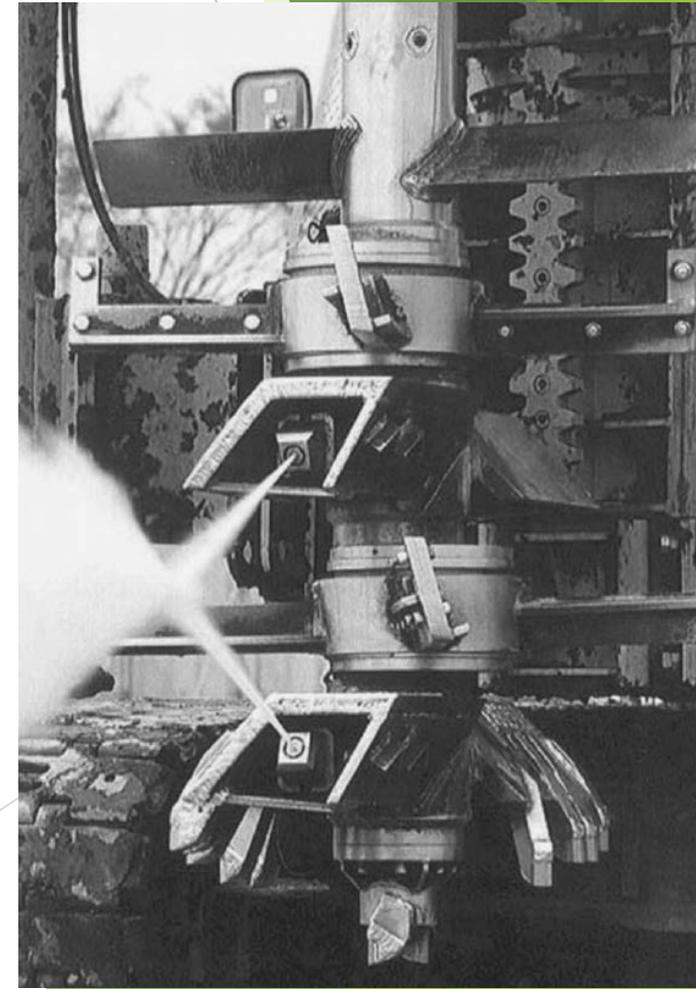
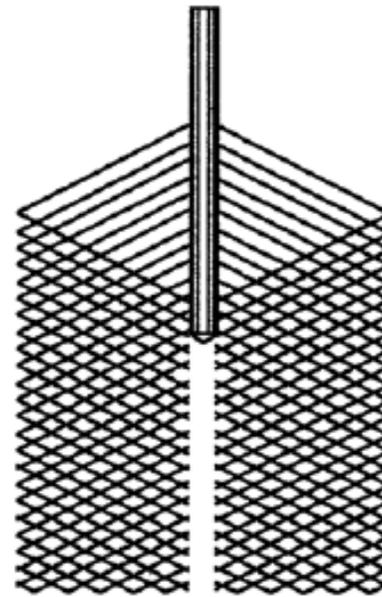
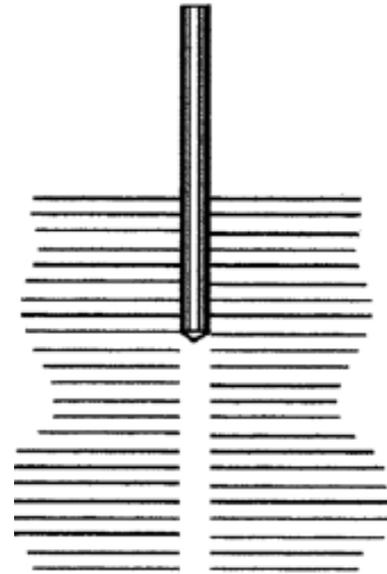
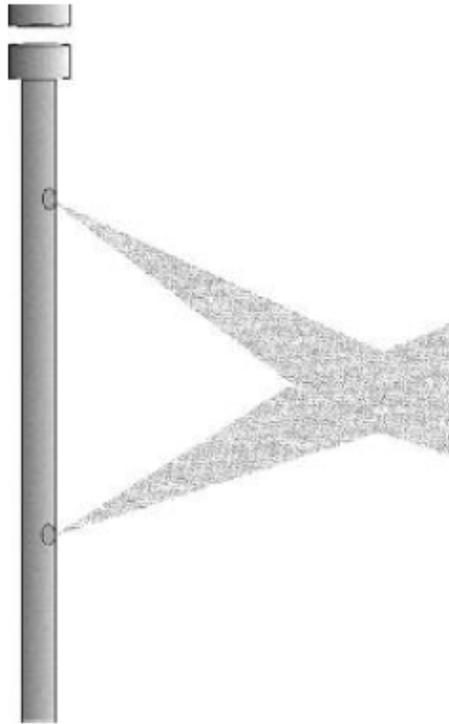




# Jet Grouting

- Sistemas: Cross-jet grouting

Dos chorros que chocan produciendo una columna de diámetro muy uniforme





# Jet Grouting

## ► Parámetros de Ejecución

Parámetros de trabajo	Monofluído	Doble fluido (aire)	Doble fluido (agua)	Triple fluido	SuperJet
Presión de la lechada (bar)	300-500	300-500	> 20	> 20	300-500
Caudal de la lechada (l/min)	50-450	50-450	50-200	50-200	300-450
Presión de agua (bar)	-	-	300-600	300-600	-
Caudal de agua (l/min)	-	-	30-150	50-150	-
Presión de aire (bar)	-	2-17	-	2-17	2-17
Caudal de aire (m <sup>3</sup> /min)	-	3-12	-	3-12	3-12
Toberas de corte (mm)	1,5-5	1,5-6	1,5-6	1,5-6	4-6
Toberas de relleno (mm)	-	-	4-12	4-12	-
Velocidad de ascenso (cm/min)	20-70	10-50	10-50	10-50	5-30
Velocidad de rotación (rpm)	10-30	5-20	5-20	5-20	2-15

(Fernández V 2012)



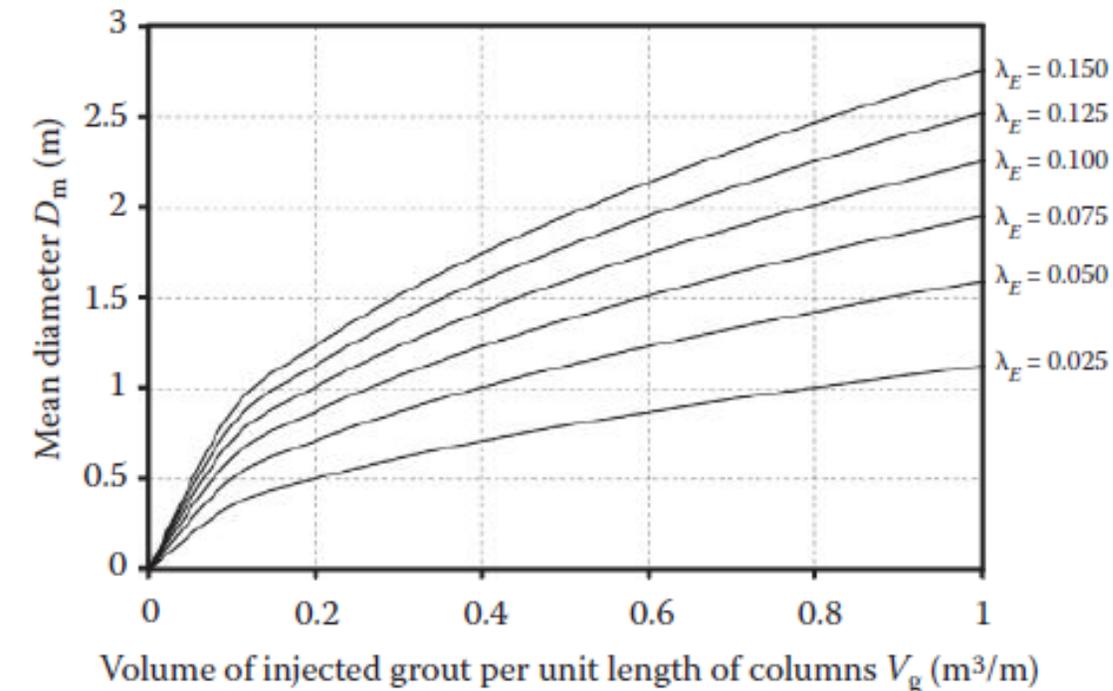
# Jet Grouting

## ► Parámetros de Diseño

Resistencia a la Compresión Simple (UCS), Módulo de Deformación (E)

- Arenas limpias: UCS = 3 a 15 MPa; E = 300\*UCS
- Arenas con Finos: UCS = 2 a 7 MPa; E = 600\*UCS
- Arcillas: UCS = 2 a 5 MPa; E = 800\*UCS a 1000UCS

$$D_{\text{mean}} = 1.128 \sqrt{p \cdot V_g \cdot \lambda_E}$$



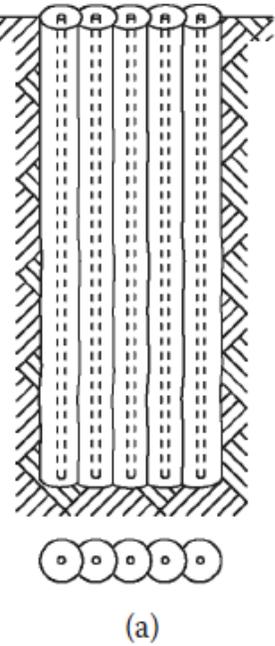
**Table 4.2** Typical values of the energetic efficiency  $\lambda_E$  and of its reciprocal  $1/\lambda_E$  (volumetric specific energy) for a single-fluid jet grouting treatment in different soils

