

Mejoramiento de suelos aplicado a los aproches de puentes

César DAVIN

Gerente General Menard Colombia

cesar.davin@menard-mail.com



Asociación de Ingenieros
Estructurales de Antioquia



SIMPOSIO INTERNACIONAL
DE INGENIERÍA DE PUENTES
SIIP 2025



Agenda

- 01 Generalidades sobre el mejoramiento de suelos**

- 02 Técnicas y metodologías aplicadas en aproches de puentes**



De Medellín para el mundo: Conectando saberes, construyendo futuro



01

Generalidades sobre el mejoramiento de suelos



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



¿ En qué consiste es el mejoramiento de suelos?



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



¿ En qué consiste es el mejoramiento de suelos?

Mejoramiento de las propiedades de los suelos pobres para obtener condiciones geotécnicas óptimas para soportar estructuras de manera eficiente y efectiva.



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



¿ En qué consiste es el mejoramiento de suelos?

Mejoramiento de las propiedades de los suelos pobres, permitiendo construir de manera superficial (y así evitar cimentaciones profundas tipo pilotes).



De Medellín para el mundo: Conectando saberes, construyendo futuro



¿ Por qué necesitar mejoramiento de suelos?

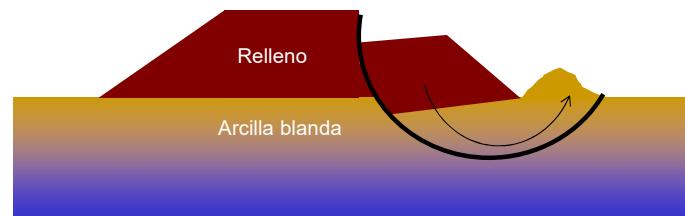
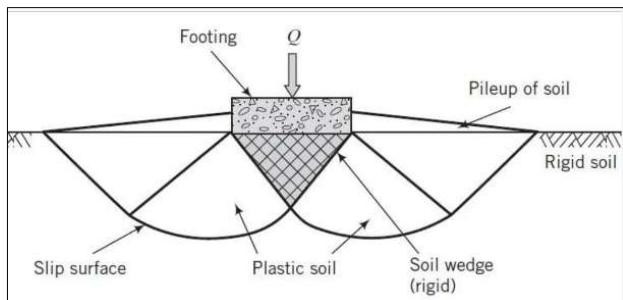
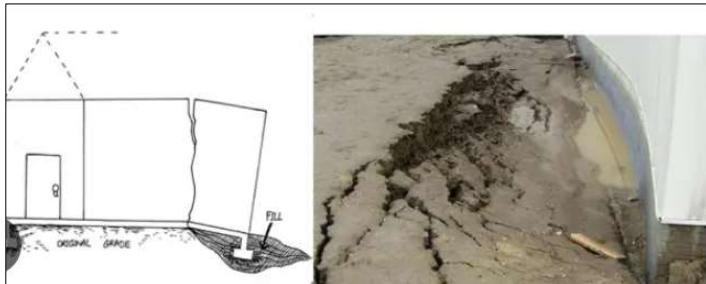


De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



¿ Por qué necesitar mejoramiento de suelos?

1. Problemas de capacidad portante / estabilidad / rigidez



¿ Por qué necesitar mejoramiento de suelos?

2. Asentamientos altos (totales / diferenciales)



Escuela de Pointe-à-Pitre,
unos días después de su construcción



Escuela de Pointe-à-Pitre,
10 años después

¿ Por qué necesitar mejoramiento de suelos?

3. Riesgo de licuación



¿ Por qué necesitar mejoramiento de suelos?

1. Problemas de capacidad portante / estabilidad / rigidez

Problemáticas estáticas

2. Asentamientos altos (totales / diferenciales)

Problemática dinámica

3. Riesgo de licuación



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



¿ Por qué necesitar mejoramiento de suelos?

1. Problemas de capacidad portante / estabilidad / rigidez

Problemáticas estáticas

2. Asentamientos altos (totales / diferenciales)

Problemática dinámica

3. Riesgo de licuación

En realidad, la problemática se resume a los criterios de recepción de cada proyecto (especificaciones).



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



¿ Por qué necesitar mejoramiento de suelos?

1. Problemas de capacidad portante / estabilidad

Punzonamiento $FS = \frac{(\Pi+2).Cu}{\sigma'v}$

Falla circular de talud Abaco de Taylor
Elementos Finitos

2. Asentamientos altos (totales / diferenciales) $\rightarrow \Delta h = \sigma'v * (H/E_{edo})$

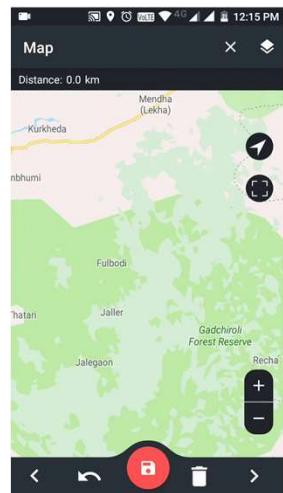
3. Riesgo de licuación \rightarrow Factor de Seguridad frente al riesgo de licuación: $FS = \frac{CRR_{7.5} \times MSF}{CSR} \times K_\sigma$
 \rightarrow Asentamientos sismo-inducidos



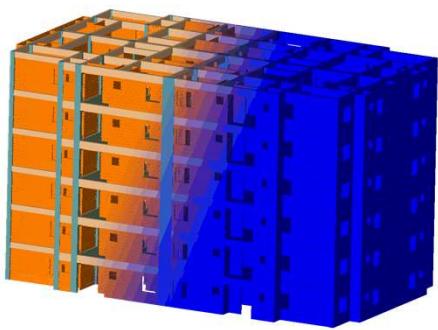
De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



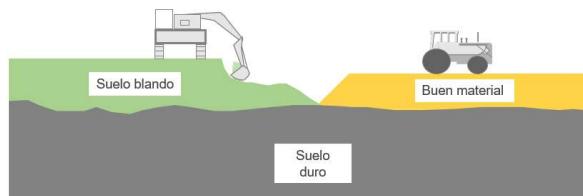
Soluciones tradicionales para mitigar estas problemáticas



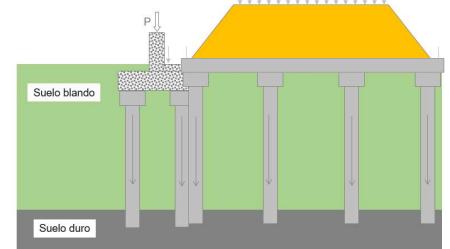
Cambiar la ubicación del proyecto



Sobre diseñar la estructura



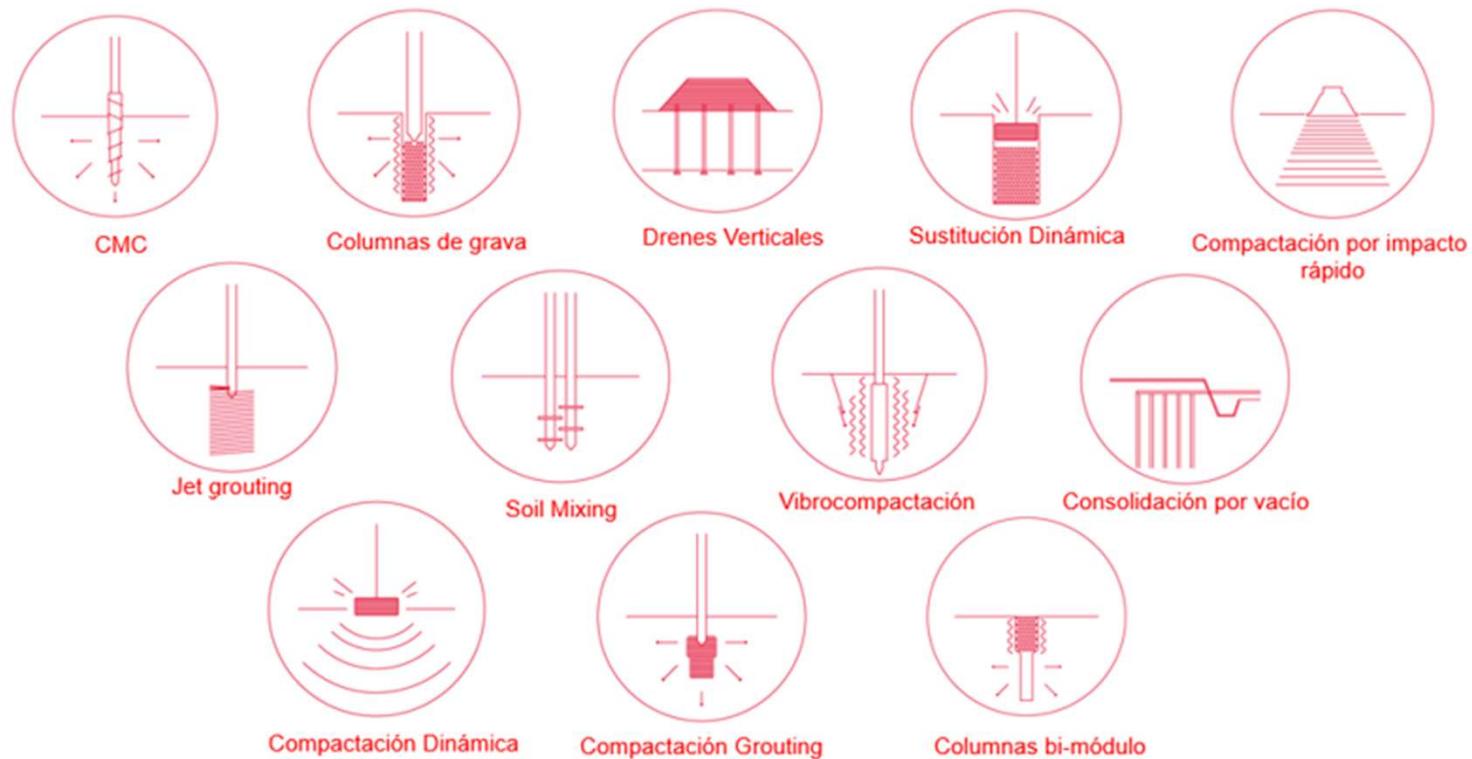
Sustituir el suelo blando



Hacer fundaciones profundas (pilotes)



El mejoramiento de suelos como alternativa



De Medellín para el mundo: Conectando saberes, construyendo futuro



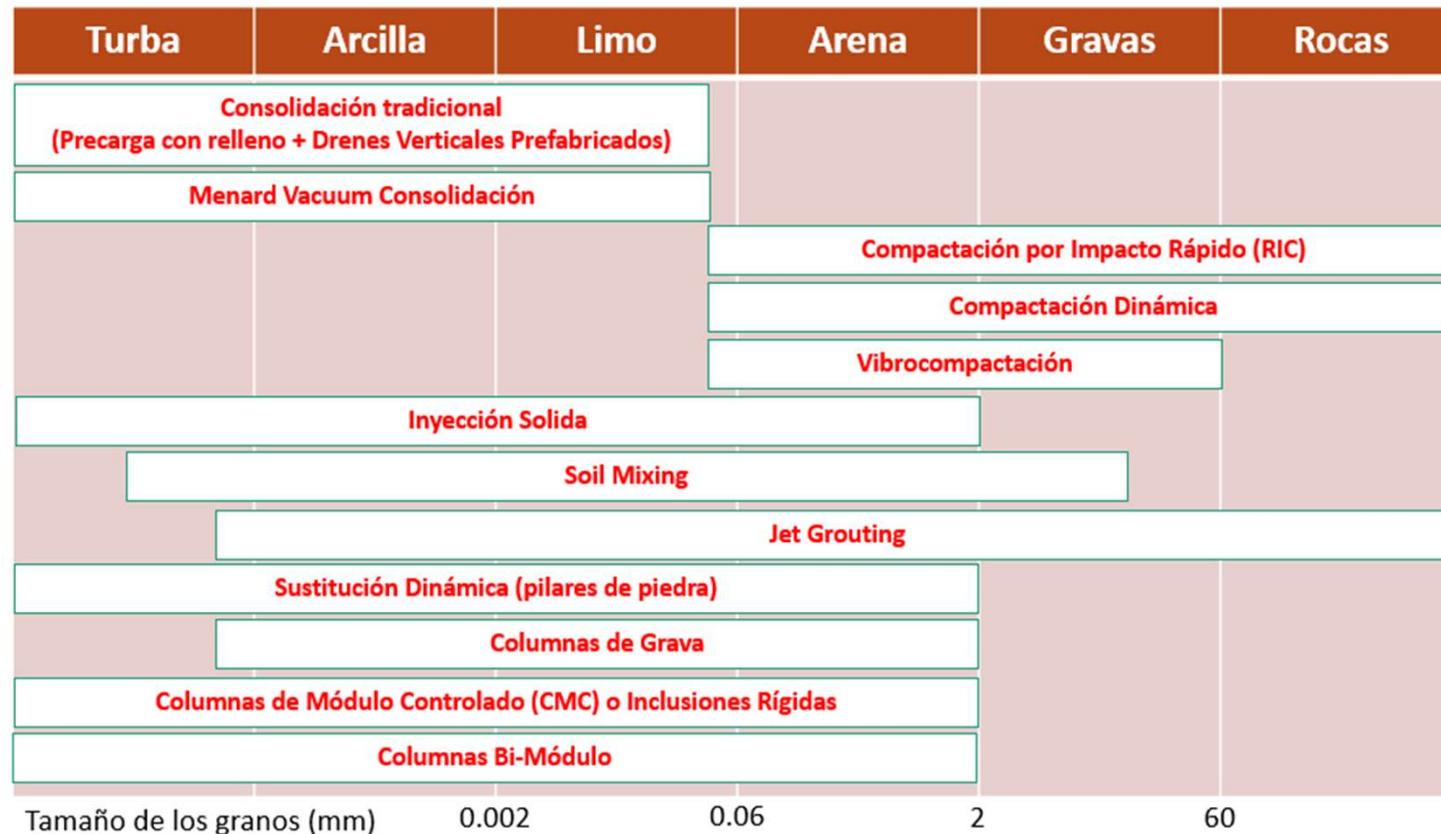
A. Técnicas para mitigar problemáticas estáticas (baja capacidad portante / asentamientos altos)



