

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE  
MECANICA DEL SUELO  
E INGENIERIA GEOTECNICA

## **Jornadas sobre OBRAS DE INTERÉS GEOTÉCNICO**

**Ciclo: Empresas Consultoras**

# **IDOM**

**53ª SESIÓN**

Madrid, 10 de junio de 2019

Con la colaboración del  
CENTRO DE ESTUDIOS  
DE EXPERIMENTACION DE OBRAS PÚBLICAS

A wide-angle photograph of a large-scale construction site in Algeria. The foreground and middle ground are dominated by numerous large, circular concrete silos under construction. The silos are arranged in rows, with some showing their internal structures. The ground is uneven and covered with construction debris, including large piles of grey concrete and earth. In the background, two tall yellow tower cranes stand prominently against a cloudy sky. Beyond the construction site, a range of blue mountains is visible under a heavy, overcast sky. The overall scene depicts a major industrial infrastructure project.

**IDOM**

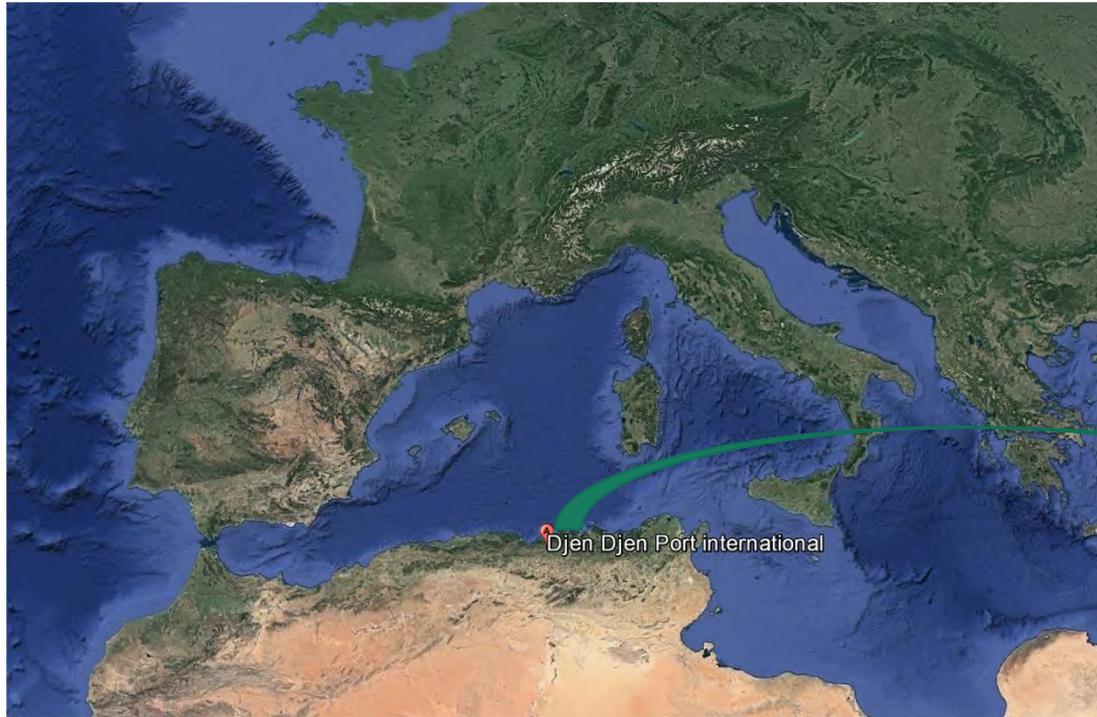
Infraestructuras sostenibles y  
resilientes para entornos cambiantes

**GEOTECNIA EN OBRAS INDUSTRIALES**

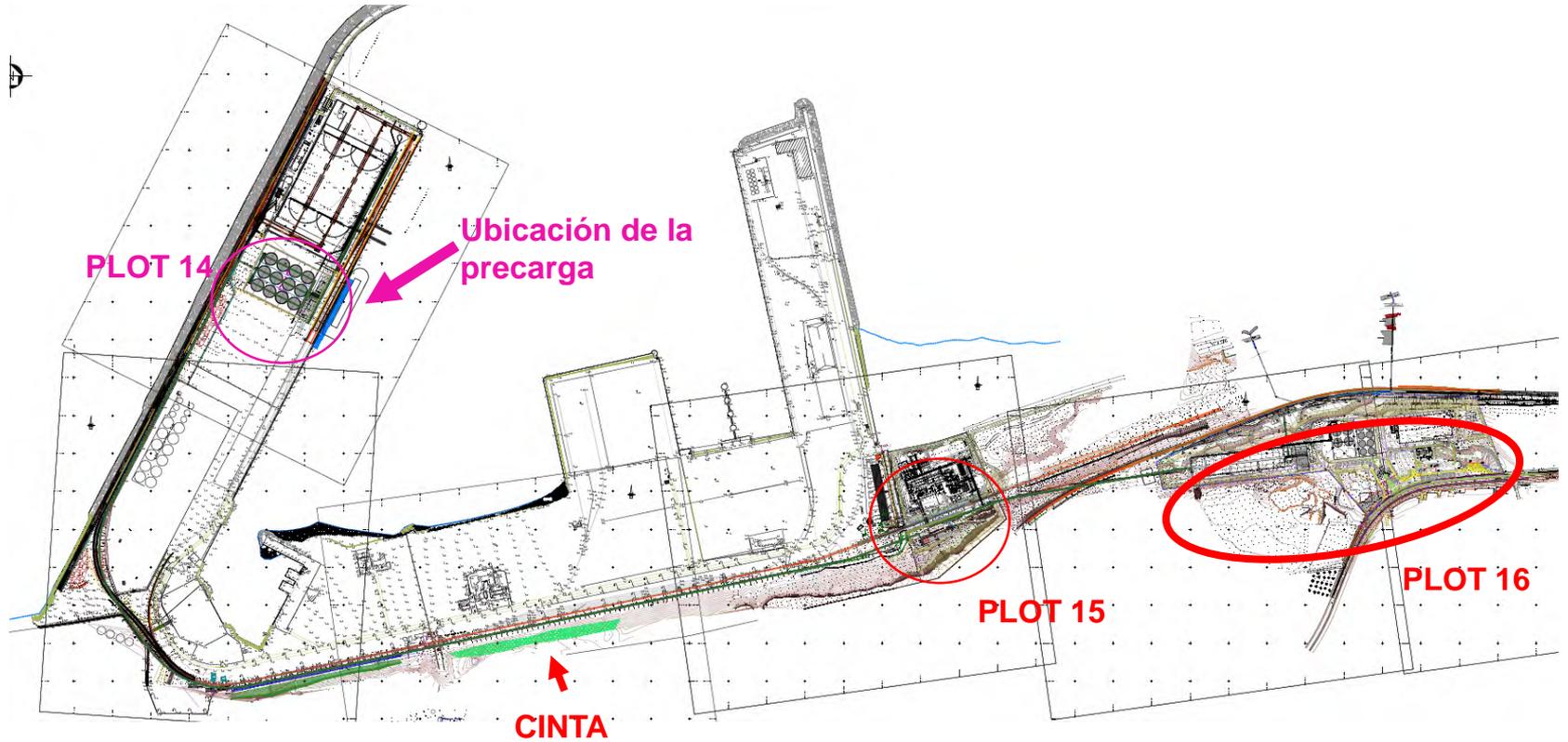
**TRATAMIENTO MEDIANTE PRECARGA EN CIMENTACIÓN DE  
SILOS DE GRANO EN ARGELIA**

1. Localización y planta general
2. Descripción de la obra
3. Caracterización geotécnica. Columna geotécnica de cálculo
4. Problemática: alternativas de tratamiento del terreno
5. Tratamiento del terreno propuesto
6. Auscultación
7. Campaña geotécnica de comprobación
8. Evaluación del grado de mejora del terreno: análisis de mejora entre la campaña geotécnica inicial y final
9. Recalibrado del modelo
10. Conclusiones

# 1. LOCALIZACIÓN Y PLANTA GENERAL



# 1. LOCALIZACIÓN Y PLANTA GENERAL



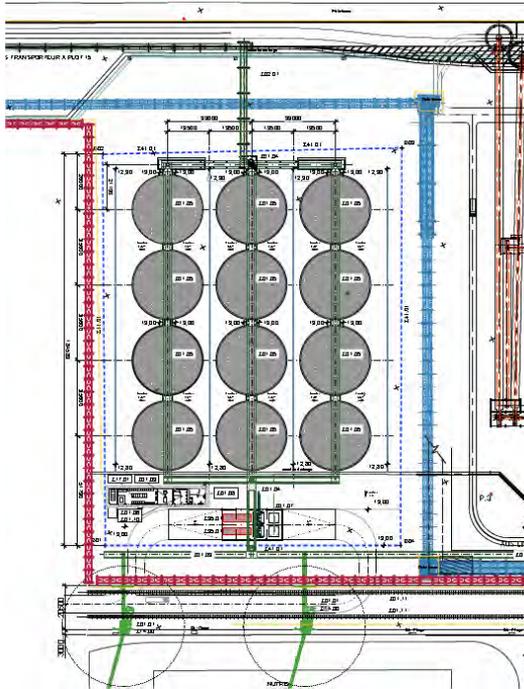
Soya Crushing Plant consiste en una planta de proceso de semillas de soja, distribuida en 3 zonas:

- Plot 14: descarga y almacenamiento de grano en el puerto de Djen Djen. Tras el almacenamiento, se descarga y transporta por una cinta de 3.2 km de longitud hasta el plot 15
- Plot 15: proceso y producción
- Plot 16: almacenamiento del producto y carga

Desde el punto de vista geotécnico, se incluyen las siguientes actuaciones o tratamientos:

- Cimentaciones superficiales mediante zapatas y losas
- Cimentaciones profundas mediante pilotes de 600 y 800 mm de diámetro
- Tratamiento de mejora de terreno en zona de vertidos mediante columnas de grava
- Tratamiento de mejora del terreno en zona portuaria mediante precarga

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA OBRAS

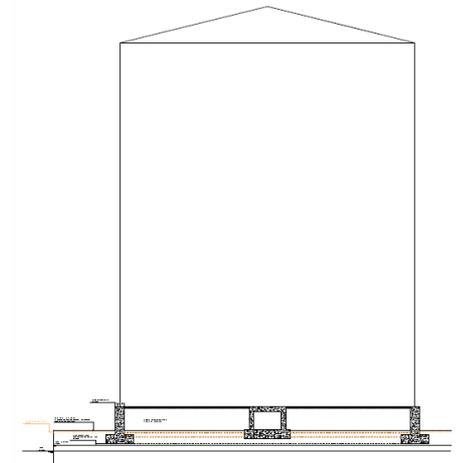


Las obras se ubican en el puerto de Djen Djen en Argelia

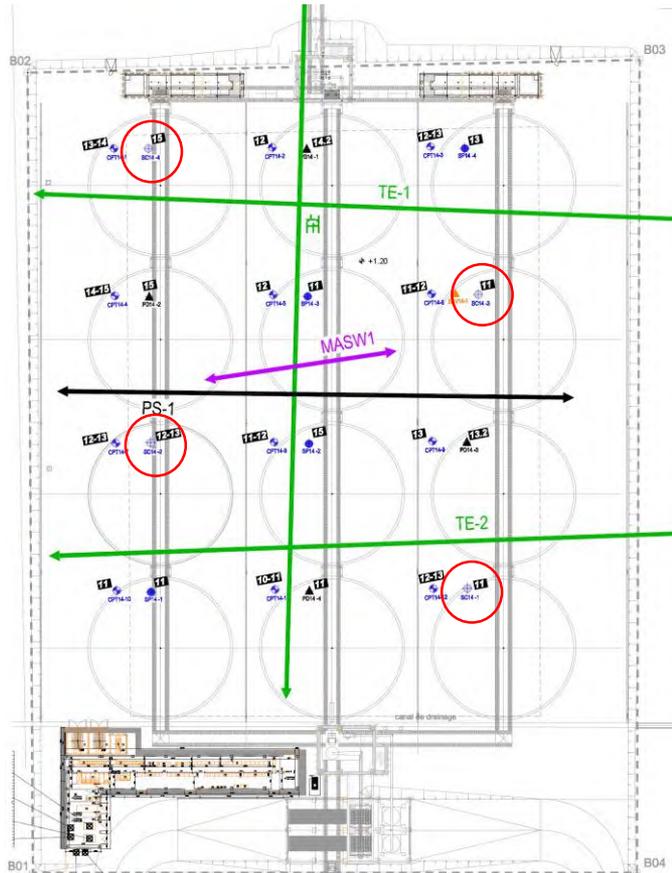
Se requiere la ejecución de 12 silos de almacenamiento de grano, de 40 m de altura y 32 m de diámetro, conectados entre sí por galerías y cintas transportadoras.

Los silos suponen una carga de 33 t/m<sup>2</sup>.

Su cimentación está compuesta por una zapata en forma de anillo de 5 m de base y 1 m de canto.



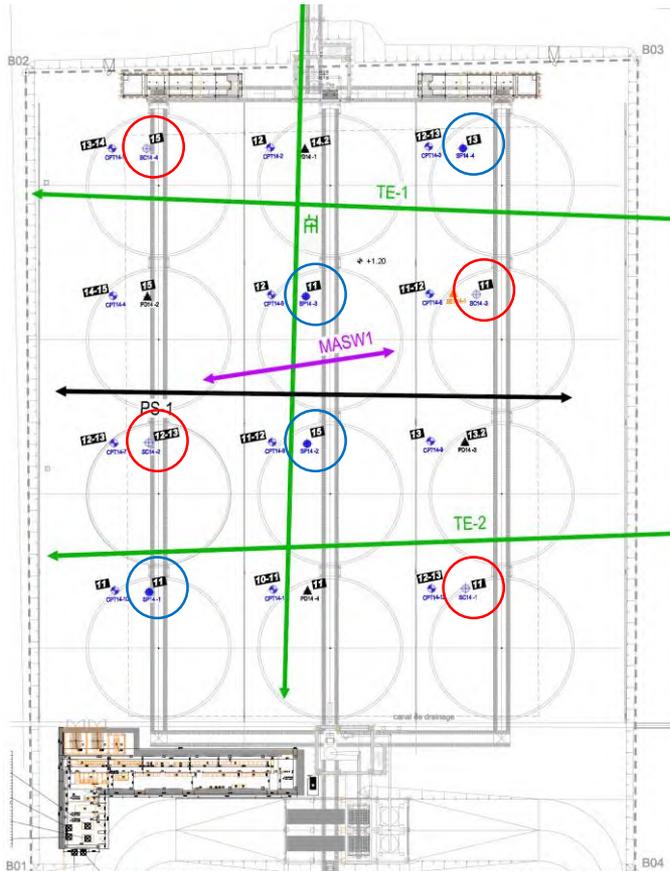
### 3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA



Para la realización del informe geotécnico se ejecutó una campaña geotécnica compuesta por:

- 4 sondeos mecánicos a rotación de 45 m de longitud
- 4 sondeos presiométricos de 45 m de longitud
- 4 ensayos de penetración DPSH de 15 m de longitud
- 12 ensayos de penetración CPTU de 24 m de longitud media
- Perfiles de tomografía y sísmicos

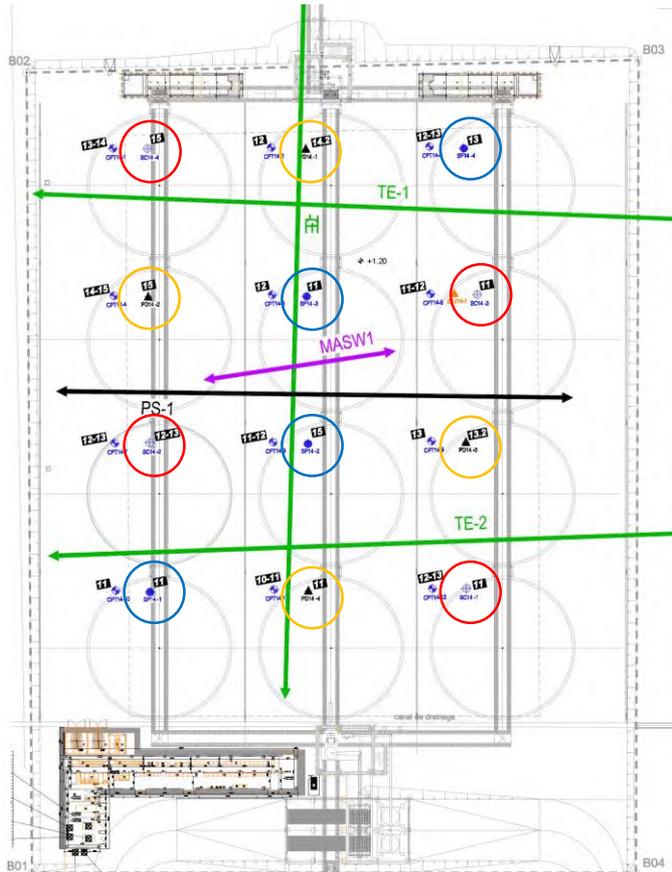
### 3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA



Para la realización del informe geotécnico se ejecutó una campaña geotécnica compuesta por:

- 4 sondeos mecánicos a rotación de 45 m de longitud
- 4 sondeos presiométricos de 45 m de longitud
- 4 ensayos de penetración DPSH de 15 m de longitud
- 12 ensayos de penetración CPTU de 24 m de longitud media
- Perfiles de tomografía y sísmicos

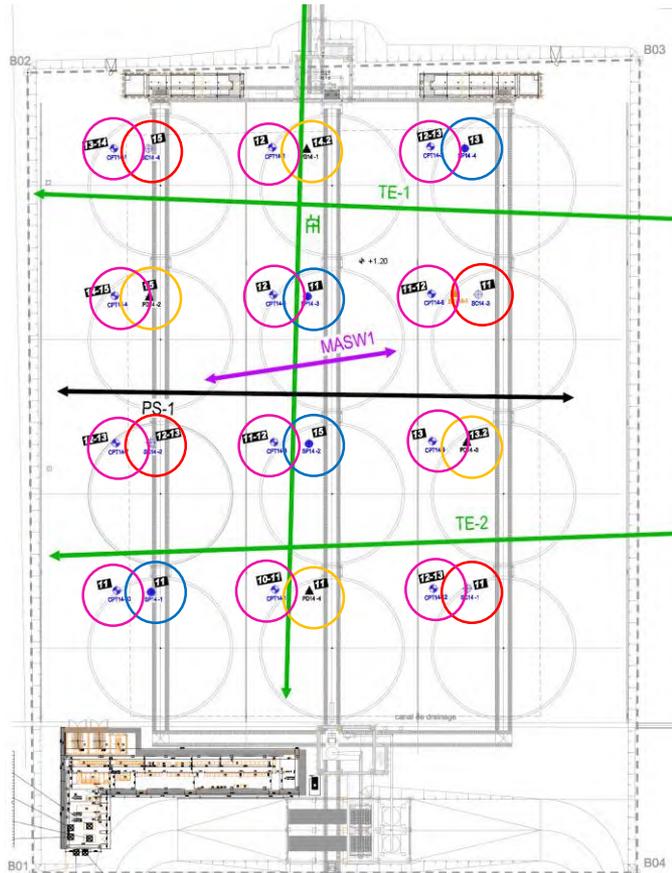
### 3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA



Para la realización del informe geotécnico se ejecutó una campaña geotécnica compuesta por:

- 4 sondeos mecánicos a rotación de 45 m de longitud
- 4 sondeos presiométricos de 45 m de longitud
- 4 ensayos de penetración DPSH de 15 m de longitud
- 12 ensayos de penetración CPTU de 24 m de longitud media
- Perfiles de tomografía y sísmicos

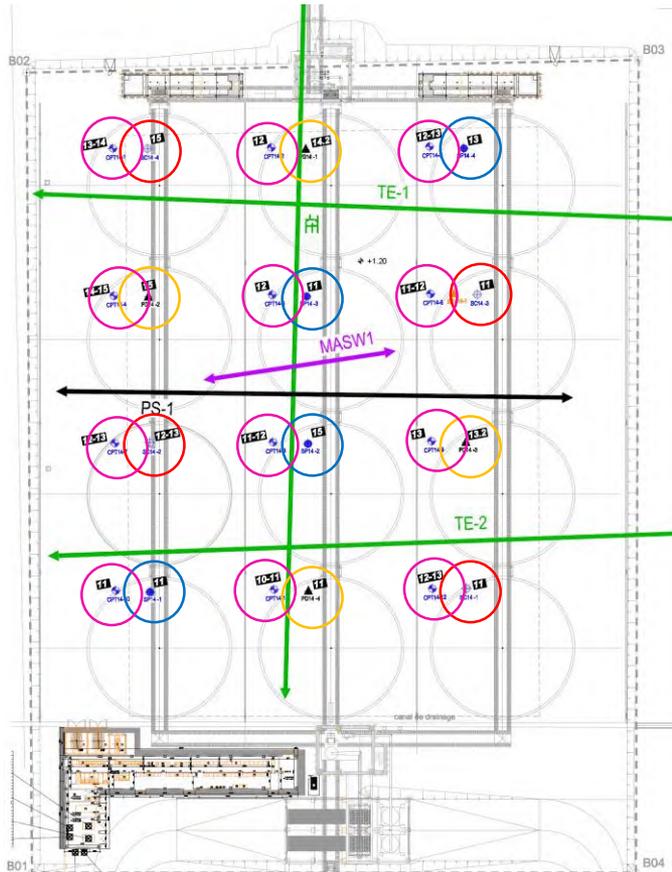
### 3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA



Para la realización del informe geotécnico se ejecutó una campaña geotécnica compuesta por:

- 4 sondeos mecánicos a rotación de 45 m de longitud
- 4 sondeos presiométricos de 45 m de longitud
- 4 ensayos de penetración DPSH de 15 m de longitud
- 12 ensayos de penetración CPTU de 24 m de longitud media
- Perfiles de tomografía y sísmicos

### 3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

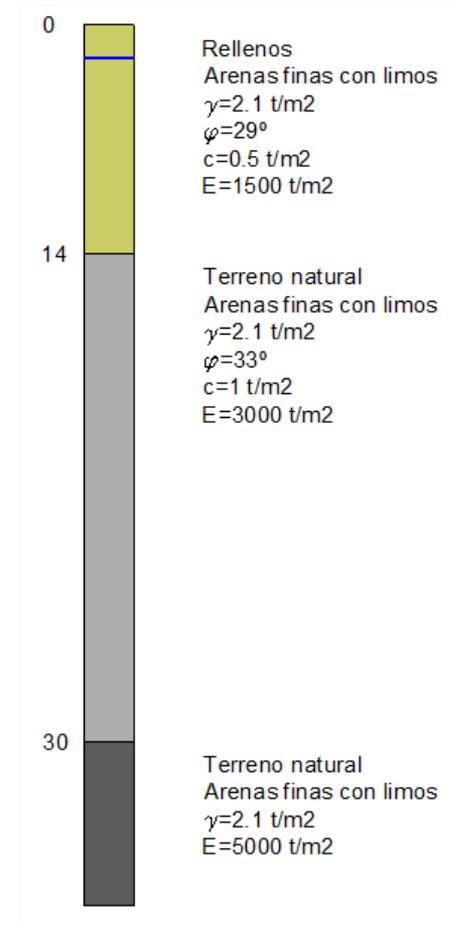


Para la realización del informe geotécnico se ejecutó una campaña geotécnica compuesta por:

- 4 sondeos mecánicos a rotación de 45 m de longitud
- 4 sondeos presiométricos de 45 m de longitud
- 4 ensayos de penetración DPSH de 15 m de longitud
- 12 ensayos de penetración CPTU de 24 m de longitud media
- Perfiles de tomografía y sísmicos

Se distinguen los siguientes niveles geotécnicos:

- Rx. rellenos antrópicos vertidos
- Rp. Rellenos portuarios: arenas comp. media de 10-14 m de espesor
- Rf. Rellenos de fondo marino: arenas algo más compactas que el nivel anterior



#### CONDICIONANTES PARA LA CIMENTACIÓN

- Cargas elevadas en una gran superficie, que afectan a niveles del terreno a gran profundidad
- No se ha detectado sustrato indeformable que limite asientos en profundidad o permita el empotramiento de una cimentación profunda

#### ALTERNATIVAS DE CIMENTACIÓN

- Cimentación superficial  Se estiman asientos del orden de 40 cm
- Cimentación profunda con pilotes  Trabajarán como pilotes flotantes.  
Necesitan una gran longitud para el desarrollo de la resistencia por fuste requerida  
Elevados asientos

En ambos casos es necesario un tratamiento del terreno previo.

### ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DEL TERRENO

- Vibroflotación



Densificación por acción de una vibración en el interior del terreno  
Se aplica en terrenos granulares flojos, con #0,08<5-10%

En la parcela los suelos presentan un contenido en finos superior al 15%

- Vibrosustitución



Densificación por acción de una vibración en el interior del terreno  
Mejora del terreno por aportación de material granular

Solo actúa en la capa superior del terreno (10-15 m)

- Precarga



Tratamiento de mejora de terreno de uso extendido en suelos portuarios

Los terrenos sometidos a una cierta carga, se deforman más la primera vez que se aplica la carga que en ocasiones posteriores. La primera carga deja al suelo con mayor resistencia y menor deformabilidad, aunque dicha carga sea retirada

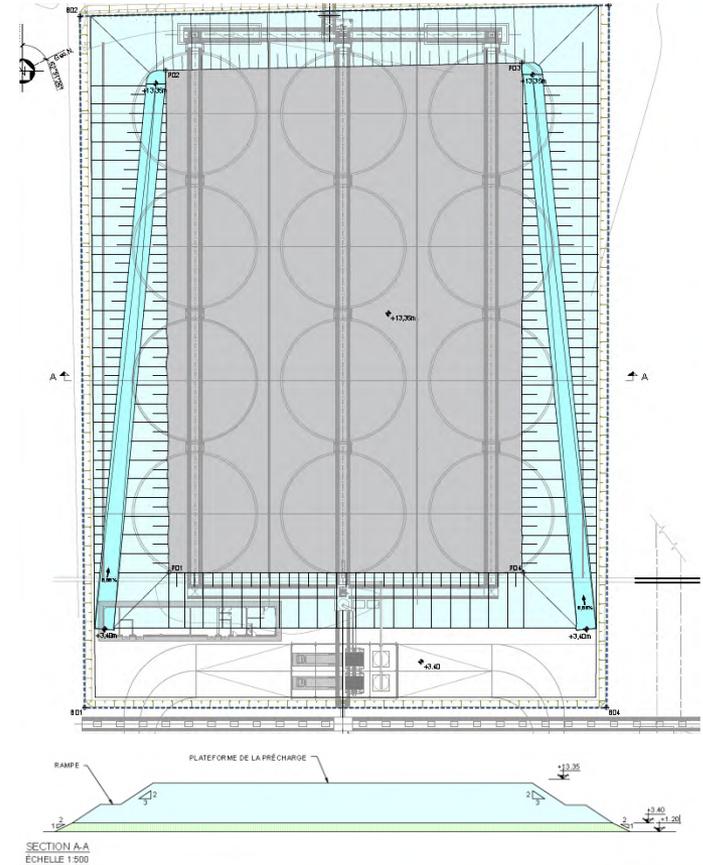
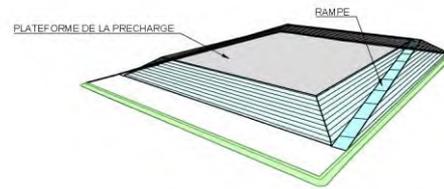
En la parcela los suelos son permeables, por lo que no se requiere de tratamiento adicional para acelerar la consolidación

Se propone la cimentación superficial de los silos, tras un tratamiento del terreno mediante precarga.

# 5. TRATAMIENTO DEL TERRENO

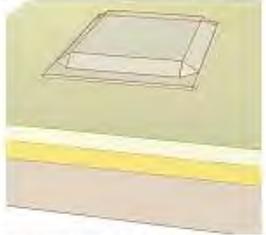
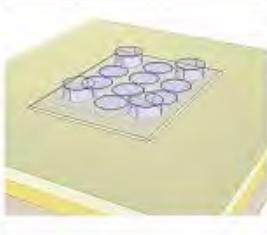
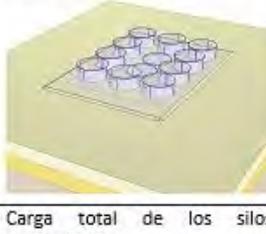
Se propone la ejecución de un tratamiento del terreno mediante precarga con relleno de tierras, de 11,5 m de altura, que supondrá una carga similar a la carga media en servicio.

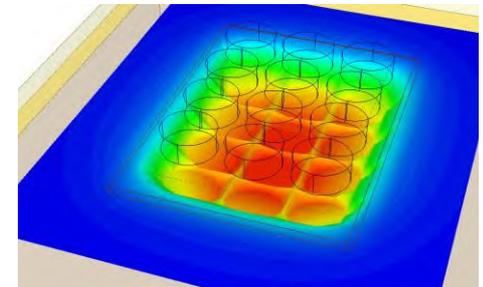
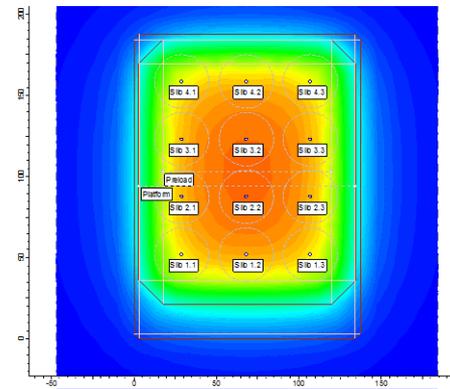
La altura de la precarga está limitada por la superficie disponible en la parcela.



