

Máster en Túneles y Obras Subterráneas

Módulo 4: Túneles a cielo abierto

Deformabilidad

Acciones sobre el entorno

Antonio Gens / Marcos Arroyo



Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona

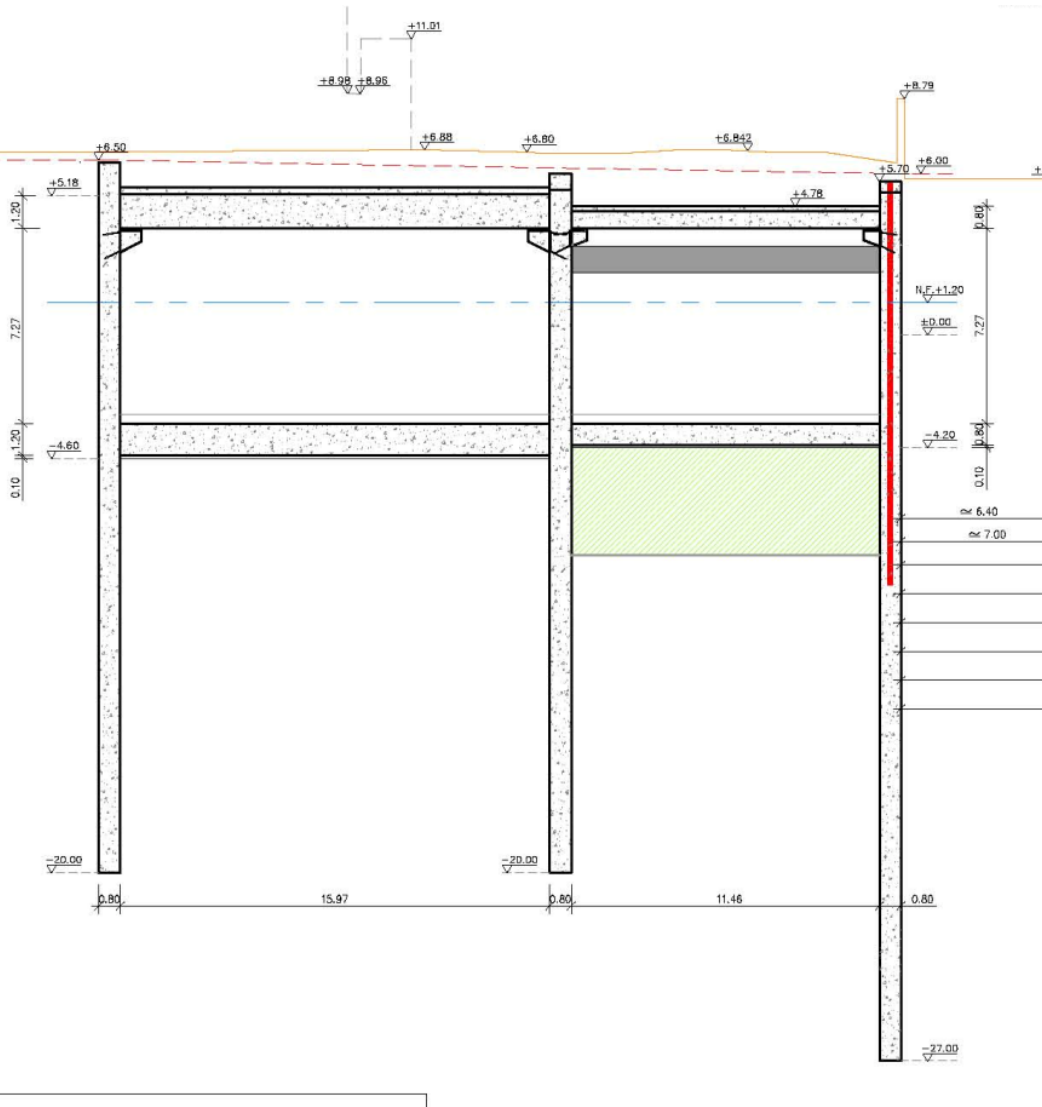


Madrid, 8 de marzo 2016

Esquema de la presentación

- ❑ Introducción
- ❑ Mecanismos de deformación en excavaciones
- ❑ Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos
 - Movimientos laterales y asientos máximos
 - Distribución de asientos
- ❑ Métodos de cálculo
- ❑ Métodos de control y reducción de movimientos
- ❑ Un ejemplo de mitigación de movimientos
- ❑ Conclusiones

Túneles a cielo abierto



Entrada del AVE en Barcelona. Prat de Llobregat

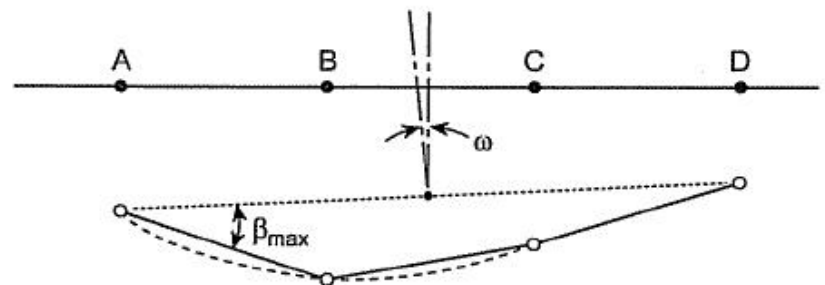
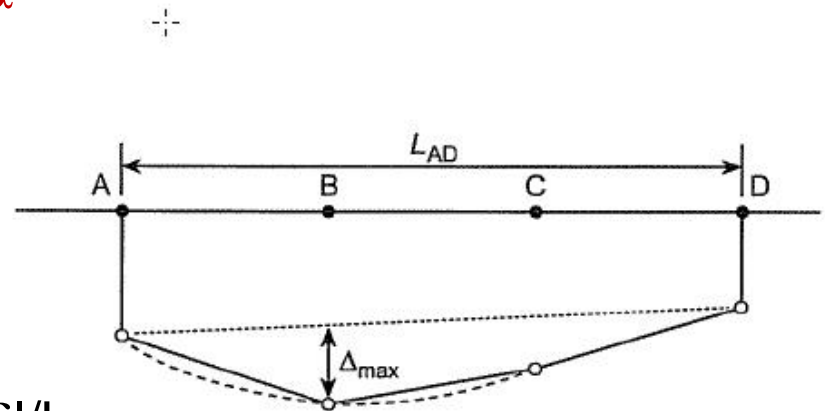
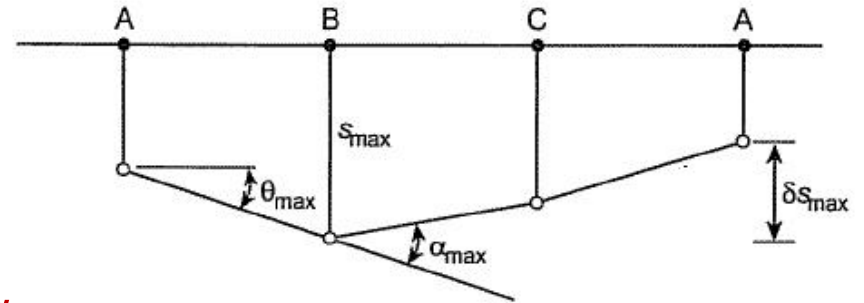
Muros pantalla: movimientos producidos por la excavación

- ❑ La ejecución de una excavación inevitablemente produce movimientos en la pantalla y en el terreno circundante
 - Solo vamos a considerar movimientos “normales” (es decir los correspondientes a una ejecución adecuada y no debidos a circunstancias accidentales)
 - Movimientos asociados fundamentalmente al proceso de excavación
- ❑ La tolerancia sobre el nivel de deformaciones aceptable (en condiciones urbanas) ha disminuido de forma notable en los últimos años
 - Supone una mayor exigencia para la estimación y control de movimientos

Introducción

□ Movimiento del terreno y de la cimentación

- Rotación o inclinación, θ
- Deformación angular (distorsión), α
- Deflexión (flecha) relativa, Δ_{\max}
- Razón de deflexión, Δ_{\max}/L
- Giro, ω
- Rotación relativa, β
- Deformación horizontal media, $\varepsilon_h = \delta l/L$



Introducción

○ Criterio de daño

Table 2.2 Relationship between category of damage and limiting tensile strain (ϵ_{lim}) (after Boscardin and Cording, 1989)

Category of damage	Normal degree of severity	Limiting tensile strain ϵ_{lim} (%)
0	Negligible	0–0.05
1	Very slight	0.05–0.075
2	Slight	0.075–0.15
3	Moderate ^a	0.15–0.3
4 to 5	Severe to very severe	>0.3

^a Boscardin and Cording describe the damage relating to ϵ_{lim} in the range of 0.15–0.3% as 'moderate to severe'. However, none of their case studies exhibits severe damage for this range of strains. There is no evidence to suggest that tensile strains up to 0.3% cause severe damage

Boscardin & Cording (1989)

Introducción

○ Criterio de daño

Table 2.1 Classification of visible damage to walls with particular reference to ease of repair of plaster and brickwork or masonry

Category of damage	Normal degree of severity	Description of typical damage ^a
0	Negligible	Hairline cracks less than about 0.1 mm
1	Very slight	<i>Fine cracks which are easily treated during normal decoration.</i> Damage generally restricted to internal wall finishes. Close inspection may reveal some cracks in external brickwork or masonry. Typical crack widths up to 1 mm.
2	Slight	<i>Cracks easily filled. Redecoration probably required. Recurrent cracks can be masked by suitable linings.</i> Cracks may be visible externally and some repointing may be required to ensure weathertightness. Doors and windows may stick slightly. Typical crack widths up to 5 mm.
3	Moderate	<i>The cracks require some opening up and can be patched by a mason. Repointing of external brickwork and possibly a small amount of brickwork to be replaced.</i> Doors and windows sticking. Service pipes may fracture. Weathertightness often impaired. Typical crack widths are 5 to 15 mm or there are several greater than 3 mm.
4	Severe	<i>Extensive repair work involving breaking-out and replacing sections of walls, especially over doors and windows.</i> Windows and door frames distorted, floor sloping noticeably. ^b Walls leaning ^b or bulging noticeably, some loss of bearing in beams. Service pipes disrupted. Typical crack widths are 15 to 25 mm but also depends on the number of cracks.
5	Very severe	<i>This requires a major repair job involving partial or complete rebuilding.</i> Beams lose bearing, walls lean badly and require shoring. Windows broken with distortion. Danger of instability. Typical crack widths are greater than 25 mm but depends on the number of cracks.

Ease of repair is given in italics

Burland et al. (1977)

Introducción

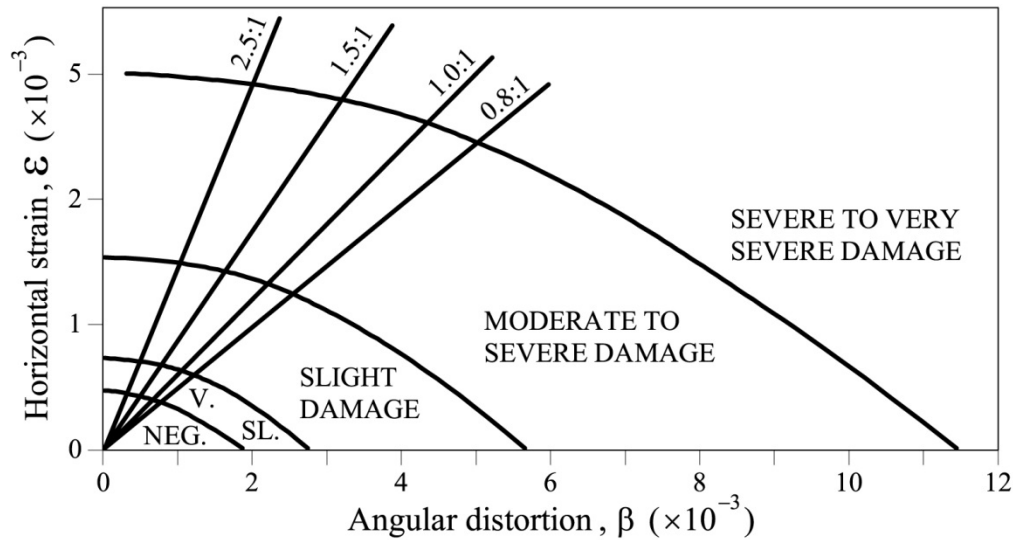
○ Criterio de daño

Categoría de daño	Descripción del daño	Deformación de tracción (%)	Reparaciones
0	Inapreciable	0 - 0.05	
1	Muy ligero	0.05 - 0.075	
2	Ligero	0.075 - 0.15	pintor
3	Moderado	0.15 - 0.3	albañil
4 o 5	Severo o muy severo	> 0.3	juez

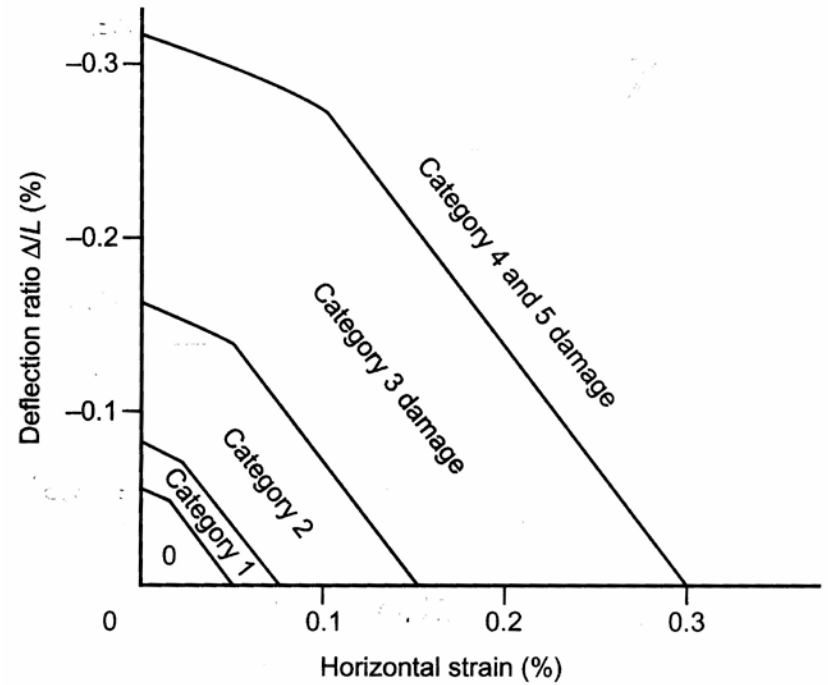
Boscardin & Cording (1989)

Introducción

○ Criterio de daño



Boscardin & Cording (1989)



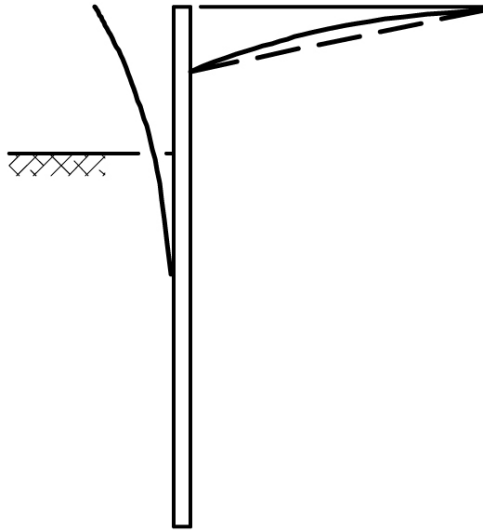
Burland (1998)

Esquema de la presentación

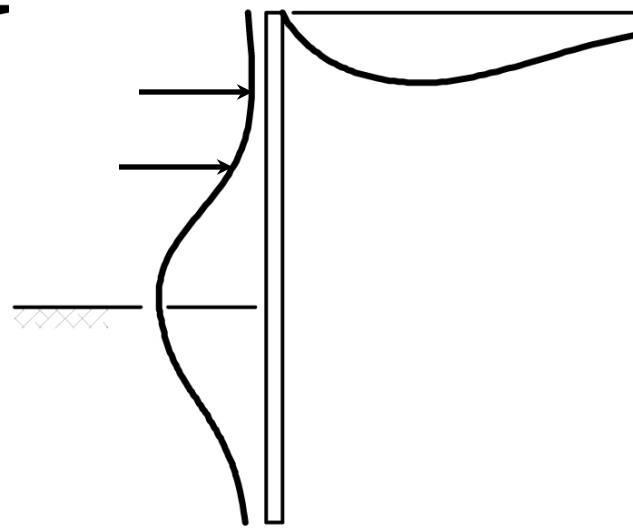
- ❑ Introducción
- ❑ Mecanismos de deformación en excavaciones
- ❑ Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos
 - Movimientos laterales y asientos máximos
 - Distribución de asientos
- ❑ Métodos de cálculo
- ❑ Métodos de control y reducción de movimientos
- ❑ Un ejemplo de mitigación de movimientos
- ❑ Conclusiones

Mecanismos de deformación

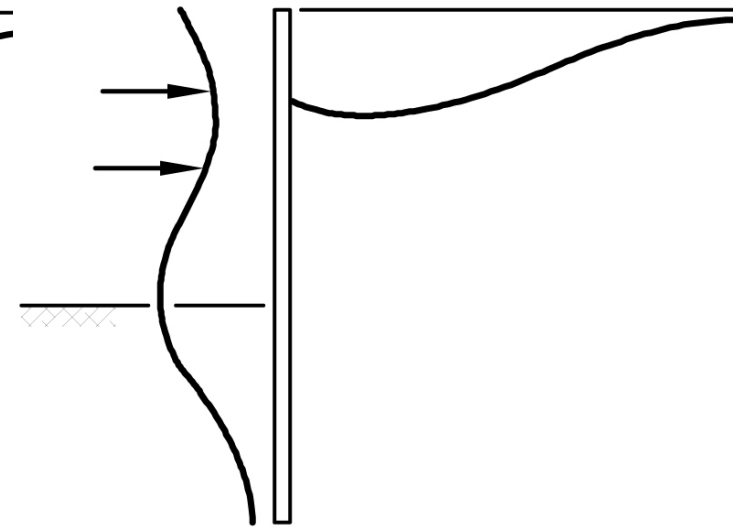
- Dos modos fundamentales de deformación



Pantalla en voladizo



Pantalla apuntalada

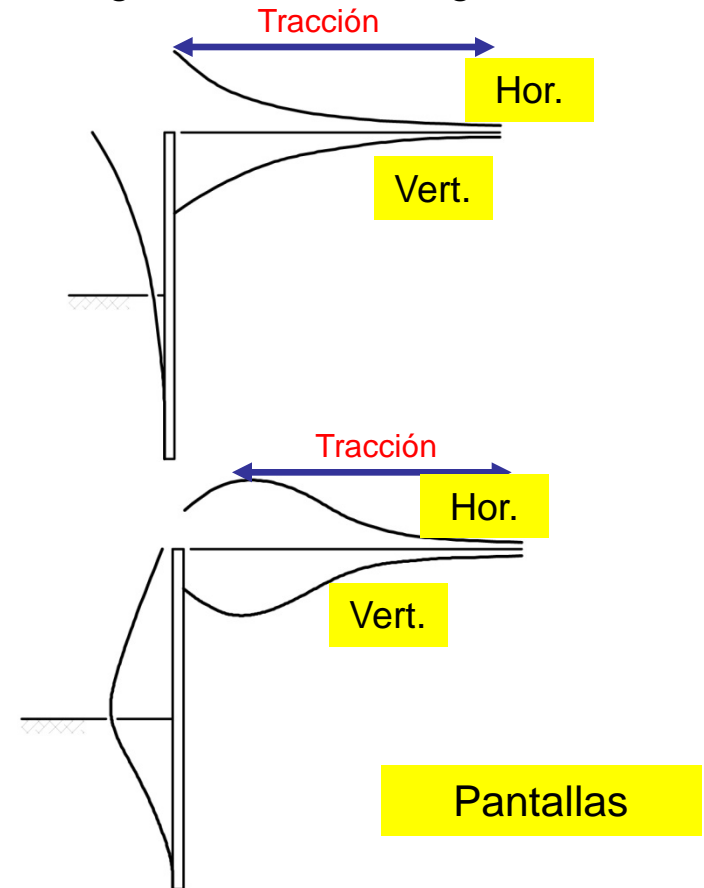
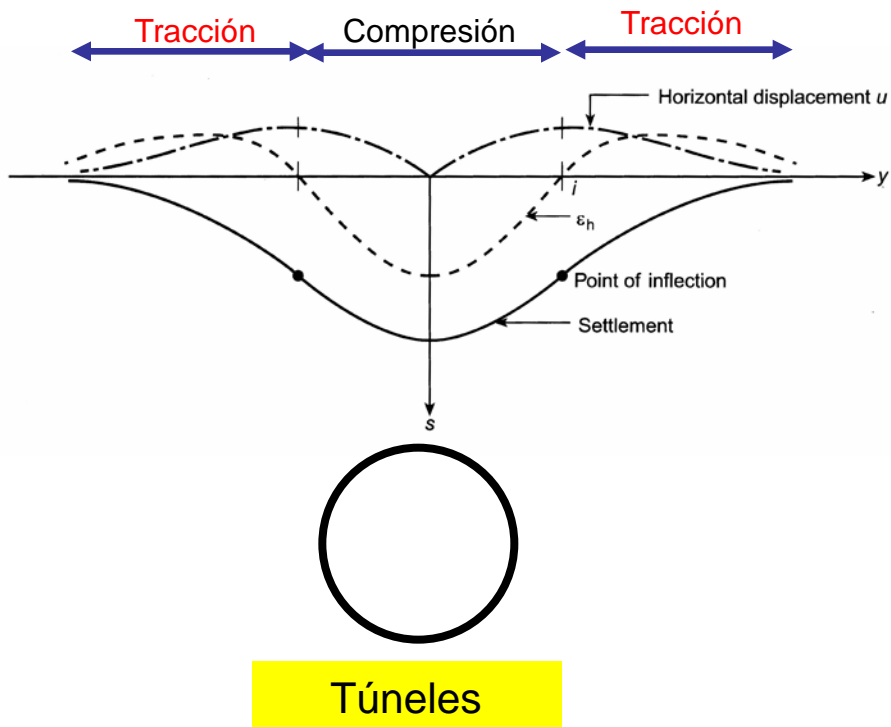


Desplazamientos
totales

- Hay una relación directa (pero no única) de la deformación lateral de la pantalla a los asientos en superficie

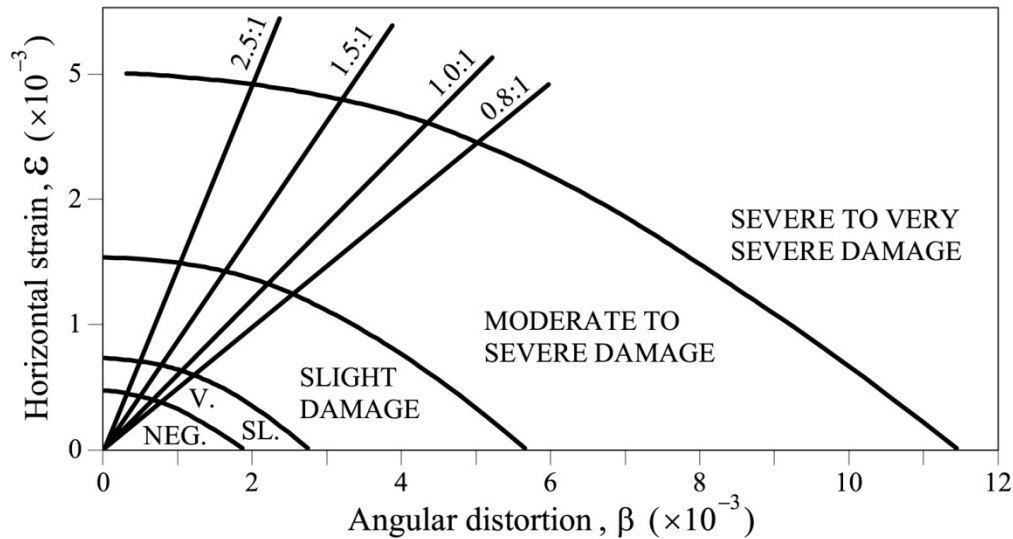
Mecanismos de deformación

- La deformación horizontal de **tracción** contribuye de manera importante al daño de edificios y estructuras
 - son más difíciles de medir (menor experiencia)
 - la mayoría de las deformaciones horizontales asociadas a la excavación con pantallas son de tracción (más desfavorables que en el caso de túneles)
 - la respuesta del edificio puede depender de forma significativa de su rigidez horizontal

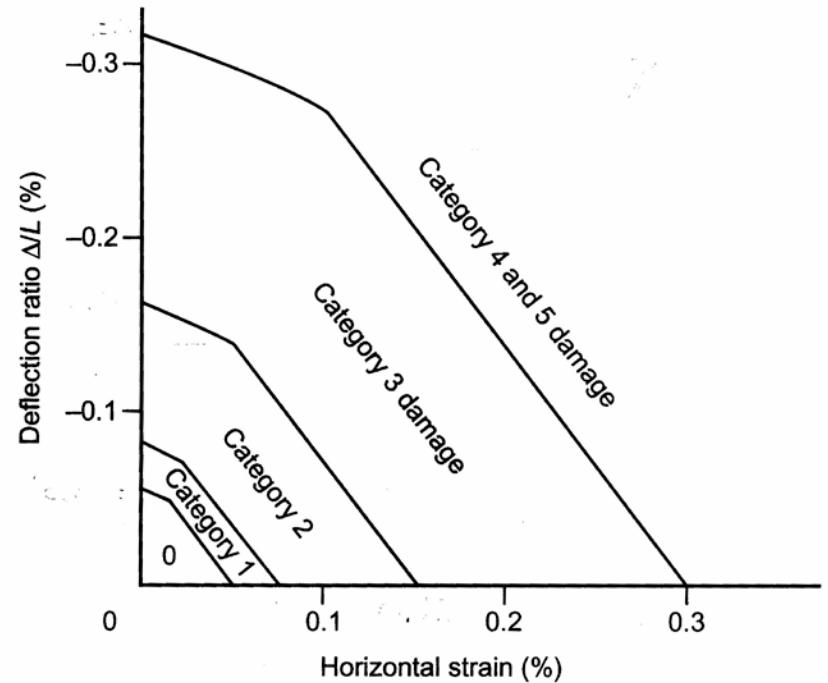


Mecanismos de deformación

- La deformación horizontal de **tracción** contribuye de manera importante al daño de edificios y estructuras



Boscardin & Cording (1989)



Burland (1998)

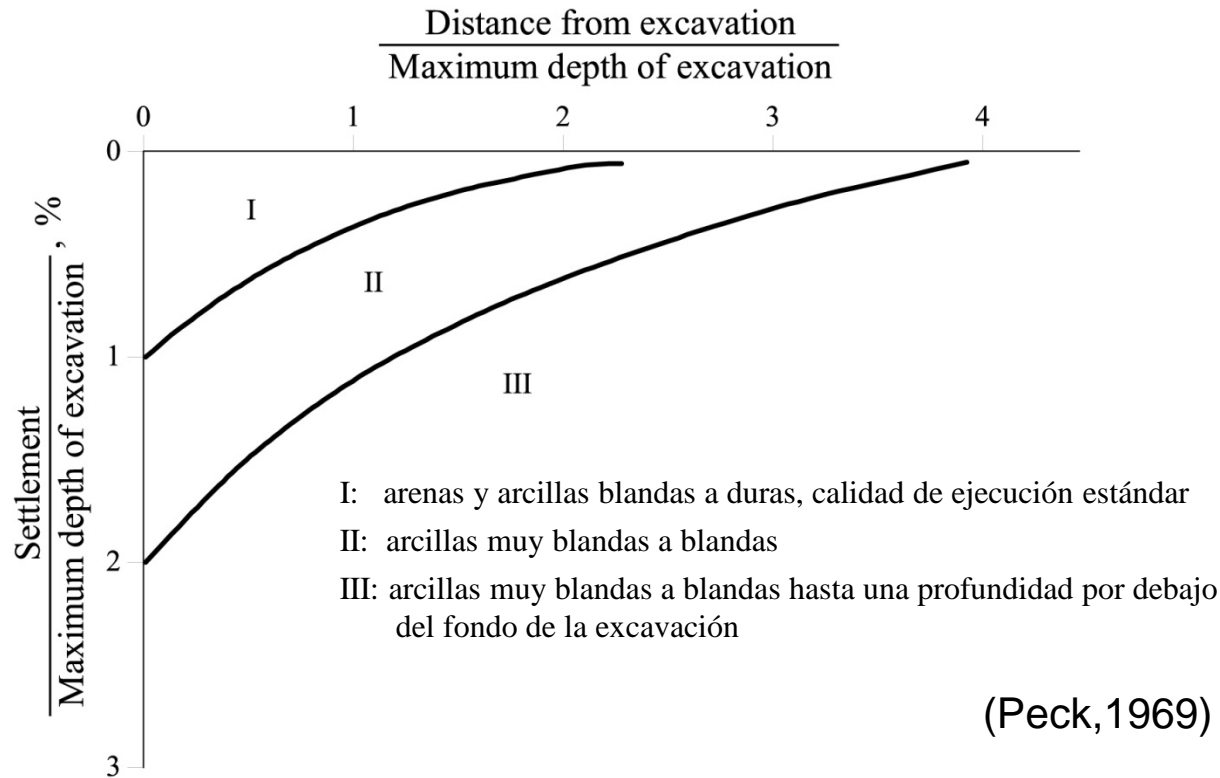
Mecanismos de deformación

- Factores que influyen en los movimientos causados por la excavación
 - cambios de tensiones en el terreno (asociados a excavación y construcción)
 - tamaño de la excavación (profundidad y anchura)
 - propiedades del suelo
 - tensiones horizontales iniciales en el terreno
 - condiciones hidráulicas y su variación
 - rigidez de las pantallas y del apuntalamiento
 - precarga de puntales o anclajes
 - cargas exteriores
 - método constructivo
 - calidad de ejecución
 - etc...

Esquema de la presentación

- ❑ Introducción
- ❑ Mecanismos de deformación en excavaciones
- ❑ Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos
 - Movimientos laterales y asientos máximos
 - Distribución de asientos
- ❑ Métodos de cálculo
- ❑ Métodos de control y reducción de movimientos
- ❑ Un ejemplo de mitigación de movimientos
- ❑ Conclusiones

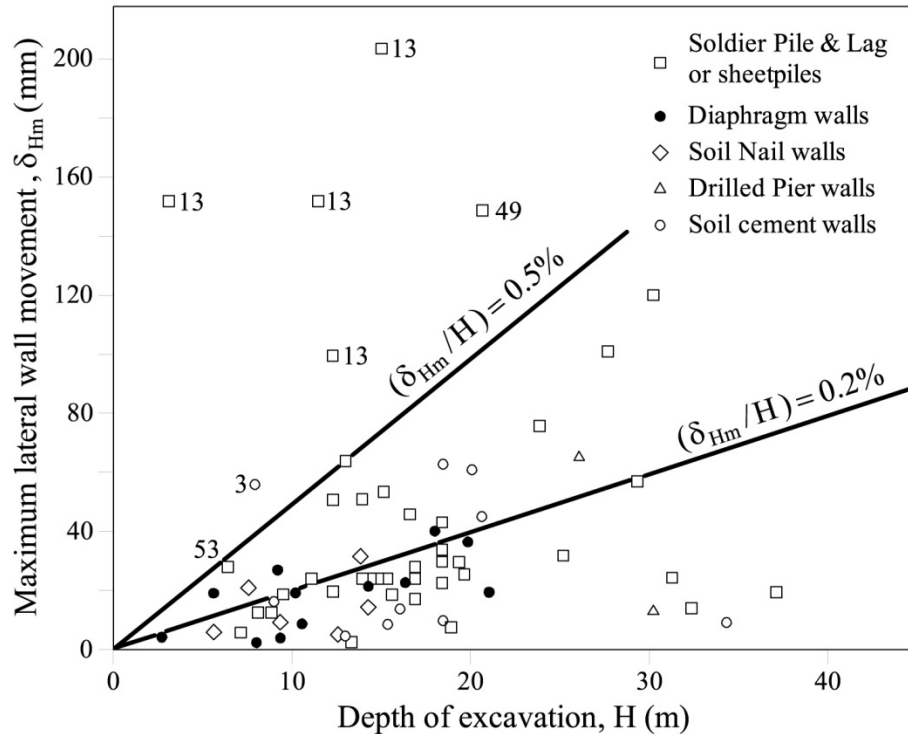
Asientos



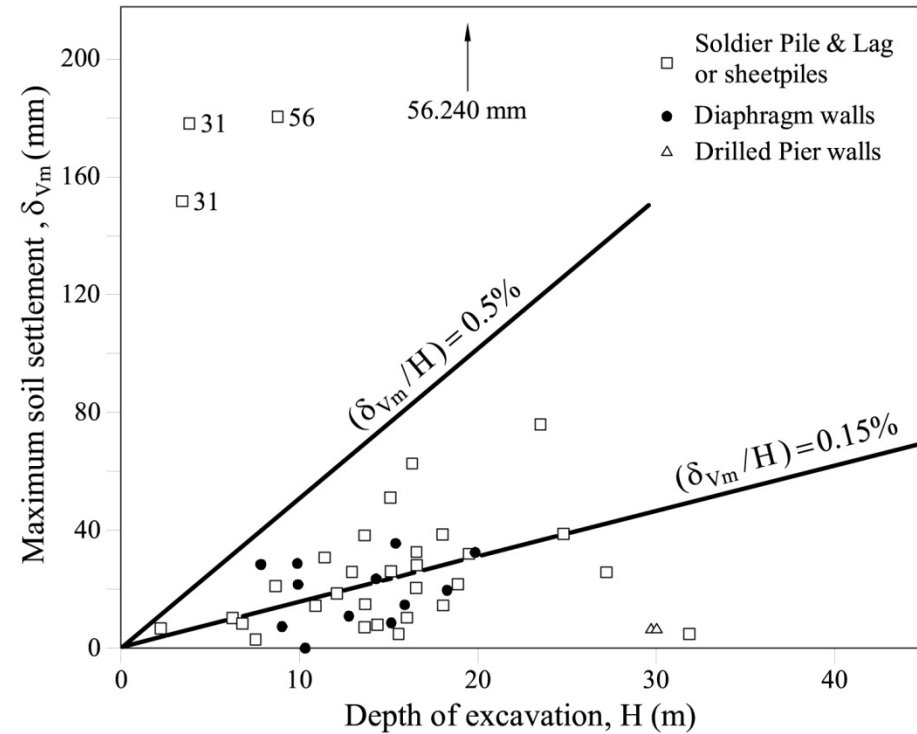
- Curvas derivadas de excavaciones con tablestacas o muro berlinés (soldier piles). Empotramiento reducido.

Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos

○ Arcillas rígidas, suelos residuales y arenas (Clough & O'Rourke, 1990)



Movimiento lateral máximo

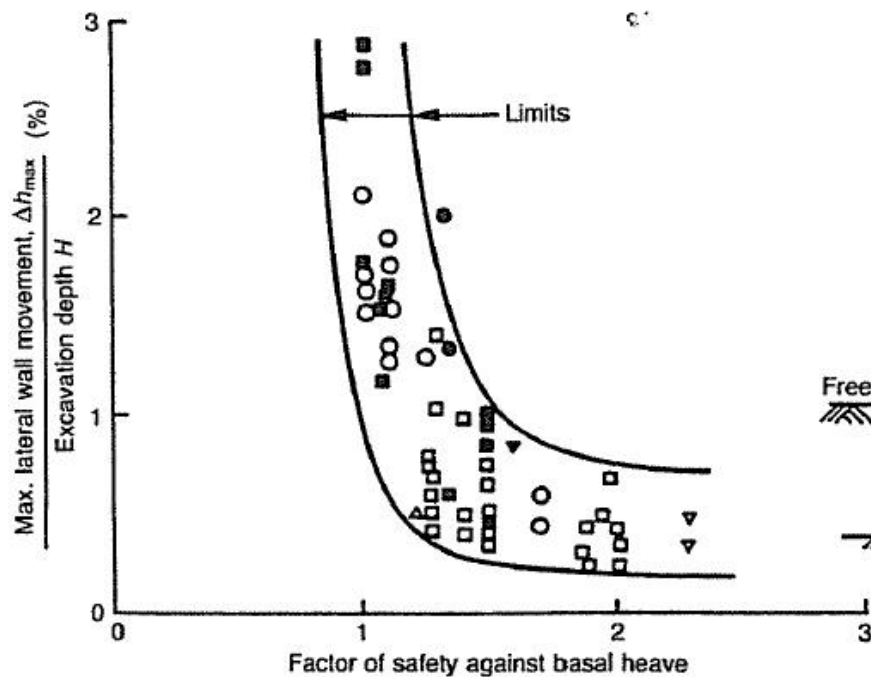


Asiento máximo

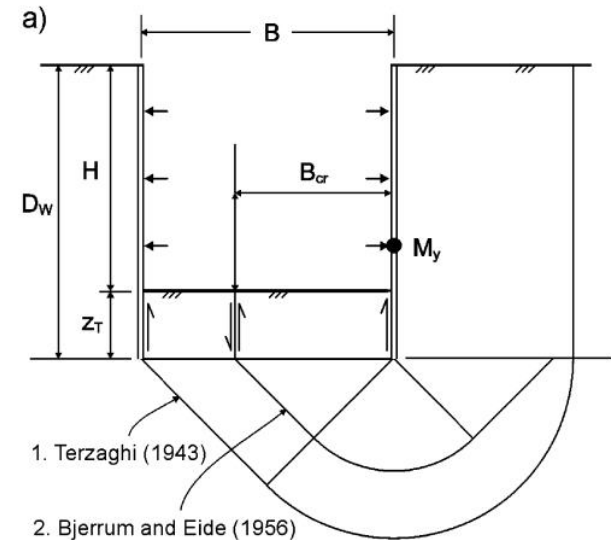
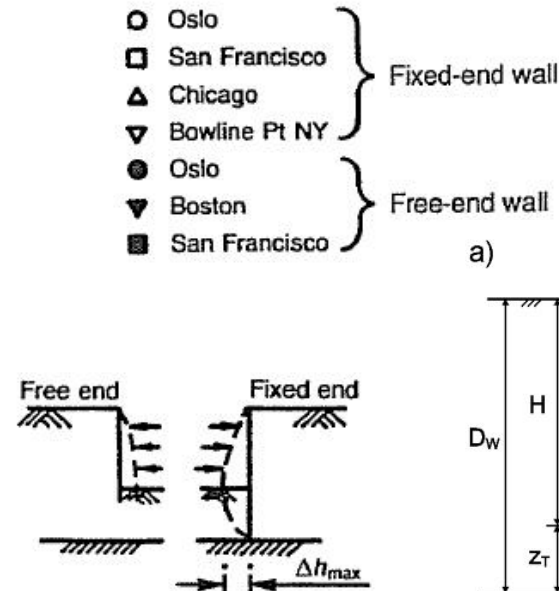
- Los movimientos horizontales máximos medios alrededor del 0.2%
- Los asentos máximos medios alrededor del 0.15 %
- Amplia dispersión, más en movimientos horizontales
- No hay diferencias significativas entre distintos tipos de muros

Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos

○ Arcillas blandas (Mana & Clough, 1981)



Movimiento lateral máximo

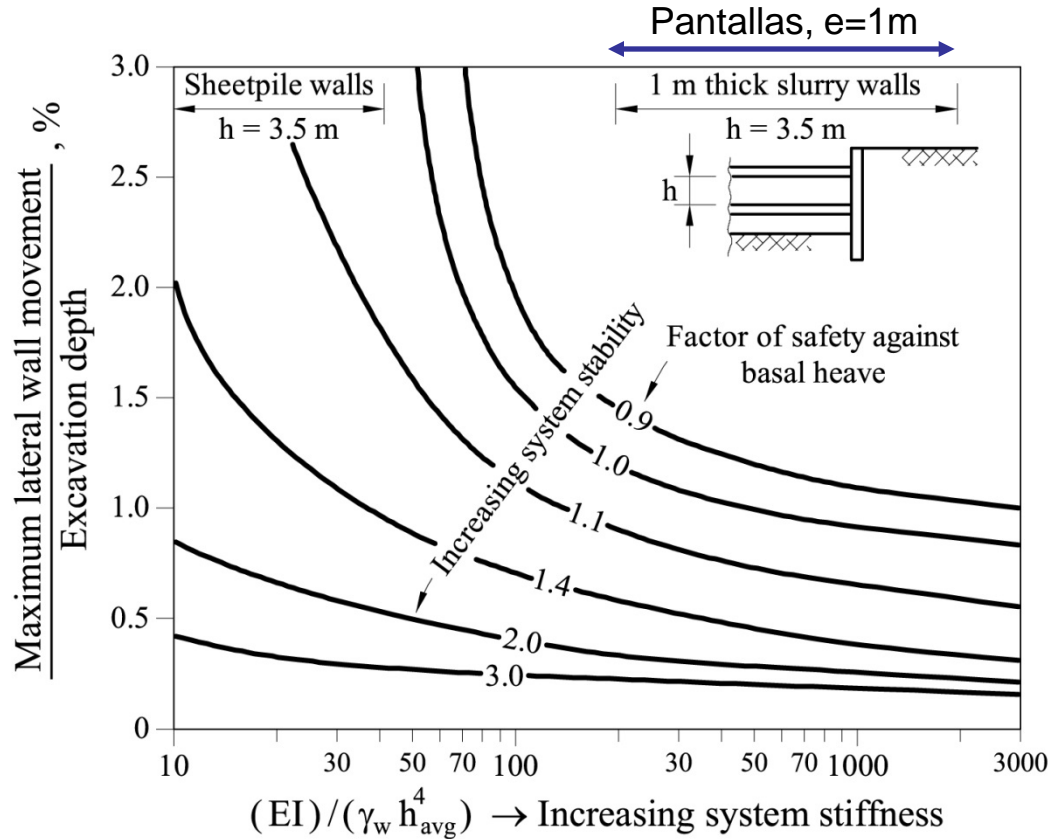


Inestabilidad de fondo

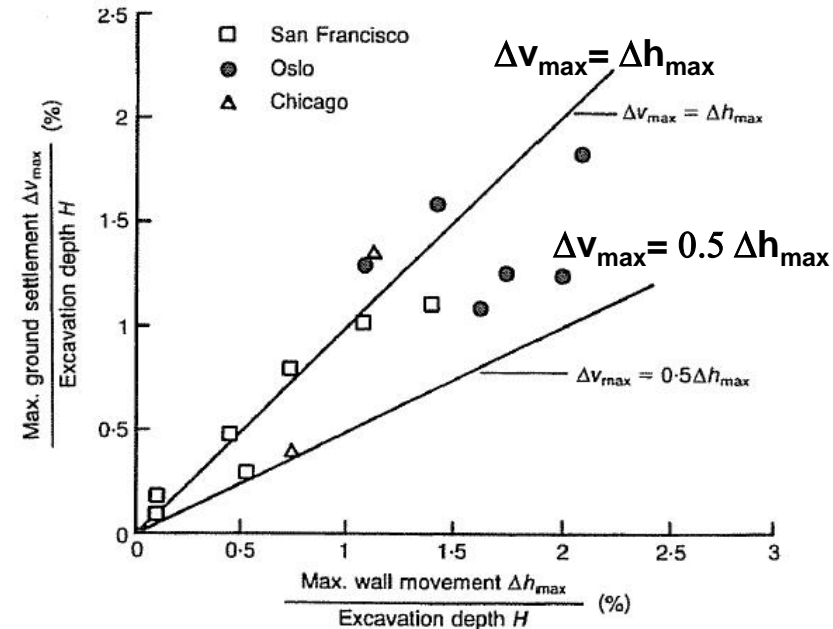
- Los movimientos asociados a la inestabilidad de fondo son dominantes cuando el factor de seguridad es bajo

Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos

○ Arcillas blandas (Clough & O'Rourke, 1990)