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



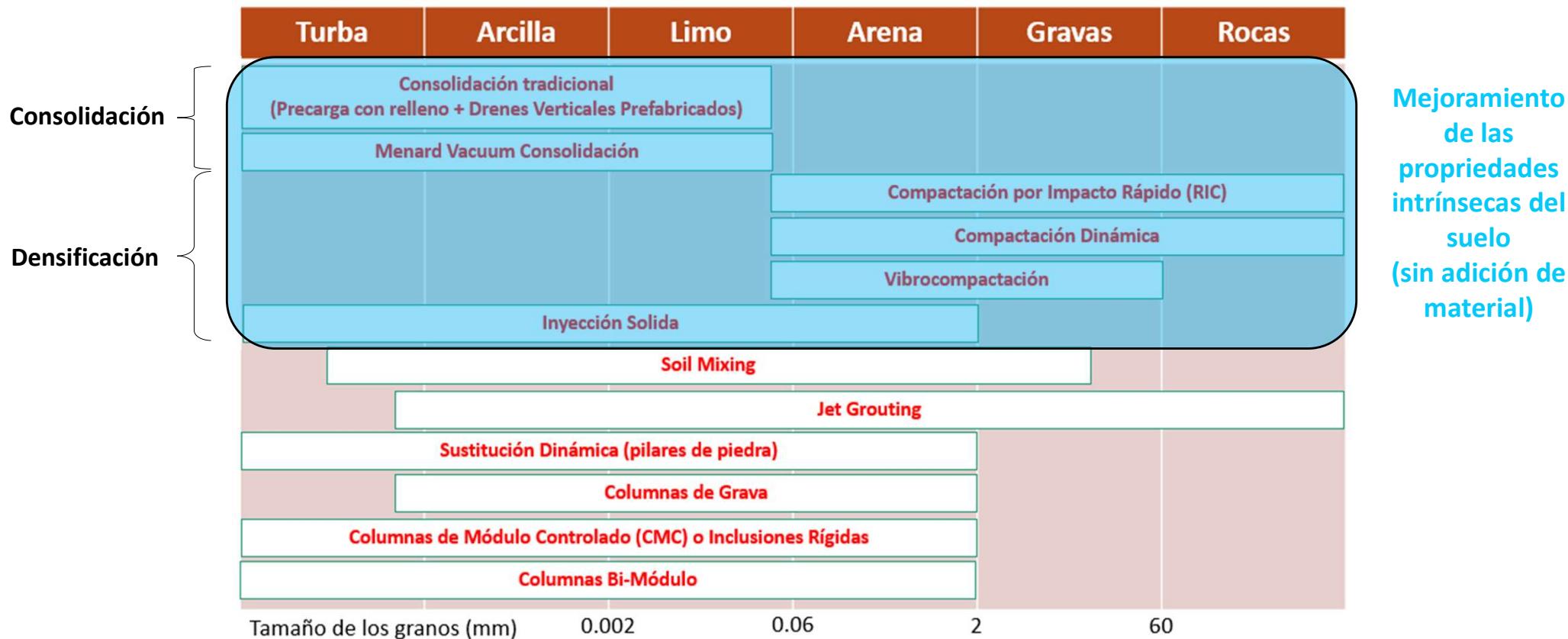
A. Técnicas para mitigar problemáticas estáticas (baja capacidad portante / asentamientos altos)



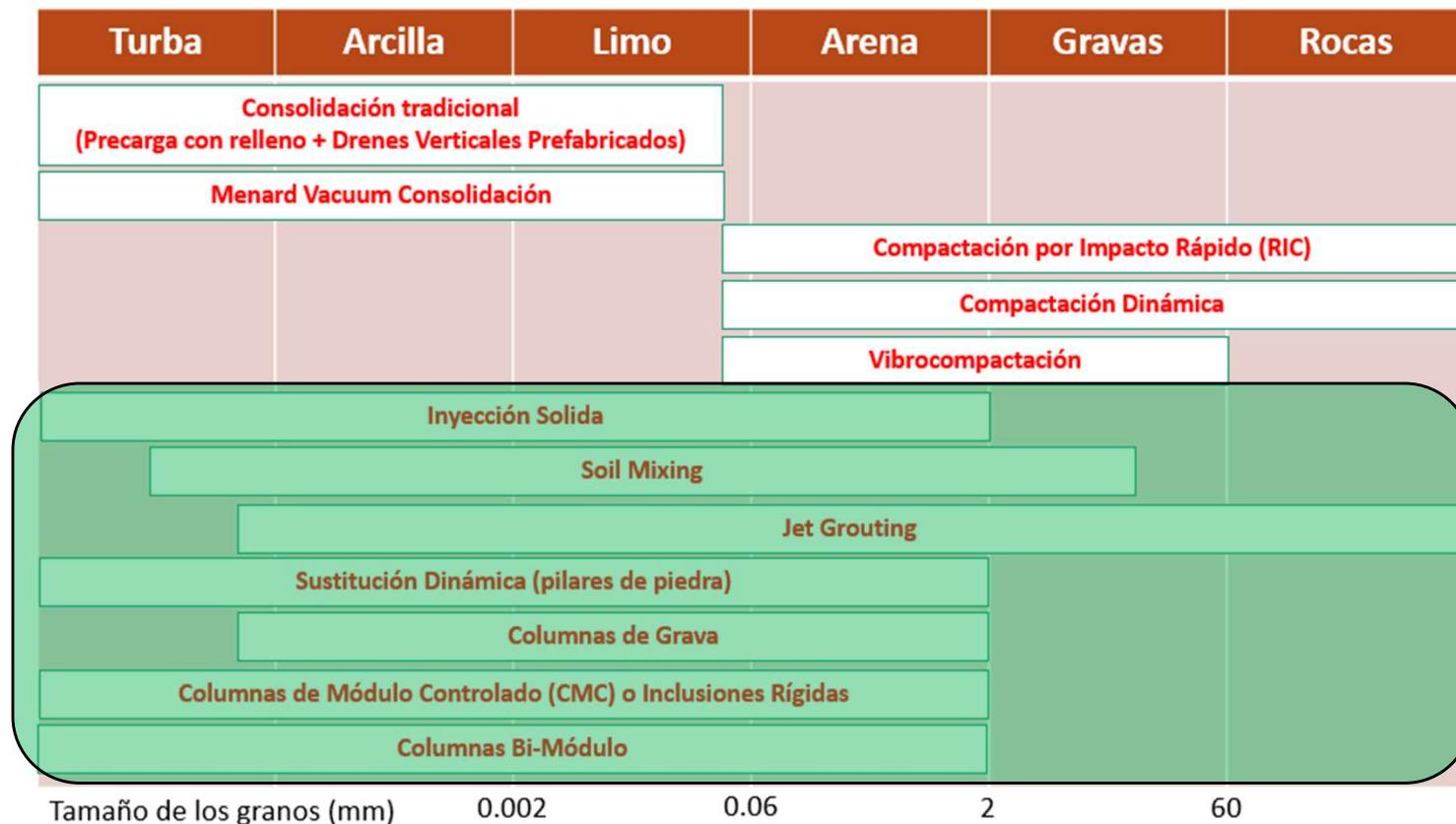
De Medellín para el mundo: Conectando saberes, construyendo futuro



A. Técnicas para mitigar problemáticas estáticas (baja capacidad portante / asentamientos altos)



A. Técnicas para mitigar problemáticas estáticas (baja capacidad portante / asentamientos altos)



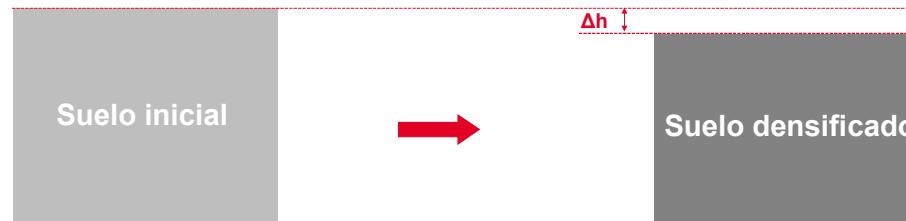
Reforzamiento de suelo
 (alivio del suelo de una parte de las cargas mediante el agregado de elementos rígidos o semirrígidos)



A. Técnicas para mitigar problemáticas estáticas (baja capacidad portante / asentamientos altos)

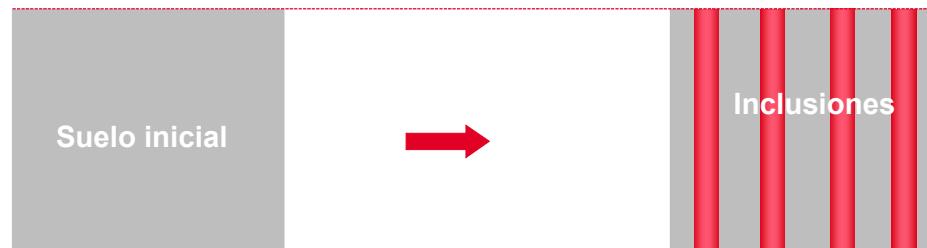
Técnicas de mejoramiento de las propiedades intrínsecas de los suelos

- ⊕ Densificación por acción directa sobre las características del suelo, consumo de los asentamientos **antes** de la vida útil del proyecto



Técnicas de reforzamiento de suelos mediante elementos rígidos o semirrígidos

- ⊕ Mejoramiento global del comportamiento del suelo por instalación de inclusiones, reducción de los asentamientos **durante** la vida útil del proyecto



B. Técnicas para mitigar problemáticas dinámicas (riesgo de licuación)



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



B. Técnicas para mitigar problemáticas dinámicas (riesgo de licuación)

1 DENSIFICACIÓN	2 REDUCCIÓN DEL ESFUERZO CORTANTE SÍSMICO INCLUSIÓN DE ELEMENTOS RÍGIDOS EN EL SUELO	3 CONFINAMIENTO	4 DRENAJE	AUMENTO DEL FACTOR K0
<ul style="list-style-type: none">• Compactación Dinámica• Vibrocompactación• Inyección Sólida	<ul style="list-style-type: none">• Columnas de Grava / de Arena• Sustitución Dinámica• Inclusiones Rígidas• Inyección Sólida• Soil Mixing / Jet Grouting	<ul style="list-style-type: none">• Pantallas tradicionales (tablestacas, etc.)• Pantallas de Soil Mixing / Jet Grouting	<ul style="list-style-type: none">• Columnas de Grava / de Arena• Sustitución Dinámica• Drenes sísmicos (EQ Drains)	<ul style="list-style-type: none">• Técnicas que generan una expansión lateral del suelo (densificación del suelo circundante)



Técnicas de mejoramiento de suelos para problemáticas estáticas



Técnicas de mejoramiento de suelos para la mitigación del riesgo de licuación

1	2	3	4
DENSIFICACIÓN	REDUCCIÓN DEL ESFUERZO CORTANTE SÍSMICO INCLUSIÓN DE ELEMENTOS RÍGIDOS EN EL SUELO	CONFINAMIENTO	DRENAJE
<ul style="list-style-type: none"> Compactación Dinámica Vibrocompactación Inyección Sólida 	<ul style="list-style-type: none"> Columnas de Grava / de Arena Sustitución Dinámica Inclusiones Rígidas Inyección Sólida Soil Mixing / Jet Grouting 	<ul style="list-style-type: none"> Pantallas tradicionales (tablestacas, etc.) Pantallas de Soil Mixing / Jet Grouting 	<ul style="list-style-type: none"> Columnas de Grava / de Arena Sustitución Dinámica Drenes sísmicos (EQ Drains)
			<ul style="list-style-type: none"> Técnicas que generan una expansión lateral del suelo (densificación del suelo circundante)



De Medellín para el mundo: Conectando saberes, construyendo futuro



02

Técnicas y metodologías aplicadas en aproches de puentes



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



¿ Por qué necesitar mejoramiento de suelos?