Soil	Energetic efficiency $\lambda_E$ ( $\text{m}^3/\text{MJ}$ )	Volumetric specific energy $1/\lambda_E$ ( $\text{MJ}/\text{m}^3$ )
Sandy gravel	0.067–0.100	10–15
From gravelly sand to silty sand	0.033–0.067	15–30
From sandy silt to clayey silt (low consistency)	0.020–0.033	30–50
From sandy silt to clayey silt (high consistency)	<0.020	>50

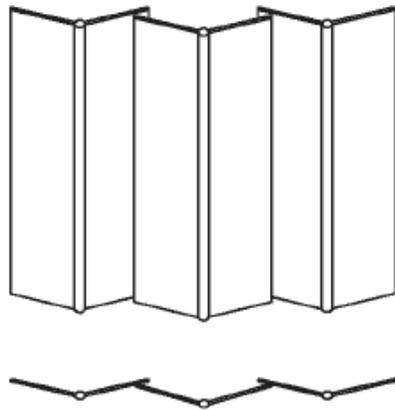


# Jet Grouting

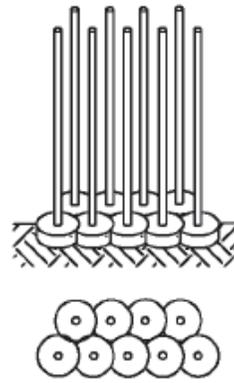
## ► Elementos y Estructuras



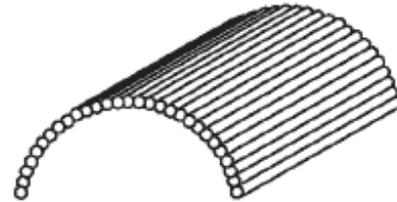
(a)



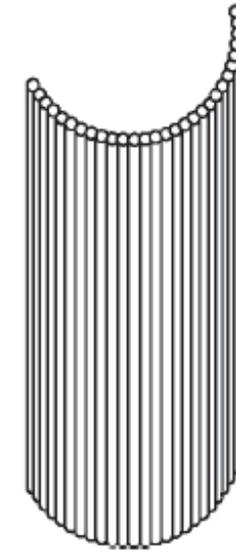
(b)



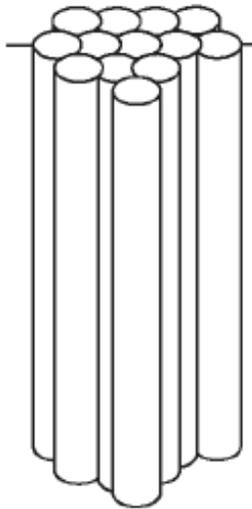
(c)



(d)



(e)



(f)

a) Diafragma

b) Diafragma

c) Losa

d) Paraguas/sombrilla

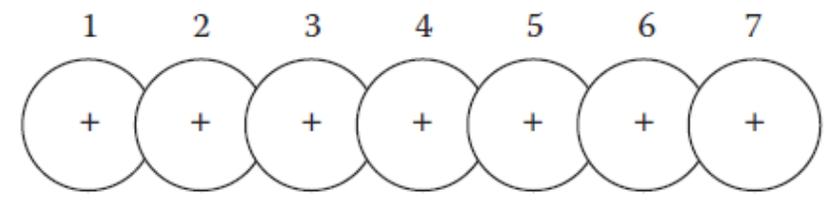
e) Shaft

f) Bloque

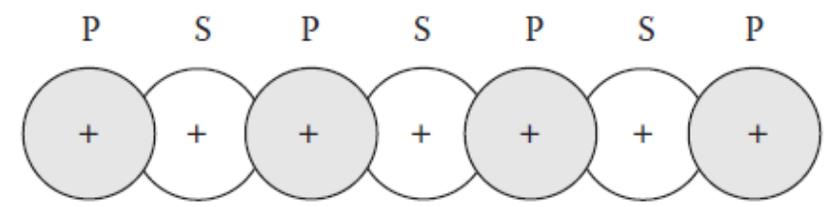


# Jet Grouting

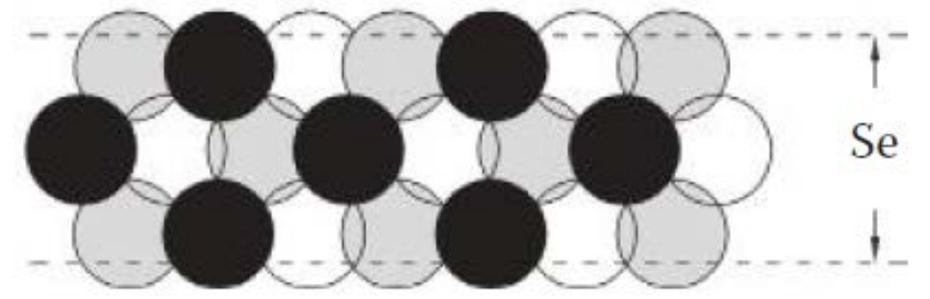
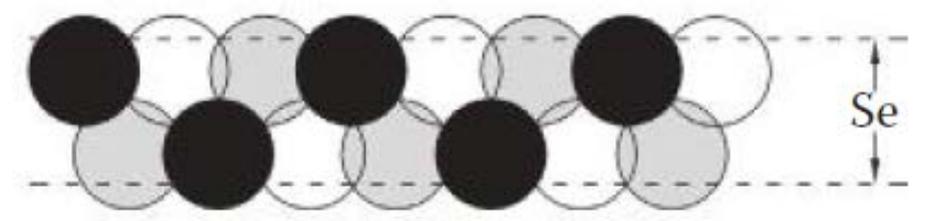
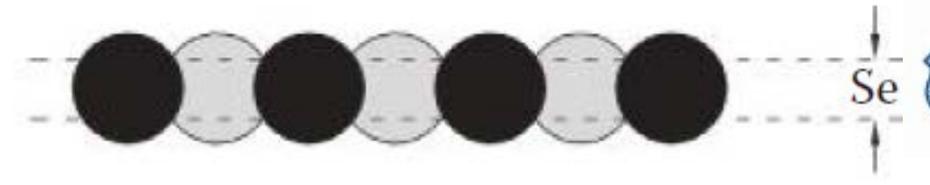
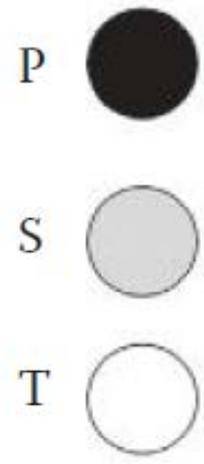
## ► Secuencia constructiva



(a)

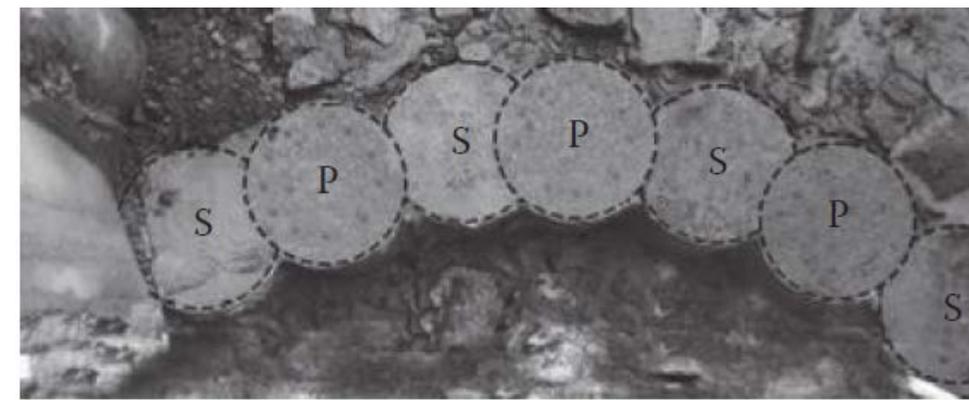


(b)