Movimiento lateral máximo



Asientos

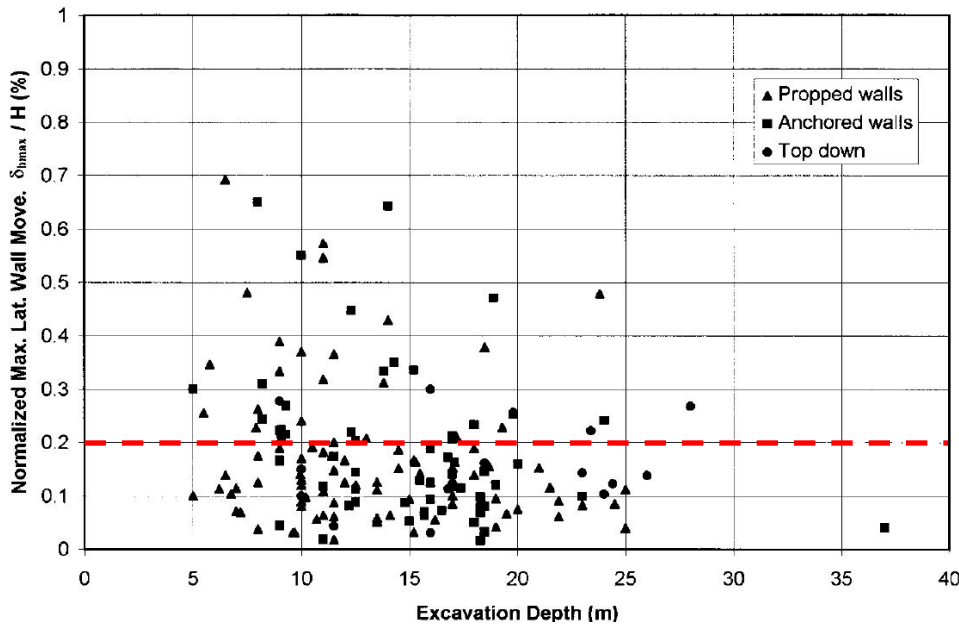
- Rigidez del sistema: $(EI)/(\gamma_w h^4)$
- Addenbrooke et al. (2000) definen la rigidez del sistema como $(EI)/(\gamma_w h^5)$

○ Otras recopilaciones

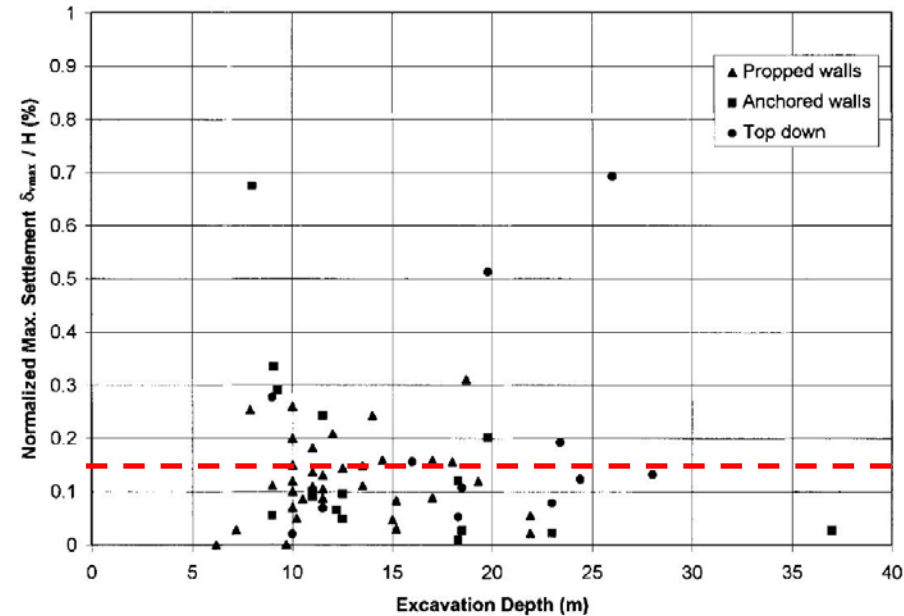
- Karlsrud (1986): Oslo soft clay
- Ou et al. (1993): Taipei soft clay
- Wong et al. (1997): Singapore
- Carder (1995): UK
- Fernie and Suckling (1996): UK
- Long (2001): 296 casos! (COST Action C-7)

Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos

- Recopilación de Long (2001). Excavaciones en suelos medios y rígidos



Movimiento lateral máximo

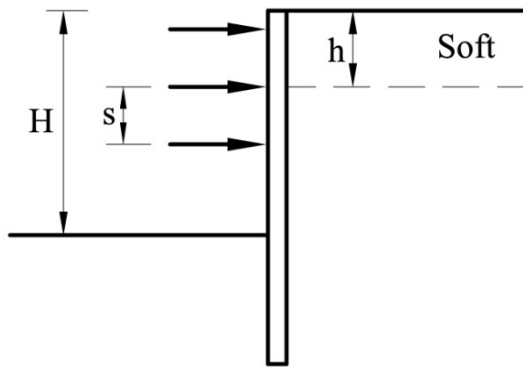


Asiento máximo

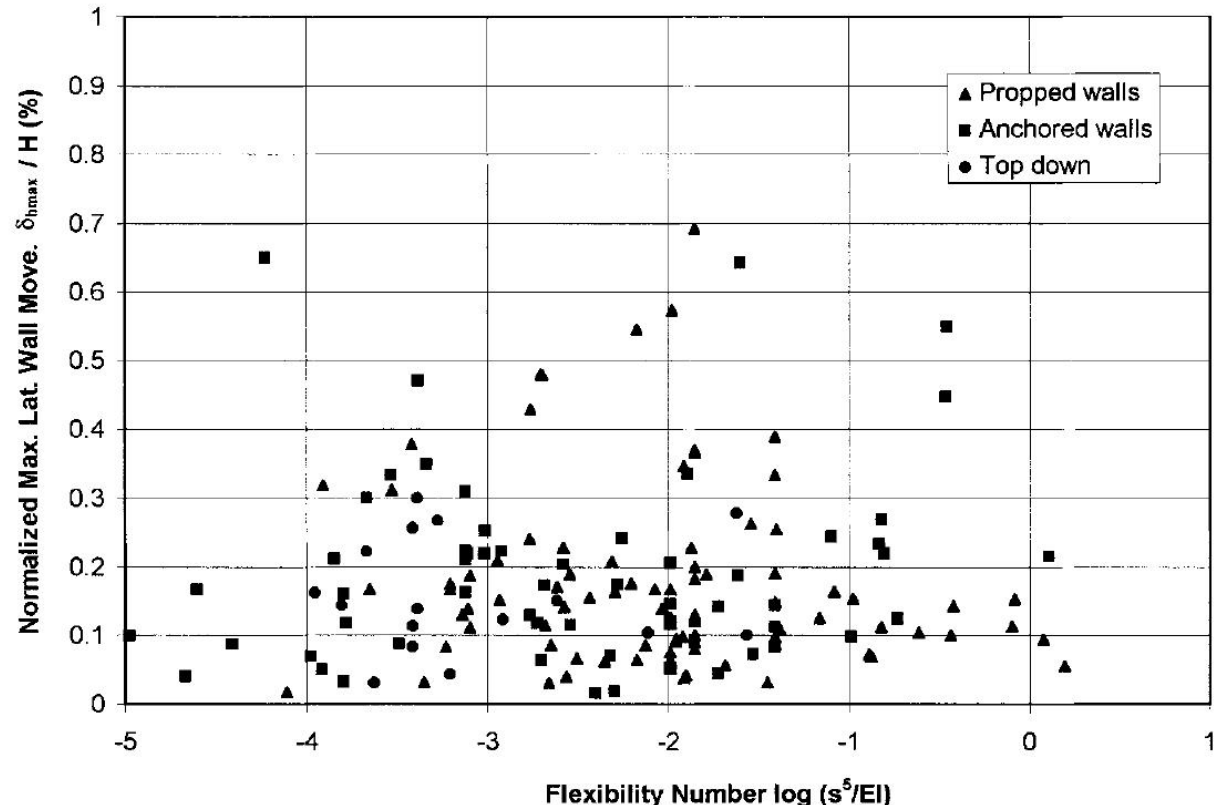
- Amplia dispersión
- En general valores menores de los recogidos por Clough & O'Rourke (1990)
- Poca influencia del tipo de sostenimiento (puntales, anclajes, arriba-abajo)

Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos

- Recopilación de Long (2001). Excavaciones en suelos medios y rígidos



$$h < 0.6H$$



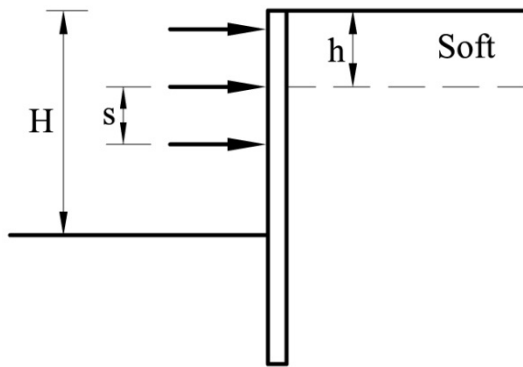
Flexibilidad de desplazamientos: $(s^5)/(EI)$ (Addenbrooke et al., 2000)

Movimiento lateral máximo

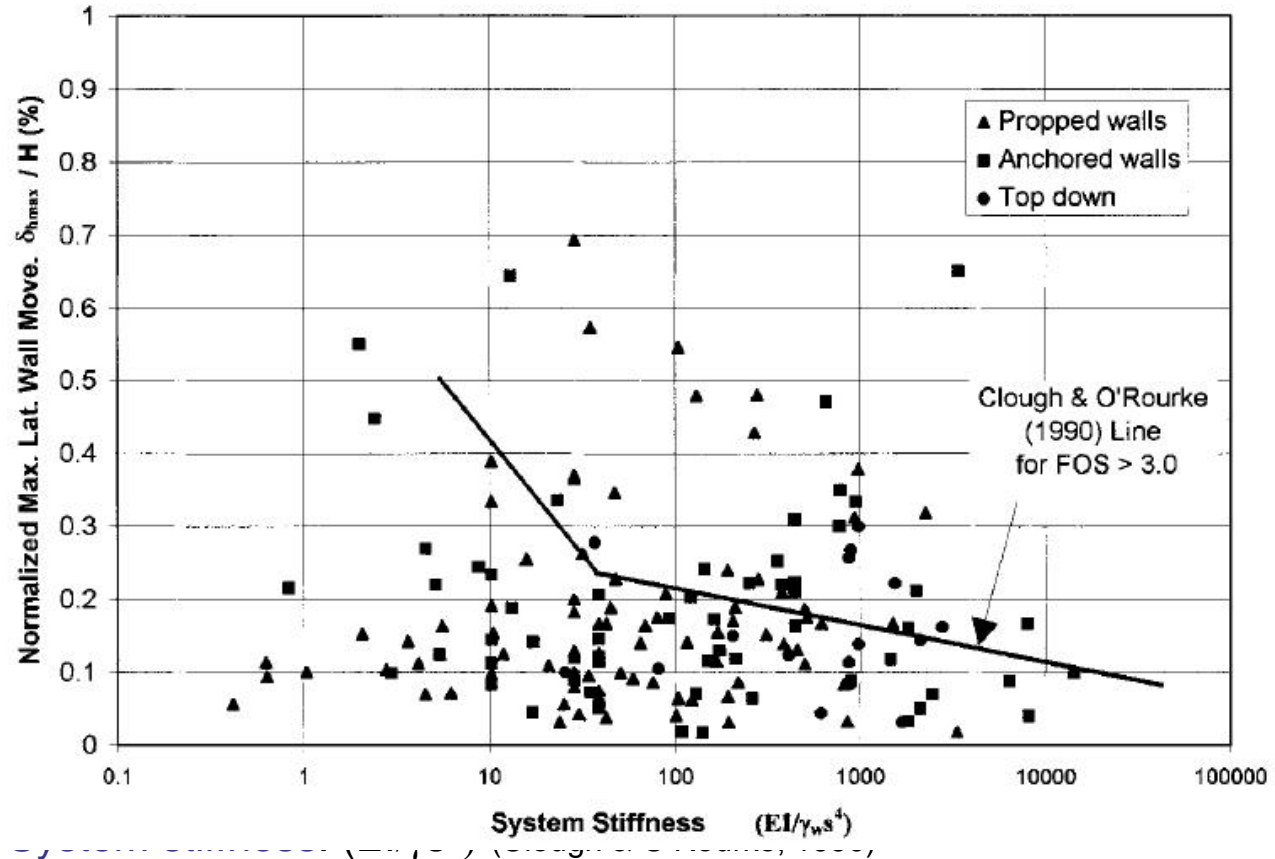
- La rigidez del sistema no es un parámetro determinante en estos casos

Empirical methods for evaluating movements

- Recopilación de Long (2001). Excavaciones en suelos medios y rígidos



$h < 0.6H$

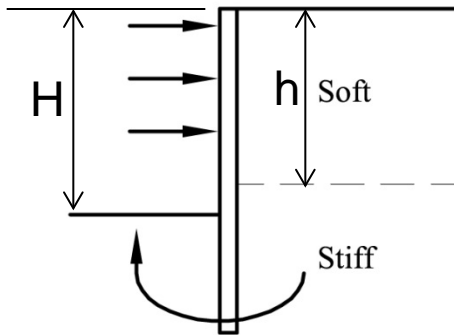


Movimiento lateral máximo

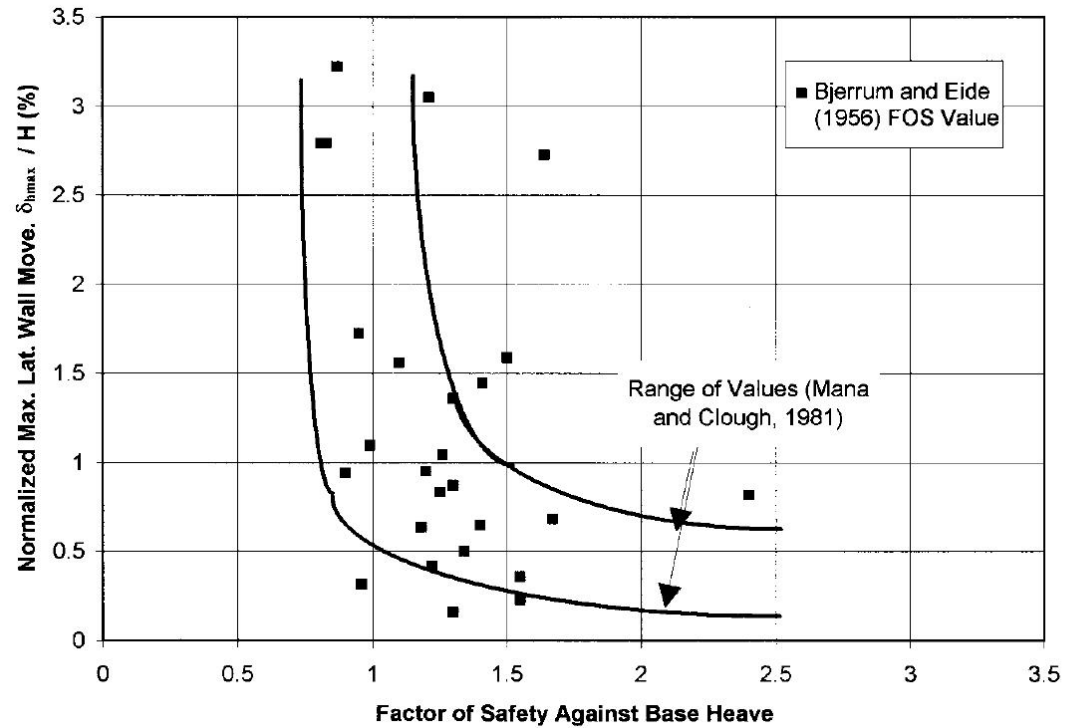
- System stiffness does not appear to be a critical parameter in these cases

Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos

- Recopilación de Long (2001). Excavaciones en suelos blandos



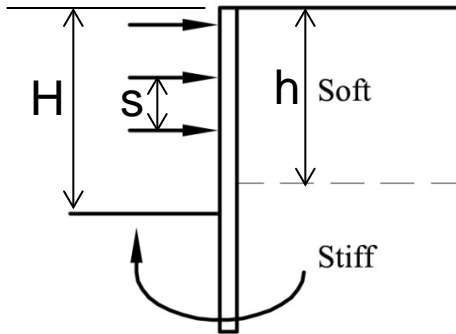
$h > 0.6H$
Bajo FS



Movimiento lateral máximo

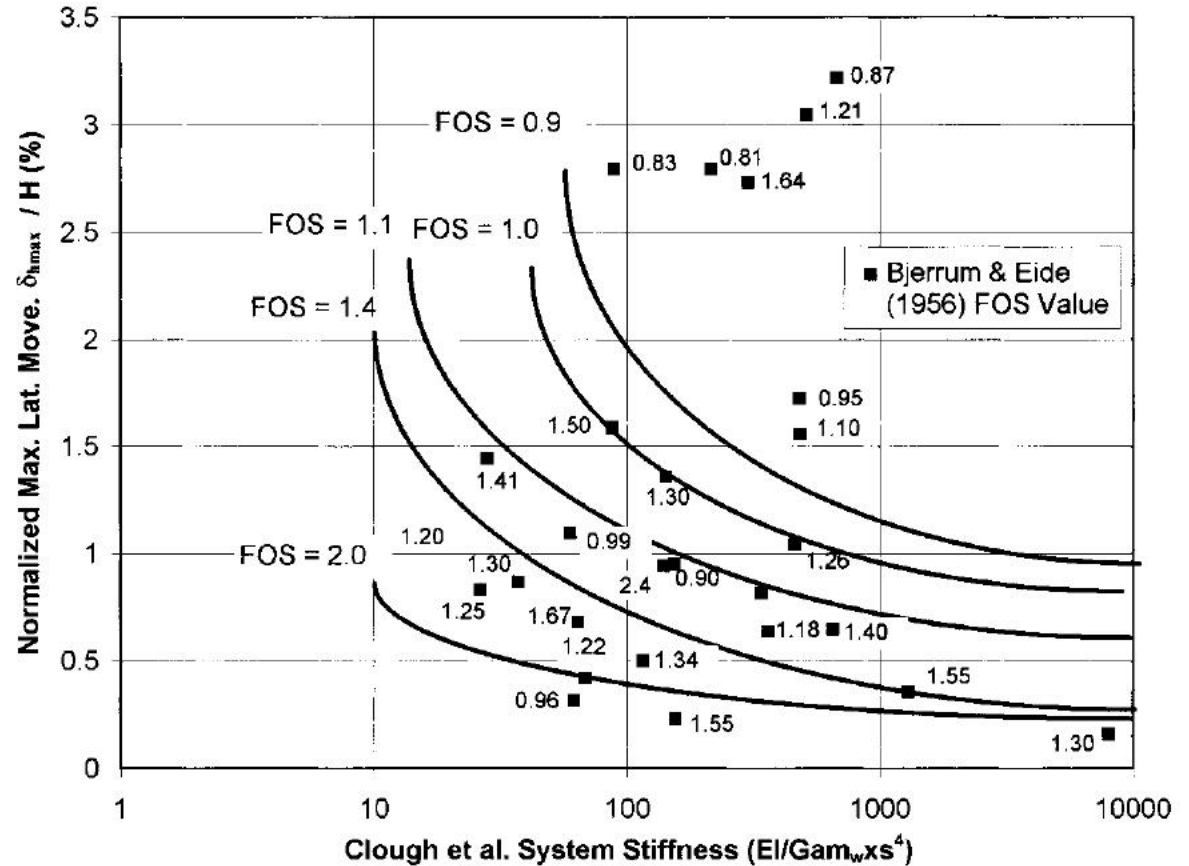
Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos

- Recopilación de Long (2001). Excavaciones en suelos blandos



$$h > 0.6H$$

Bajo FS



Movimiento lateral máximo

Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos

- Recopilación de Long (2001): causas de excesivos movimientos (respecto a la mayoría de obras en circunstancias similares). 36 casos analizados
 - Excesivos movimientos en situación de voladizo: 12 casos
 - Muro excesivamente flexible: 8 casos
 - Fluencia de anclajes/apuntalamientos: 3 casos
 - Plastificación estructural: 2 casos
 - Entrada de agua: 1 caso
 - Hinca de pilotes: 1 caso
 - Desconocidas: 9 casos

Esquema de la presentación

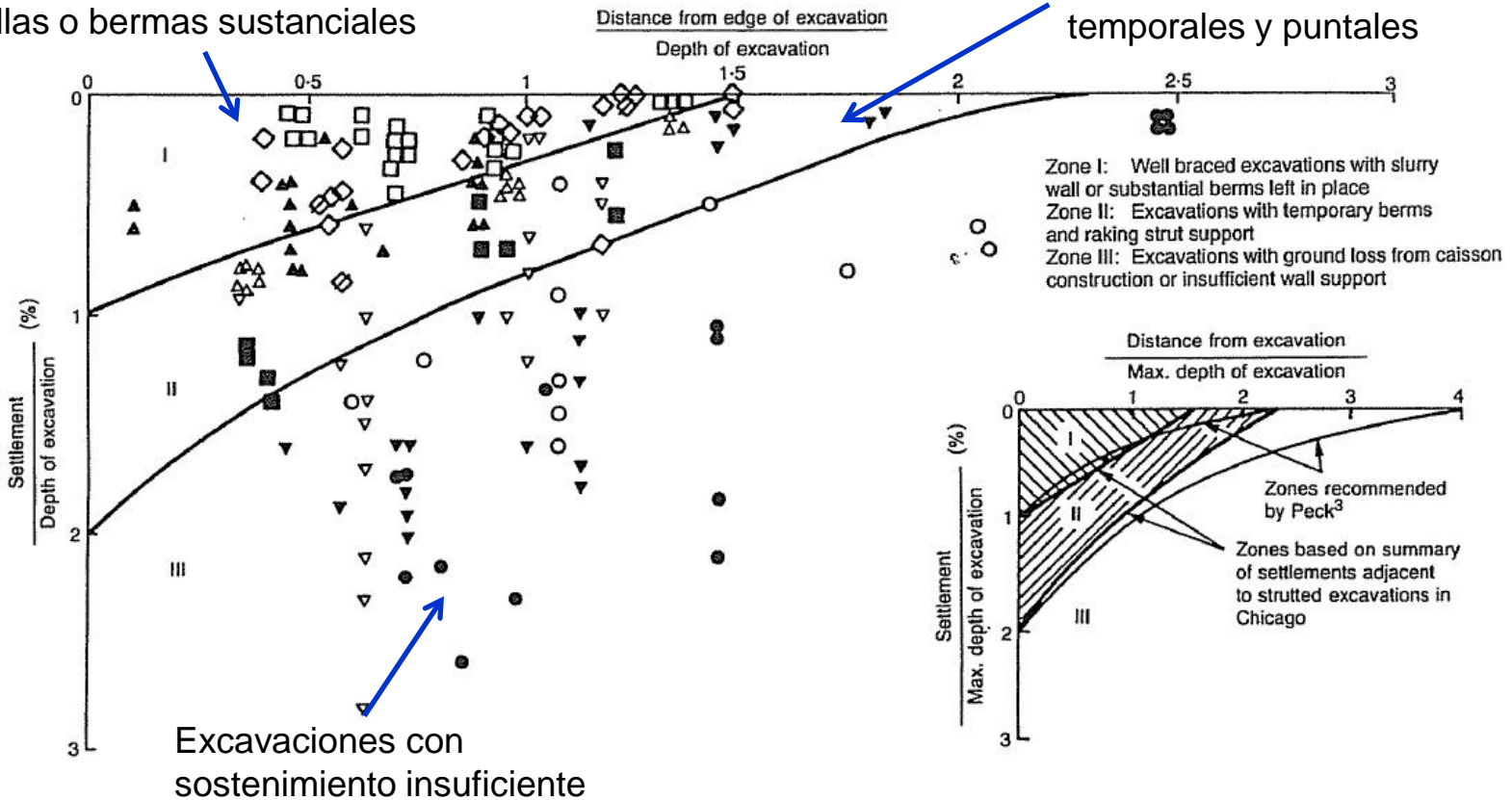
- ❑ Introducción
- ❑ Mecanismos de deformación en excavaciones
- ❑ Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos
 - Movimientos laterales y asientos máximos
 - Distribución de asientos
- ❑ Métodos de cálculo
- ❑ Métodos de control y reducción de movimientos
- ❑ Un ejemplo de mitigación de movimientos
- ❑ Conclusiones

Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos

○ Curvas derivadas de excavaciones con tablestacas o muro berlinés

Excavaciones bien arriostradas con pantallas o bermas sustanciales

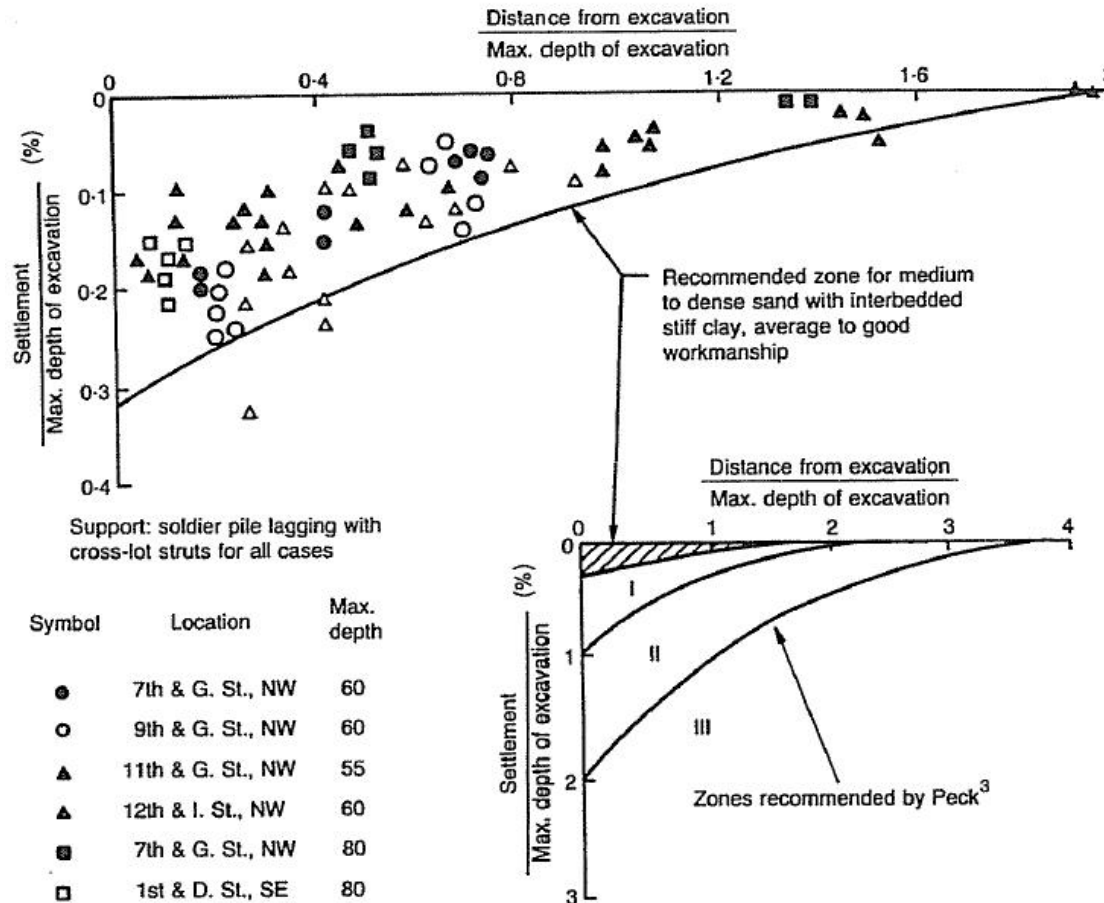
Excavaciones con bermas temporales y puntales



Excavaciones en Chicago (O'Rourke, 1976)

Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos

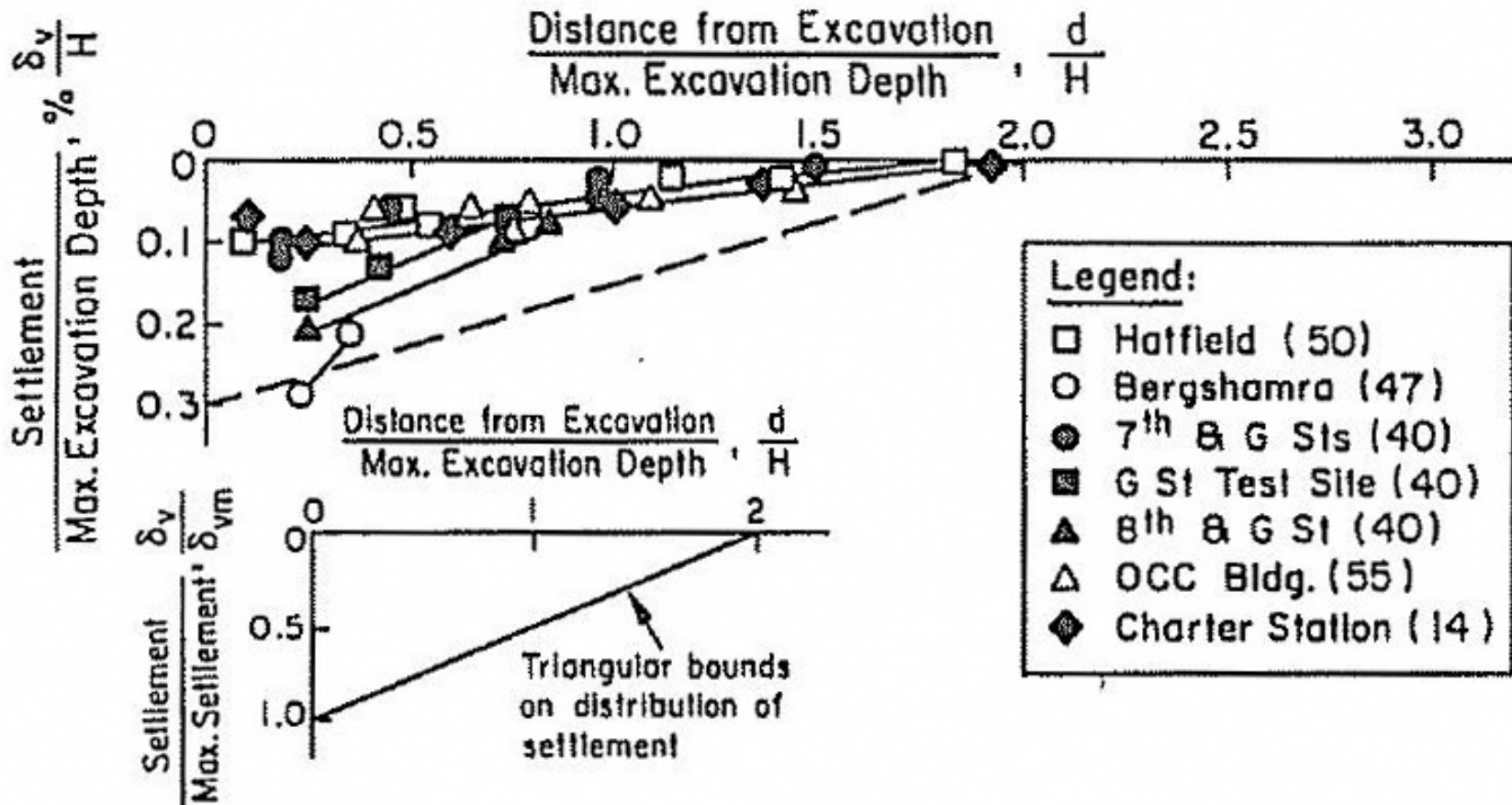
- Curvas derivadas de excavaciones con tablestacas o muro berlinés



Arenas densas y arcillas interestratificadas
Excavaciones en Washington D.C. (O'Rourke, 1976)

Métodos empíricos de evaluación de movimientos

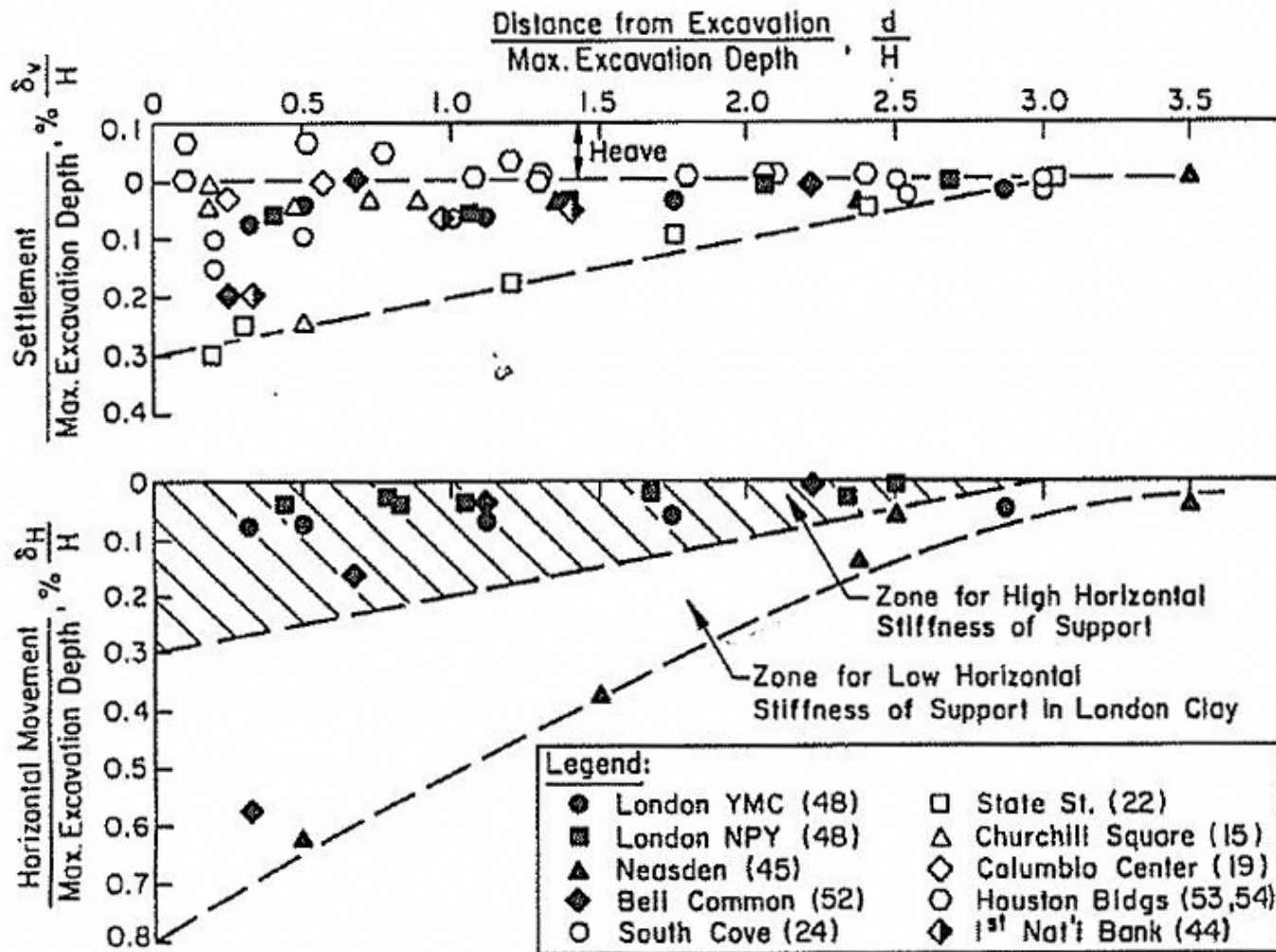
- Distribución de asientos en superficie (Clough & O'Rourke, 1990)



Arenas

Métodos empíricos de evaluación de movimientos

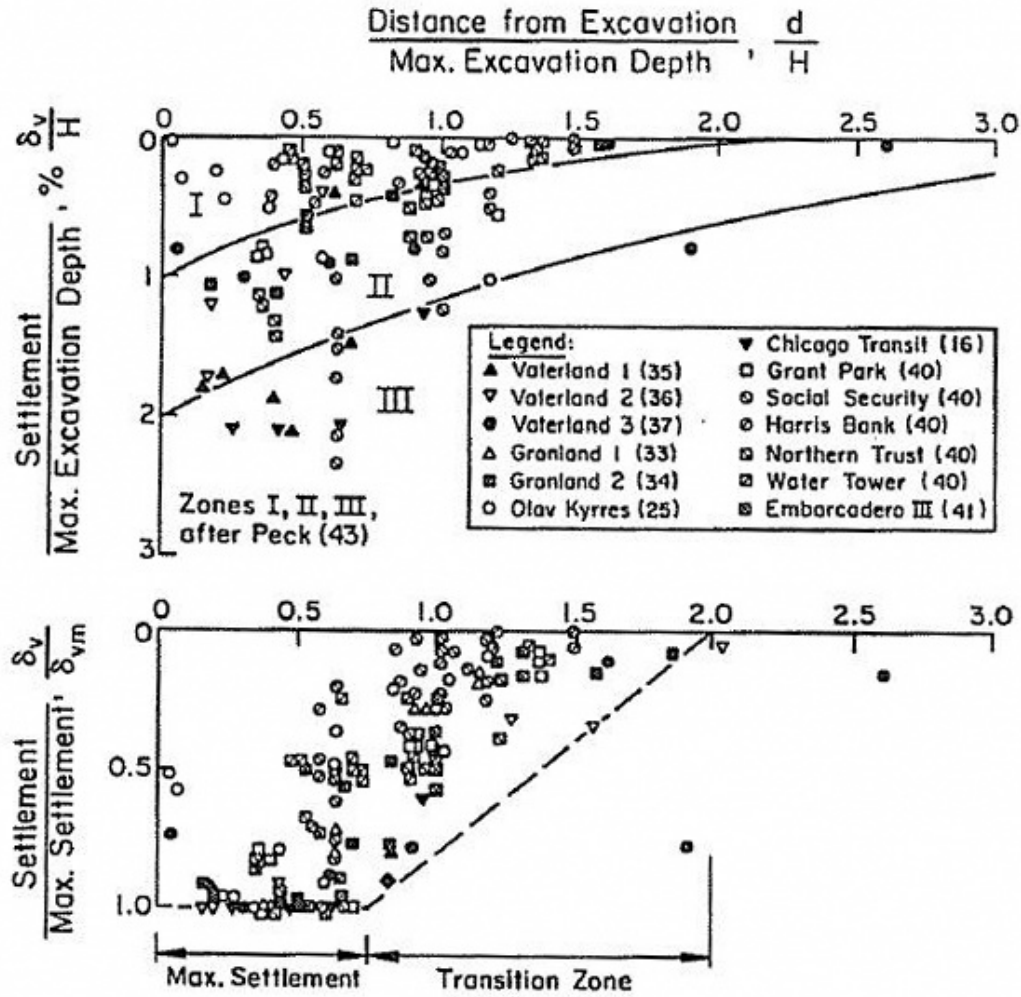
- Distribución de asientos en superficie (Clough & O'Rourke, 1990)



Arcillas rígidas y duras

Métodos empíricos de evaluación de movimientos

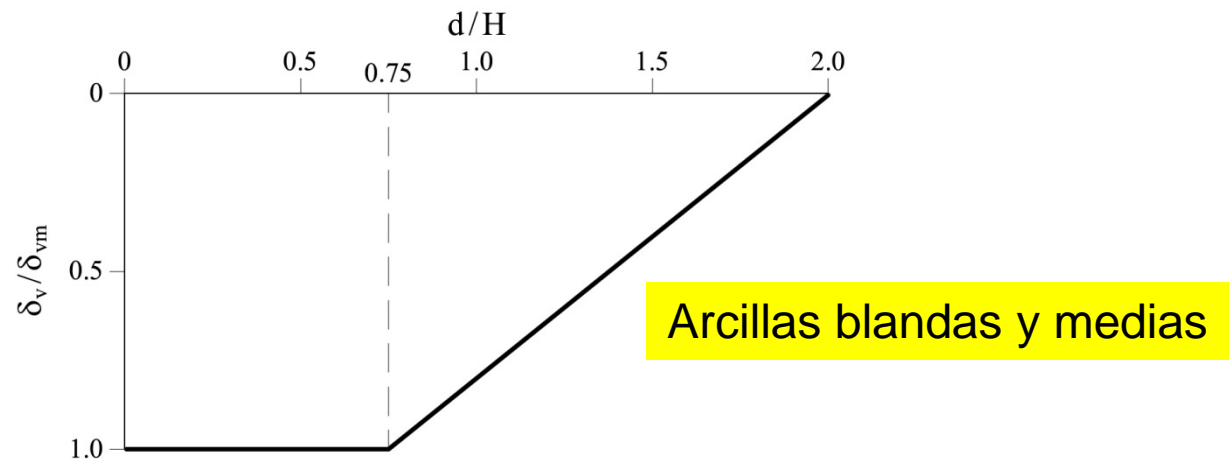
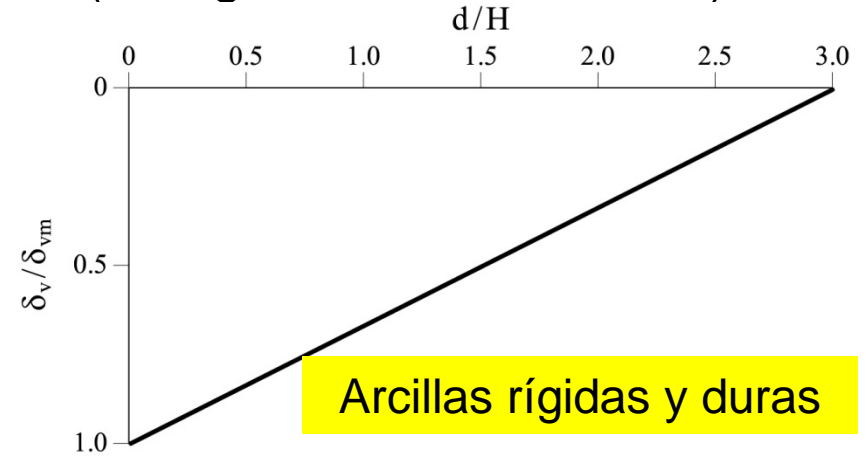
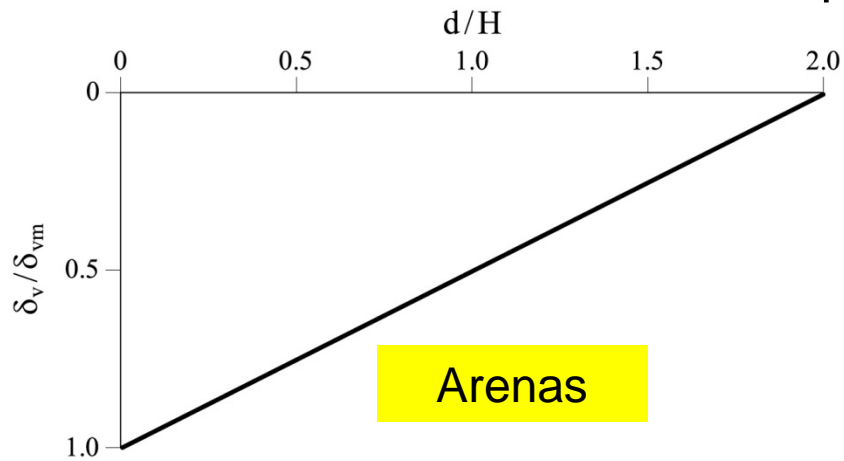
- Distribución de asentamientos en superficie (Clough & O'Rourke, 1990)