## 5. TRATAMIENTO DEL TERRENO

Para el diseño de la precarga, se realizó un cálculo de asientos analítico y mediante el programa Settle 3D, estableciendo distintas fases de carga:

		
Ejecución de la plataforma hasta la cota +3.40 Ejecución de la precarga hasta la cota +13.35 Retirada de la precarga	Ejecución de la cimentación de los silos	Carga total de los silos de las esquinas
		
Carga total de los silos perimetrales	Carga de los silos centrales	

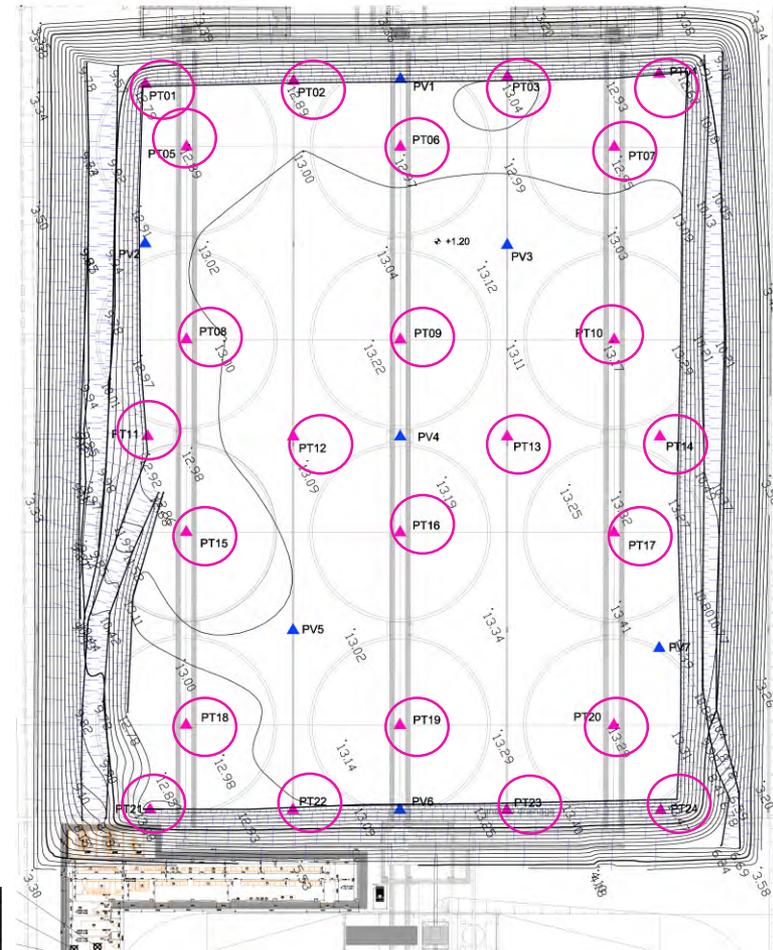


El modelo de cálculo indica un asiento máximo debido a la precarga de 40,9 cm, y un asiento máximo diferencial debido a la carga de los silos centrales de 9-10 cm.

# 6. AUSCULTACIÓN

El diseño de la precarga incluye:

- Campaña de auscultación:
  - 24 placas de asientos
  - 7 piezómetros
  - Calendario y frecuencia de medición



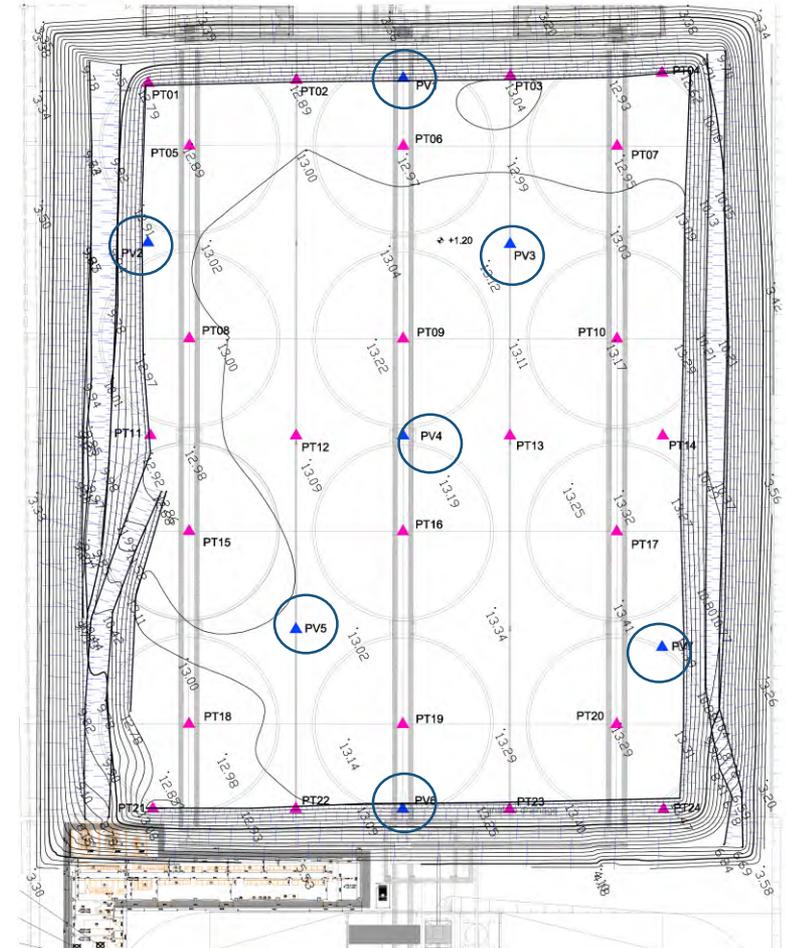
LÉGENDE	
CAMPAÑA DE VERIFICACIÓN GEOTÉCNICA (POUR ÊTRE EXÉCUTÉE AVANT LES OPÉRATIONS DE PRÉCHARGE)	SP ■ SONDAGE PROFOND
SURVEILLANCE DE LA PRÉCHARGE (POUR ÊTRE INSTALLÉE AVANT LES OPÉRATIONS DE PRÉCHARGE)	PT ▲ PLACQUE TASSEMENT (24 UNITÉS) PV ▲ FIL PIÉZOMÈTRE VIBRANT (7 UNITÉS)
ESSAI GÉOTÉCNIQUE APRÈS LE RETRAIT DE LA PRÉCHARGE (POUR ÊTRE EXÉCUTÉ APRÈS LE RETRAIT DE LA PRÉCHARGE)	SN ■ SONDAGE (6 UNITÉS) PR ▲ SONDAGE PIÉZOMÈTRE (6 UNITÉS) CPTU ▲ ESSAI DE PÉNÉTRATION AU CÔNE (6 UNITÉS) DH ▲ ESSAI DOWN HOLE (2 UNITÉS)

# 6. AUSCULTACIÓN

El diseño de la precarga incluye:

- Campaña de auscultación:
  - 24 placas de asientos
  - 7 piezómetros
  
- Propuesta de frecuencia de medición:

Fase	Frecuencia
Durante la construcción	Medición diaria Mínimo 1 medición por cada tongada de relleno
Después de la construcción	En el primer mes: 1 medición/ 3 días En los siguientes 2 meses: 1 medición /semana



LÉGENDE	
CAMPAÑA DE VERIFICACIÓN GEOTÉCNICA (POUR ÊTRE EXÉCUTÉE AVANT LES OPÉRATIONS DE PRÉCHARGE):	SP ■ SONDAJE PROFUNDO
SURVEILLANCE DE LA PRÉCHARGE (POUR ÊTRE INSTALLÉ AVANT LES OPÉRATIONS DE PRÉCHARGE):	PT ▲ PLaque TASSiMENT (24 UNITÉS) PV ▲ FIL PIÉZOMÈTRE VIBRANT (7 UNITÉS)
ESSAI GÉOTÉCNIQUE APRÈS LE RETRAIT DE LA PRÉCHARGE (POUR ÊTRE EXÉCUTÉ APRÈS LE RETRAIT DE LA PRÉCHARGE):	SN ⊕ SONDAJE @ UNITÉS PR ⊕ SONDAJE PIÉZOMÈTRE @ UNITÉS CPTU ⊕ ESSAI DE PÉNÉTRABILITÉ AU CÔNÉ @ UNITÉS DH ⊕ ESSAI DOWN-HOLE (2 UNITÉS)

La precarga se ejecuto en octubre de 2017, con algo de retraso en zona oeste, manteniéndose durante 3 meses.

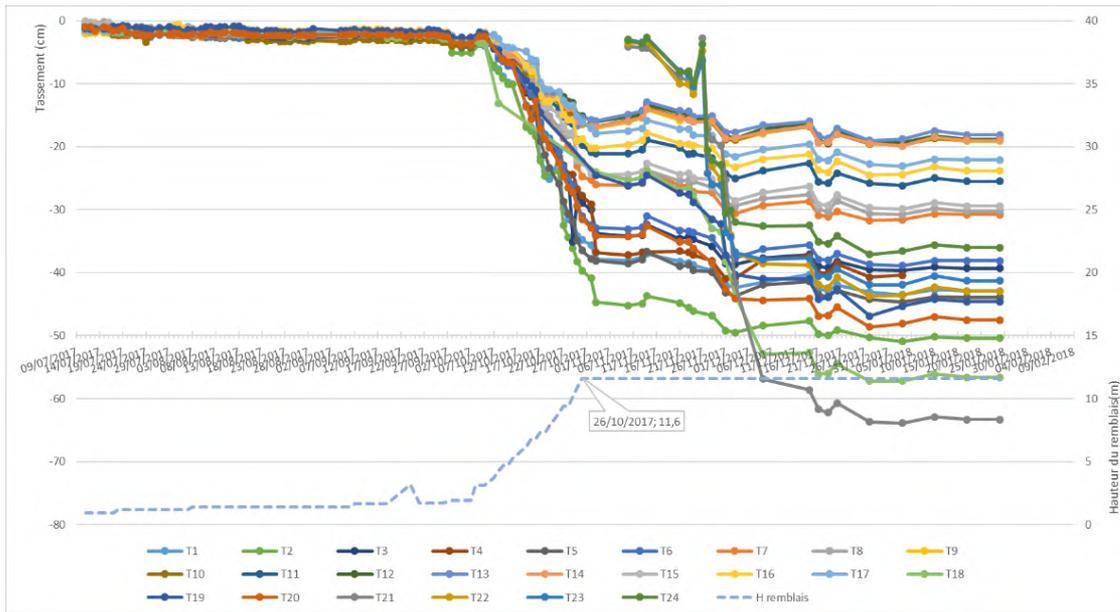
Se retiró una vez comprobada la estabilización de los asientos.

La interpretación de los datos procedentes de los elementos de auscultación permitieron la calibración del modelo de cálculo, para permitir su empleo para el ajuste de los asientos previstos en las cimentaciones de los silos.



Se detectó sobre foto aérea, la existencia de un acopio de material de altura y extensión importante que permaneció en la parcela durante un año aproximadamente.

Este acopio supone ya una “precarga” local, previa a la ejecutada, a tener en cuenta en la interpretación de los resultados.



## PLACAS DE ASIENTO

Se observa una gran variabilidad en los asientos registrados (20-60 cm), por lo que se realizó una zonificación. En las lecturas, se observa, además, que el asiento se produce de manera simultánea a la aplicación de las cargas, en este caso, con la altura de relleno.

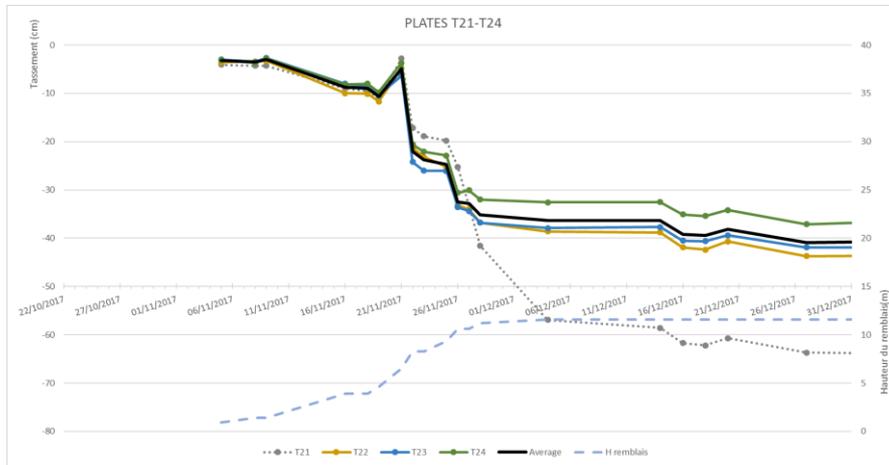
## PIEZÓMETROS

Los piezómetros no detectaron incremento de presión intersticial.

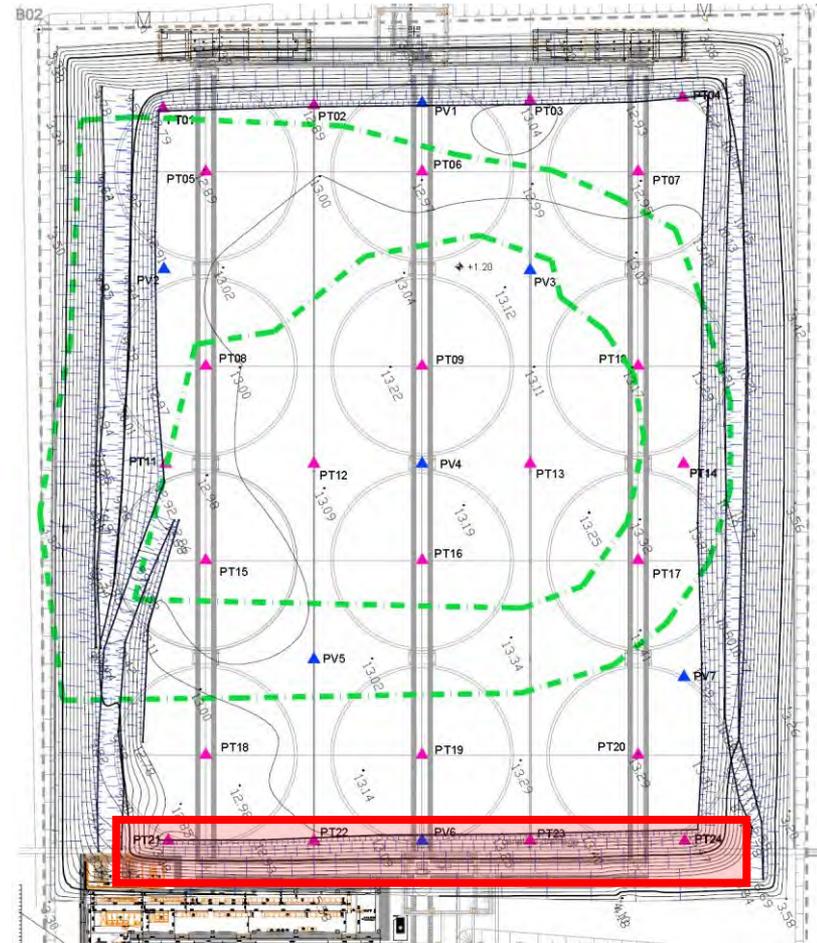
## PLACAS T21-T24

Localizadas en la zona donde la precarga se ejecutó con posterioridad.

Asiento medio del orden de **38 cm.**

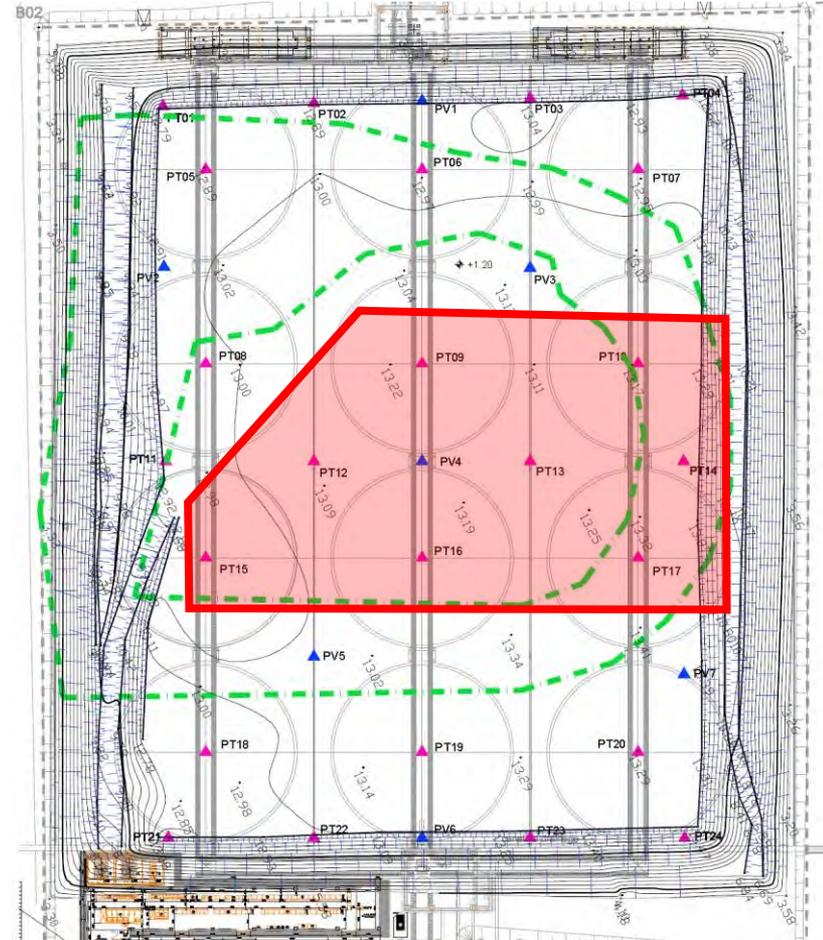
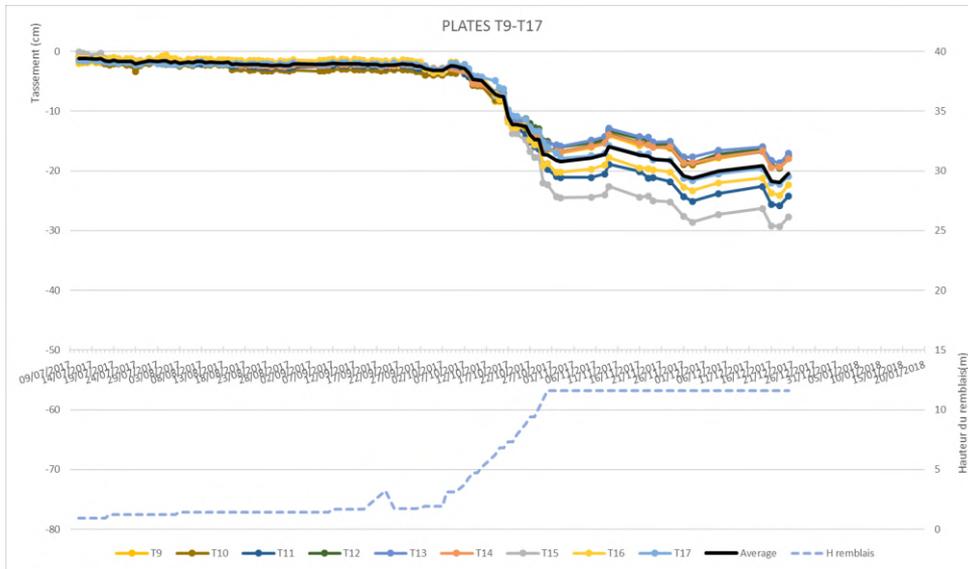


El valor de la placa T21 no ha sido considerado por tratarse de un valor anómalo.



## PLACAS T9-T17

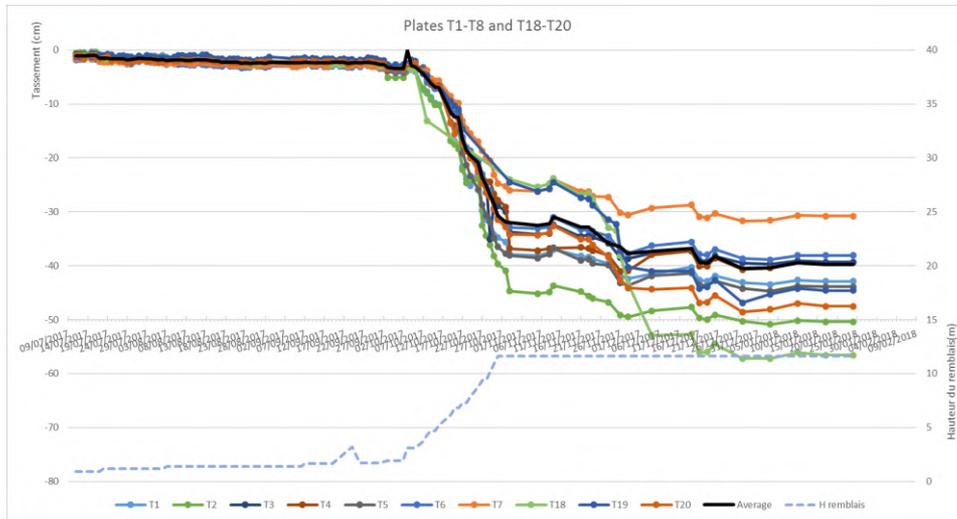
En la zona donde el acopio previo alcanzo su altura máxima.  
Asiento medio del orden de **20 cm**.



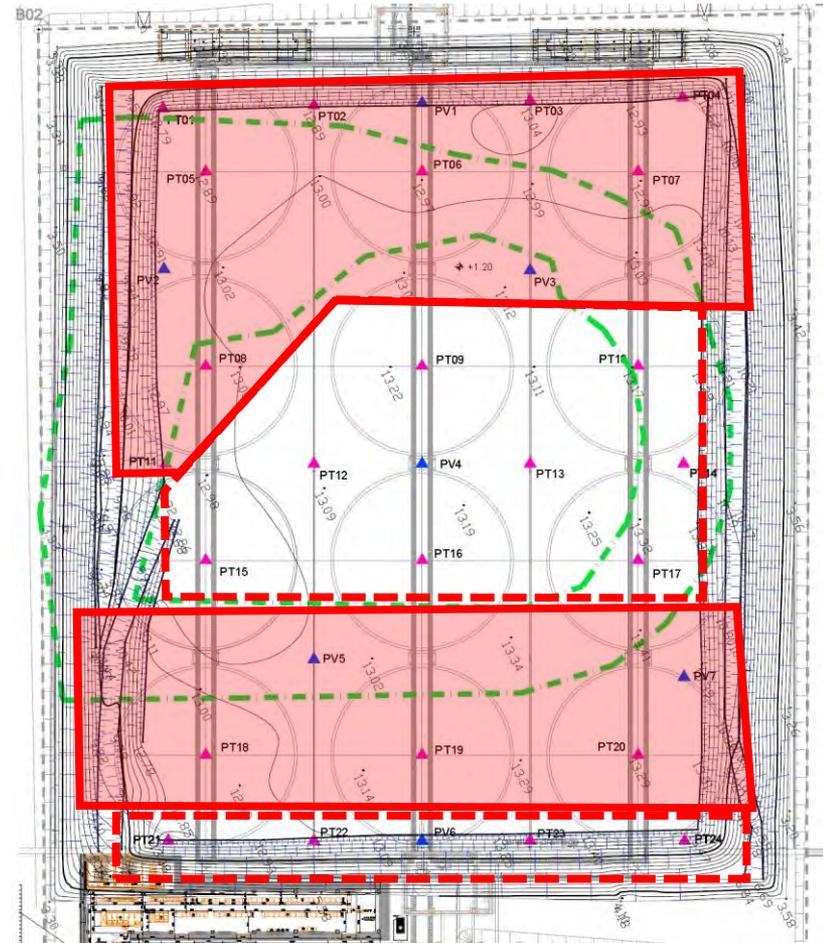
## PLACAS T1-T8 y T18-T20

Fuera del ámbito de influencia del acopio  
Mayor dispersión, debido a la influencia de los taludes de la precarga.

Asiento medio del orden de **40 cm.**

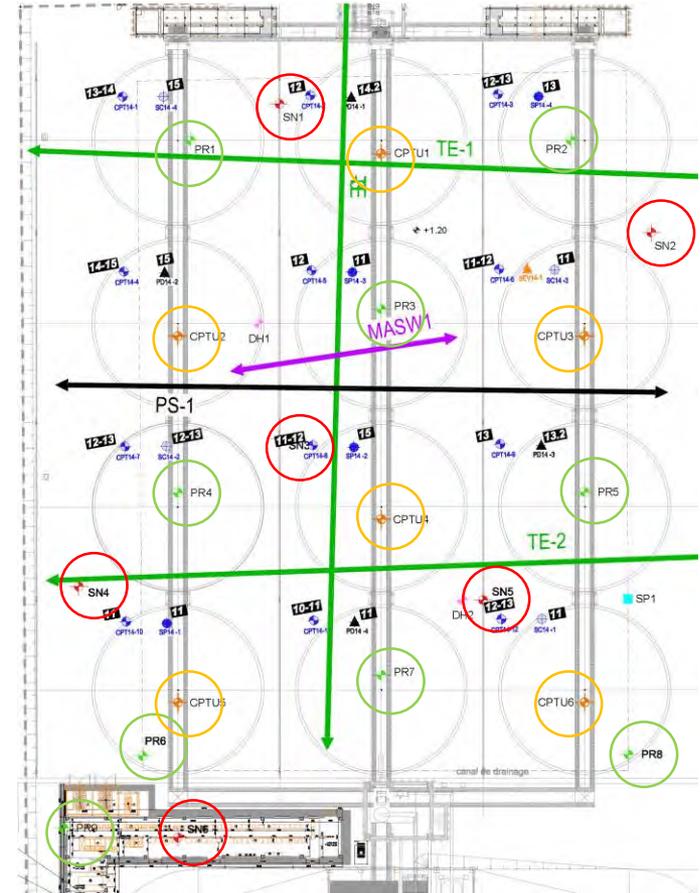


Se observa que la mayor parte del asiento (80-90%) es instantáneo, produciéndose durante la colocación de la carga. La estabilización de asientos se observa al mes de ejecutada la precarga.

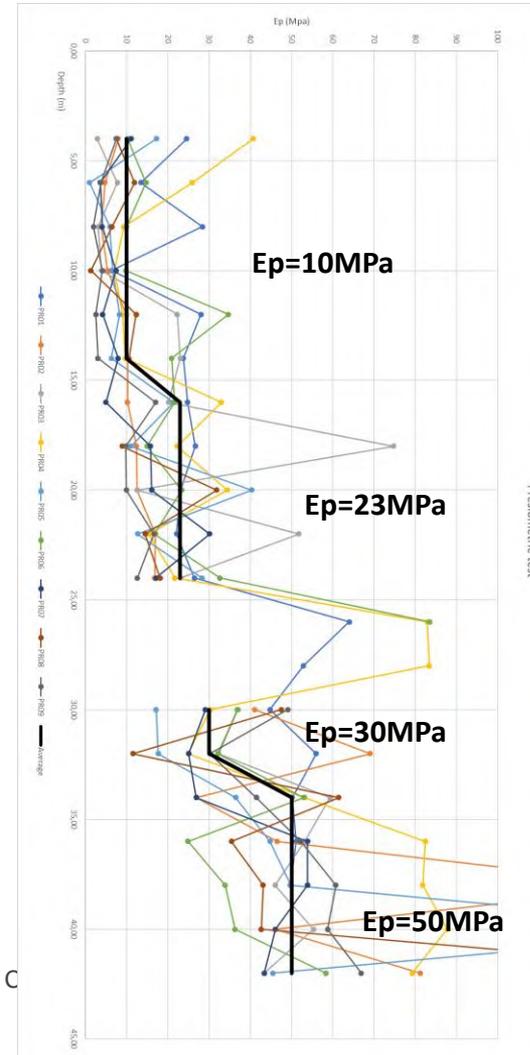
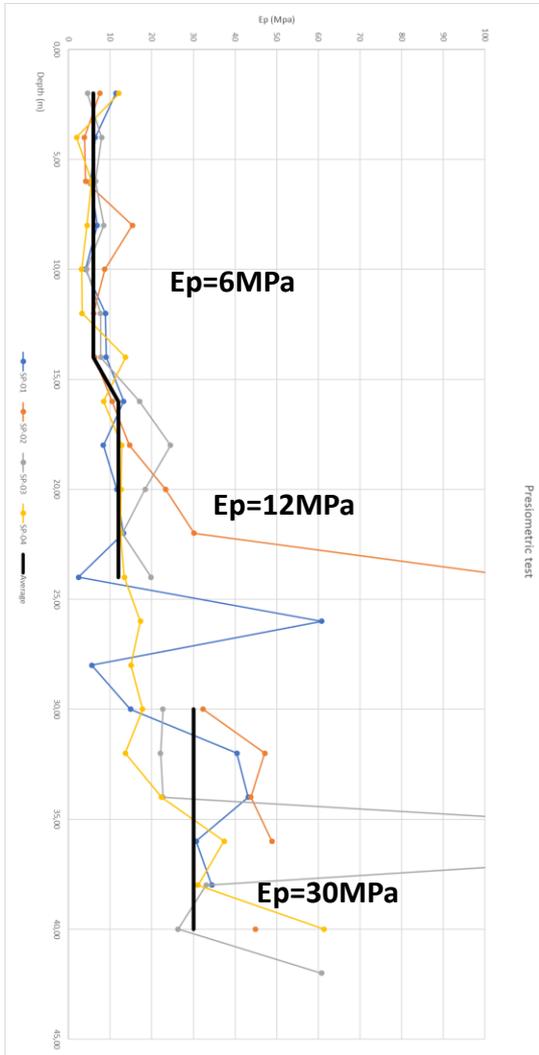


Tras la retirada se realizó una campaña geotécnica de comprobación:

- 6 sondeos mecánicos a rotación de 42 m de longitud
- 9 sondeos presiométricos de 43 m de longitud
- 6 ensayos de penetración CPTU



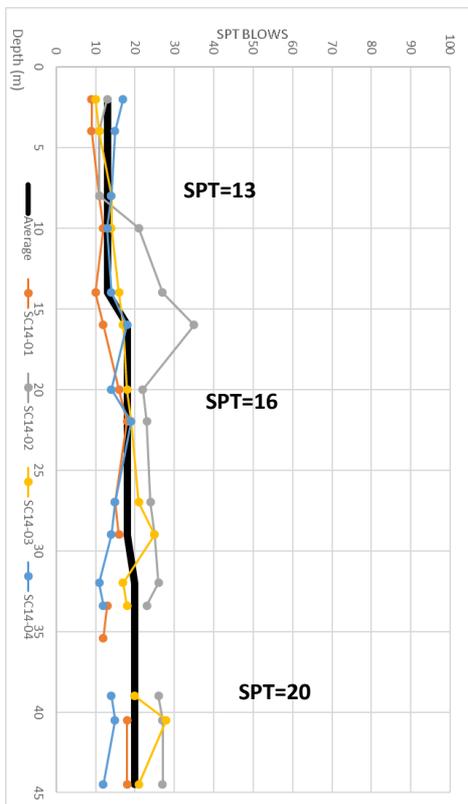
# 8. EVALUACIÓN DEL GRADO DE MEJORA



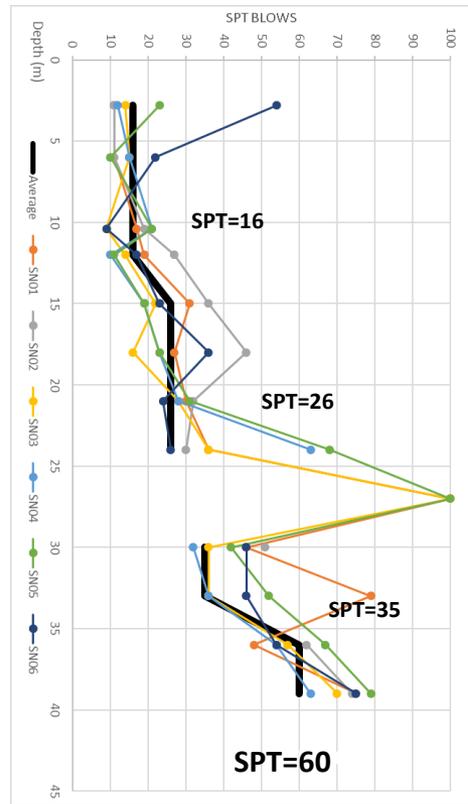
Se observa en los presiómetros realizados tras la retirada de la precarga, un incremento de los módulos presiométricos.