Fresco/Endurecido

- a) Fresco/fresco
- b) Fresco/Endurecido

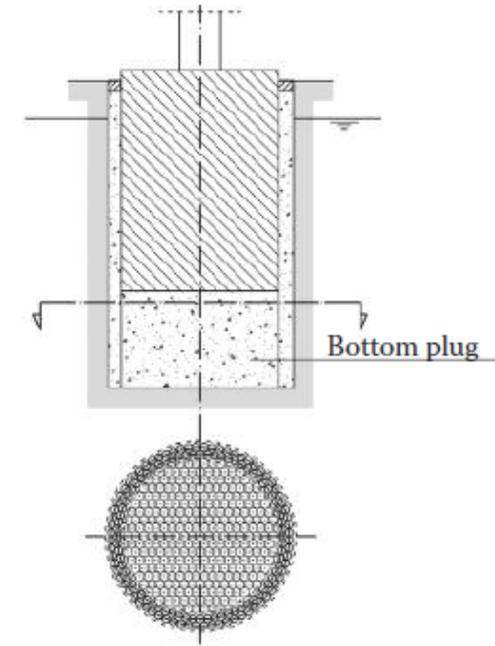
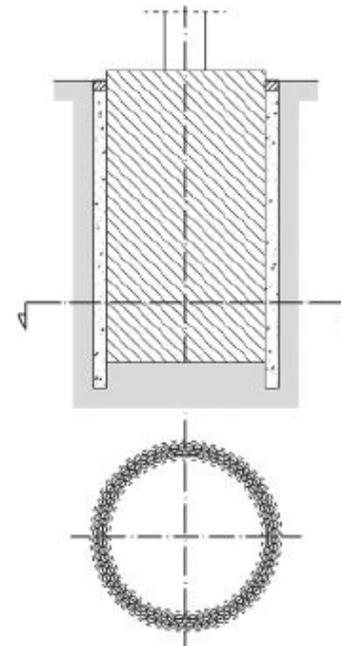
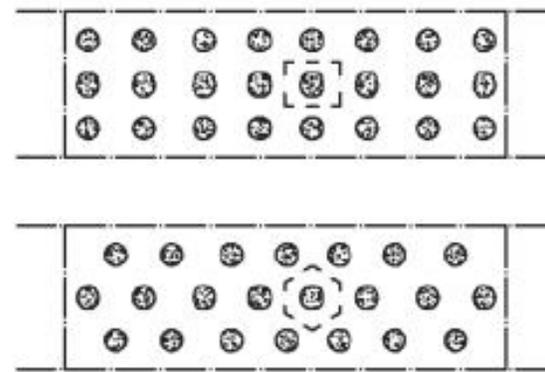
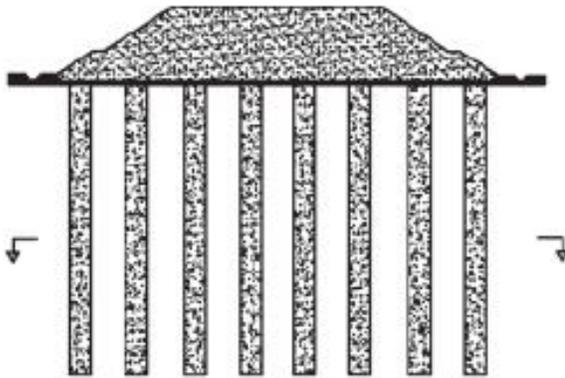
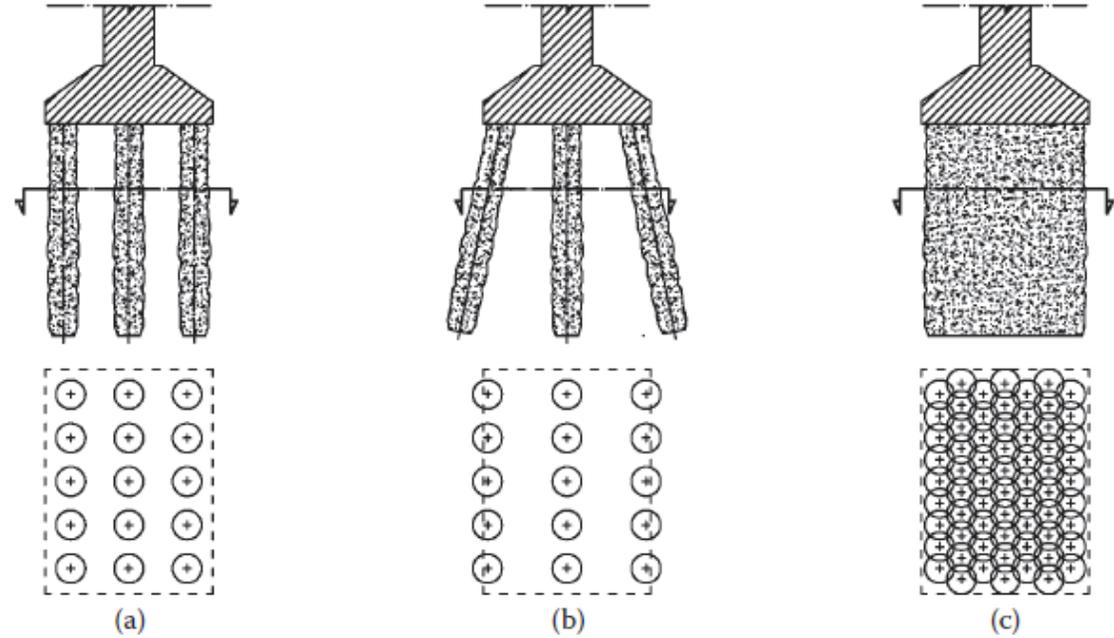




# Jet Grouting

## ► Aplicaciones

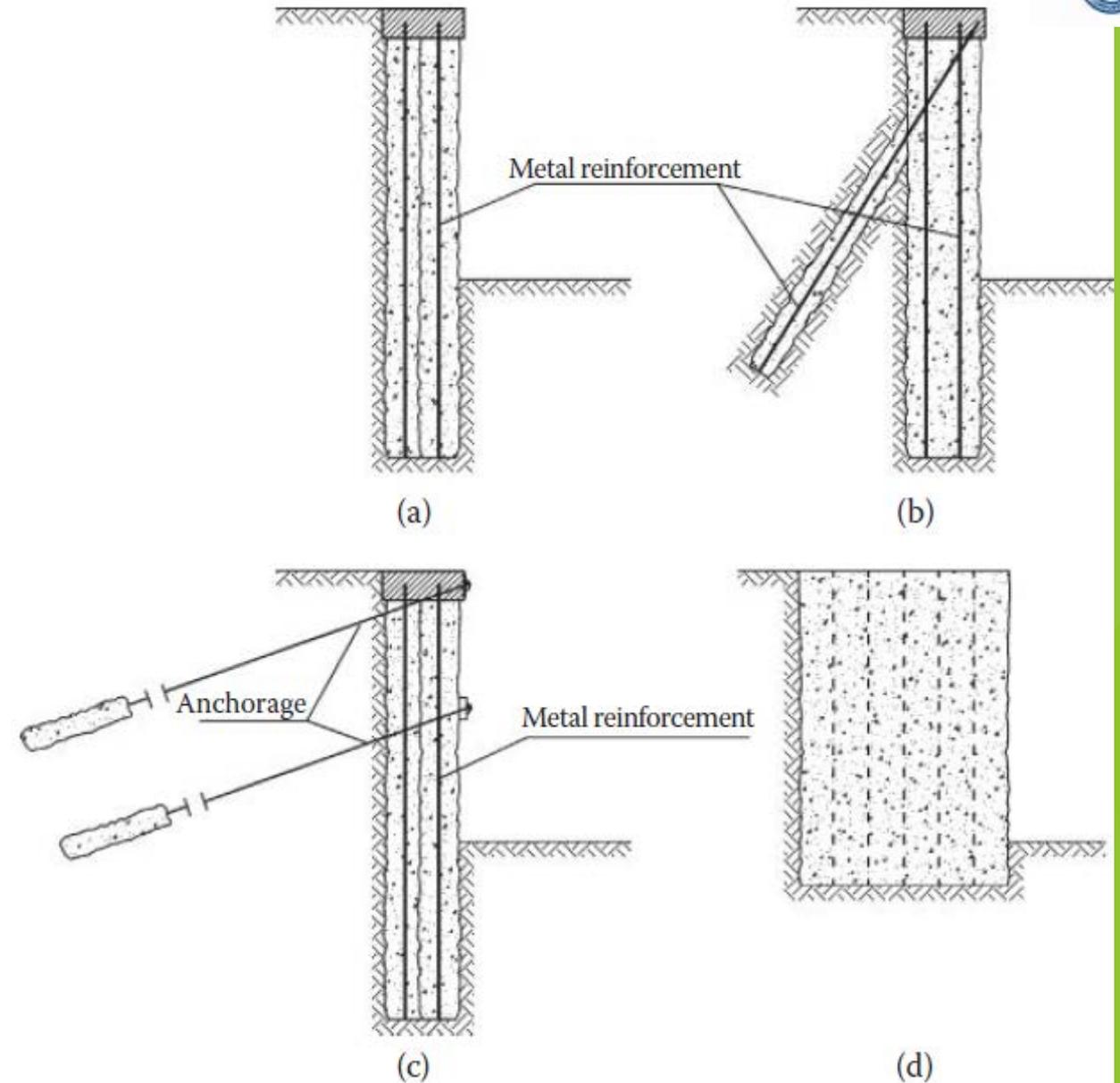
- Fundaciones
- Estructuras de contención
- Barreras hidráulicas
- Túneles
- Otras.





# Jet Grouting

- ▶ Aplicaciones
  - ▶ Fundaciones
  - ▶ Estructuras de contención
  - ▶ Barreras hidráulicas
  - ▶ Túneles
  - ▶ Otras.