1. Problemas de capacidad portante / estabilidad / rigidez

Problemáticas estáticas

2. Asentamientos altos (totales / diferenciales)

Problemática dinámica

3. Riesgo de licuación

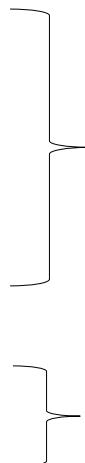


De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro

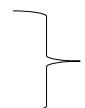


¿ Por qué necesitar mejoramiento de suelos?

1. Problemas de capacidad portante / estabilidad
2. Asentamientos altos (totales / diferenciales)
3. Riesgo de licuación



Problemáticas estáticas



Problemática dinámica

Posibles problemáticas para la construcción
de aproches de puentes



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



¿ Por qué necesitar mejoramiento de suelos?

1. Problemas de capacidad portante / estabilidad

Punzonamiento / Falla circular de talud

FS > 1.3 (obra temporal)

FS > 1.5 (obra definitiva)

2. Asentamientos altos (totales / diferenciales)

- Asentamientos totales max.: 3 – 10 cm
- Asentamientos diferenciales max.:
1:500
0.2% a 1% de la altura del muro en
Tierra Armada
+ definir en cual plazo

3. Riesgo de licuación

Factor de Seguridad frente al riesgo de
licuación (en general FS > 1.25)

Posibles problemáticas para la construcción
de aproches de puentes

Asentamientos sismo-inducidos



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Tipos de aproches de puentes

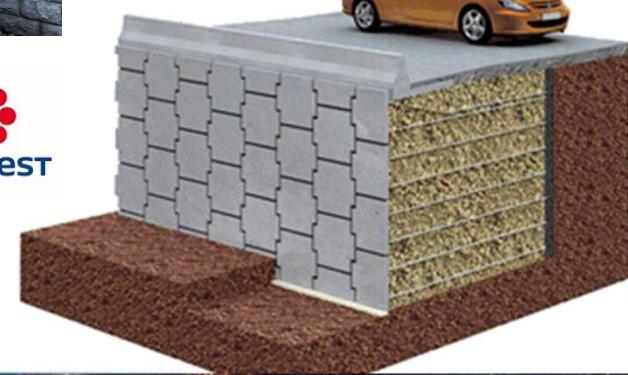
TALUDES



MUROS DE TIERRA ARMADA



Henri Vidal

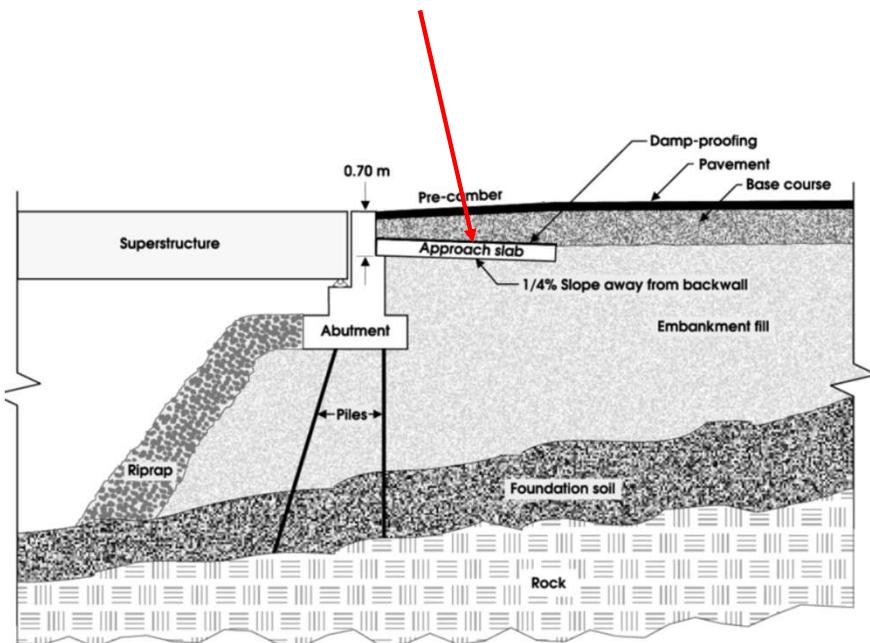


De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Aproches de puentes: buenas prácticas

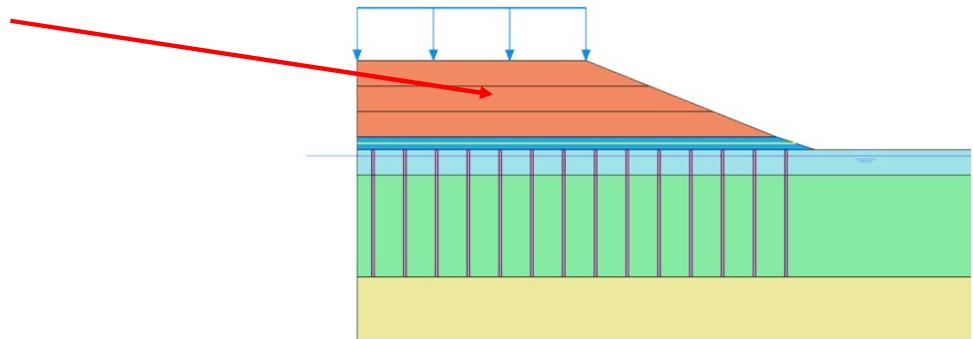
Losa de aproximación



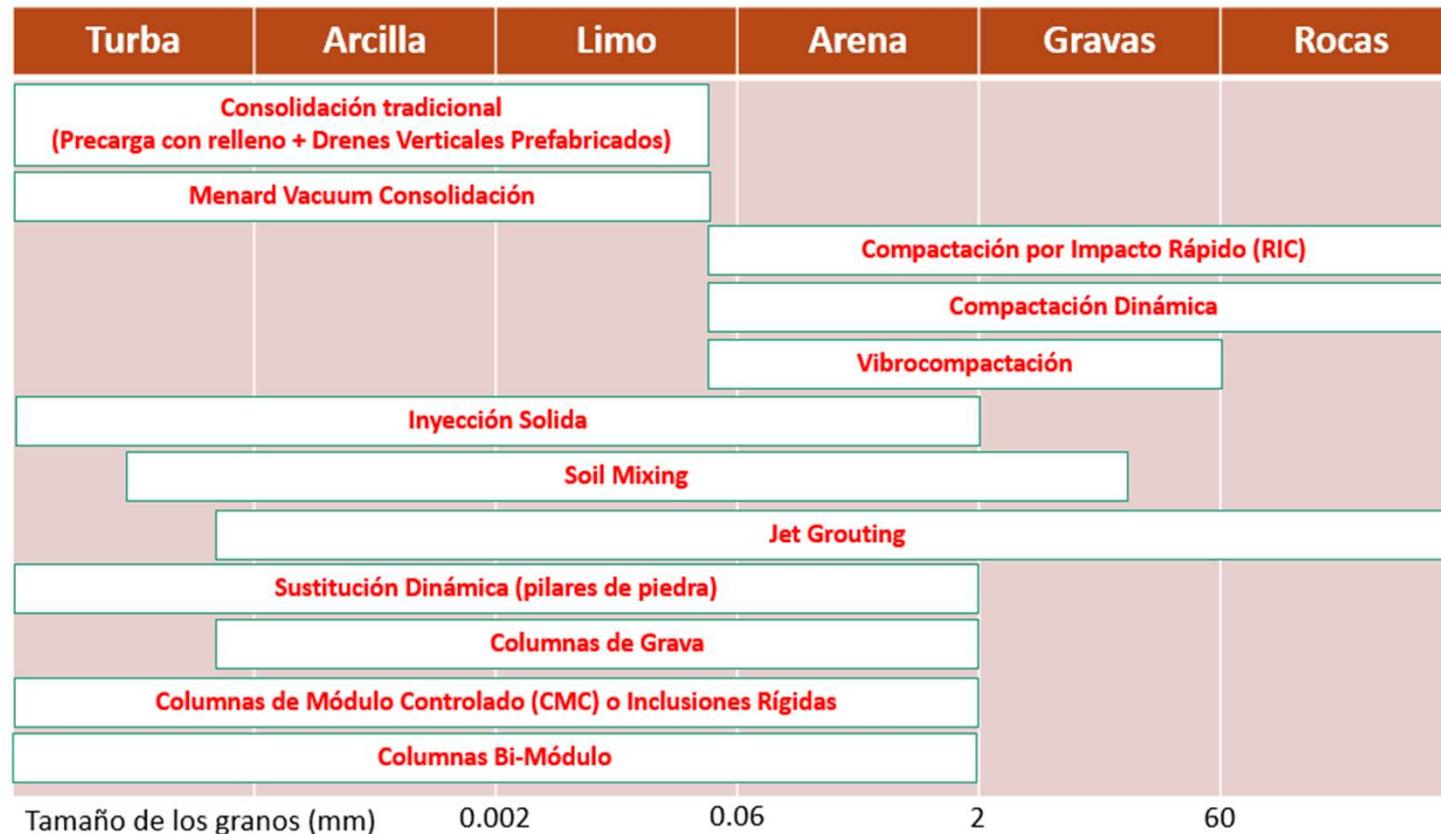
Aproches de puentes: buenas prácticas

Material de relleno del aroche

- Material granular (< 5% de finos)
- Bien compactado, por capas de 30 cm
- Un geotextil anticontaminante puede ser necesario para separar la capa de suelo fino blando subyacente del relleno del aroche
- Control calidad de la compactación del relleno: por ensayo Proctor modificado (> 95%) o ensayos de placa ($EV_2 > 50 \text{ MPa}$ y $EV_2/EV_1 < 2$)



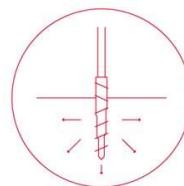
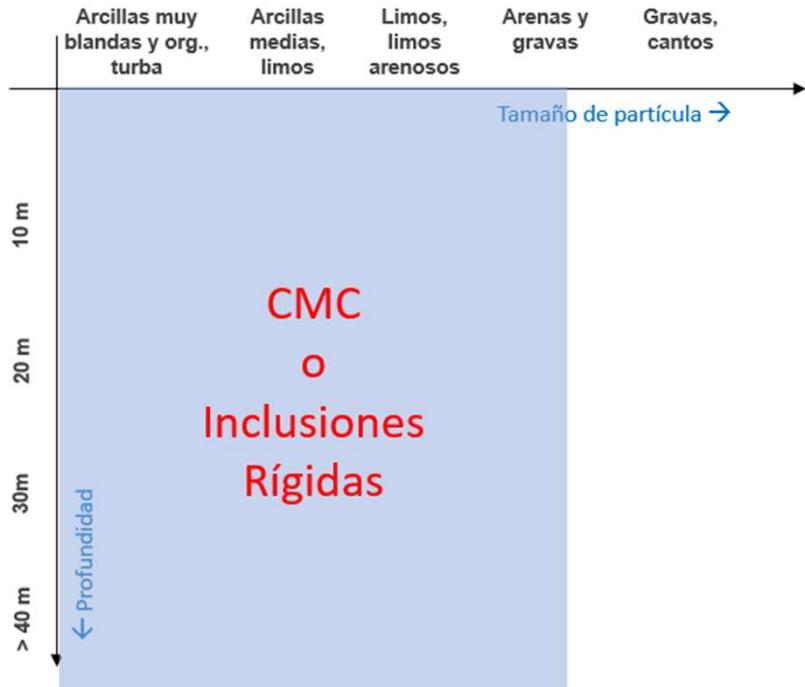
Técnicas para mitigar problemáticas estáticas (baja capacidad portante / asentamientos altos)



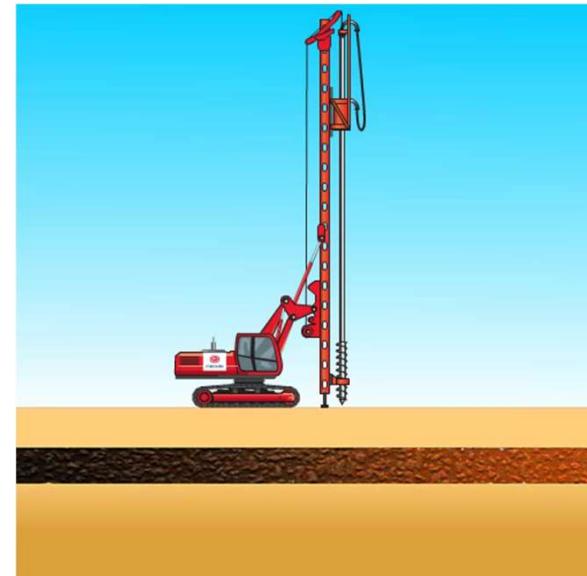
Técnicas para mitigar problemáticas estáticas (baja capacidad portante / asentamientos altos)



Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)



Jean-Marie
Cognon
(Menard)



Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)