El incremento presenta un ratio del orden de 2, especialmente a partir de 14 m de profundidad.

# 8. EVALUACIÓN DEL GRADO DE MEJORA



SPT en sondeos camp. inicial



SPT en sondeos Camp. comprobación

Los golpes de los SPT también muestran un incremento con un ratio del orden de 2,5-3,0.

El incremento presenta un ratio del orden de 2, especialmente a partir de 14 m de profundidad.

	NSPT	Ep (Mpa)			
		Range	Average	Range	Average
Port fill	0,0-14,0	9-17	13	2-15	6,5
Seabed sands	14,0-30,0	10-35	18	2-25	10-12
Seabed sands	30,0-55,0				
Marl	from 55,0	-	-	-	-

2016 campaign

	NSPT	Ep (Mpa)			
		Range	Average	Range	Average
Port fill	0,0-14,5	9-22	16	2-28	10,6
Seabed sands	14,5-24,5	16-43	26	9-72	23
Seabed sands and gravels	24,5-29,5	R	R		
Disturbed marl	from 29,5	32-36	35	11-37	30
Marl		52-79	60	27-81	50

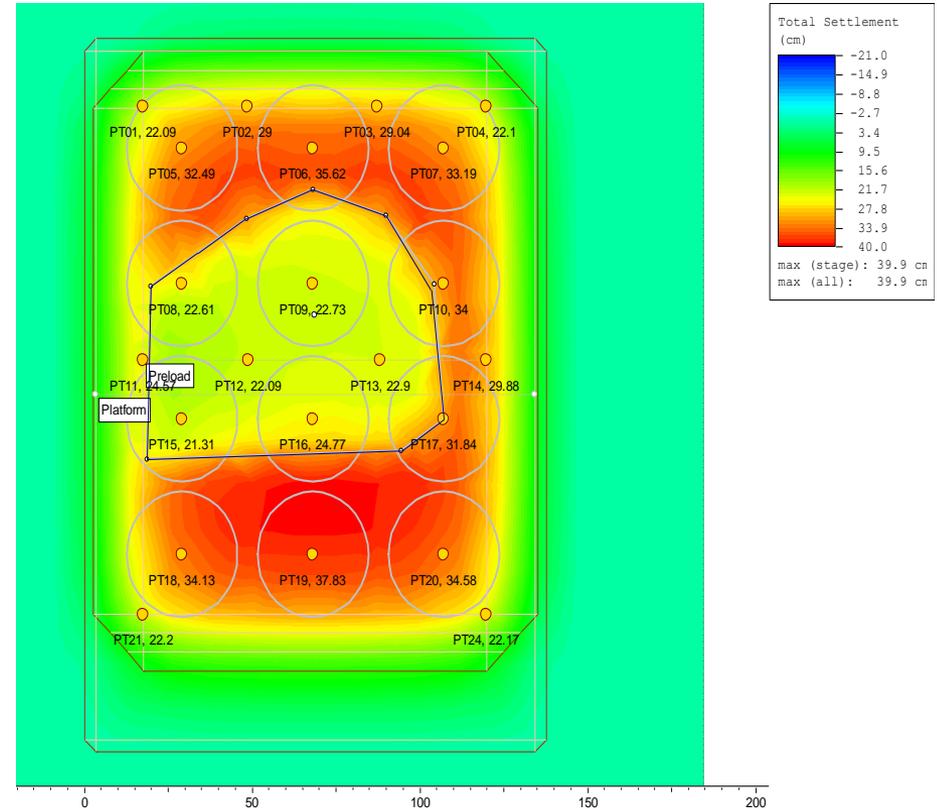
2018 campaign

# 9. RECALIBRADO DEL MODELO

El modelo recalibrado indica los siguientes asientos en la precarga:

- Zona dentro de la huella del acopio previo: 21-24 cm
- Zona de taludes de la precarga: 27-36 cm
- Resto: 40-44 cm

Se observa un buen ajuste a las lecturas de las placas de asiento, por lo que se emplea este modelo para la predicción de asientos de los silos.

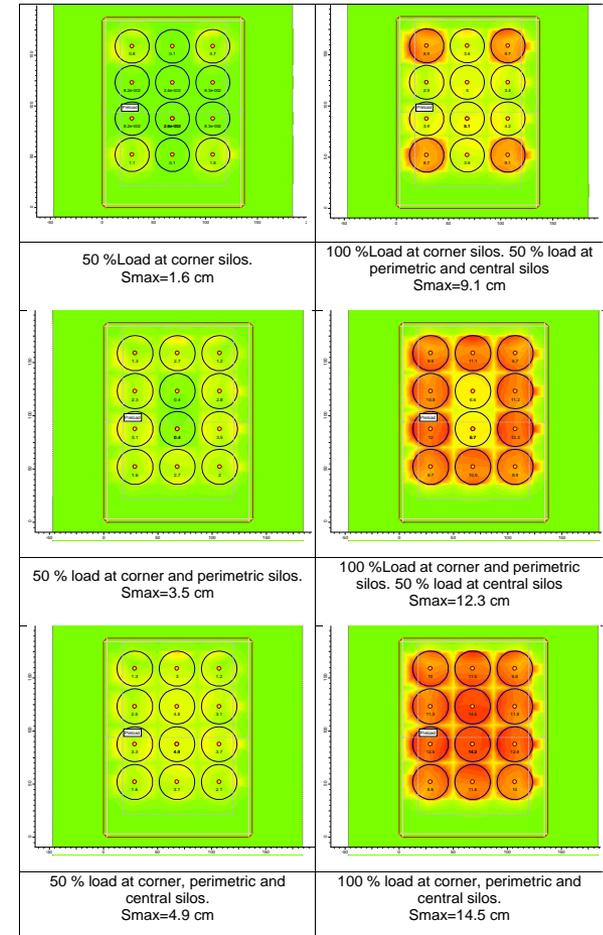


# 9. RECALIBRADO DEL MODELO

Se propone un llenado/vaciado progresivo de los silos, comenzando por los silos de las esquinas, perimetrales y los silos centrales. Este faseado permitirá reducir los asentamientos diferenciales, especialmente durante los primeros ciclos de llenado.

El análisis del llenado 50% / 100% indica una reducción de asentamientos diferenciales entre depósitos adyacentes del orden de 5 cm.

Será necesaria la monitorización de los asentamientos durante los primeros ciclos de llenado.



- La cimentación de unos silos de grano en un relleno portuario induce sobre el terreno asientos elevados, superiores a los admisibles ( $\approx 40$  cm)
- Tras un análisis de alternativas, se analiza un tratamiento de mejora del terreno mediante precarga de tierras, tras la cual se ejecutará la cimentación superficial de los depósitos
- La precarga fue monitorizada de manera continua mediante la lectura de asientos, registrándose medidas entre 20-60 cm. Esta dispersión de lecturas queda justificada por la existencia de un acopio de material previo que precargó con anterioridad el terreno
- La campaña geotécnica de comprobación, posterior a la retirada de la precarga, muestra una mejora del terreno con un incremento de los módulos presiométricos y los SPT entre 2 y 3 veces
- El recalibrado del modelo deformacional con los resultados de la auscultación y de la campaña de comprobación reproduce las mediciones obtenidas, por lo que resulta adecuado para la estimación de los asientos debidos al llenado de los depósitos
- Se establece un faseado en el llenado/vaciado de los silos, con el objeto de reducir los asientos diferenciales, especialmente durante los primeros ciclos de llenado
- Las distintas fases de llenado/vaciado deberán realizarse desde las esquinas hacia el centro

# **IDOM**

**Our commitment, your success**

**IDOM.COM**

# IDOM

Infraestructuras sostenibles y  
resilientes para entornos cambiantes



## MODELO GEOTÉCNICO PARA LA LÍNEA 3 DEL METRO DE RIAD

1. INTRODUCCIÓN
2. CONTEXTO GEOLÓGICO
3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA
4. MÉTODOS CONSTRUCTIVOS
5. ANÁLISIS RIESGOS GEOTÉCNICOS
6. CONCLUSIONES
7. AGRADECIMIENTOS



Salini Impregilo  
Ansaldo STS  
Bombardier  
Larsen & Toubro  
Nesma  
Idom  
Worley Parsons



# 1. INTRODUCCIÓN

IDOM

## Arabia Saudí

2.150.000 km<sup>2</sup>

30M (9M expatriados)

Mayor productor petróleo del mundo

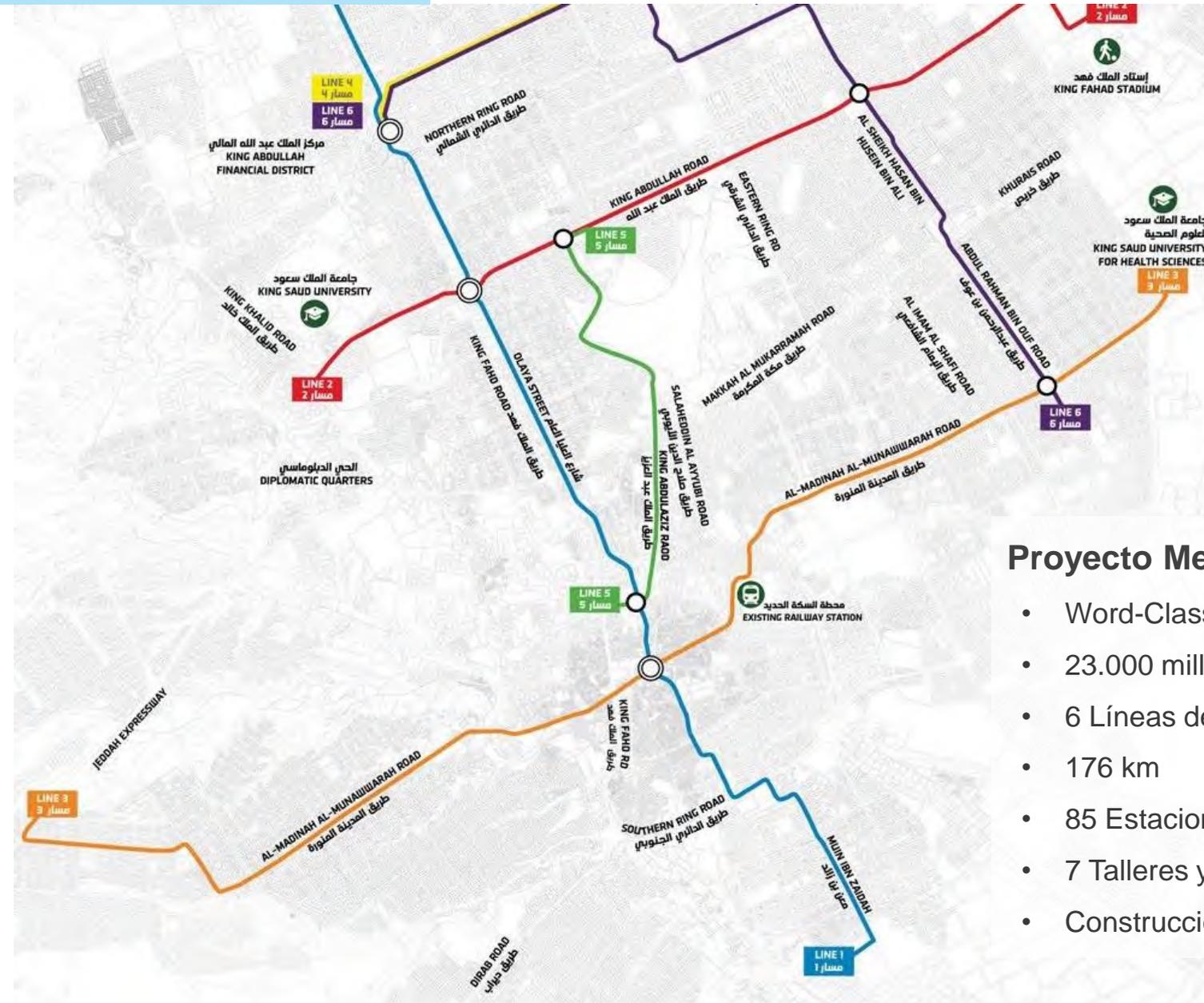
## Riad

Rápido crecimiento 6M (8M by 2030)

Tráfico privado denso: Contaminación

New World-Class Transport System



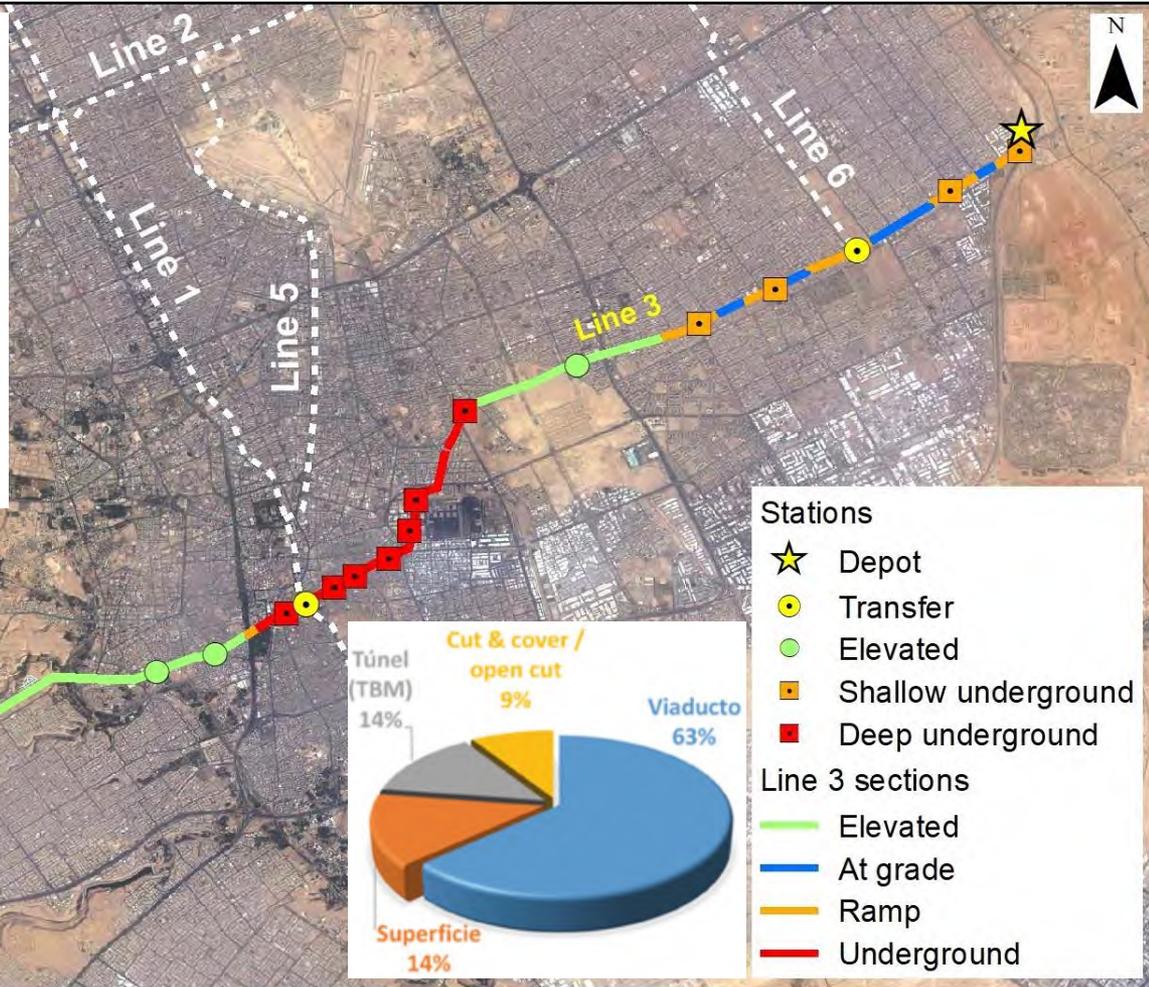


## Proyecto Metro de Riad

- World-Class Driverless System
- 23.000 millones \$
- 6 Líneas de Metro
- 176 km
- 85 Estaciones: 50 UG, 31 EL, 4 AG
- 7 Talleres y Cocheras
- Construcción 5 años (Final 2019)

## LÍNEA 3

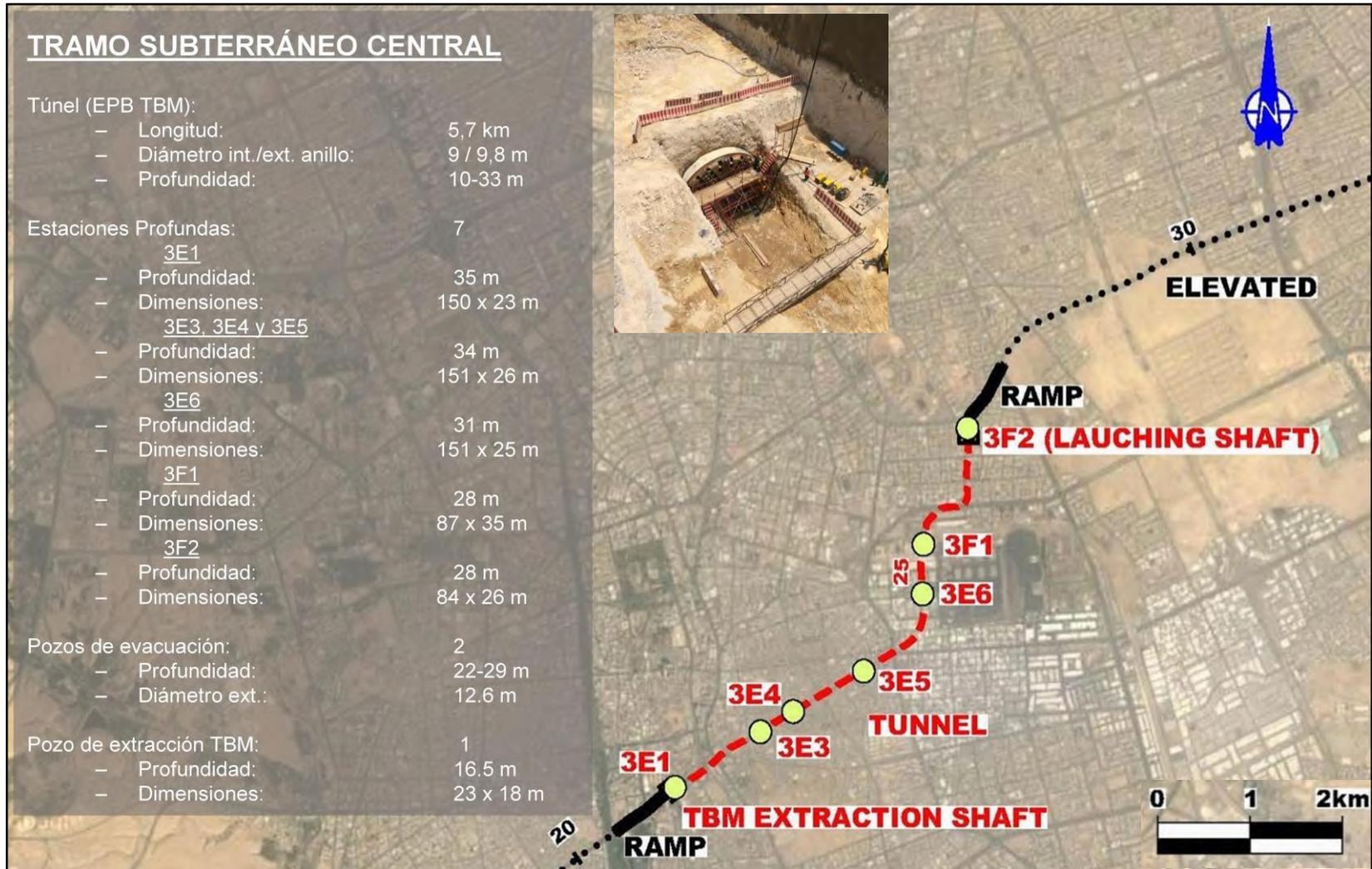
- La línea más larga: 41,6 km
- 350 profesionales
- >1 millón horas/hombre
- 22 Estaciones: 9 UG, 9 EL, 4 SH
- 25,7 km Viaducto
- 11 km Subterráneo (5.7 km TBM)
- 4,9 km A nivel
- 2 Talleres y Cocheras
- 2 Pozos Evacuación Emergencia



## DESAFÍOS

- Tamaño del proyecto (6.000 millones \$)
- Alcance multi - cultural
- Plazos muy reducidos “Fast – Track”
- Proyecto tipo “Design – Build”



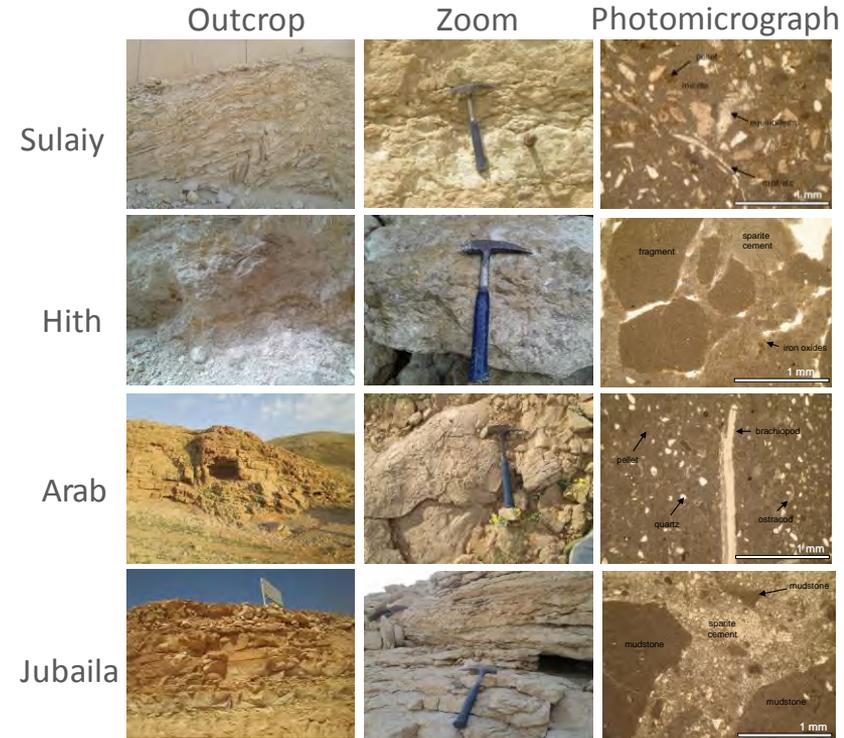
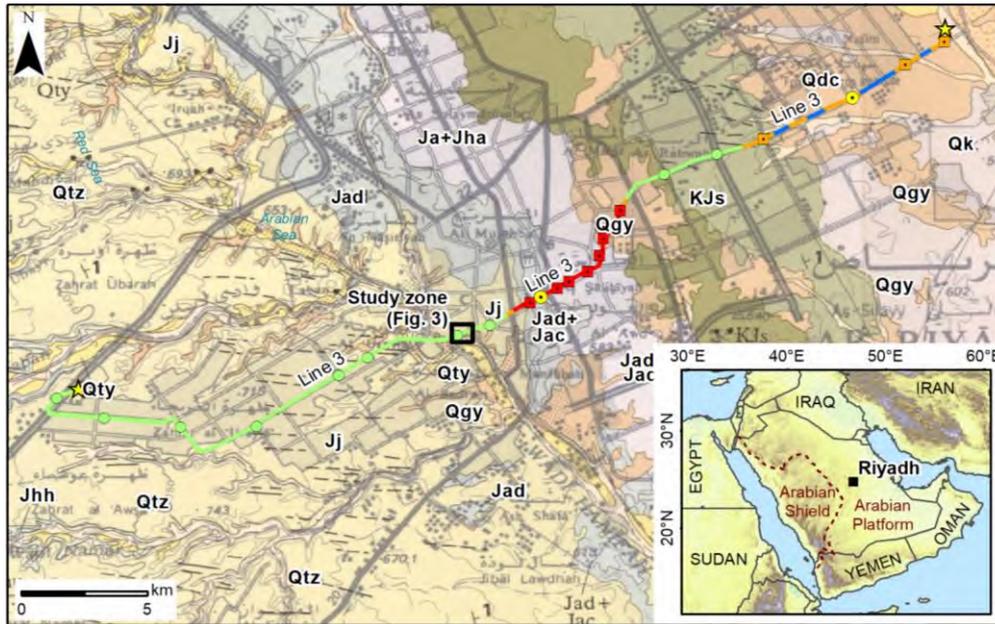


- Próxima edificios históricos y emblemáticos
- Mantenimiento TBM en estaciones excavadas

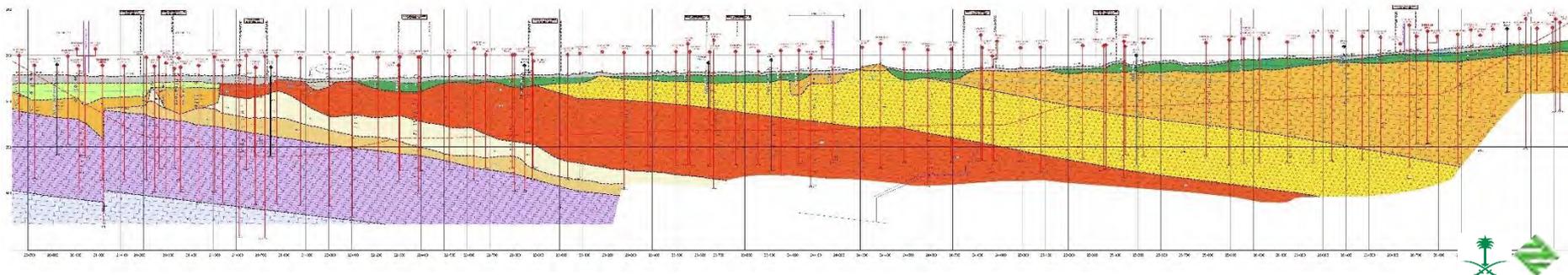
- Complejo contexto geológico-geotécnico
- Limitado espacio para ejecución estaciones



## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO

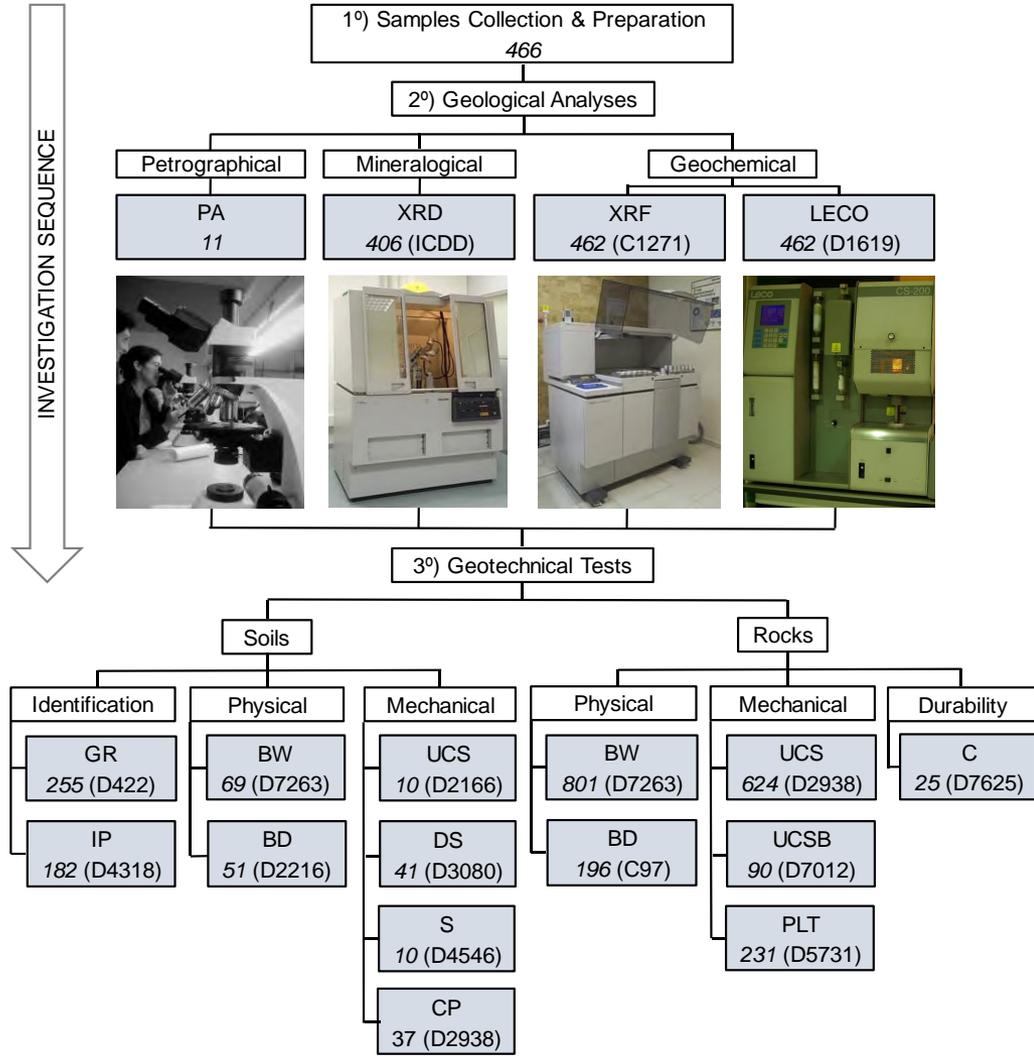


- Sucesión calcárea Jurásico Sup.-Cretácico Inf. (1-3<sup>o</sup>)
- Alto niveles freático
- Intenso plegamiento y brechificación disolución anhidritas

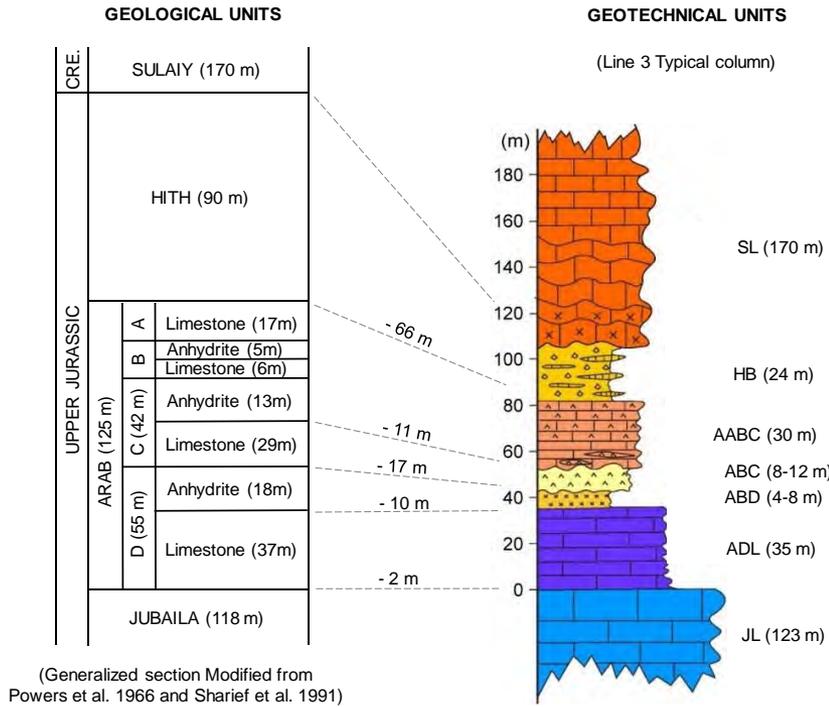


# 3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

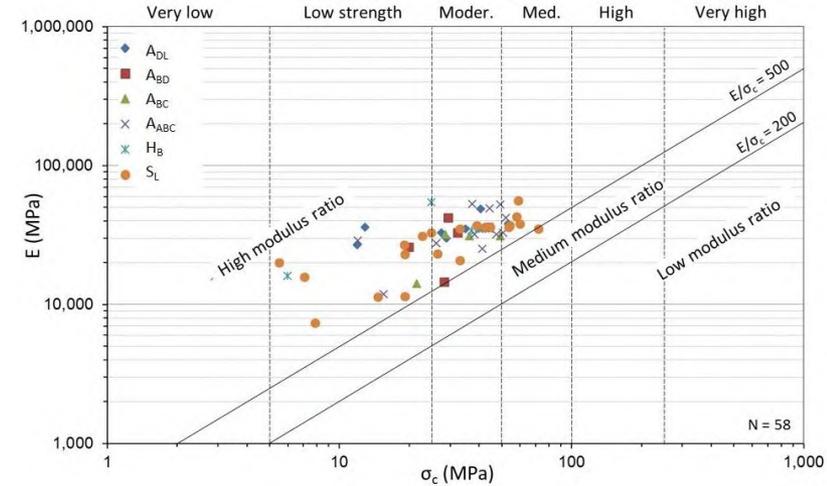
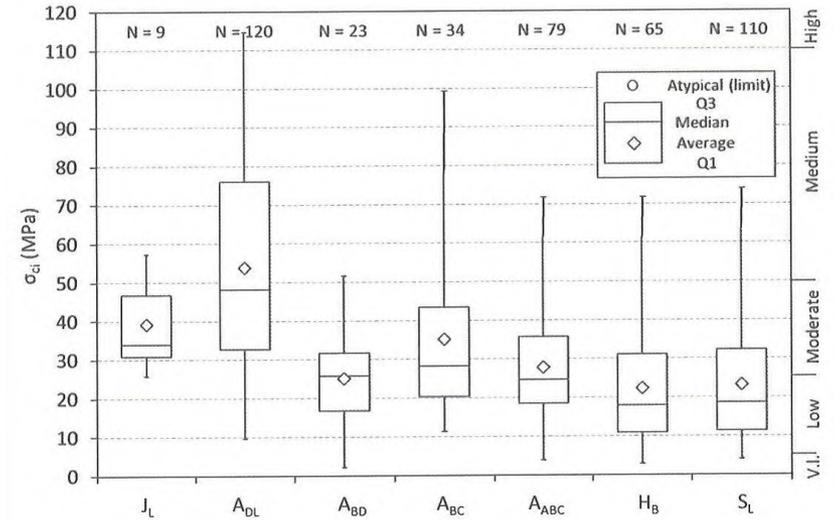
PROSPECCIONES	Geofísica	Sondeos mecánicos (342)	PRUEBAS IN SITU	Mecánicas	SPT (753)
		Sísmica de refracción (37,8 km)			Presiómetros (107)
		Down-hole (169)			Placas de carga (10)
		Cross-hole (28)			Ensayos de bombeo (7)
		Tomografía eléctrica (39,7 km)			Ensayos tipo Lugeon (199)
		Georadar (39,1 km)			Ensayos tipo Lefranc (33)
		Estaciones geomecánicas (17)			OTROS



# 3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA



	JL	ADL	ABD	ABC	AABC	HB	SL
<b>Prome.</b>	39	54	25	33	28	22	23
<b>Máx.</b>	57,5	115	51,6	98,2	72	71,7	73,7
<b>UCS (MPa)</b>							
<b>Mín.</b>	26	10	2,2	11,3	4	2,8	4
<b>Desv.</b>	15,12	27,98	12,88	21,23	13,1	15,18	15,53
<b>Nº</b>	9	120	23	34	79	65	110
<b>RMR</b>	75	72	42	56	57	46	57
<b>GSI</b>	70-75	65-70	40-45	50-55	50-55	40-50	50-55
<b>Calidad</b>	Buena	Buena	Media	Media	Media	Media	Media



- Resistencia baja-media. Alto módulo relativo
- Tv-logging caracterización geomecánica



## TBM-EPB



TBM  
(EPB)

- Calizas con riesgo kárstico y brechas
- Suelos superficiales
- Nivel freático próximo a la superficie
- Ambiente urbano

Minimizar subsidencias

Reducir plazo construcción

### DATOS RECORRIDO Y PERFIL TÚNEL

Longitud:	5,7 km
Mínimo radio vertical / horizontal:	800 m / 300 m
Gradiente (+/-):	6%

### DATOS GEOMÉTRICOS DOVELAS

Número de dovelas:	6+1 llave
Diámetro interior / exterior anillo:	9 m / 9,8 m
Espesor/ longitud dovelas:	400 mm / 1.8 m
Peso dovela más pesada:	8.500 Kg
Tipo de conexión:	"Biblock system"

### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS TBM

Tipo:	EPB Ø 10,16 m	
Cabeza de corte:		
	Rotación:	Bidireccional
	Spokes:	6
	Diámetro corte:	10.160 mm
	Ratio apertura:	35%
Puntos de inyección:		
	Inyec. Foam / bentonita:	8
	Inyección agua:	8
	Inyec. Agua / Agua P:	8 / 1 central
Escudo:		
	Tipo:	Articulado
	Presión trabajo en eje:	4 bar
Unidad motriz:		
	Máximo par de eje:	21.000 kNm at 1rpm
	Par desbloqueo:	27.000 kNm at 1rpm
Tornillo sin fin:		
	Longitud / Anchura:	15,5 m / 800 mm
Empuje:		
	Máximo empuje:	8.7849 kN @ 350 bar
	Número de cilindros:	38 en pares



## RAMPAS



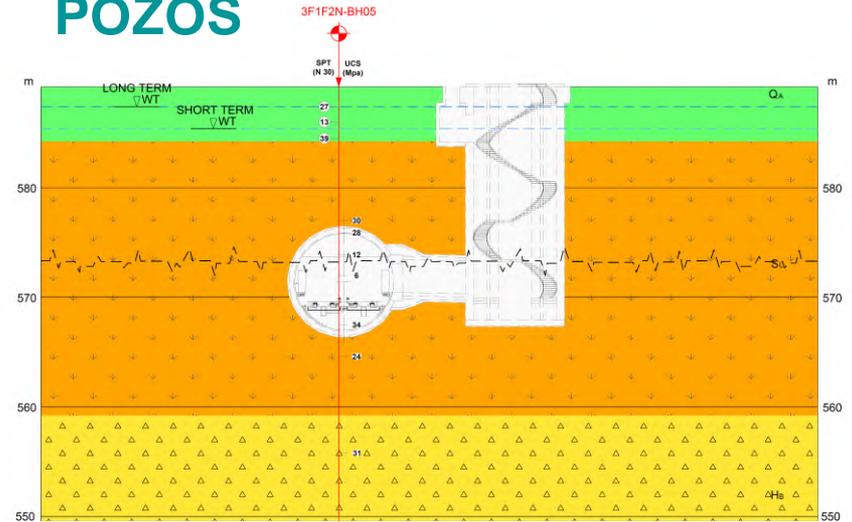
### Rampa Oeste

- Parcialmente TBM y “C&C”
- “Bottom-Up”, pilotes secantes (1 m), pantalla micropilotes y en trinchera

### Rampa Este

- “Bottom - Up”. Contención suelos con pantalla anclada micropilotes (N) y talud en suelos (1H:2V) con “soil-nailing” (S)
- Roca vertical, bulones pasivos, gunita, mallazo

## POZOS



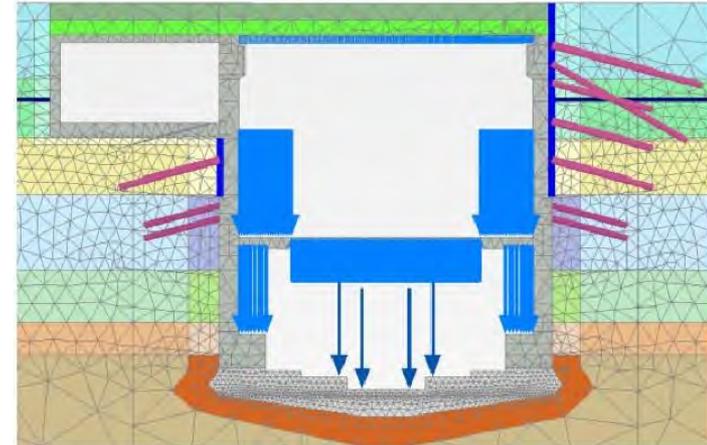
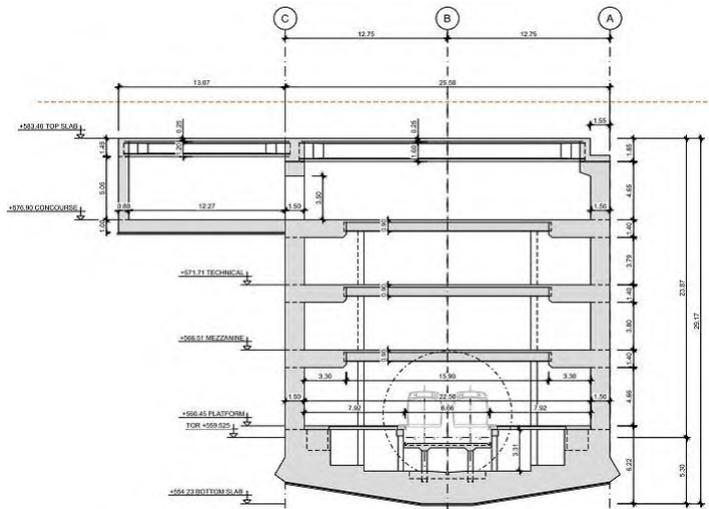
### Extracción TBM

- “C&C” con pantalla pilotes secantes arriostrados y con apuntalamientos
- Sistema “Bottom-Up” (16,5m profundidad)

### Evacuación emergencia

- “Top - Down”, “Shaft - Sinking”
- Conexión a túnel principal con túnel en mina (1,8 x 2,6 m) y marco refuerzo anillo

## ESTACIONES PROFUNDAS



### Excavación

- Excavación “concourse” vestíbulo, las salas MEP y las salas de ventilación (8-10m)
- Excavación caja profunda (28m (3F2)-35m (3E1) con longitud de 85 m (3F1 y 3F2) a 150 m (3E1, 3E3, 3E4, 3E5 y 3E6)



## ESTACIONES PROFUNDAS

### Procedimiento Constructivo

- “C&C”, “Bottom – Up”
- Bulones pasivos ( $\varnothing 50\text{mm}$  3x3m), gunita y mallazo en roca
- Pantalla pilotes secantes, vigas de atado, apuntalamientos, anclajes activos y bulones pasivos en suelos
- Denso entorno urbano, sin posibilidad de taludes en suelos => pilotes o micropilotes
- En zona de subsidencia kárstica (3E1) => anclas activos y pasivos

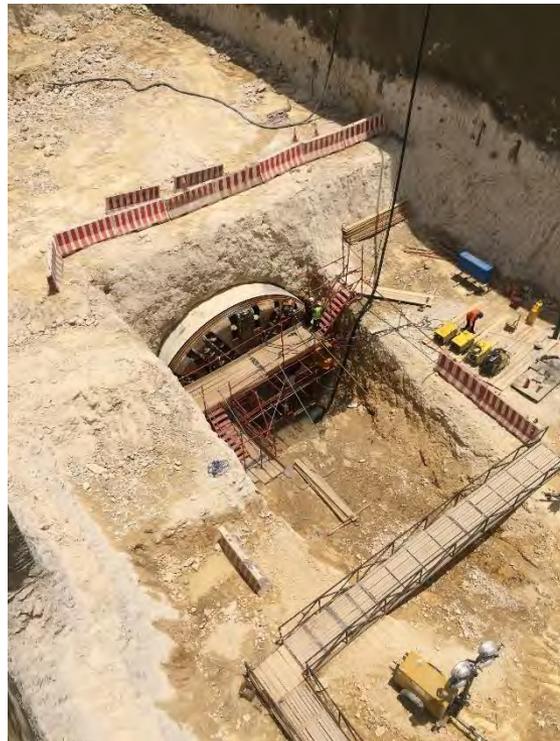
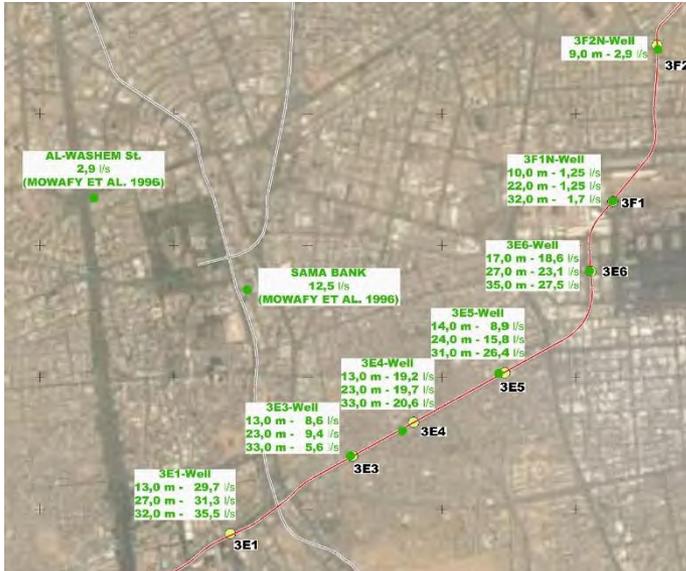


## ESTACIONES PROFUNDAS

### Desafíos

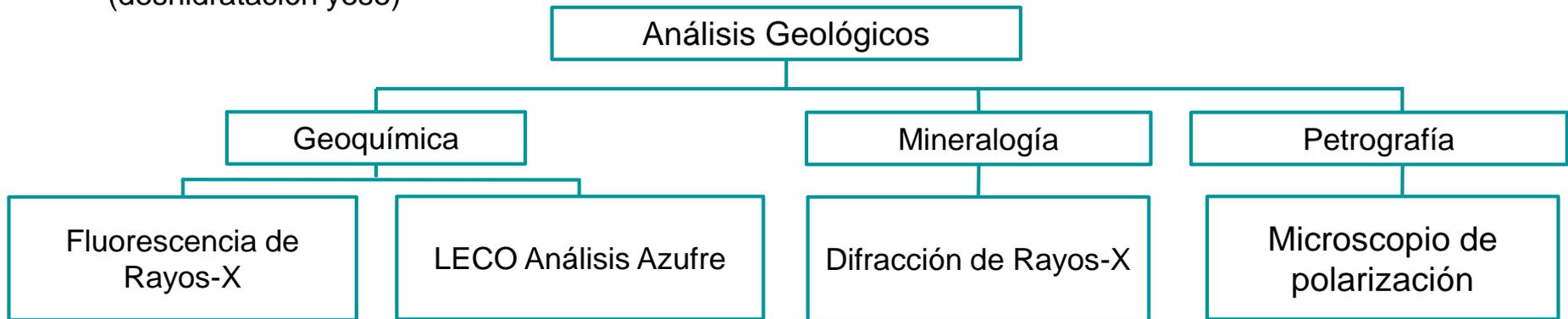
- Integración excavaciones con TBM
- Ensayos de bombeo para análisis caudales de infiltración, con diseño perimetral pozos de bombeo

- TBM pasando antes del inicio de la excavación
- 5 m de roca remanente sobre la clave del túnel
- TBM pasando en estación excavada



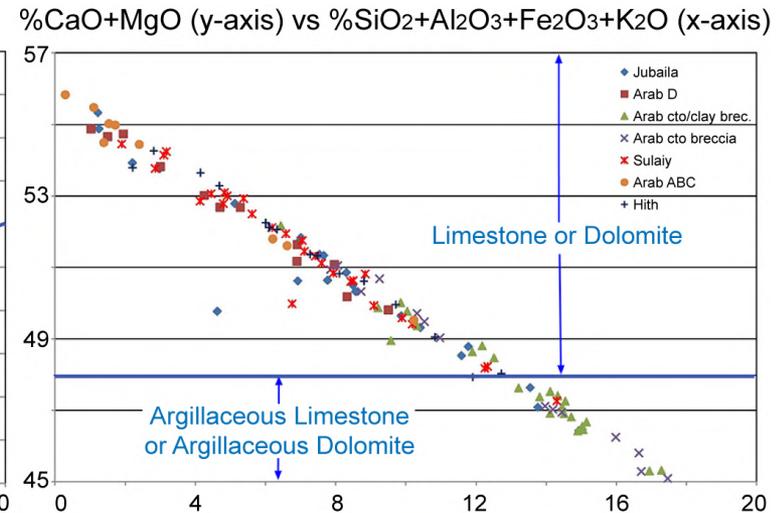
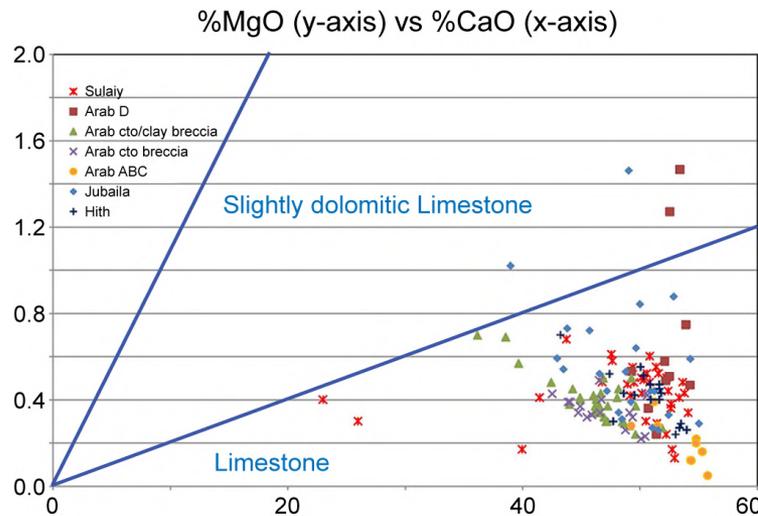
## HINCHAMIENTO, COLAPSO, PEGAJOSIDAD Y ABRASIVIDAD

- Arab y Hith calizas con intercalaciones de anhidritas y yesos, trampa petrolífera en los yacimientos de KSA (100 m de anhidrita a 30 km de Riad)
- Disolución total evaporitas => Descartado riesgo expansividad (hinchamiento anhidrita) o colapso (deshidratación yeso)



## HINCHAMIENTO, COLAPSO, PEGAJOSIDAD Y ABRASIVIDAD

- Calizas puras con algunas calizas arcillosas, margas y dolomías
- Tendencia lineal indicativa de afinidad geoquímica

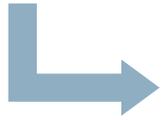


- Pegajosidad para cortadores tuneladora en secciones de túnel con calizas arcillosas, margas y brechas arcillosas
- Frente mixto para la tuneladora, en unidades susceptibles de Lavado de matriz arcillosa



## HINCHAMIENTO, COLAPSO, PEGAJOSIDAD Y ABRASIVIDAD

- En suelos bajo contenido minerales expansivos (12% paligorskita y 8% montmorillonite QS)



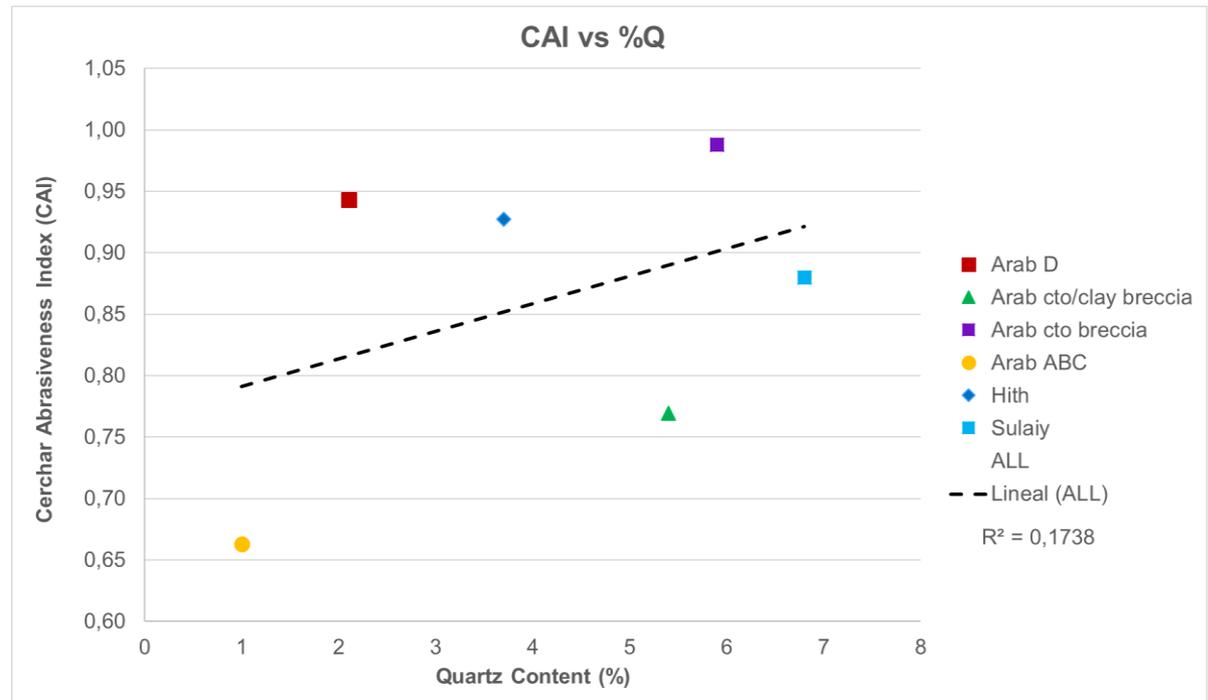
Riesgo confirmado con ensayos de presión de hinchamiento (< 10 kPa) e hinchamiento libre (< 1%)

- Terreno poco abrasivo para los cortadores de la TBM

Bajo contenido Q  
(1 - 6.8%)



Bajo CAI  
(0.65 - 0.95)

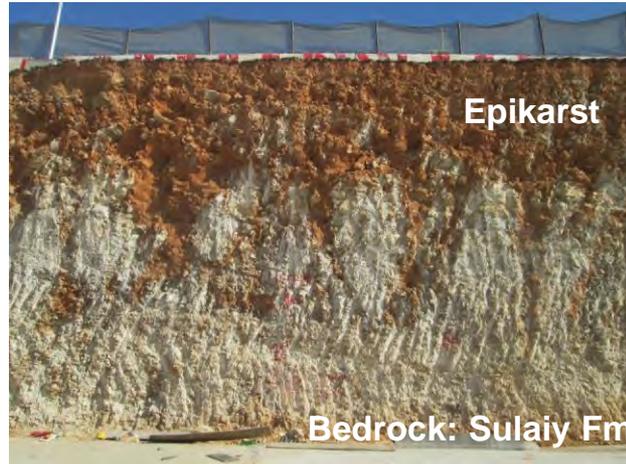


## KARST

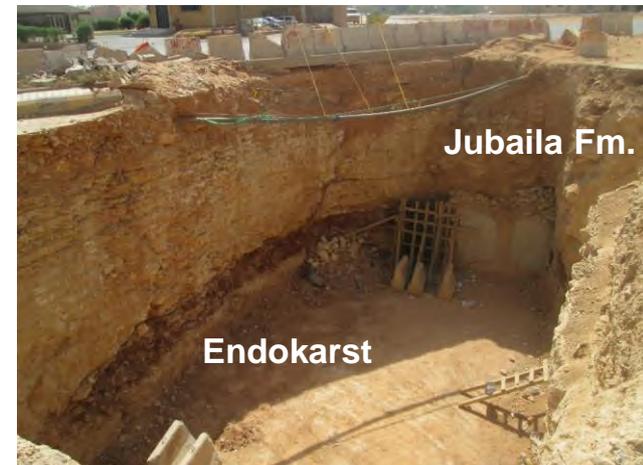
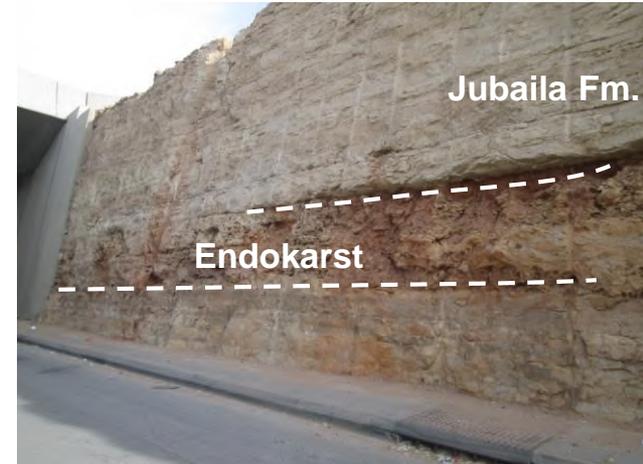
### CUEVAS