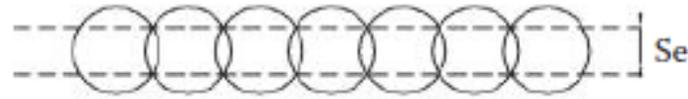




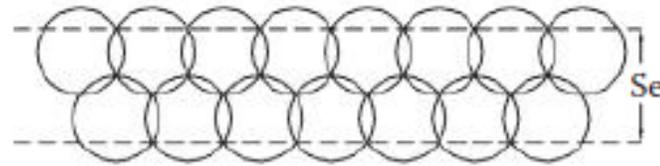
# Jet Grouting

## ► Aplicaciones

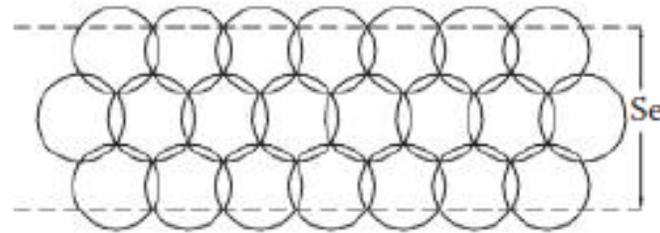
- Fundaciones
- Estructuras de contención
- **Barreras hidráulicas**
- Túneles
- Otras.



(a)



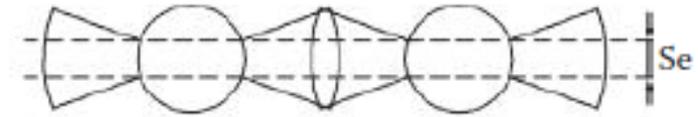
(b)



(c)



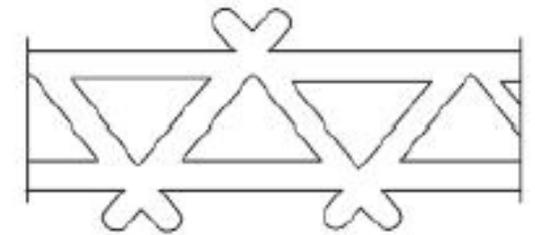
(d)



(e)



(f)



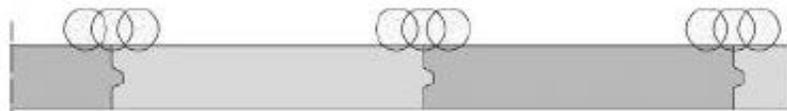
(g)



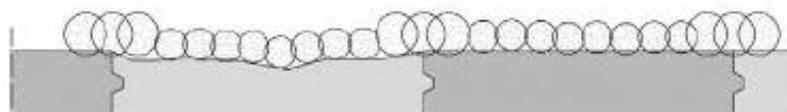
# Jet Grouting

## ► Aplicaciones

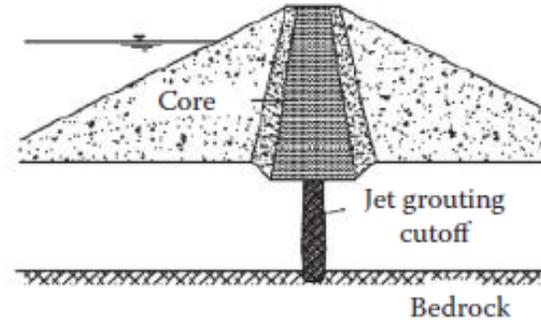
- Fundaciones
- Estructuras de contención
- **Barreras hidráulicas**
- Túneles
- Otras.



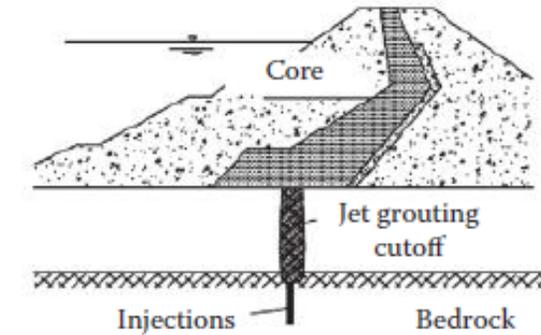
(a)



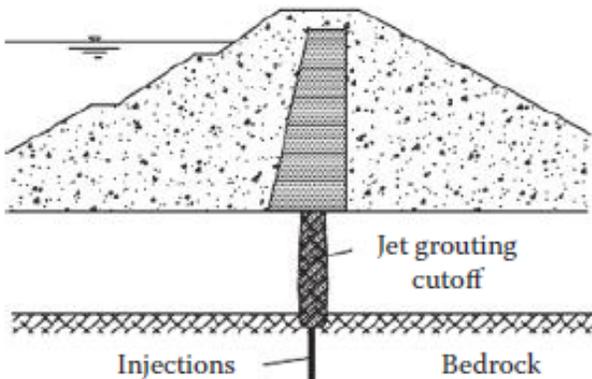
(b)



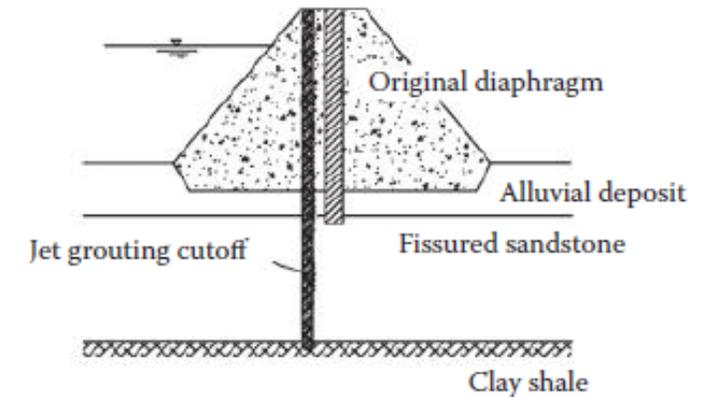
(a) Codbeck Dam–U.K. (from Bell 1993)



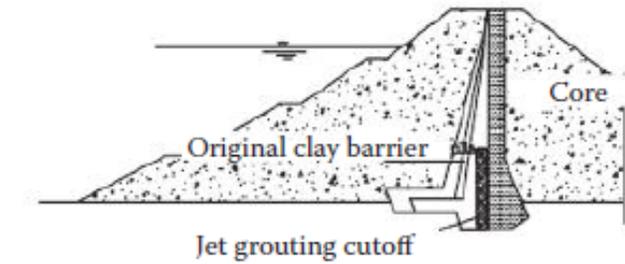
(b) Ertan Dam–China (from Sembenelli and Sembenelli 1999)



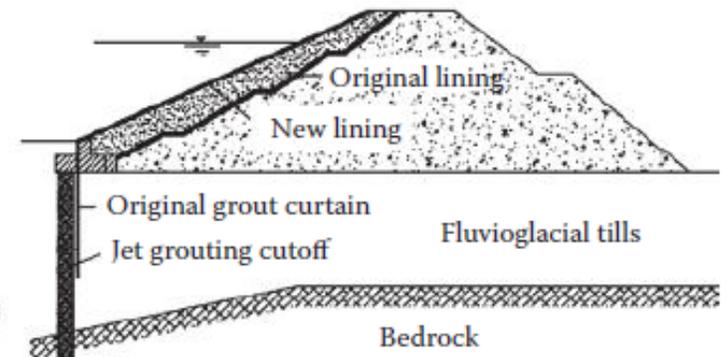
(c) Thika Dam–Kenia (from Attewill et al. 1992)



(d) Bronbach Dam–Germany (from Bell 1993)



(e) Sose Dam–Germany (from Bell 1993)



(f) Forcoletta Dam–Italy (from ENEL 2000)

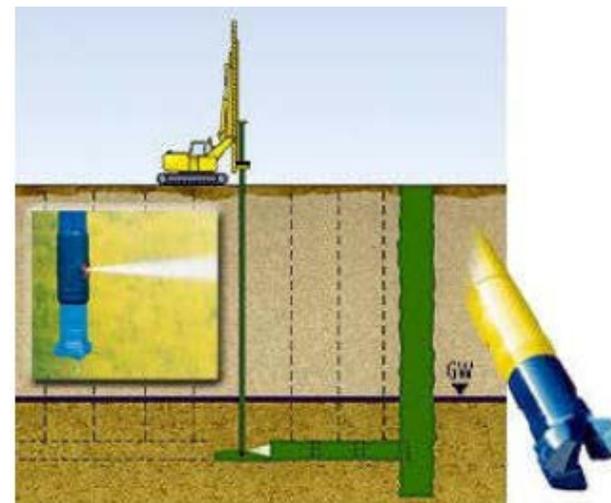
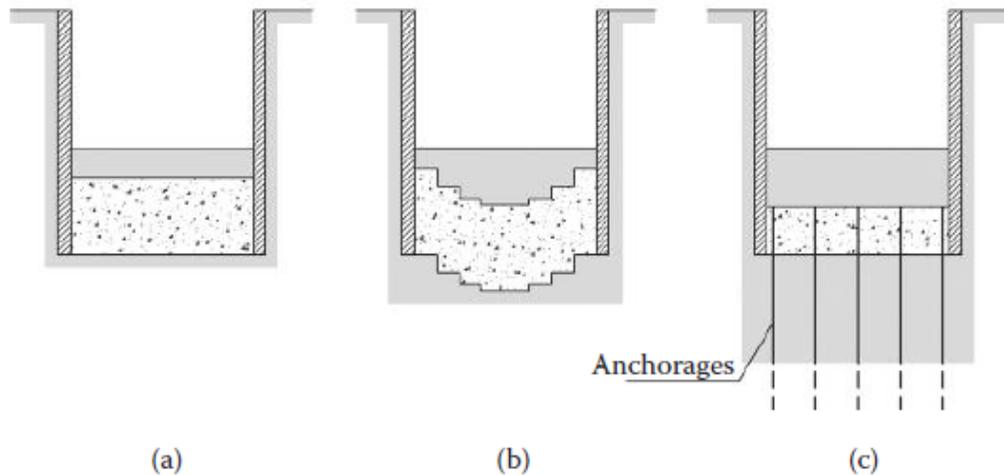


# Jet Grouting

## ► Aplicaciones

- Fundaciones
- Estructuras de contención
- **Barreras hidráulicas**
- Túneles
- Otras.

