

# 5 ETP, CITT, Área Frontal y TCTA AM

- a. Historia e investigación de campo
- b. Evaluación de alternativas de cimentación. Elección del diseño
- c. Pruebas de construcción de losa y pilotes en campo
- d. Fase de construcción. Resultados y comportamiento

# 1. Historia e investigaciones de campo tempranas

1. History and early site investigations



# Algunos proyectos en suelos difíciles / Some projects in difficult soils

**1. Línea ferroviaria de alta velocidad #1**, Reino Unido. Trenes de 300km/hr solo 1m por encima de suelos muy blandos del río Támesis sujetos a resonancia. Solucionado con losa continua piloteada.

1. High Speed 1, UK. 300 km/hr on tracks only 1m above soft Thames Marshes. Prone to resonance at operational speeds. Solved using optimised piled slab.

**2. Gautrain**, Sudáfrica. Línea ferroviaria en suelos colapsables.

2. Gautrain, South Africa: railway viaducts on collapsing ground.

**3. Terraplenes en Athlone**, Irlanda. Suelos más blandos y más sensitivos que los de Texcoco

3. Athlone road embankments, Ireland: softer and more sensitive/brittle soils than Texcoco

**4. Ciudad de Northwich**, Reino Unido, gran ciudad construida en minas de sal de 90m de profundidad y soportada en pilares de unos 5m de sal. Solucionado sustituyendo agua salobre con grout para estabilizar las minas.

4. Northwich UK, large town built on salt mines at 90m depth and supported on a 5m remnant pillars of salt. Solved replacing brine with grout.

**5. Puente Gerald Desmond**, Puerto de Long Beach, California: Puente sobre un canal ensanchado. Sujeto a licuefacción y dispersión lateral. Solucionado con pilotes de 60 a 80m.

5. Gerald Desmond Bridge, Port of Long Beach, California: bridge over widened deep channel prone to EQ liquefaction and lateral spreading. Solved using base grouted piles at 60 to 80m depth.

# Nuevo Aeropuerto Internacional de México

**Ubicado en arcillas vírgenes del Lago de Texcoco**

Located on virgin Lake Texcoco clays



# Legado Geotécnico de Nabor Carrillo (1911-1967)

## Geotechnical legacy of Nabor Carrillo



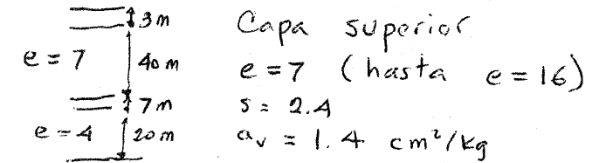
**nabor carrillo**

**e hundimiento de la ciudad de México  
proyecto texcoco**

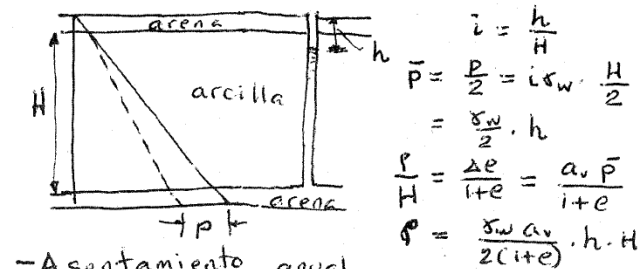
secretaría de hacienda y crédito público

### MEXICO

- Características suelo México



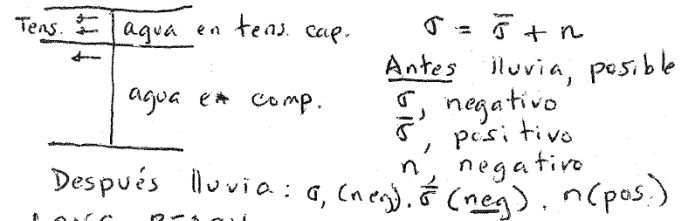
- Mecanismo elemental



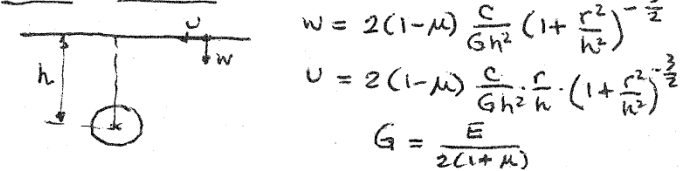
- Asentamiento anual

$\lambda \doteq \frac{1}{2}$  descenso niv piez  
 Experimentalmente,  $\lambda = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{5}$  d.n.p.

- Mecanismo grietas



### LONG BEACH





# Investigaciones tempranas del terreno / Early site investigations

## Modelos de elementos finitos históricos / Historical FE models

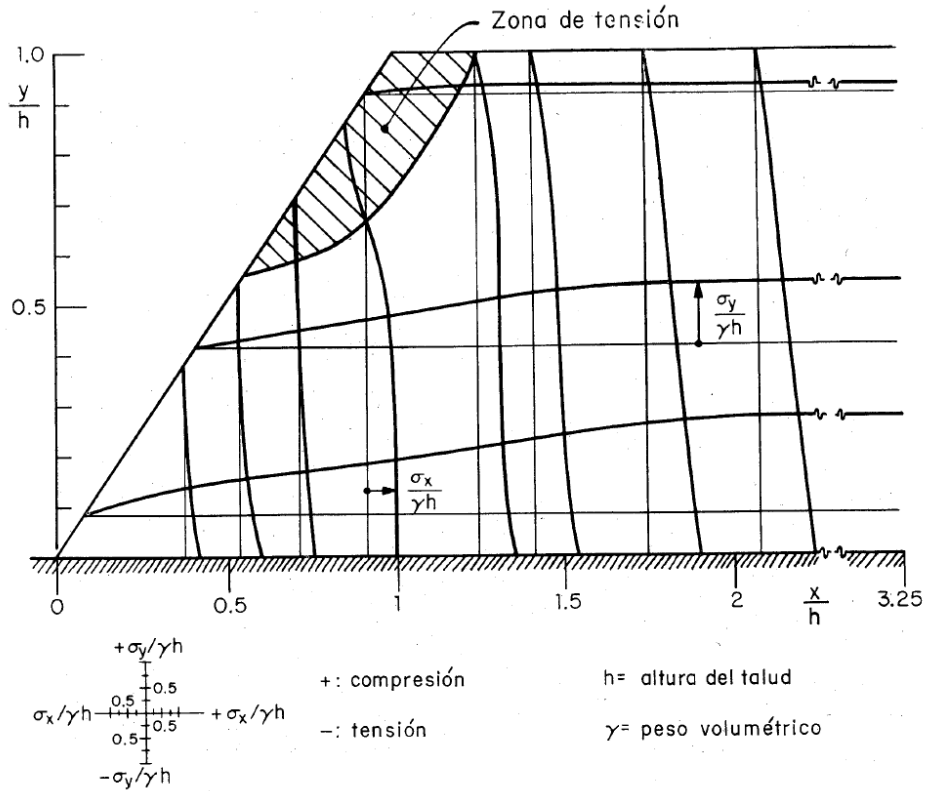


FIG 2 ANALISIS POR EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS :  
ESTADO DE ESFUERZOS EN UN TALUD DE 45°  
FINITE ELEMENT ANALYSIS : STRESS STATE IN A 45° SLOPE

Resendiz & Zonana (1969)

## Contenido de sal en agua freática / Ground water salt content

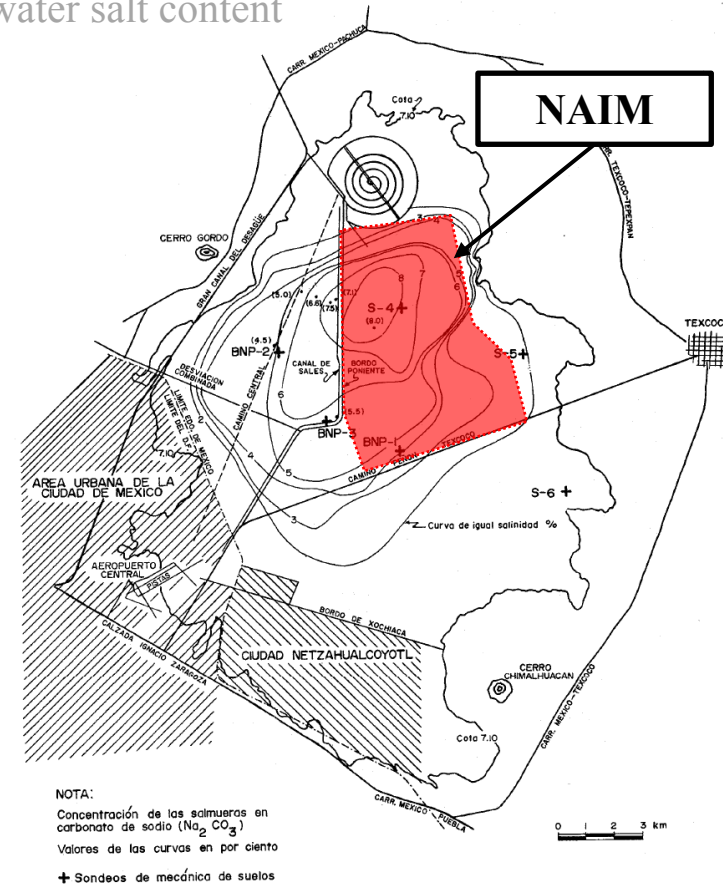
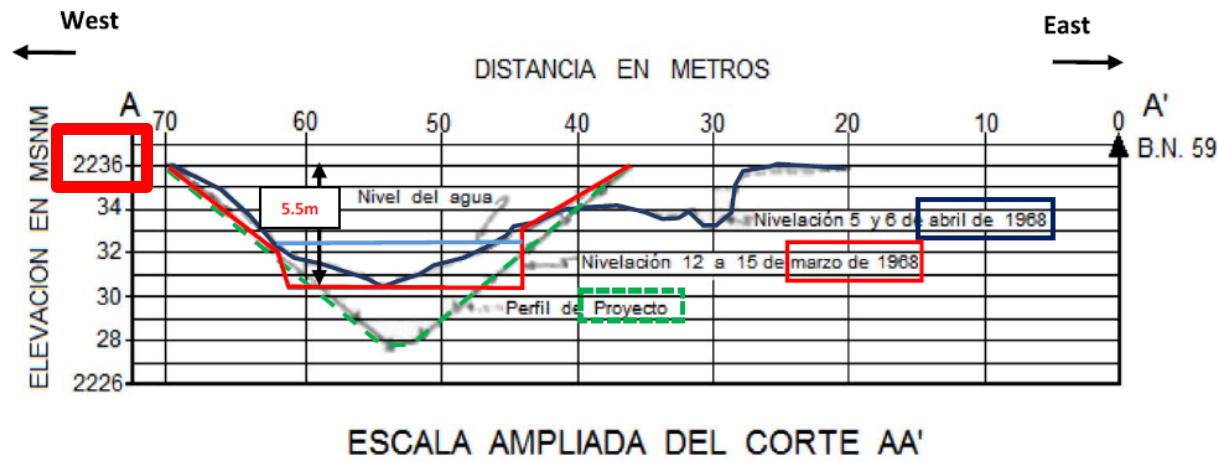
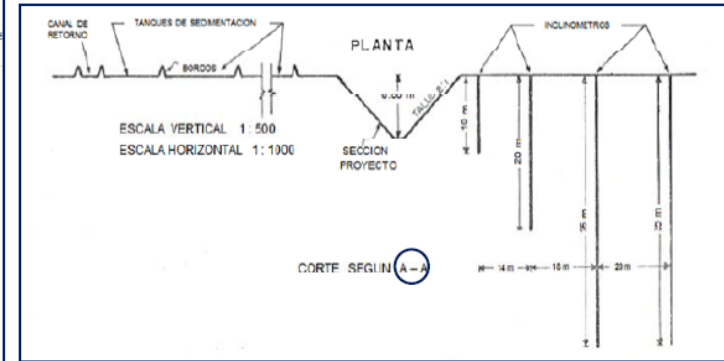
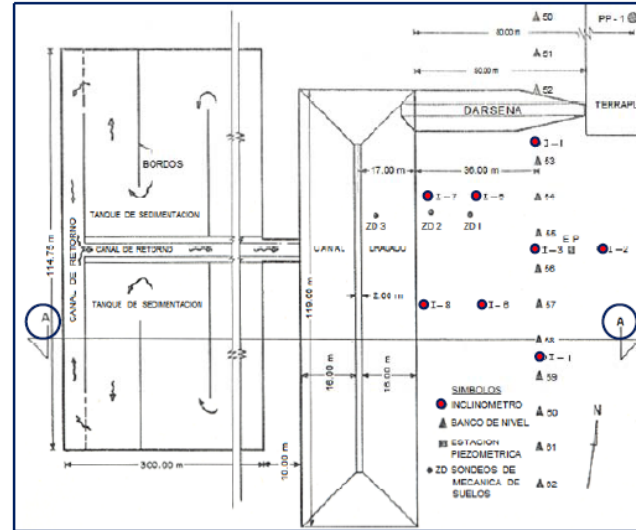
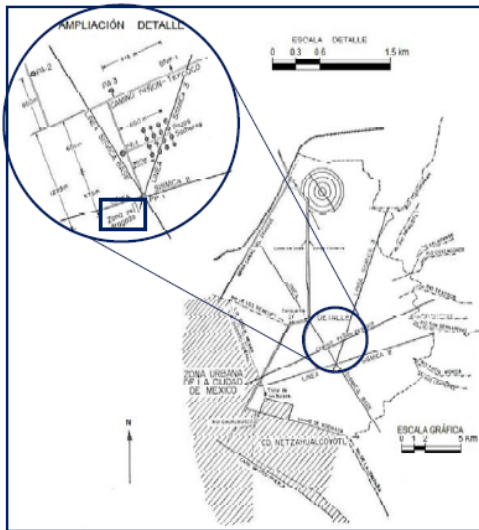


FIG 7. CURVAS DE IGUAL SALINIDAD EN EL LAGO DE TEXCOCO SEGUN DETERMINACIONES REALIZADAS POR SOSA TEXCOCO, S. A.  
CURVES OF EQUAL ALKALI CONTENT IN THE TEXCOCO LAKE, DETERMINED BY SOSA TEXCOCO, S.A.