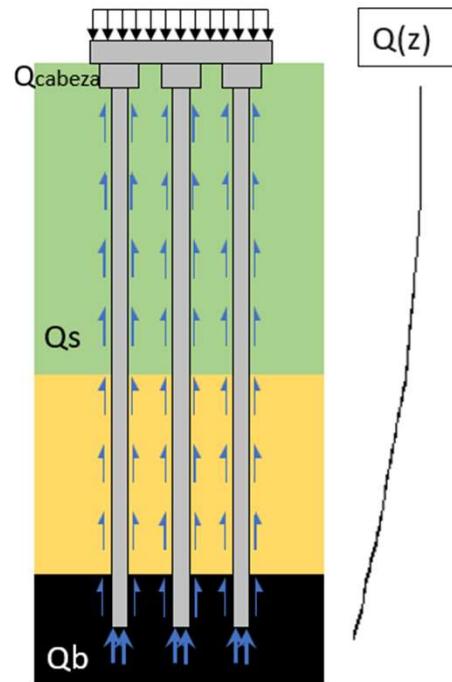
Pilotes

100% de las cargas en los pilotes

Ninguna carga en el suelo

$$Q_{\max} \text{ en la cabeza:}$$
$$Q_{\max} = Q_{cab} = Q_s + Q_b$$

Asentamientos $\approx 0-1\text{cm}$

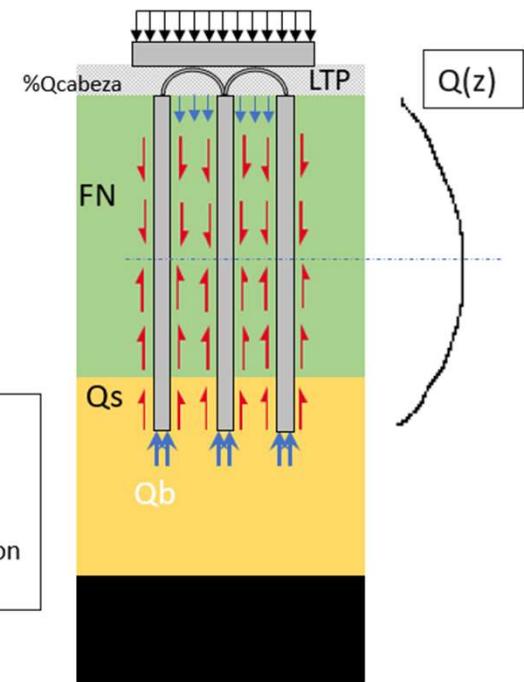


Inclusiones Rígidas / CMC

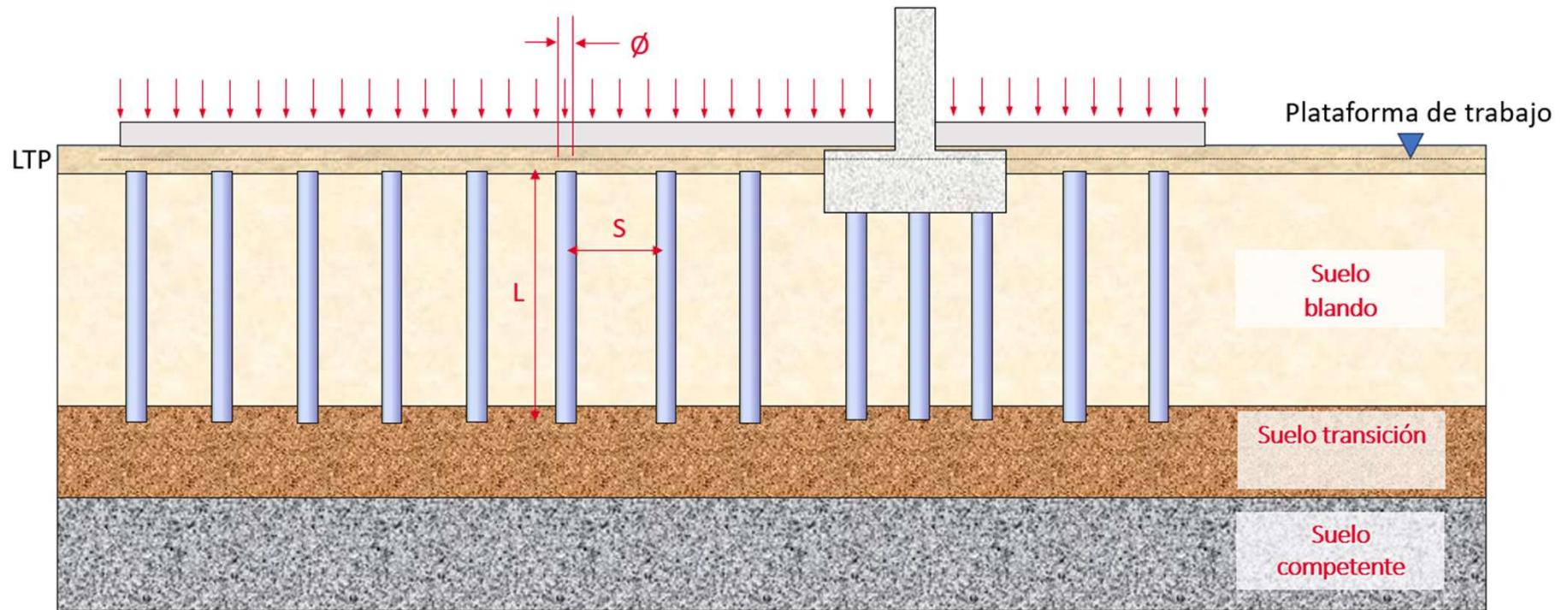
Distribución de las cargas entre las CMC y el suelo

$$Q_{\max} \text{ al plano neutro:}$$
$$Q_{\max} = \%Q_{cab} + F_N = Q_s + Q_b$$

Asentamientos : el diseño de las CMC esta ajustado para cumplir con los criterios del proyecto

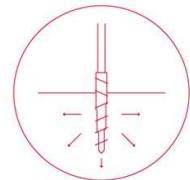


Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)



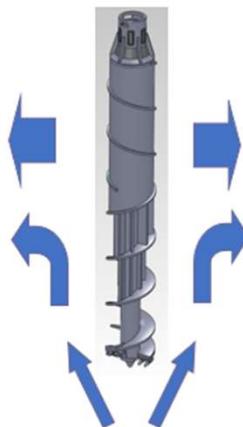
Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)

- Profundidad: 2 a 50 m
- Diámetros: 280 mm a 450 mm
- Tasa de remplazo: 1% a 9%
- Concreto o mortero, R_c 8 a 35 MPa
- Rango del factor de reducción de asentamientos: 2 a 10



Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)

Rotación & broca de
desplazamiento lateral de suelo
(Menard)



Rotación & broca CFA
(Continuous Flight Auger)
Extracción de suelo



VCC (Vibro Concrete Columns)



Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro

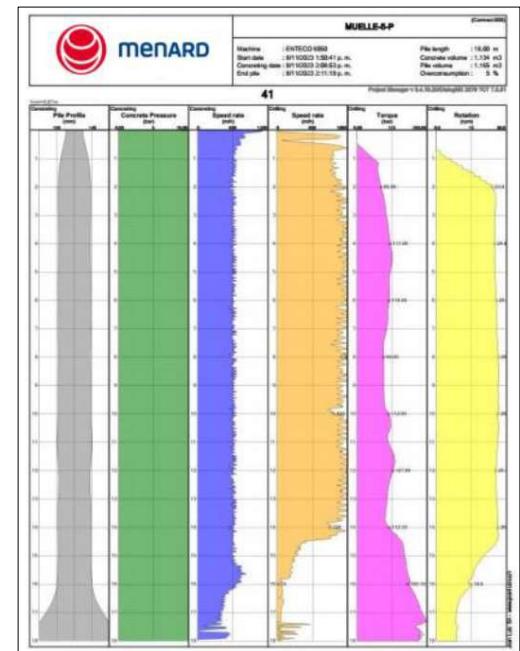
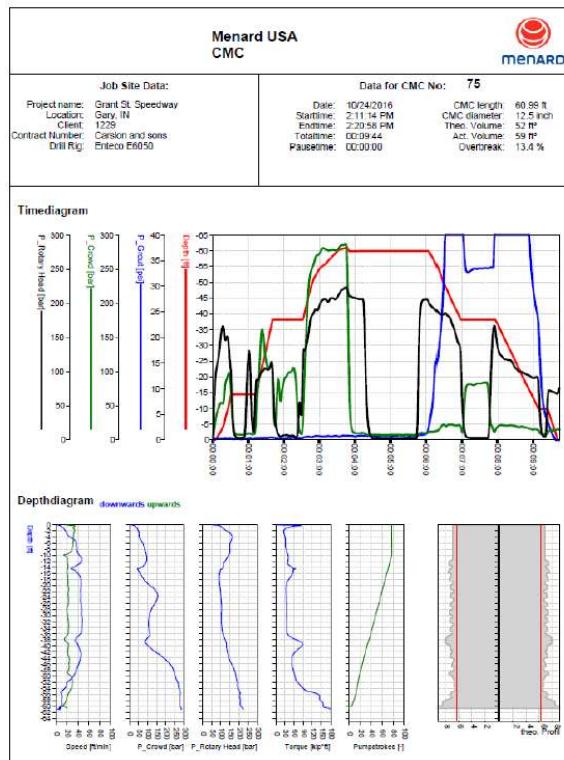
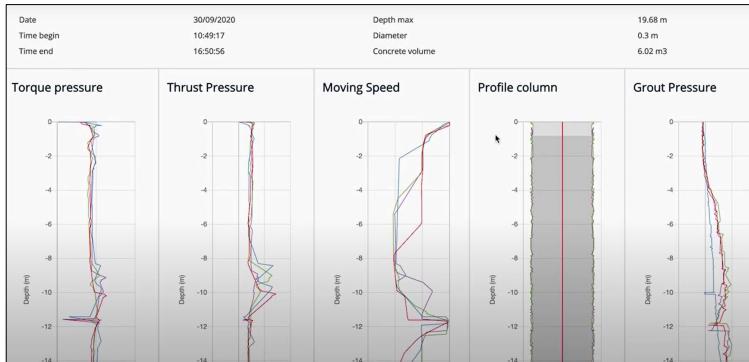


Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)

Monitoreo de la ejecución:

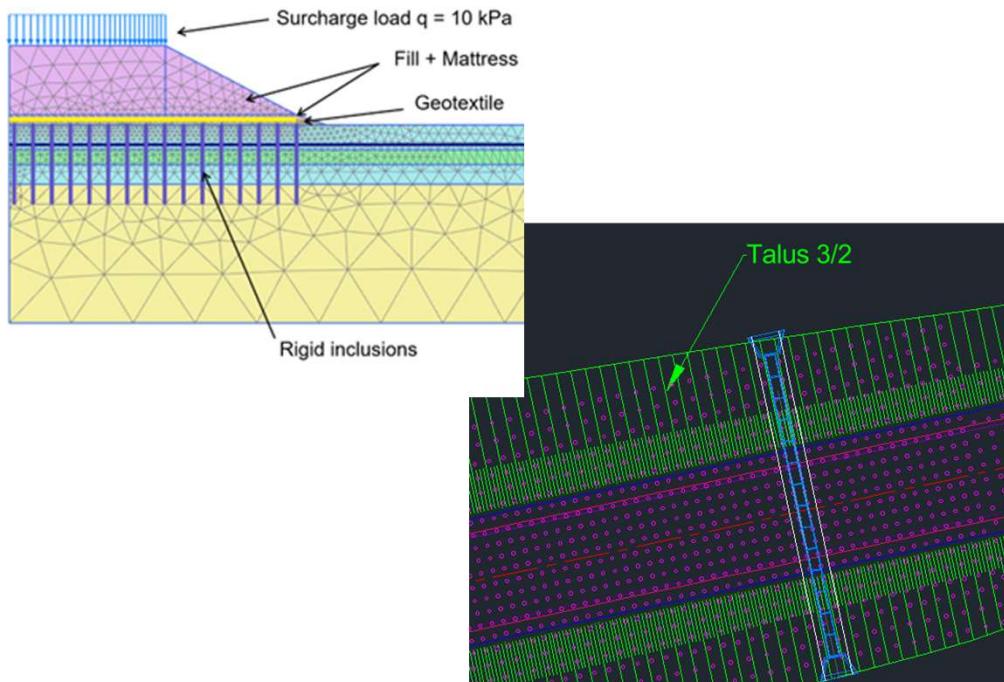
Registro de los parámetros de perforación y de hormigonado