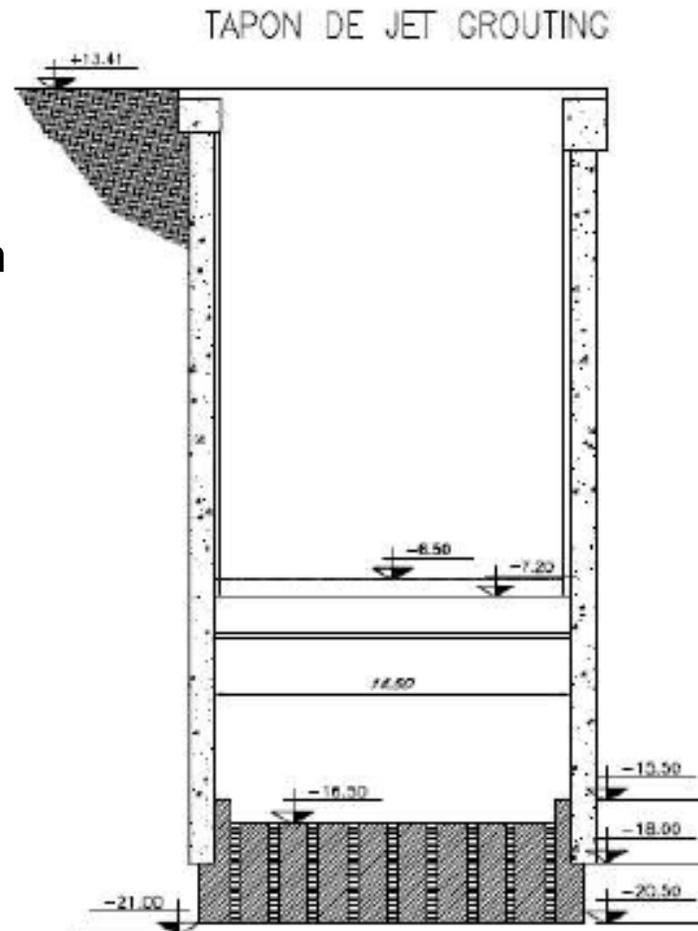
 Jet-grouted material     Natural soil



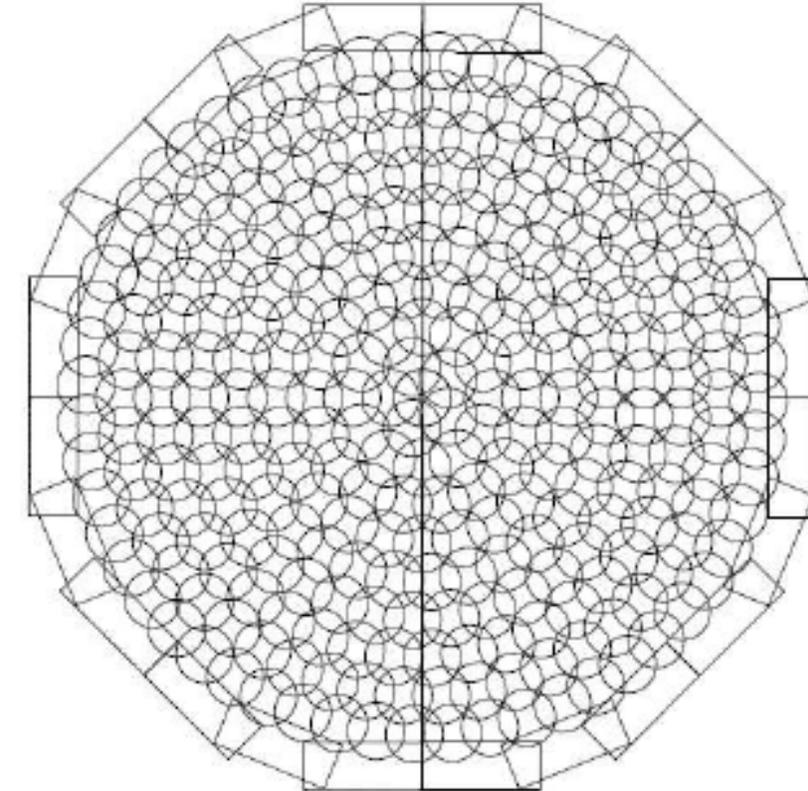


# Jet Grouting

- ▶ Aplicaciones
  - ▶ Fundaciones
  - ▶ Estructuras de contención
  - ▶ **Barreras hidráulicas**
  - ▶ Túneles
  - ▶ Otras.



PLANTA TAPON DE FONDO

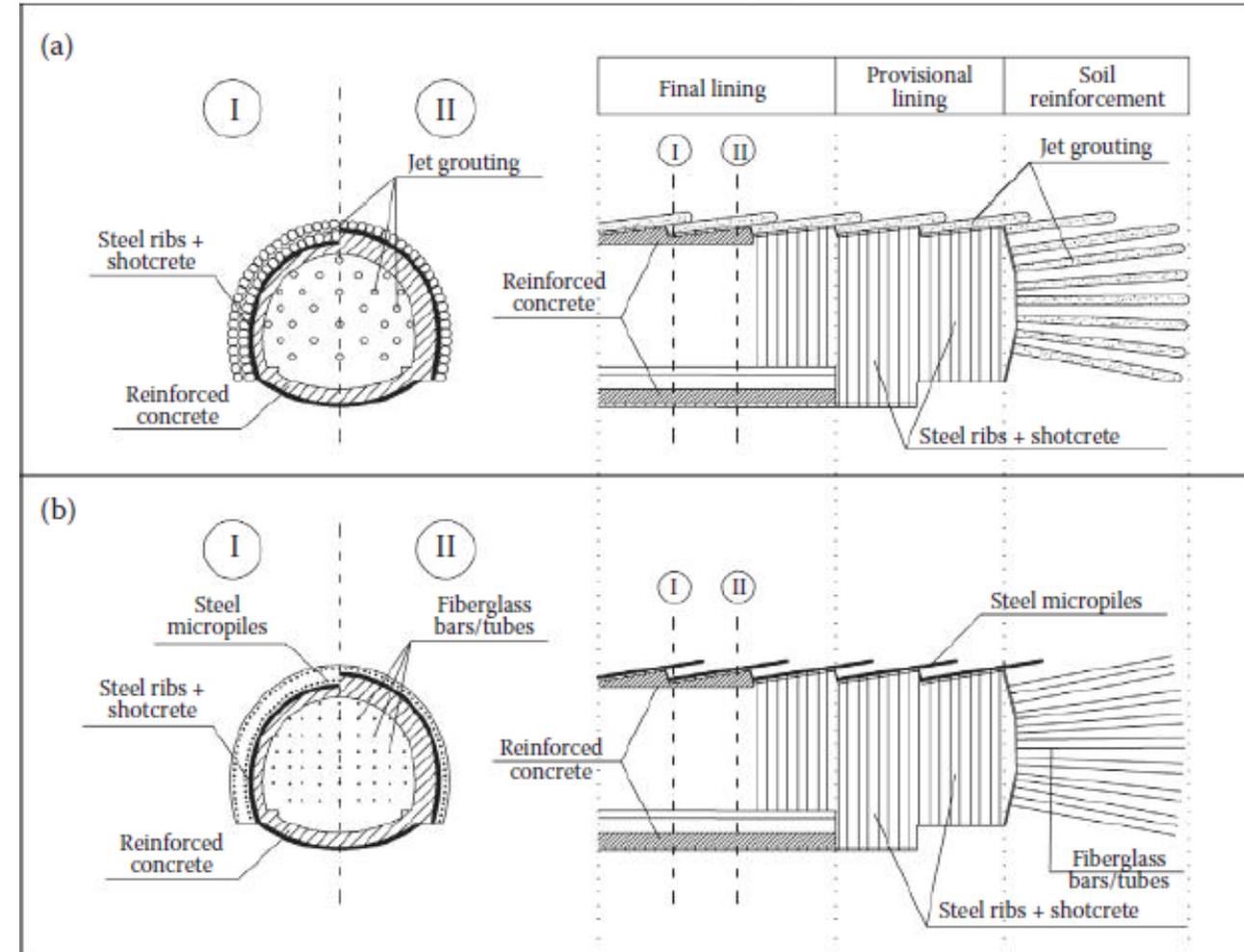
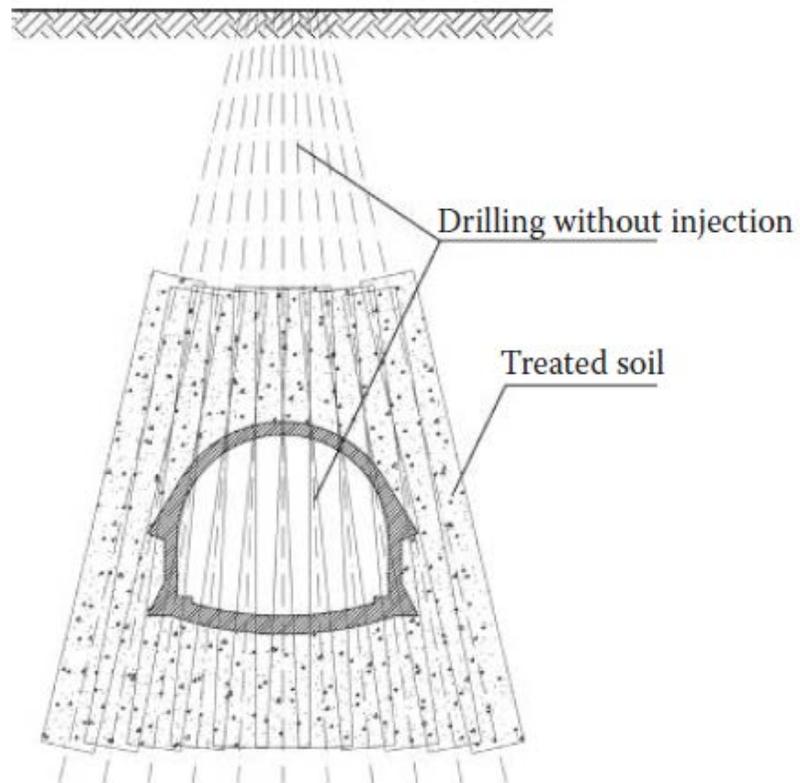