Marsal & Graue (1969)

# Investigaciones tempranas del terreno / Early site investigations



**Excavación de prueba de 1968**  
1968 Trial Excavation

**Lago de Texcoco a +2236 msnm**  
Texcoco Lake at +2236 masl

FIG. 55 AGRIETAMIENTO Y SECCION TRANSVERSAL EN LA ZONA DESLIZADA

# Investigaciones tempranas del terreno / Early site investigations

## Ensayo cíclico lento (0.1 a 1 Hz) en pilotes hincados de 30x30 cm

Slow (0.1 to 1 Hz) cyclic testing of 30 cm square driven piles

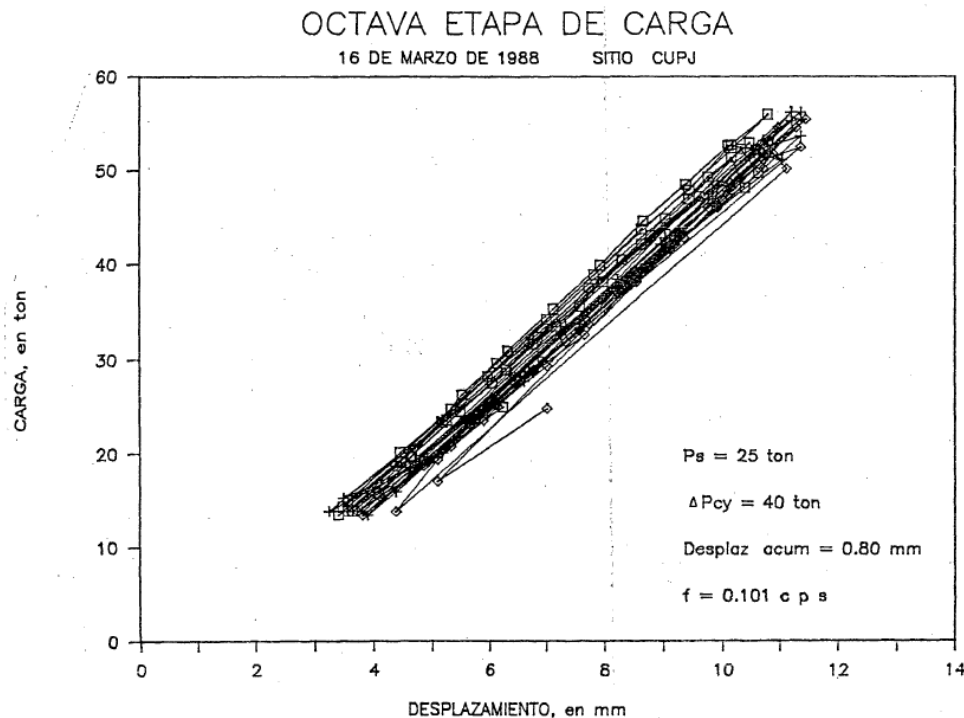
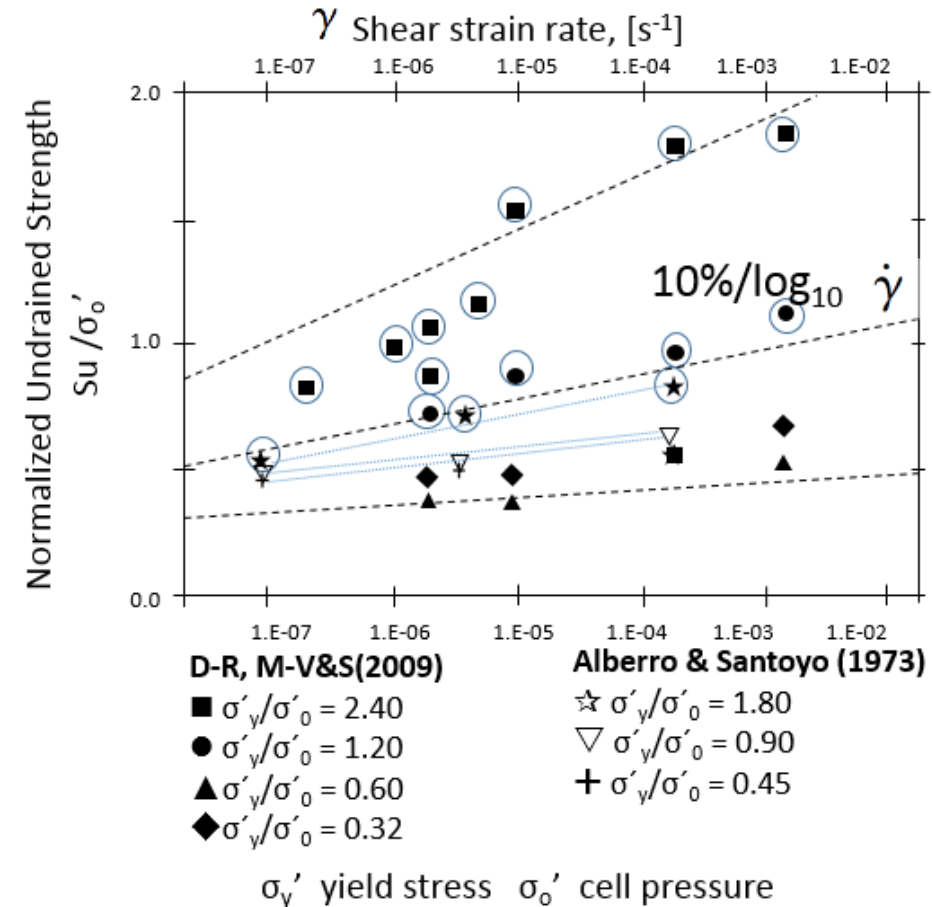


Fig 36h. Ensayo cíclico No 2. Ps = 25 ton. Pilote 1

Jaime, Romo & Resendiz (1988)

## Efectos de la tasa de deformación en la resistencia CIU de las arcilla de la Ciudad de México

Strain rate effects on CIU strength of Mexico City clays

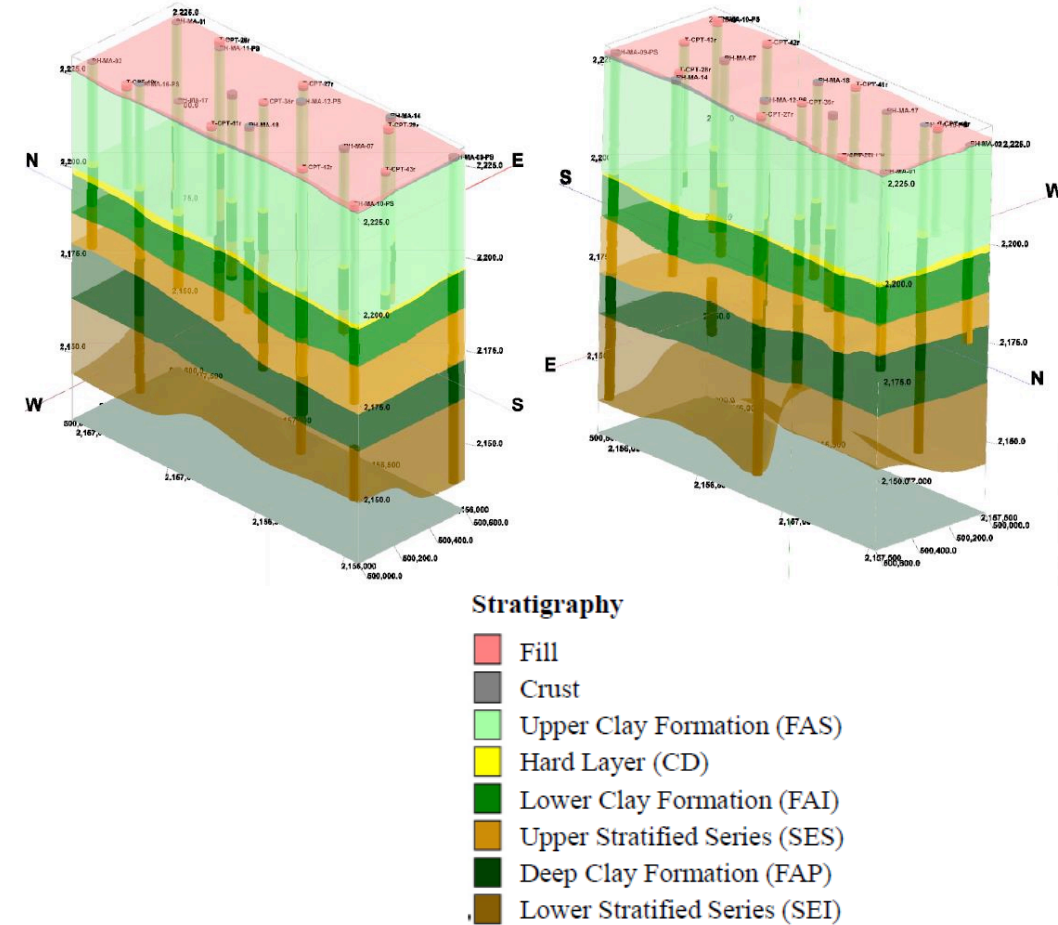
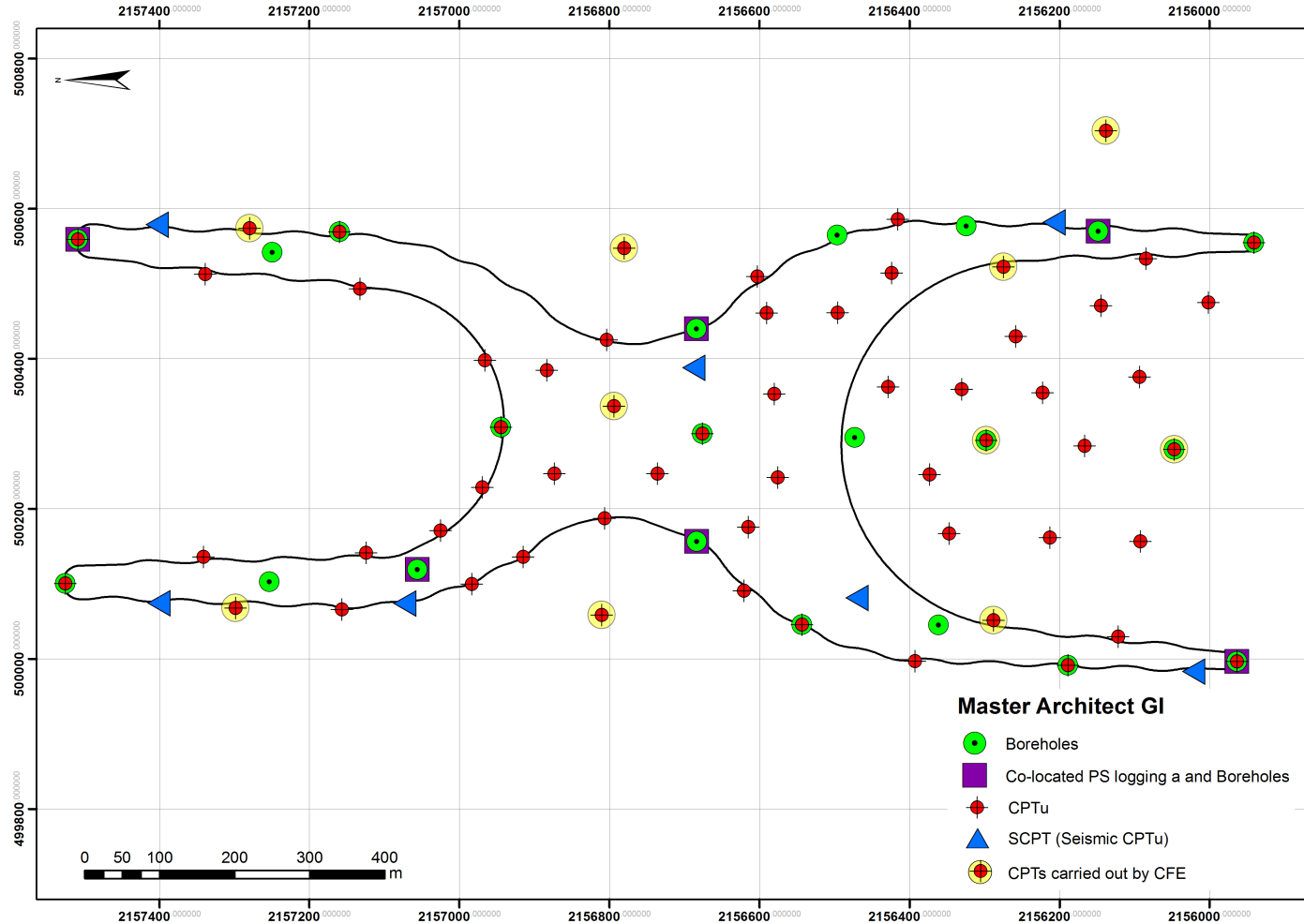