- Omnibox
- Jean Lutz
- Guhma

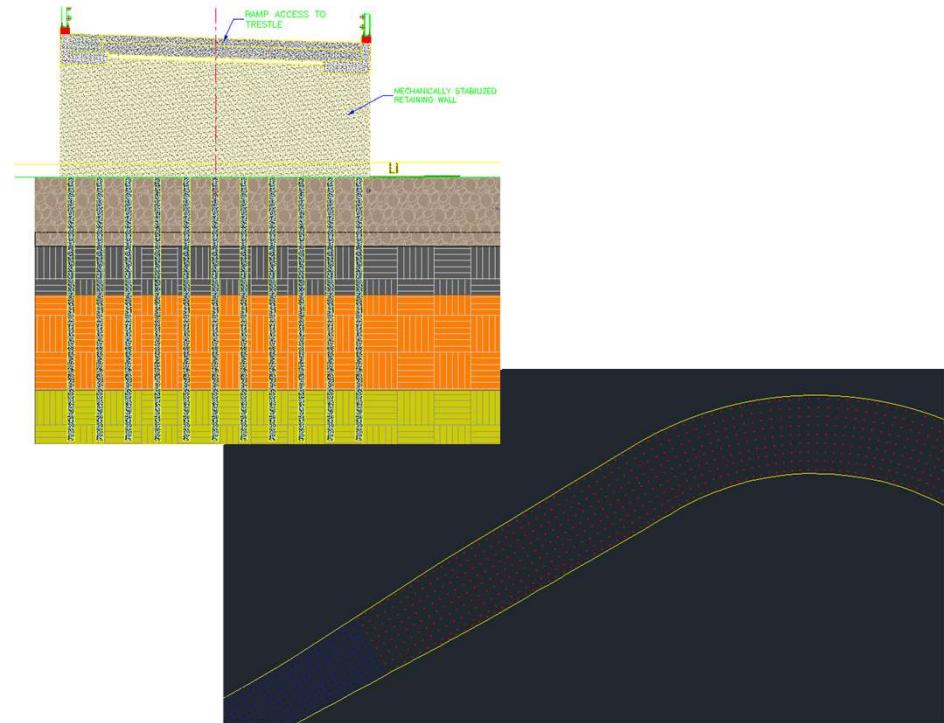


Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)

TALUDES

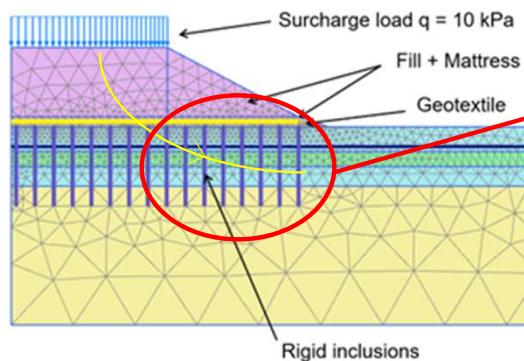


MUROS DE TIERRA ARMADA



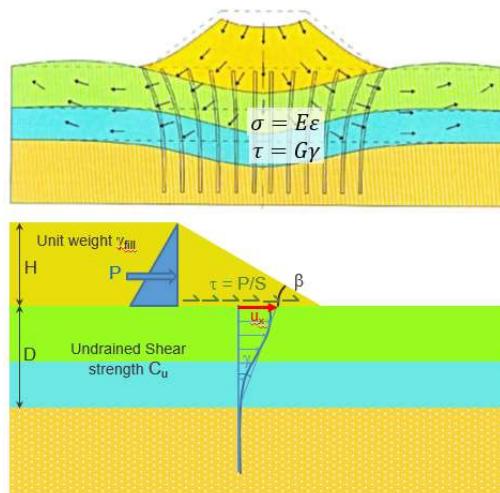
Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)

TALUDES



Puede ocurrir con rellenos muy altos y suelos blandos

Chequear la integridad de las Inclusiones Rígidas debajo de los taludes, sometidas a flexión compuesta



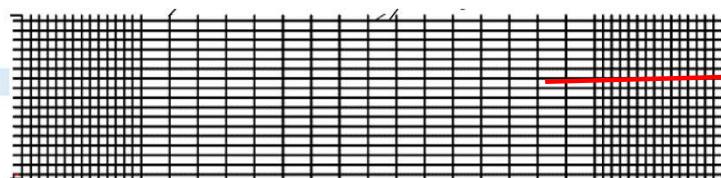
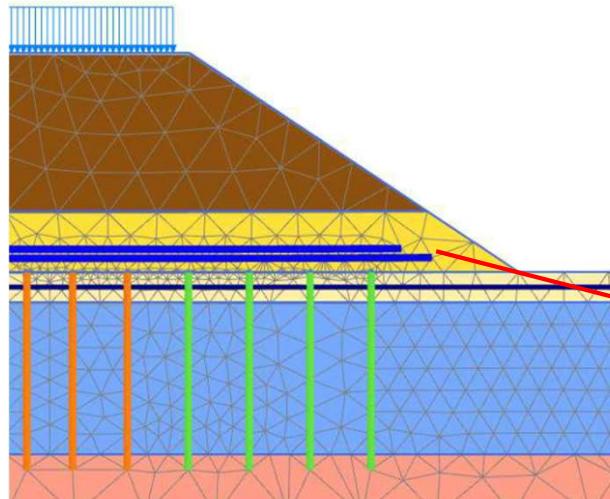
En caso de exceder la resistencia de la inclusión a la flexión compuesta:

**Reforzar la columna
O
Reforzar el relleno**



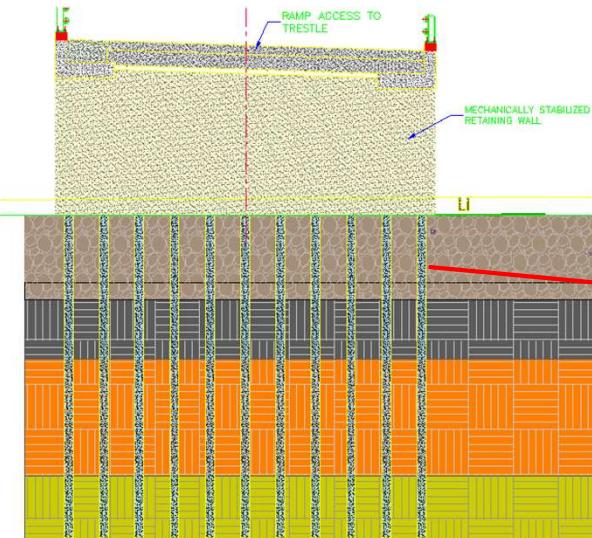
Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)

TALUDES



Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)

MUROS DE TIERRA ARMADA



La ubicación de la ultima fila debe ser bien definida para que las columnas estén al 100% comprimidas



Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)

Comentarios generales:

- Se recomienda utilizar un **modelo de elementos finitos (FEM) en 2D (Plane Strain) o 3D** (con software como Plaxis, Midas, etc.) para el análisis de los aproches de puentes (disimetría de las cargas). Y hacer **una verificación** del diseño en una zona específica (con cargas simétricas) **de manera analítica**.
- **Buena práctica:** Dividir el aproche en tramos (tanto longitudinal como transversalmente), con el fin de optimizar la malla / la profundidad de las CMC, considerando siempre el espesor máximo del relleno en cada tramo
- **Controles de calidad:** Ensayos de placa estática, PIT, control del diámetro, control de la calidad del concreto + monitoreo de la ejecución en tiempo real

Recomendaciones de diseño: ASIRI



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)



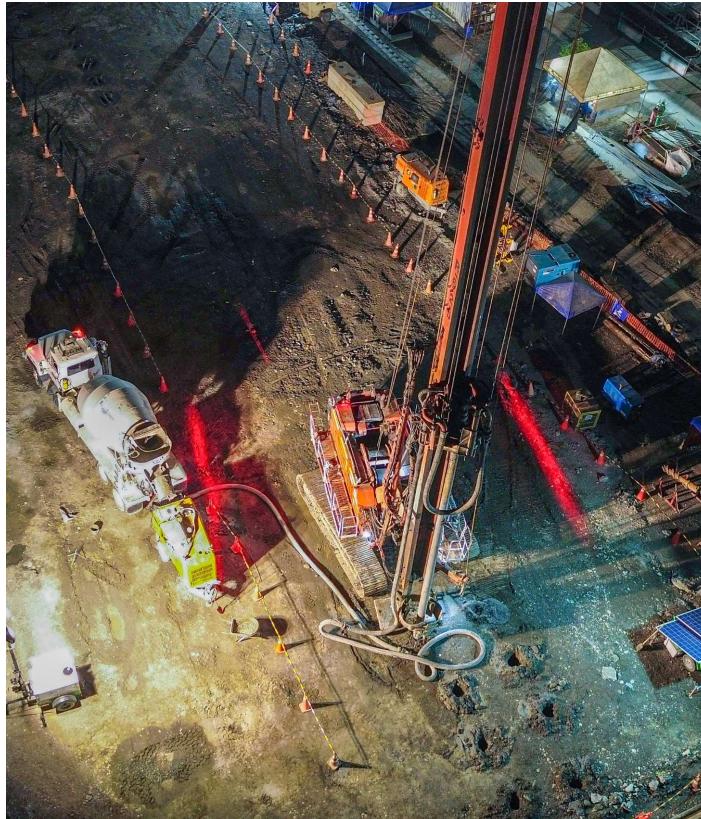
Pacific Highway Upgrade
New South Wales
Australia



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)



Puerto Antioquia
Colombia



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)



Pasos vehiculares (AIFA)
Tecámac
México



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)



Puente Sibaté
Cundinamarca
Colombia



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Inclusiones Rígidas o Columnas de Módulo Controlado (CMC)



I-564 Intermodal
Norfolk, VA
Estados Unidos



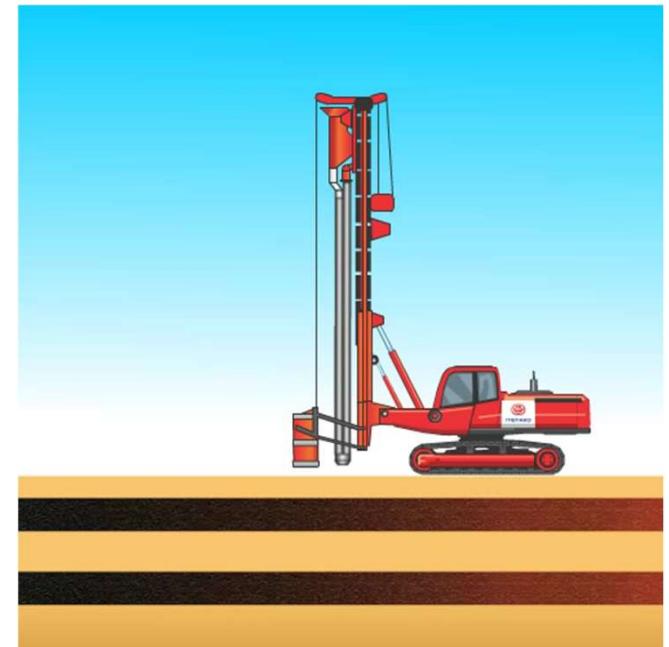
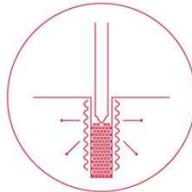
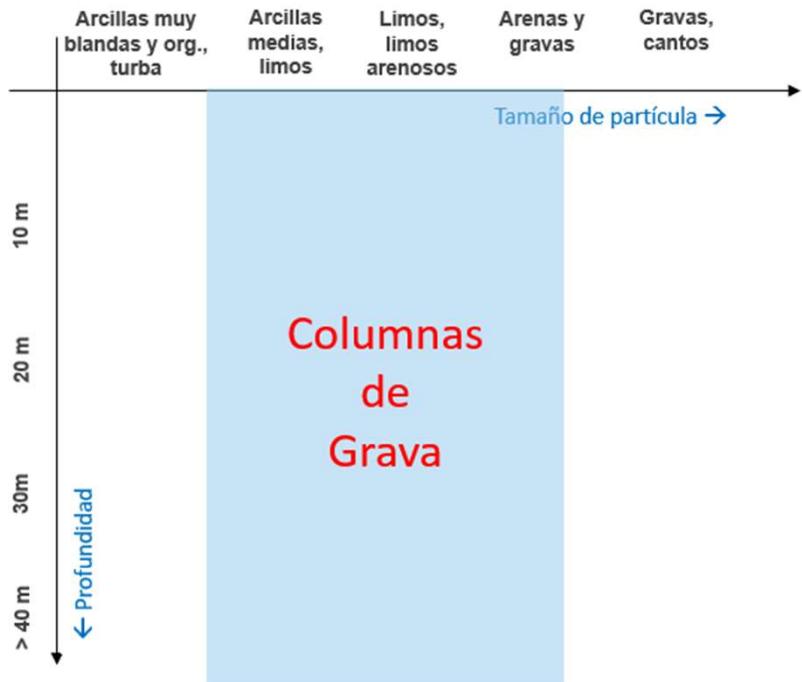
De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Técnicas para mitigar problemáticas estáticas (baja capacidad portante / asentamientos altos)