### EPIKARST & SINKHOLES



### ENDOKARST



## KARST DETECCIÓN

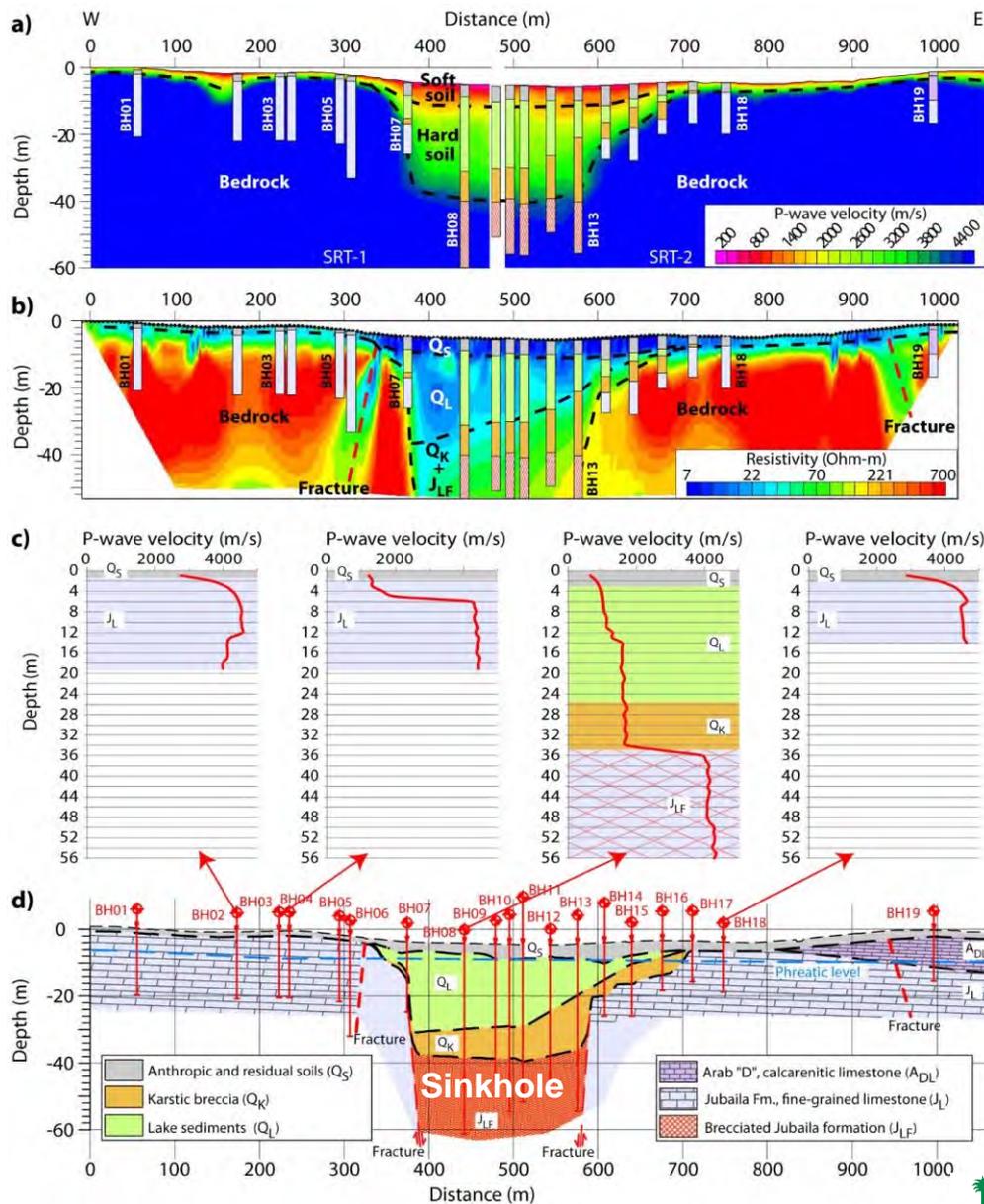
- 37.8 km SRT

- 39.7 km ERT

- 169 DH

- 28 CH

- 39.1 km GPR



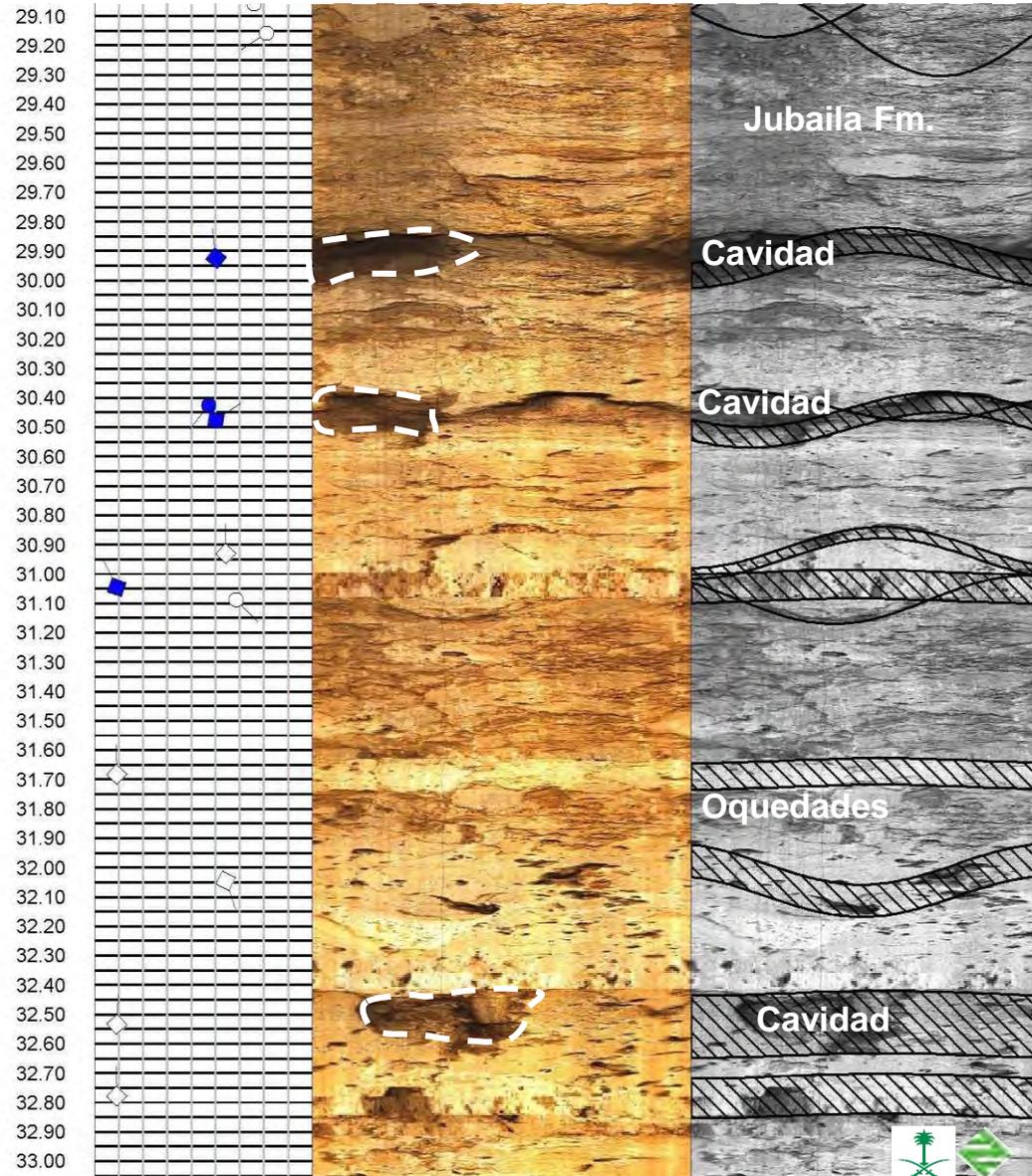
## Investigación Geofísica



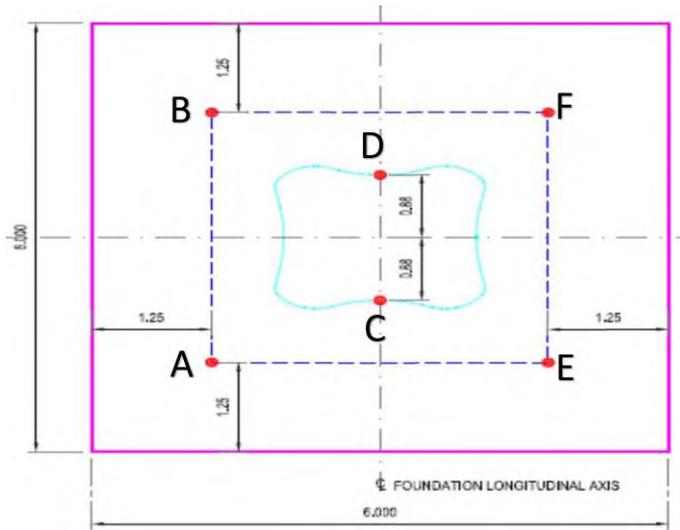
## KARST DETECCIÓN

La detección con geofísica confirmada con:

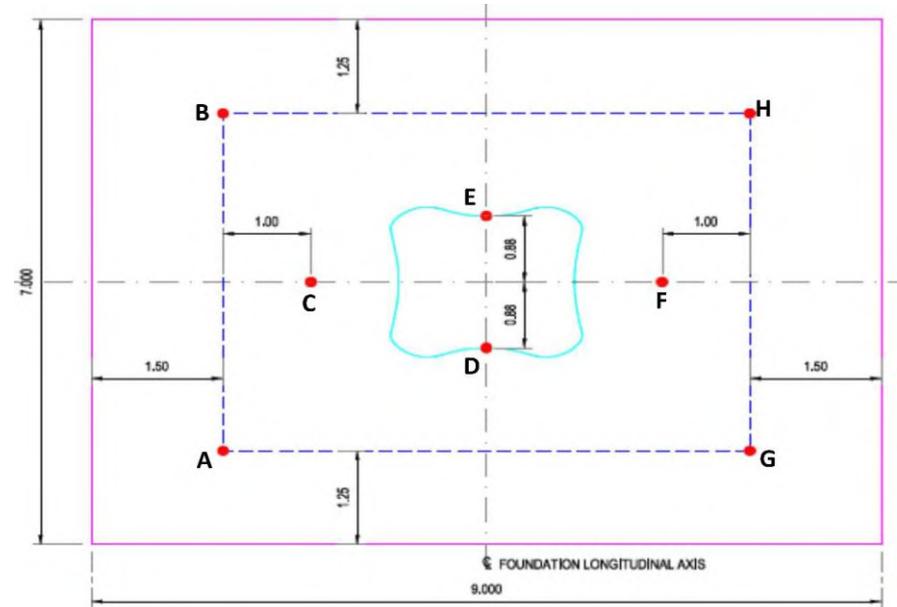
- 342 Sondeos
- 218 Tv-logging
- 107 Ensayos presiométricos



## KARST PREVENCIÓN



6 x 6 m = 6 Probeholes



7 x 9 m = 8 Probeholes



- Perforaciones a destroza ( $\varnothing 89$  mm después “grouting”) en 653 pilas de viaducto
- Base cimentaciones directas => 5 a 8 “probeholes”
- Profundidad investigación =  $2 \times B$
- Pilotes >3 m bajo punta
- Cavidad = incremento velocidad perforación



## KARST CORRECCIÓN

## CIMENTACIONES



- Cavidades detectas en “probeholes” fueron inyectadas con bajas presiones (2-5 bar) y relación Agua/Cem. 0.6

- Cavidades en superficie fueron rellenadas con mortero

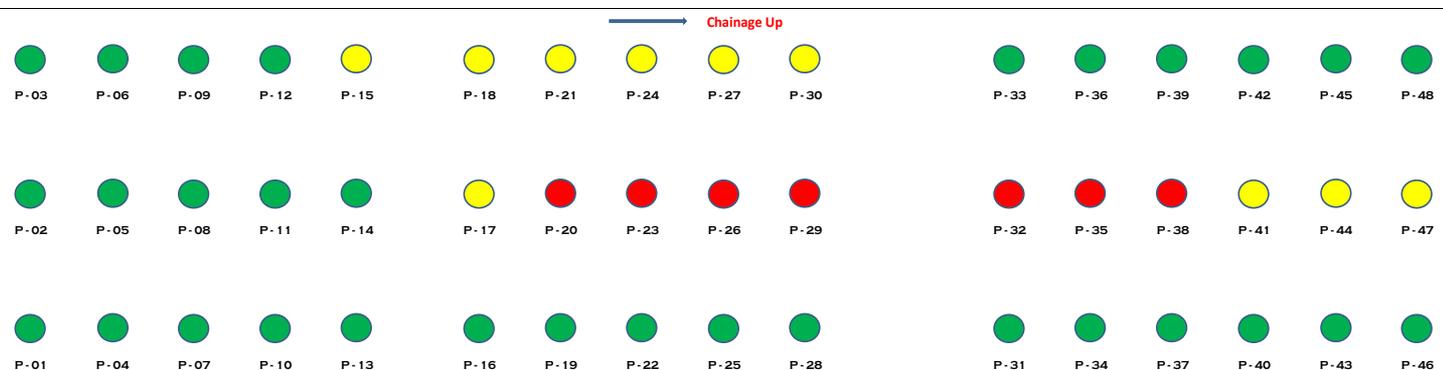


## KARST CORRECCIÓN

### SINKHOLE (DOLINAS)



- Refuerzo con geotextiles para pavimentos y rellenos sobre cavidades
- Pantallas de pilotes secantes en zonas de rellenos de dolinas

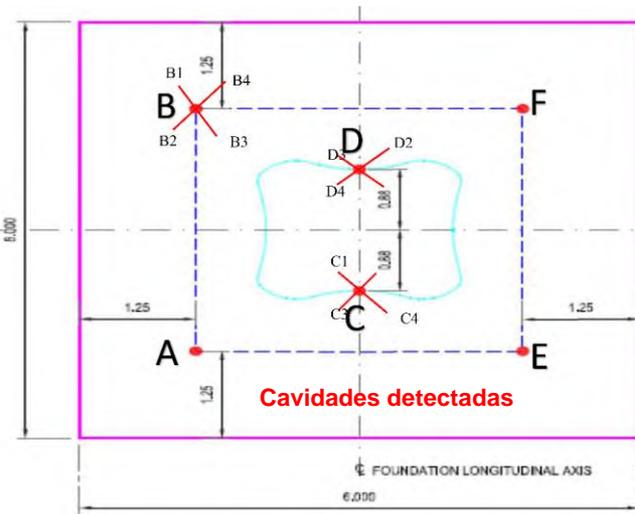


Cimentaciones profundas para “puentear” dolinas

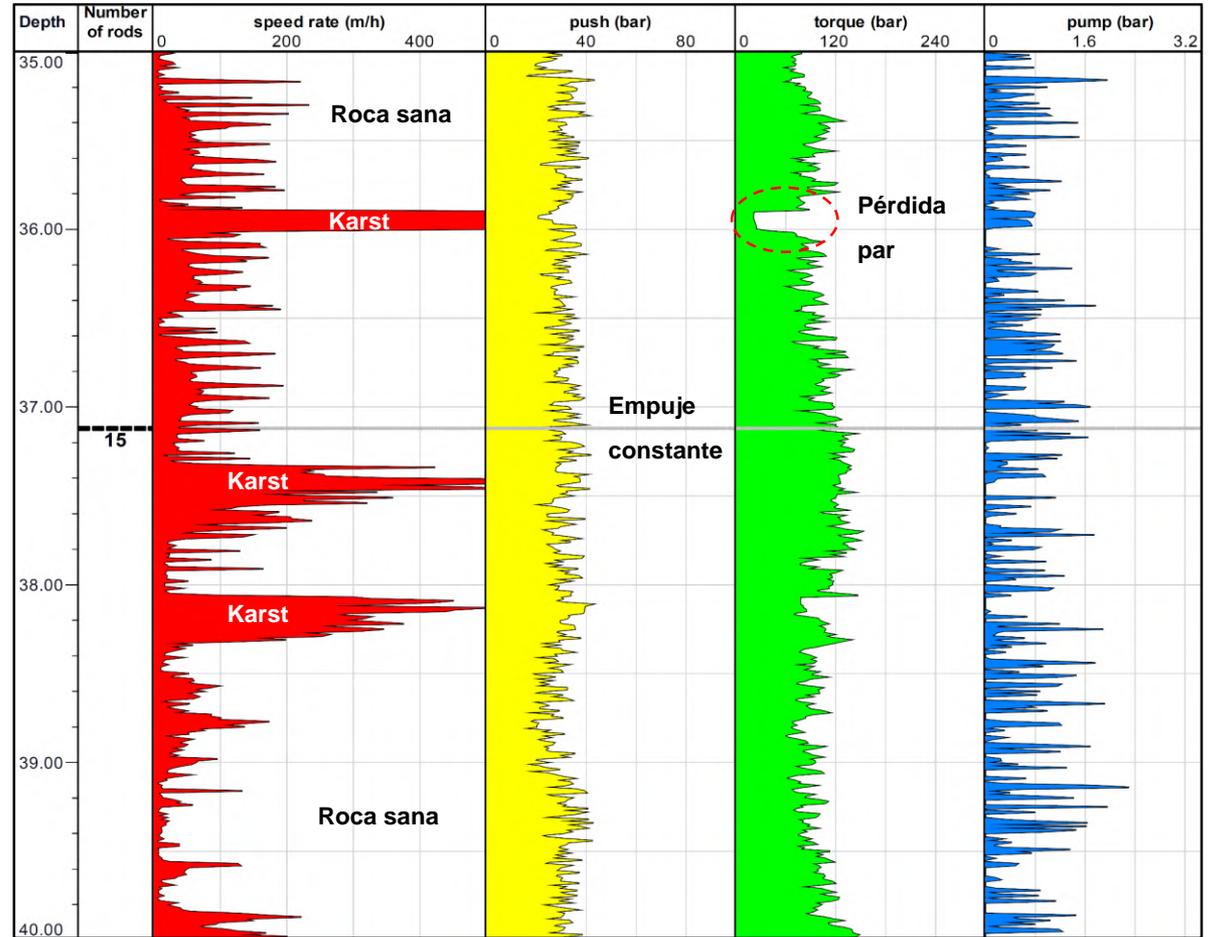


## KARST CORRECCIÓN

- Inyecciones de cavidades detectadas con “perforaciones”

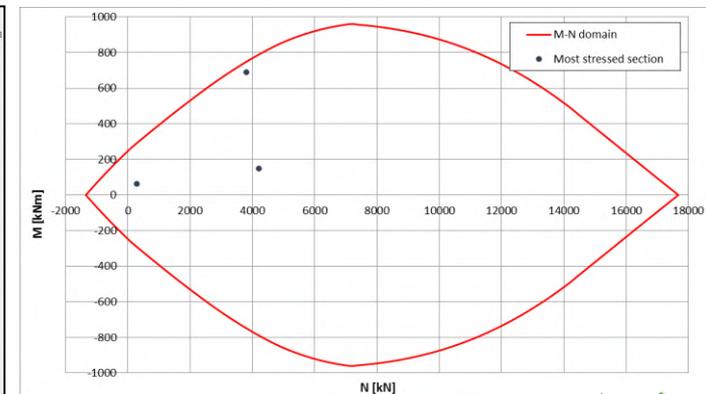
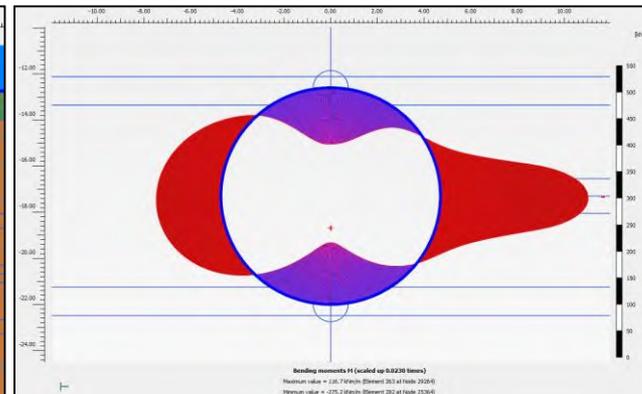
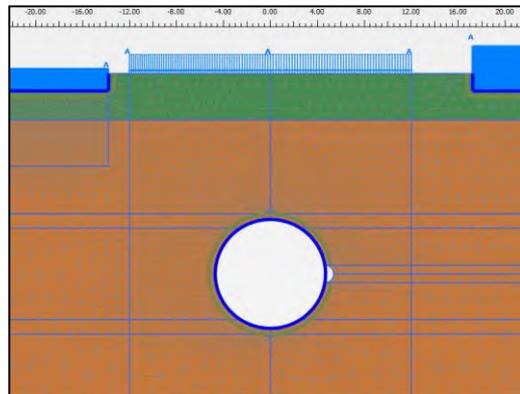
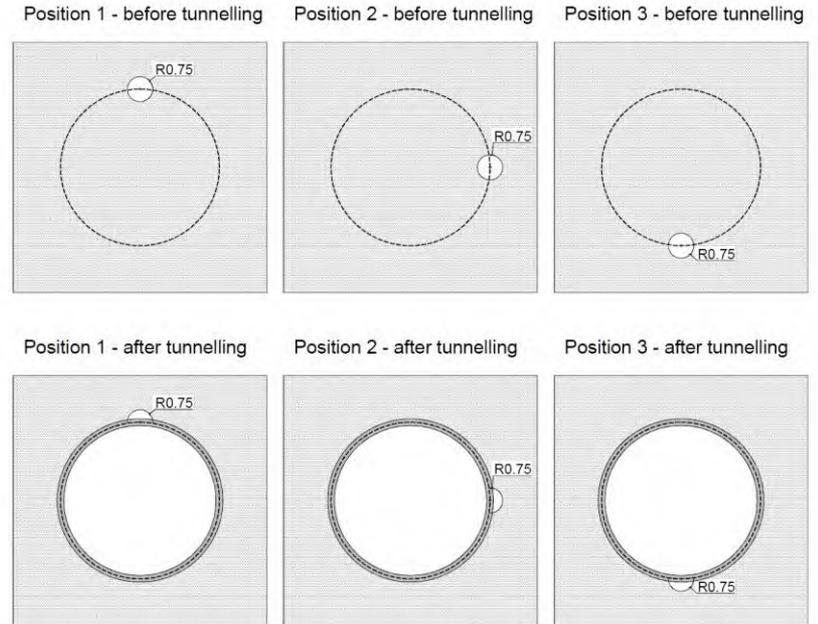


- En caso de detectar cavidades el número de perforaciones se aumento para confirmar su extensión.
- Realización de sondeos con recuperación y ensayos de laboratorio para confirmar el tratamiento



## KARST TÚNELES

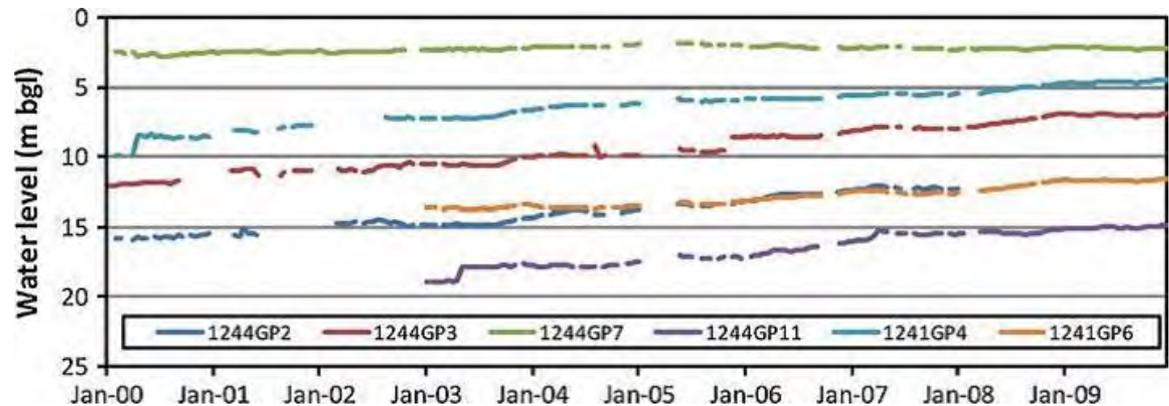
- Evaluación corto plazo de cavidad circular  $\varnothing 1,5\text{m}$  => deficiente ejecución inyecciones trasdós anillo
- Plaxis 2D, comportamiento sostenimiento con cavidad no detectada (sin confinamiento): clave, hastial contraclave
- Verificación estructural a lo largo de todo el túnel, confirmando el diseño del sostenimiento



## RIESGO DE FLOTABILIDAD ESTACIONES PROFUNDAS

- Baja permeabilidad substrato junto con barreras baja transmisividad
- Aumento fugas en servicios públicos, estimada en 2,5 mm/día y localmente hasta 10 mm/día en zonas verdes (Rushton, 1994)

Ascenso continuado NF  
(hasta 0,55 m/año)



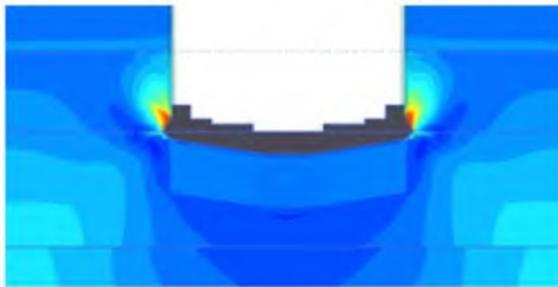
*Al-Othman & Ahmed, 2012*

Efecto de la subpresión sobre la estructura



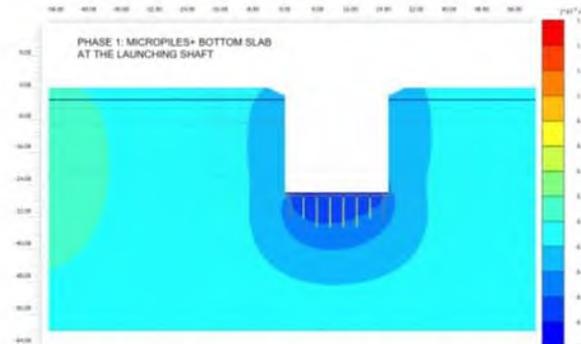
## RIESGO DE FLOTABILIDAD ESTACIONES PROFUNDAS

- Diferentes soluciones constructivas frente flotabilidad al no contar con resistencia por fricción lateral (lámina impermeable en trasdós muros perimetrales), solamente equilibrio de pesos frente a presión hidrostática. Diseño particularizado de la losa de fondo en cada estación.