Diaz-Rodriguez, Martinez & Santamarina (2009)



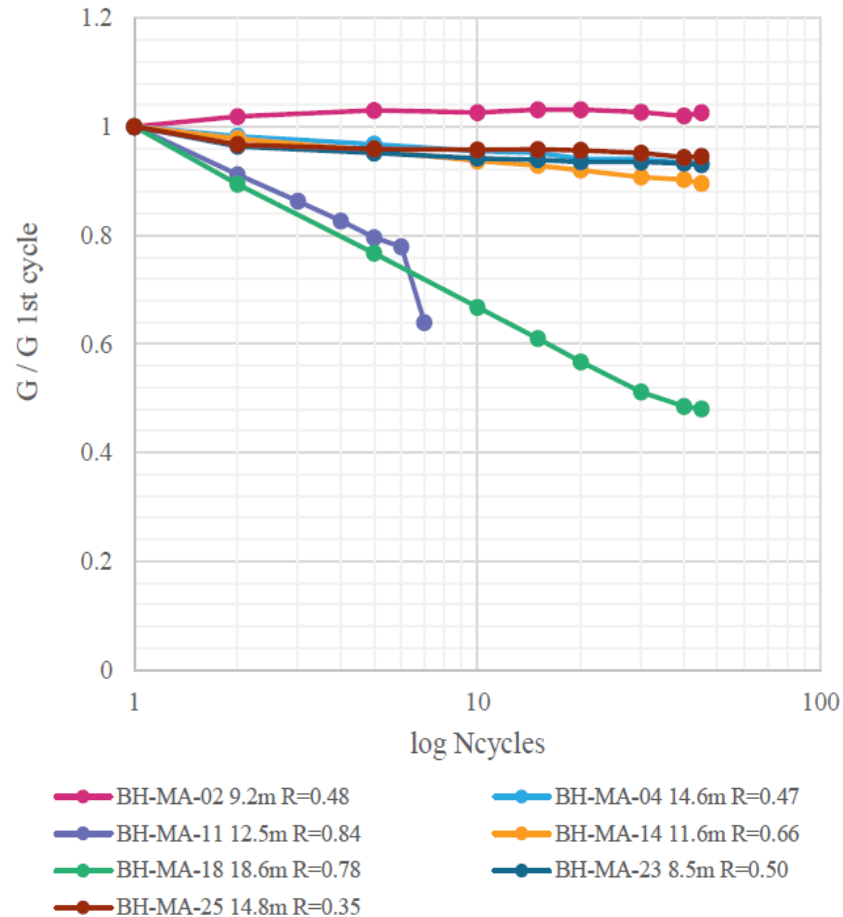
# Campana de exploración del subsuelo. Arquitecto Maestro 2015

## Ground Investigation. MA 2015



# Exploración de 2015. Ensayos triaxiales cíclicos en suelo vírgen del Lago de Texcoco (FAS)

2015 GI: Cyclic triaxial testing in virgin Lake Texcoco (FAS) soils



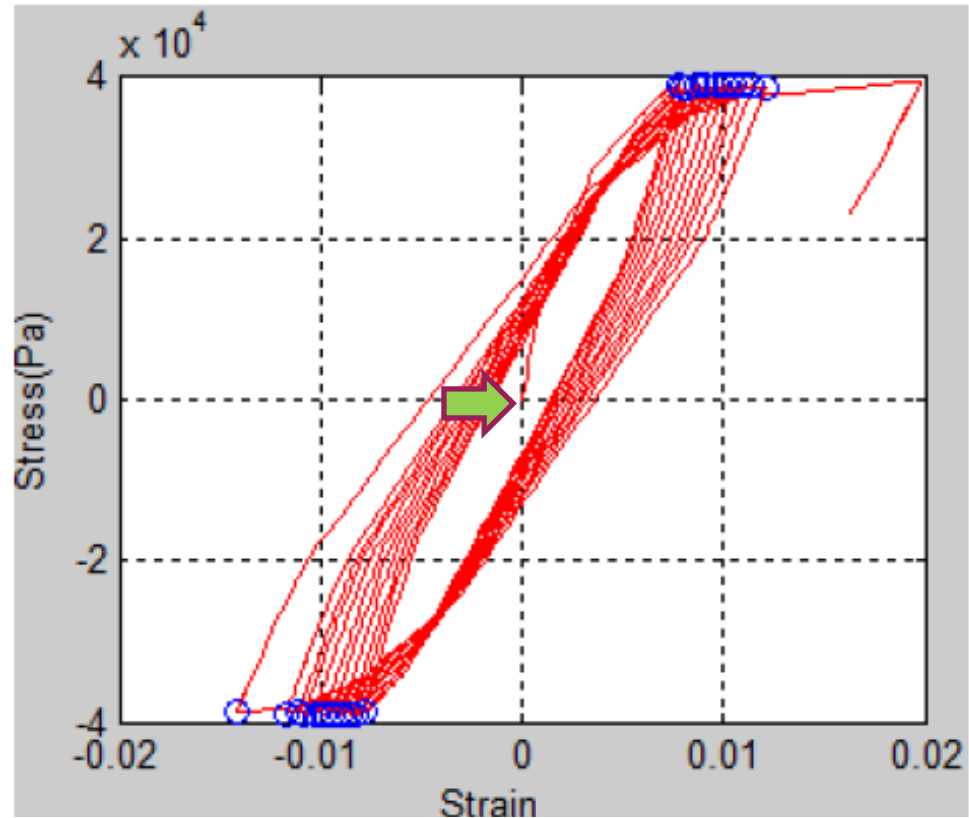
**Pruebas a 0.4 Hz / Tested at 0.4 Hz**

$$R = t_{cy} / S_u \quad (10^{-6} \text{ s}^{-1})$$

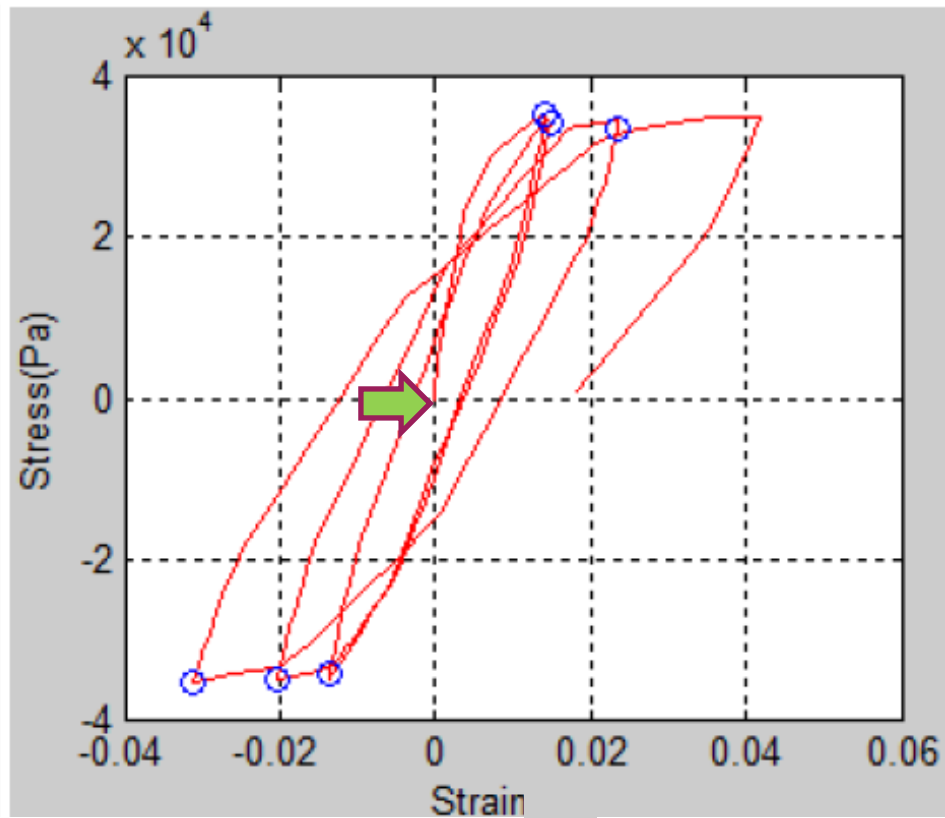
$$\dot{\gamma} = 10^{-2} \text{ to } 10^{-1} \text{ s}^{-1}$$