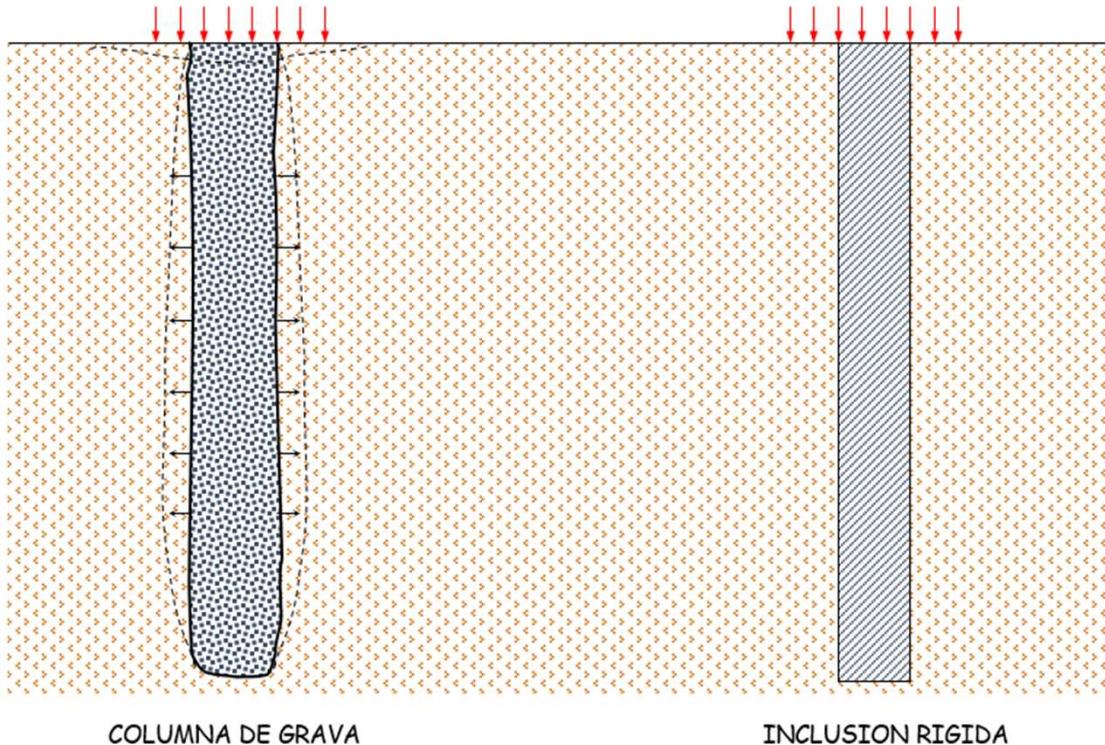
Columnas de Grava



De Medellín para el mundo: Conectando saberes, construyendo futuro



Columnas de Grava



COLUMNA DE GRAVA

INCLUSION RIGIDA

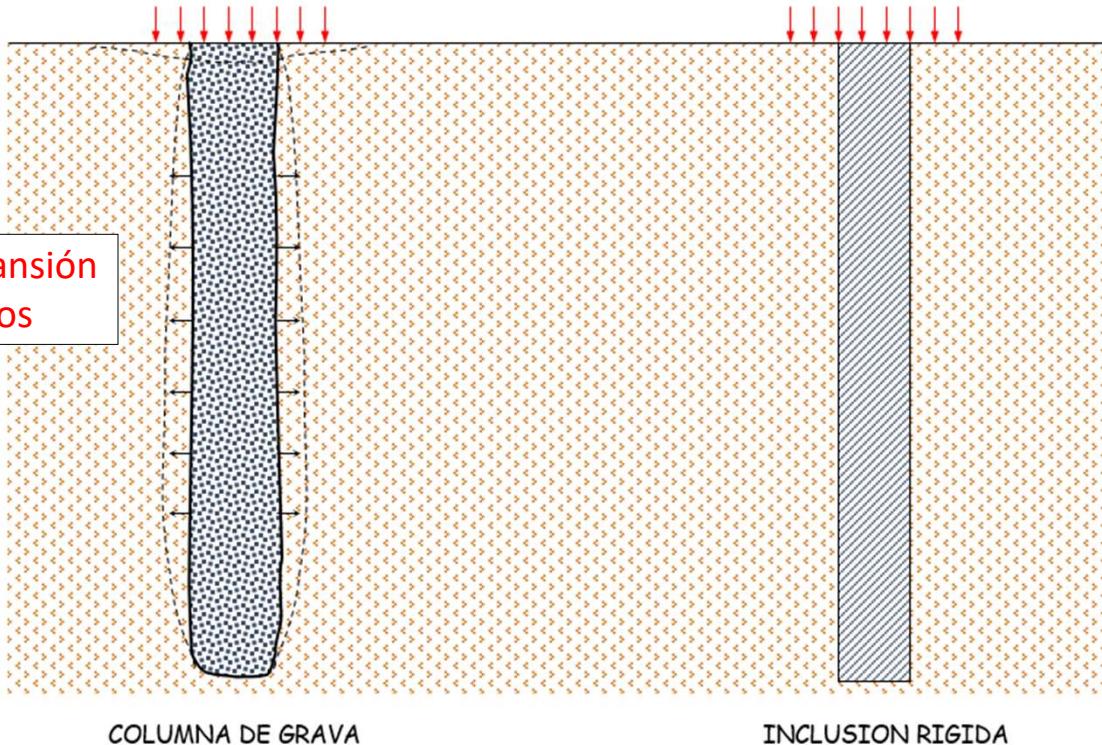
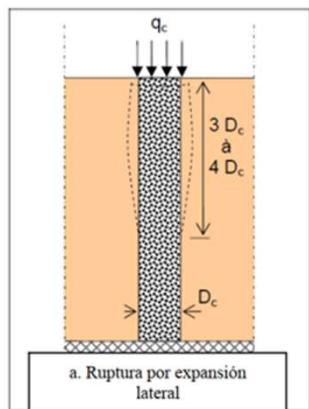


De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Columnas de Grava

Riesgo de ruptura por expansión lateral en suelos blandos

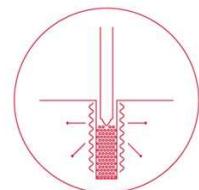


De Medellín para el mundo: Conectando saberes, construyendo futuro



Columnas de Grava

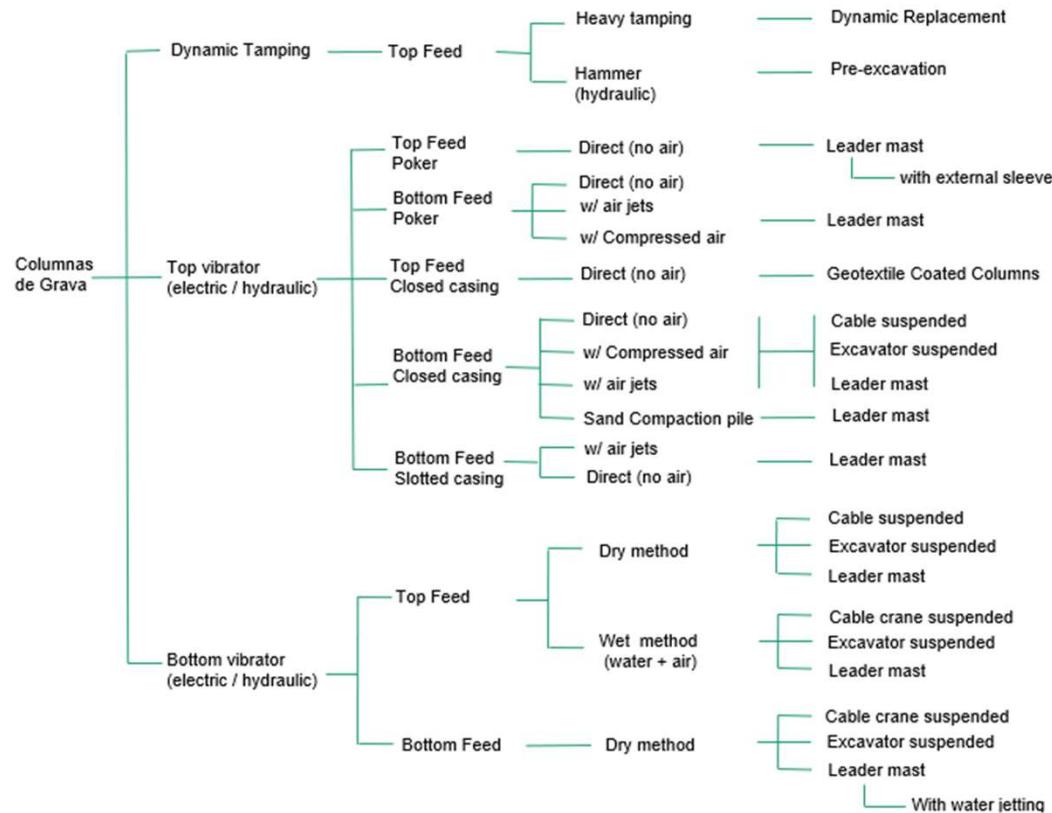
- Profundidad: 3 a 60 m
- Diámetros: 300 mm a 2000 mm
- Tasa de remplazo: 3% a 25%
- Rango del factor de reducción de asentamientos: de 2 a 3
- No aplica en suelos cohesivos con $S_u < 20 \text{ kPa}$ ($q_c < 300 \text{ kPa}$)
- Buena resistencia a los esfuerzos cortantes / laterales
- Carácter drenante que permite acelerar la consolidación



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Columnas de Grava



Cada metodología tiene sus ventajas & desventajas de diseño / de ejecución

Se debe elegir la técnica la más adecuada a cada proyecto



De Medellín para el mundo: Conectando saberes, construyendo futuro



Columnas de Grava



Wet top feed
Vibrador en la punta



Dry bottom feed
(slotted casing)
Vibrador en la cabeza



Dry bottom feed
Vibrador en la
punta



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro


menard

Columnas de Grava



Dry Bottom Feed
Vibrador en la cabeza



Dry Bottom Feed
Vibrador en la punta



Dry bottom feed
Vibrador en la punta

Columnas de Grava

6.2.1 Test Frequency

METHOD	WET		DRY	
	recorded	unrecorded	recorded	unrecorded
Checking diameter	1 per set of 50 columns up to 100, beyond that at least 3			
Checking continuity	1/50	1/20	only if an anomaly is detected	1/50
Compaction verification	1/80 under concrete slab or raft foundation + 1/20 under ground mass with a minimum of 5			
Load test*	1 test up to 800 m and 1 per section beyond 800 m.		1 test up to 2000 m and 400 columns, and at least one more beyond 2000 m.	

Con ensayos CPT (o similares) en las columnas

Hasta 1.5 veces la carga ELS



De Medellín para el mundo: Conectando saberes, construyendo futuro



Columnas de Grava



4to puente sobre el
canal de Panamá



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



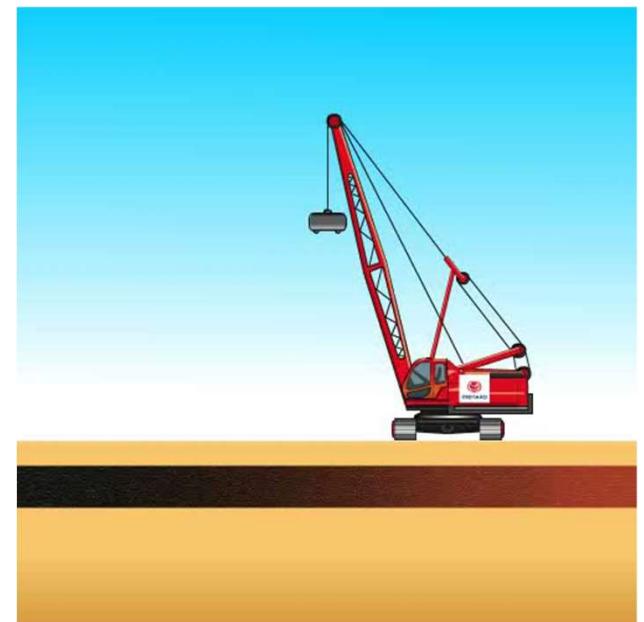
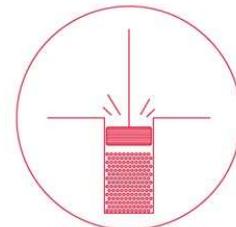
Técnicas para mitigar problemáticas estáticas (baja capacidad portante / asentamientos altos)