(Trevi 2012)

# Jet Grouting

## ► Aplicaciones

- Fundaciones
- Estructuras de contención
- Barreras hidráulicas
- Túneles
- Otras.



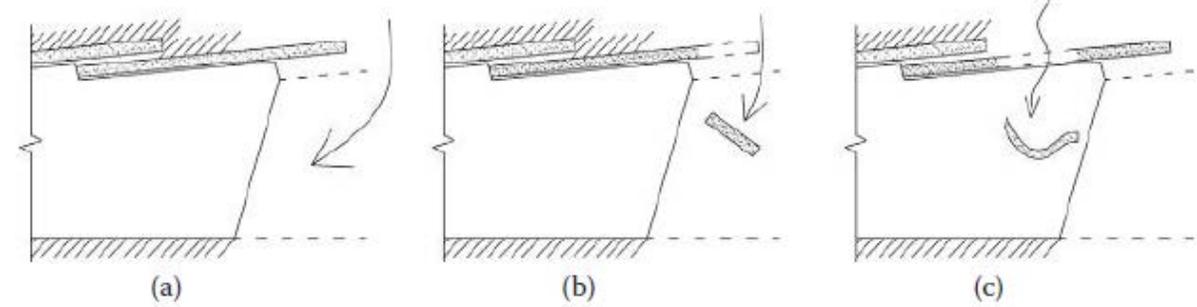
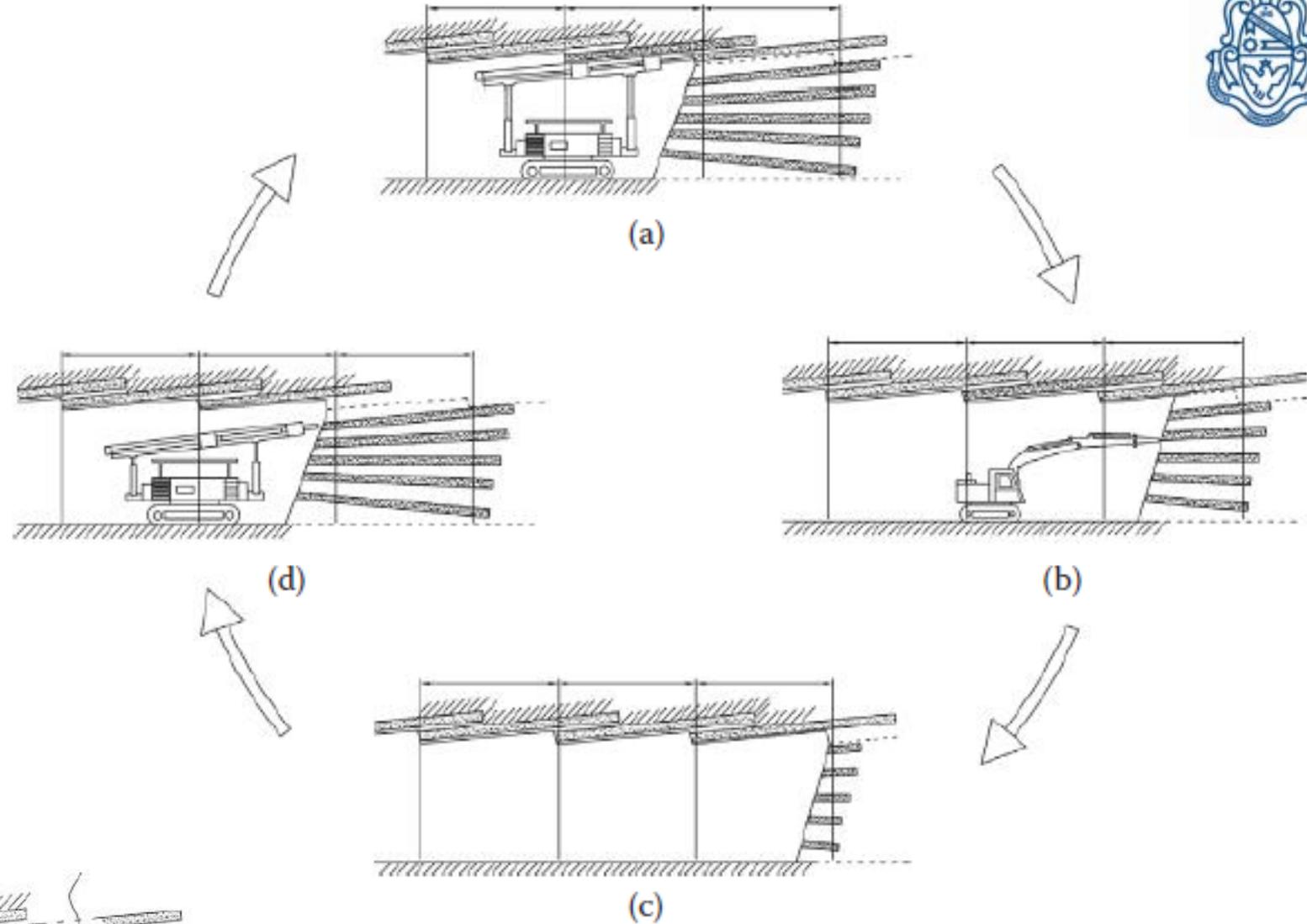


# Jet Grouting

## ► Aplicaciones

- Fundaciones
- Estructuras de contención
- Barreras hidráulicas
- Túneles
- Otras.