# Exploración de 2015. Calibración con ensayos triaxiales de laboratorio

## 2015 GI: Calibration with triaxial testing



BH MA-18 R=0.84

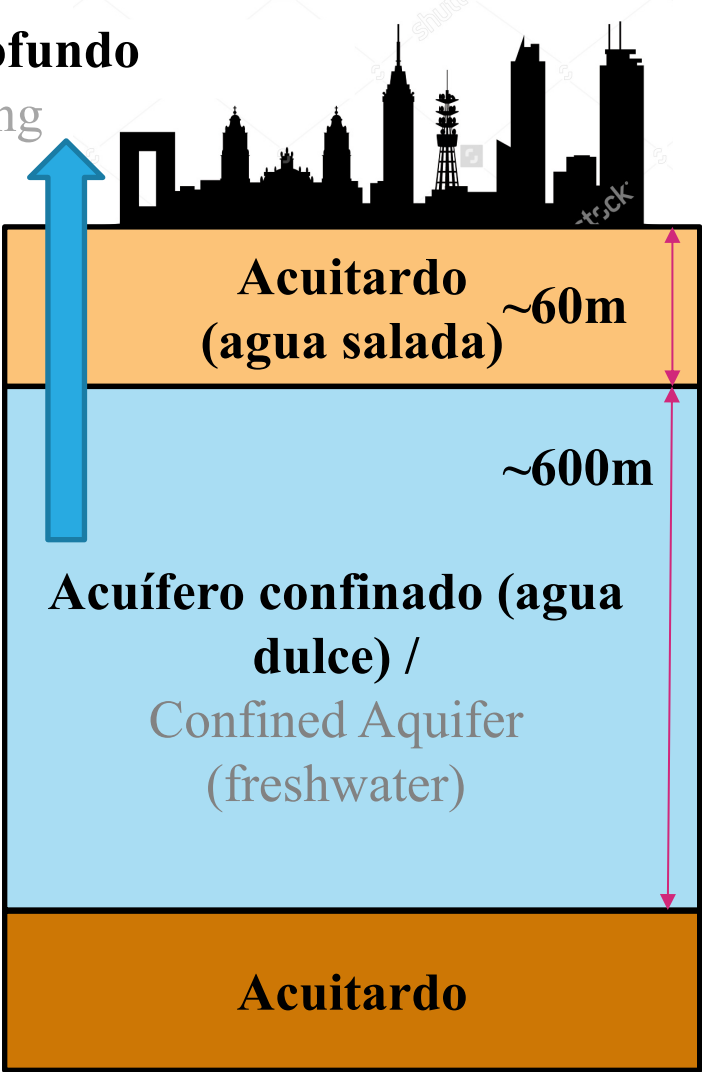


BH MA-11 R=0.78



# Subsidencia Regional / Regional Subsidence

**Bombeo profundo**  
Deep pumping



# Subsidencia Regional NAIM / NAIM Regional Subsidence

**Suelos Blandos / Soft Soils**

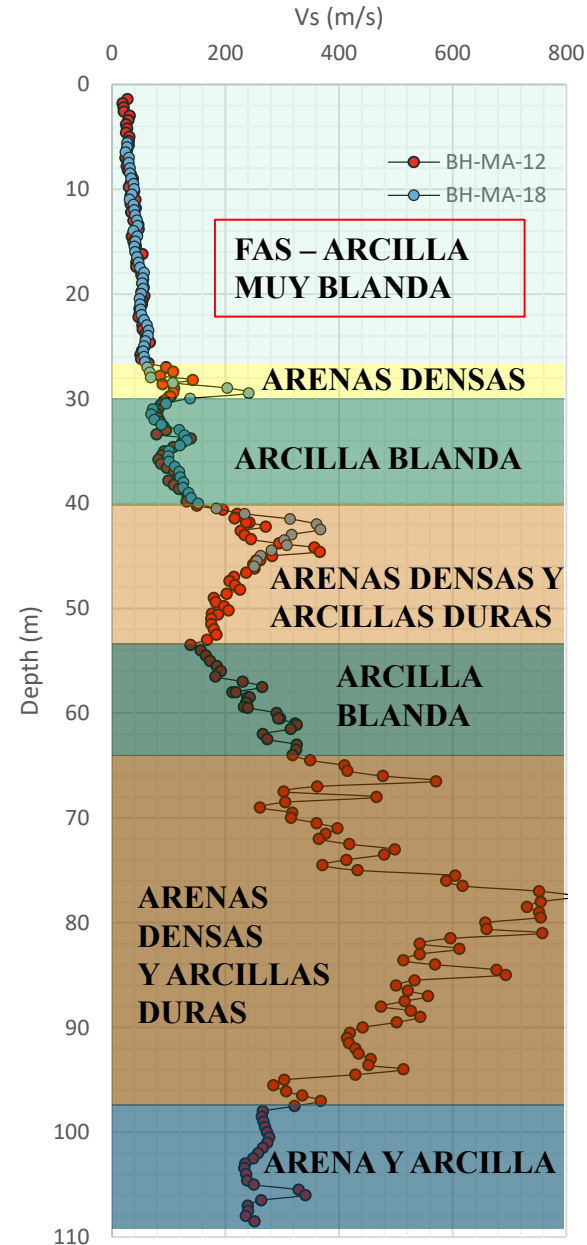
*~60m Acuitardo / Aquitard*

**Bombeo para abastecimiento**

Water supply Pumping

*~600m Acuífero / Aquifer*

to 600m



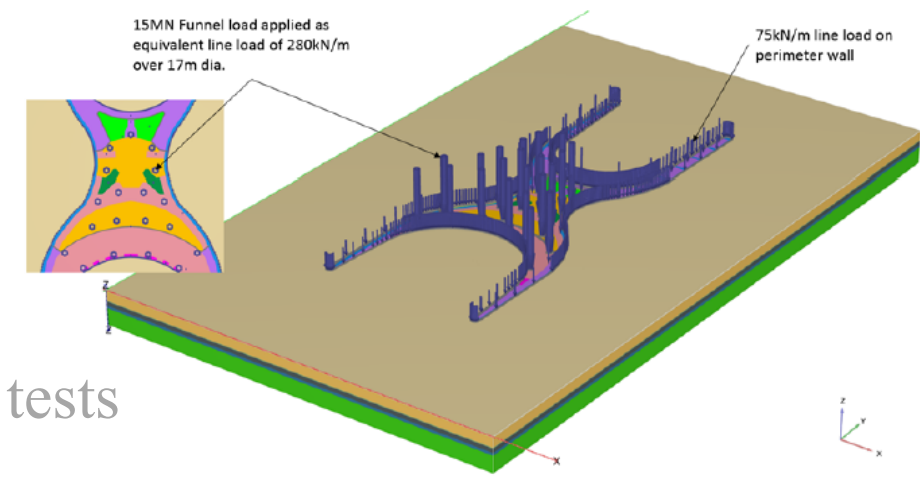
**Subidencia regional de unos**

**15mm/mes in ET y 12mm en ATCT**

Subsidence about 15mm/month in PTB,  
12mm/month in ATCT

# Calibración de nuestro modelo geotécnico

Calibrated our soil model with



- Ensayos de campo y laboratorio / In situ and laboratory tests
- Pruebas de excavación y pilotes por Cimesa / Trial excavation and trial piling
- Pruebas de campo del IIUNAM / IIUNAM field trials
- Pruebas de precarga con vacío de Pimosa y Menard / Vacuum preloading trials by Pimosa and Menard
- Registros históricos de subsidencia regional y extracción de agua subterránea hasta 600m de profundidad / Historic regional subsidence and groundwater extraction effects down to 600m

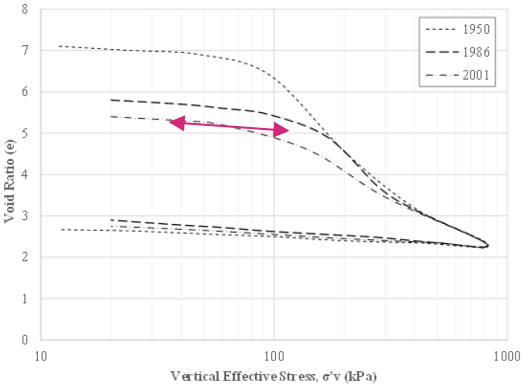
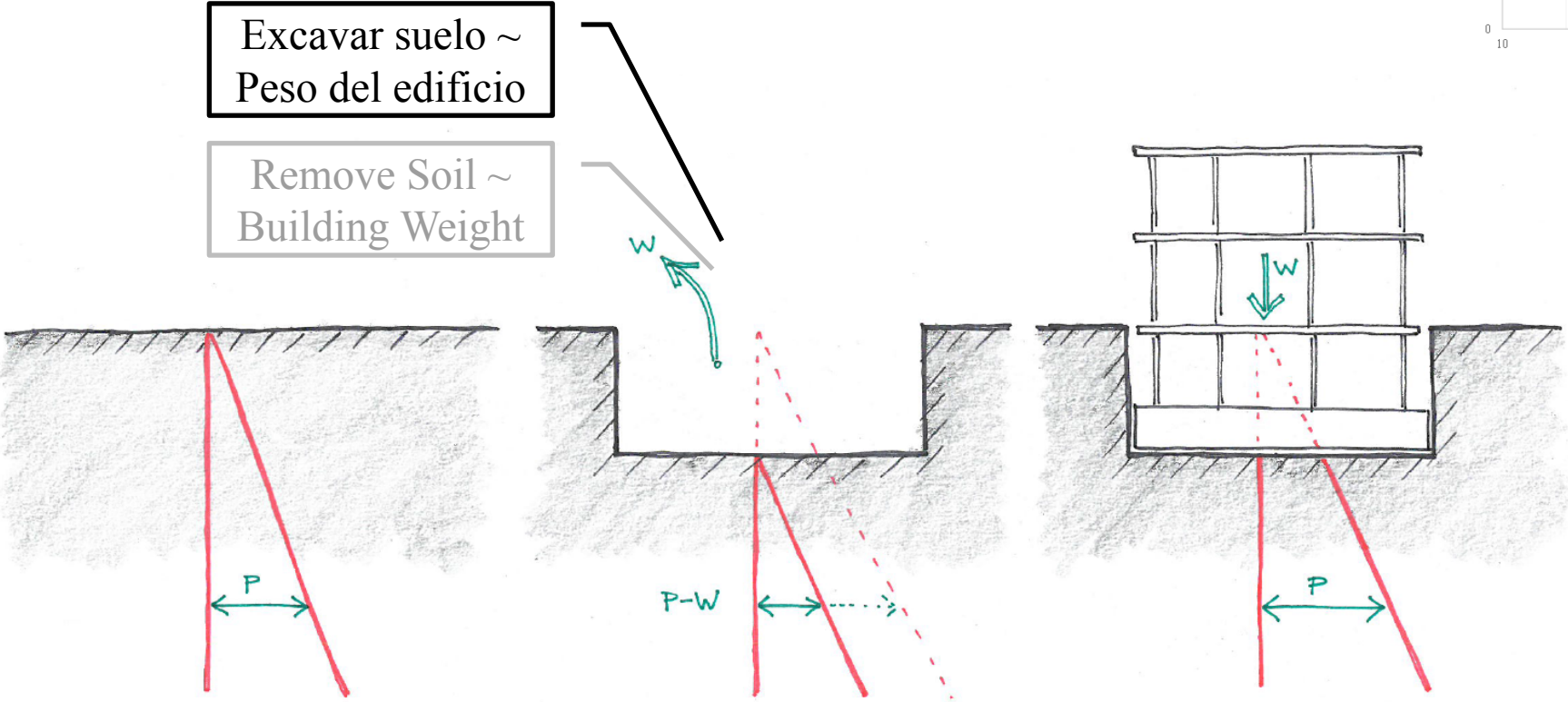
## **2. Evaluación de alternativas de cimentación**

2. Evaluation of foundations alternatives



# Opciones de cimentación: Losa compensada

## Foundation options: Compensated raft



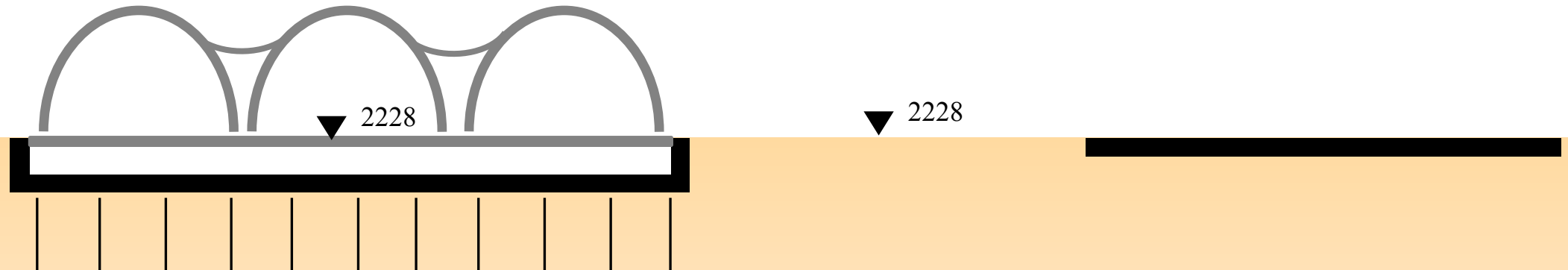
Ovando et al (2007)

# Opciones de cimentación ET, CTT, Área frontal / Foundation options

## PLAN A

- LOSA COMPENSADA / COMPENSATED RAFT
- EXCAVACIONES ABIERTAS SECUENCIALES / SEQUENTIAL OPEN EXCAVATIONS
- SUELOS NO MEJORADOS / UN-IMPROVED SOILS

VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (ET) / EXCAVATION VOLUME (PTB) = 2,000,000m<sup>3</sup>  
PILOTES DE FRICCIÓN / FRICTION PILES = 5,200



EDIFICIO TERMINAL  
TERMINAL BUILDING

*PISTAS, CALLES DE RODAJE, PLATAFORMAS  
(OTRO DISEÑADOR)  
RUNWAY, TAXIWAYS, APRON  
(BY OTHERS)*

# Opciones de cimentación ET, CTT, Área frontal / Foundation options

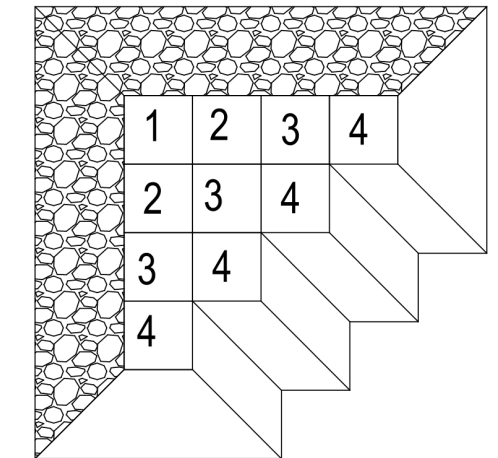
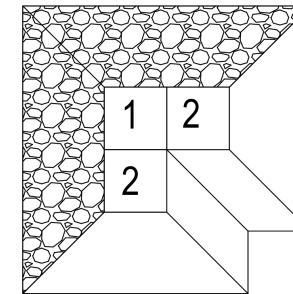
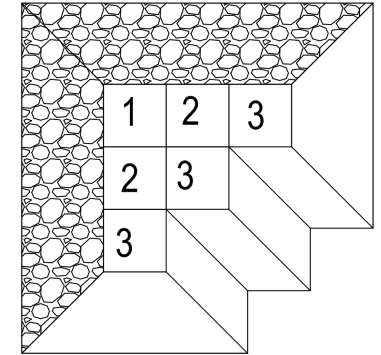
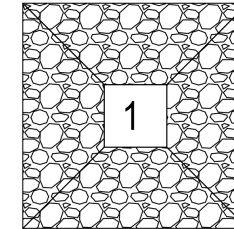
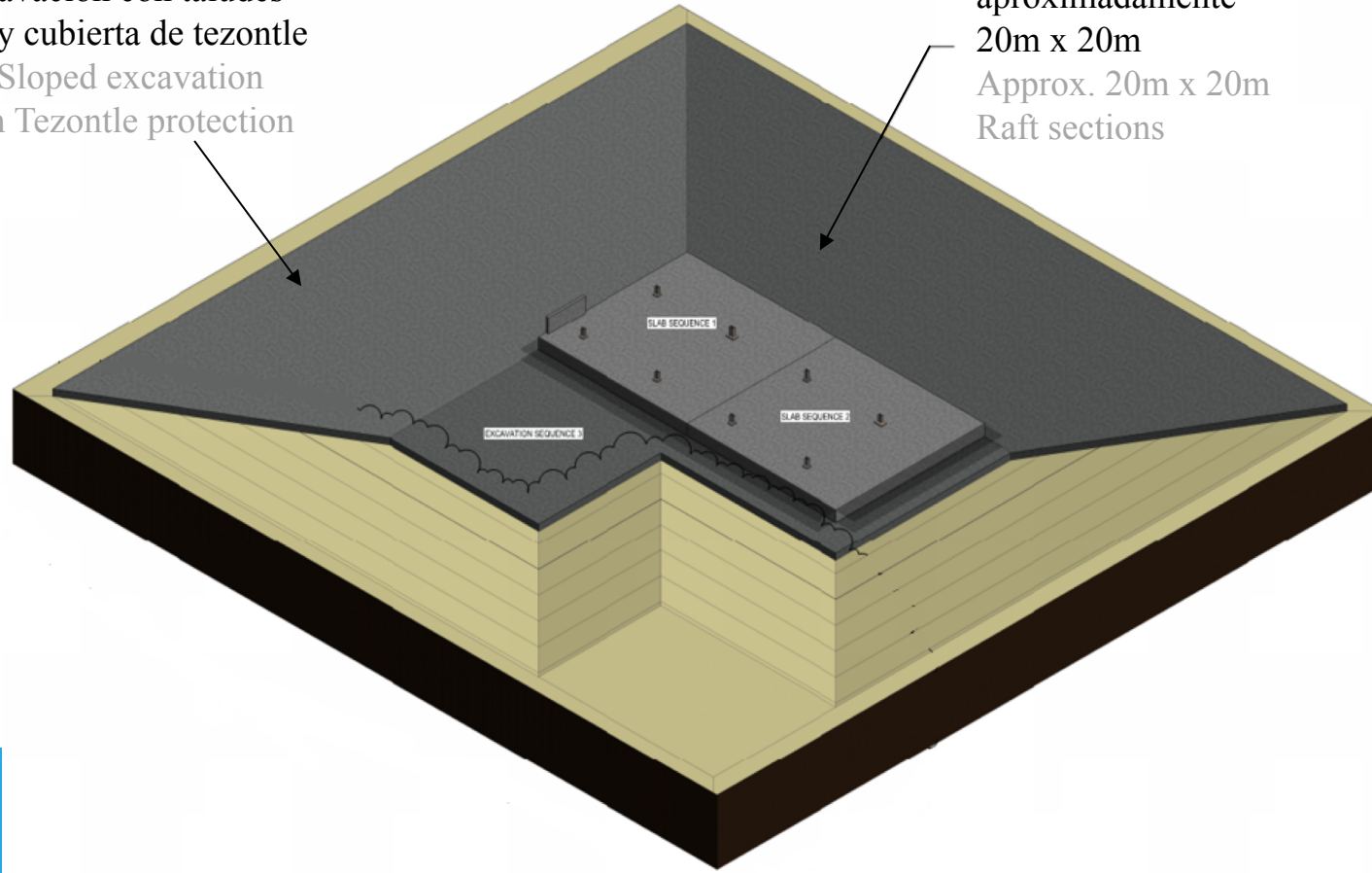
## PLAN A