Arcillas blandas y medias

Métodos empíricos de evaluación de movimientos

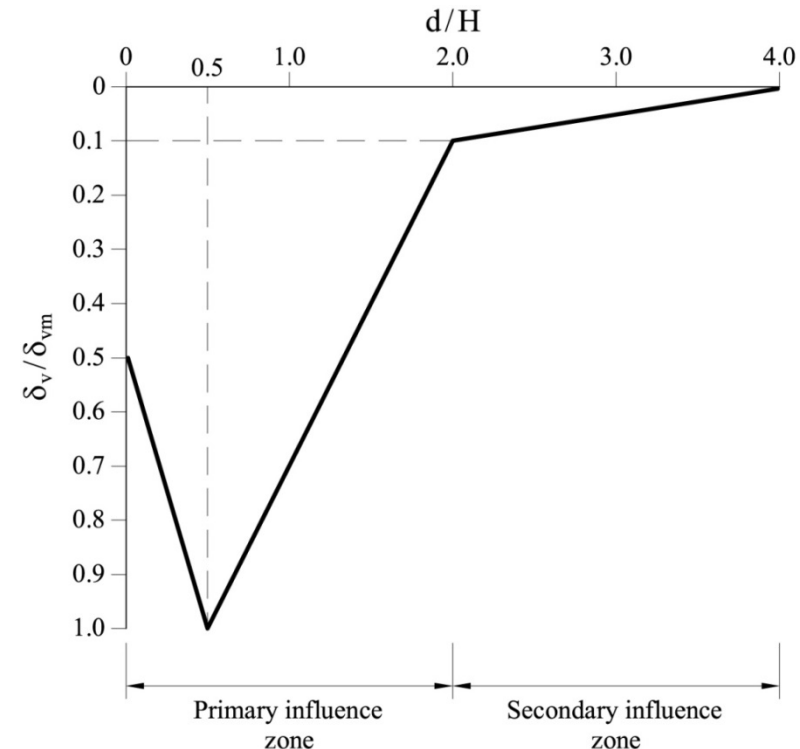
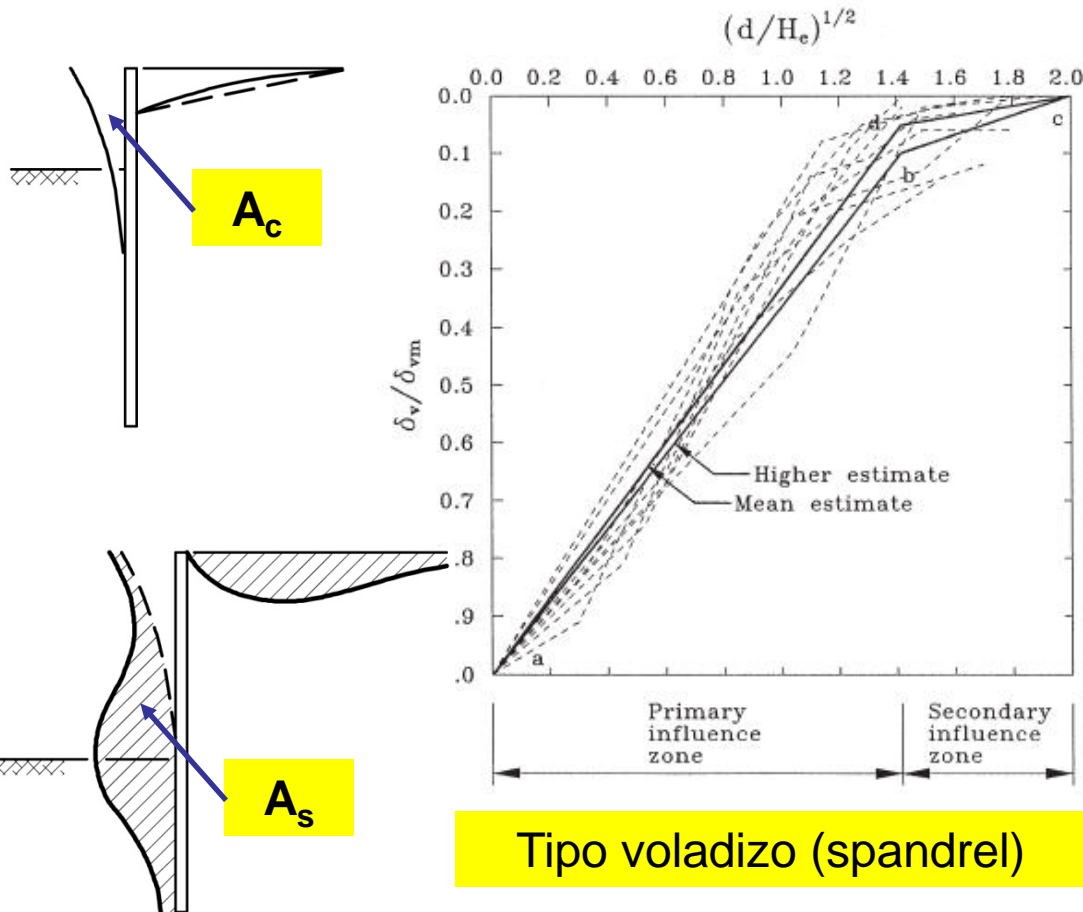
○ Distribución de asentos en superficie (Clough & O'Rourke, 1990)



Métodos empíricos de evaluación de movimientos

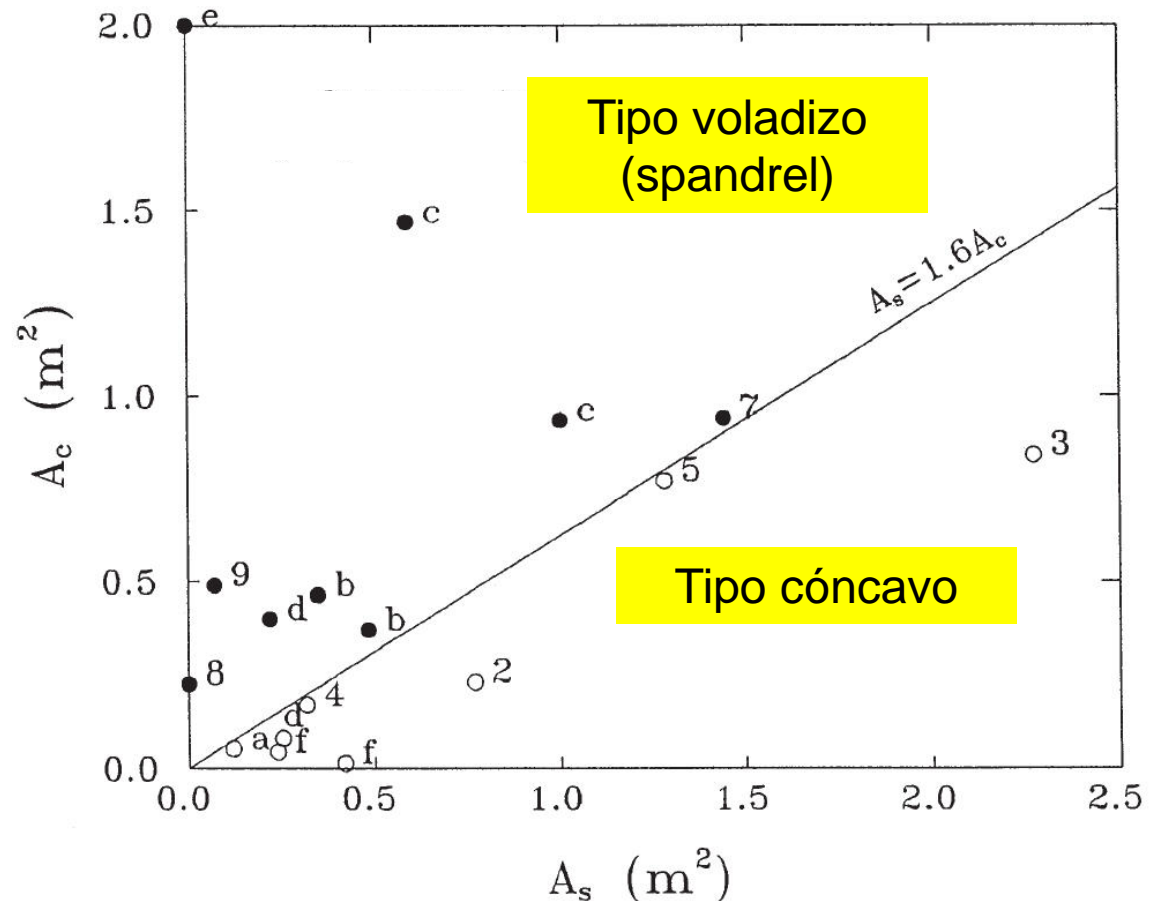
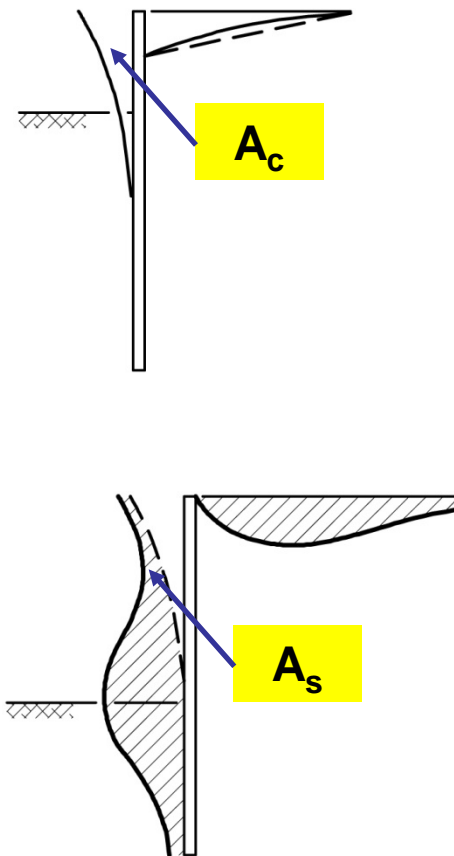
○ Distribución de asientos en superficie (Hsieh and Ou, 1998)

- Sugieren que la forma de la distribución de asientos esta relacionada con el tipo de deformación del muro



Métodos empíricos de evaluación de movimientos

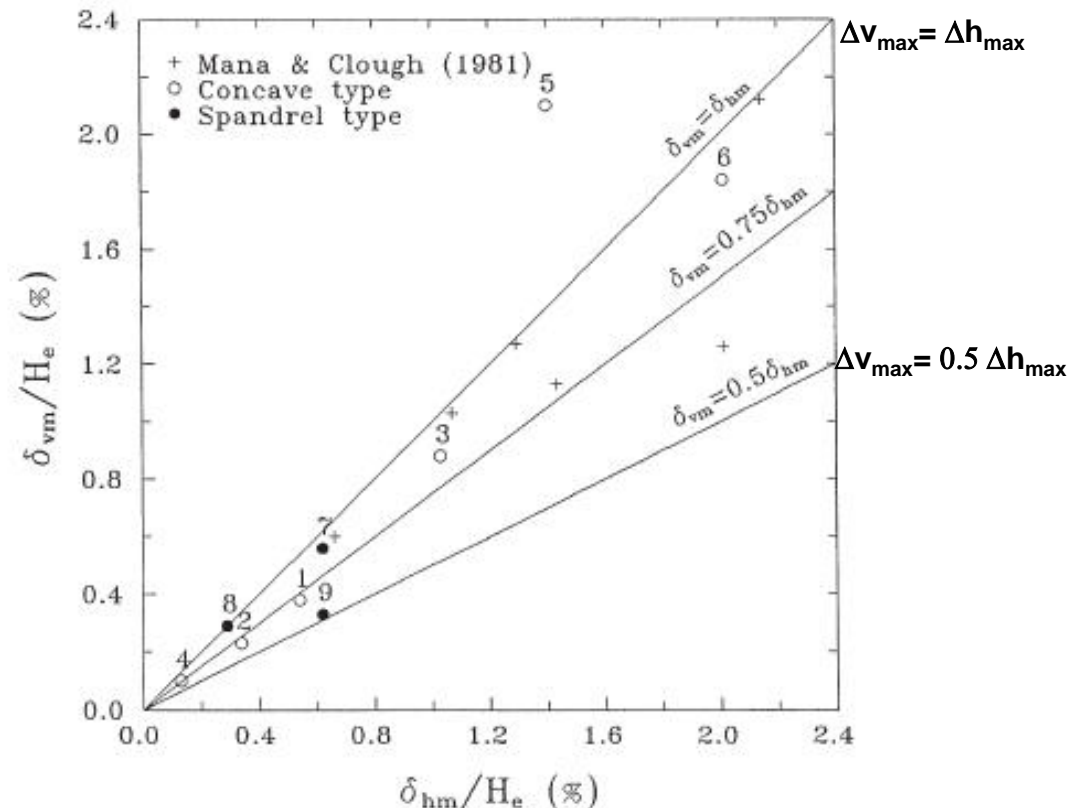
- Distribución de asientos en superficie: procedimiento de predicción (Hsieh and Ou, 1998)
 - (1) Predecir el máximo movimiento lateral del muro (métodos numéricos o procedimientos empíricos)
 - (2) Determinar el tipo de asiento predominante (voladizo o cóncavo)



Métodos empíricos de evaluación de movimientos

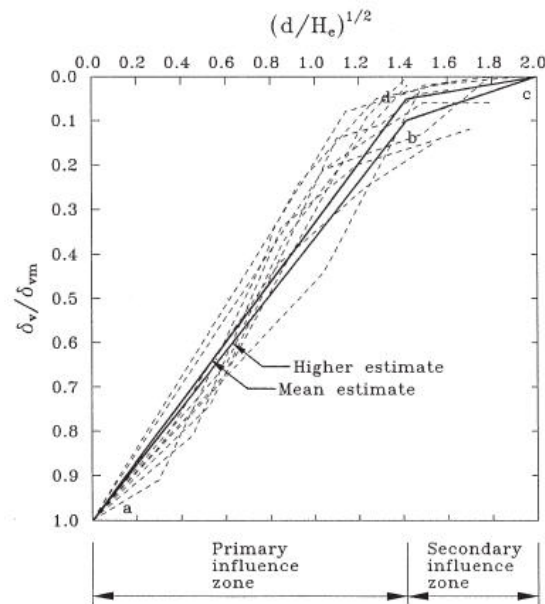
- Distribución de asientos en superficie: procedimiento de predicción (Hsieh and Ou, 1998)
 - (1) Predecir el máximo movimiento lateral del muro (métodos numéricos o procedimientos empíricos)
 - (2) Determinar el tipo de asiento predominante (voladizo o cóncavo)
 - (3) Estimar el asiento máximo en superficie (relación $\delta_{vm} - \delta_{hm}$), independiente del tipo de distribución

relación $\delta_{vm} - \delta_{hm}$

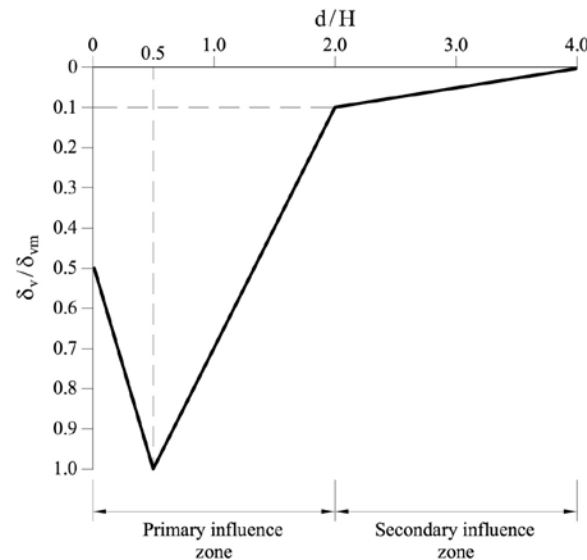


Métodos empíricos de evaluación de movimientos

- Distribución de asientos en superficie: procedimiento de predicción (Hsieh and Ou, 1998)
 - (1) Predecir el máximo movimiento lateral del muro (métodos numéricos o procedimientos empíricos)
 - (2) Determinar el tipo de asiento predominante (voladizo o cóncavo)
 - (3) Estimar el asiento máximo en superficie (relación $\delta_{vm} - \delta_{hm}$)
 - (4) Calcular la distribución de asientos



Tipo voladizo (spandrel)

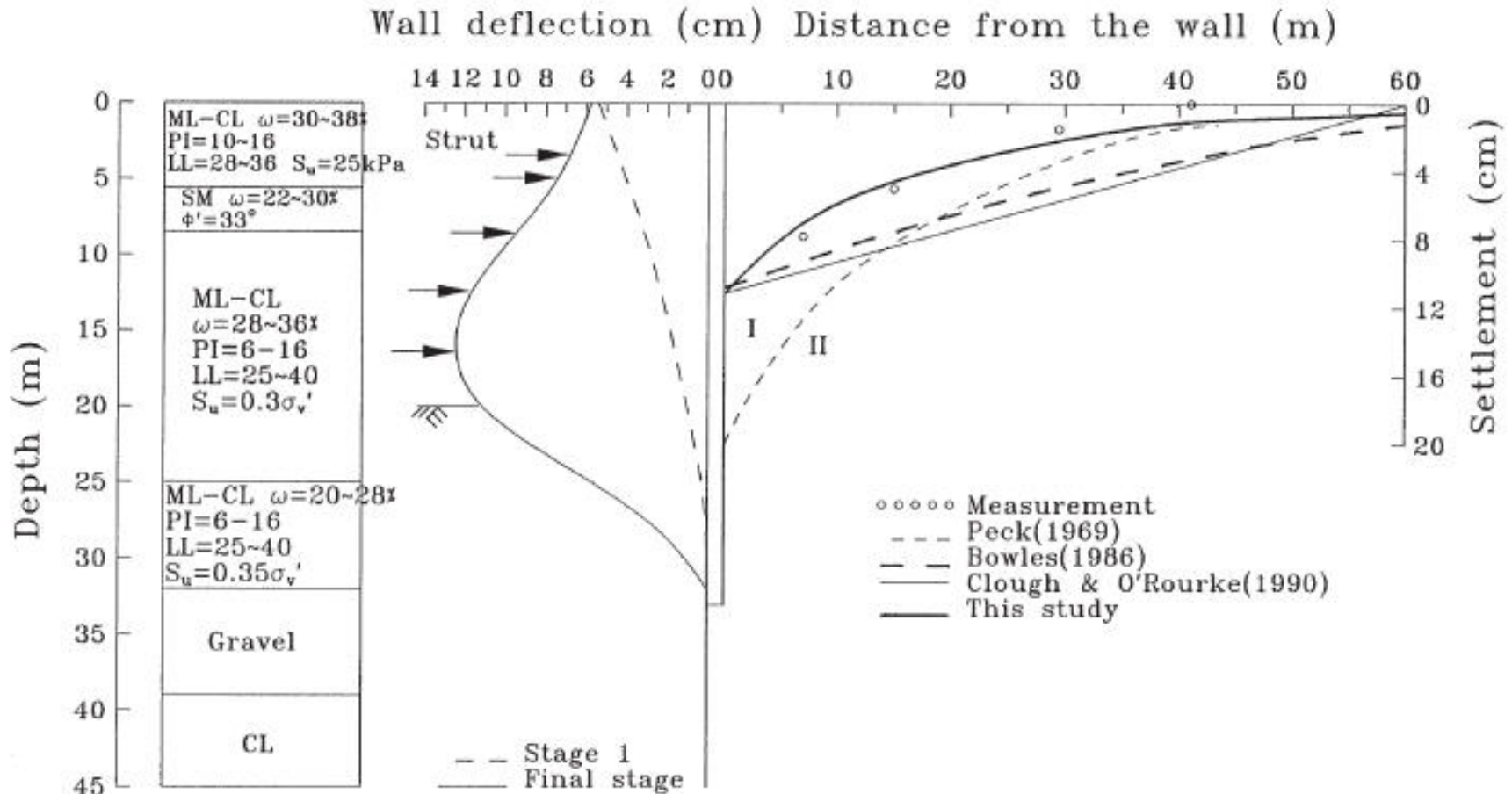


Tipo cóncavo

Métodos empíricos de evaluación de movimientos

○ Distribución de asientos en superficie (Hsieh and Ou, 1998)

- Excavación en arcilla limosa para el Far-East Enterprise Center en Taipei

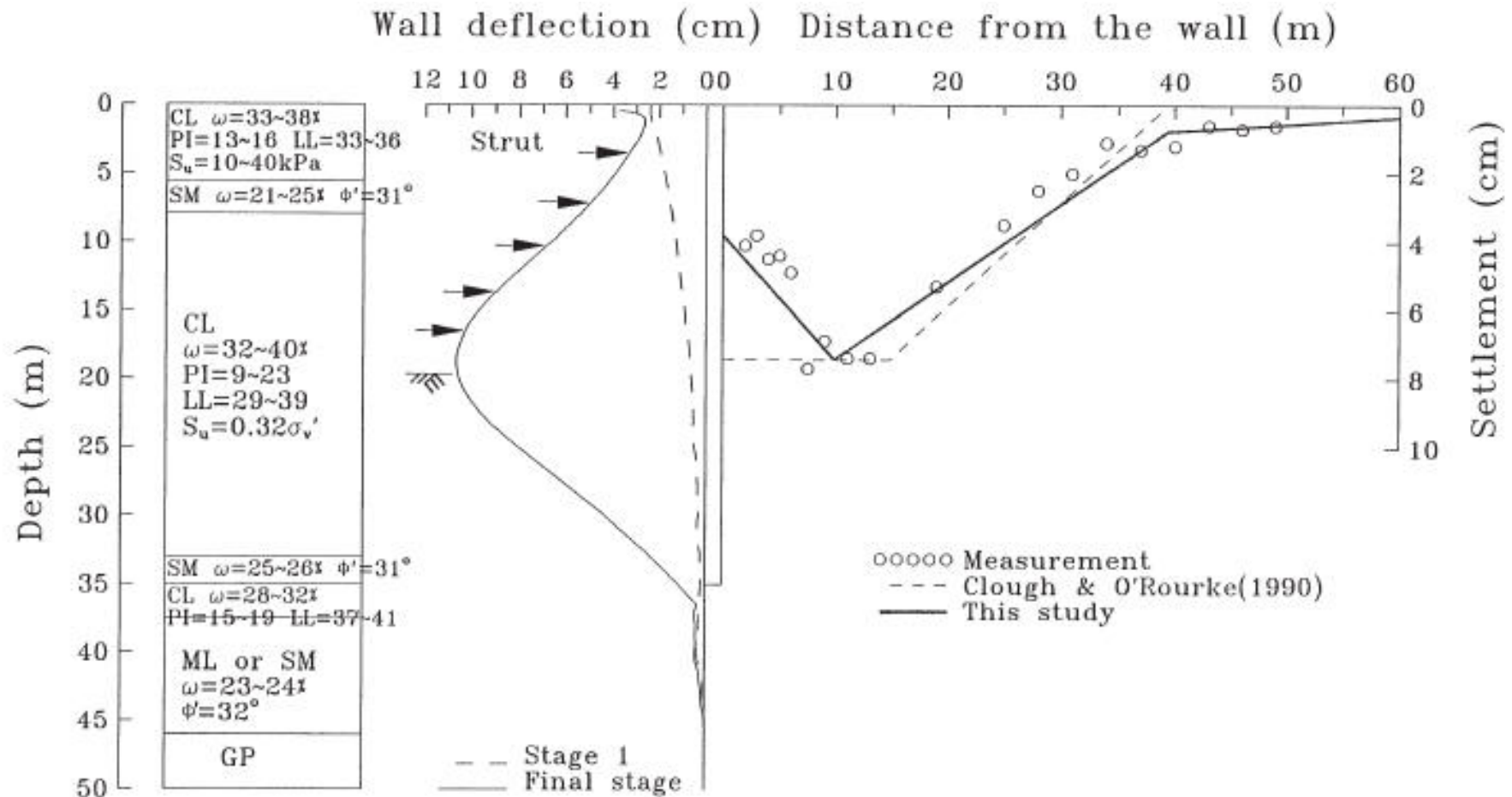


Tipo voladizo (sprandel)

Métodos empíricos de evaluación de movimientos

○ Distribución de asentos en superficie (Hsieh and Ou, 1998)

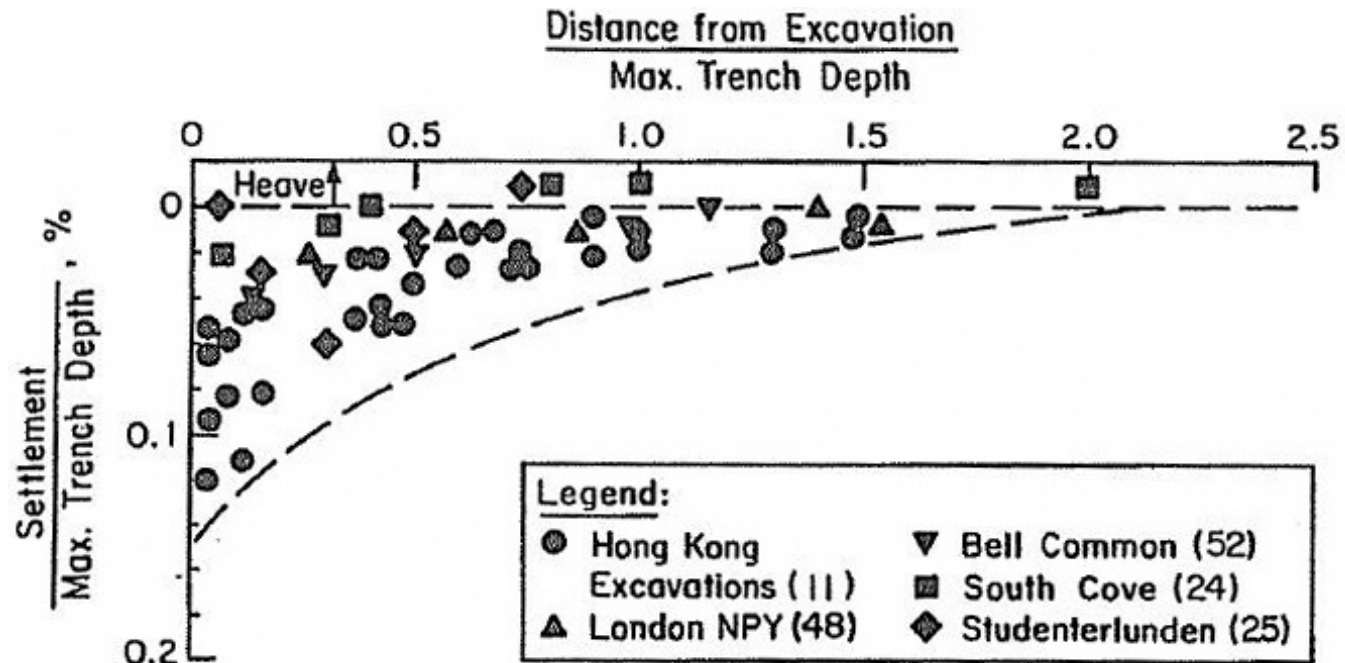
- Excavación en arcilla limosa blanda cerca del centro de la Taipei basin



Tipo cóncavo

Métodos empíricos de evaluación de movimientos

- Asientos causados por la excavación de los elementos de muro pantalla (Clough & O'Rourke, 1990)



- Hong Kong, Charter Station: 50mm de asiento en un módulo de 37m de profundidad
- Normalmente 5-15 mm de asiento en terreno blando

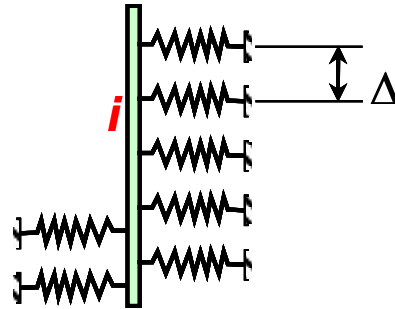
Esquema de la presentación

- ❑ Introducción
- ❑ Mecanismos de deformación en excavaciones
- ❑ Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos
 - Movimientos laterales y asientos máximos
 - Distribución de asientos
- ❑ **Métodos de cálculo**
- ❑ Métodos de control y reducción de movimientos
- ❑ Un ejemplo de mitigación de movimientos
- ❑ Conclusiones

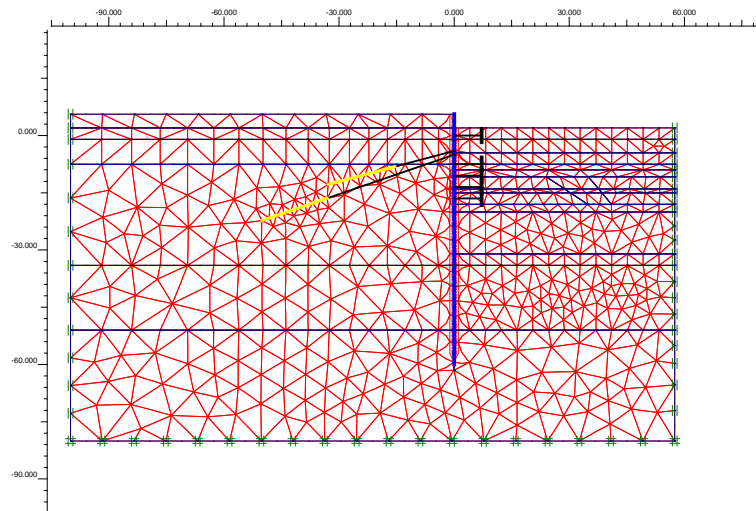
Métodos de cálculo de movimientos

❑ Métodos de cálculo

- Métodos de equilibrio límite (no dan información sobre movimientos)
- Pantallas consideradas como vigas elásticas apoyadas en una serie de muelles (modelo de Winkler): RIDO, PARATIE, WALLOP...



- Simulación del problema por métodos de elementos finitos o diferencias finitas: ABAQUS, FLAC, PLAXIS, MIDAS ... y muchos más



Métodos de cálculo de movimientos

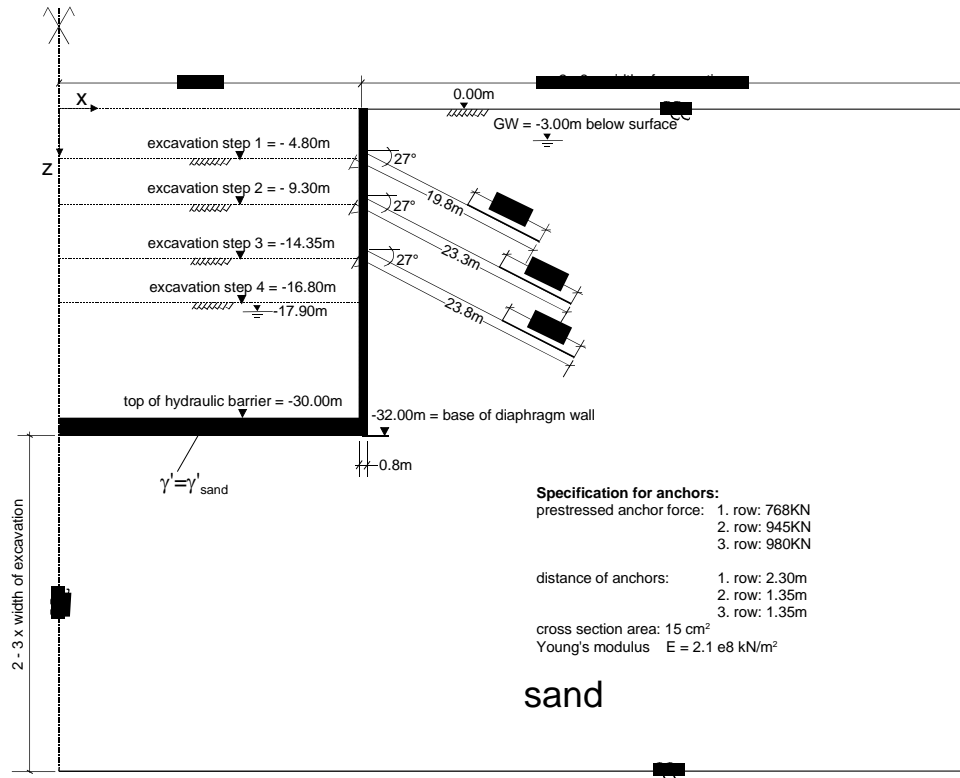
- ❑ Pantallas consideradas como vigas apoyadas en muelles
 - Relativamente simples, requieren un número limitado de hipótesis y decisiones
 - Existe una amplia experiencia de uso práctico
 - Permite introducir un cierto grado de no linealidad
 - El coeficiente de balasto (parámetro fundamental en este tipo de cálculo) es un parámetro con graves limitaciones
 - No consideran el problema de forma global
 - Se obtienen los desplazamientos horizontales de la pantalla, los movimientos del terreno deben calcularse de forma separada

Métodos de cálculo de movimientos

- ❑ Métodos de elementos finitos / diferencias finitas
 - Más complejos, requieren un mayor número de hipótesis / decisiones (modelo constitutivo, tipo de análisis, tensiones iniciales, condiciones de contorno...)
 - Algunos modelos requieren un nivel de información no siempre disponible
 - Permiten considerar todo el problema de una forma conjunta, contribuye notablemente a la comprensión de los mecanismos de deformación y resistencia
 - Proporcionan una información completa sobre tensiones, deformaciones, desplazamientos
 - Aunque existe menos experiencia de uso en la práctica, progresivamente está sustituyendo a los métodos más simplificados y la diferencia está desapareciendo
 - Validación / calibración con medidas reales son esenciales

Métodos de cálculo de movimientos

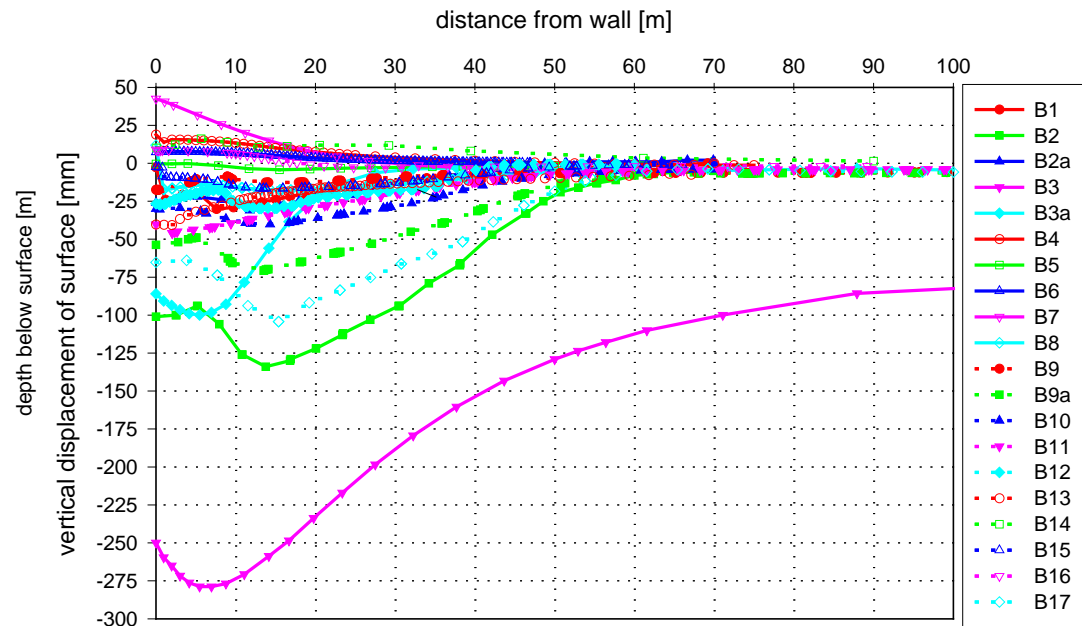
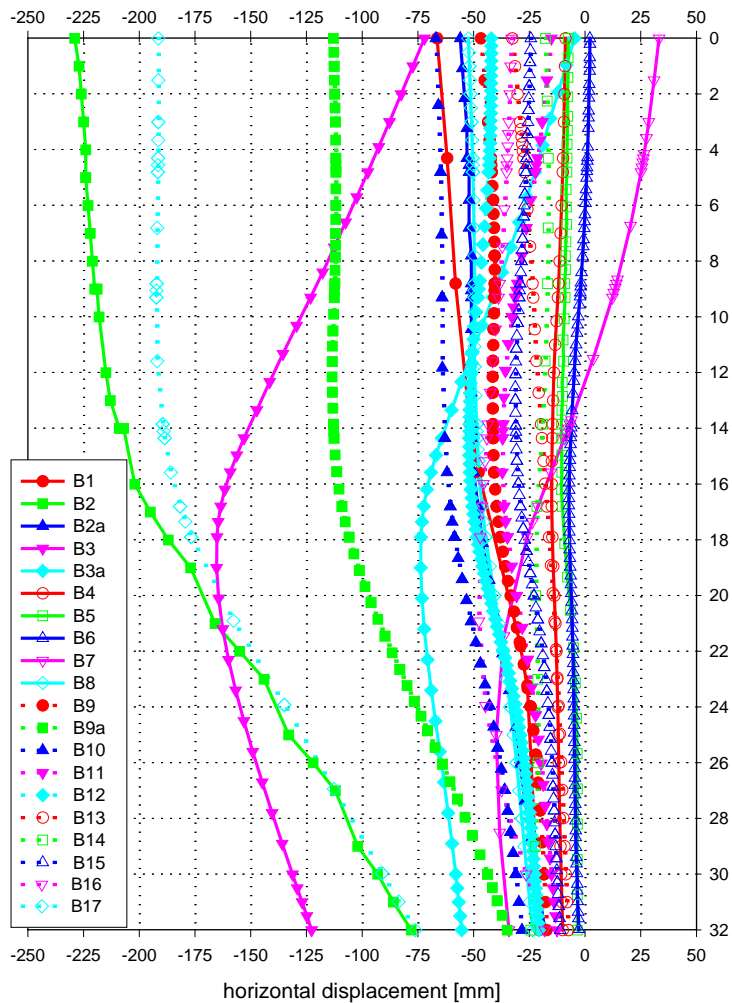
- ❑ Benchmark para un cálculo con elementos finitos (Schweiger, 2006)



- 17 participantes
 - tamaño del dominio
 - elementos estructurales, interfaces
 - modelos constitutivos: Mohr-Coulomb, elastoplásticos no lineales, hipoplásticos
- parámetros de resistencia similares, mayor diferencia en los parámetros de deformabilidad

Métodos de cálculo de movimientos

□ Benchmark (Schweiger, 2006)

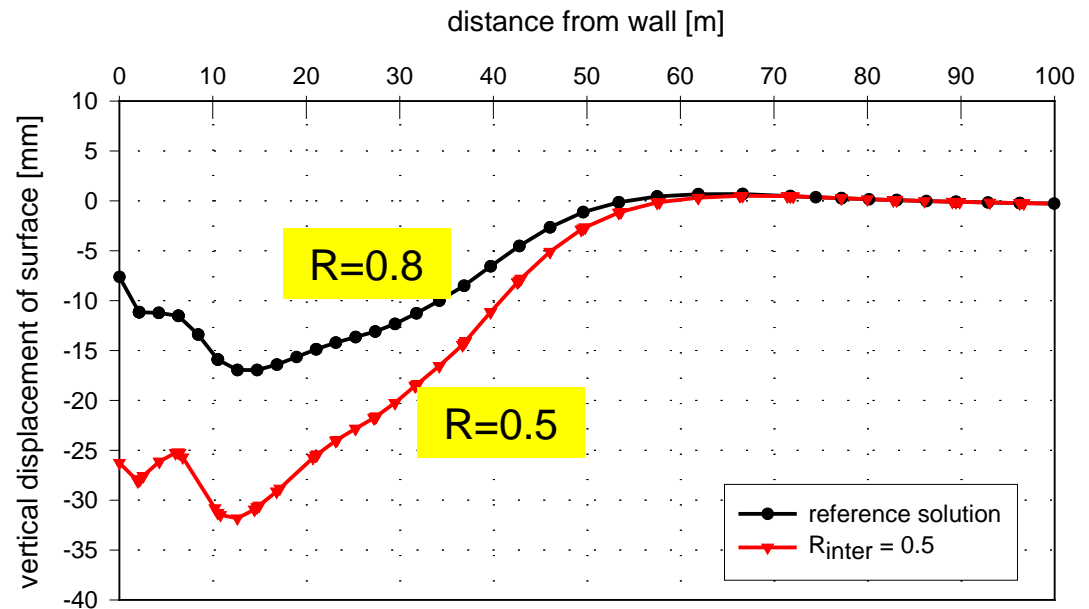
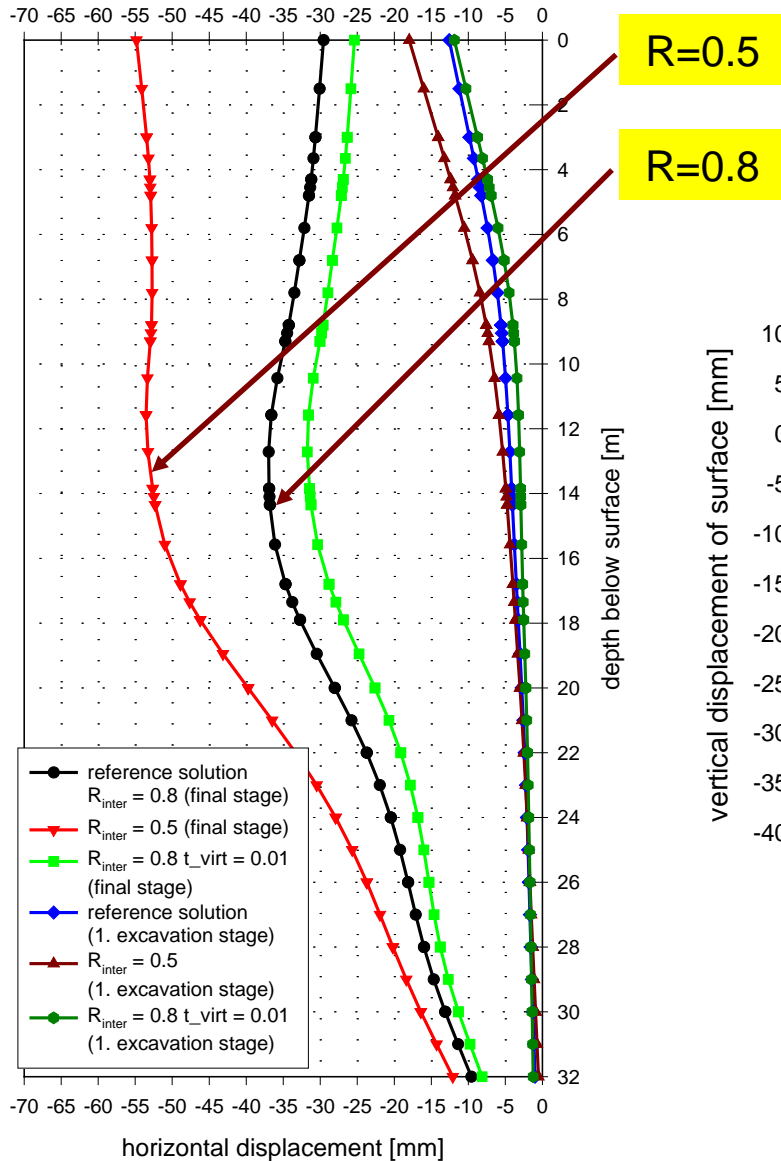


Asientos en superficie

Movimientos horizontales del muro pantalla

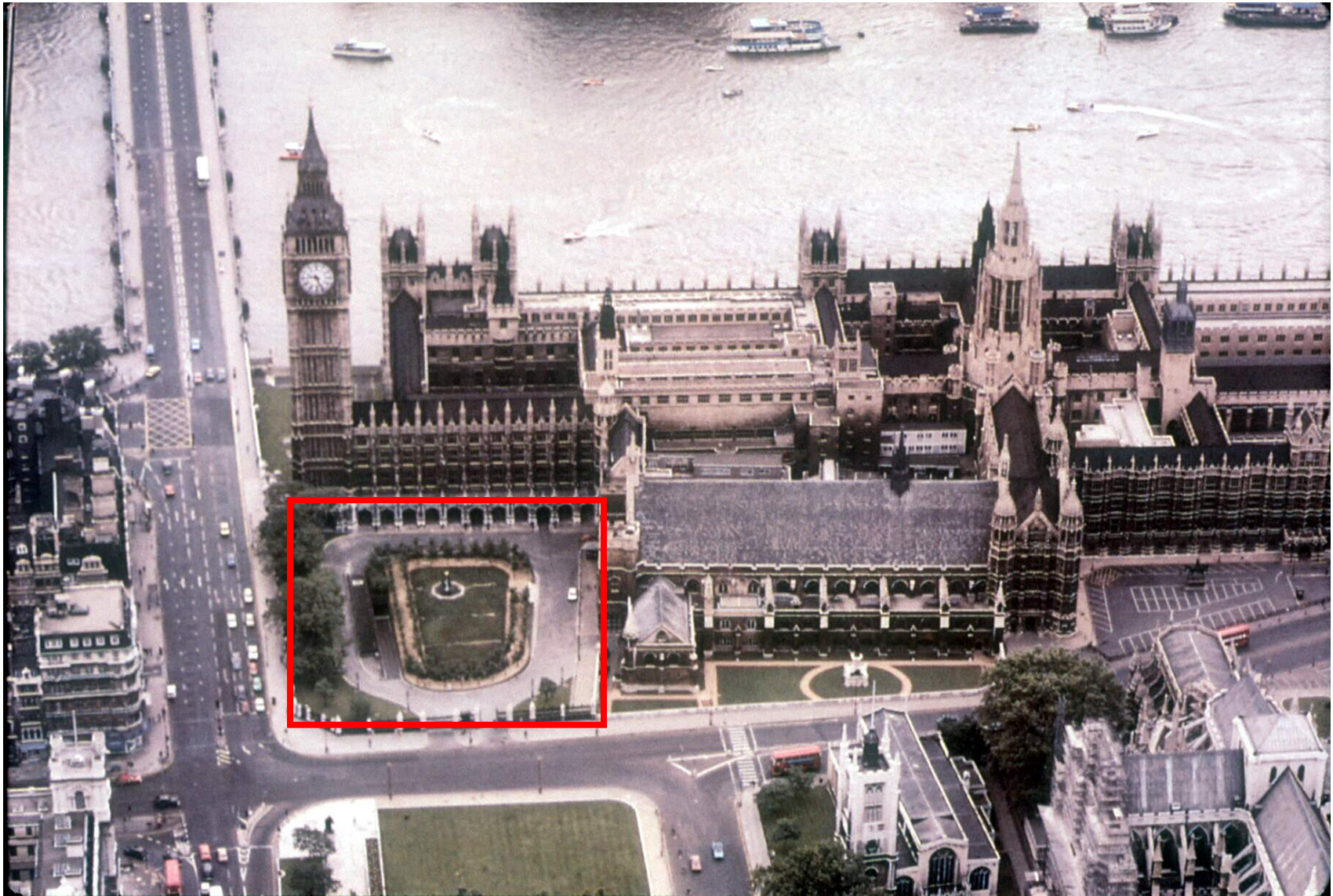
Métodos de cálculo de movimientos

□ Efecto de la fricción suelo/muro pantalla



y el modelo constitutivo?