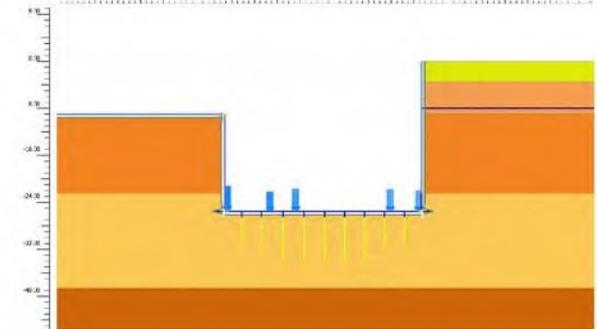


MOBILIZED ROCK MASS

SOLUCIÓN CONTRABÓVEDA  
LLAVE DE CORTANTE



SOLUCIÓN ANCLAJE  
LOSA DE FONDO



SOLUCIÓN ANCLAJE  
DE LOSA Y LLAVE CORTANTE

- El diseño geotécnico realizado para la Línea 3 del Metro de Riad, ha permitido optimizar las obras actualmente en ejecución, reduciendo plazos y costes de implementación; enfrentando para ello numerosos desafíos técnicos, como es el riesgo kárstico o el efecto de la subpresión, cumpliendo con los estrictos términos de referencia en los reducidos plazos exigidos
- La modelización geotécnica implementada para la Línea 3, como integración de estudios geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos, permitió anticipar riesgos geológicos, evitando problemas geotécnicos, alcanzando un rendimiento medio para la TBM de 20 m/día



Saudi Arabia's Riyadh Development  
Authority (RDA)



Grupo de Investigación de Geología  
Aplicada a la Ingeniería  
de la Universidad de Oviedo



Sociedad Española de Mecánica del Suelo  
e Ingeniería Geotécnica



ArRiyadh New Mobility Consortium (ANM)



**Autores:**

**Manuel Cueto – IDOM**

**Pablo de la Puente – IDOM**

**Sergio Mayordomo – IDOM**

**Miguel Martín Gómez – IDOM**

**Daniel Arias – Universidad de Oviedo**

**Carlos López-Fernández – Universidad de Oviedo**

**Luis Pando – Universidad de Oviedo**

**Fotografías de la Línea 3 del Metro de Riad:** © “Picture property of RDA – All Rights Reserved”



# **IDOM**

**Our commitment, your success**

**IDOM.COM**

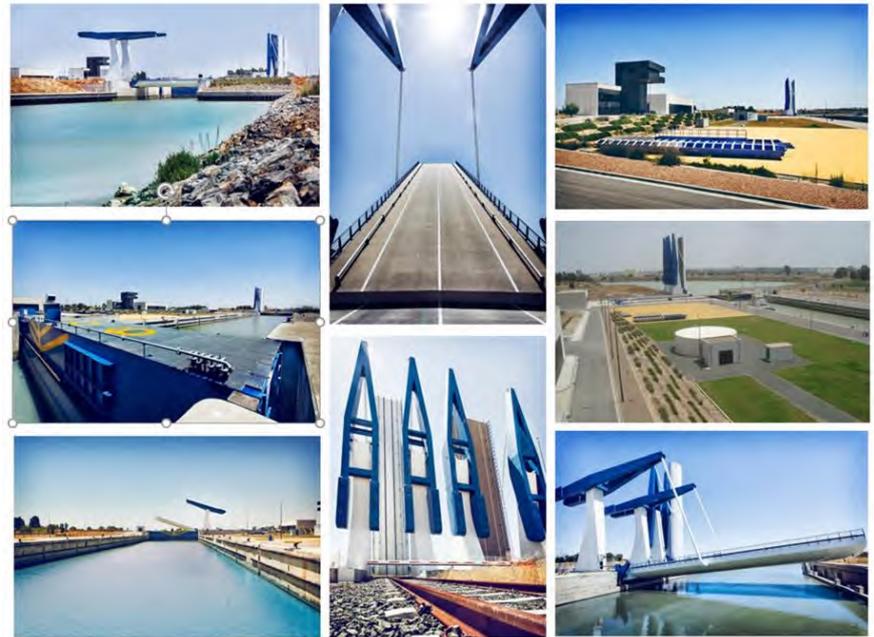


**IDOM**

Infraestructuras sostenibles y  
resilientes para entornos cambiantes

**ASISTENCIA TÉCNICA NUEVA ESCLUSA EN EL PUERTO  
DE SEVILLA**

1. Localización y planta general
2. Descripción general de la obra
3. Proceso constructivo
4. Campaña geotécnica complementaria
5. Columna geotécnica.
6. Terraplén de prueba.
7. Ataguía de cierre
8. Pantalla de bentonita-cemento
9. Condiciones de desembalse rápido
10. Red de instrumentación
11. Muelles de tablestacas
12. Diques de cierre
13. Modelos de filtración



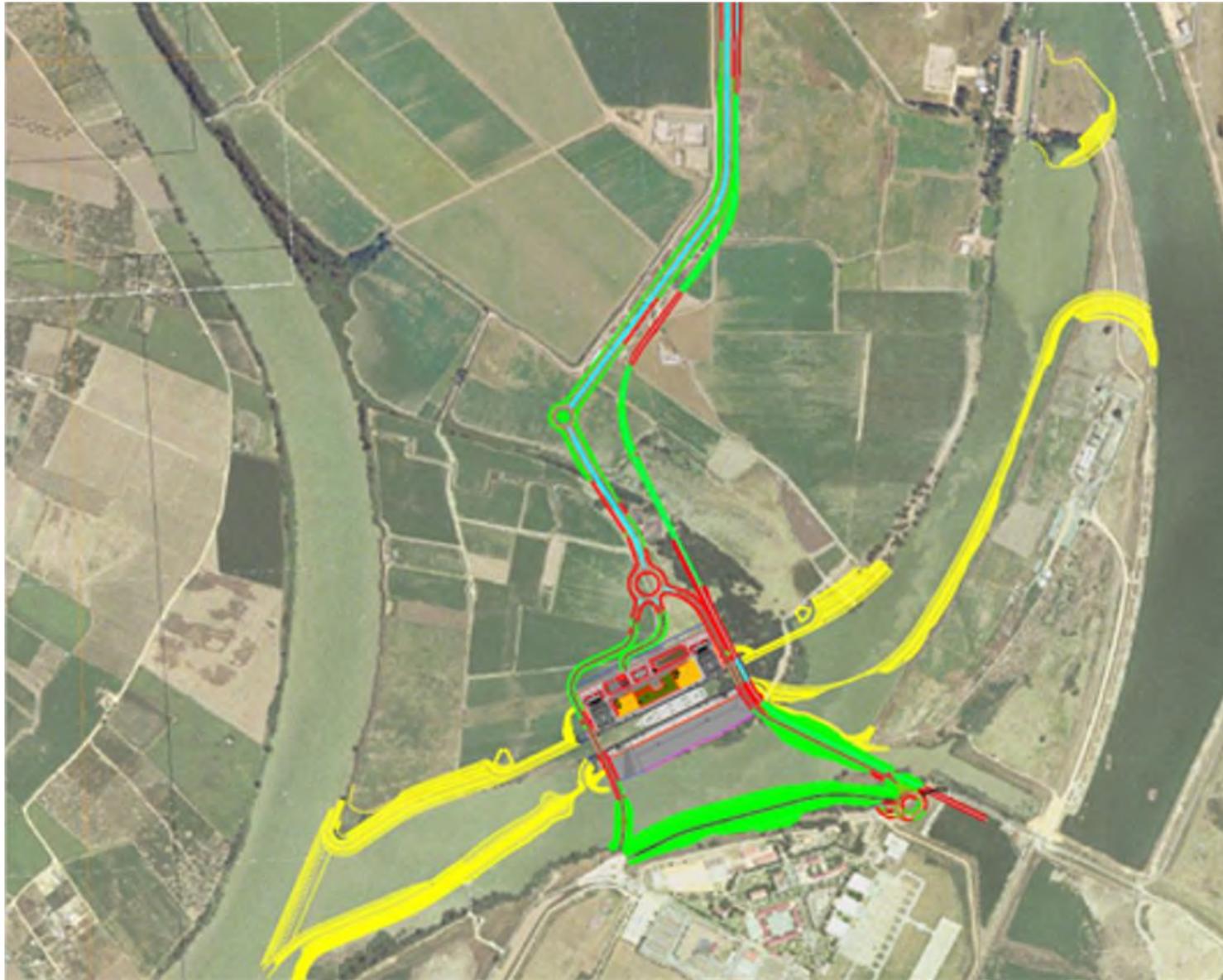
# 1. LOCALIZACIÓN Y PLANTA GENERAL



# 1. LOCALIZACIÓN Y PLANTA GENERAL



# 1. LOCALIZACIÓN Y PLANTA GENERAL



Las dimensiones internas de la nueva esclusa, son tales que deben permitir el acceso seguro a los distintos tipos de buques dentro del espectro de las 10.000 TPM (DWT) y a plena carga.

Como consecuencia de los estudios realizados, las dimensiones mínimas del cuenco útil deben ser:

ESLORA: 250m  
MANGA: 40m  
COTA DE SOLERA: -11m

El cuerpo completo de la esclusa está compuesto por los siguientes módulos, enumerados de lado río a lado puerto:

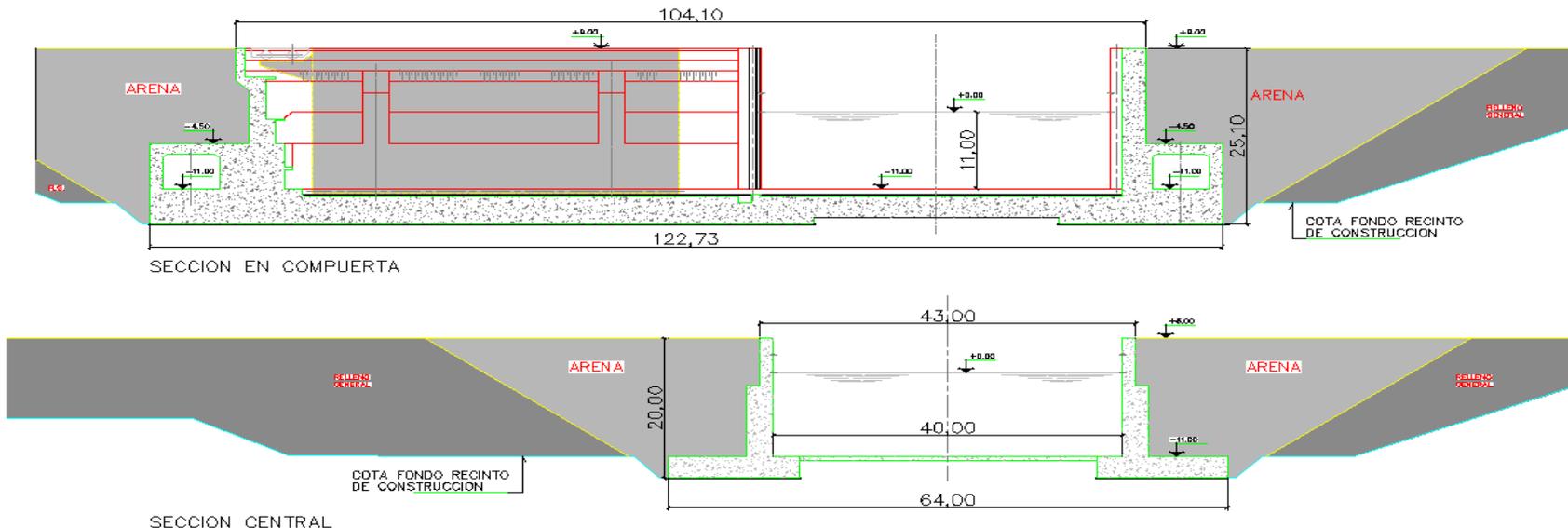
- 1. ZONA DE PUENTES: Se ha proyectado cimentación para dos unidades, uno previsto y otro futuro. Ambos para tráfico rodado**
- 2. ZONA DE GARAJES, para alojamiento y maniobra de dos puertas de operación**
- 3. CUENCO DE MANIOBRA**
- 4. ZONA DE GARAJES, para dos puertas interiores**
- 5. ZONA DE PUENTES: Se ha proyectado cimentación para dos unidades, uno para tráfico rodado y otro para ferrocarril**



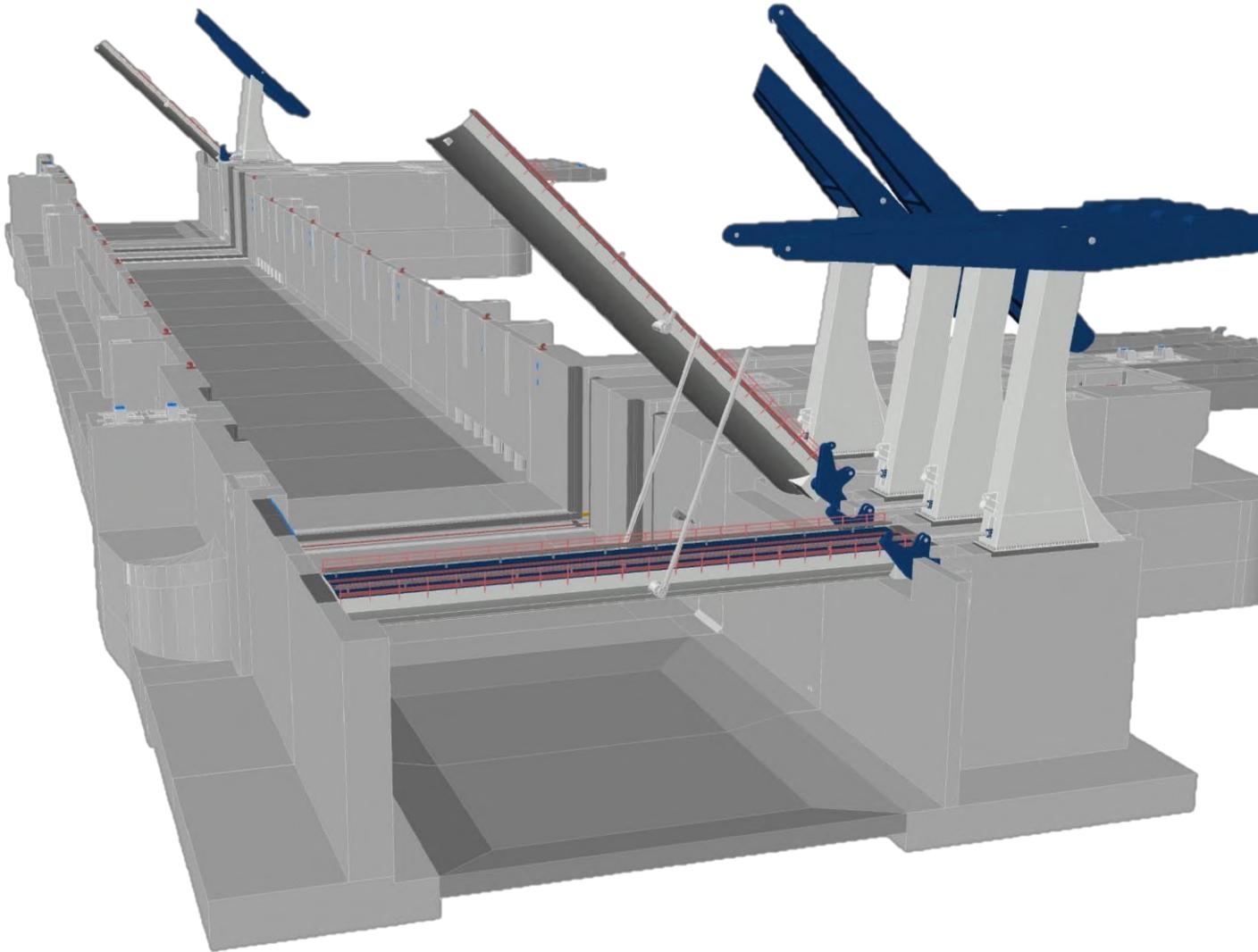
## 2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA OBRA

Estructuralmente la esclusa está compuesta por dos grandes muros de gravedad simétricos respecto al eje longitudinal, y dimensionados para absorber los empujes de tierras y transmitir al nivel de cimentación una tensión admisible acorde a la naturaleza del terreno. En las zonas de cimentación de los puentes, zona de garajes de las puertas y galerías del sistema de llenado y vaciado, las dimensiones también están definidas atendiendo a las instalaciones y servicios interiores que alberga.

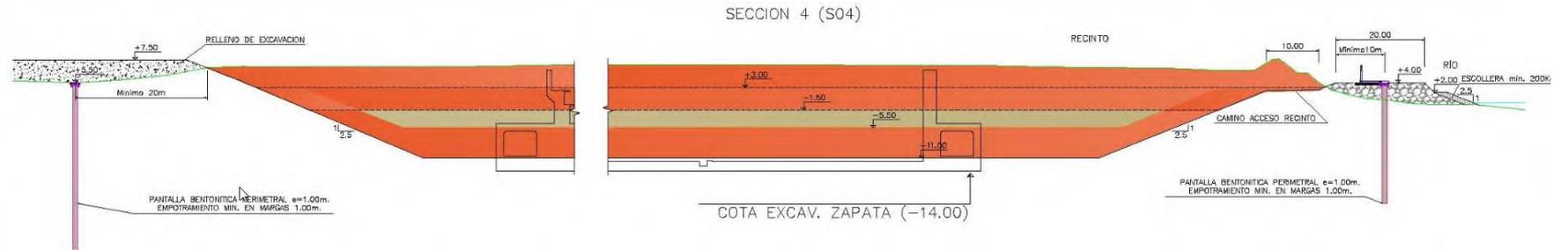
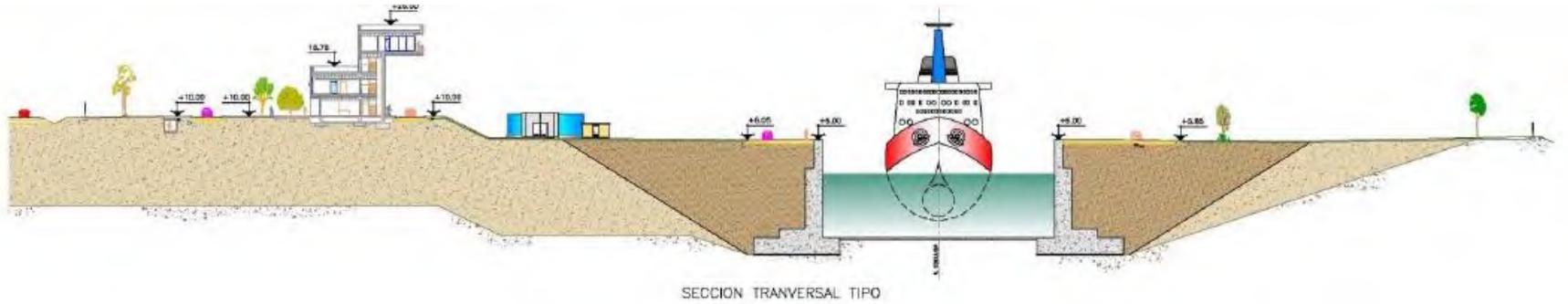
- Ambos lados están cimentados de forma independiente a base de zapatas, con un canto variable entre 3,00 y 5,10 m.
- La altura de los muros oscila entre 17,00 y 20,00 m.
- La solera en la sección central se ha dispuesto perforada, para evitar subpresiones
- El nivel de cimentación medio se sitúa en la cota -15m en zona de gravas y arenas



## 2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA OBRA



# 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



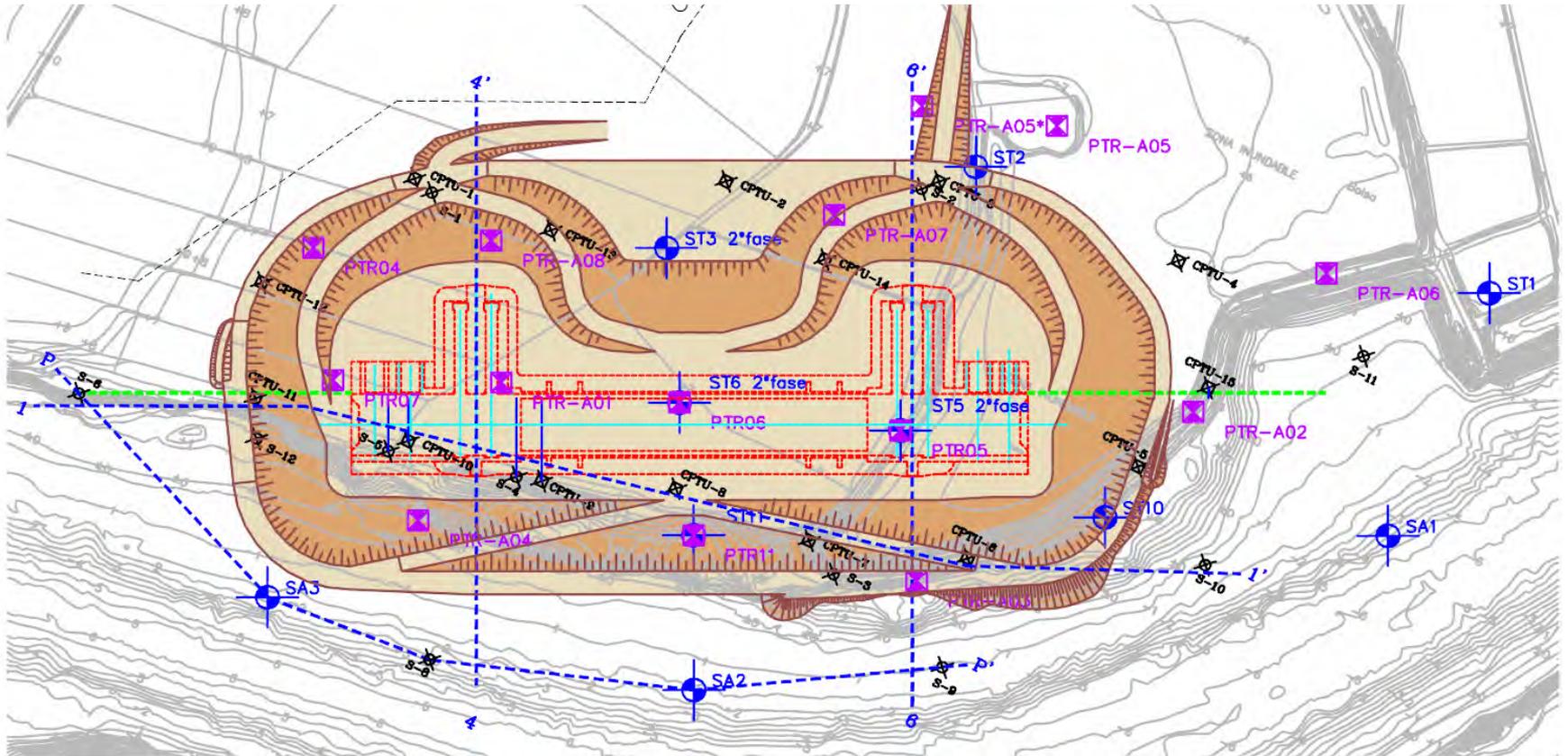
### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



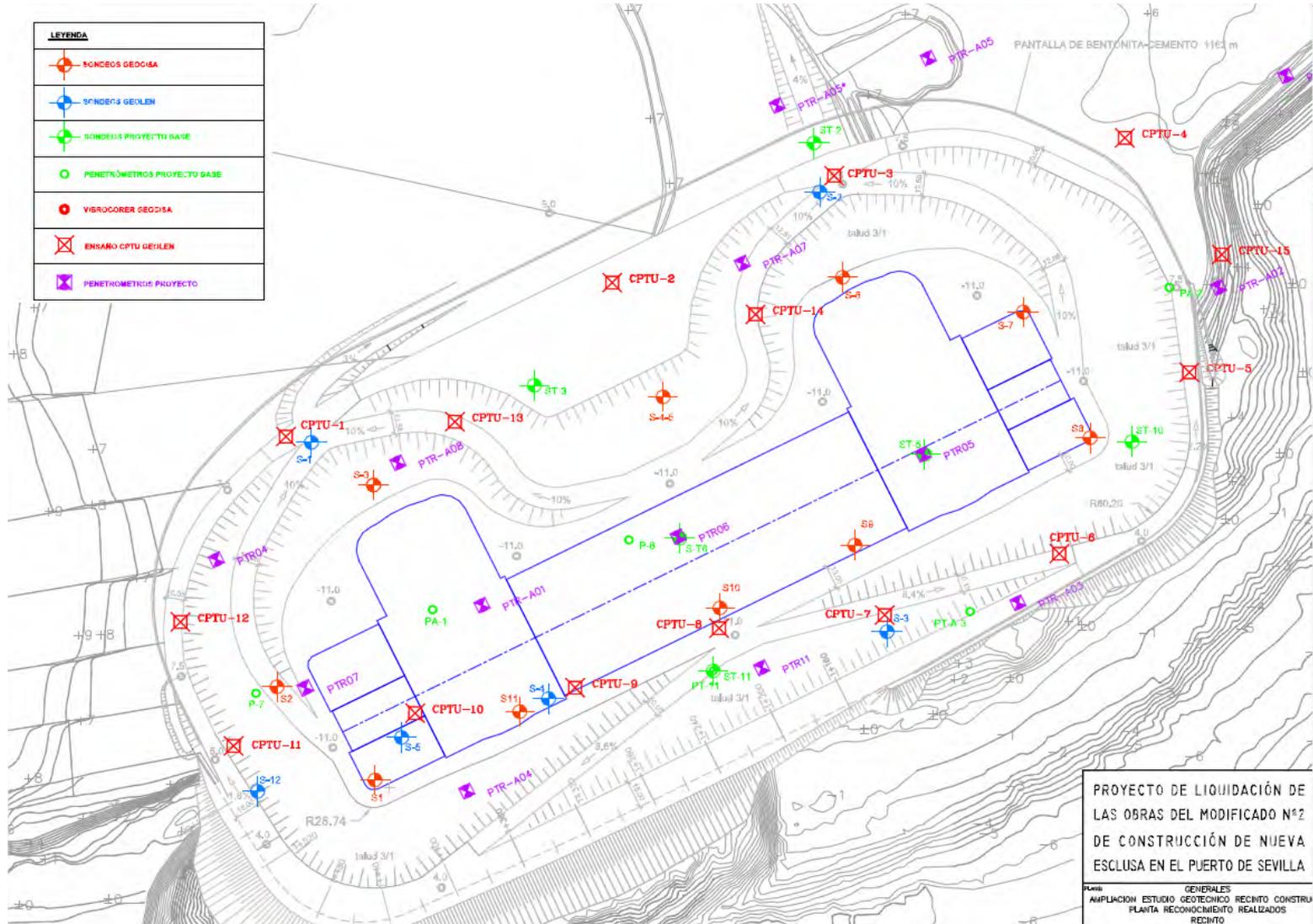
### 3. PROCESO CONSTRUCTIVO



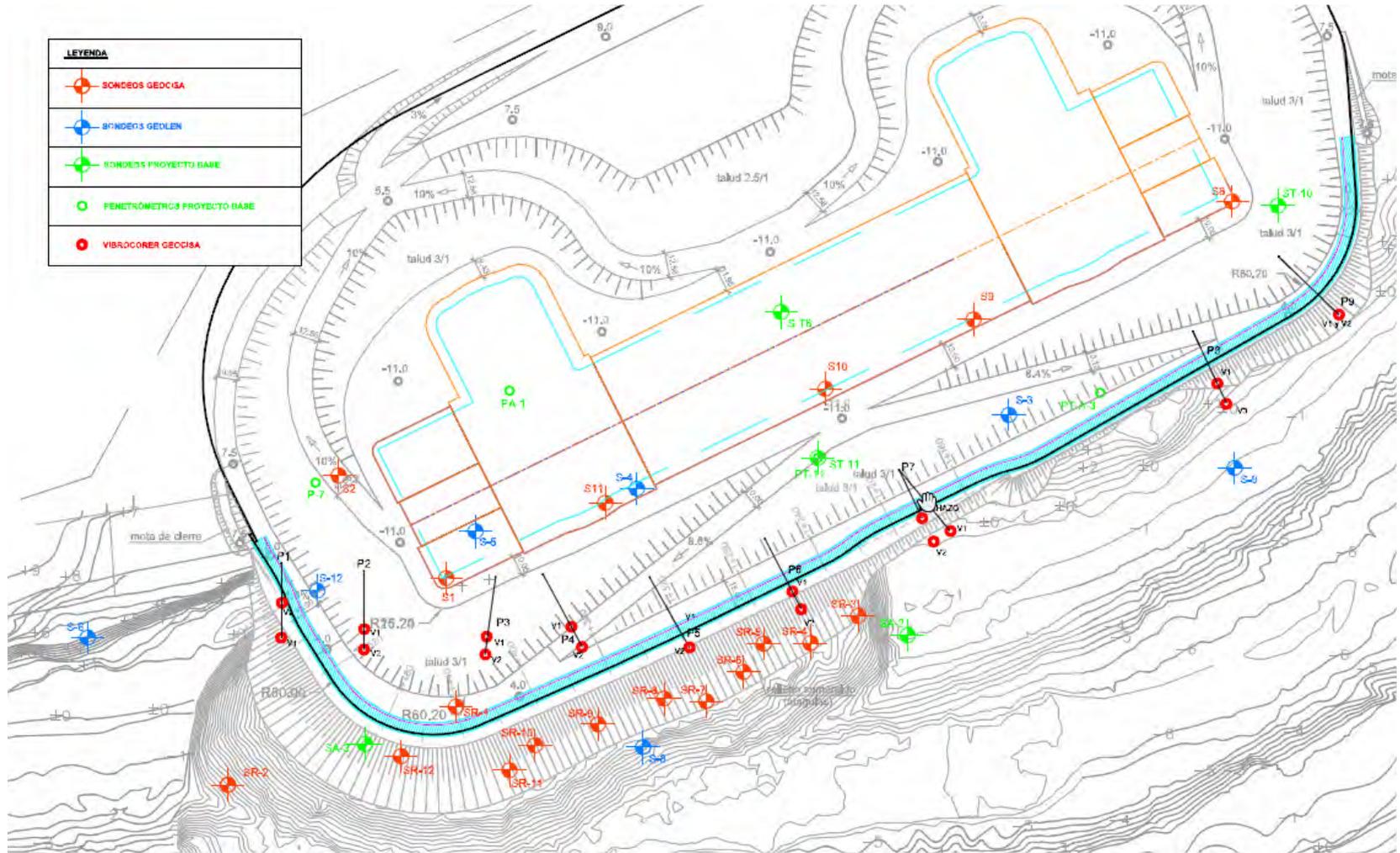
# 4. CAMPAÑA GEOTÉCNICA COMPLEMENTARIA



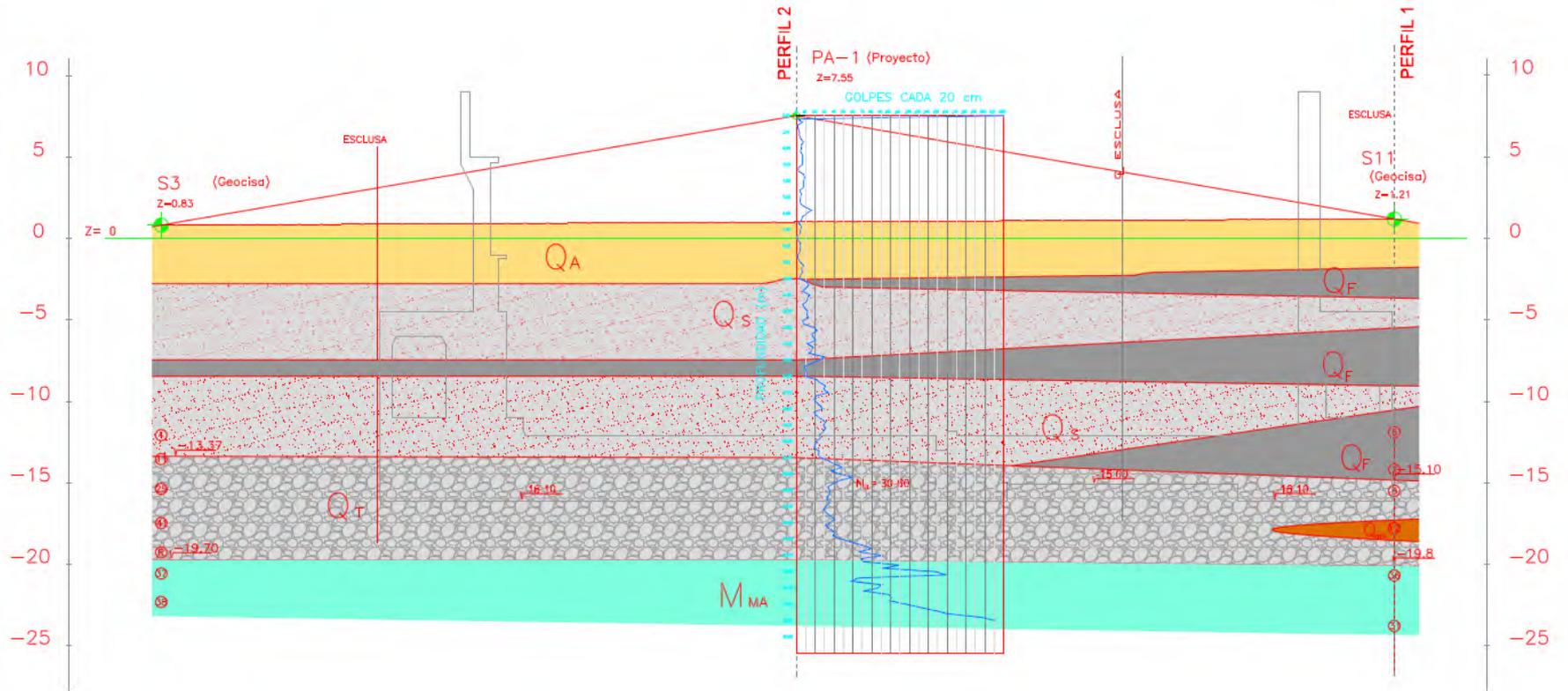
# 4. CAMPAÑA GEOTÉCNICA COMPLEMENTARIA



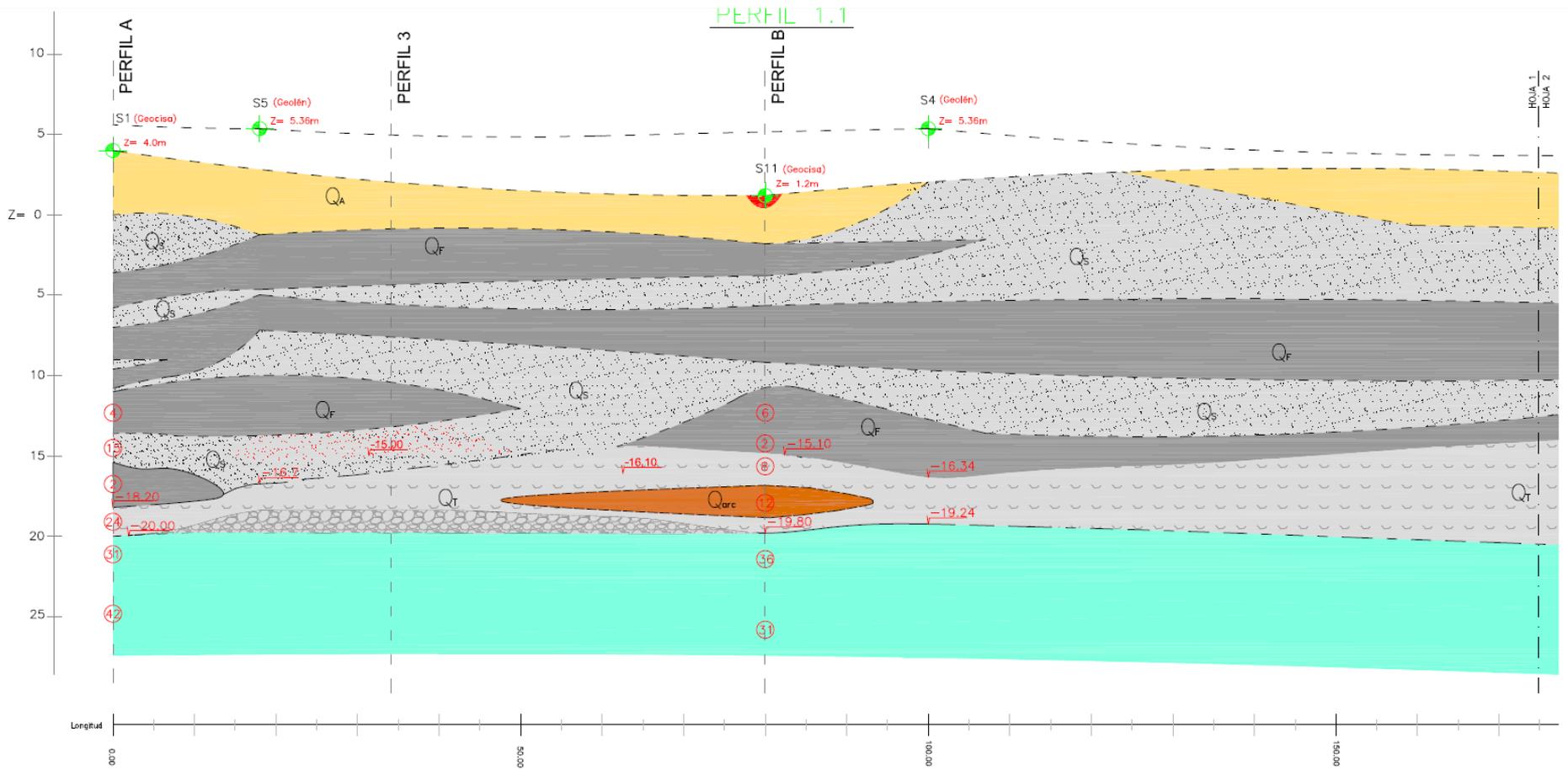
# 4. CAMPAÑA GEOTÉCNICA COMPLEMENTARIA (ZONA MOTA DE CIERRE)