- LOSA COMPENSADA / COMPENSATED RAFT
- EXCAVACIONES ABIERTAS SECUENCIALES / SEQUENTIAL OPEN EXCAVATIONS
- SUELOS NO MEJORADOS / UN-IMPROVED SOILS

VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (ET) / EXCAVATION VOLUME (PTB) = 2,000,000m<sup>3</sup>  
PILOTES DE FRICCIÓN / FRICTION PILES = 5,200

Excavación con taludes  
1:4 y cubierta de tezontle  
1:4 Sloped excavation  
with Tezontle protection

Secciones de losa de  
aproximadamente  
20m x 20m  
Approx. 20m x 20m  
Raft sections

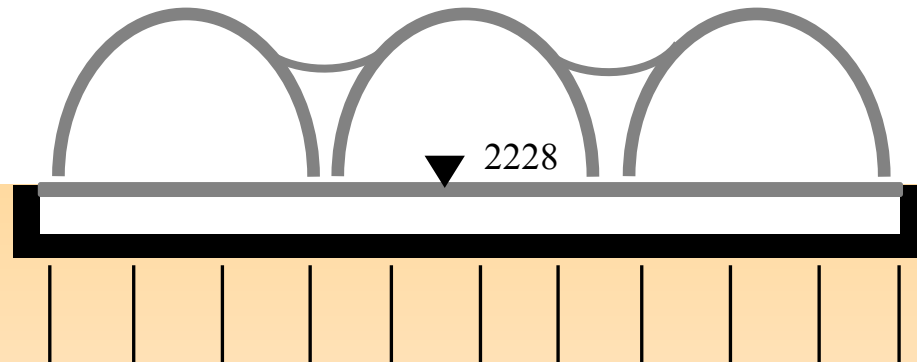


# Opciones de cimentación ET, CTT, Área frontal / Foundation options

## PLAN B

- LOSA COMPENSADA / COMPENSATED RAFT
- EXCAVACIONES CON TABLESTACA / SHEET PILED EXCAVATIONS
- SUELOS NO MEJORADOS / UN-IMPROVED SOILS

VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (ET) / EXCAVATION VOLUME (PTB) = 1,700,000m<sup>3</sup>  
PILOTES DE FRICCIÓN / FRICTION PILES = 5,200  
MURO DE TABLESTACA TEMPORAL / TEMPORARY SHEET PILE WALL = 30,000m



EDIFICIO TERMINAL  
TERMINAL BUILDING

▼ 2228

*PISTAS, CALLES DE RODAJE, PLATAFORMAS  
(OTRO DISEÑADOR)  
RUNWAY, TAXIWAYS, APRON  
(BY OTHERS)*

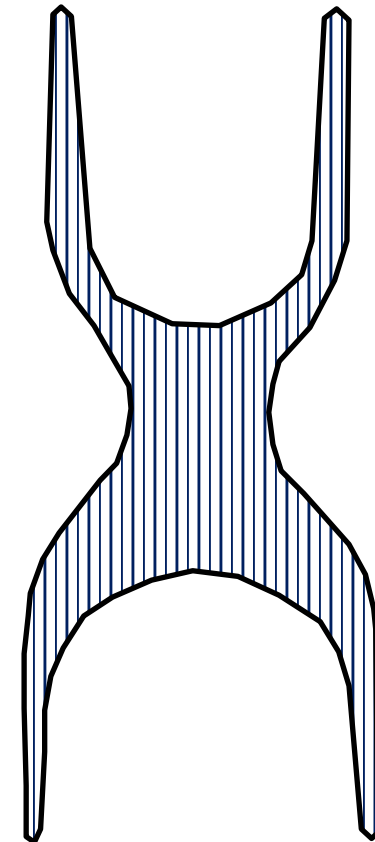
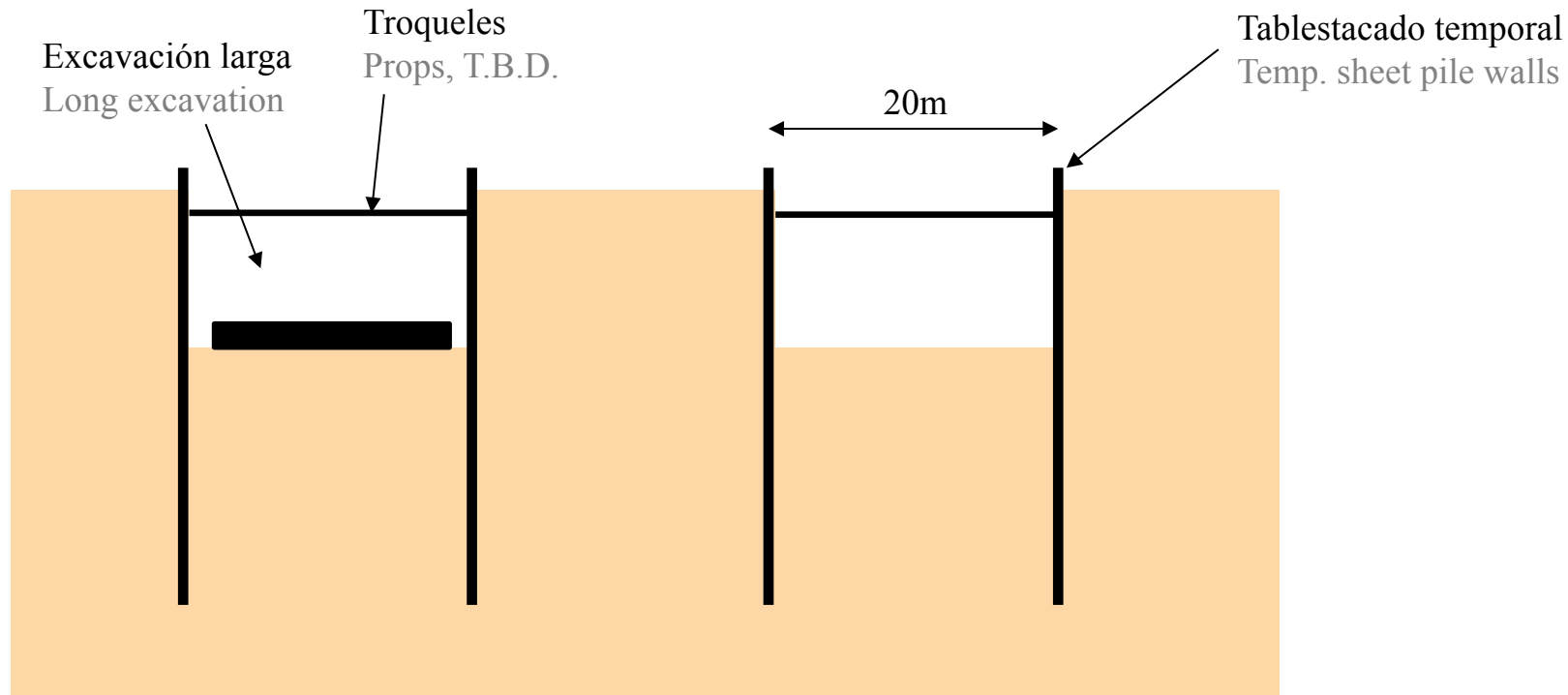


# Opciones de cimentación ET, CTT, Área frontal / Foundation options

## PLAN B

- LOSA COMPENSADA / COMPENSATED RAFT
- EXCAVACIONES CON TABLESTACA / SHEET PILED EXCAVATIONS
- SUELOS NO MEJORADOS / UN-IMPROVED SOILS

VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (ET) / EXCAVATION VOLUME (PTB) = 1,700,000m<sup>3</sup>  
PILOTES DE FRICCIÓN / FRICTION PILES = 5,200  
MURO DE TABLESTACA TEMPORAL / TEMPORARY SHEET PILE WALL = 30,000m

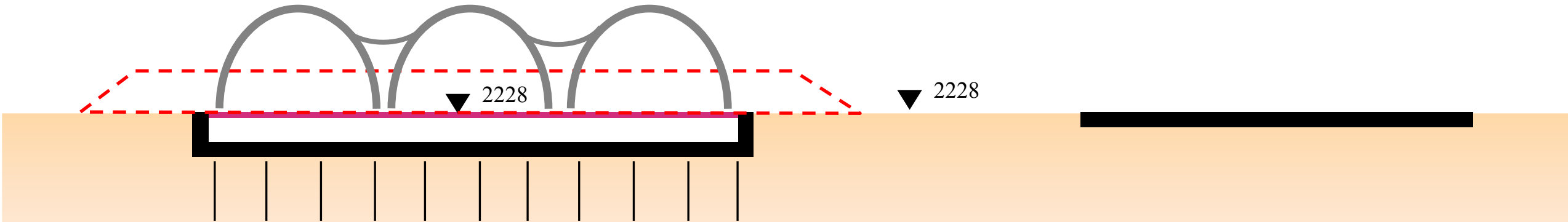


# Opciones de cimentación ET, CTT, Área frontal / Foundation options

## PLAN C

- LOSA COMPENSADA / COMPENSATED RAFT
- EXCAVACIONES ABIERTAS CONTINUAS / CONTINUOUS OPEN EXCAVATIONS
- SUELOS PRECARGADOS / PRE-LOADED SOILS

VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (ET) / EXCAVATION VOLUME (PTB) = 1,700,000m<sup>3</sup>  
PILOTES DE FRICCIÓN / FRICTION PILES = 5,200  
VOLUMEN DE RELLENO DE PRECARGA / PRE-LOAD FILL VOLUME = 2,000,000m<sup>3</sup>  
DRENES / DRAINS = 133,000