## ► Formas de falla típicas





# Clasificación

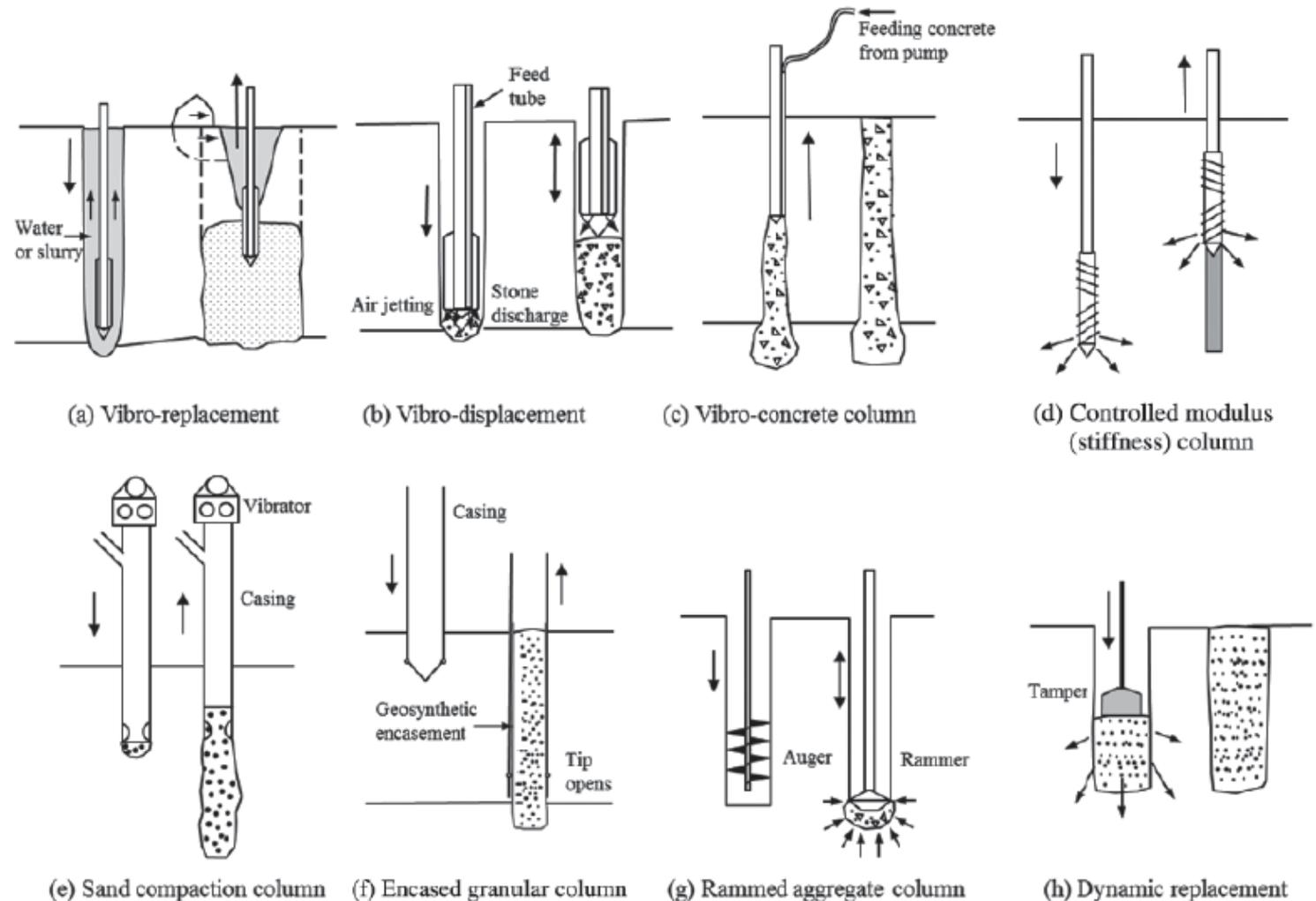
- ▶ Incremento del peso unitario
  - ▶ Compactación tradicional/reemplazo
  - ▶ Compactación dinámica
  - ▶ Vibro-compactación / Vibro-sustitución
  - ▶ Consolidación/colapso
- ▶ Agregado de Cementantes
  - ▶ Inyecciones
  - ▶ Jet Grouting
- ▶ **Agregado de Inclusiones Rígidas**



# Agregado de Inclusiones Rígidas

► Consiste en la mejora de un sector del terreno mediante la instalación de elementos de mayor rigidez y resistencia.

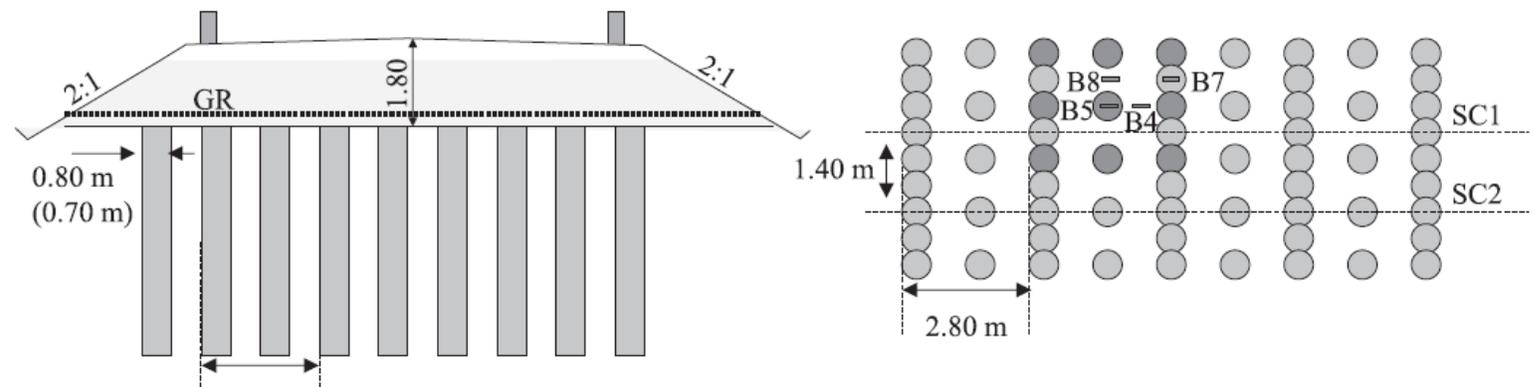
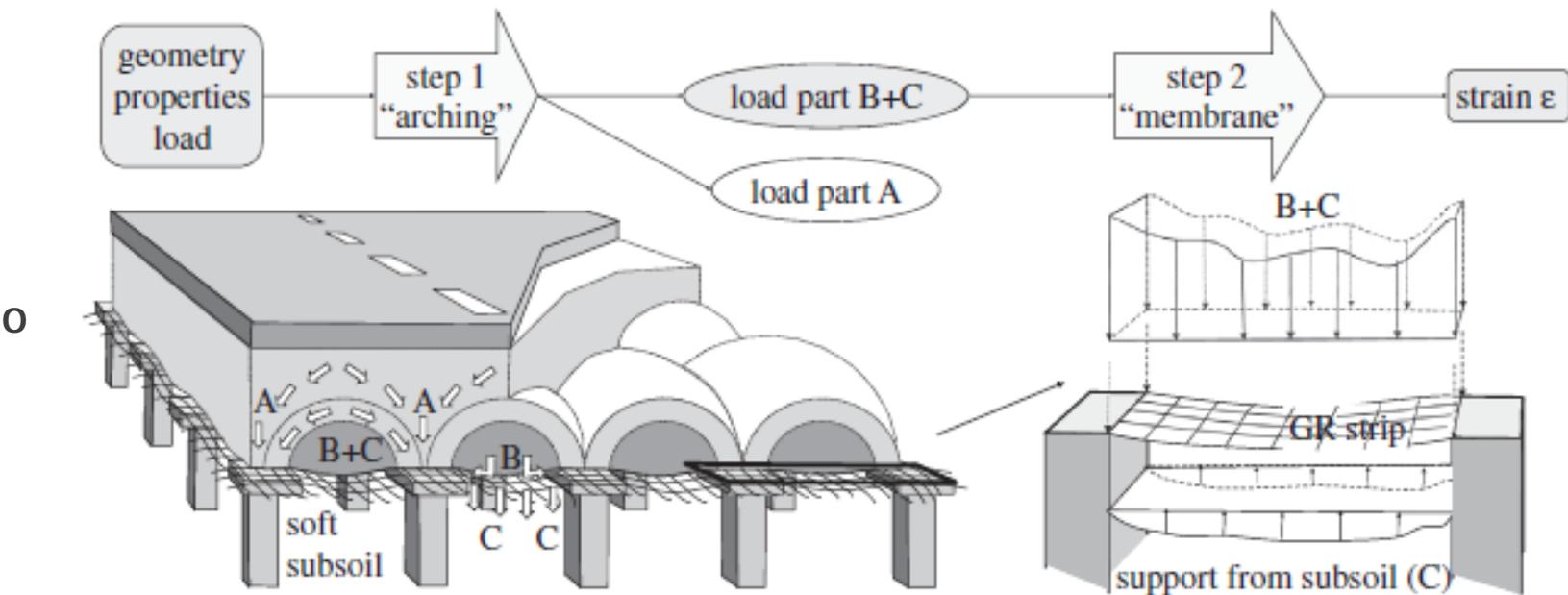
- Pilotes hincados
- Pilotes preexcavados
- Deep Soil Mixing
- Columnas de módulo controlado
- Vibrocompactación
- Vibro reemplazo
- Reemplazo dinámico



# Agregado de Inclusiones Rígidas

► Consiste en la mejora de un sector del terreno mediante la instalación de elementos de mayor rigidez y resistencia.