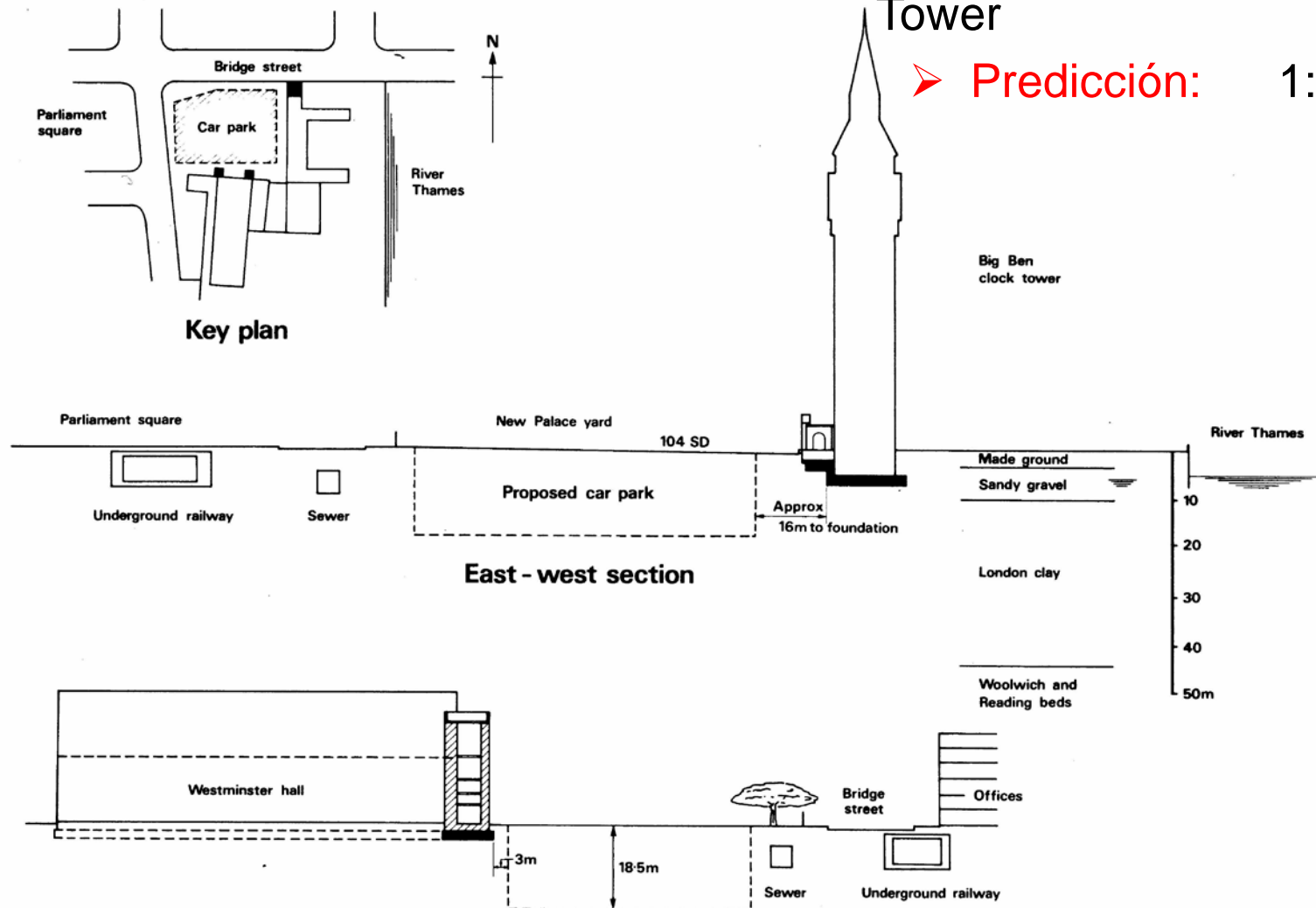
Métodos de cálculo de movimientos



Palacio de Wesminster, Londres

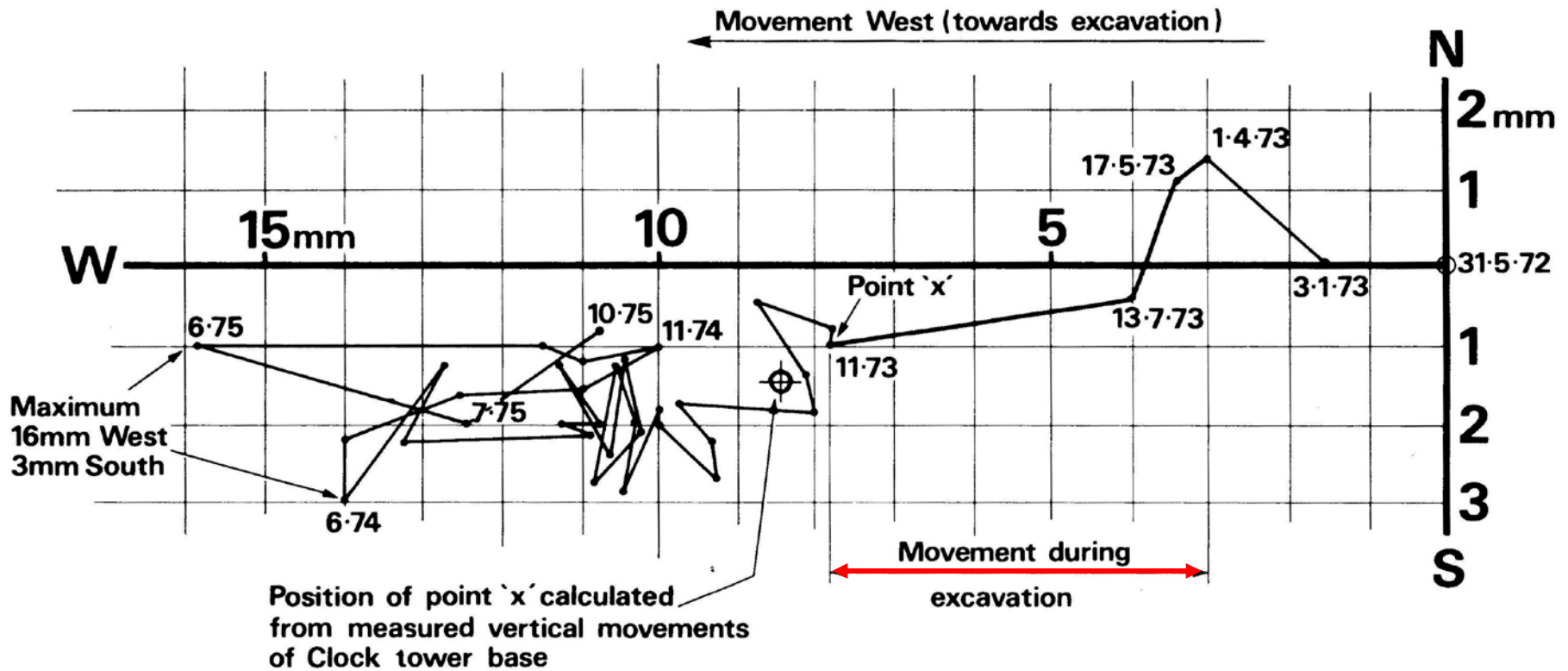
Métodos de cálculo de movimientos

- Inclinación de la Clock Tower
- Predicción: 1:8000



Palacio de Wesminster, Londres

Métodos de cálculo de movimientos

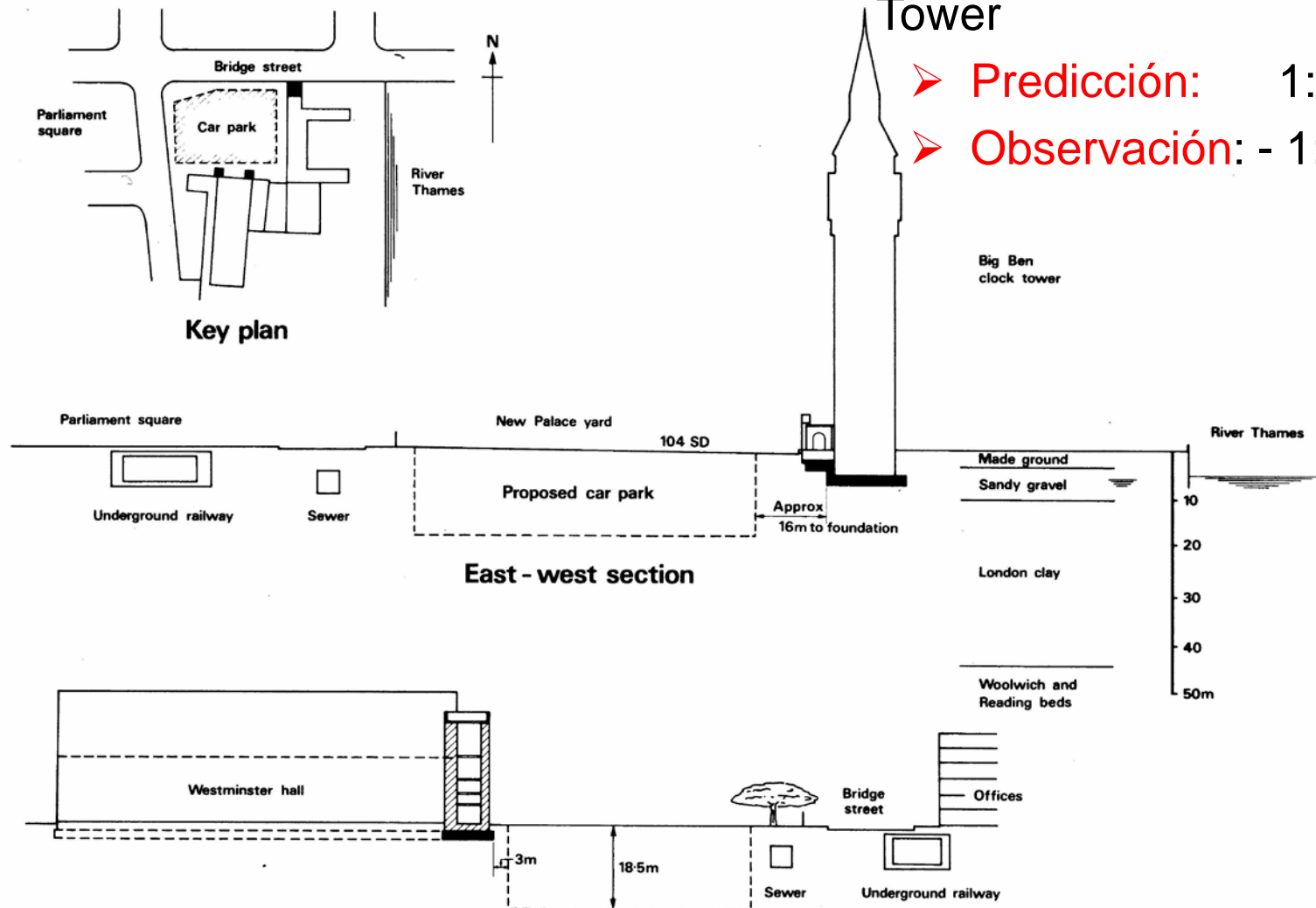


Movimientos de la Clock Tower

Métodos de cálculo de movimientos

○ Inclinación de la Clock Tower

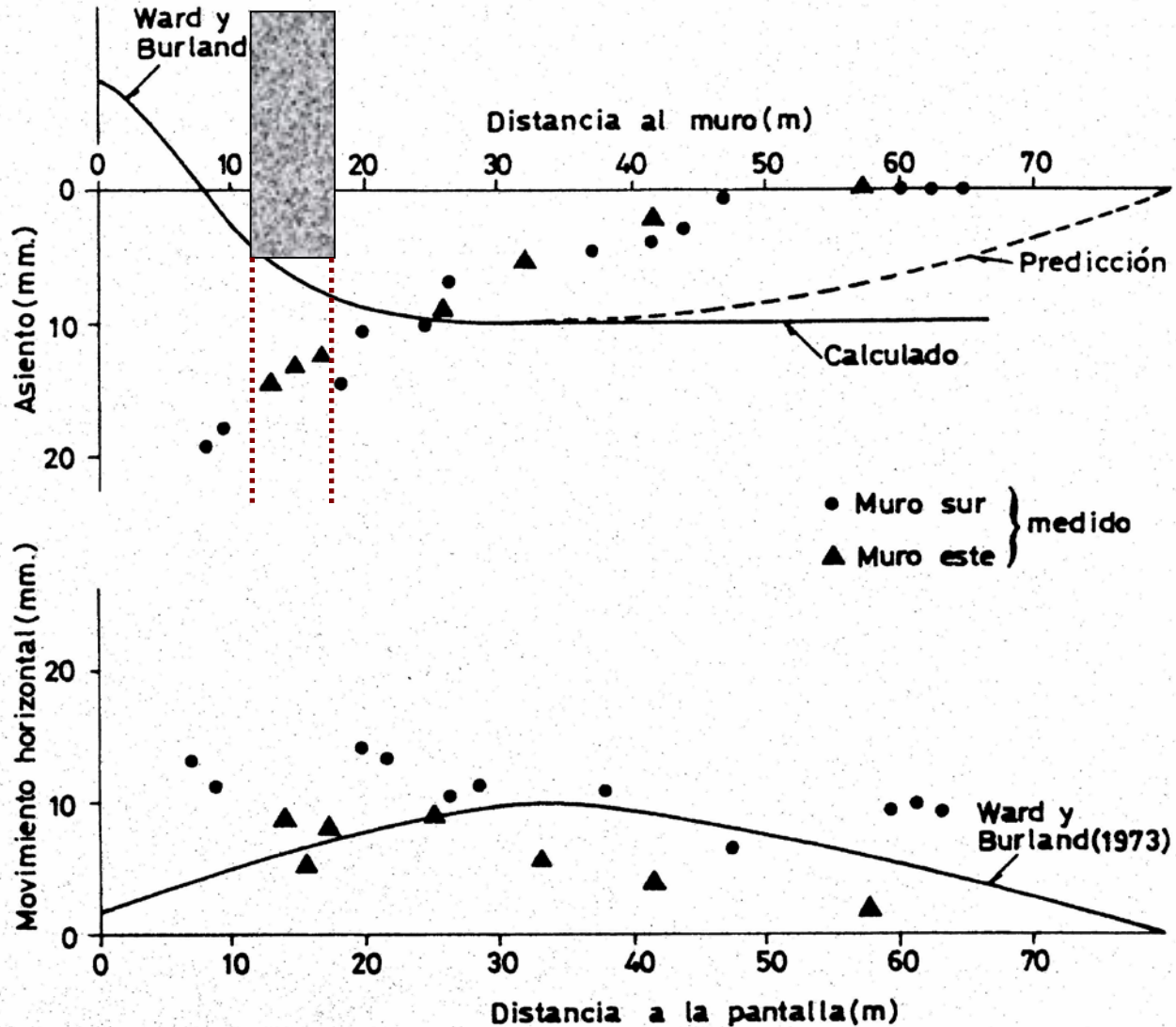
- Predicción: 1:8000
- Observación: - 1:8600



Palacio de Wesminster, Londres

Métodos de cálculo de movimientos

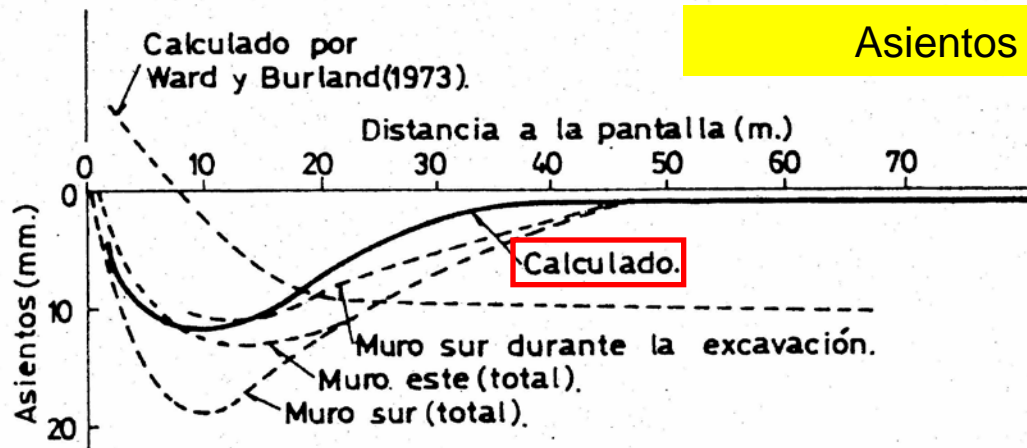
Modelo constitutivo: Elasticidad lineal



Desplazamientos verticales y horizontales

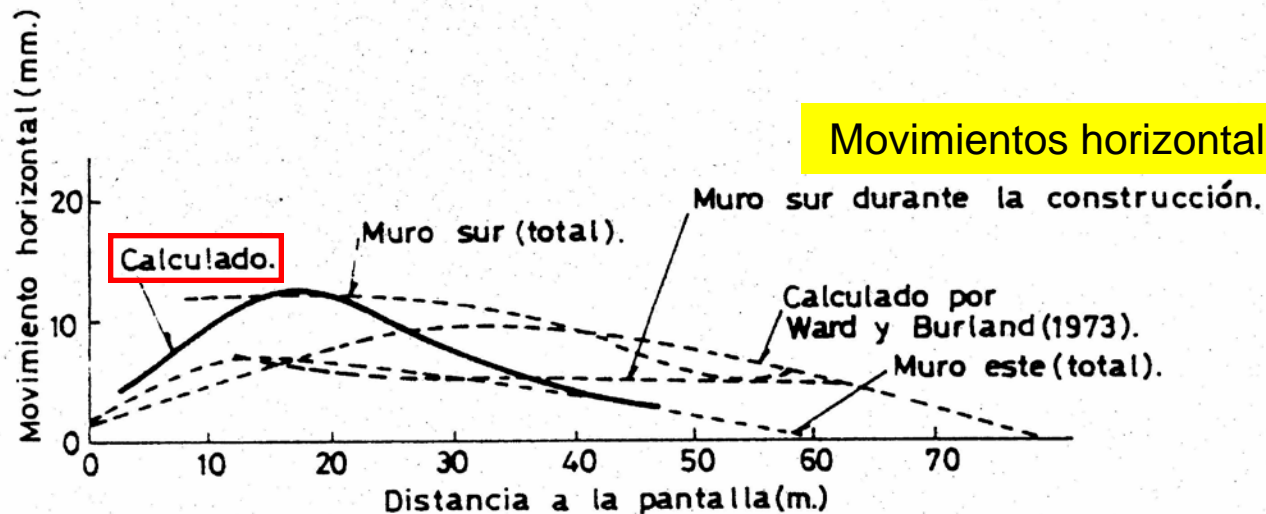
Métodos de cálculo de movimientos

❑ Uso de un modelo constitutivo no lineal



(a)

Movimientos de la superficie del terreno



(b)

Métodos de cálculo de movimientos

ESTUDIO (Schweiger, priv. comm.)

Objetivos del estudio: mostrar la influencia del modelo constitutivo para distintos tipos de terreno

> mostrar tendencias y comportamiento cualitativo en preferencia a comparaciones cuantitativas

Modelos constitutivos

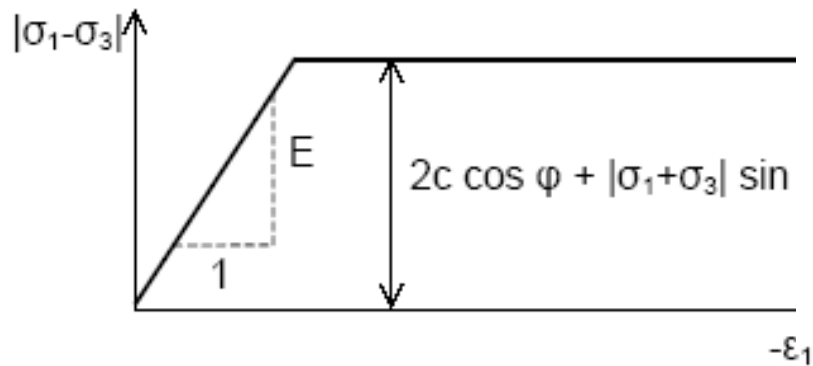
- Mohr-Coulomb
- Hardening Soil
- HS_small
- Soft Soil (solo casos en arcilla)
- Modified Cam Clay (solo casos en arcilla)

Resultados

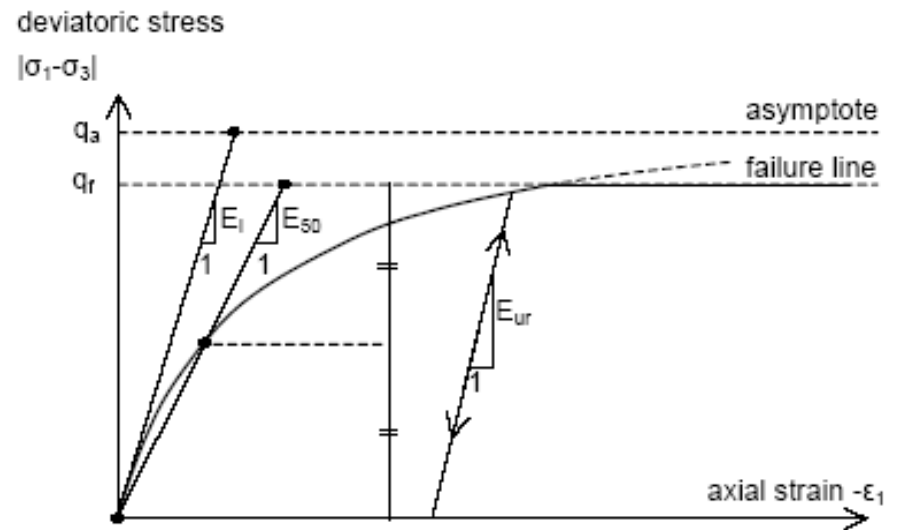
- Deformación del muro
- Momentos flectores/cargas del arriostamiento
- Distribución de empujes del terreno (activos - pasivos)
- Asientos en el trasdós del muro

Métodos de cálculo de movimientos

□ Efecto del modelo constitutivo



Mohr-Coulomb

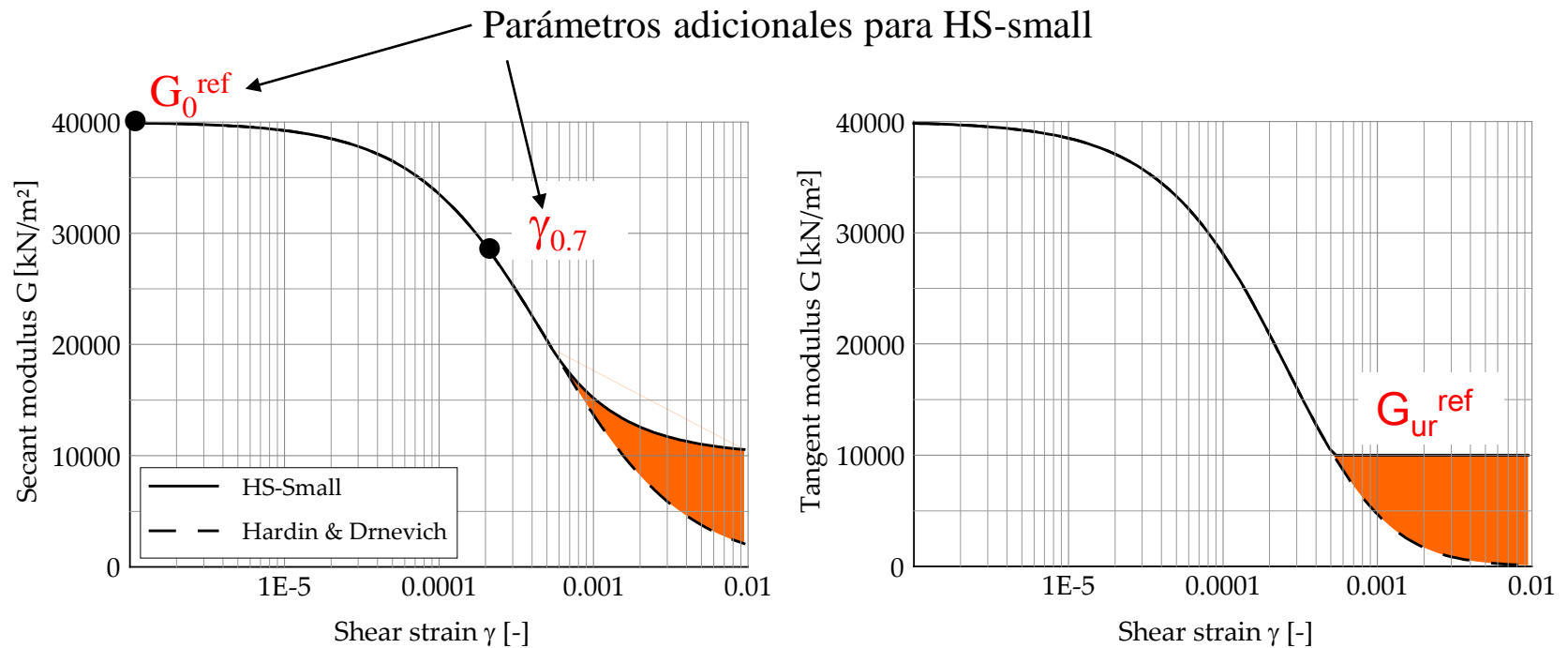


Hardening Soil

Métodos de cálculo de movimientos

□ Efecto del modelo constitutivo

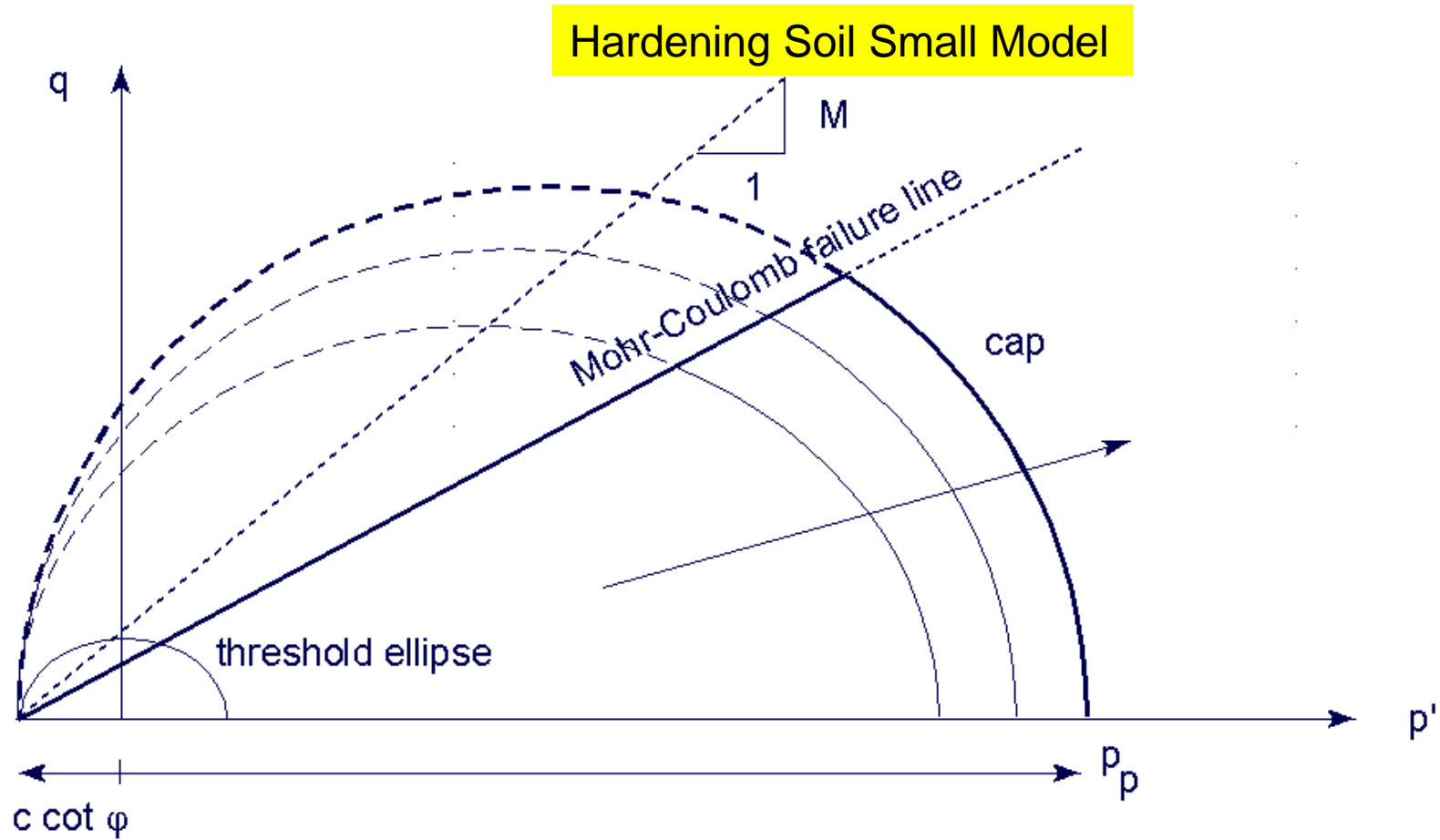
Hardening Soil Small Model



Thomas Benz, *Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences*,
Mitteilung 55 des Instituts für Geotechnik, Universität Stuttgart, 2007.

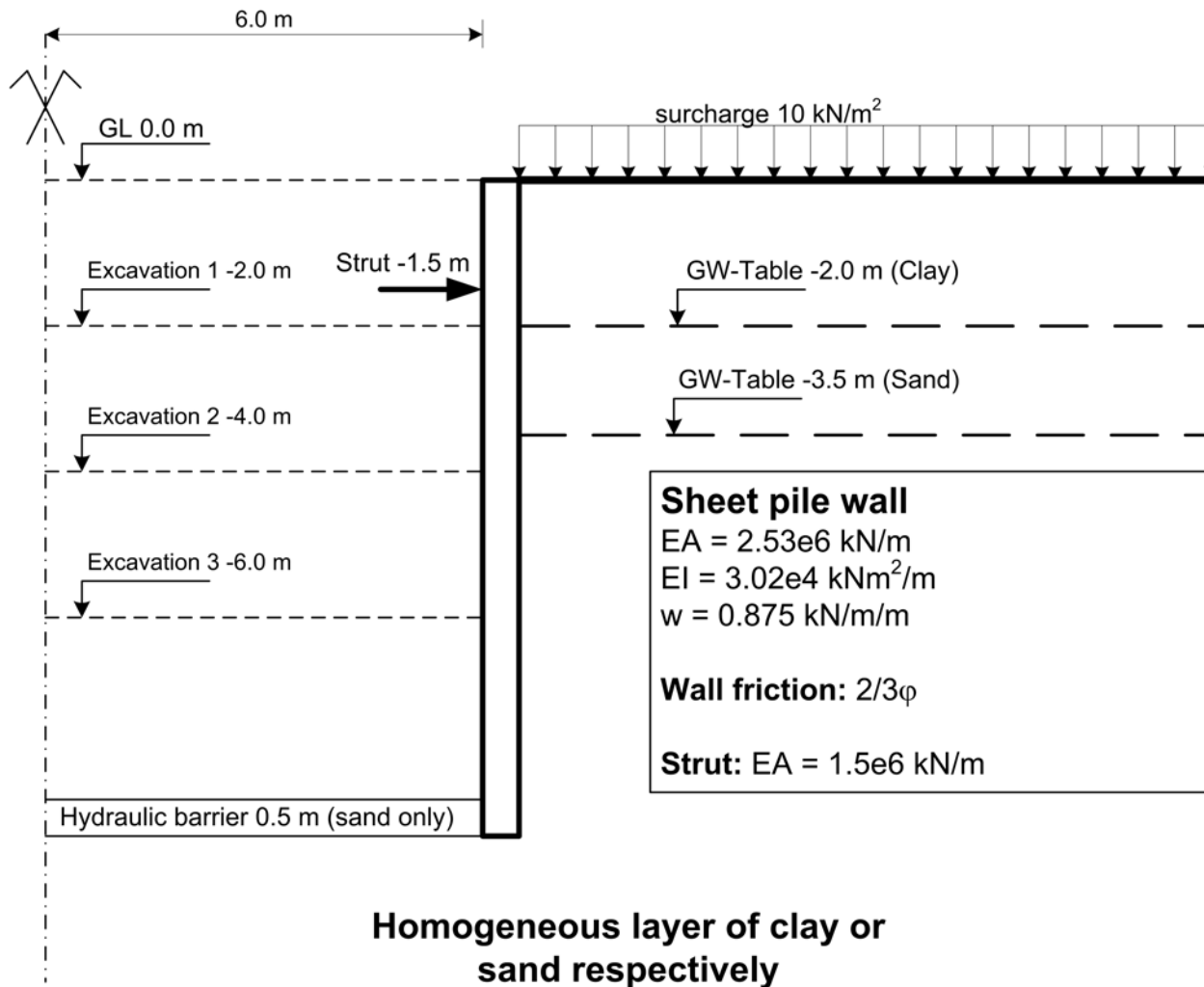
Métodos de cálculo de movimientos

Soft Soil Model



Métodos de cálculo de movimientos

Definición del problema



Longitud del muro:

Arena densa: 9 m

Arena suelta a media: 10 m

Arcilla: 11 m

Métodos de cálculo de movimientos

ARENA DENSA

Parámetros para el Hardening Soil model (HS)

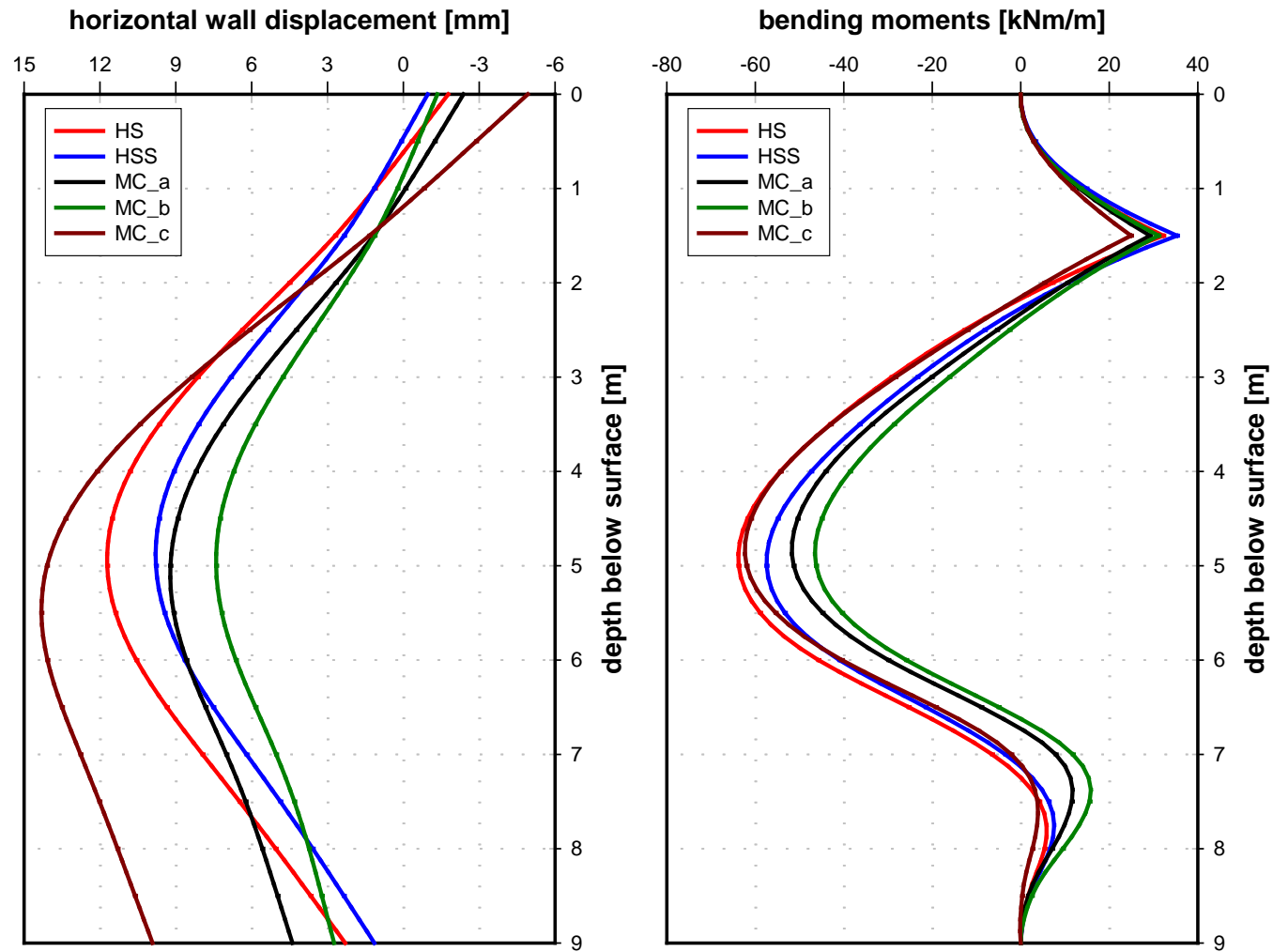
Parameter		Meaning	Value
γ	[kN/m ³]	Unit weight (unsaturated)	18
γ_{sat}	[kN/m ³]	Unit weight (saturated)	20
φ'	[°]	Friction angle (Mohr-Coulomb)	41
c'	[kPa]	Cohesion (Mohr-Coulomb)	0
ψ	[°]	Angle of dilatancy	15
ν_{ur}	[-]	Poisson's ratio unloading-reloading	0.20
E_{50}^{ref}	[kPa]	Secant modulus for primary triaxial loading	30 000
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	[kPa]	Tangent modulus for oedometric loading	30 000
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	[kPa]	Secant modulus for un- and reloading	90 000
m	[-]	Exponent of the Ohde/Janbu law	0.55
p_{ref}	[kPa]	Reference stress for the stiffness parameters	100
K_0^{nc}	[-]	Coefficient of earth pressure at rest (NC)	$1 - \sin(\varphi')$
σ_{Tension}	[kPa]	Tensile strength	0

Parámetros adicionales para el Hardening Soil Small model (HSS)

Parameter		Meaning	Value
G_0	[kPa]	Small-strain Shear modulus	112 500
$\gamma_{0.7}$	[-]	Reference shear strain where $G_{\text{sec}}=0.7G_0$	0.0002

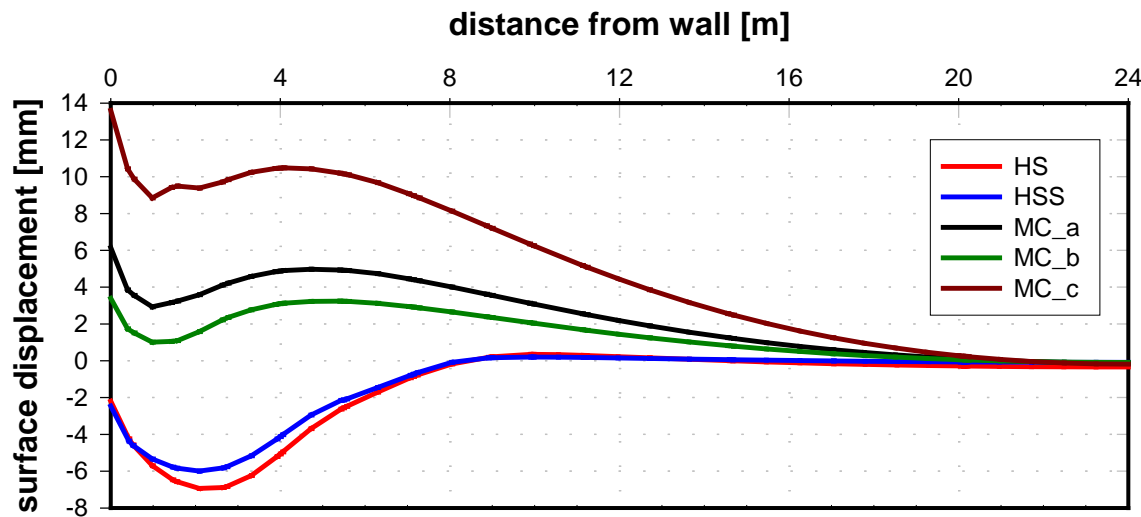
Métodos de cálculo de movimientos

ARENA DENSA



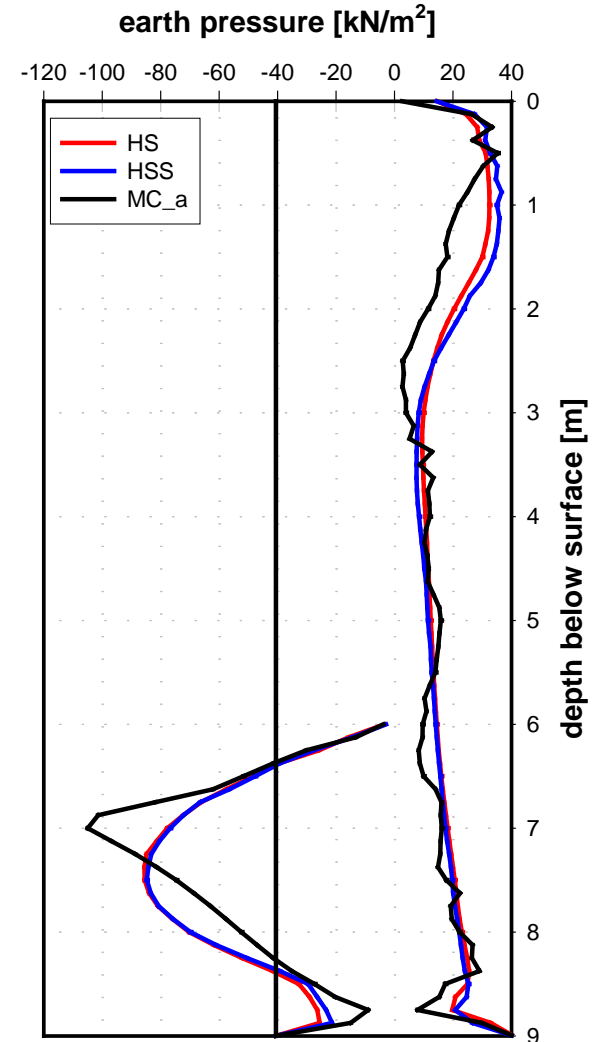
Métodos de cálculo de movimientos

ARENA DENSA



Fuerzas en el arriostramiento:

HS:	-102 kN/m
HSS:	-107 kN/m
MC_a:	-78 kN/m
MC_b:	-83 kN/m
MC_c:	-72 kN/m



Métodos de cálculo de movimientos

ARCILLA

Parámetros para el Hardening Soil model (HS)

Parameter	Meaning	Value
γ	[kN/m ³] Unit weight (unsaturated)	15
γ_r	[kN/m ³] Unit weight (saturated)	16
φ'	[°] Friction angle (Mohr-Coulomb)	27
c'	[kPa] Cohesion (Mohr-Coulomb)	15
ψ	[°] Angle of dilatancy	0
ν_{ur}	[-] Poisson's ratio unloading-reloading	0.20
E_{50}^{ref}	[kPa] Secant modulus for primary triaxial loading	4 300
E_{oed}^{ref}	[kPa] Tangent modulus for oedometric loading	1 800
E_{ur}^{ref}	[kPa] Secant modulus for un- and reloading	14 400
m	[-] Exponent of the Ohde/Janbu law	0.90
p^{ref}	[kPa] Reference stress for the stiffness parameters	100
K_0^{nc}	[-] Coefficient of earth pressure at rest (NC)	$1-\sin(\varphi')$
R_f	[-] Failure ratio	0.90
$\sigma_{Tension}$	[kPa] Tensile strength	0

Parámetros adicionales para el Hardening Soil Small model (HSS)

Parameter	Meaning	Value
G_0	[kPa] Small-strain Shear modulus	25 000
$\gamma_{0,7}$	[-] Reference shear strain where $G_{sec}=0.7G_0$	0.0003