De Medellín para el mundo: Conectando saberes, construyendo futuro



Sustitución Dinámica

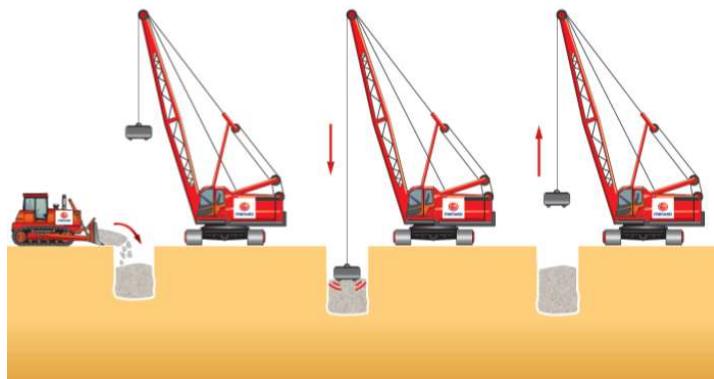


De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro

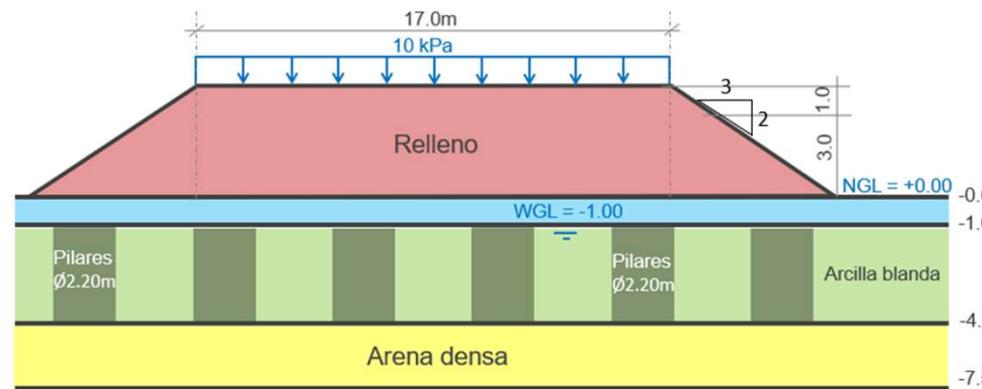


Sustitución Dinámica

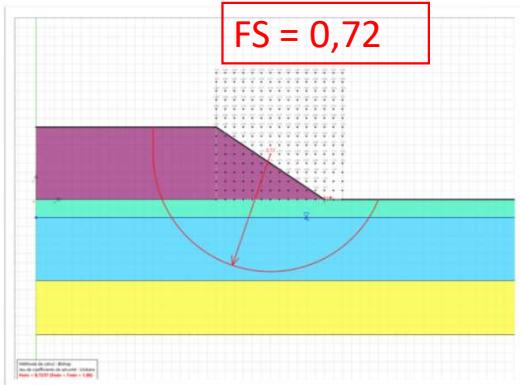
- Caída libre de una masa de 10 a 35 ton, desde una altura de 10 a 30 m
- Pilares:
 - Diámetro típico: 1.5 m – 3.5 m
 - Profundidad máxima: 6 m – 7 m
 - Malla típica: 3.5 m – 6 m



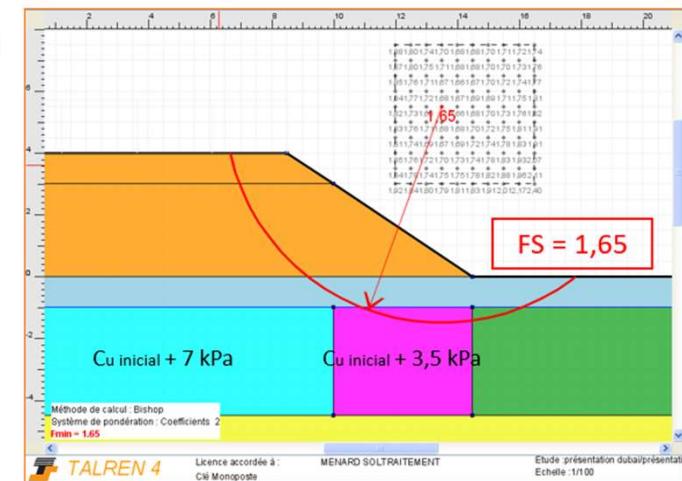
Sustitución Dinámica



FS = 0,72



Aproche de puente - autopista
Francia



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Sustitución Dinámica



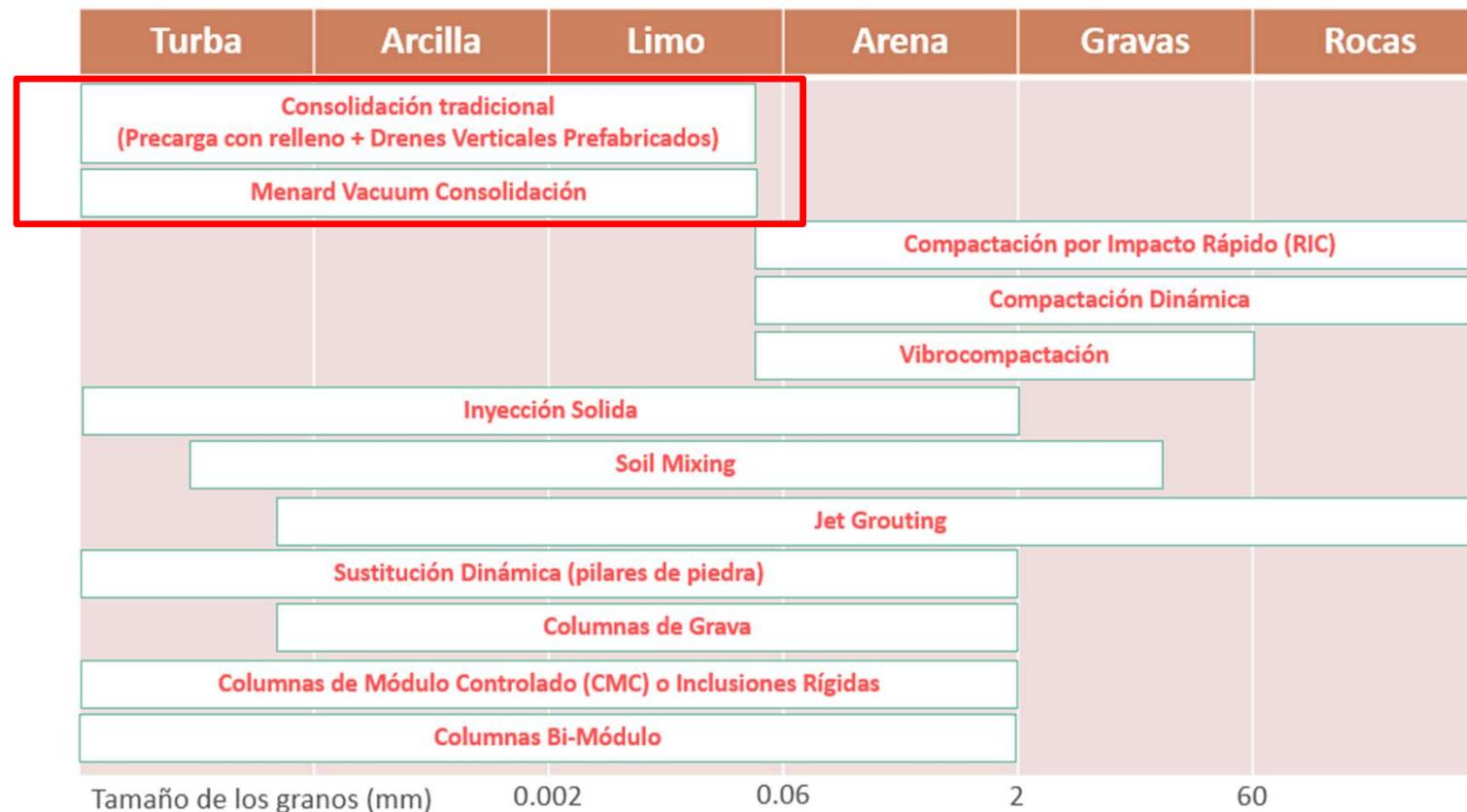
CEDI
Girardota, Antioquia
Colombia



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



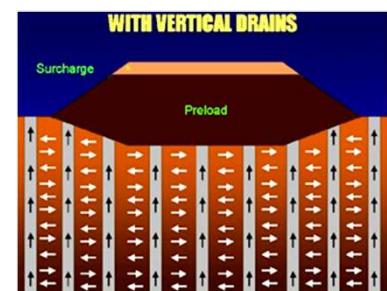
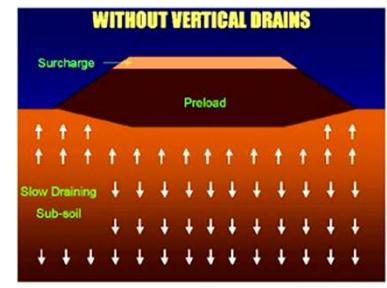
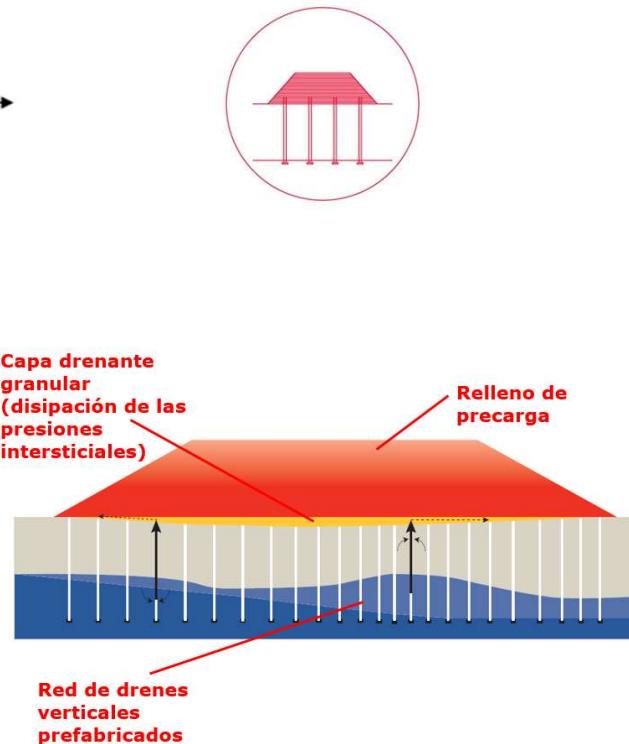
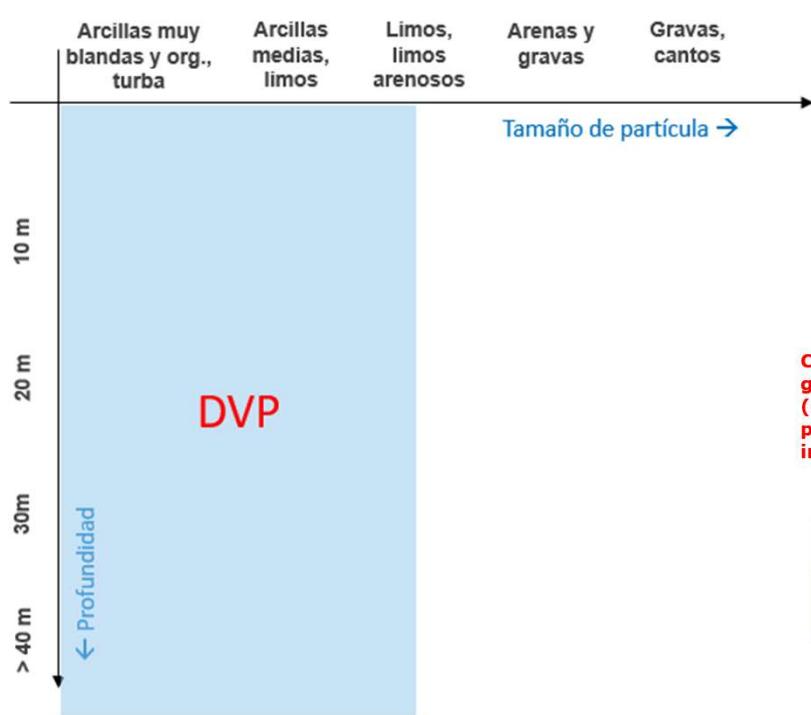
Técnicas para mitigar problemáticas estáticas (baja capacidad portante / asentamientos altos)



De Medellín para el mundo: Conectando saberes, construyendo futuro



Drenes Verticales Prefabricados



Drenes Verticales Prefabricados



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Drenes Verticales Prefabricados



Puerto Antioquia
Colombia

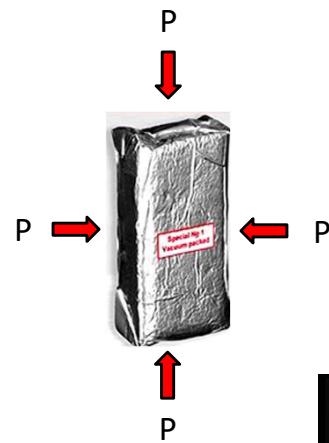
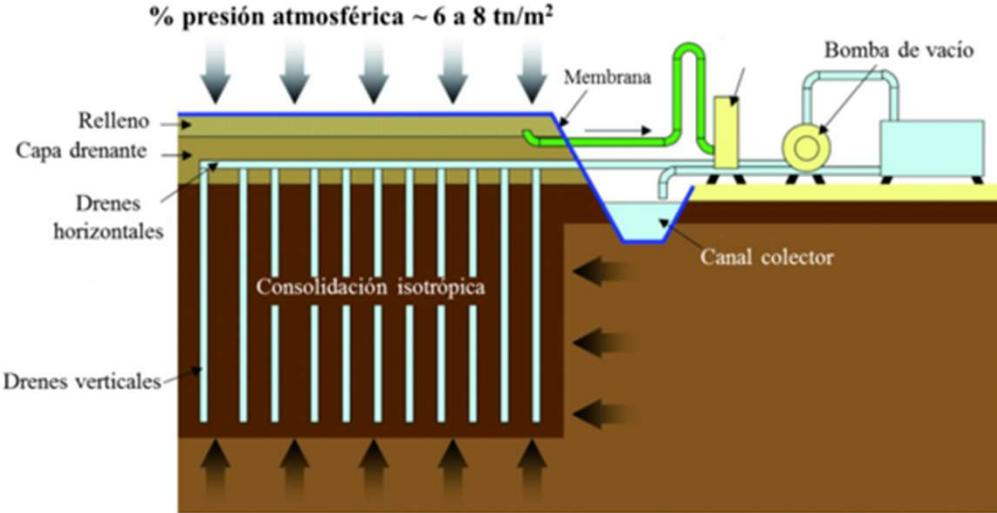