# 5. PERFILES GEOTÉCNICOS

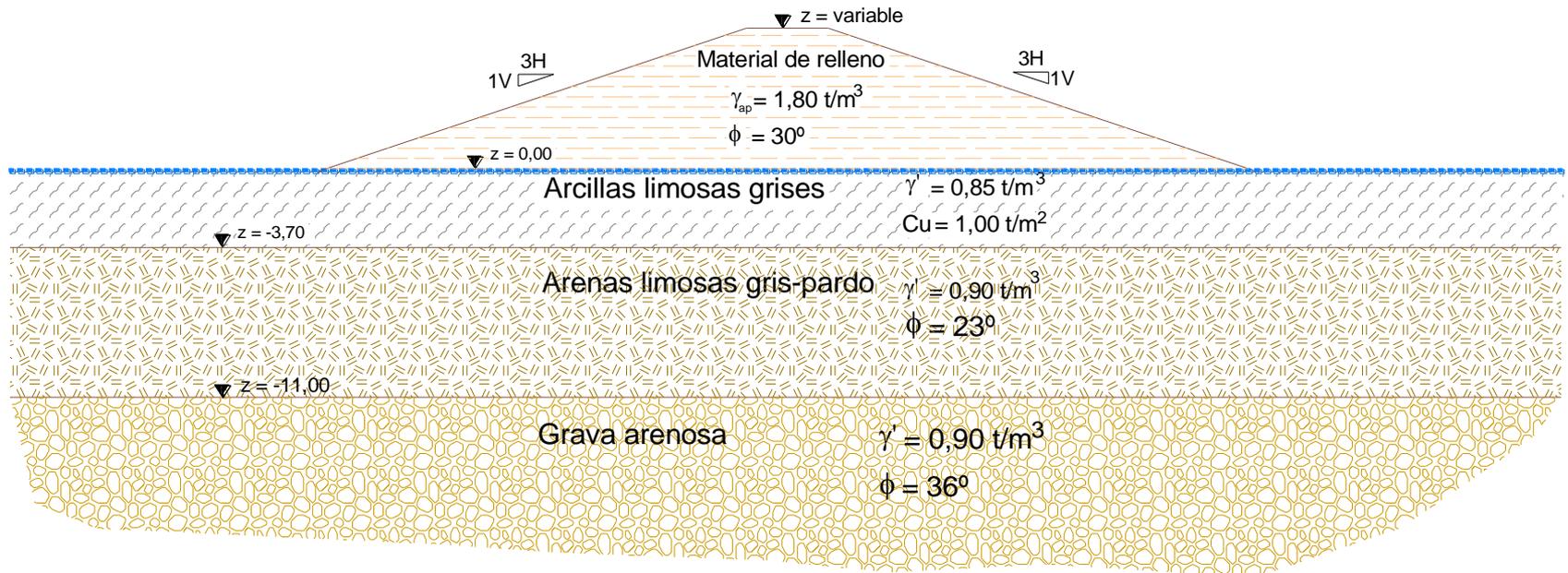


# 5. PERFILES GEOTÉCNICOS



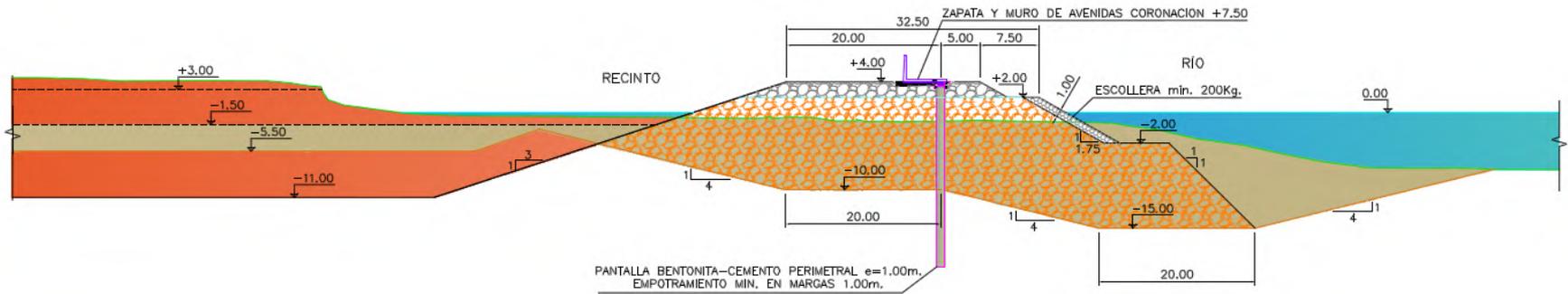
### SEGUIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DE LA MOTA DE PRUEBA: COMPORTAMIENTO RELLENO CON MATERIAL DE OBRA SOBRE SUELOS BLANDOS

- Análisis de las fases de construcción.
- Instrumentación del terraplén.
- Seguimiento de la instrumentación.

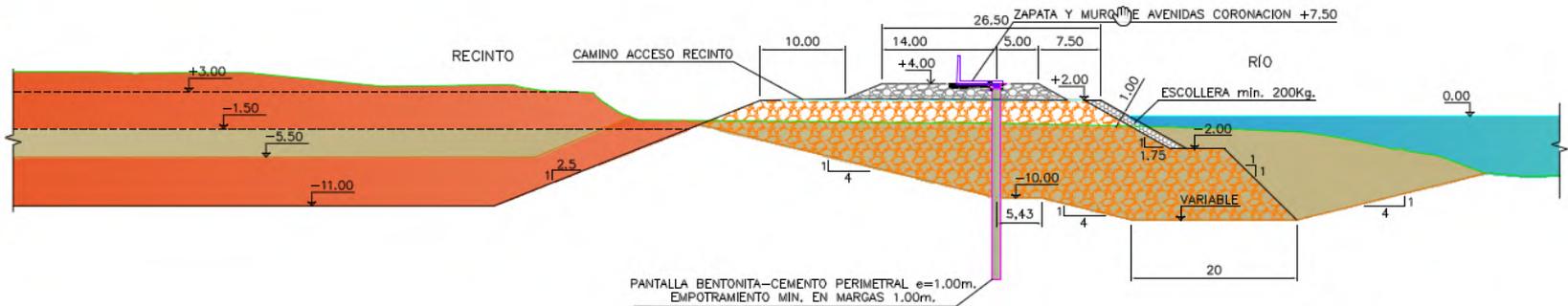


# 7. ATAGUÍA DE CIERRE: SECCIÓN TIPO

### SECCION 1 (S01)



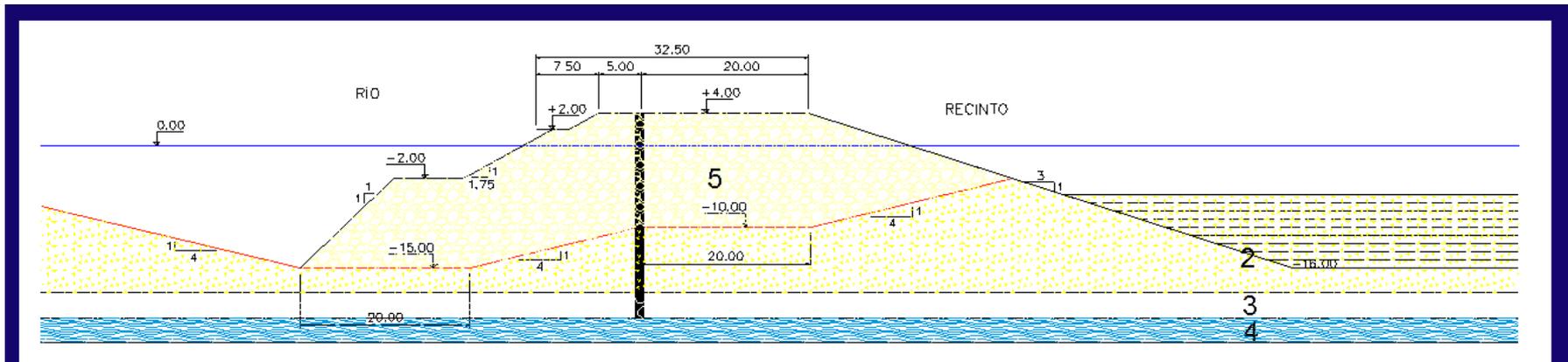
### SECCION 2 (S02)



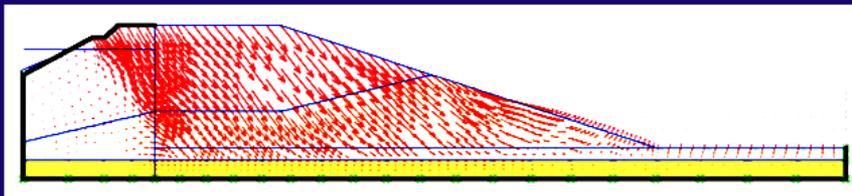
# 8. PANTALLA DE BENTONITA-CEMENTO: ANÁLISIS DEFORMACIONAL

- Longitud media pantalla bentonita-cemento: 28 m.

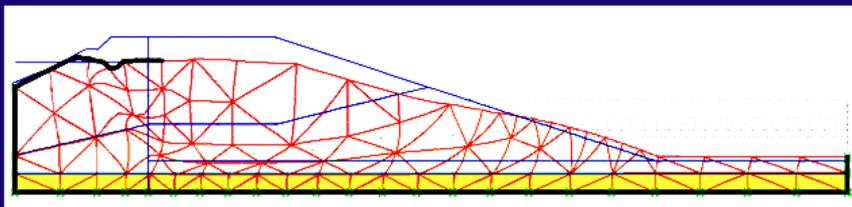
DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	VISCOSIDAD (seg.)	PH	PERMEABILIDAD (cm/s)	RESIST. COMPRESIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )		
				7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS
1,22	42,6	12,6	1,36E-06	3,45	5,65	7,56



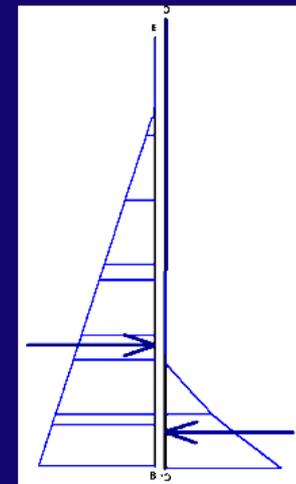
- Perfil transversal ataguía de cierre



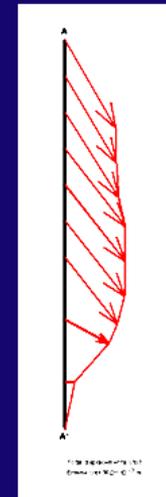
- Esquema vectores de desplazamientos



- Situación final (malla deformada)



Presión de poros



Deformación Pantalla

- Granulometría relleno sumergido ataguía de cierre: 28% del material con tamaños superiores a los 8 cm, y el 55% con tamaños superiores a los 4 cm. Un 13% de grava media de tamaño entre 2,5 y 1 cm, y un 12% de grava fina entre 10 y 2mm.
- El relleno ideal debería de tener como tamaño máximo 8 cm y sólo el 15% con tamaños superiores a 4 cm.
- BATACHES DE PRUEBA: IDENTIFICAR MÁXIMA PROFUNDIDAD ESTABLE.
- EJECUCIÓN DE CADA BATACHE POR FASES.
- PROGRAMA ESPECIFICO DE “REBATAchado”.
- IMPORTANTES SOBRESUMOS DE BENTONITA-CEMENTO. 40%-55%

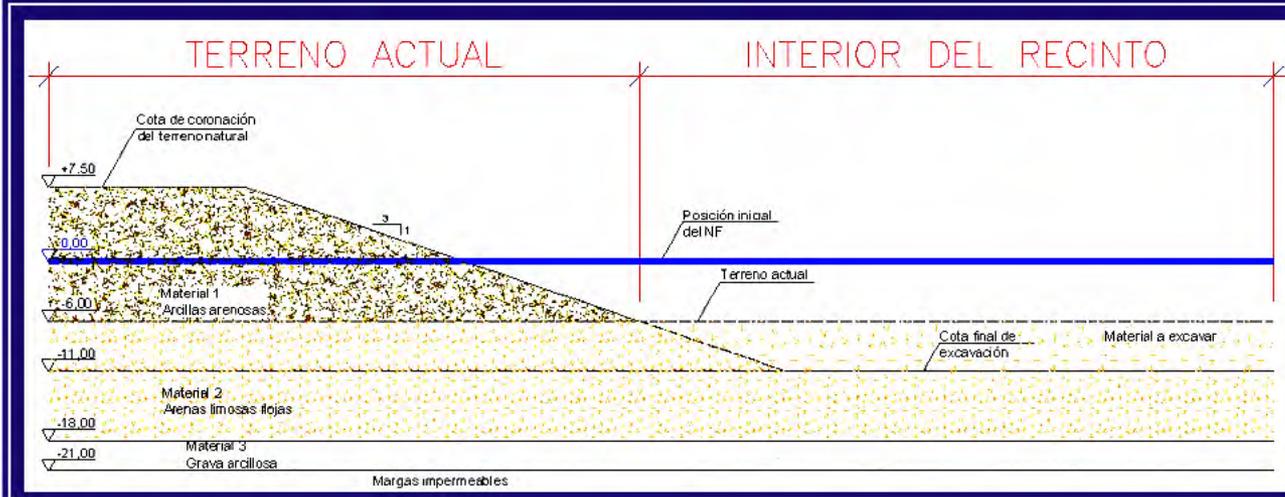
- **Objetivos:**

- Estimar el ritmo de bombeo, que genere un decalaje admisible entre la línea de saturación del terreno, y el nivel de la lámina libre, que garantice la estabilidad de los taludes interiores, durante el desembalse

Variables del proceso:

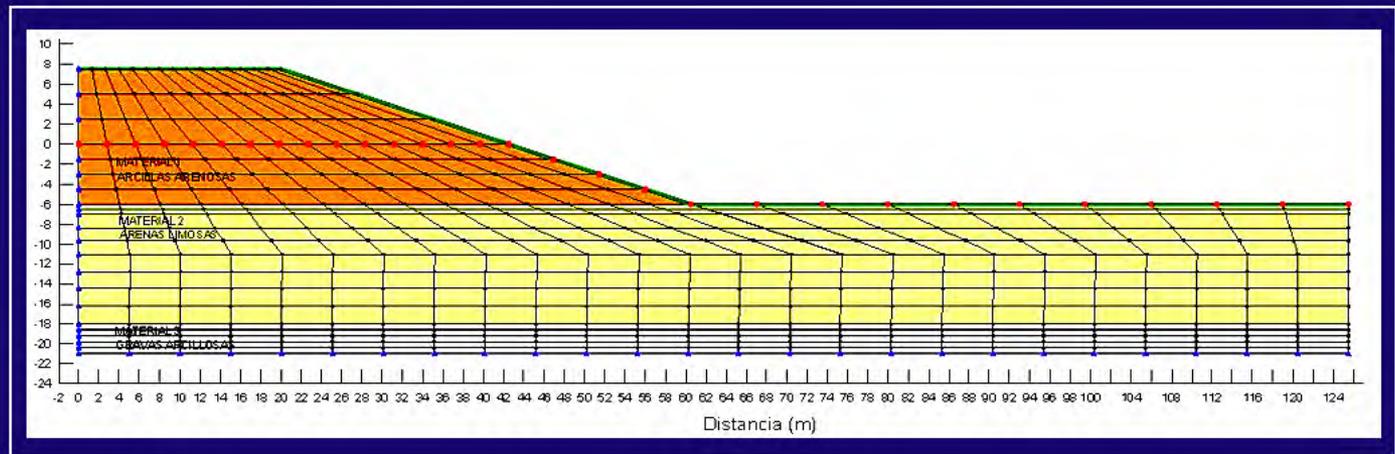
- Ritmo descenso lámina libre mediante bombeo: ¿0,5m/día, 1m/día, 2m/día, etc?
- Permeabilidad del terreno
- Forma de bombeo: (superficial, profunda, ó ambas)

# 9. ESTABILIDAD TALUDES INTERIORES EN SITUACIÓN DE DESEMBALSE

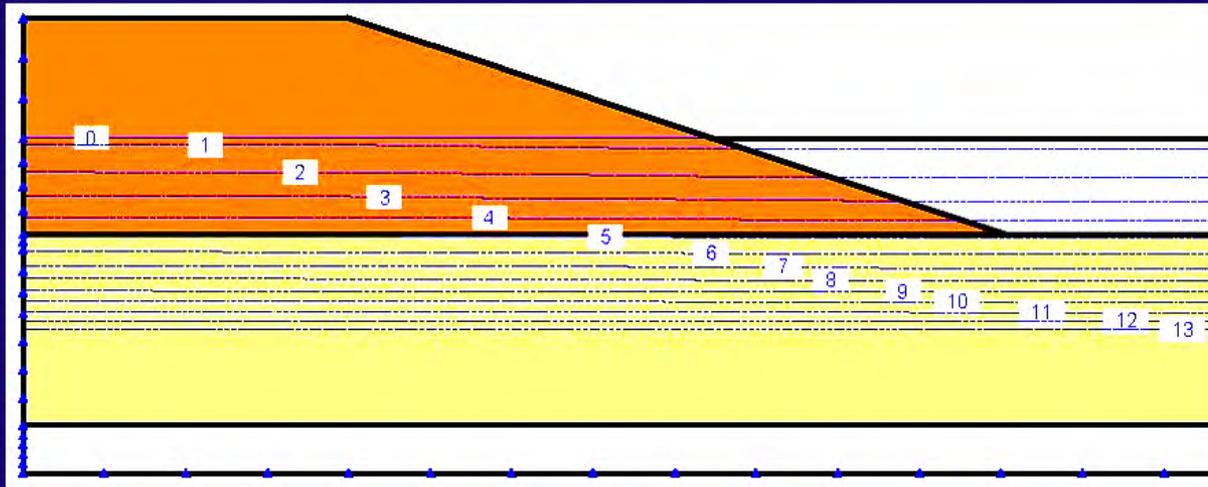


- Perfil transversal considerado.

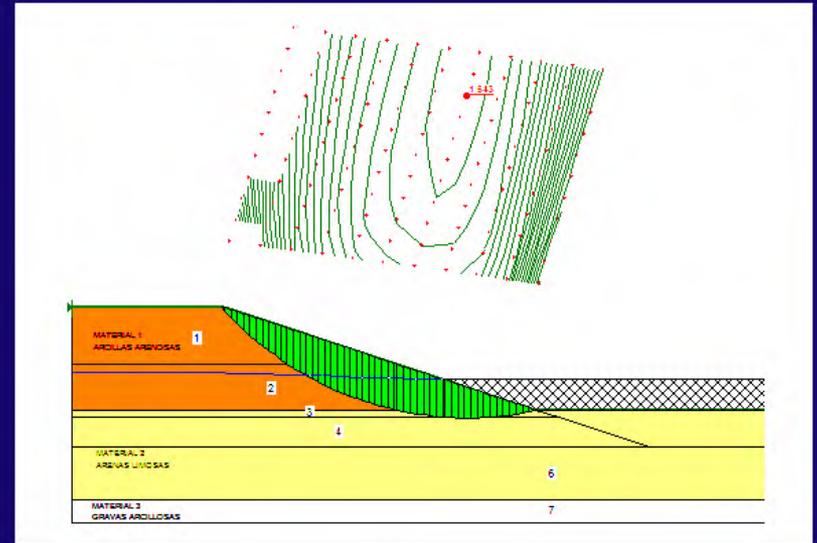
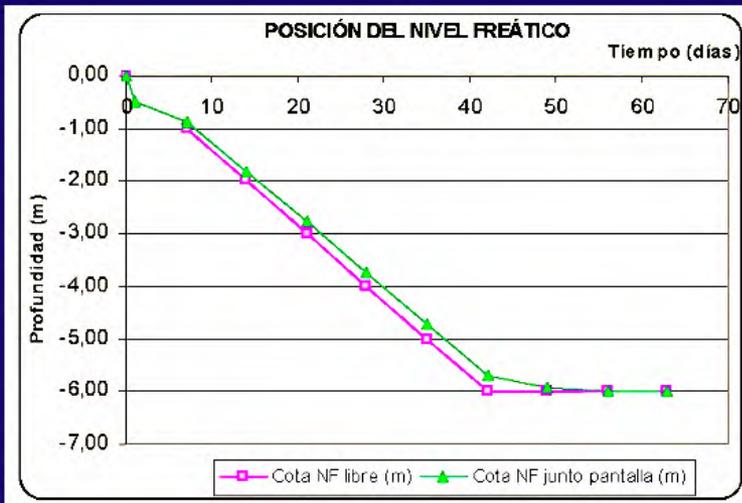
- Malla de elementos finitos generada.



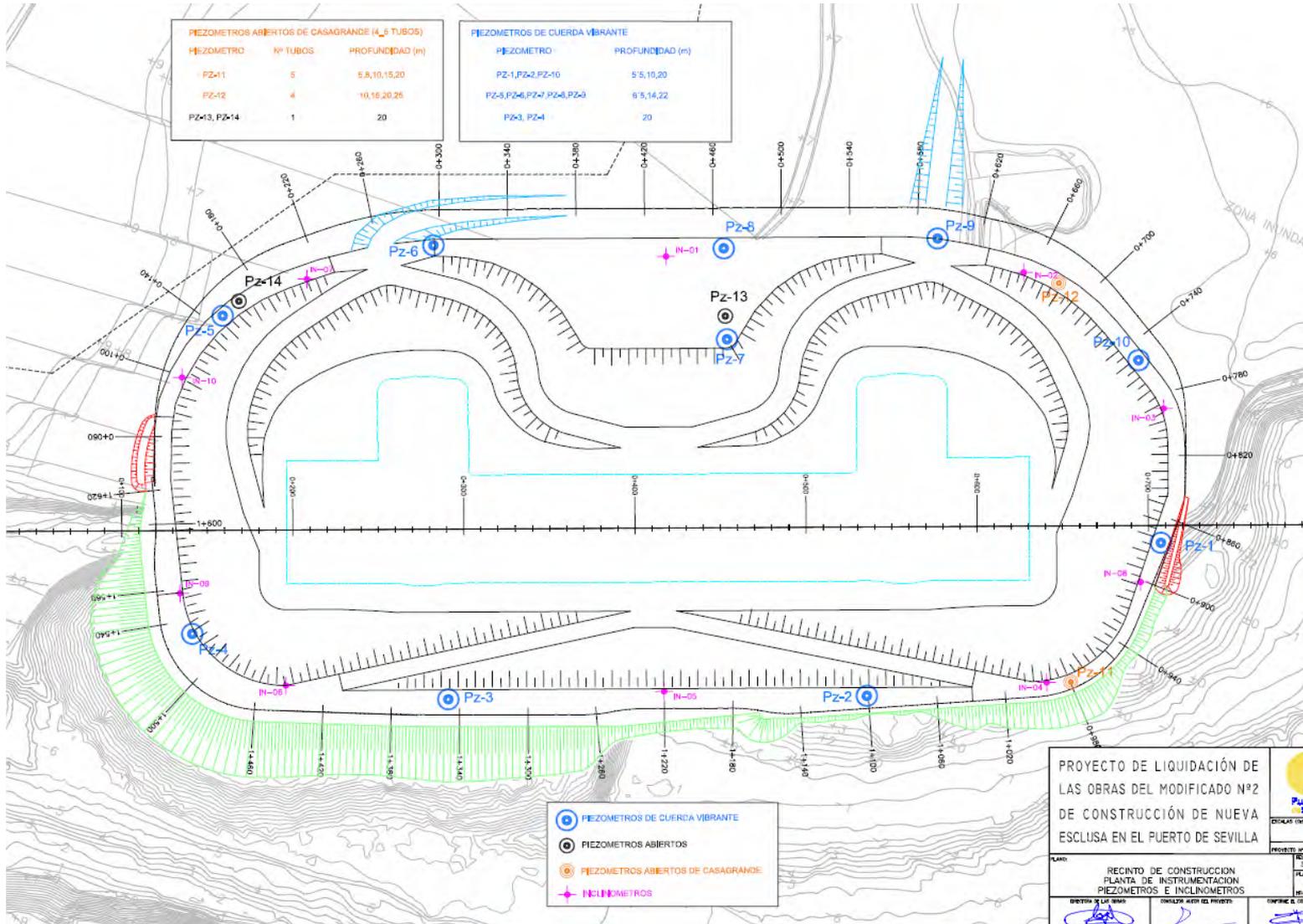
# 9. ESTABILIDAD TALUDES INTERIORES EN SITUACIÓN DE DESEMBALSE



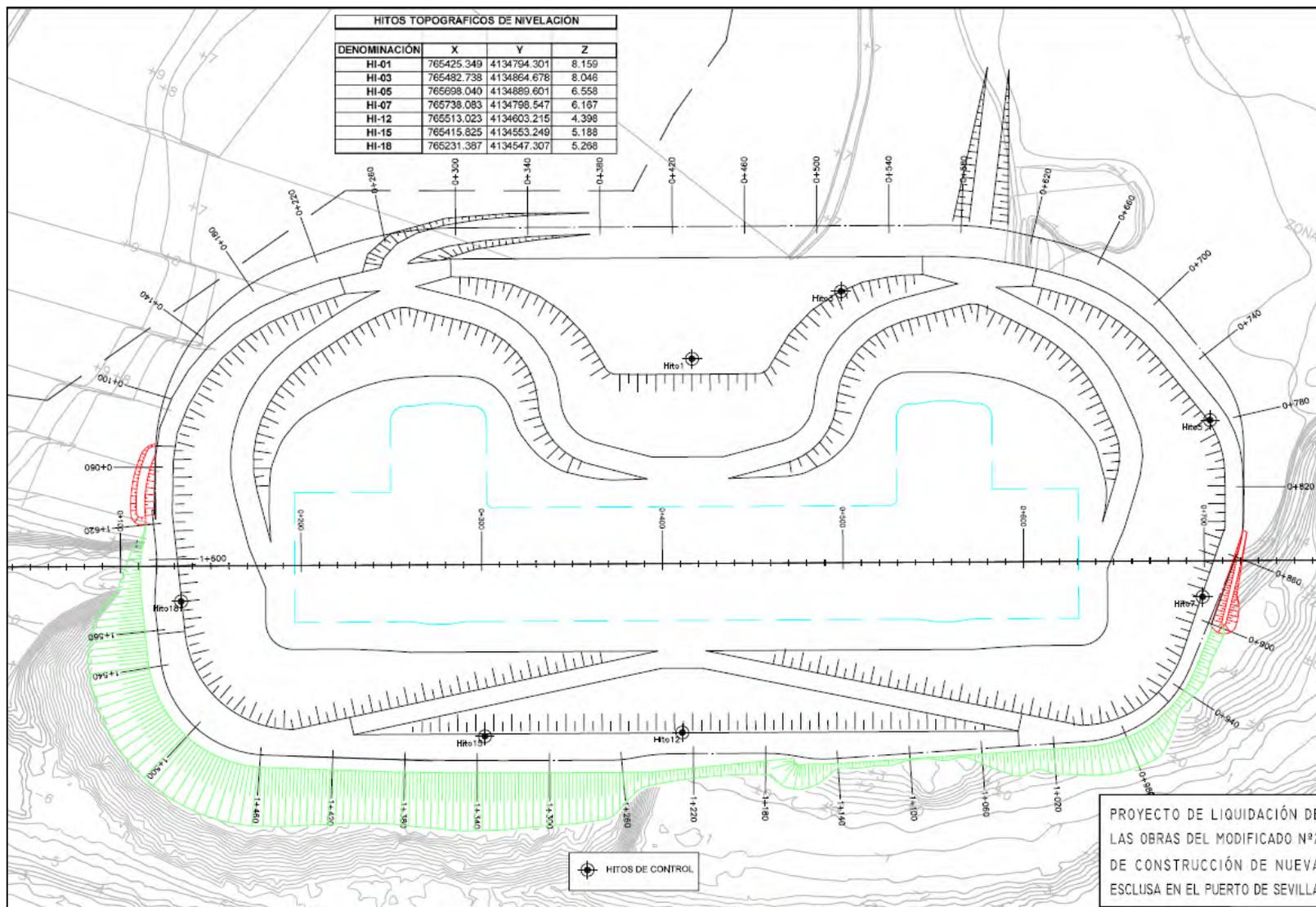
- Altura de la lámina de agua en el interior del terreno