Métodos de cálculo de movimientos

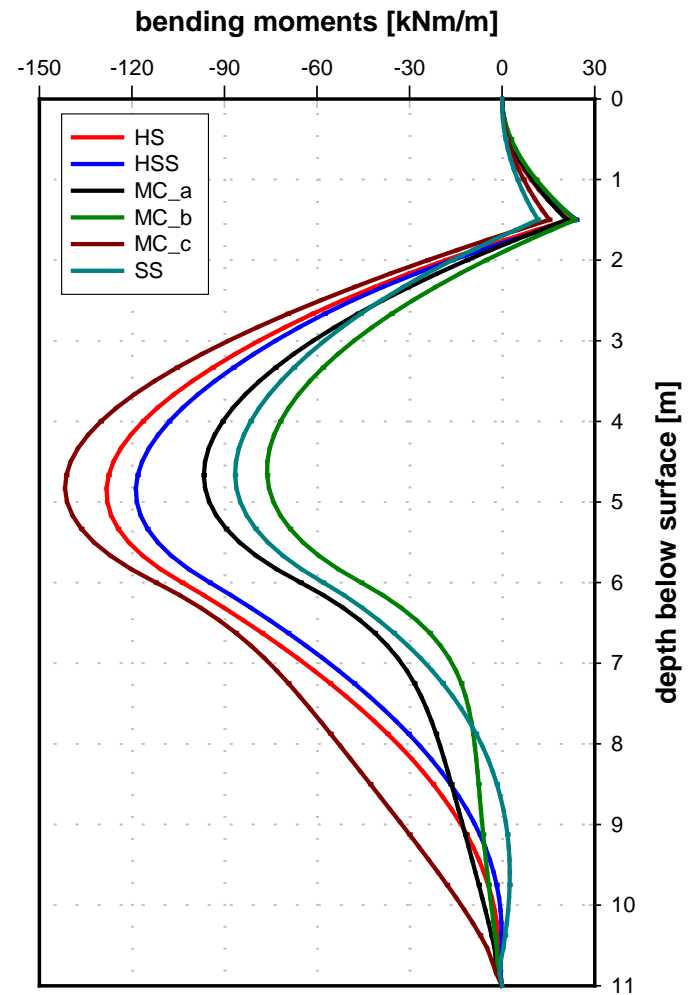
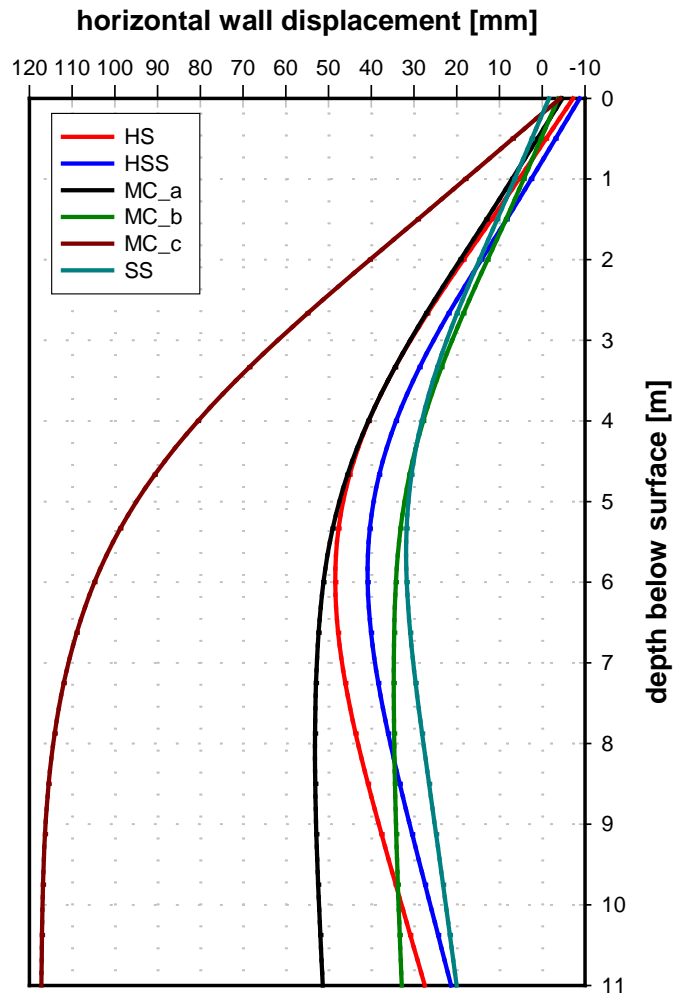
ARCILLA

Parámetros para el Soft Soil model (SS)

Parameter		Meaning	Value
γ	[kN/m ³]	Unit weight (unsaturated)	15
γ_r	[kN/m ³]	Unit weight (saturated)	16
φ'	[°]	Friction angle (Mohr-Coulomb)	27
c'	[kPa]	Cohesion (Mohr-Coulomb)	15
ψ	[°]	Angle of dilatancy	0
ν_{ur}	[-]	Poisson's ratio	0.20
κ^*	[-]	Modified swelling index	0.0125
λ^*	[-]	Modified compression index	0.0556
K_0^{nc}	[-]	Coefficient of earth pressure at rest (NC)	$1 - \sin(\varphi')$
$\sigma_{Tension}$	[kPa]	Tensile strength	0

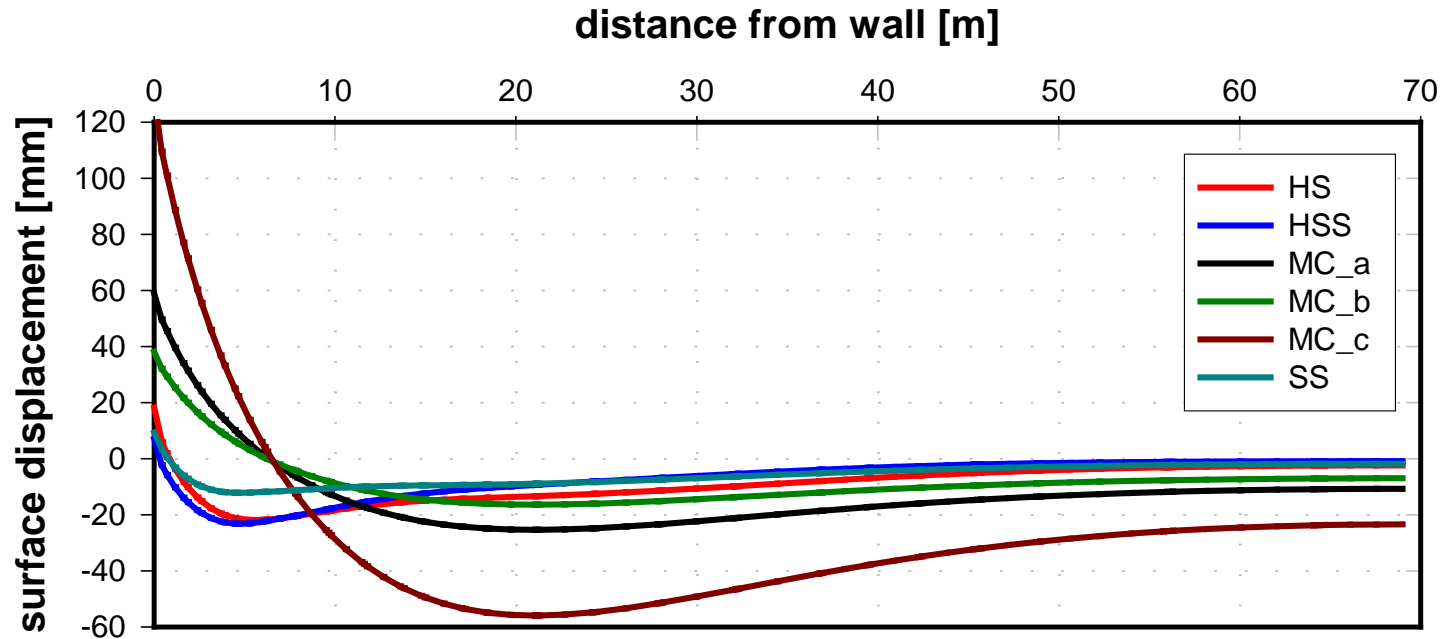
Métodos de cálculo de movimientos

ARCILLA



Métodos de cálculo de movimientos

ARCILLA



Fuerzas en el arriostramiento:

HS: -115 kN/m

HSS: -120 kN/m

MC_a: -96 kN/m

MC_b: -93 kN/m

MC_c: -103 kN/m

SS: -75 kN/m

Métodos de cálculo de movimientos

Efecto del modelo constitutivo

- **Mohr-Coulomb: deformaciones no realistas**
 - Sobreestimación del levantamiento de fondo, muy dependiente de la profundidad del modelo
 - Frecuentemente levantamiento detrás del muro
- **Hardening Soil model: deformaciones cualitativamente más realistas**
 - Mejor levantamiento de fondo, pero crece con la profundidad del modelo
 - Se obtiene asiento detrás del muro, pero frecuentemente con una cubeta demasiado ancha (y poco profunda)
- **HS-small model: deformaciones más realistas cualitativa y cuantitativamente**
 - Buen levantamiento de fondo independiente de la profundidad del modelo
 - Cubeta de asientos detrás del muro más realista (más estrecha y profunda)

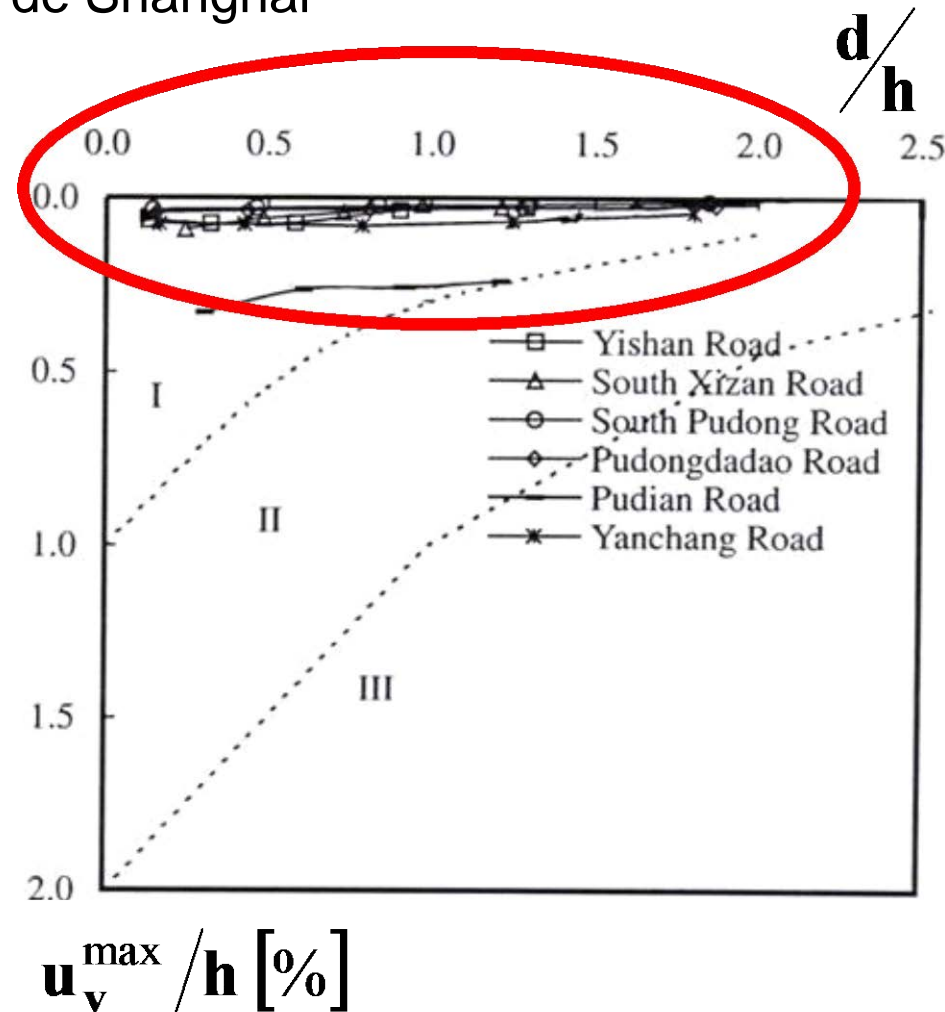
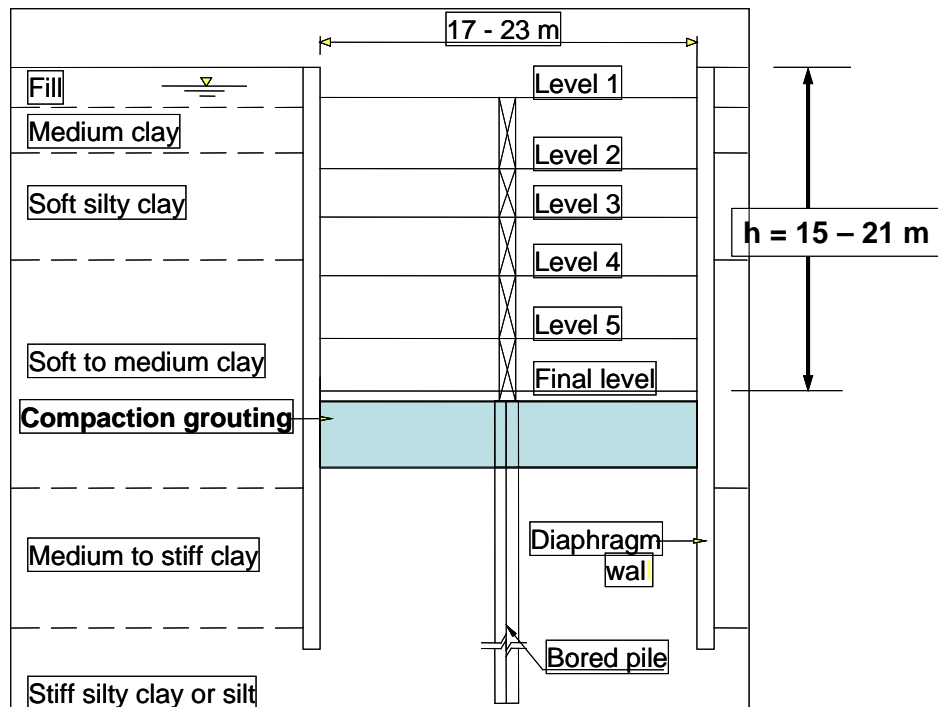
Esquema de la presentación

- ❑ Introducción
- ❑ Mecanismos de deformación en excavaciones
- ❑ Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos
 - Movimientos laterales y asientos máximos
 - Distribución de asientos
- ❑ Métodos de cálculo
- ❑ **Métodos de control y reducción de movimientos**
- ❑ Un ejemplo de mitigación de movimientos
- ❑ Conclusiones

Métodos de control y reducción de movimientos

❑ Tomando medidas adecuadas, es posible minimizar movimientos, incluso en suelos blandos

○ Un ejemplo reciente: el metro de Shanghai



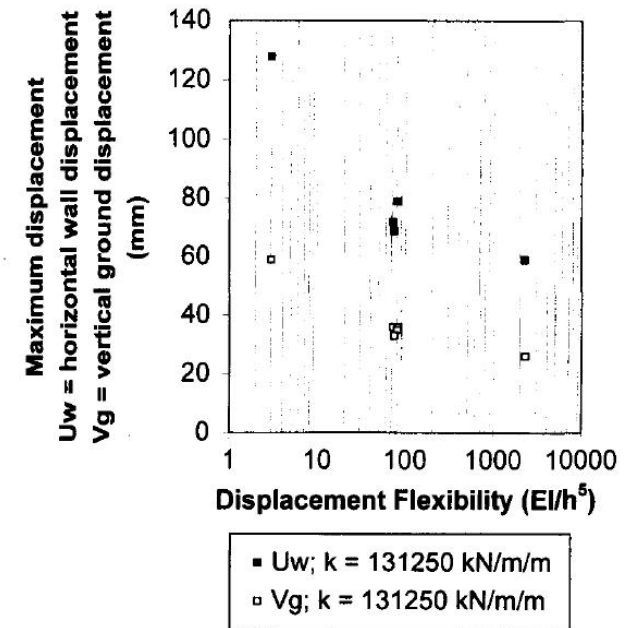
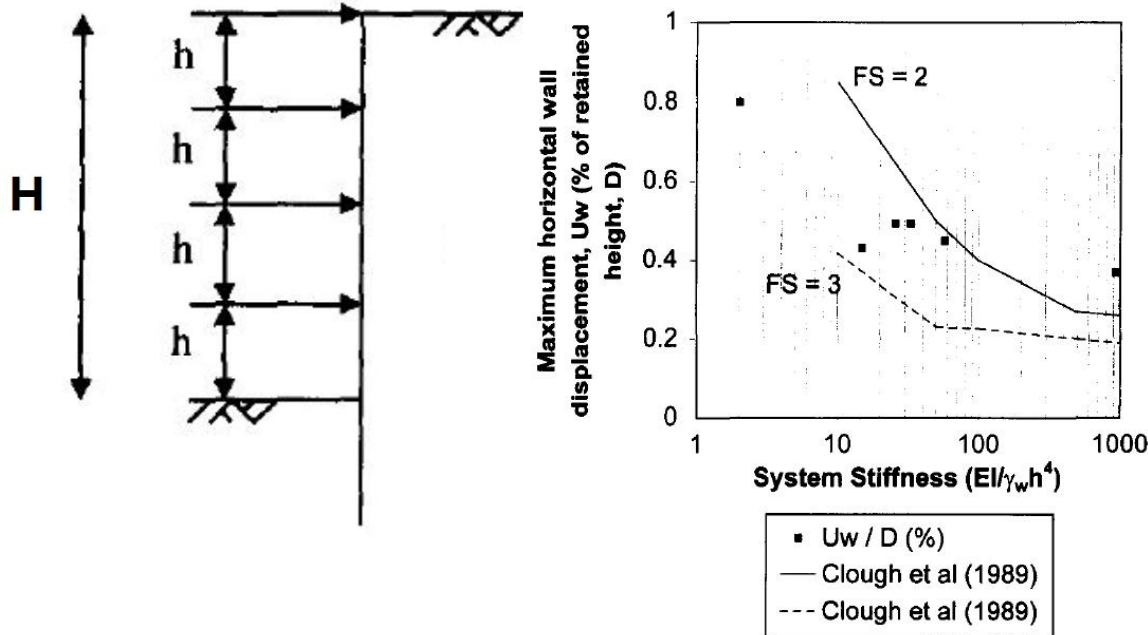
Métodos de control y reducción de movimientos

1. Incrementar la rigidez del sistema de contención
2. Instalación temprana de la primera fila de arriostramientos
3. Atención al contacto entre arriostramiento y pantalla
4. Pretensar los arriostramientos
5. Evitar sobreexcavaciones
6. Empotrar la pantalla en un estrato rígido
7. Arriostramiento por debajo del nivel de excavación máxima
8. Muro impermeable y control del flujo de agua
9. Inyecciones de compensación?

Métodos de control y reducción de movimientos

1. Aumentar la rigidez del sistema de contención

- Análisis paramétrico con elementos finitos (modelo de pequeñas deformaciones)
- Escala logarítmica!

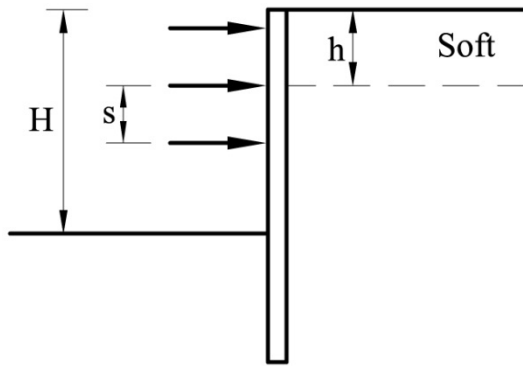


(Adddenbrooke et al., 2000)

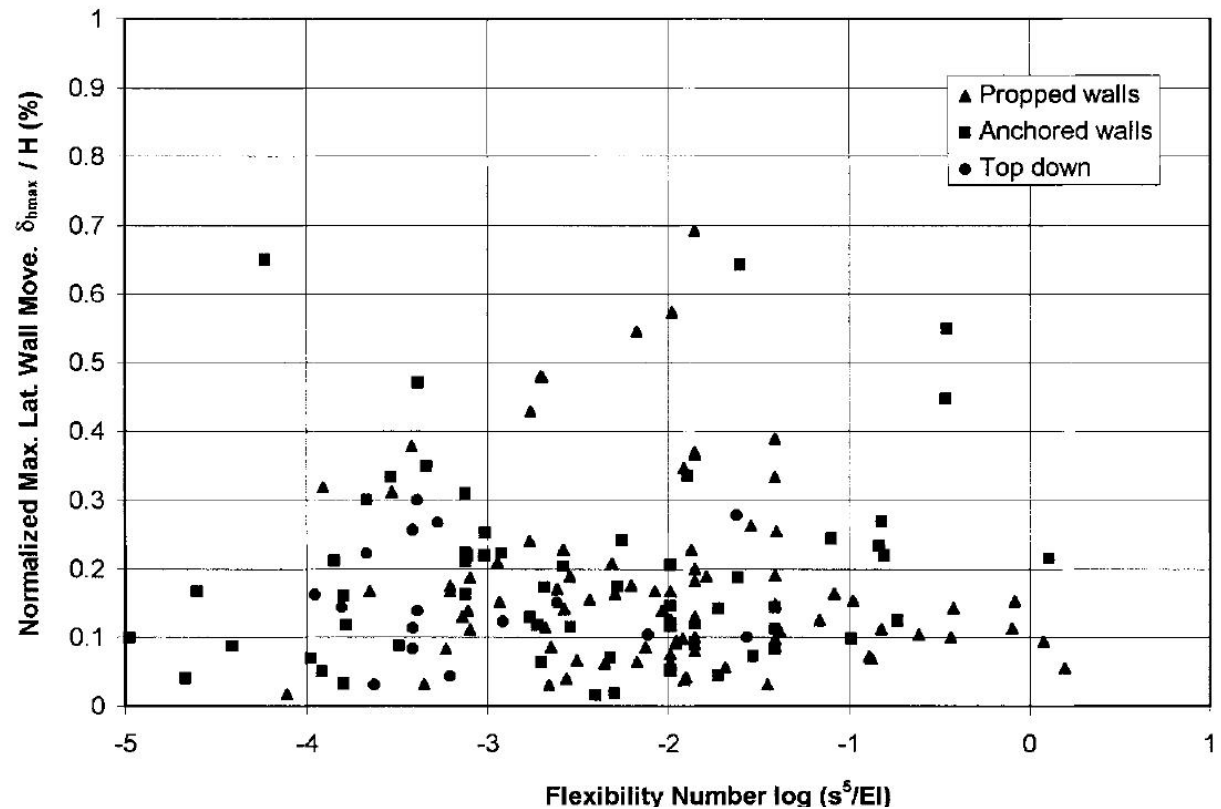
Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos

1. Aumentar la rigidez del sistema de contención

- Recopilación de Long (2001). Excavaciones en suelos medios y rígidos



$$h < 0.6H$$



Flexibilidad de desplazamientos: $(s^5)/(EI)$ (Addenbrooke et al., 2000)

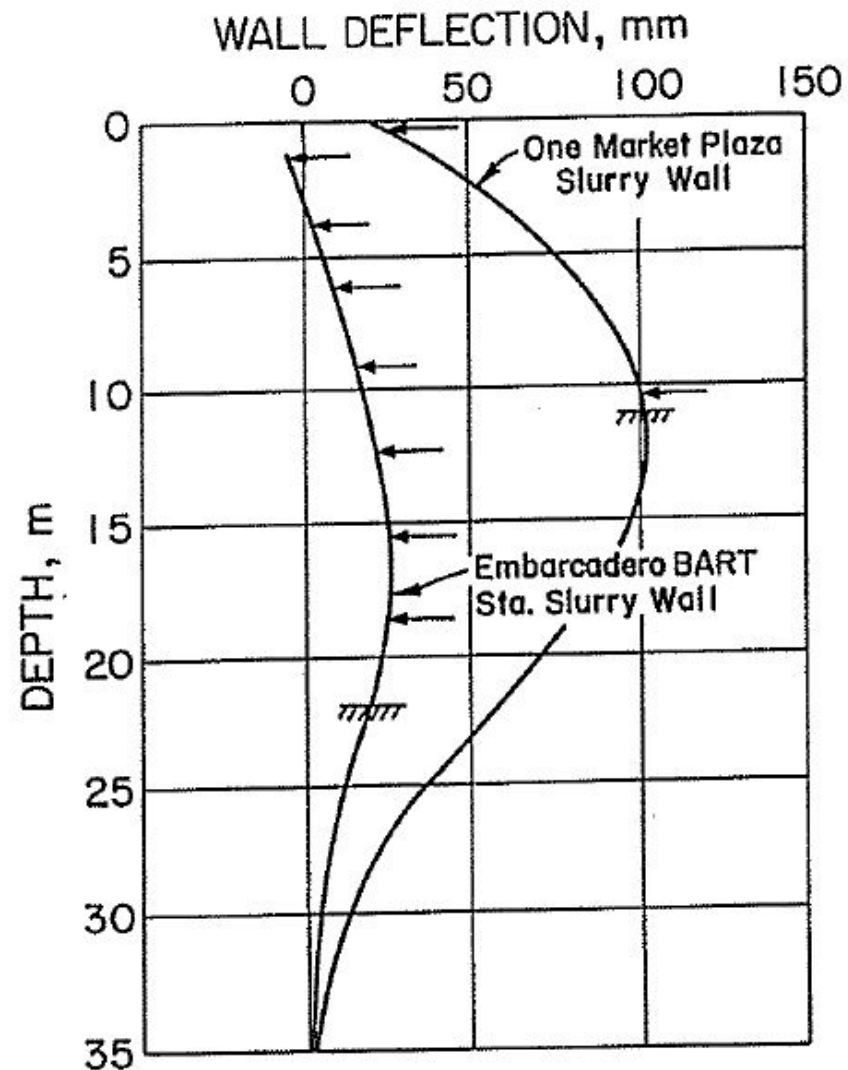
Movimiento lateral máximo

- La rigidez del sistema no es un parámetro determinante en estos casos

Métodos de control y reducción de movimientos

○ 1. Aumentar la rigidez del sistema de contención

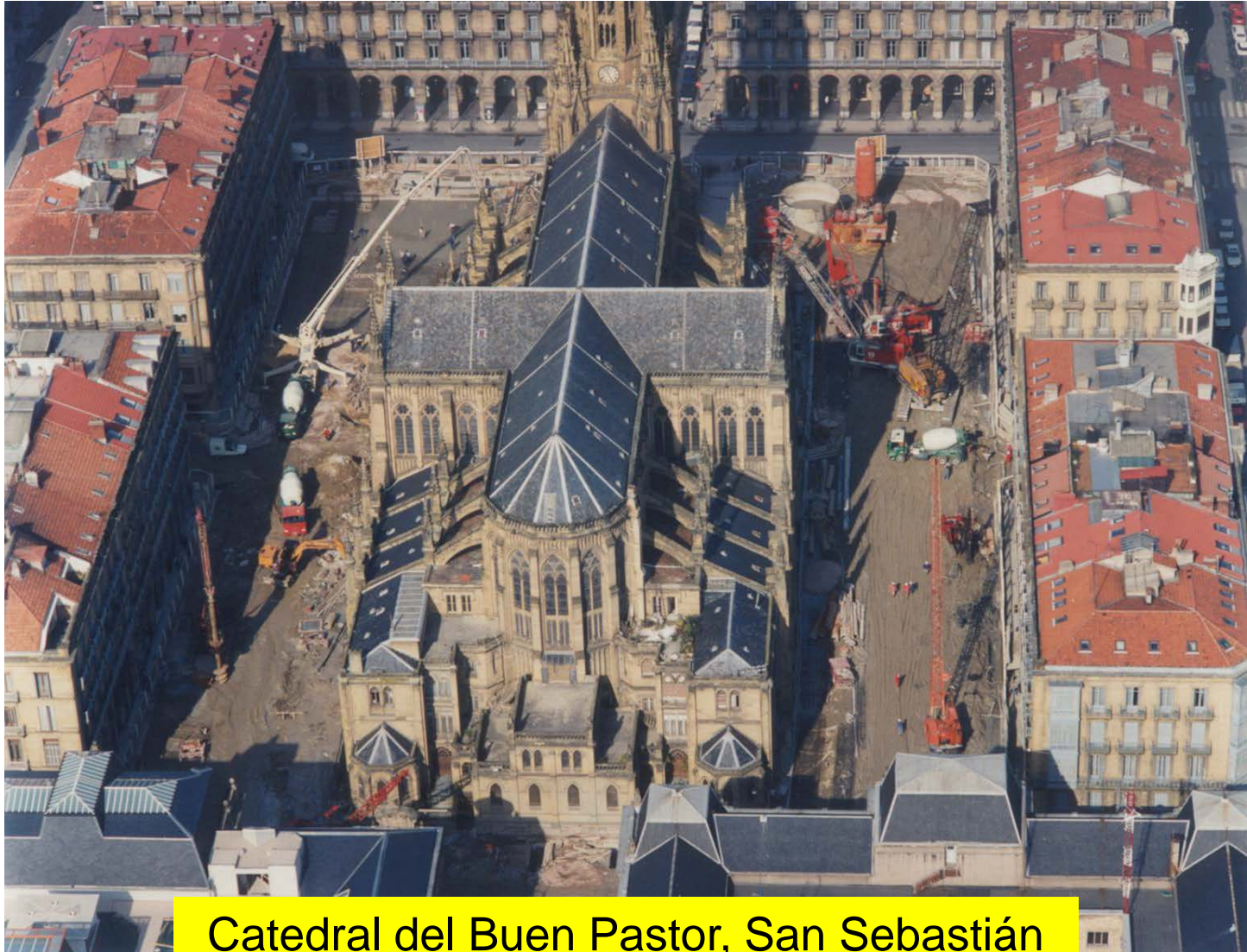
- Excavación en 20 m de San Francisco Bay Mud (bajo 6m de relleno)
- Pantallas de hormigón



(Clough & O' Rourke, 1990)

Métodos de control y reducción de movimientos

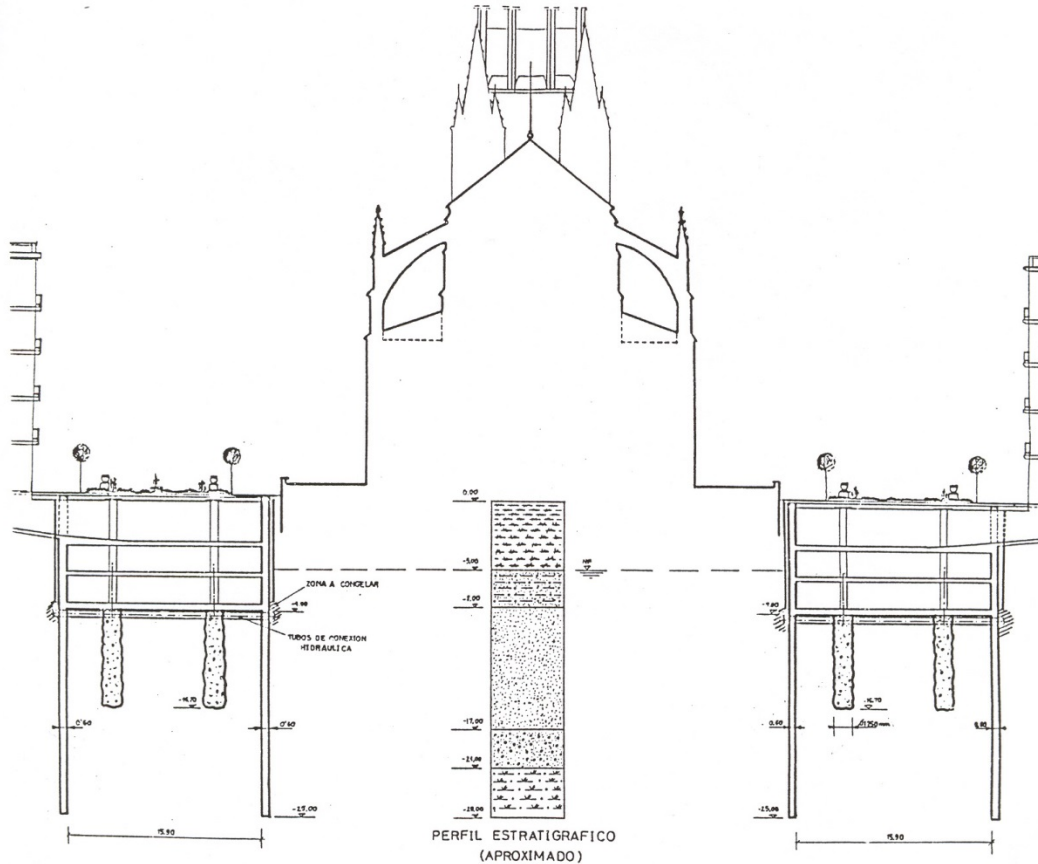
- 2. Instalación temprana de la primera fila de arriostramientos
 - procedimiento clásico de construcción “ascendente - descendente”



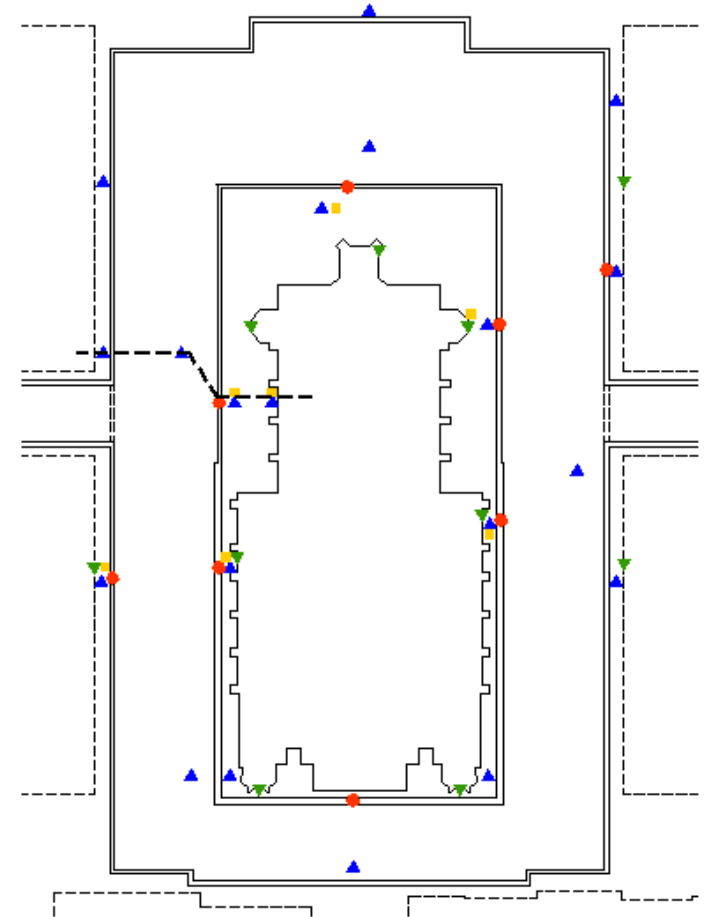
Catedral del Buen Pastor, San Sebastián

Métodos de control y reducción de movimientos

- 2. Instalación temprana de la primera fila de arriostramientos
 - procedimiento clásico de construcción “ascendente - descendente”



Alzado



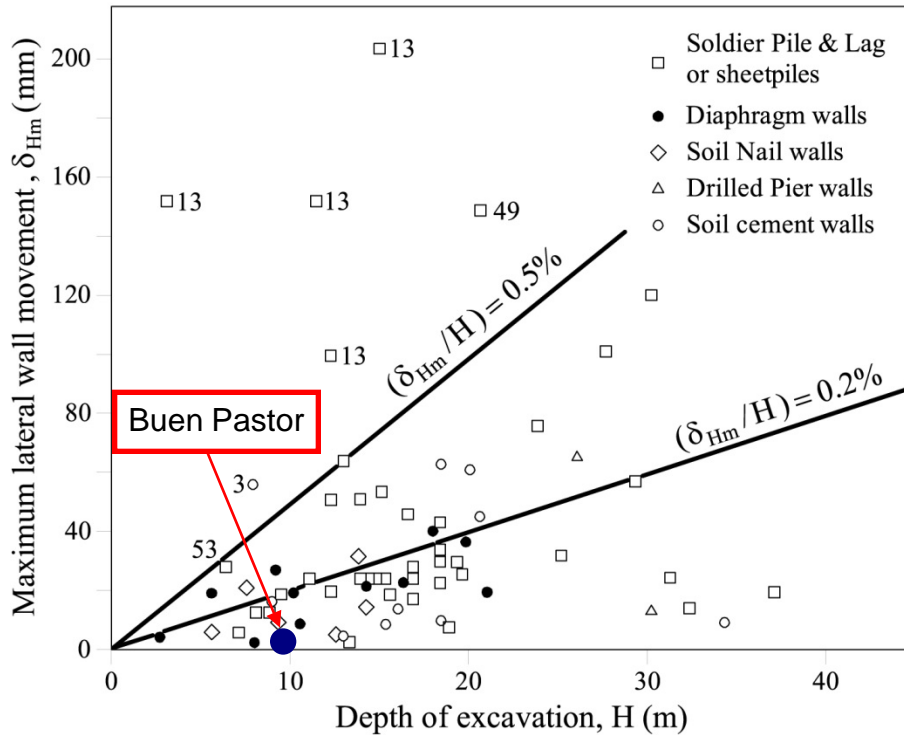
Planta

Catedral del Buen Pastor, San Sebastián

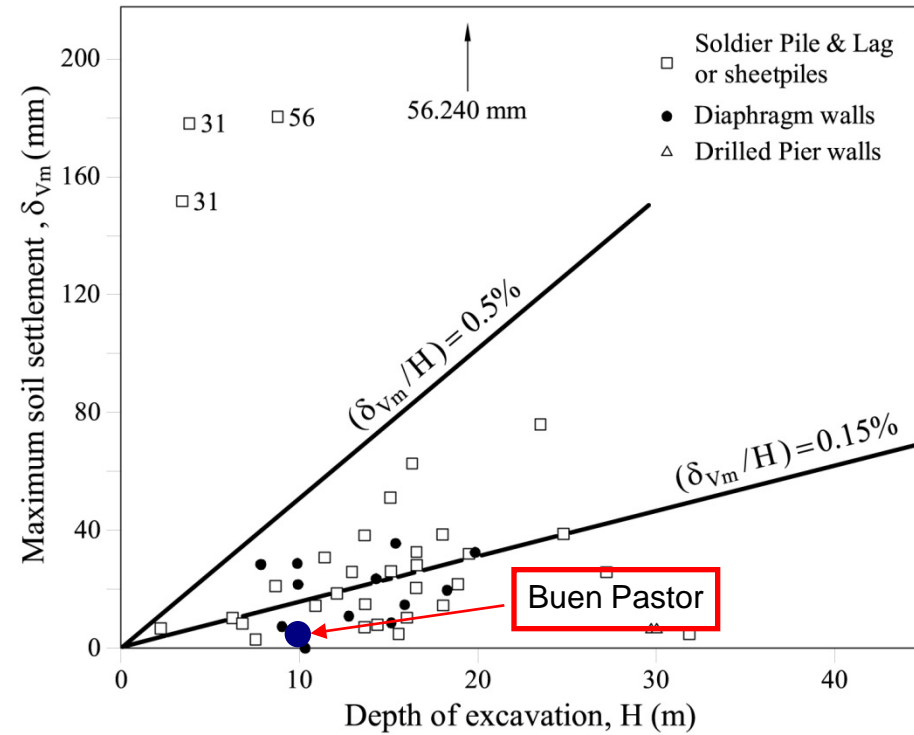
Métodos de control y reducción de movimientos

2. Instalación temprana de la primera fila de arriostramientos

- procedimiento clásico de construcción “ascendente - descendente”



Movimiento lateral máximo



Asiento máximo

Catedral del Buen Pastor, San Sebastián

Métodos de control y reducción de movimientos

○ 4. Pretensado del arriostramiento (puntales y anclajes)

- los anclajes con zona libre de cierta longitud tiene una deformabilidad importante



- ❑ Muro de pilotes (65 cm dia.)
- ❑ Longitud del muro: 80 m
- ❑ Prof. máx. de excavación: 20 m
- ❑ Excavación en granito meteorizado

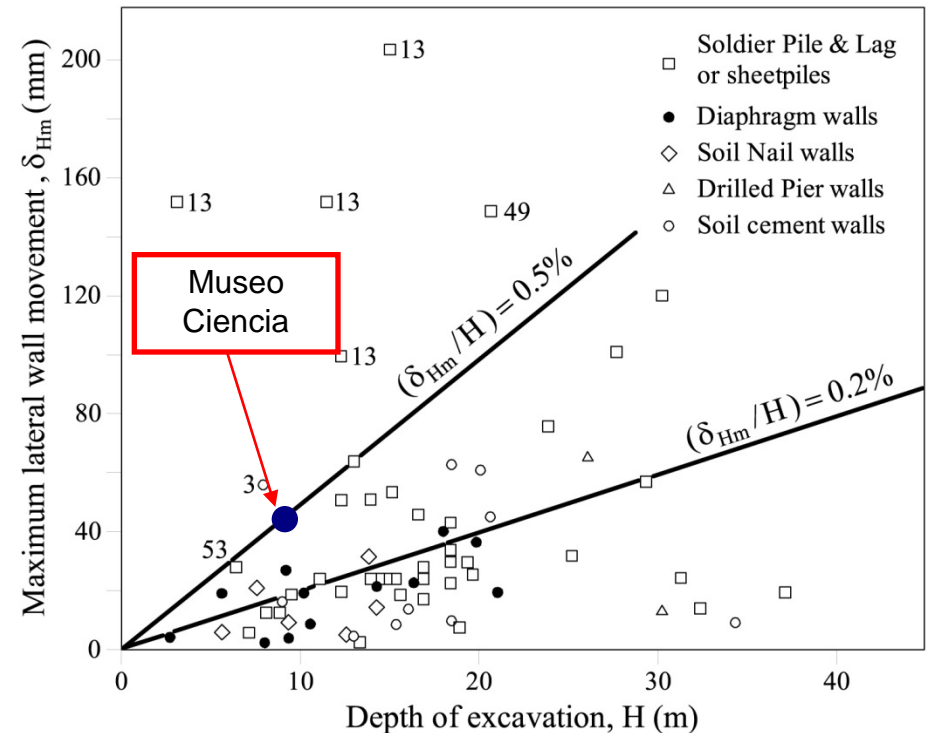
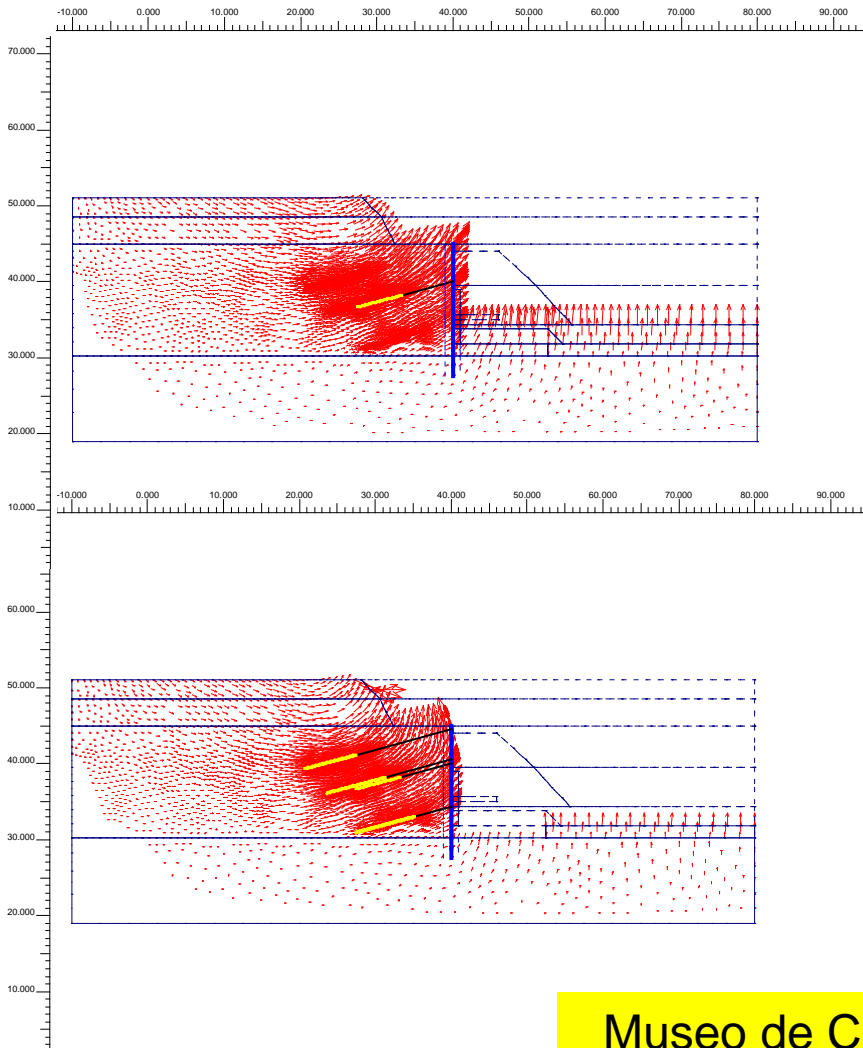