EDIFICIO TERMINAL  
TERMINAL BUILDING

*PISTAS, CALLES DE RODAJE, PLATAFORMAS  
(OTRO DISEÑADOR)  
RUNWAY, TAXIWAYS, APRON  
(BY OTHERS)*

# Opciones de cimentación ET, CTT, Área frontal / Foundation options

## PLAN C

**ETAPA 1**  
**1 AÑO DE PRE-CARGA CON VACÍO Y DRENES**

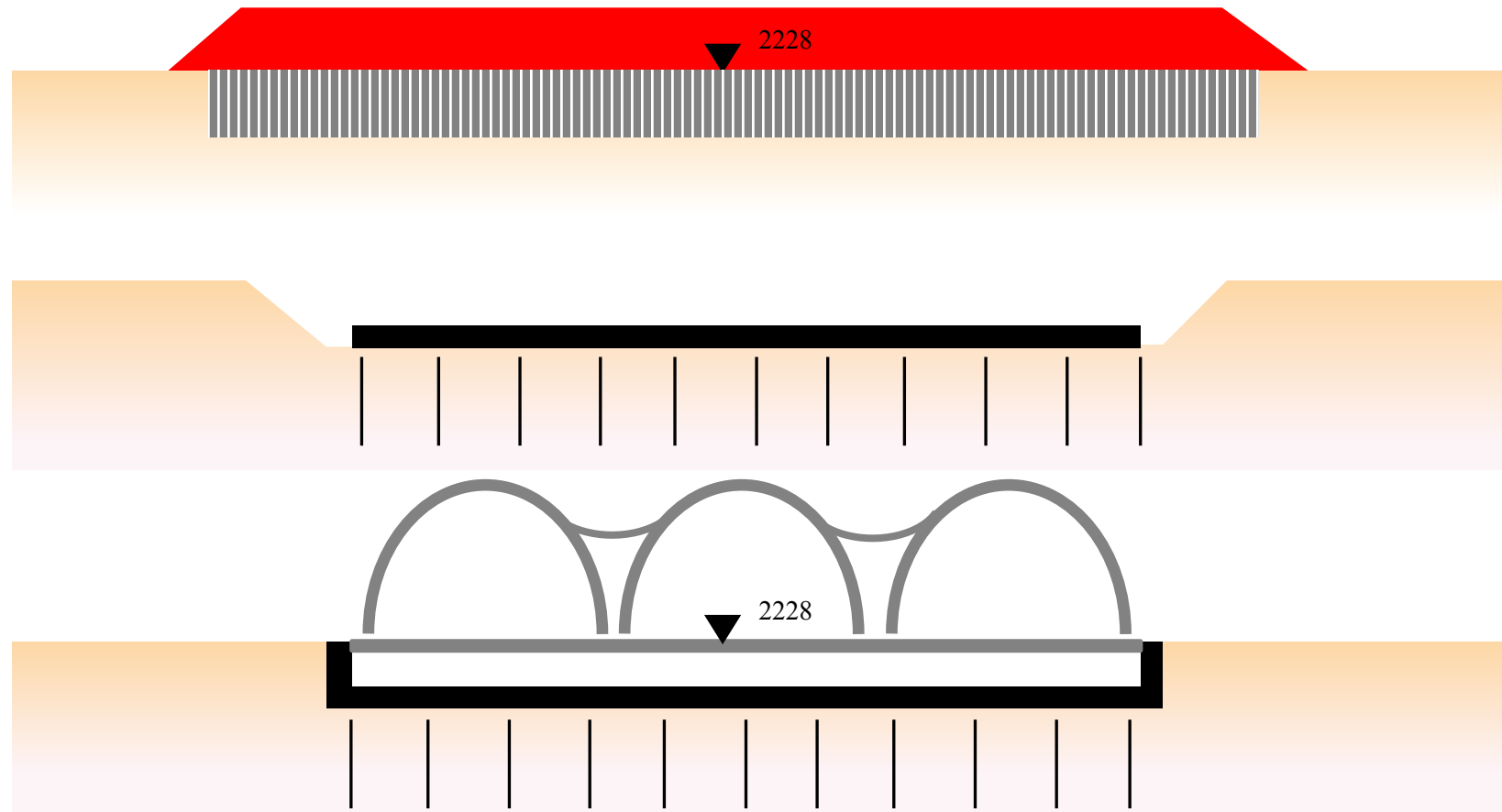
STEP 1  
1 YEAR PRE-LOAD WITH VACUUM DRAINS

**ETAPA 2**  
**EXCAVACIÓN ABIERTA + CONSTRUCCIÓN**

STEP 2  
COMPLETE OPEN EXCAVATION +  
CONSTRUCTION

**ETAPA 3**

STEP 3

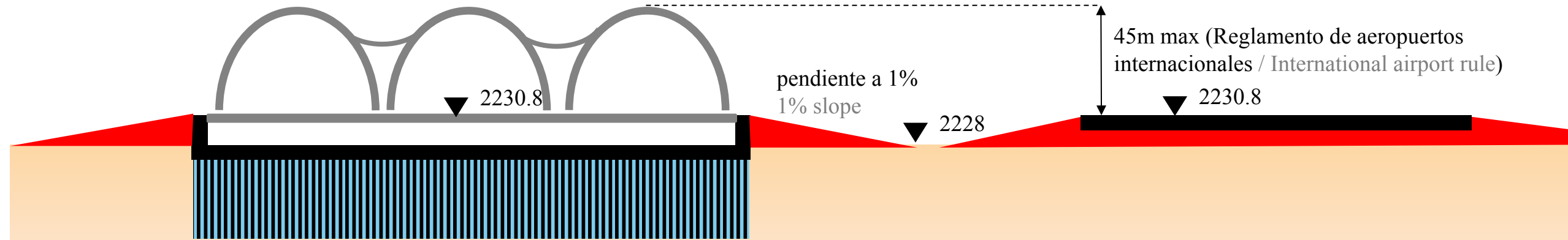


# Opciones de cimentación ET, CTT, Área frontal / Foundation options

## PLAN D

- LOSA CON PILOTES DE FRICCIÓN / PILED RAFT
- EXCAVACIONES ABIERTAS SECUENCIALES / SEQUENTIAL OPEN EXCAVATIONS
- SUELOS NO MEJORADOS / UN-IMPROVED SOILS
- RELLENO EN PLATAFORMAS / APRON FILL

VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (ET) / EXCAVATION VOLUME (PTB) = 1,000,000m<sup>3</sup>  
PILOTES DE FRICCIÓN / FRICTION PILES = 30,000  
VOLUMEN DE RELLENO DE TALUDES / SLOPE FILL VOLUME = 2,000,000m<sup>3</sup>

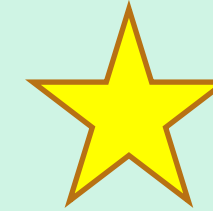


EDIFICIO TERMINAL  
TERMINAL BUILDING

*PISTAS, CALLES DE RODAJE, PLATAFORMAS  
(OTRO DISEÑADOR)  
RUNWAY, TAXIWAYS, APRON  
(BY OTHERS)*



# Síntesis Opciones de cimentación ET, CTT, Área frontal / Summary



## PLAN A

- LOSA COMPENSADA / COMPENSATED RAFT
- EXCAVACIONES ABIERTAS SECUENCIALES /
- SUELOS NO MEJORADOS

VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (ET) = 2,000,000m<sup>3</sup>  
 PILOTES DE FRICCIÓN = 5,200

## PLAN B

- LOSA COMPENSADA / COMPENSATED RAFT
- EXCAVACIONES CON TABLESTACA
- SUELOS NO MEJORADOS

VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (ET) = 1,700,000m<sup>3</sup>  
 PILOTES DE FRICCIÓN = 5,200  
 MURO DE TABLESTACA TEMPORAL = 30,000m

**COSTO CONSTRUCTIVO:** > PLAN A

**PROGRAMA DE TRABAJOS:** > PLAN A

**MANTENIMIENTO:** ~ PLAN A

## PLAN C

- LOSA COMPENSADA / COMPENSATED RAFT
- EXCAVACIONES ABIERTAS CONTINUAS
- SUELOS PRECARGADOS / PRELOADED SOIL

VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (ET) = 1,700,000m<sup>3</sup>  
 PILOTES DE FRICCIÓN = 5,200  
 VOLUMEN DE PRECARGA = 2,000,000m<sup>3</sup>  
 DRENES = 133,000

**COSTO CONSTRUCTIVO:** > PLAN A

**PROGRAMA DE TRABAJOS:** > PLAN A

**MANTENIMIENTO:** ~ PLAN A

## PLAN D

- LOSA CON PILOTES / PILED RAFT
- EXCAVACIONES ABIERTAS SECUENCIALES
- SUELOS NO MEJORADOS
- RELLENO EN PLATAFORMAS

VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (ET) = 1,000,000m<sup>3</sup>  
 PILOTES DE FRICCIÓN = 30,000  
 VOLUMEN DE RELLENO DE TALUDES = 2,000,000m<sup>3</sup>

**COSTO CONSTRUCTIVO:** > PLAN A

**PROGRAMA DE TRABAJOS:** > PLAN A

**MANTENIMIENTO:** > PLAN A

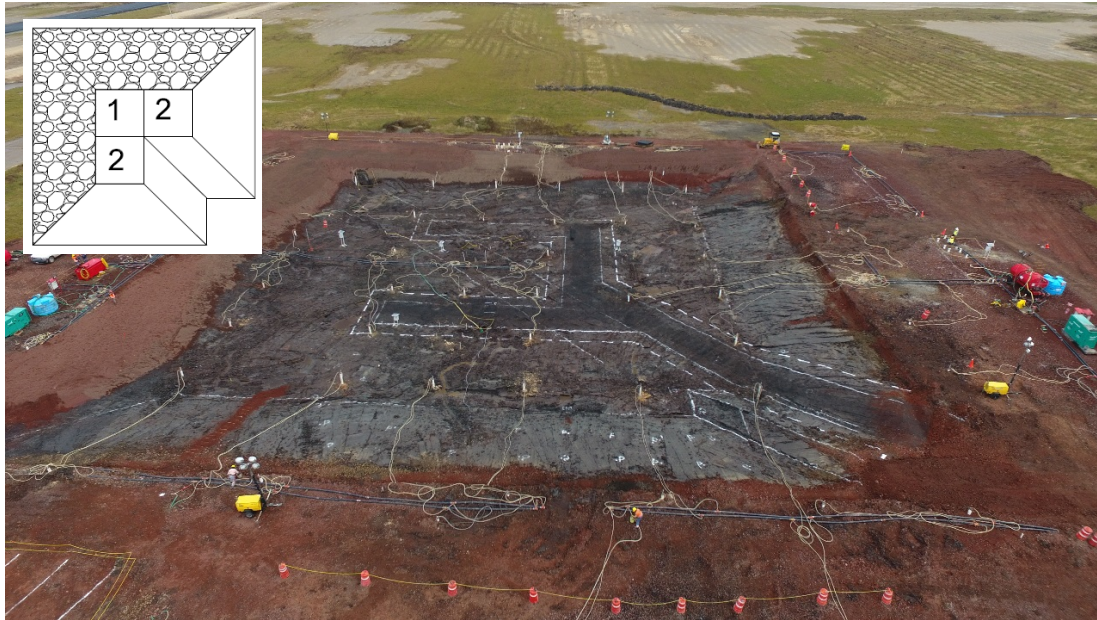
## **3. Pruebas de construcción de losa y pilotes en campo**

3. Excavation and pile pre-contractual tests

# Gestión de incertidumbre geosísmica / Managing the geoseismic uncertainty

## Pruebas previas a construcción : excavación abierta y losas secuenciales de 20x20m

Precontract trials: open excavation and sequential 20x20m rafts



### Valor para el cliente / Value for the Owner

- Acelerar construcción / Speed up construction
- Disminuir costos / Lower overall costs
- Reducir responsabilidad / Liability reduction

### Valor para el diseñador / Value for the designer

- Confirmar resistencia real al esfuerzo cortante / Confirm operational shear strength
- Demostrar viabilidad / Demonstrate feasibility





# Gestión de incertidumbre geosísmica / Managing the geoseismic uncertainty

## Pruebas previas a construcción : excavación abierta y losas secuenciales de 20x20m

Precontract trials: open excavation and sequential 20x20m rafts





# Gestión de incertidumbre geotécnica

## Managing the geo uncertainty

### Pruebas previas a la construcción: pruebas de carga estática en pilotes combinadas con CAPWAP

Pre-contract trials: static pile testing combined with CAPWAP

#### Valor para el diseñador / Value for the designer

- Confirmar capacidad de 9,000 pilotes /  
Confirm 9,000 piles capacity

#### Valor para el cliente / Value for the Owner

- Acelerar construcción (CAPWAP) / Speed up construction (CAPWAP)
- Disminuir costos / Lower overall costs
- Reducir riesgos / Liability reduction



## **4. Fase de construcción. Comportamiento y resultados**

4. Construction phase. Behaviour and results to date

# Cimentaciones Compensadas / Compensated Foundations

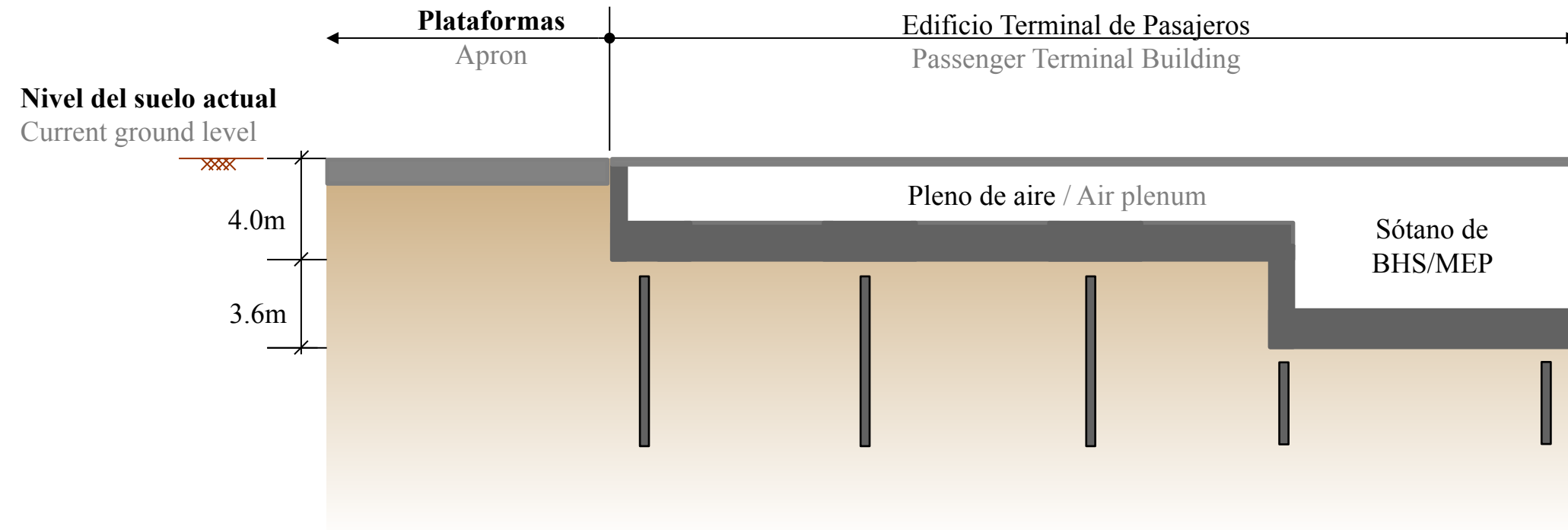
**Suelos Blandos + Subsistencia Regional + Sismos**