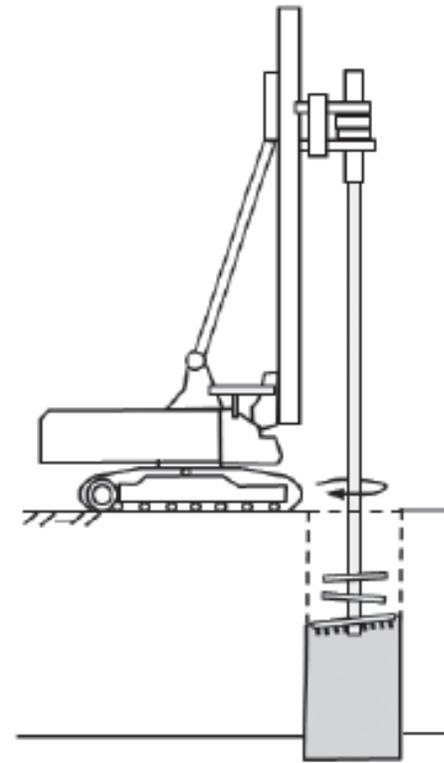
- Pilotes hincados
- Pilotes preexcavados
- Deep Soil Mixing
- Columnas de módulo controlado
- Vibrocompactación
- Vibro reemplazo
- Reemplazo dinámico





# Deep Soil Mixing

- ▶ Deep Mixing: consiste en la mezcla in situ del suelo con un agente endurecedor/estabilizador (cemento, cal, escorias, u otros aglomerantes) a distintas profundidades utilizando hélices.
- ▶ El proceso puede ejecutarse tanto en seco como en estado húmedo.
- ▶ El método húmedo utiliza mezclas en consistencia de lodos (plásticas a fluidas)
- ▶ Permite producir columnas de suelo mejorado con:
  - ▶ Geometría cierta
  - ▶ Control de dosificación en función del tipo de suelo
  - ▶ Bajo impacto en el entorno



# Deep Soil Mixing

## Herramientas

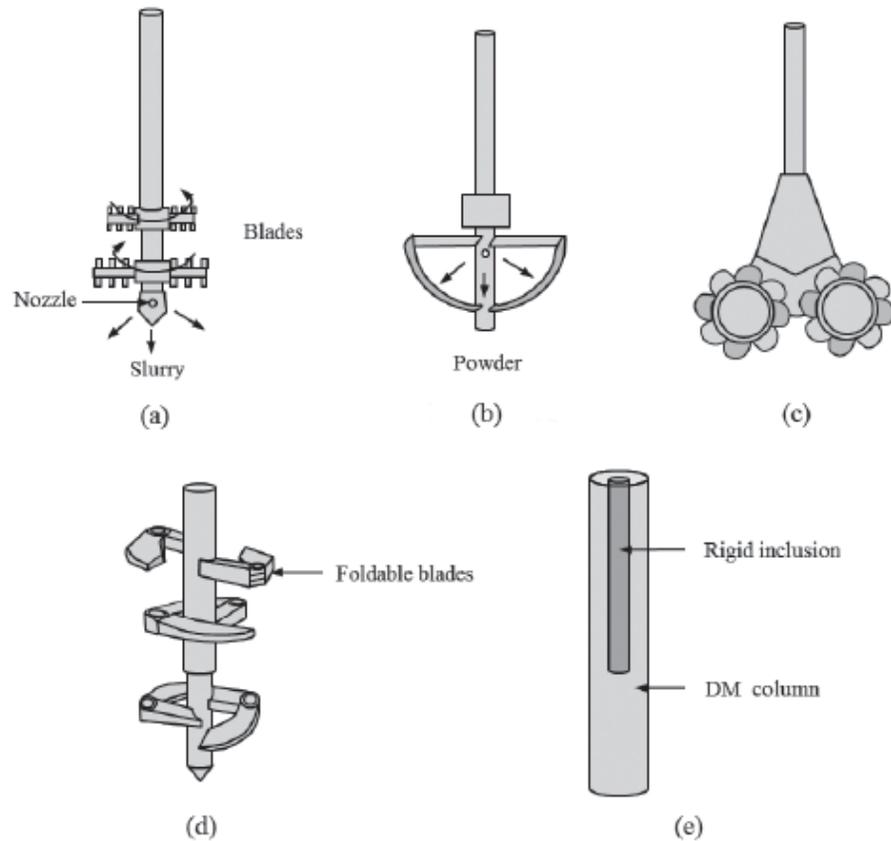
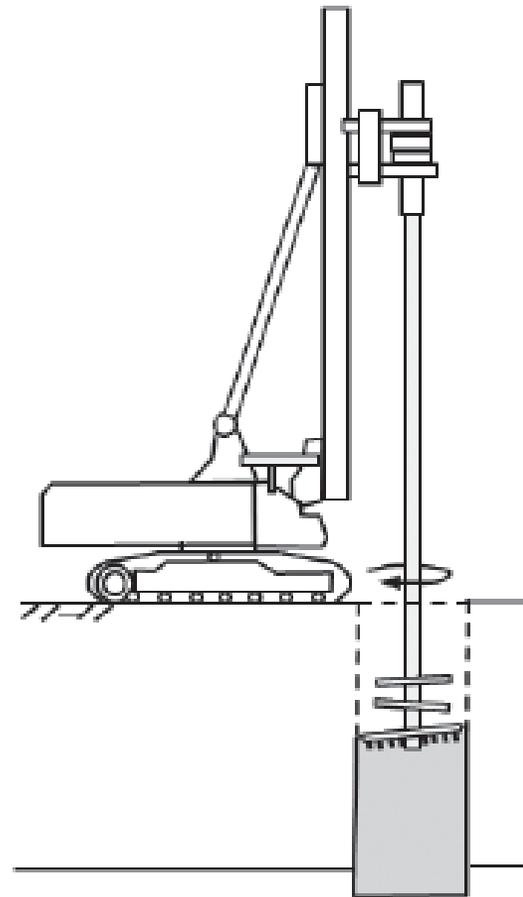


Figure 8.2 Different types of deep mixing techniques: (a) wet method, (b) dry method, (c) cutter soil mixing, (d) T-shape deep mixing, and (e) stiffened DM column.

## Hélice discontinua



## Hélice continua





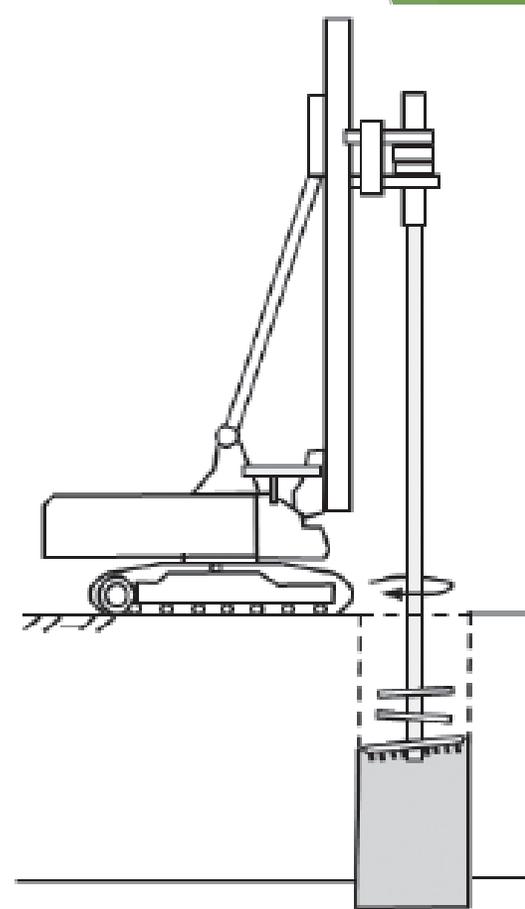
# Deep Soil Mixing

## ► Usos y Aplicaciones

- Reducción de asentamientos
- Mejora de resistencia al corte
  - Estabilidad de terraplenes
  - Estabilidad de cortes en arcillas
  - Reducción de empujes
- Mitigación de licuación
- Barreras impermeables
- Tratamiento de terreno contaminado

## ► Ventajas

- Alta productividad
- Poco impacto ambiental
- Calidad verificable
- Baja permeabilidad, hasta  $k = 10^{-9}$  m/s



## ► Limitaciones

- Profundidad limitada a ~25m
- No aplicable a gravas o suelos densos
- No permite paredes inclinadas



# Deep Soil Mixing

## ► Ejecución por vía seca

## ► Ventajas

- Más económico
- Alta eficiencia (>80 ml/hora)
- Apto para arcillas de alta plasticidad
- Poco reflujo en superficie

## ► Parámetros de ejecución

- Columnas 600mm - 1000mm x 25m
- Rotación a 100rpm - 200rpm
- Retiro 15mm - 25mm por vuelta
- Cemento 50kg/m<sup>3</sup> - 250kg/m<sup>3</sup>





# Deep Soil Mixing

## ► Ejecución por vía húmeda

## ► Ventajas

- Producto mas homogéneo
- Mayor resistencia final
- Permite atravesar suelos duros
- Se puede colocar refuerzo de acero

## ► Parámetros de ejecución

- Columnas 600mm - 2400mm x 30m
- Rotación a 15rpm - 60rpm
- Retiro 15mm - 25mm por vuelta
- Cemento 80kg/m<sup>3</sup> - 250kg/m<sup>3</sup>
- Rendimiento 10ml/h - 25ml/h





# Deep Soil Mixing

## ► Hélice Contínua (CFA- Continuous Flight Auger)

- Se puede aplicar en cualquier tipo de suelo que permita la penetración de la hélice continua (perfiles homogéneos)
  - Turbas
  - Arcillas muy blandas
  - Arenas muy sueltas
- Por ser una hélice continua nunca queda la perforación vacía: no hay riesgo de derrumbe.
- Rapidez en la instalación (100 a 250 ml turno/equipo)





# Deep Soil Mixing

## ► Hélice Contínua (CFA- Continuous Flight Auger)

- El proyecto requiera mucha cantidad de elementos del mismo diámetro y longitud similar.
- Se requiera minimizar el efecto de vibraciones y ruido.
- No se tenga espacio para almacenar lodos bentoníticos.
- Proyectos sensibles ambientalmente (CMC).