Museo de Ciencia, Barcelona

Métodos de control y reducción de movimientos

4. Pretensado del arriostramiento (puntales y anclajes)

- los anclajes con zona libre de cierta longitud tiene una deformabilidad importante



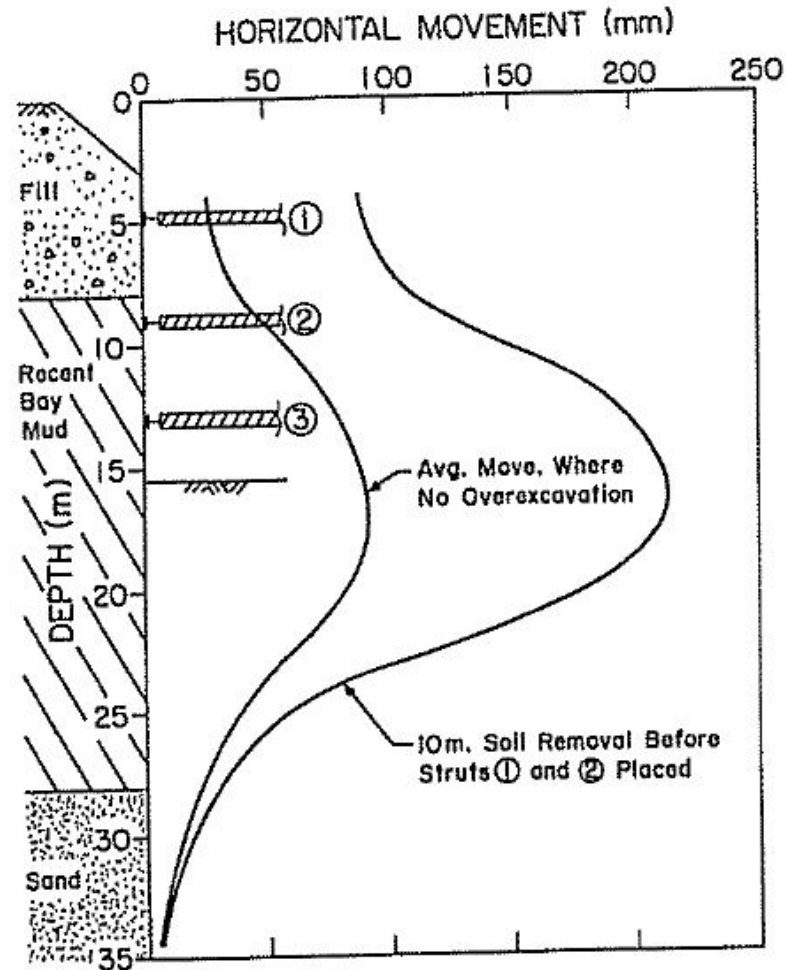
Movimiento lateral máximo

Museo de Ciencia, Barcelona

Métodos de control y reducción de movimientos

○ 5. Evitar sobreexcavaciones

- Excavación en San Francisco Bay Mud



(Clough & O' Rourke, 1990)

○ 6. Empotrar la pantalla en un estrato rígido (si es posible)

Métodos de control y reducción de movimientos

○ 7. Arriostramiento por debajo del nivel de excavación máxima

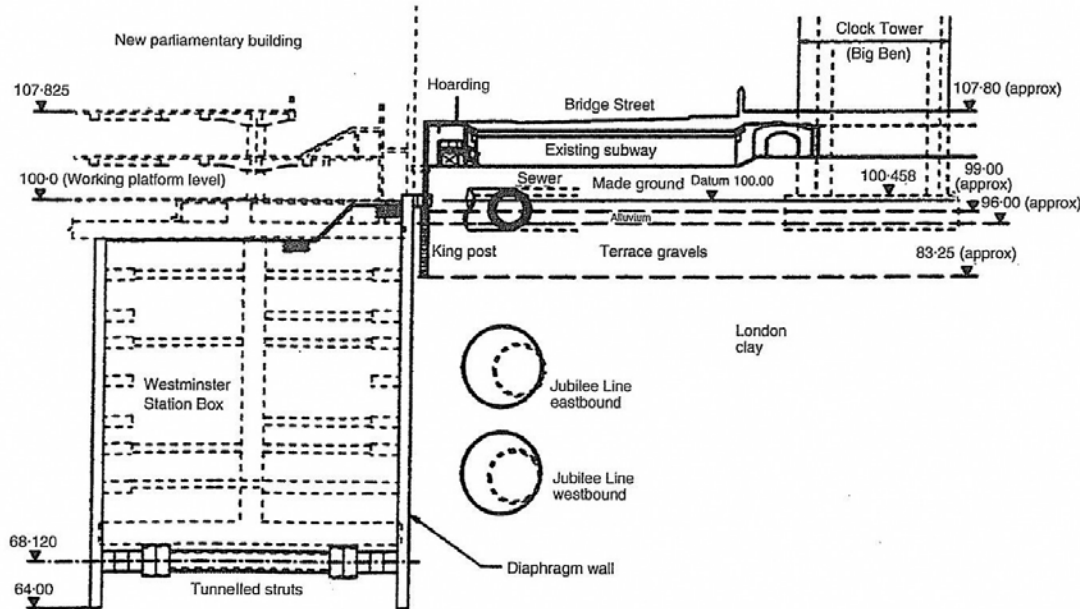
➤ Procedimientos:

- Arriostramientos colocados en zanjas o túneles pre-excavados
- Filas de módulos de pantalla
- Losas o puntales de jet grouting
- Losas o puntales con columnas de mezcla de terreno (cal, cemento)
- Losas o puntales de inyecciones de compactación

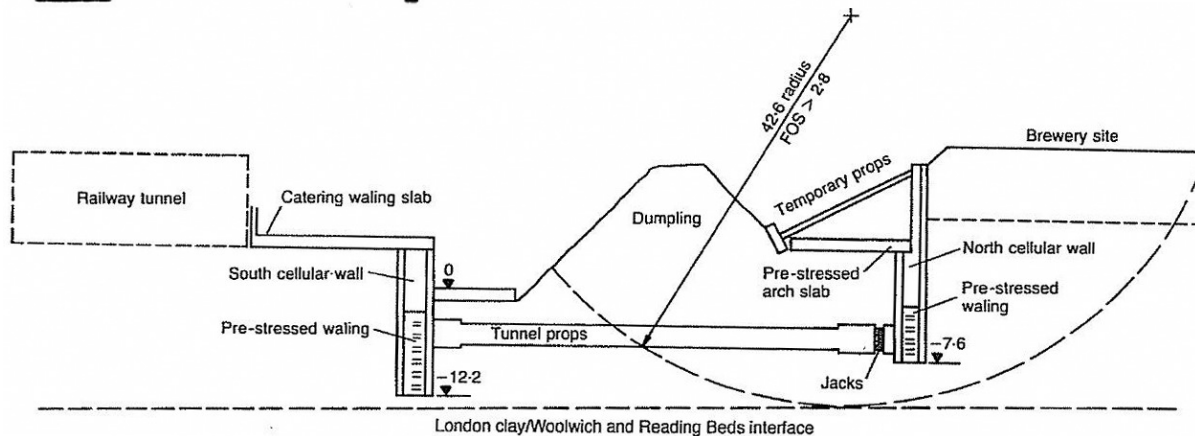
Métodos de control y reducción de movimientos

7. Arriostramiento por debajo del nivel de excavación máxima

- Arriostramientos colocados en zanjas o túneles pre-excavados



Westminster Station
London

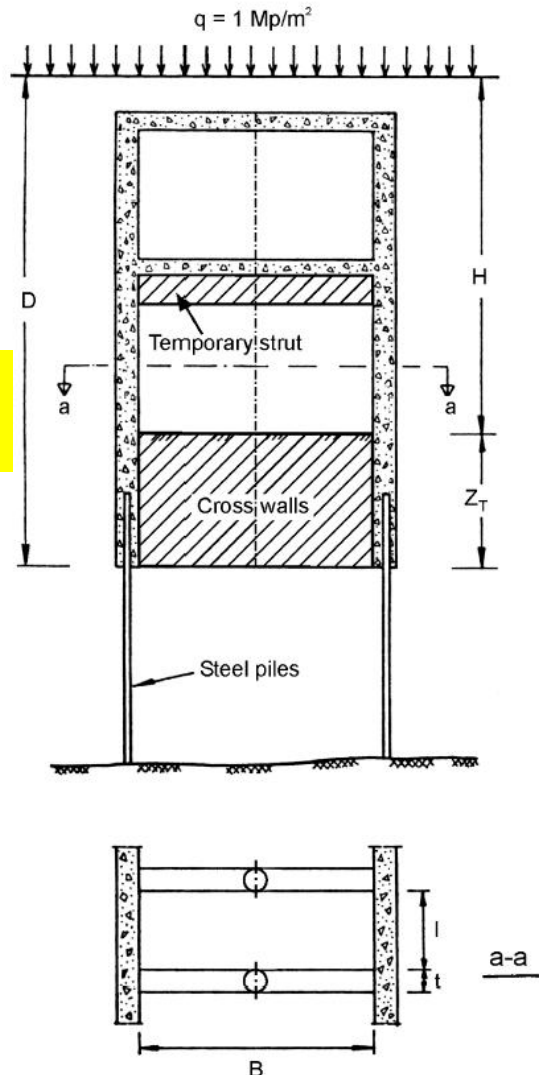


Barbican Arts Centre
London

Métodos de control y reducción de movimientos

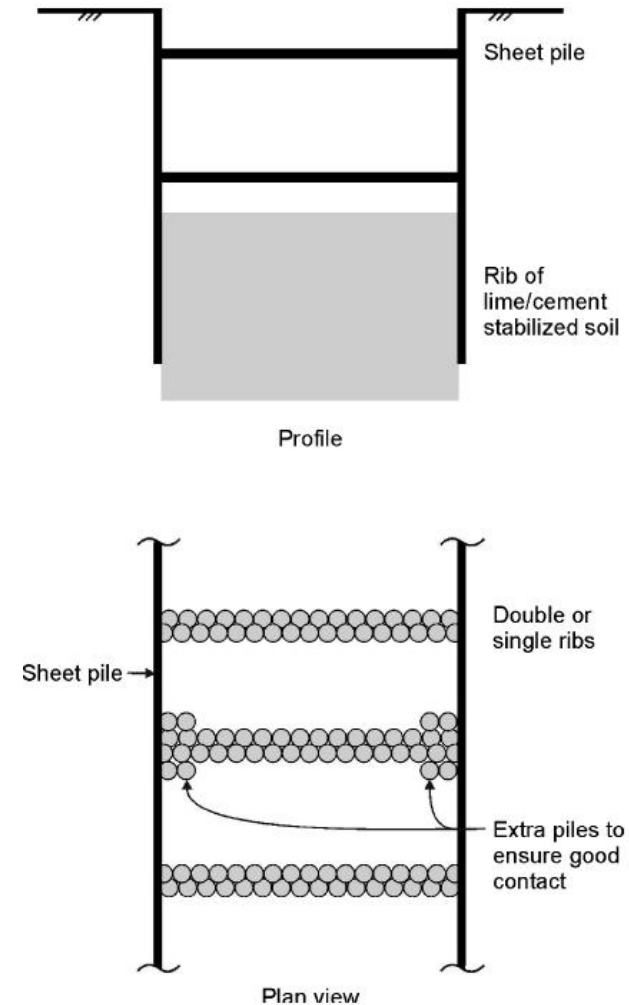
7. Arriostramiento por debajo del nivel de excavación máxima

(Karlsruud & Andresen, 2007)



Studenterlinden
Oslo

Módulos de pantalla

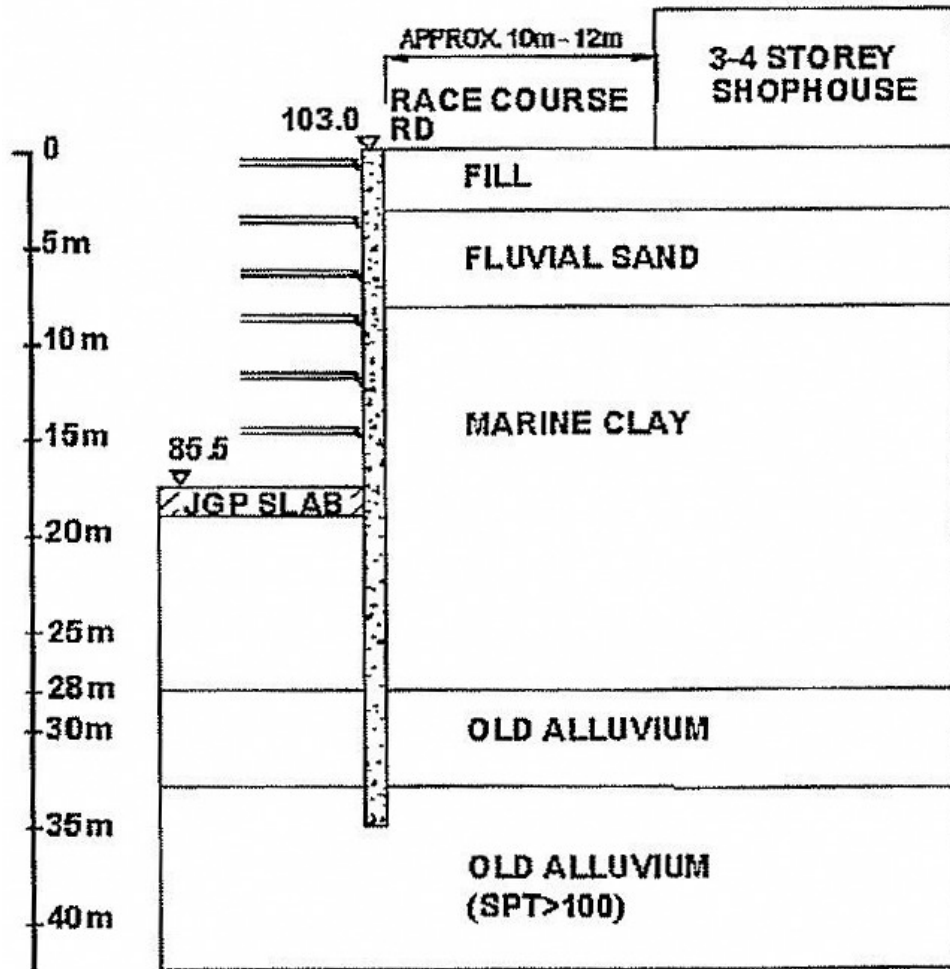


Columnas de cal - cemento

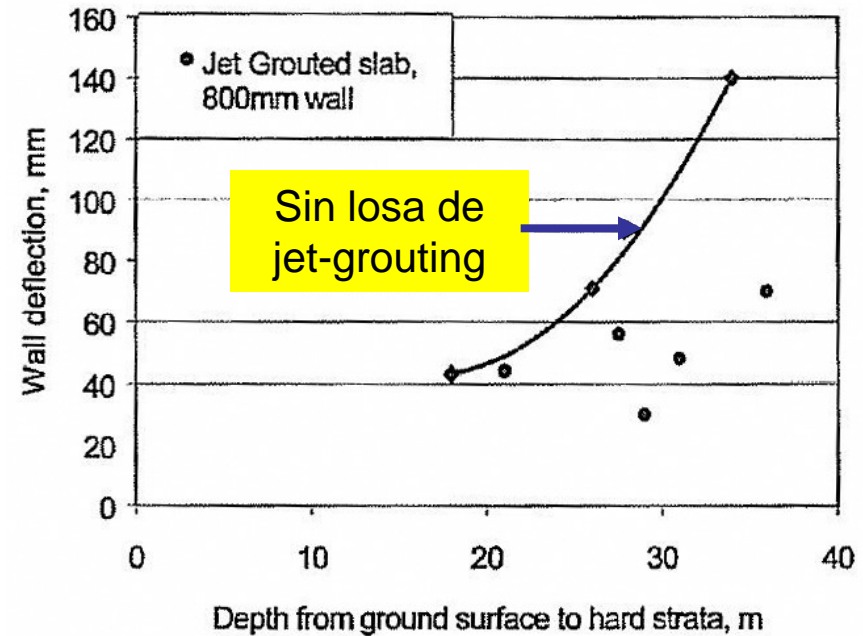
Métodos de control y reducción de movimientos

7. Arriostramiento por debajo del nivel de excavación máxima

- Losas o puntales de jet grouting



Race Course Road Metro
Singapore



Movimientos laterales de excavaciones en Singapur (Shirlaw, 2006)

Métodos de control y reducción de movimientos

○ 7. Arriostramiento por debajo del nivel de excavación máxima

➤ Procedimientos:

- Arriostramientos colocados en zanjas o túneles pre-excavados
- Filas de módulos de pantalla
- Losas o puntales de jet grouting
- Losas o puntales con columnas de mezcla de terreno (cal, cemento)
- Losas o puntales de inyecciones de compactación

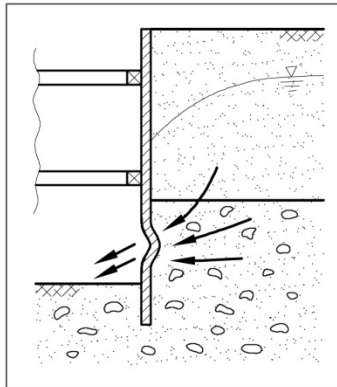
➤ Para arriostramientos utilizando técnicas de inyección/mejora

- No existe consenso sobre si es mejor utilizar una losa continua de espesor limitado o arriostramientos discontinuos de mayor espesor
- Los materiales que resultan de la inyección/mejora del terreno son frágiles y pueden perder resistencia si se supera su deformación de rotura
- La ejecución del arriostramiento puede debilitar el terreno suprayacente

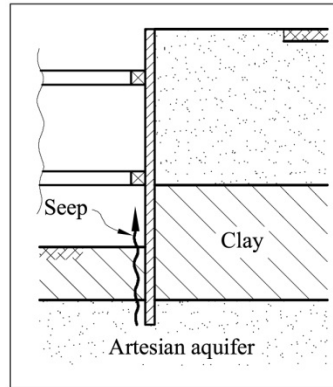
Métodos de control y reducción de movimientos

8. Muro impermeable y control del flujo de agua

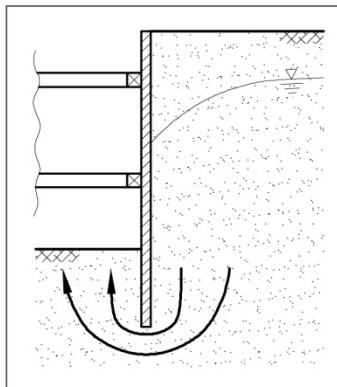
- La falta de control del flujo del agua o los cambios de condiciones hidráulicas producen movimientos del terreno a corto y/o a largo plazo



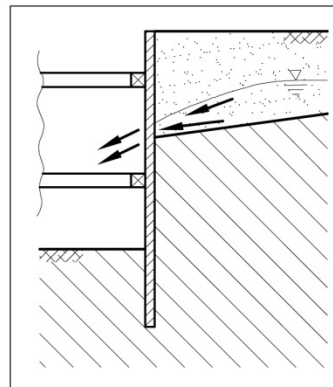
Flow through wall flaw



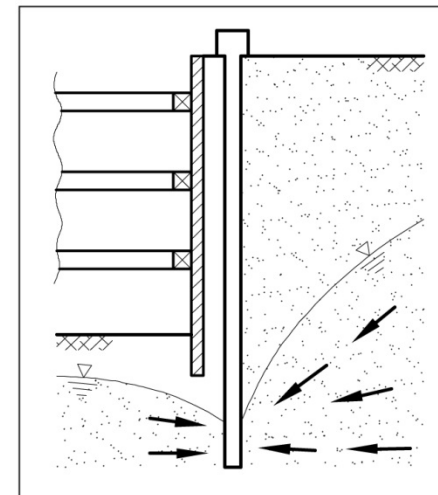
Flow along wall interface



Flow beneath wall



Flow from perched water



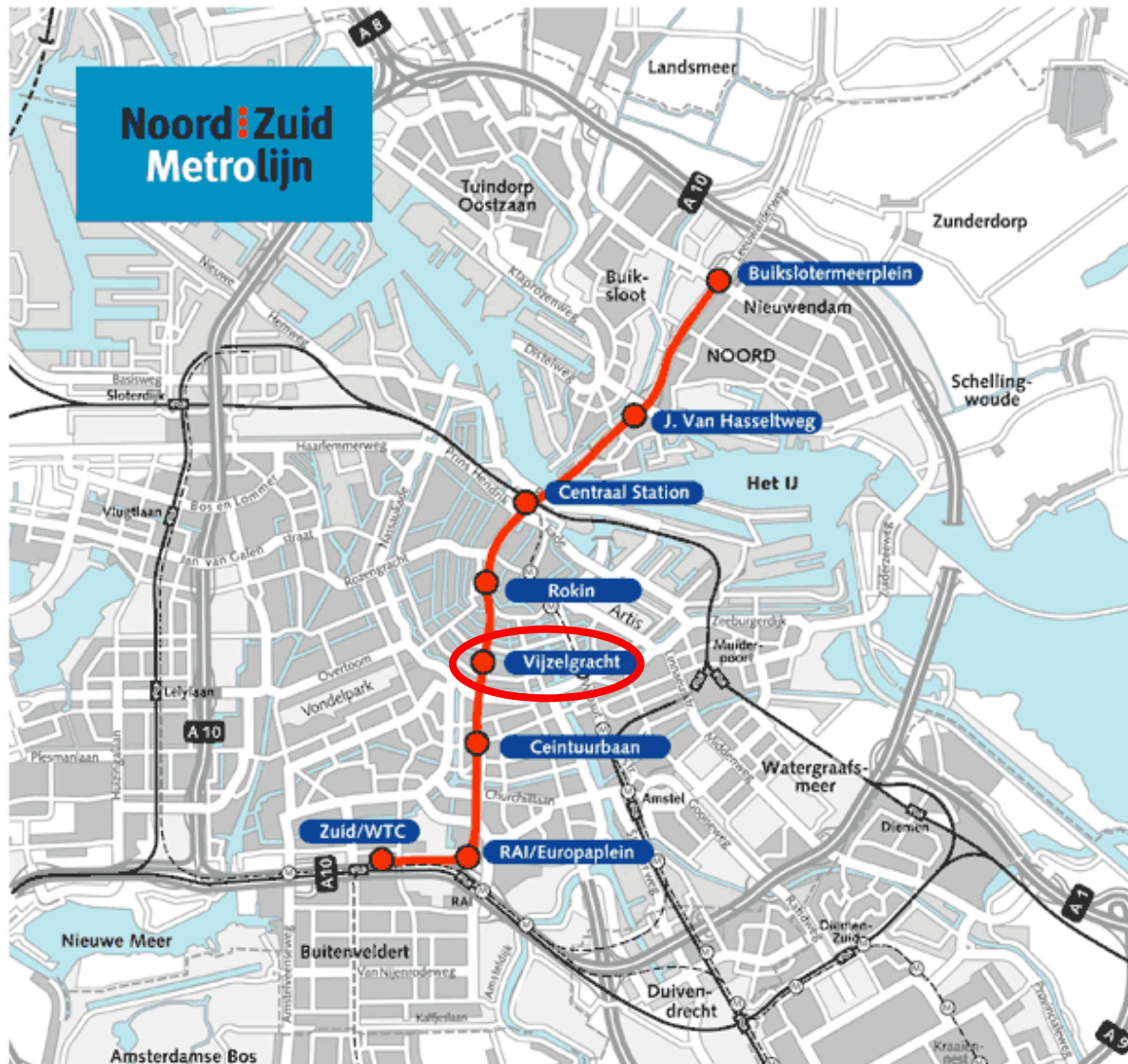
Flow caused by dewatering

Bombeo

Defectos de sellado

Métodos de control y reducción de movimientos

○ Amsterdam. North-South line



○ Estación de Vijzelgracht

➤ 250 m longitud, 22 m ancho, 31 m profundidad

➤ Construcción de arriba abajo

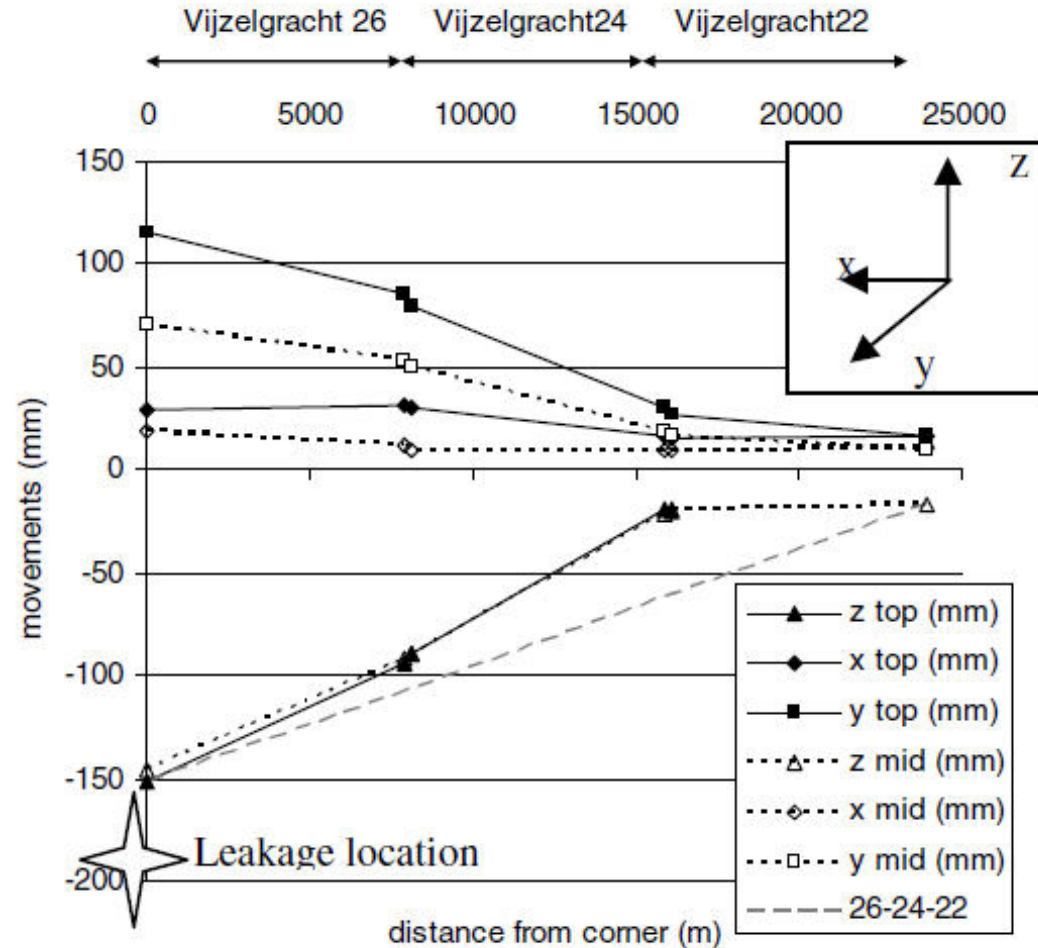
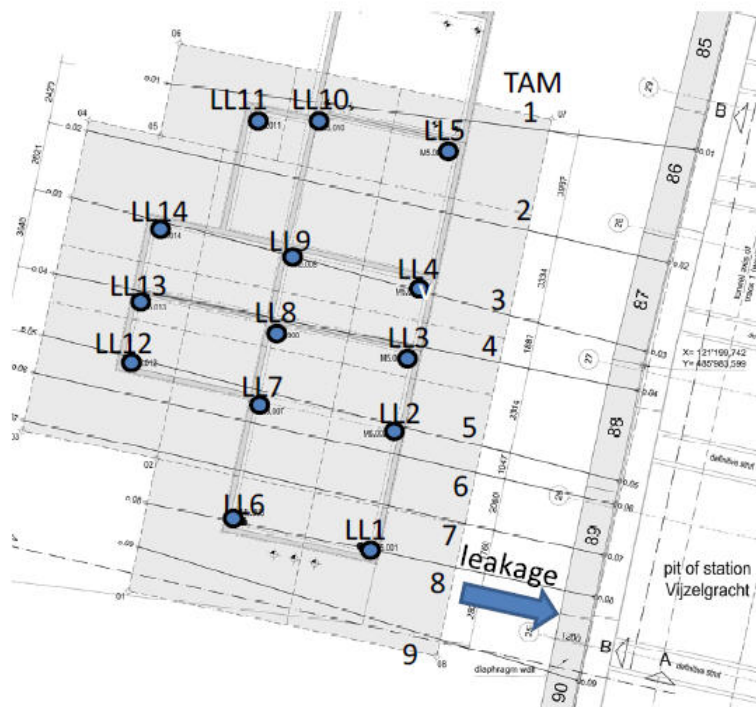
➤ Muro pantalla de 1.2 m de espesor, 45 m de profundidad

➤ Paneles de 5.1 m de longitud

Métodos de control y reducción de movimientos

○ Estación de Vijzelgracht, North-South line, Amsterdam

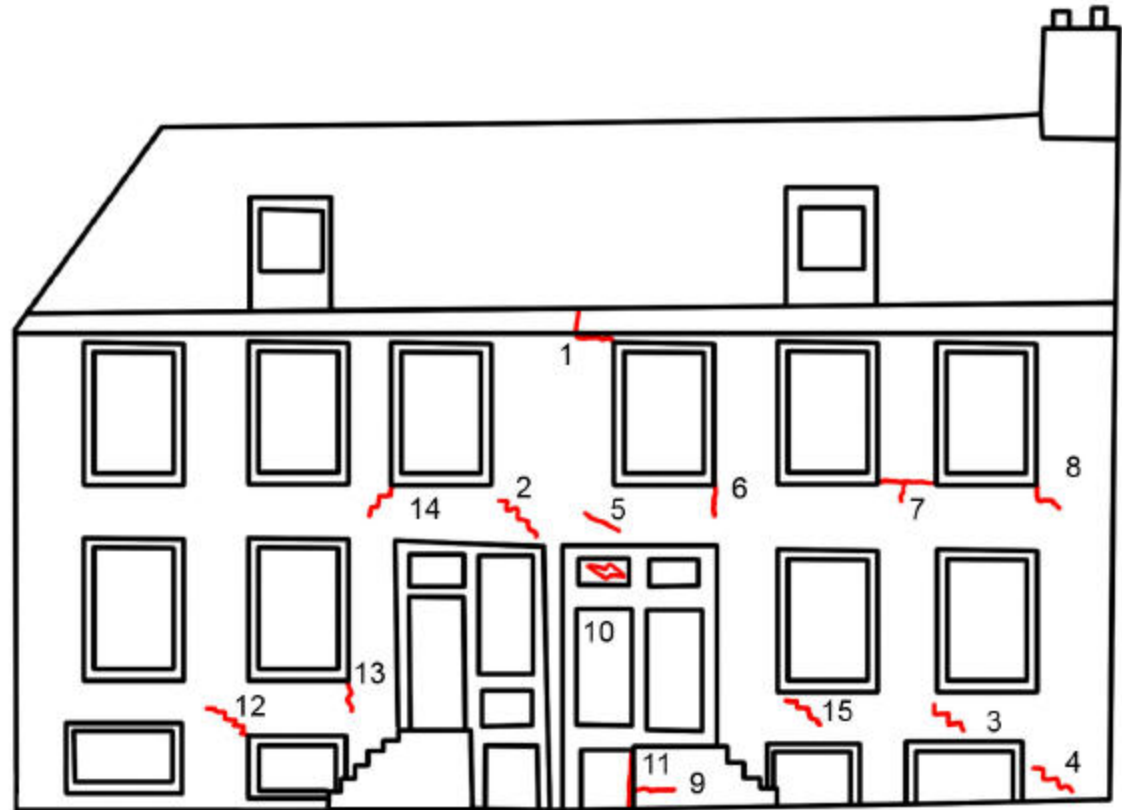
- Vijzelgracht, 26. Filtración debido a que no se pudo extraer una junta de acero



(Korff et al., 2009)

Métodos de control y reducción de movimientos

- Estación de Vijzelgracht, North-South line, Amsterdam
 - Vijzelgracht, 26. Filtración debida a que no se pudo extraer una junta de acero

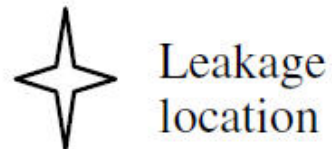
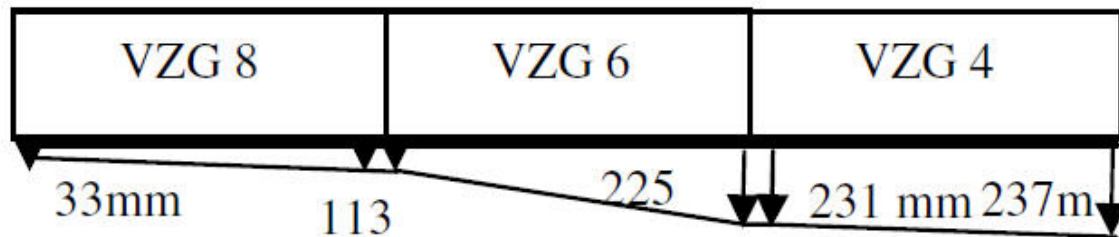


- Asientos debido a pérdida de terreno (arena) a través del muro
 - Giro de 1/78 and 1/184. Daño *severo a muy severo*

(Korff et al., 2009)

Métodos de control y reducción de movimientos

- Estación de Vijzelgracht, North-South line, Amsterdam
 - Vijzelgracht, 26. Filtración debida a una inclusión grande de bentonita en el muro pantalla



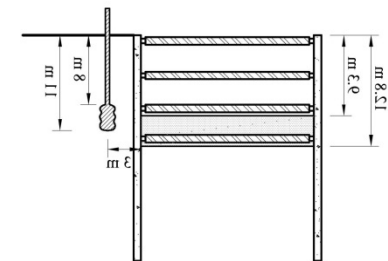
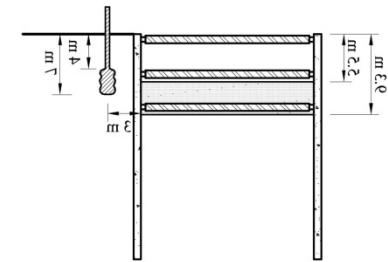
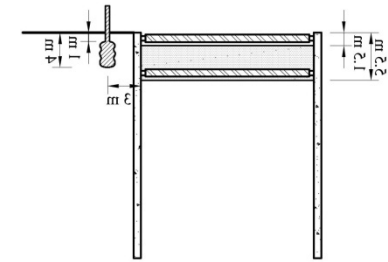
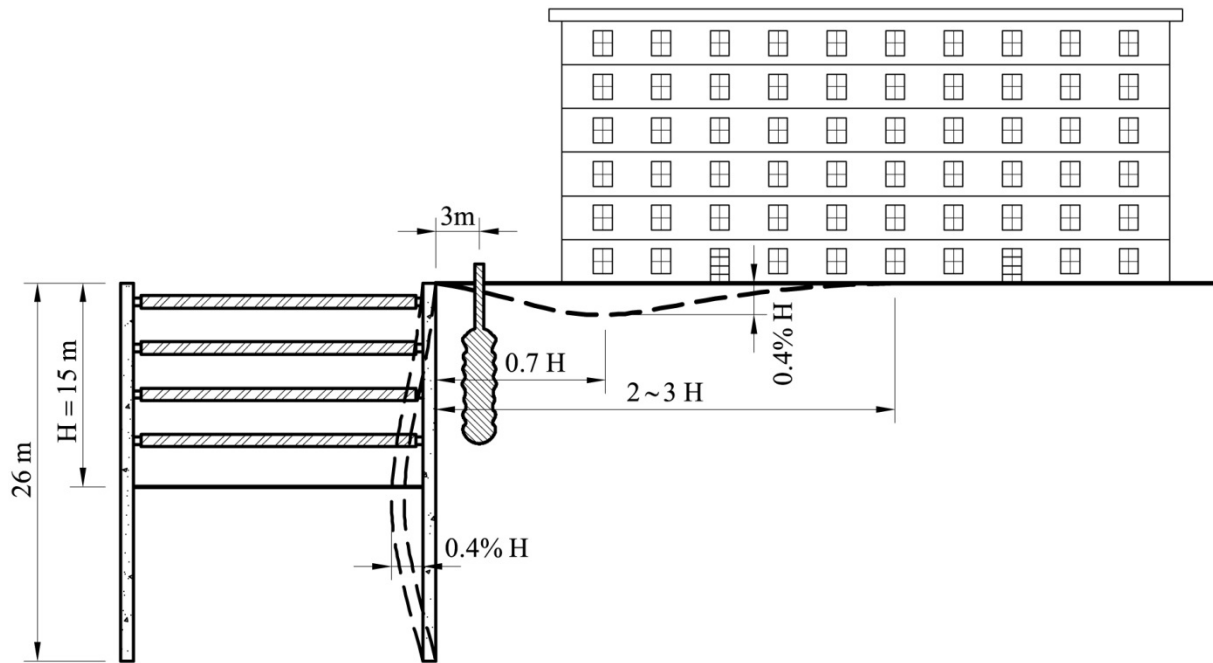
- Asientos debido a pérdida de terreno (arena) a través del muro
 - Giro de 1/38 and 1/70. Daño *severo a muy severo* (Korff et al., 2009)

Métodos de control y reducción de movimientos

○ 9. Inyecciones de compensación?