Soft Soils + Regional Subsidence + Earthquakes



# ET + CTT + Área Frontal: Cimentaciones Compensadas NAIM

## PTB + GTC + Frontage: NAIM Compensated Rafts

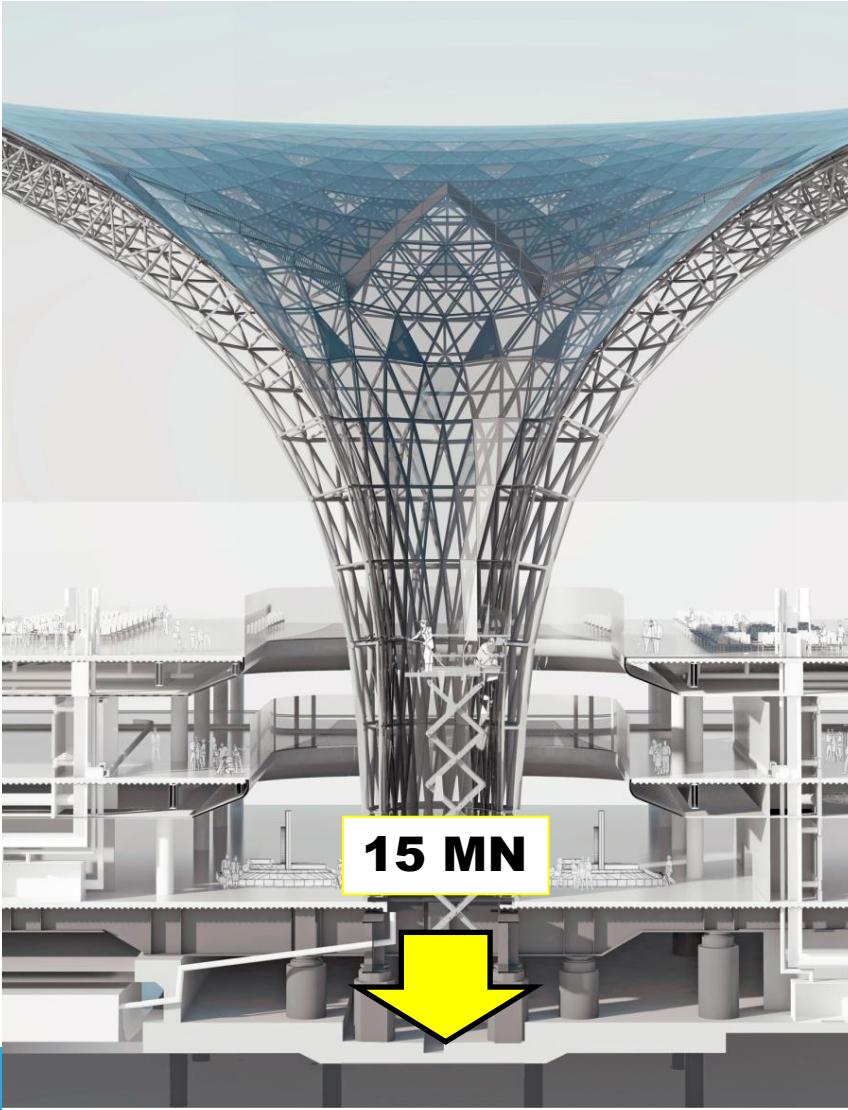




# Cimentaciones Compensada. Redistribución de esfuerzos

Compensated Raft. Stress redistribution

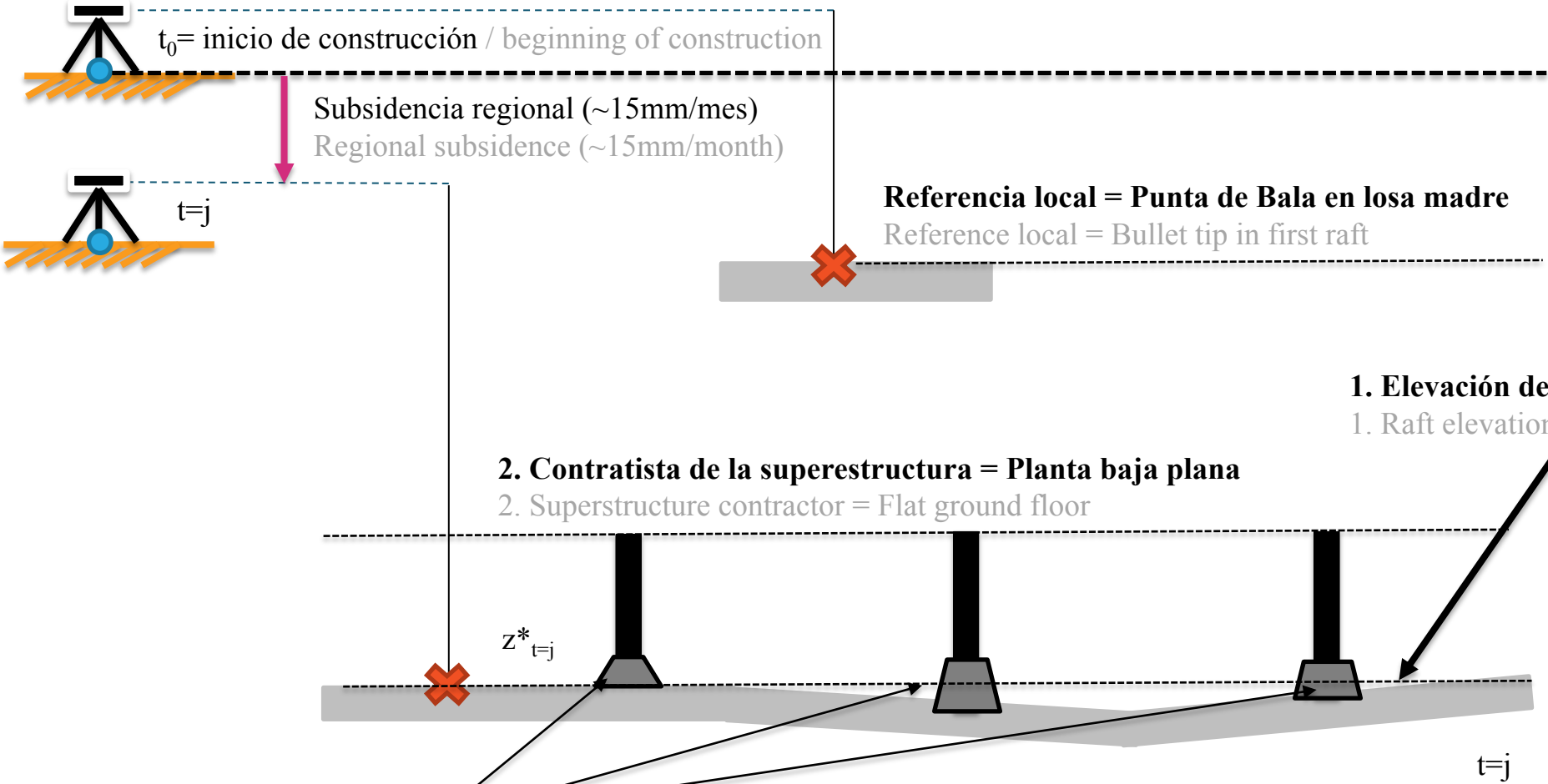
45m





# Monitoreo continuo de elevaciones de losa. Objetivo móvil

Continuous monitoring of raft elevation. Moving target

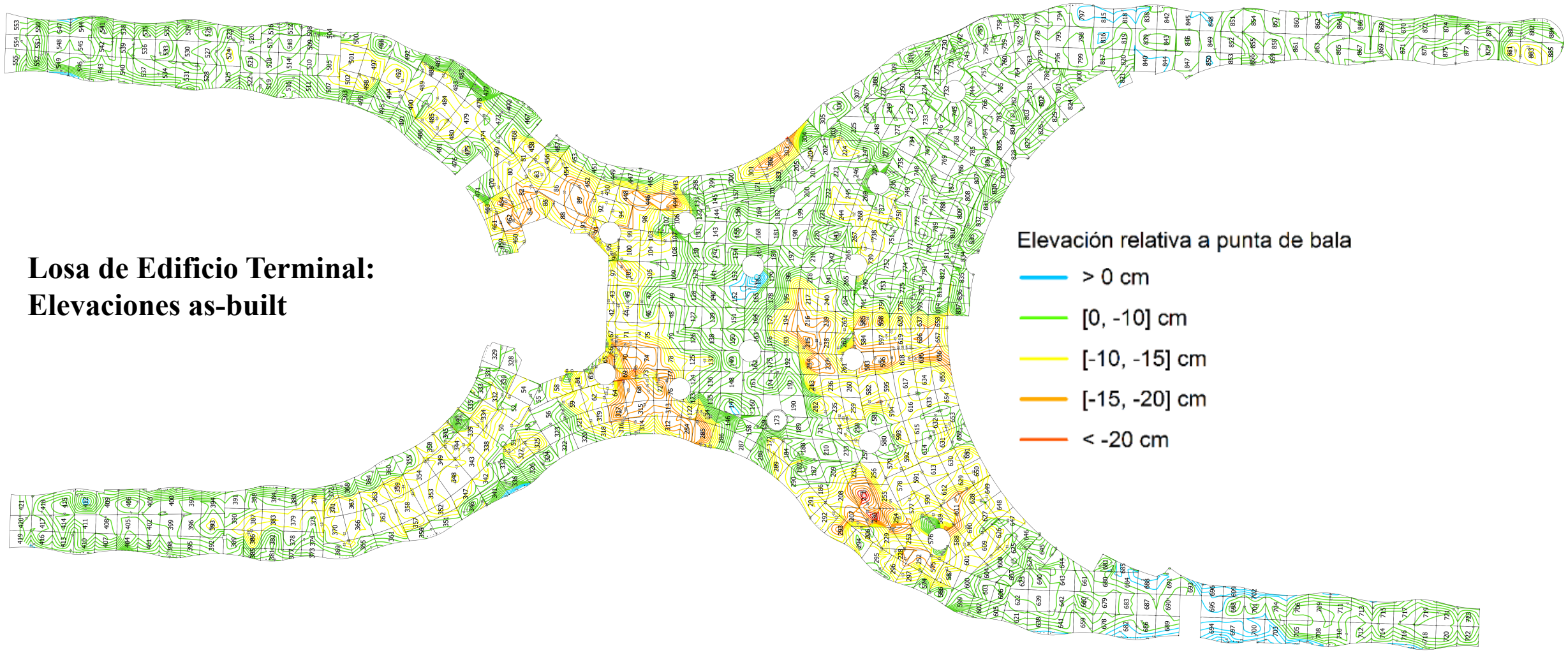


Ajuste de grout / Grout adjustment  
Columnas de  $\neq$  longitud / Columns of  $\neq$  length

# Monitoreo continuo de elevaciones de losa

## Continuous monitoring of raft elevation

### Losa de Edificio Terminal: Elevaciones as-built





# Cimentación compensada de ET. Situación actual

## Current status of PTB compensated foundation



**Masa de la estructura y cimentación del ET en este momento es del orden del 55% del total**  
Current mass of PTB structure and foundation is 55% gross of final weight

# Comportamiento de la cimentación de la TCTA

## ATCT foundation behavior summary



- Péndulo invertido de 90m / 90m tall inverted pendulum
- 65m de diámetro de cimentación vs 9m diámetro torre / 65m foundation diameter vs 9m tower diameter
- Periodo de retorno de 2475 años para eventos sísmicos / 2475yr seismic design period
- Montada sobre 12 aisladores sísmicos / Mounted on 12 seismic isolators