De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Drenes Verticales Prefabricados

Menard Vacuum™



Jean-Marie
Cognon
(Menard)

Drenes Verticales Prefabricados



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Drenes Verticales Prefabricados



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro

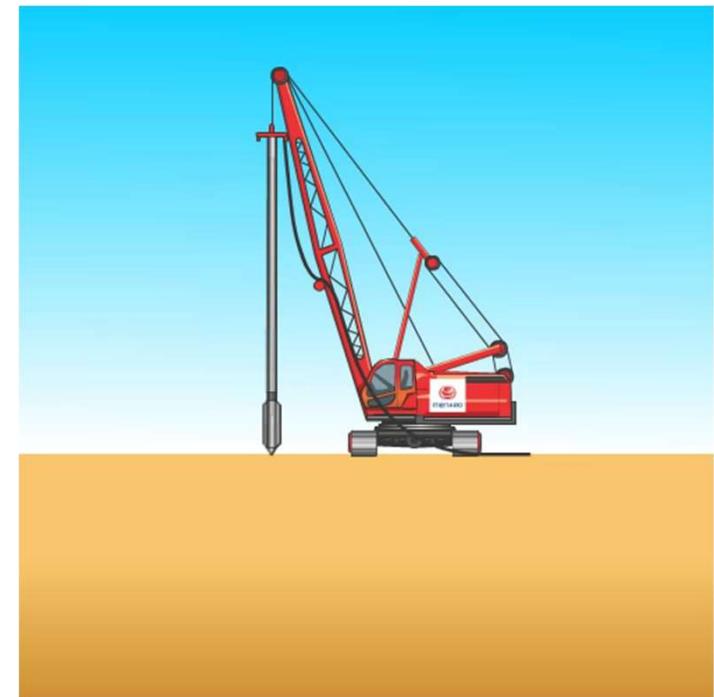
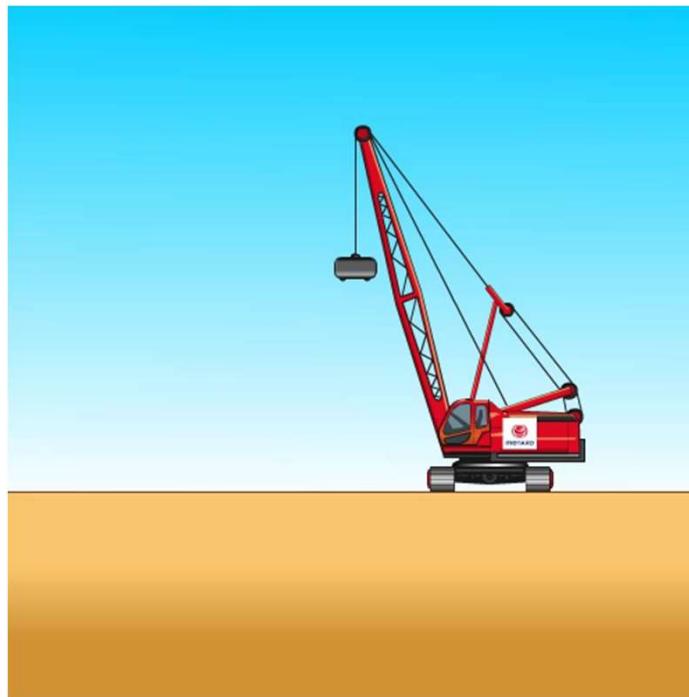
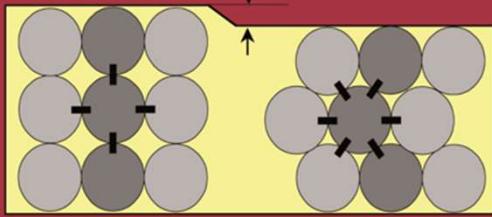


Técnicas para mitigar problemáticas estáticas (baja capacidad portante / asentamientos altos)



Densificación: Vibrocompactación y Compactación Dinámica

Recolección óptima de las partículas del suelo

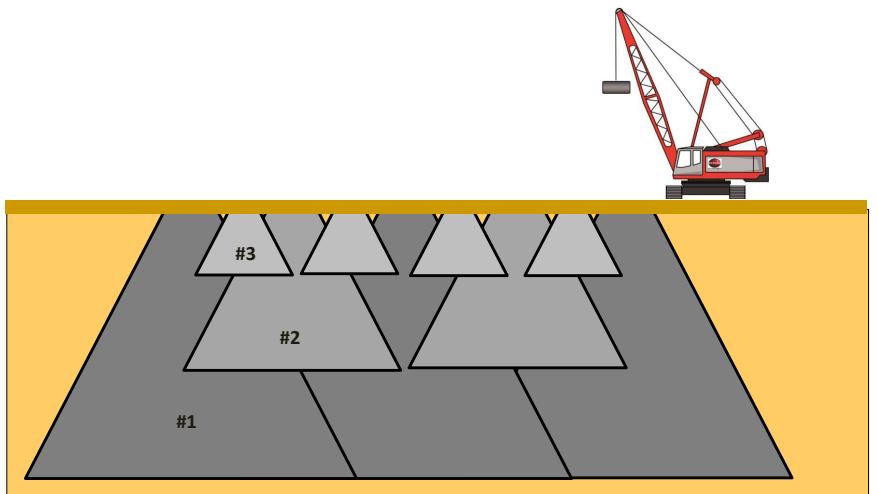
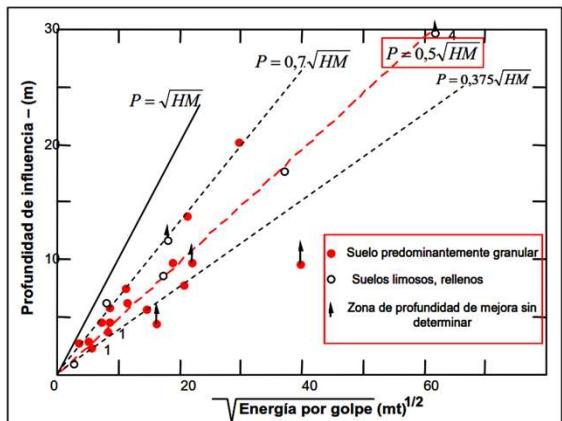


De Medellín para el mundo: Conectando saberes, construyendo futuro



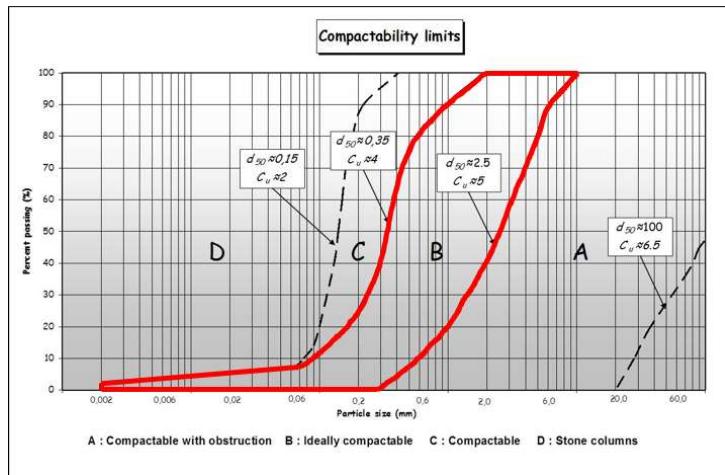
Densificación: Vibrocompactación y Compactación Dinámica

Compactación Dinámica



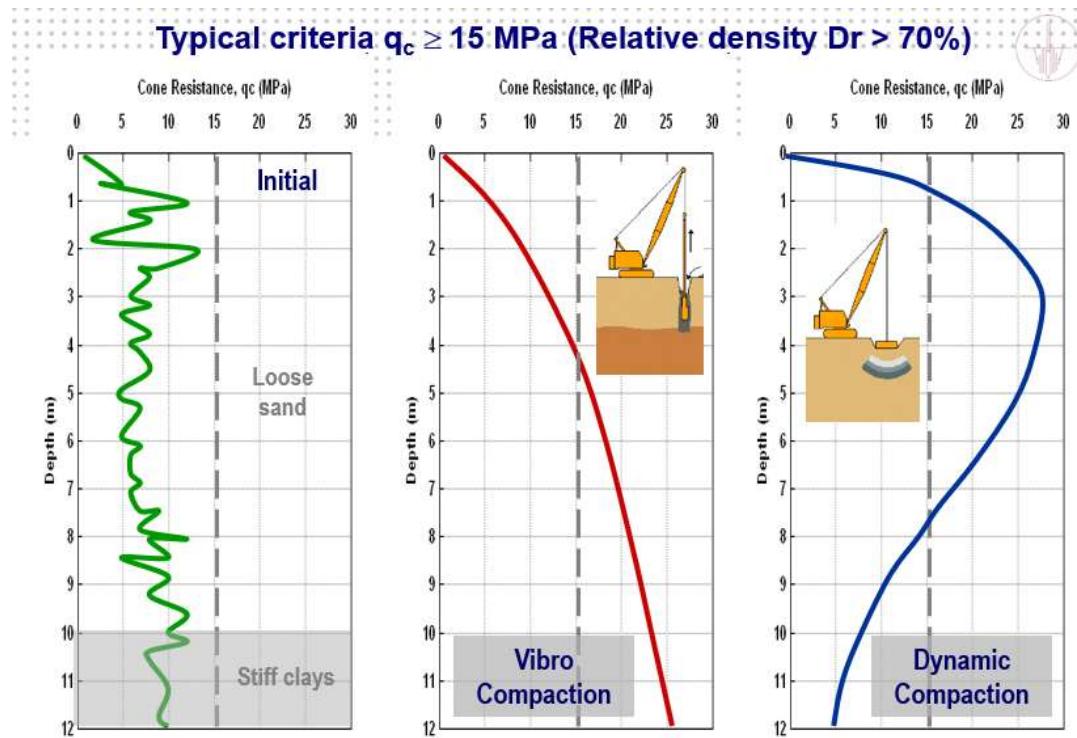
Densificación: Vibrocompactación y Compactación Dinámica

Vibrocompactación / Vibroflotación



Presa Peribonka, Canadá, 2005

Densificación: Vibrocompactación y Compactación Dinámica



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Densificación: Vibrocompactación y Compactación Dinámica



Puente Industrial
Concepción
Chile



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Densificación: Vibrocompactación y Compactación Dinámica



Palm Jumeirah &
Jebel Ali
Dubai

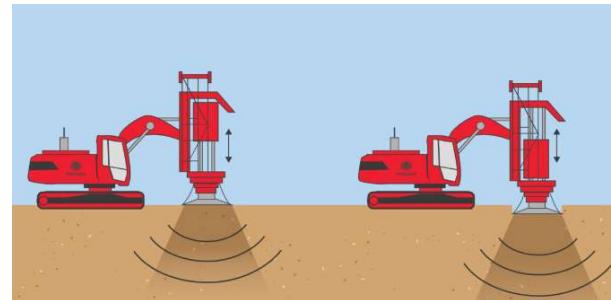


De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



Densificación: Vibrocompactación y Compactación Dinámica

Rapid Impact Compaction (RIC)



Autopista Ruda Śląska
Polonia



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro



CONCLUSIONES

- **El mejoramiento de suelos** es una alternativa comprobada y eficaz frente a la cimentación profunda tradicional, especialmente **adecuada para resolver las problemáticas asociadas a los aproches de puentes**.
- Además de generar **ahorros económicos**, estas técnicas permiten **reducir los plazos de ejecución y la huella de carbono (CO₂)**.
- **La elección de la técnica más adecuada** debe basarse en **las condiciones específicas** del proyecto: tipo de suelo, nivel freático, cargas, criterios de recepción, entorno, plazos, impacto ambiental, entre otros.
- **Las Inclusiones Rígidas (o CMC)** representan la solución más versátil y eficaz para los aproches de puentes. Es fundamental verificar su integridad sin necesidad de reforzamiento bajo los taludes.



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro





César DAVIN
Gerente General
Menard Colombia

cesar.davin@menard-mail.com

Gracias



Menard Colombia

www.menardlatam.com



De Medellín para el mundo: Conectando
saberes, construyendo futuro