➤ Excavación en arcilla blanda de Shanghai (Liu, 2003)

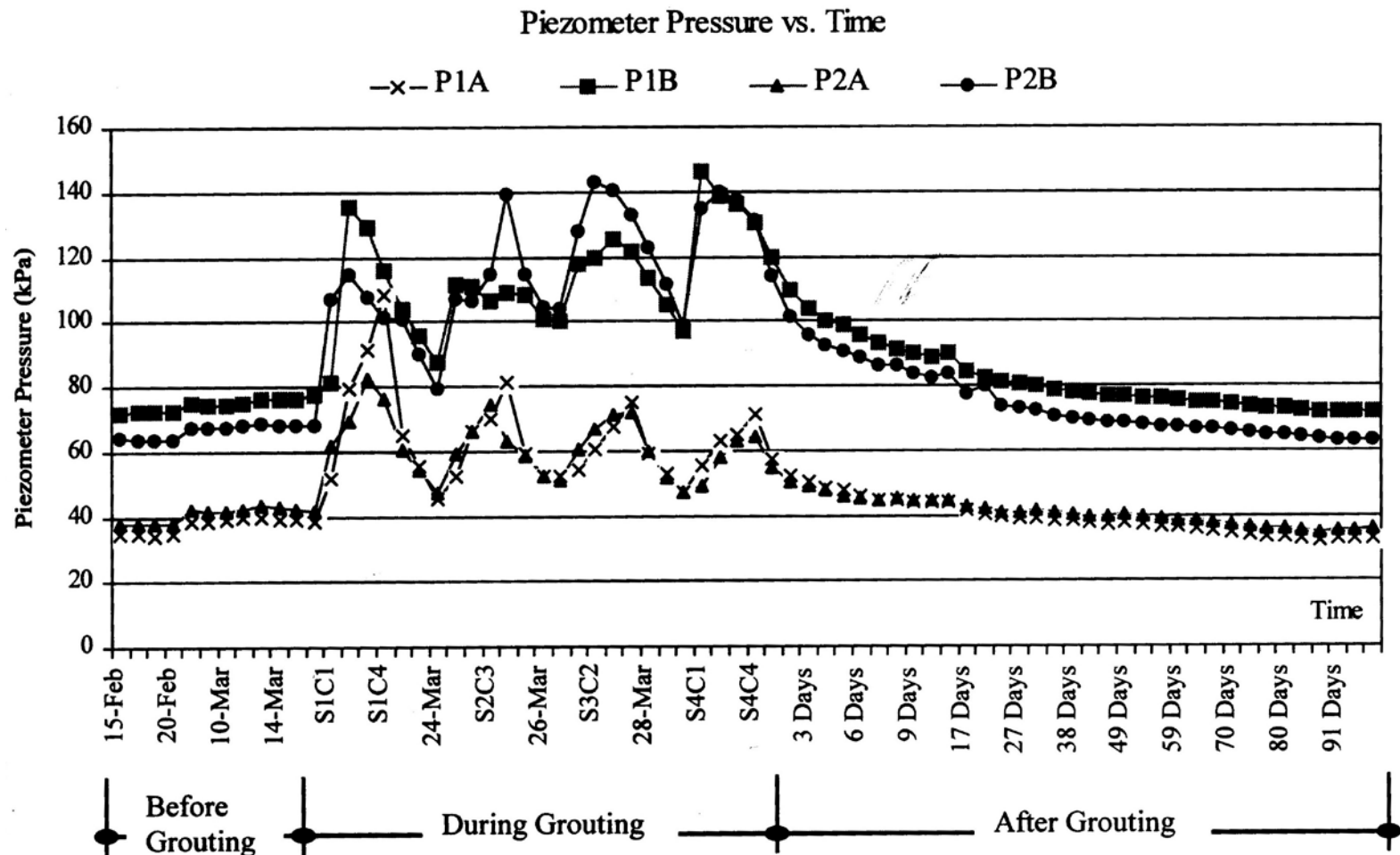
- Riesgo de afectación al muro (inyección se realiza después de colocado el arriostramiento)
- Es generalmente contraproducente realizar inyecciones de compensación en arcillas blandas



Métodos de control y reducción de movimientos

□ Uso de inyecciones de compensación en arcillas blandas

- Ensayos de inyecciones de compensación en arcilla marina de Singapur (Shirlaw et al., 1999)

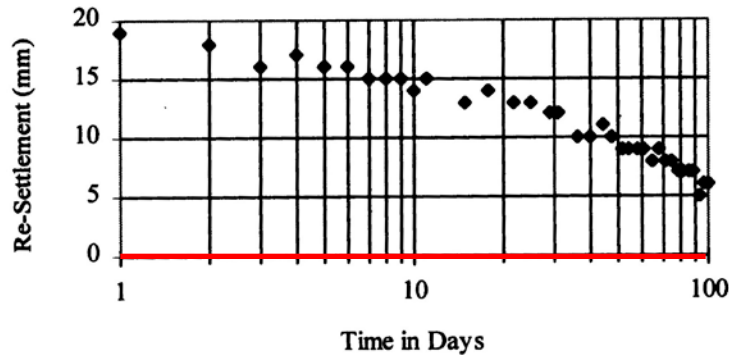


Métodos de control y reducción de movimientos

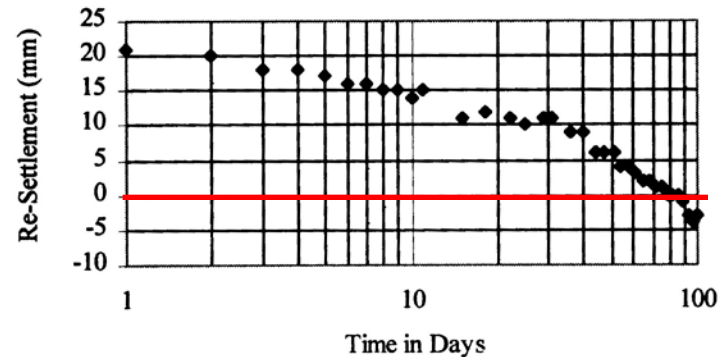
□ Uso de inyecciones de compensación en arcillas blandas

- Ensayos de inyecciones de compensación en arcilla marina de Singapur (Shirlaw et al., 1999)

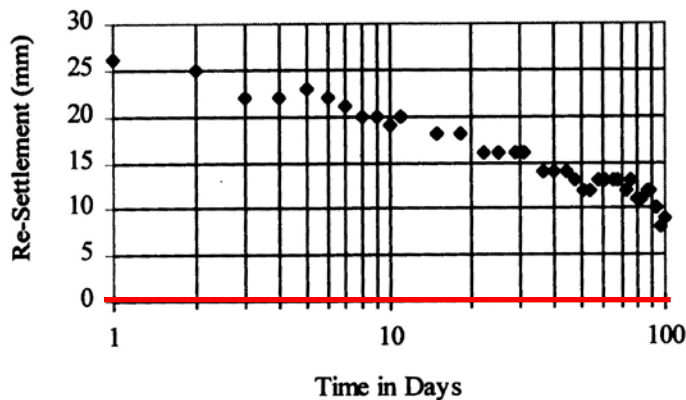
Re-Settlement vs. Time at SP14



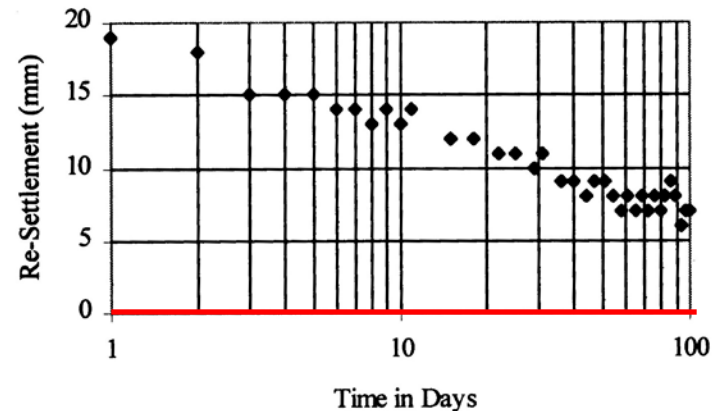
Re-Settlement vs. Time at SP15



Re-Settlement vs. Time at SP16



Re-Settlement vs. Time at SP17



Esquema de la presentación

- ❑ Introducción
- ❑ Mecanismos de deformación en excavaciones
- ❑ Experiencia previa. Métodos empíricos de evaluación de movimientos
 - Movimientos laterales y asientos máximos
 - Distribución de asientos
- ❑ Métodos de cálculo
- ❑ Métodos de control y reducción de movimientos
- ❑ Un ejemplo de mitigación de movimientos
- ❑ Conclusiones

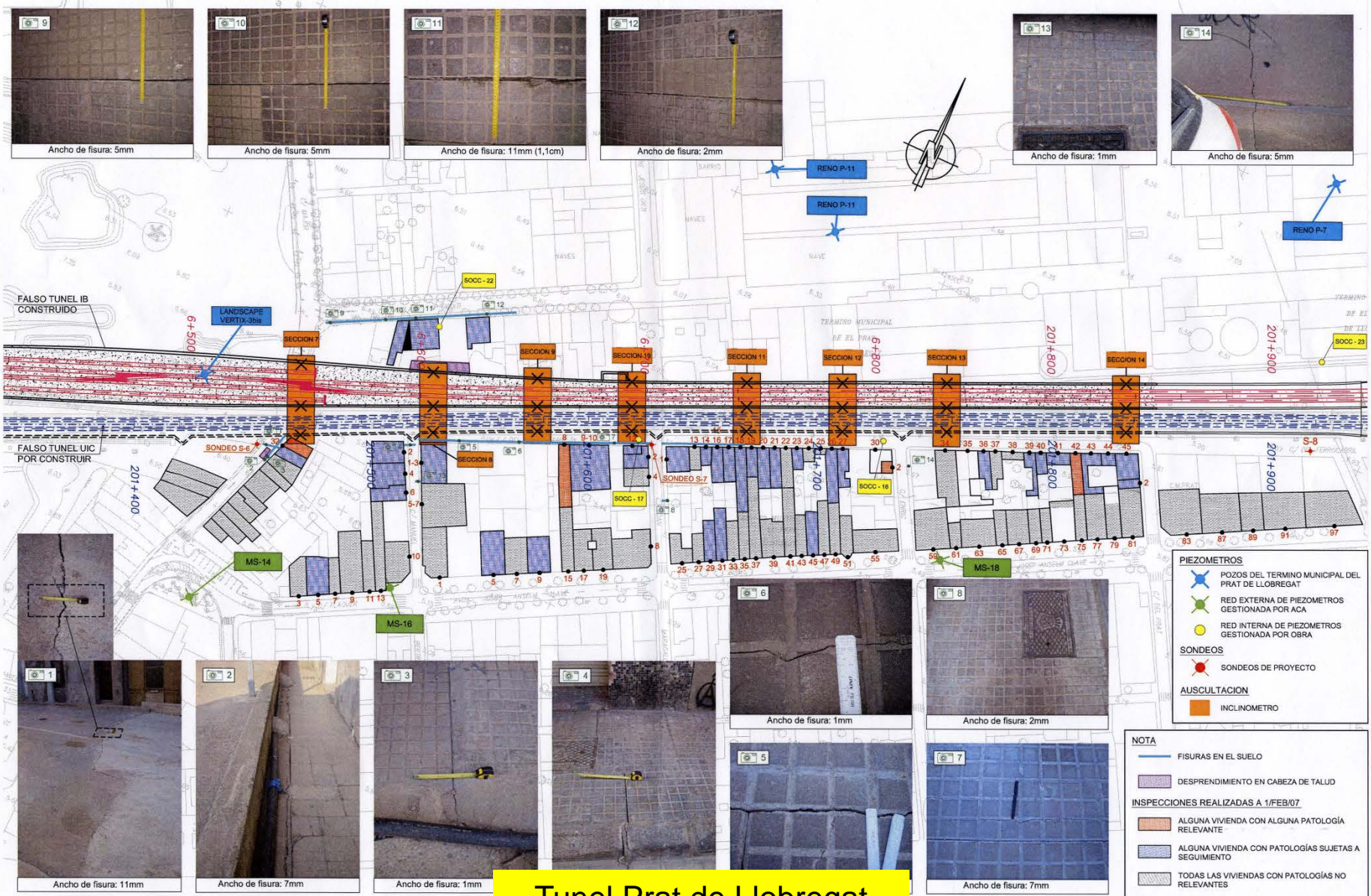
Métodos de control y reducción de movimientos



Túnel Prat de Llobregat



Métodos de control y reducción de movimientos

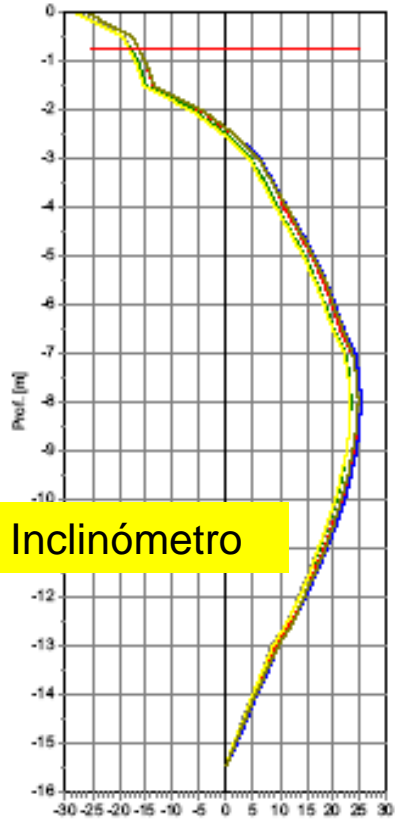


Tunel Prat de Llobregat

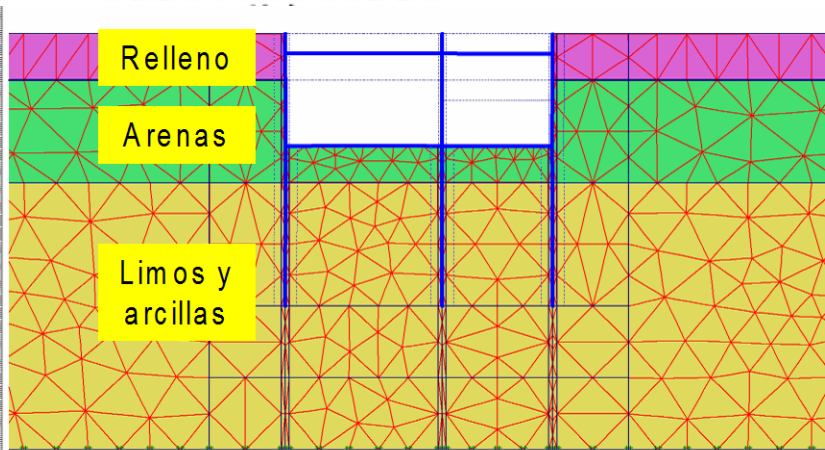
Métodos de control y reducción de movimientos



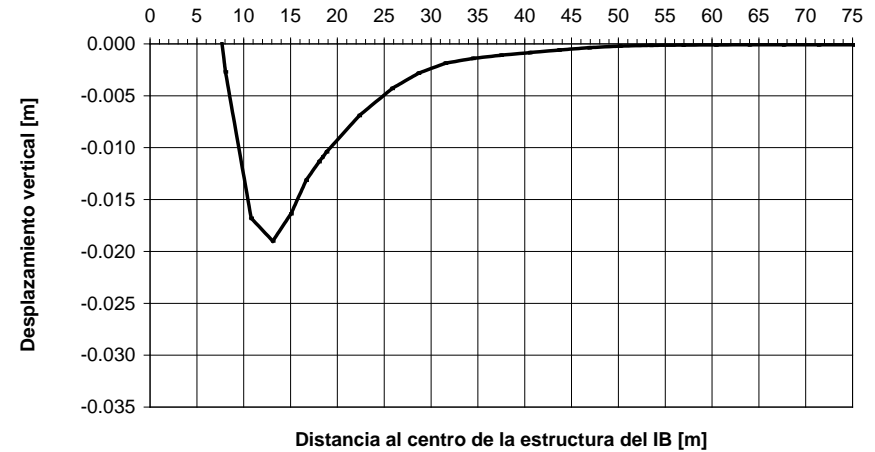
Métodos de control y reducción de movimientos



Inclinómetro

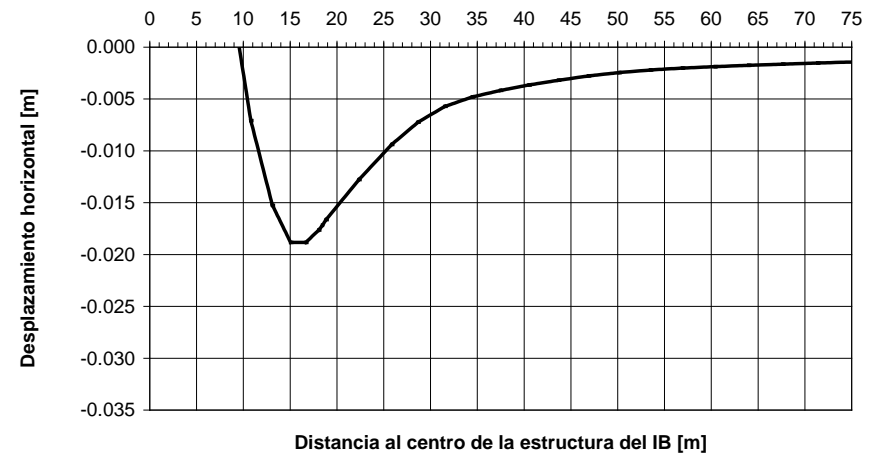


Desplazamientos verticales de la superficie del terreno en calle M. Bertrand (pk 201+525)



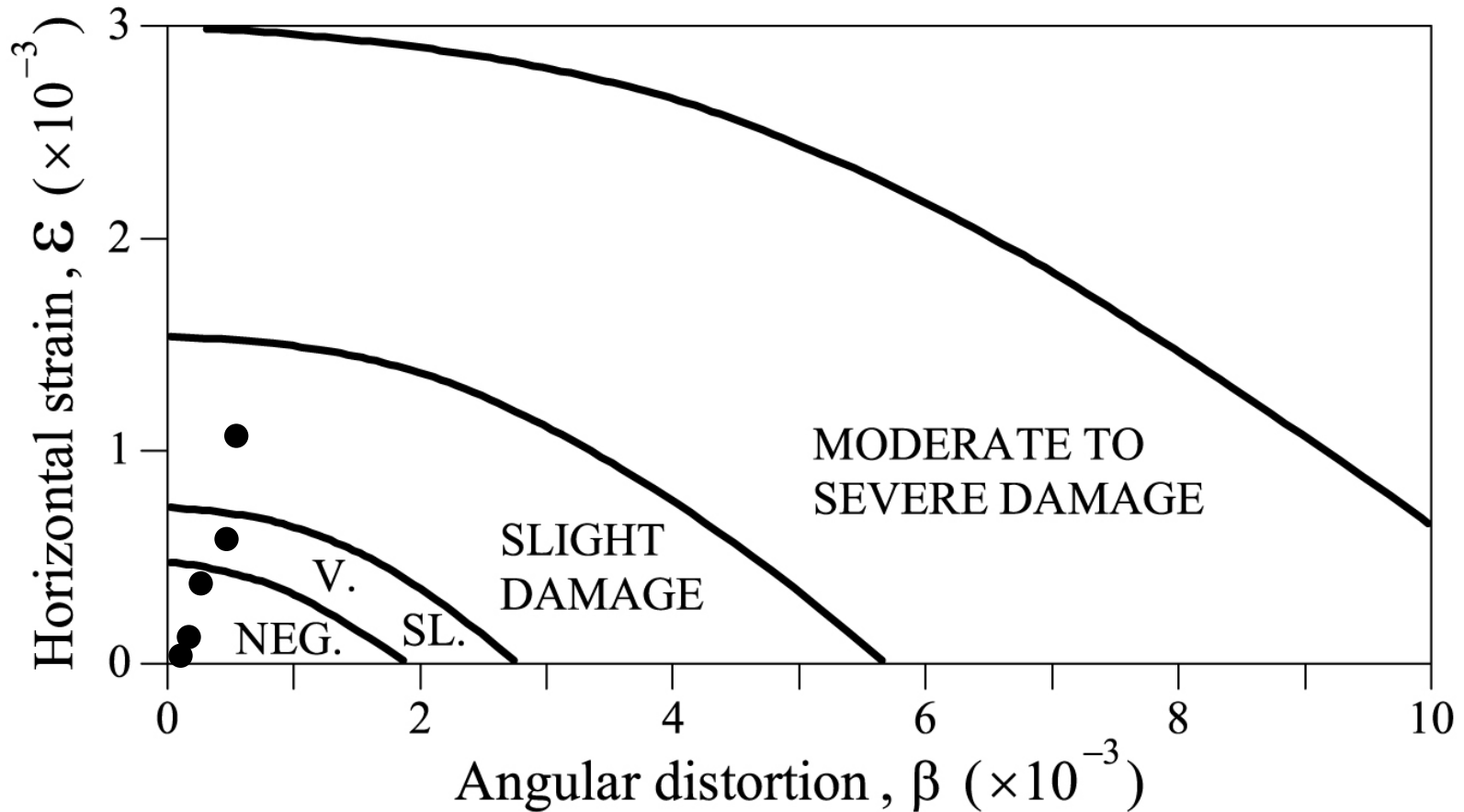
Asientos calculados

Desplazamientos horizontales de la superficie del terreno en calle M. Bertrand (pk 201+525)



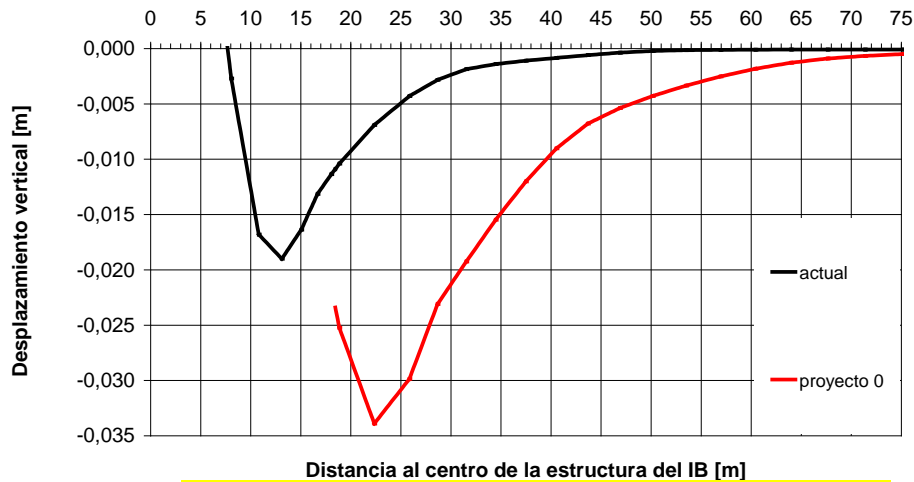
Movimientos horizontales calculados

Métodos de control y reducción de movimientos



Métodos de control y reducción de movimientos

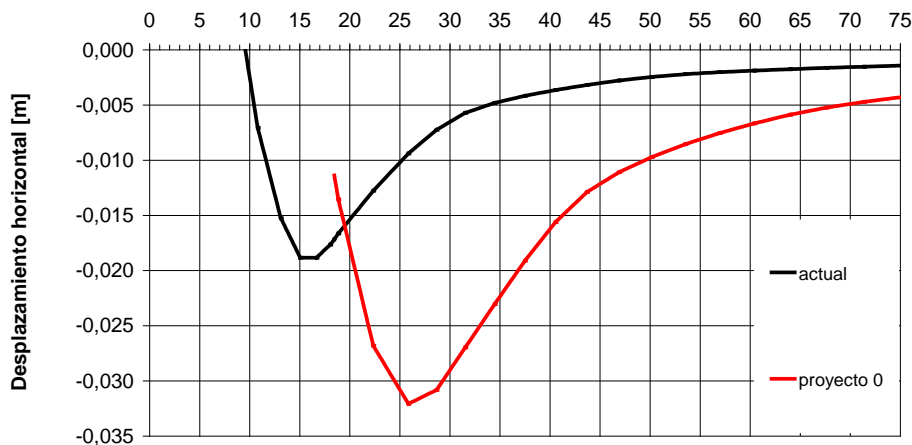
Desplazamientos verticales de la superficie del terreno en calle M. Bertrand (pk 201+525)



Distancia al centro de la estructura del IB [m]

Asientos calculados

Desplazamientos horizontales de la superficie del terreno en calle M. Bertrand (pk 201+525)

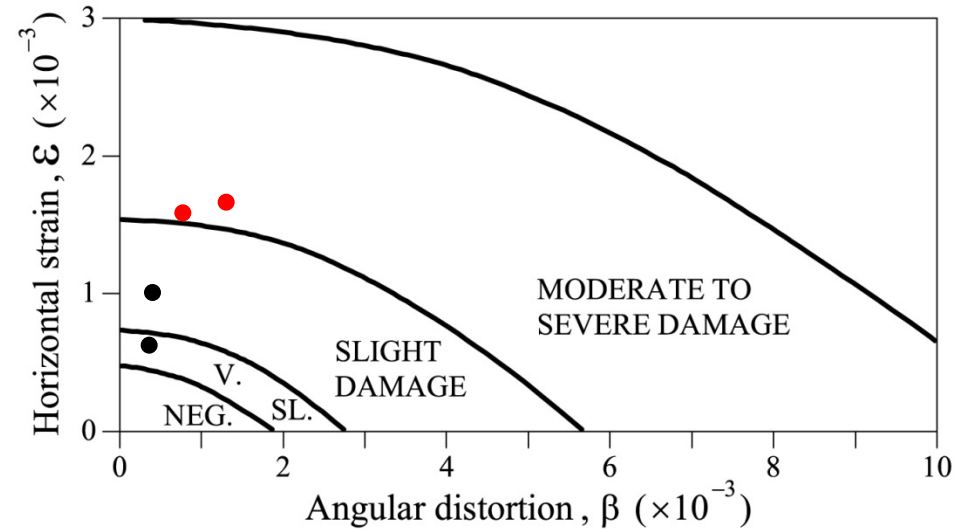


Distancia al centro de la estructura del IB [m]

Movimientos horizontales calculados

○ Proyecto 0

➤ Ninguna medida adicional



Métodos de control y reducción de movimientos

○ Posibles medidas a adoptar

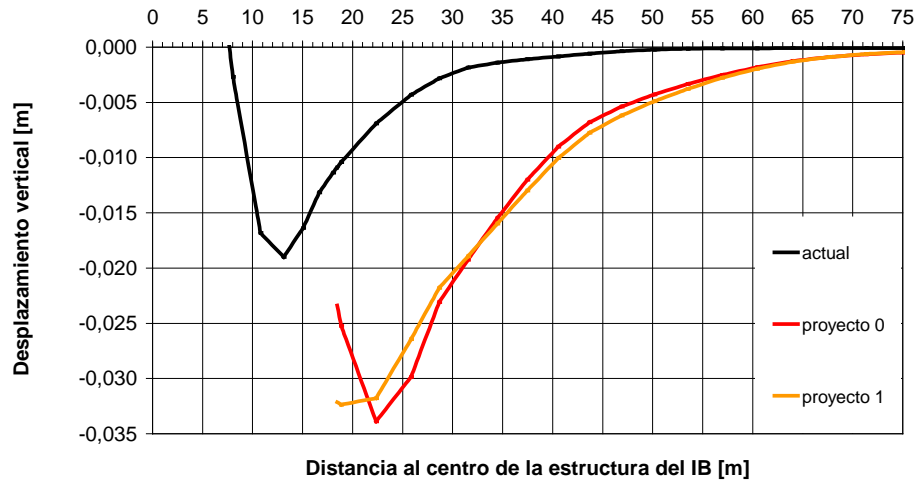
- Aumentar el espesor de la pantalla
- Colocar puntales adicionales
- Aumentar la longitud de la pantalla
- Empotrar la pantalla en un estrato rígido
- Instalar un apuntalamiento por debajo del nivel máximo de excavación (jet grouting)

○ Soluciones estudiadas

- Proyecto 0: Ninguna medida adicional
- Proyecto 1: Pantalla UIC2 de 1,20 m de espesor
- Proyecto 2: Proyecto 1 + Puntal temporal entre la cubierta y la solera
- Proyecto 3: Proyecto 2 + pie de pantalla hasta la cota -27
- Proyecto 4: Proyecto 2 + pie de pantalla hasta la cota -34
- Proyecto 5: Proyecto 3 + arriostramiento de jet grouting por debajo de la solera

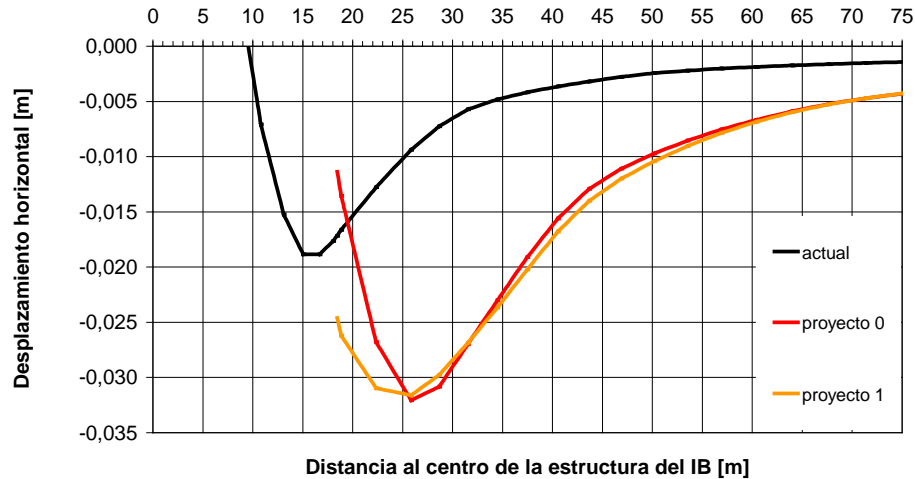
Métodos de control y reducción de movimientos

Desplazamientos verticales de la superficie del terreno en calle M. Bertrand (pk 201+525)



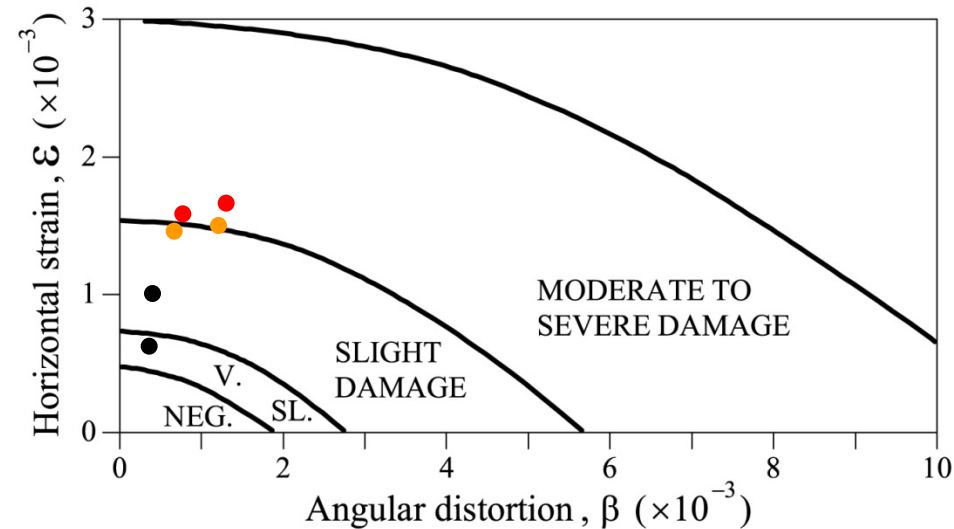
Asientos calculados

Desplazamientos horizontales de la superficie del terreno en calle M. Bertrand (pk 201+525)



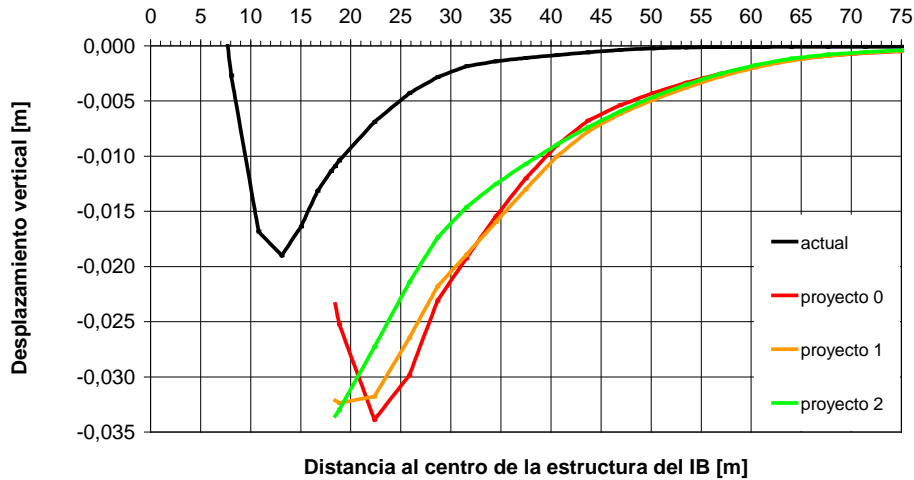
Movimientos horizontales calculados

- Proyecto 0
 - Ninguna medida adicional
- Proyecto 1
 - Espesor de pantalla: 1.2m



Métodos de control y reducción de movimientos

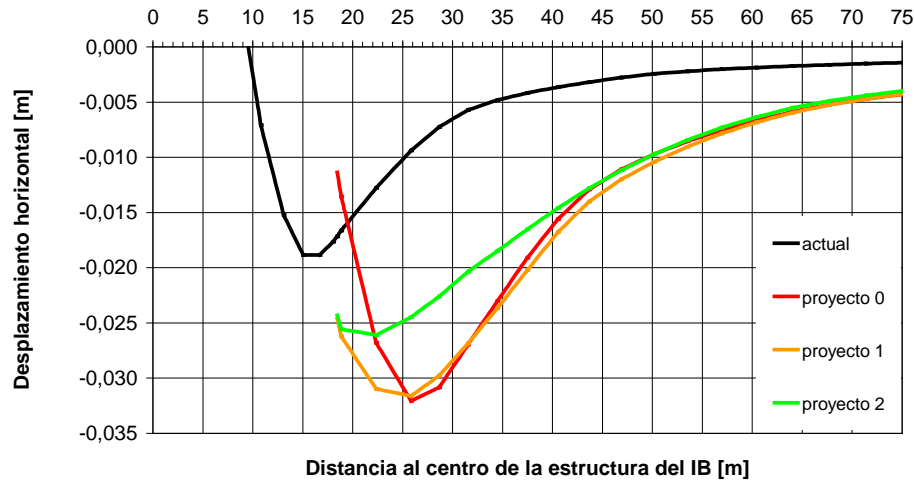
Desplazamientos verticales de la superficie del terreno en calle M. Bertrand (pk 201+525)



Distancia al centro de la estructura del IB [m]

Asientos calculados

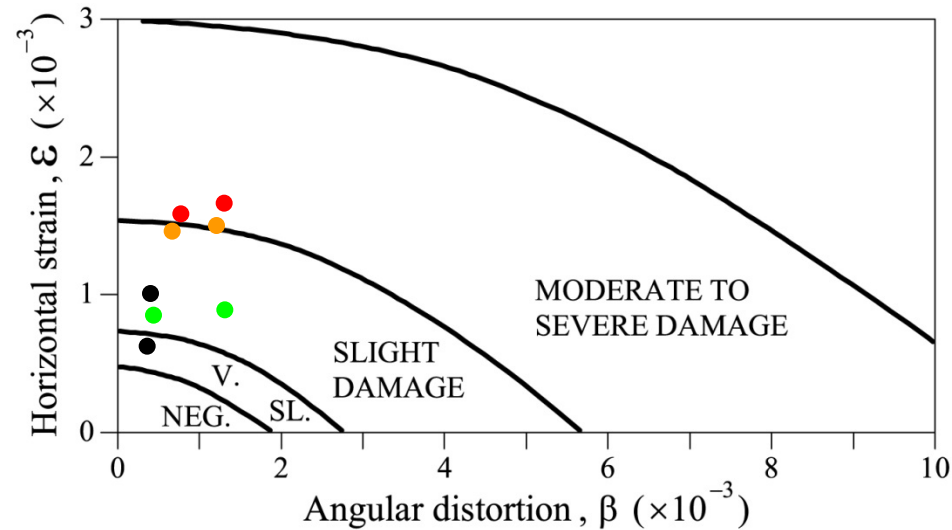
Desplazamientos horizontales de la superficie del terreno en calle M. Bertrand (pk 201+525)



Distancia al centro de la estructura del IB [m]

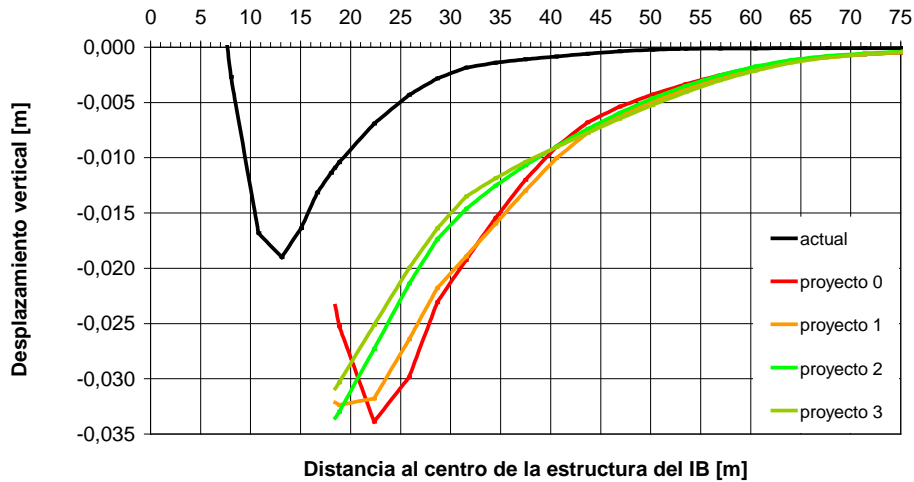
Movimientos horizontales calculados

- Proyecto 0
 - Ninguna medida adicional
- Proyecto 1
 - Espesor de pantalla: 1.2m
- Proyecto 2
 - Proyecto 1 + Puntal adicional



Métodos de control y reducción de movimientos

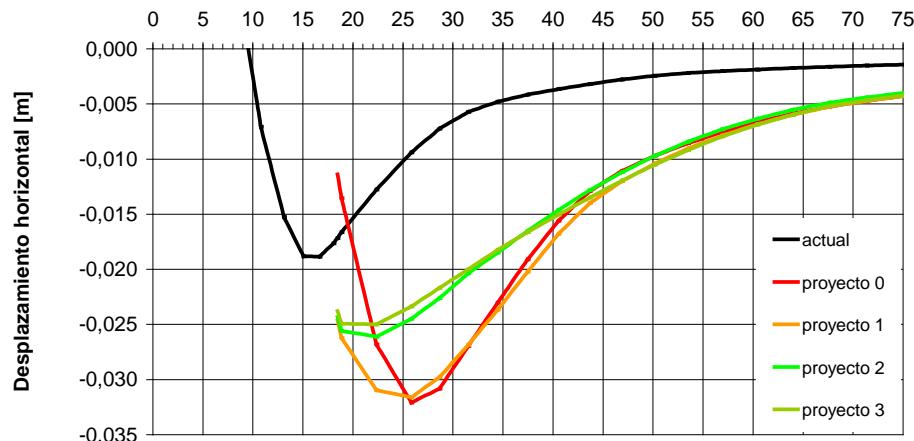
Desplazamientos verticales de la superficie del terreno en calle M. Bertrand (pk 201+525)



Distancia al centro de la estructura del IB [m]

Asientos calculados

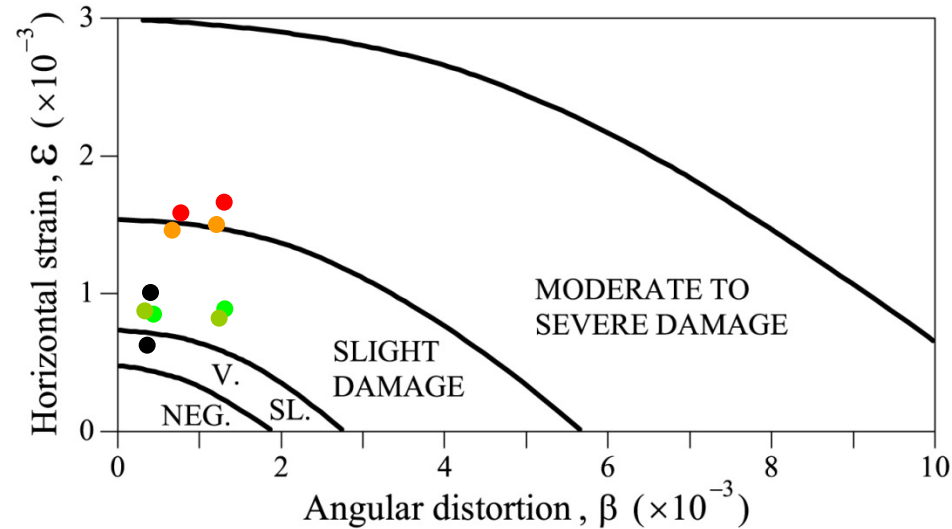
Desplazamientos horizontales de la superficie del terreno en calle M. Bertrand (pk 201+525)



Distancia al centro de la estructura del IB [m]

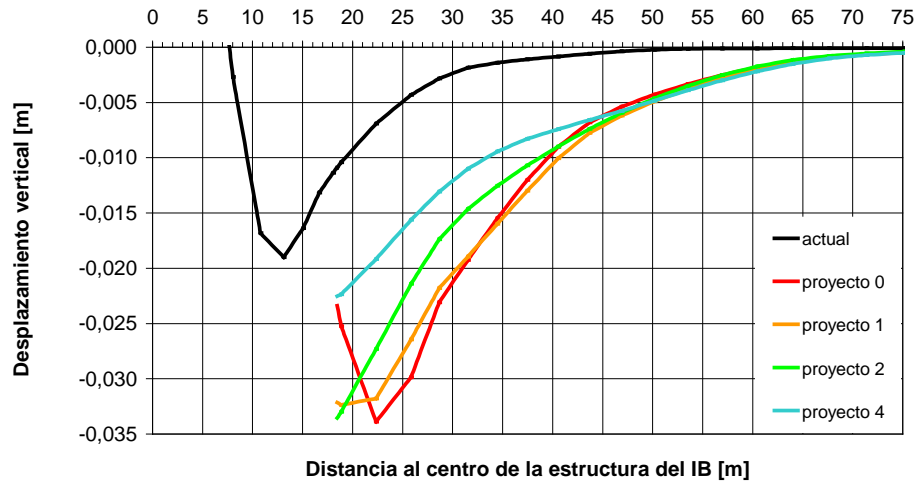
Movimientos horizontales calculados

- Proyecto 0
 - Ninguna medida adicional
- Proyecto 1
 - Espesor de pantalla: 1.2m
- Proyecto 2
 - Proyecto 1 + Puntal adicional
- Proyecto 3
 - Proyecto 2 + Pantalla cota -27



Métodos de control y reducción de movimientos

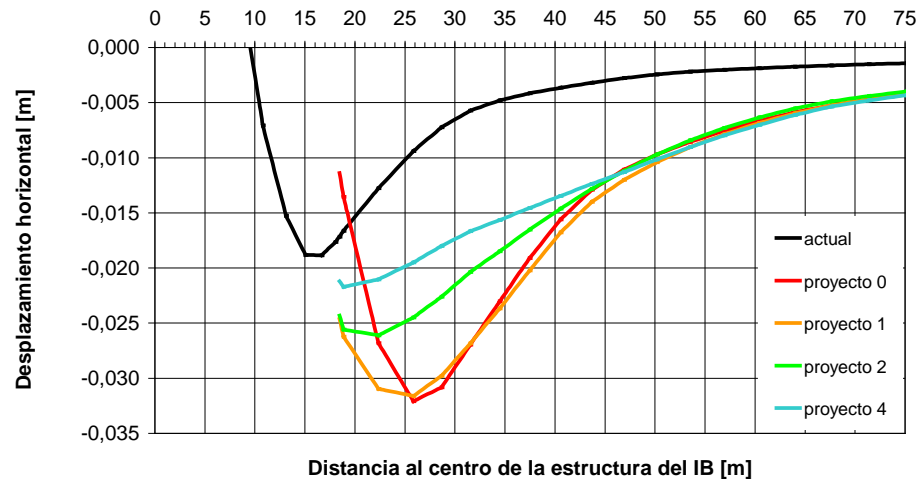
Desplazamientos verticales de la superficie del terreno en calle M. Bertrand (pk 201+525)



Distancia al centro de la estructura del IB [m]

Asientos calculados

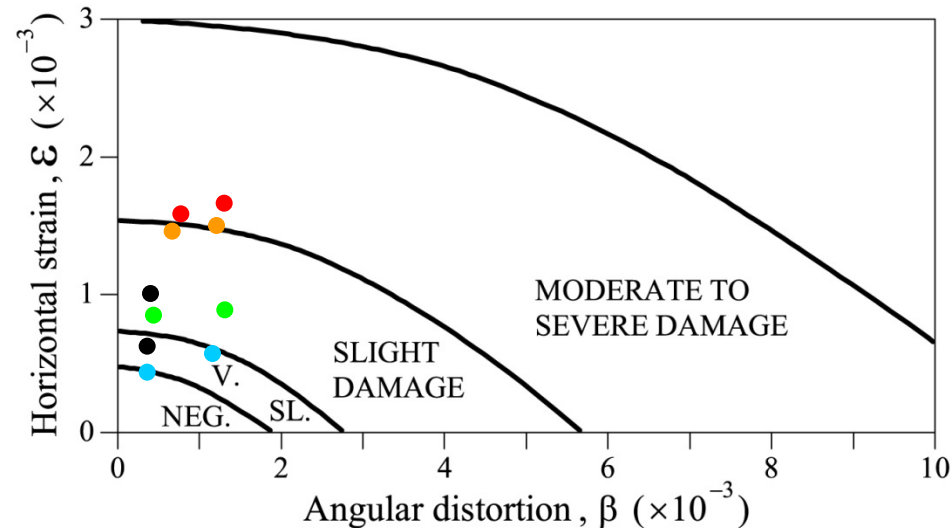
Desplazamientos horizontales de la superficie del terreno en calle M. Bertrand (pk 201+525)



Distancia al centro de la estructura del IB [m]

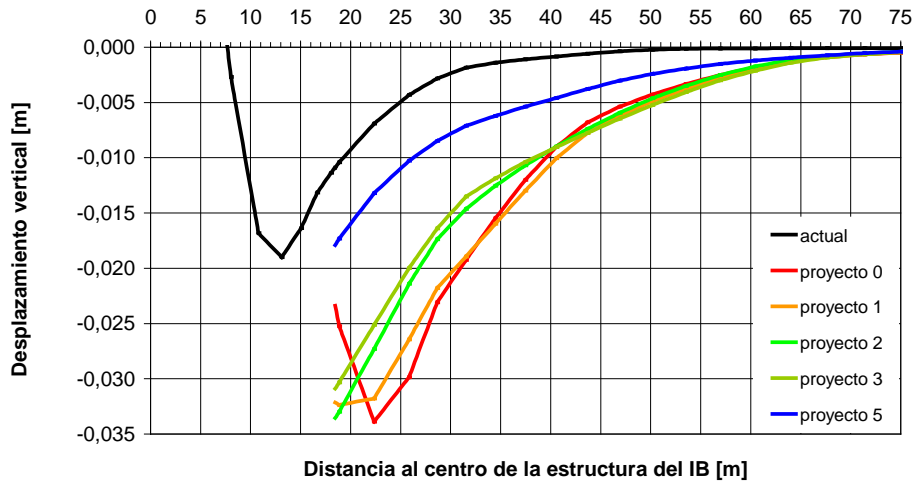
Movimientos horizontales calculados

- Proyecto 0
 - Ninguna medida adicional
- Proyecto 1
 - Espesor de pantalla: 1.2m
- Proyecto 2
 - Proyecto 1 + Puntal adicional
- Proyecto 4
 - Proyecto 2 + Pantalla empotrada estrato gravas (-34)



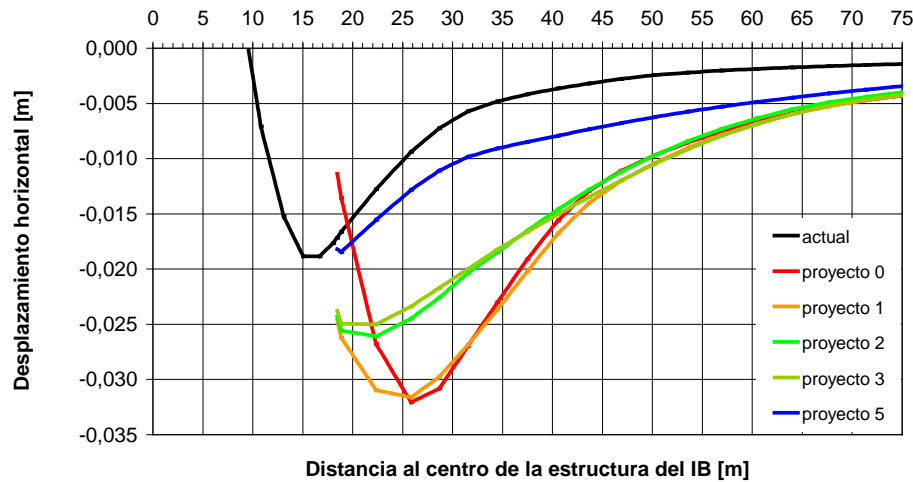
Métodos de control y reducción de movimientos

Desplazamientos verticales de la superficie del terreno en calle M. Bertrand (pk 201+525)



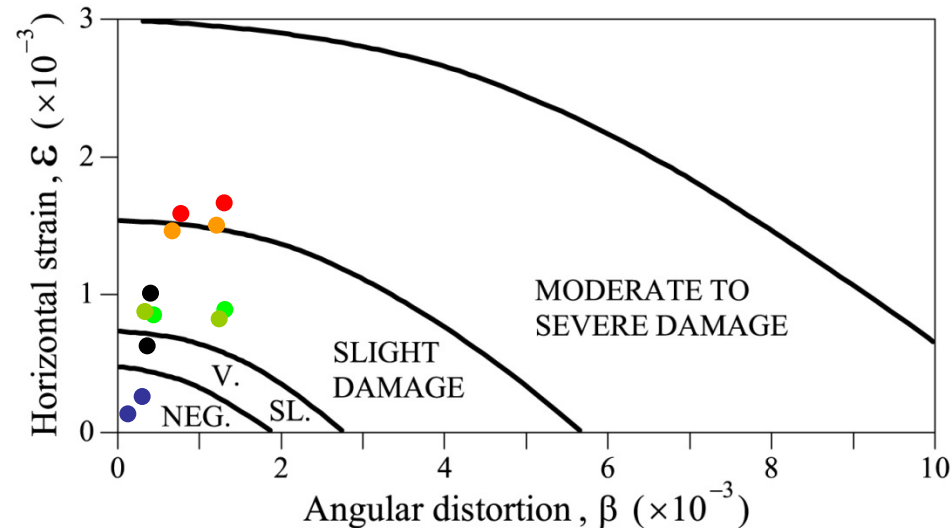
Asientos calculados

Desplazamientos horizontales de la superficie del terreno en calle M. Bertrand (pk 201+525)