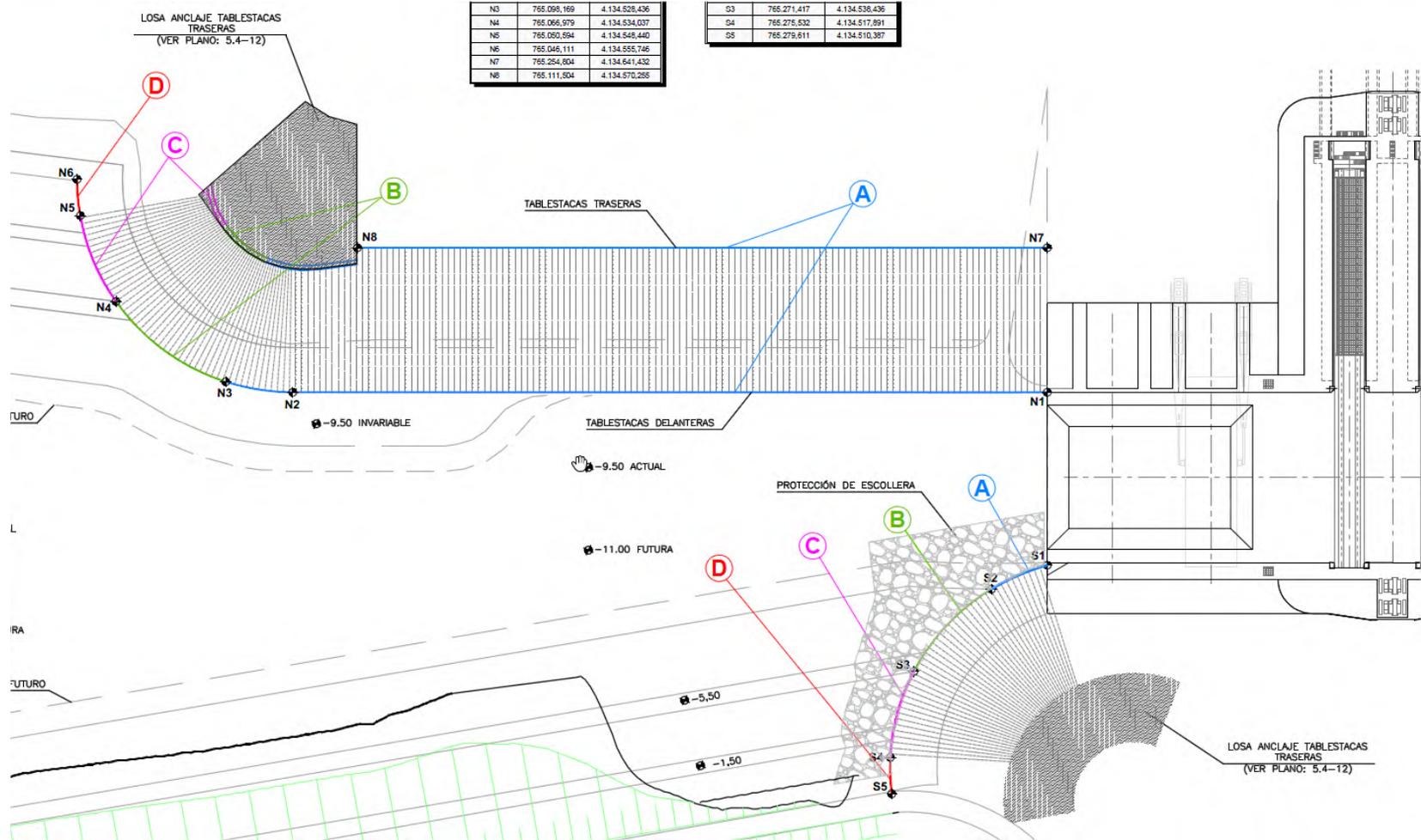
# 10. RED INSTRUMENTACIÓN: PIEZÓMETROS E INCLINÓMETROS



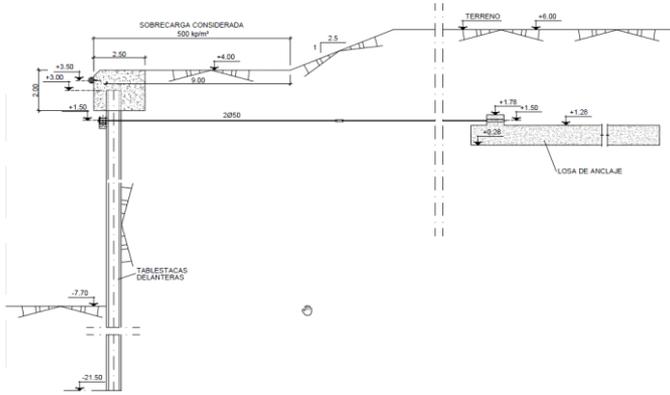
# 10. RED INSTRUMENTACIÓN: HITOS TOPOGRÁFICOS



# 11. MUELLES DE TABLESTACAS: ANCLAJES TRASEROS TRAMOS CURVOS

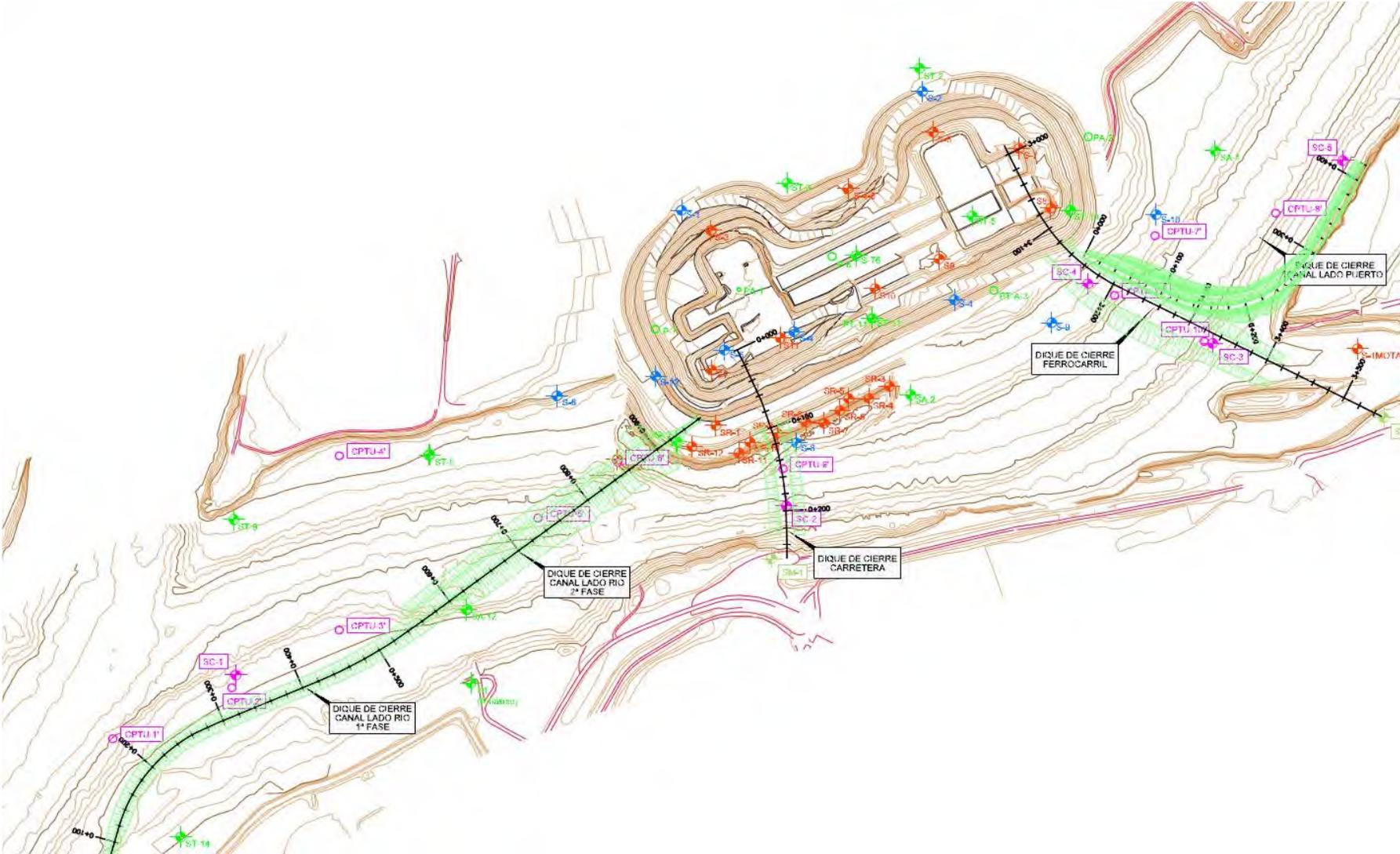


# 11. MUELLES DE TABLESTACAS: ANCLAJES TRASEROS TRAMOS CURVOS

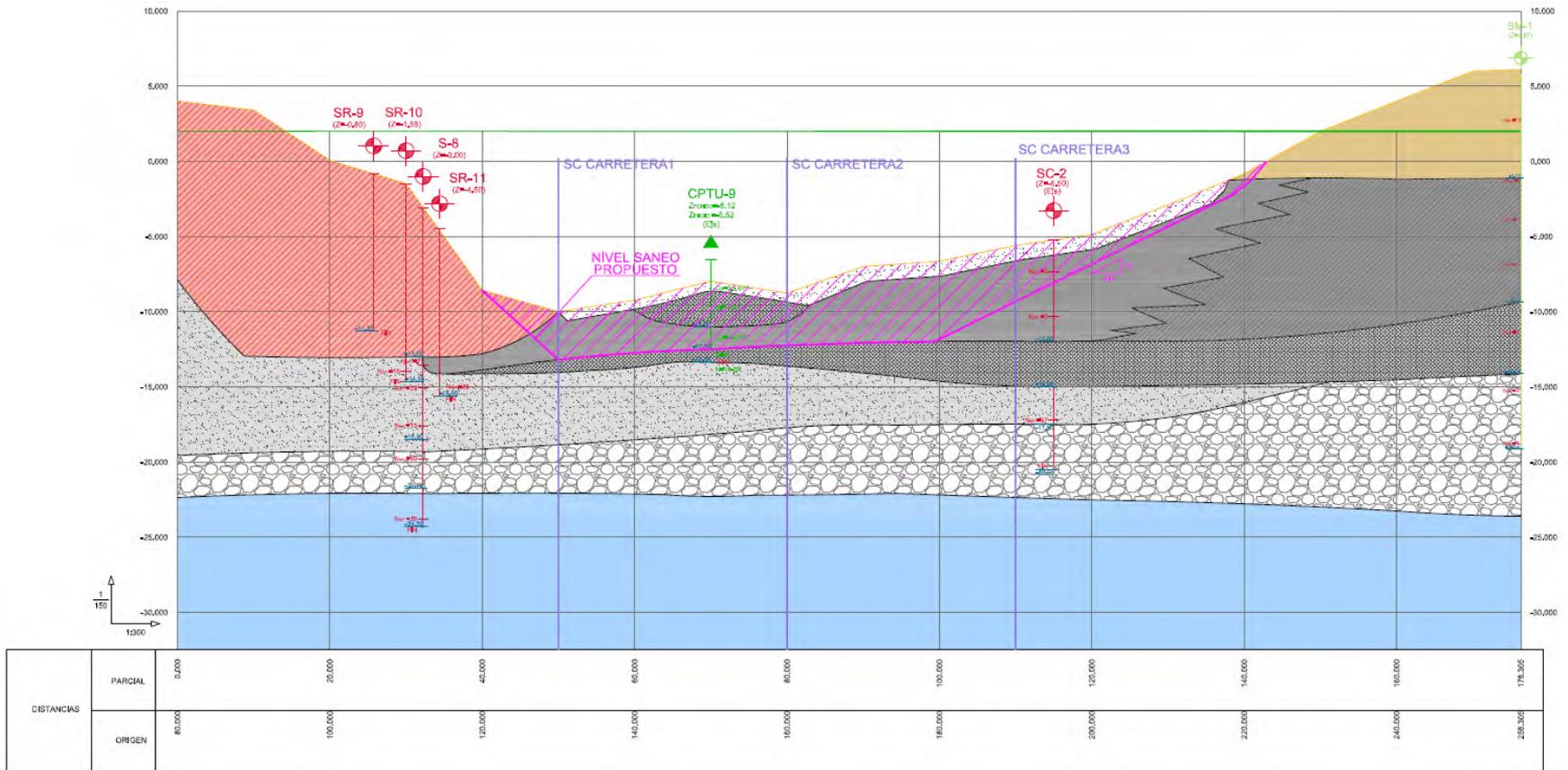


- Superficie de losas de anclaje: entre 450 y 1000 m<sup>2</sup>.

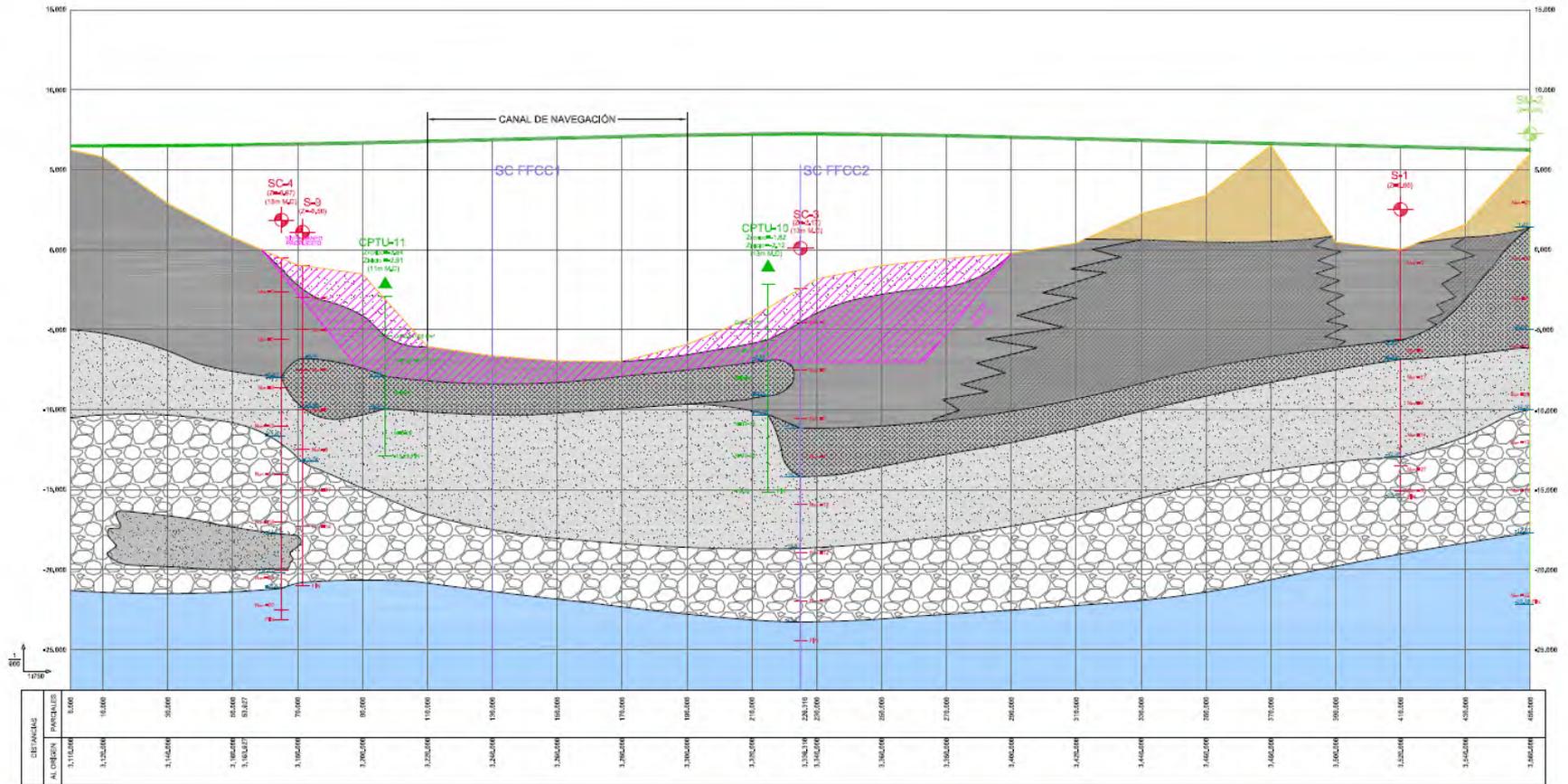
# 12. DIQUES DE CIERRE



PRINCIPAL PROBLEMÁTICA: ESTABILIDAD DE MARGENES Y ZONAS DONDE NO ERA POSIBLE EL DRAGADO PREVIO DEL CIMIENTO



PRINCIPAL PROBLEMÁTICA: ESTABILIDAD DE MARGENES Y ZONAS DONDE NO ERA POSIBLE EL DRAGADO PREVIO DEL CIMIENTO



### • EJECUCIÓN POR FASES:

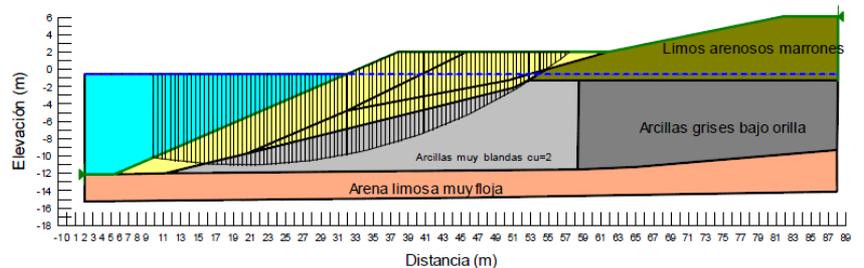
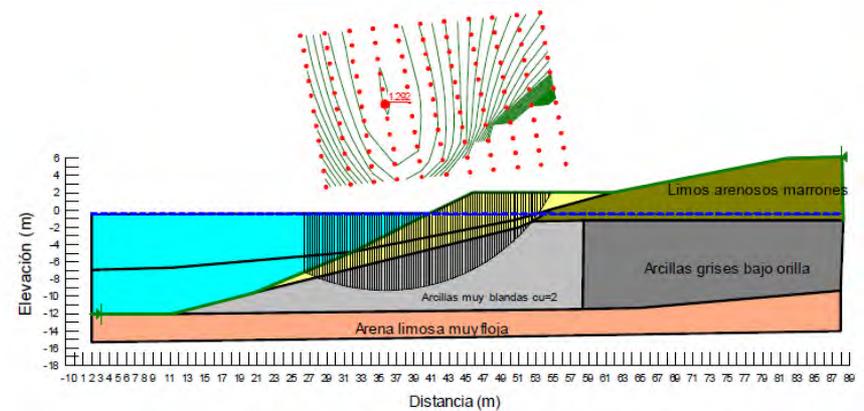
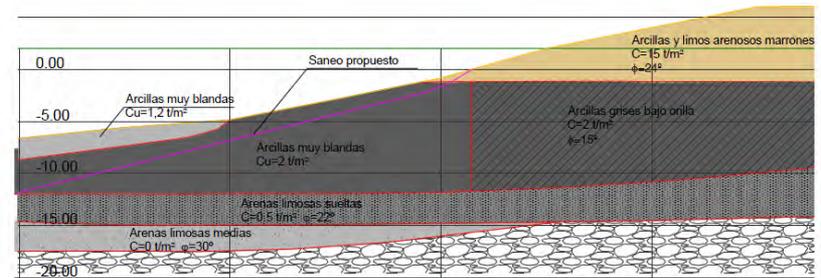
1ª FASE: DRAGADO DE MATERIAL BLANDO EN CIMIENTO. COMPATIBLE CON MARGENES

2ª FASE: VERTIDO RELLENO SUMERGIDO (PEDRAPLEN) HASTA COTA +2.

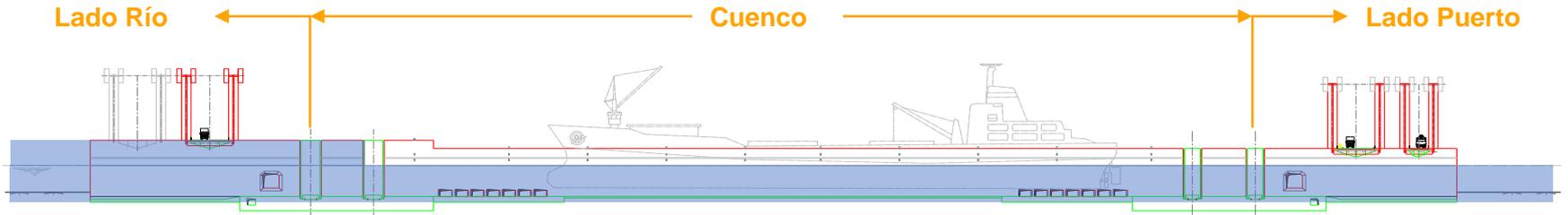
3ª FASE: TIEMPO DE CONSOLIDACIÓN ENTRE 4 Y 10 SEMANAS

4ª FASE: RELLENO HASTA CORONACIÓN COTAS +6 y +9

- **PRINCIPAL PROBLEMÁTICA:** ESTABILIDAD DE MARGENES Y ZONAS DONDE NO ERA POSIBLE EL DRAGADO PREVIO DEL CIMIENTO (IMPORTANTES SOBRE CONSUMOS DE MATERIAL DE RELLENO)

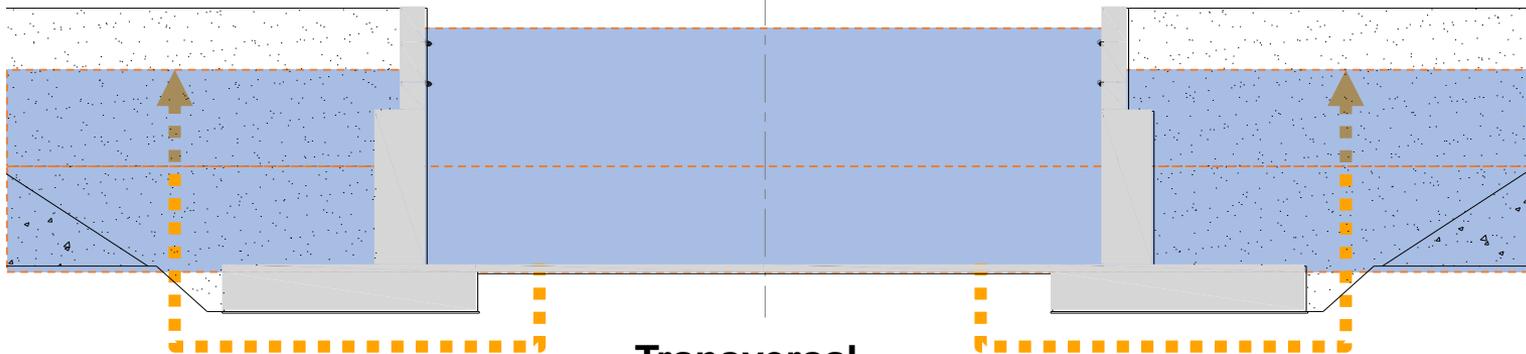
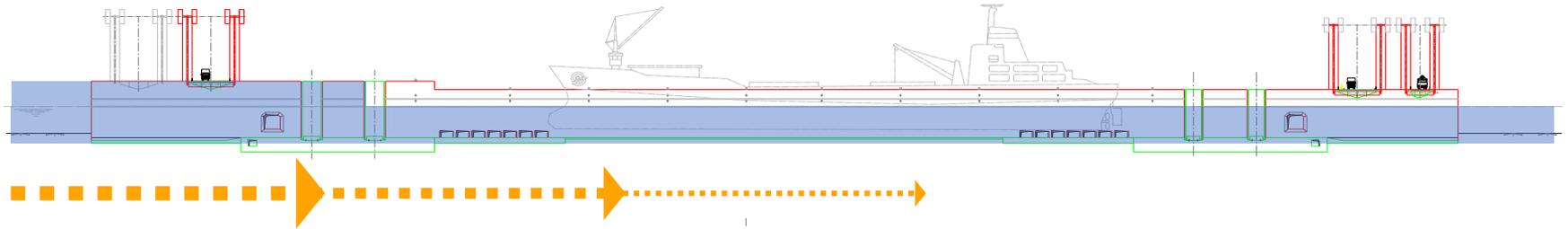


## Situación inicial



## Situación de avenida

## Filtración Longitudinal



## Transversal

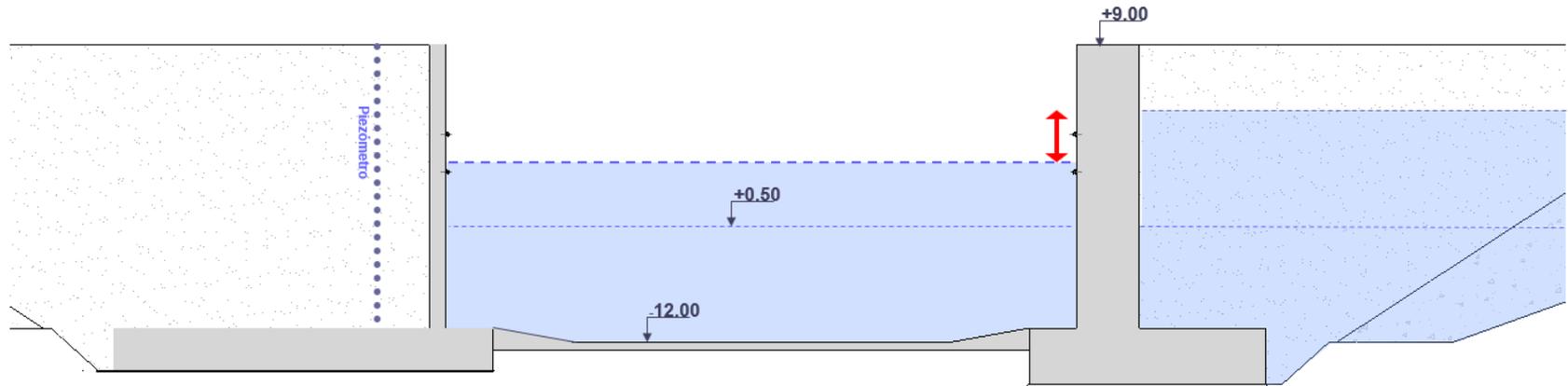


	Incremento nivel freático (N.F.)	Cota(N.F.)
Máx. Nivel operativo cuenco: 5.50:	2 días ..... =1,35 m	+2,85
	4 días ..... =2,42 m	+3,92
	6 días ..... =3,43 m	+4,93



**Máximo desnivel considerado en Cálculo**

**3,00 m**



	Incremento nivel freático (N.F.)	Cota (N.F.)
Duración avenida 8.50:	2 días ..... =3,50 m	+4,00
	4 días ..... =5,00 m	+4,40
	6 días ..... =5,90 m	+5,50



**Máximo desnivel considerado en Cálculo**

**4,00 m**



Puerto  
de Sevilla

IDOM



# **IDOM**

**Our commitment, your success**

**IDOM.COM**