Movimientos horizontales calculados

- Proyecto 0
 - Ninguna medida adicional
- Proyecto 1
 - Espesor de pantalla: 1.2m
- Proyecto 2
 - Proyecto 1 + Puntal adicional
- Proyecto 3
 - Proyecto 2 + Pantalla cota -27
- Proyecto 5
 - Proyecto 3 + Puntal de jet grouting

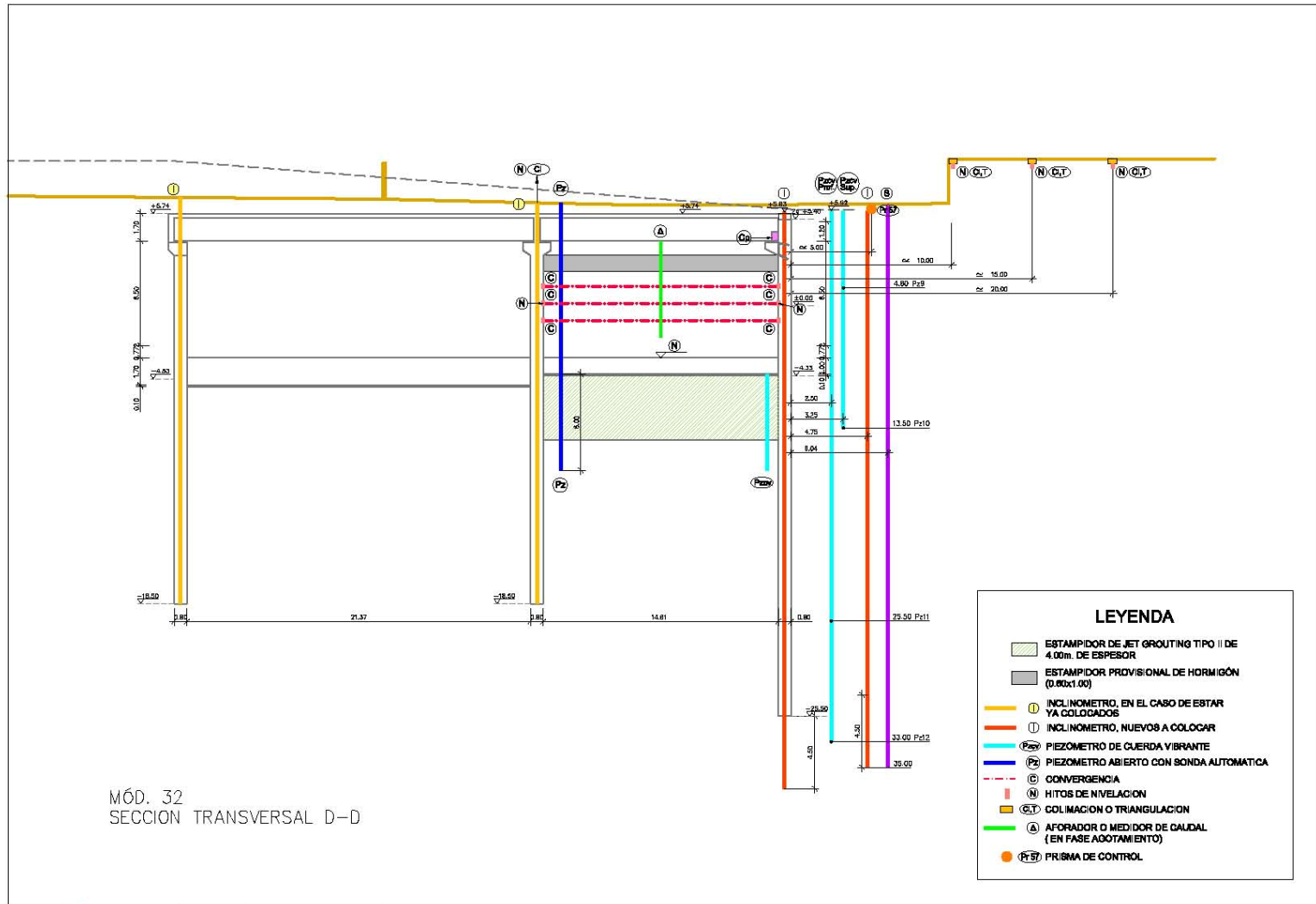


Métodos de control y reducción de movimientos



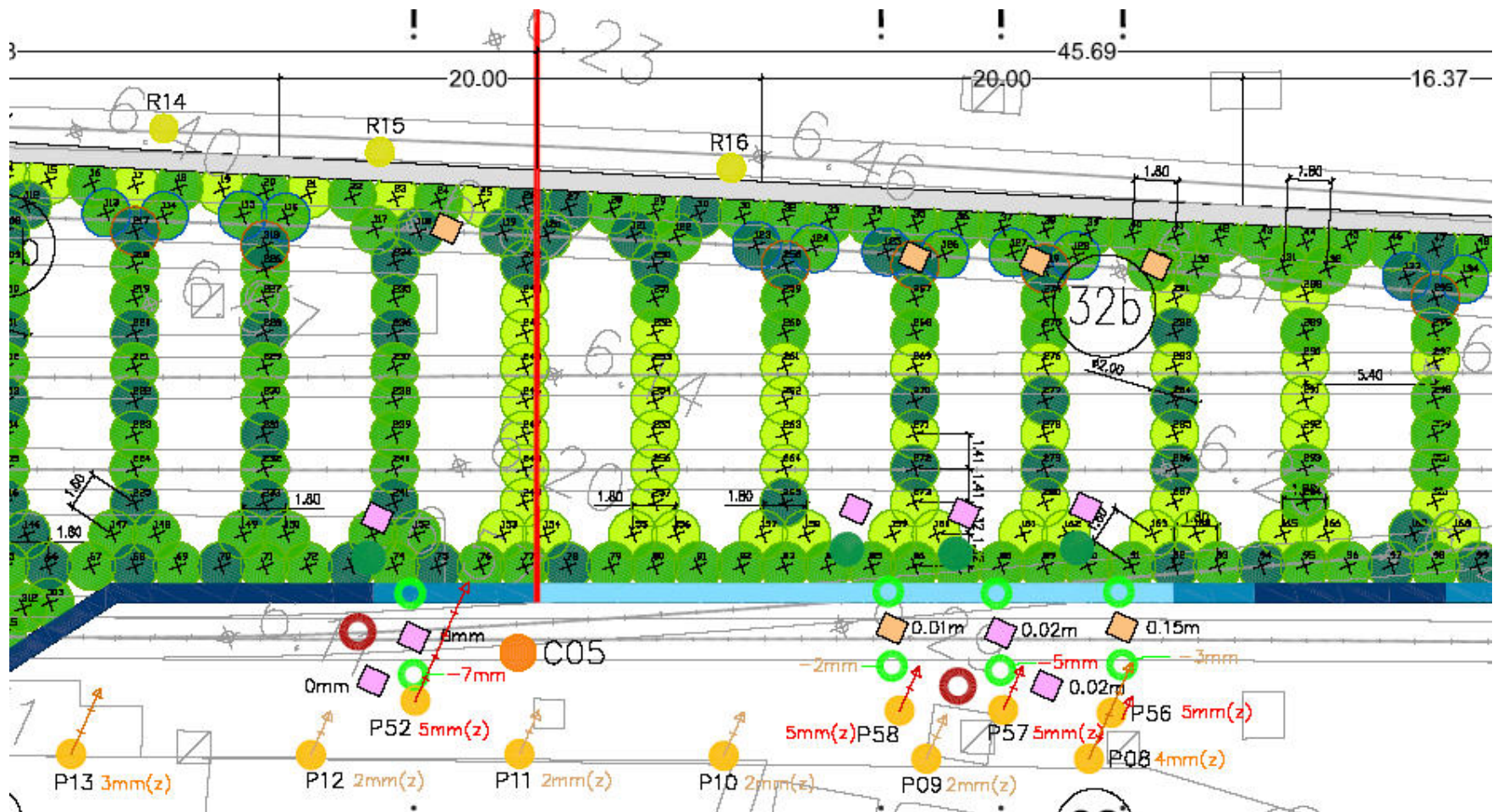
Secciones de prueba

Métodos de control y reducción de movimientos



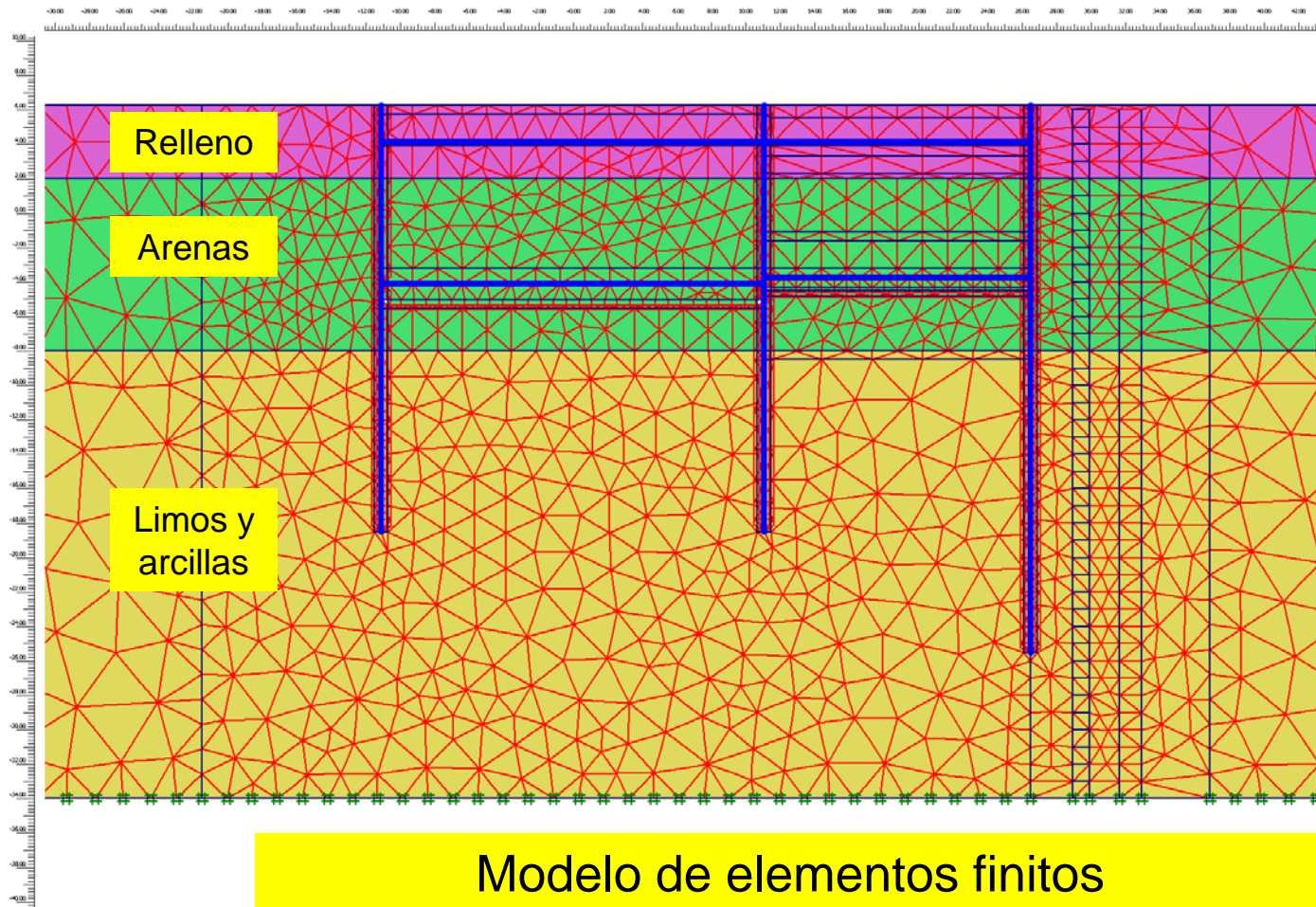
Sección de la solución adoptada

Métodos de control y reducción de movimientos



Arriostramiento mediante jet grouting por debajo de la solera

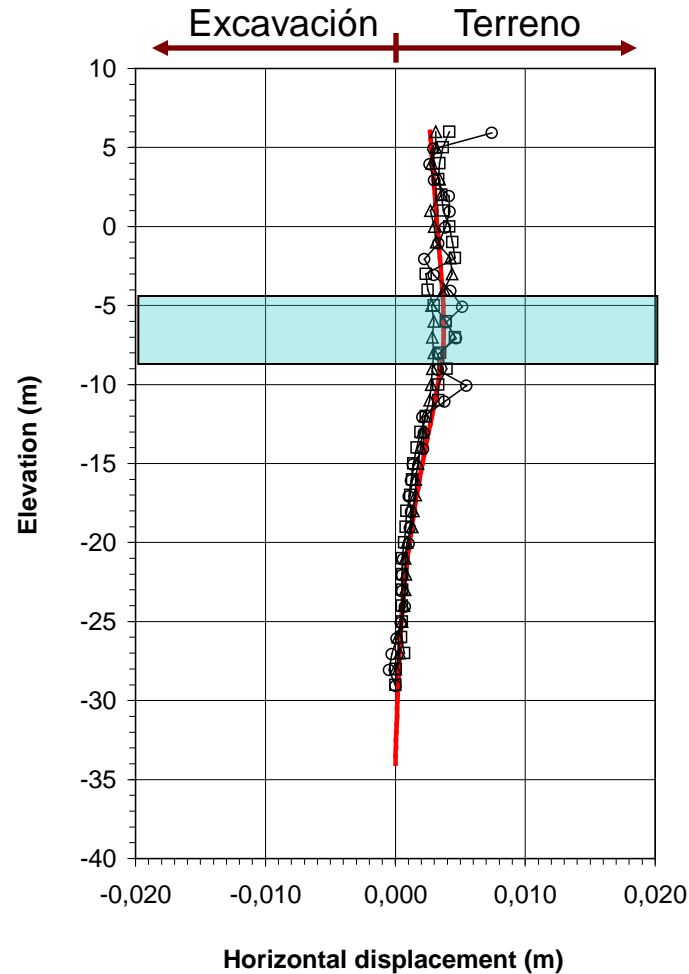
Métodos de control y reducción de movimientos



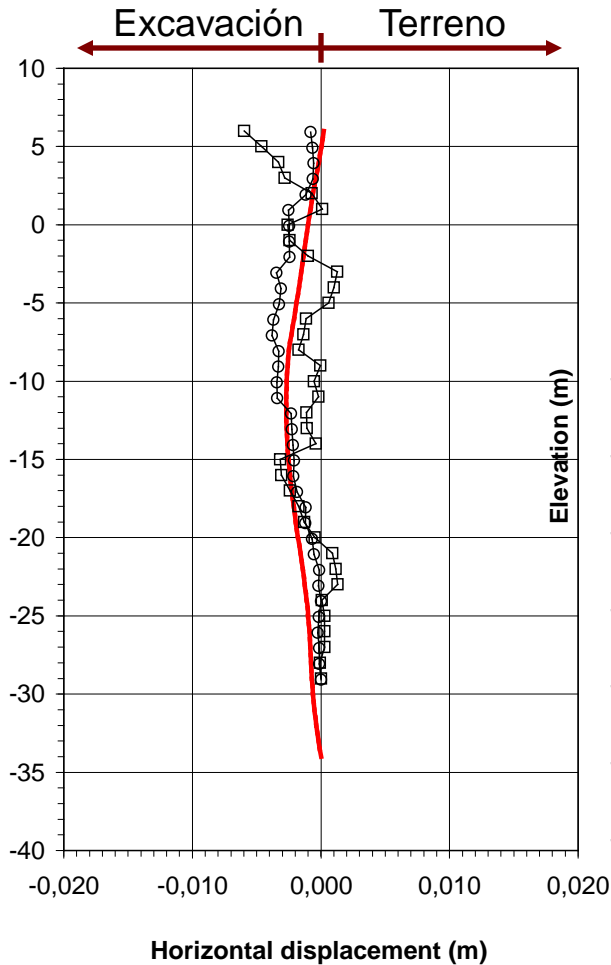
- modelo constitutivo para todos los estratos: “Hardening Soil model”

Métodos de control y reducción de movimientos

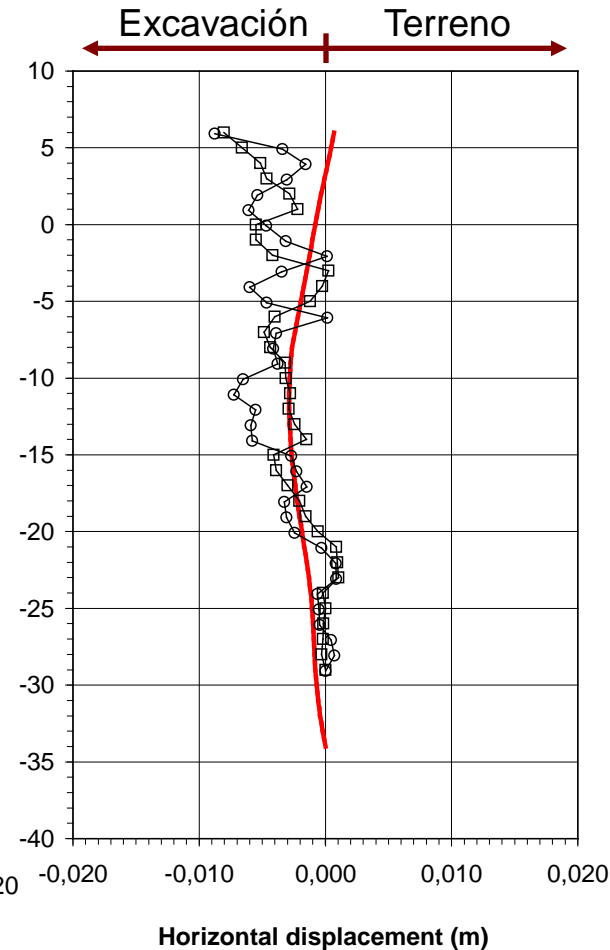
□ Observaciones y calibración del modelo. Inclínómetros en el terreno



Jet-grouting



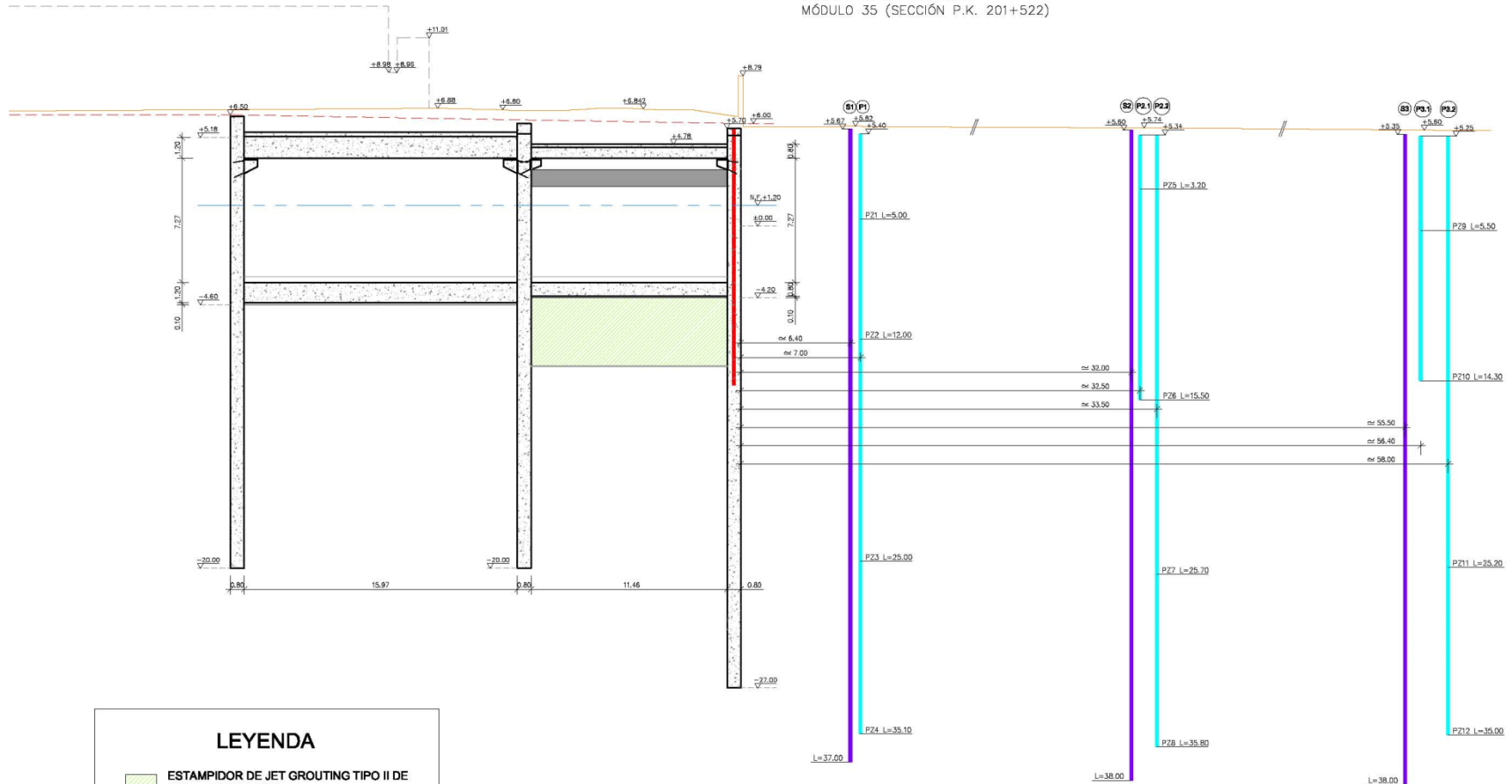
Excavación
cubierta-solera








Excavación total

Métodos de control y reducción de movimientos

CALLE MANUEL BERTRAND
MÓDULO 35 (SECCIÓN P.K. 201+522)



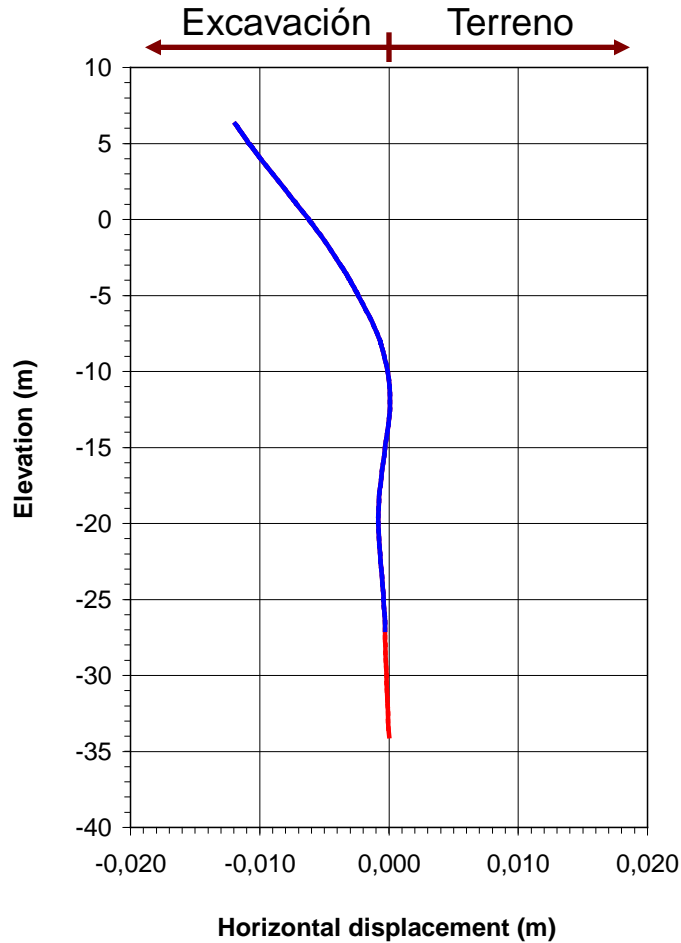
LEYENDA

-  ESTAMPIDOR DE JET GROUTING TIPO II DE 4.00m. DE ESPESOR
-  ESTAMPIDOR PROVISIONAL DE HORMIGÓN (0.60x1.00)
-  PIEZOMETRO DE CUERDA VIBRANTE
-  SLIDING DEFORMETER
-  INCLINOMETRO, NUEVOS A COLOCAR

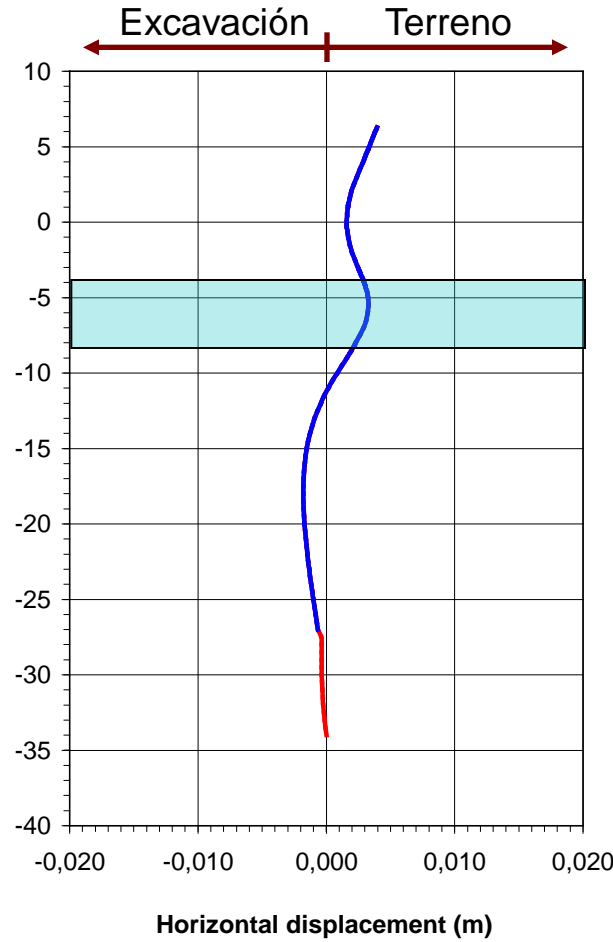
Sección calle Maragall

Métodos de control y reducción de movimientos

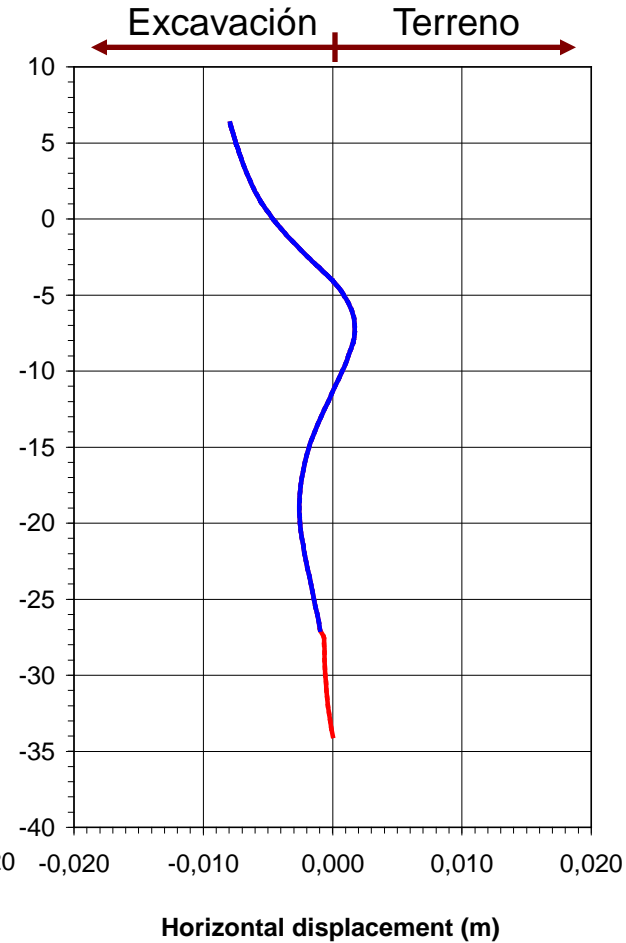
□ Predicciones del modelo calibrado. Inclínómetros en la pantalla



Excavación primer
túnel



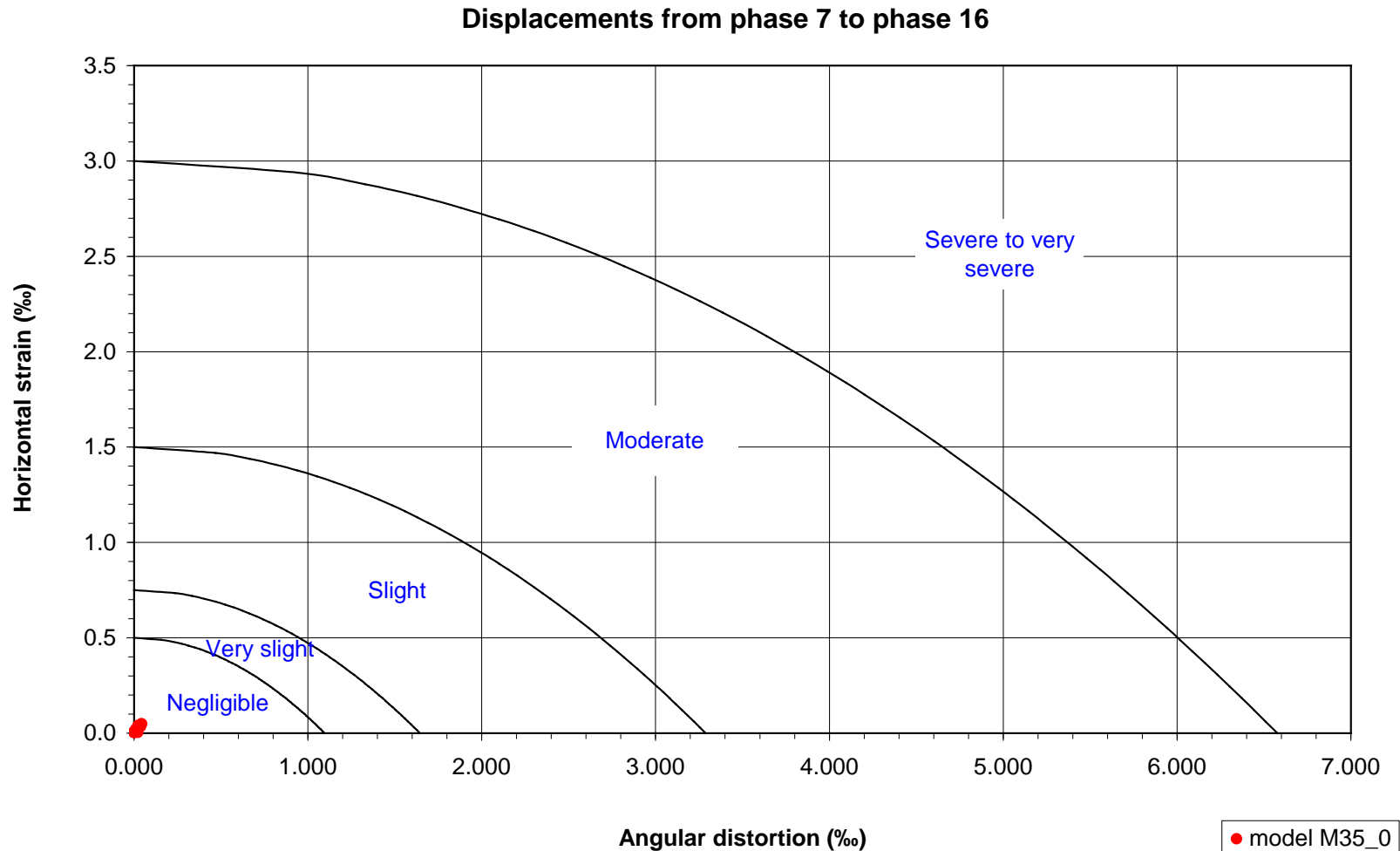
Excavación segundo
túnel



Excavación total

Métodos de control y reducción de movimientos

Estimación del daño potencial

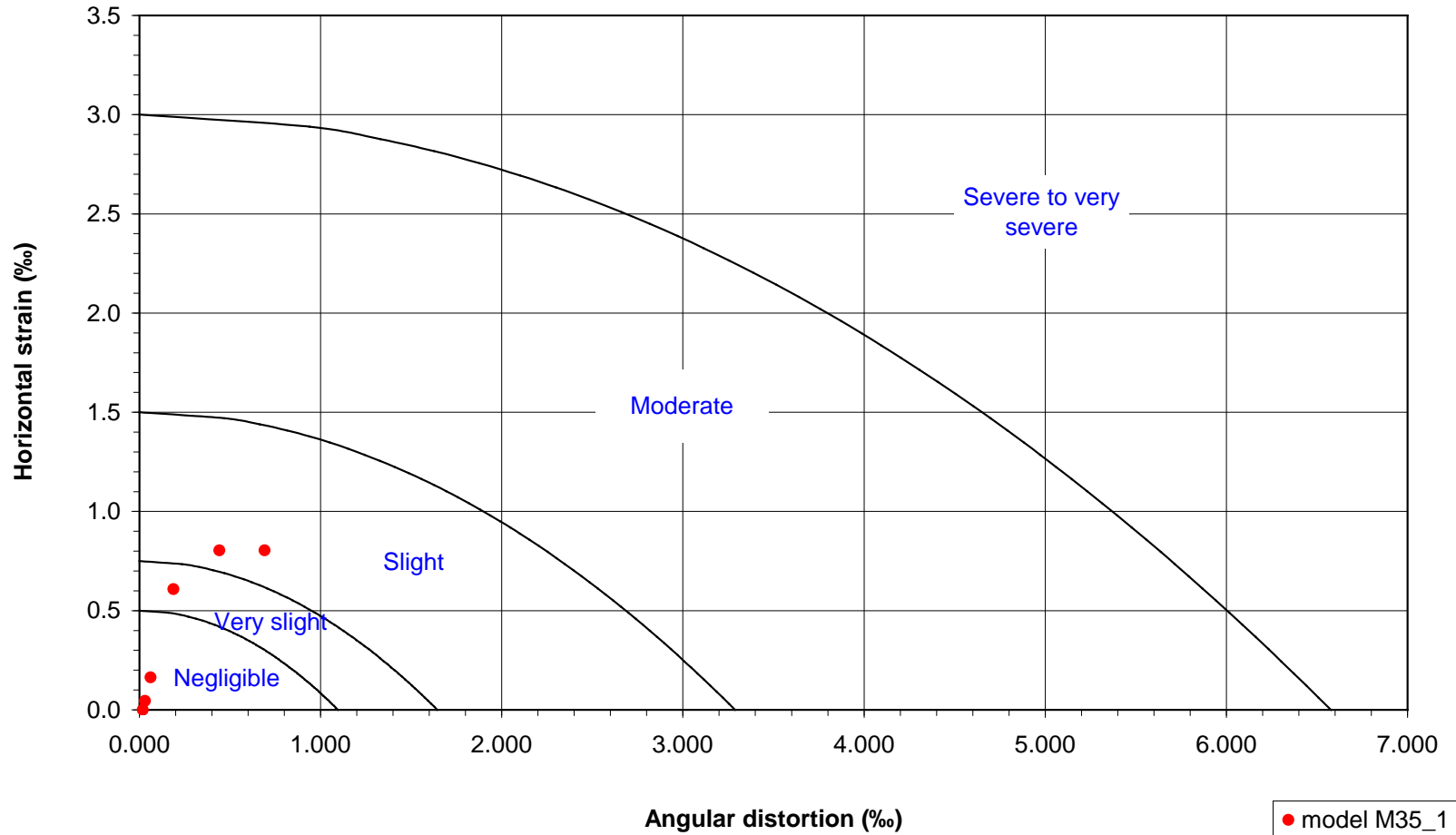


Excavación segundo tunel

Métodos de control y reducción de movimientos

Estimación del daño potencial

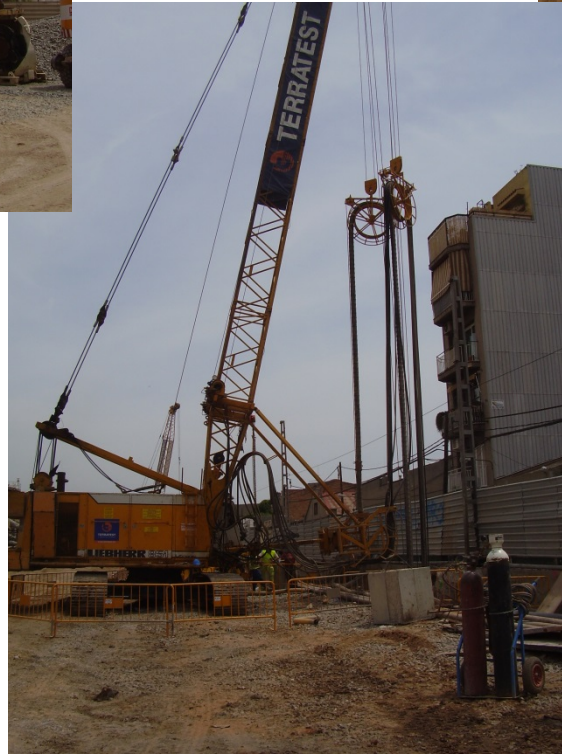
Displacements from phase 0 to phase 16



Excavación total

Métodos de control y reducción de movimientos

Construcción Túnel UIC

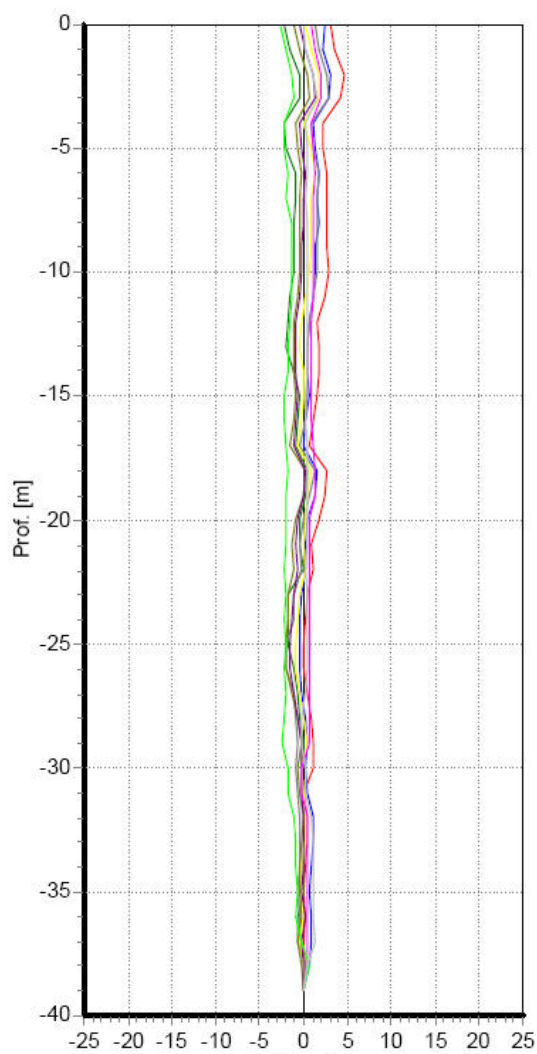


Métodos de control y reducción de movimientos

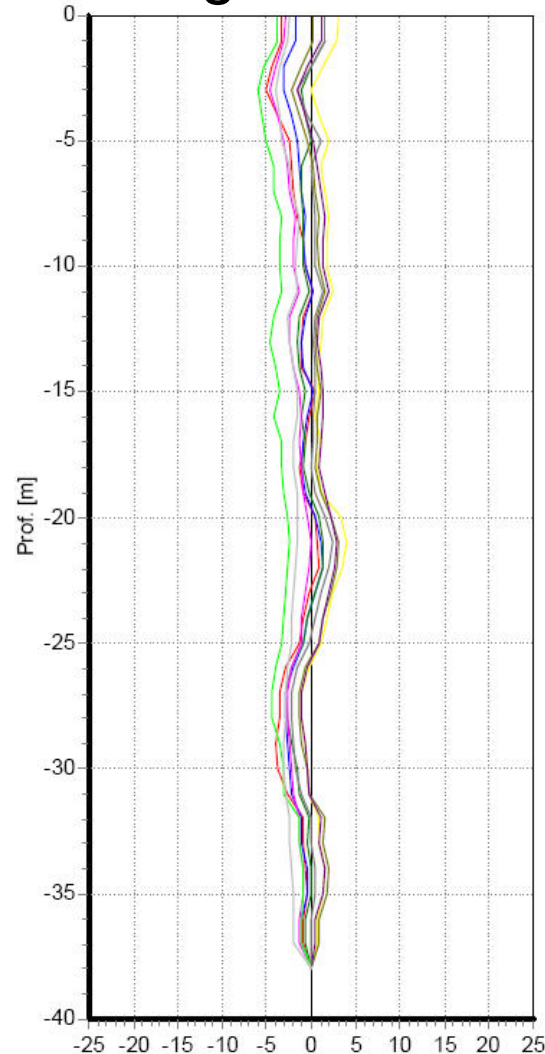


Métodos de control y reducción de movimientos

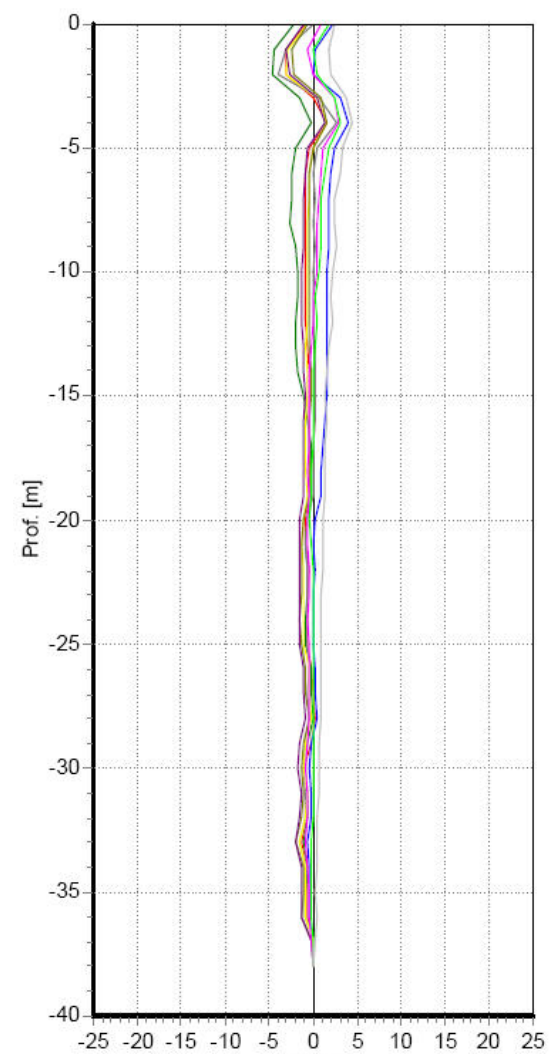
Observaciones. C/ Maragall



$d=7\text{m}$



$d=32\text{m}$



$d=55\text{m}$

Movimientos horizontales

Resumen y conclusiones

- La ejecución de una excavación al abrigo de muros pantalla produce, inevitablemente, **movimientos** en la pantalla y en el terreno circundante . La **tolerancia** sobre el nivel de deformaciones aceptable (en condiciones urbanas) ha disminuido de forma notable en los últimos años
- Los **mecanismos de deformación** del terreno debido a la excavación están bien identificados. Las **deformaciones horizontales** son mayoritariamente de tracción, más desfavorable que en el caso de excavación de túneles
- Existe una **amplia experiencia previa** documentada que proporciona información muy útil para estimar los posibles movimientos debidos a la excavación y los daños potenciales sobre estructuras vecinas
- Los métodos de análisis por **elementos finitos** (o diferencias finitas) se van generalizando cada vez más para el cálculo de pantallas y de los movimientos que producen. Estos métodos proporcionan una perspectiva más completa del problema pero requieren **validación y calibración**.
- Existe un importante **arsenal de procedimientos constructivos** que permiten **reducir** los movimientos causados por la excavación hasta los límites deseados.
- La utilización sistemática de la **gestión de riesgo** introduce elementos de objetividad y transparencia (pero no debe aplicarse a ciegas!)