# Cimentación de TCTA: losa mejorada con pilotes

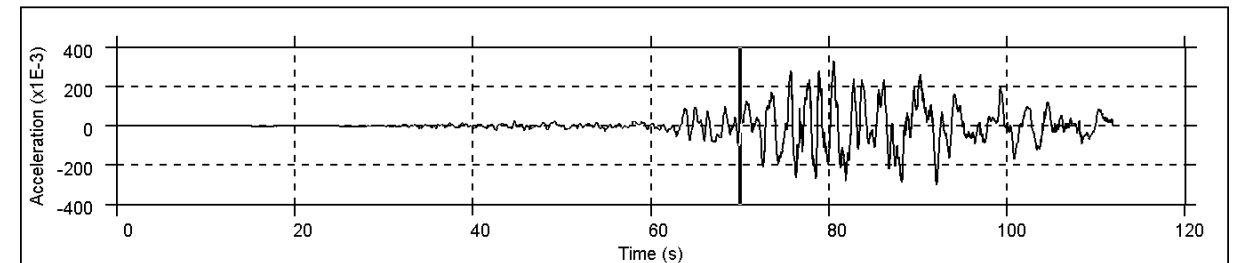
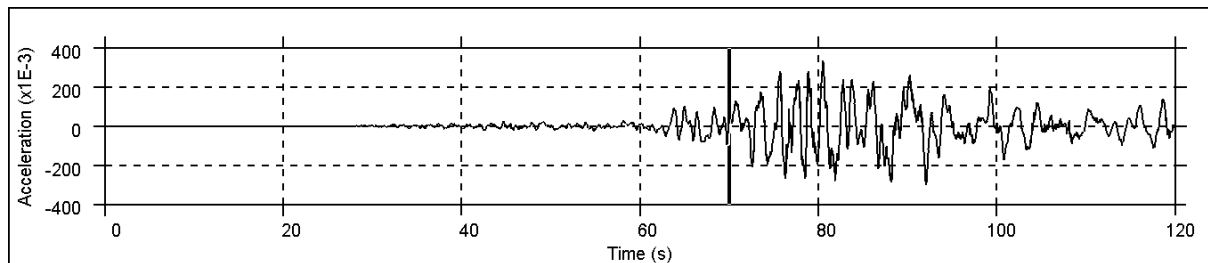
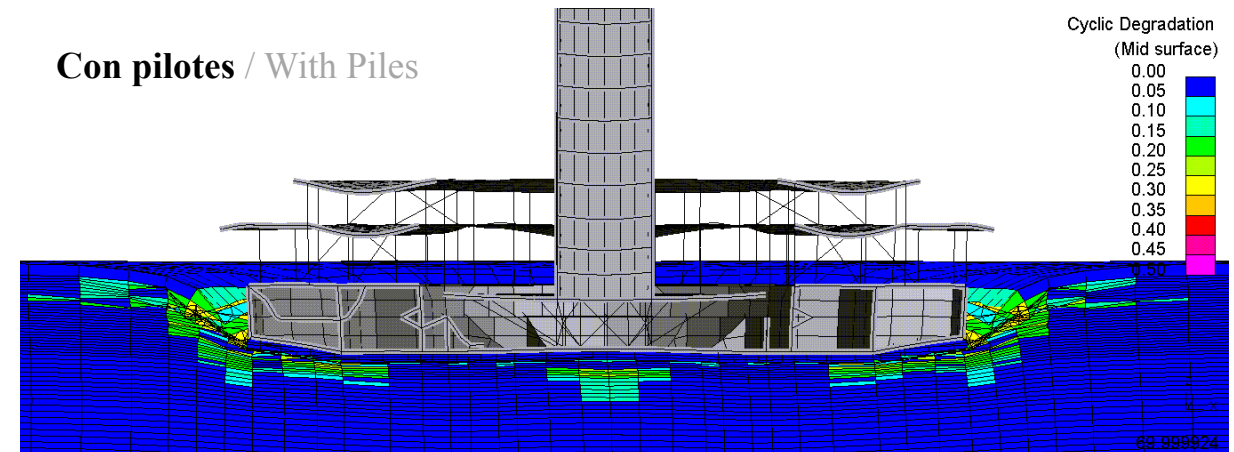
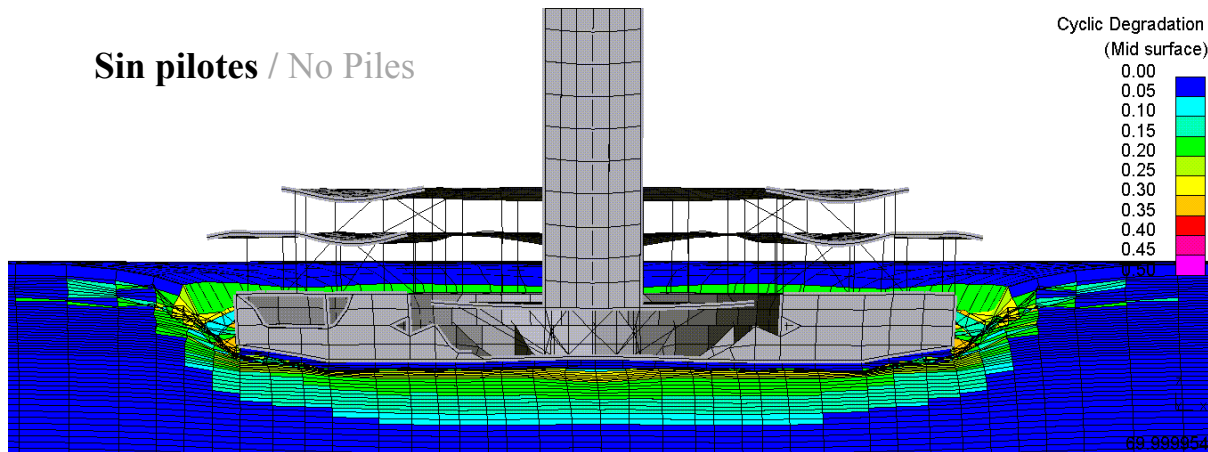
ATCT foundation: pile enhanced raft





# Comportamiento Sísmico Torre de control

## Control Tower Seismic behaviour



**Análisis de elementos finitos 3D para la losa compensada, mejorada con pilotes de fricción, de la Torre de Control**  
3D FE analysis of compensated, pile-enhanced raft foundation of base-isolated Air Traffic Control Tower

*\*Evento con periodo de retorno de 2475 años / 2475 return period event*

# Cimentación de TCTA: asentamientos constructivos

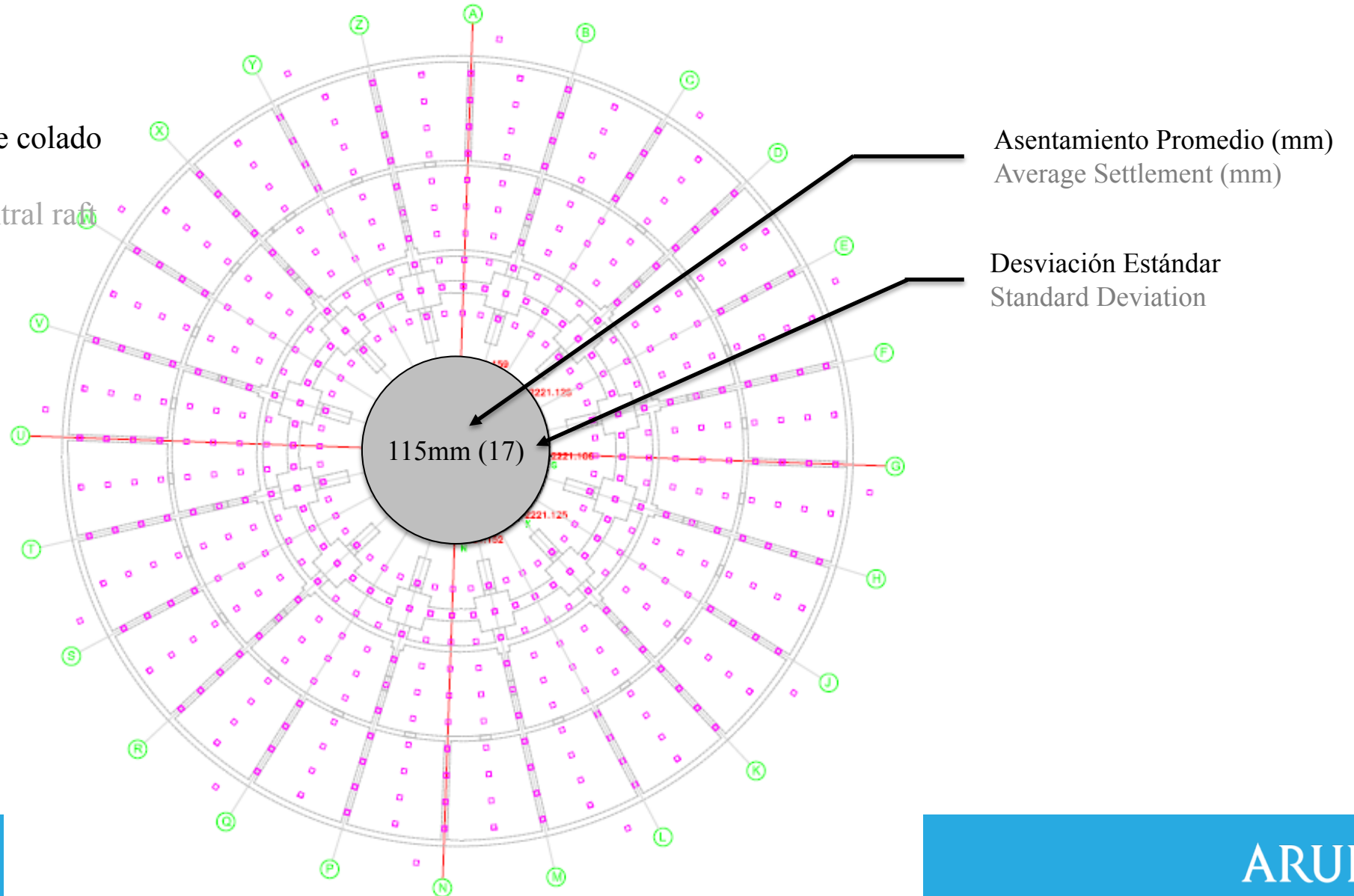
## ATCT foundation: construction settlements

**Día 49**

Fecha: 19/Oct/2017

Asentamientos acumulado desde colado de losa central (día 0)

Cumulative settlement from central raft casting (day 0)



# Cimentación de TCTA: asentamientos constructivos

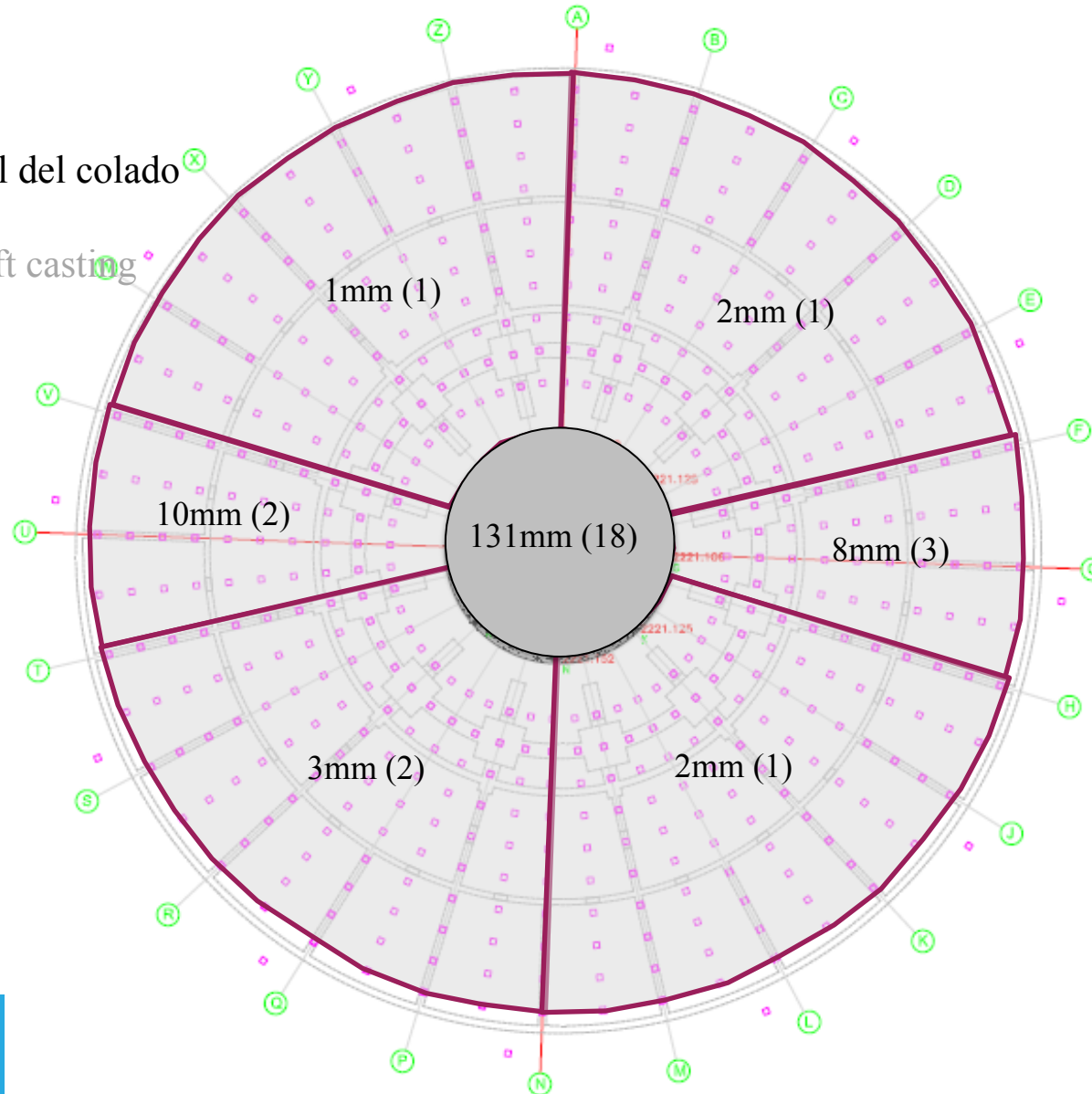
## ATCT foundation: construction settlements

**Día 84**

Fecha: 22/Nov/2017

Asentamiento acumulado al final del colado de losas

Cumulative settlement end of raft casting



# Cimentación de TCTA: asentamientos constructivos

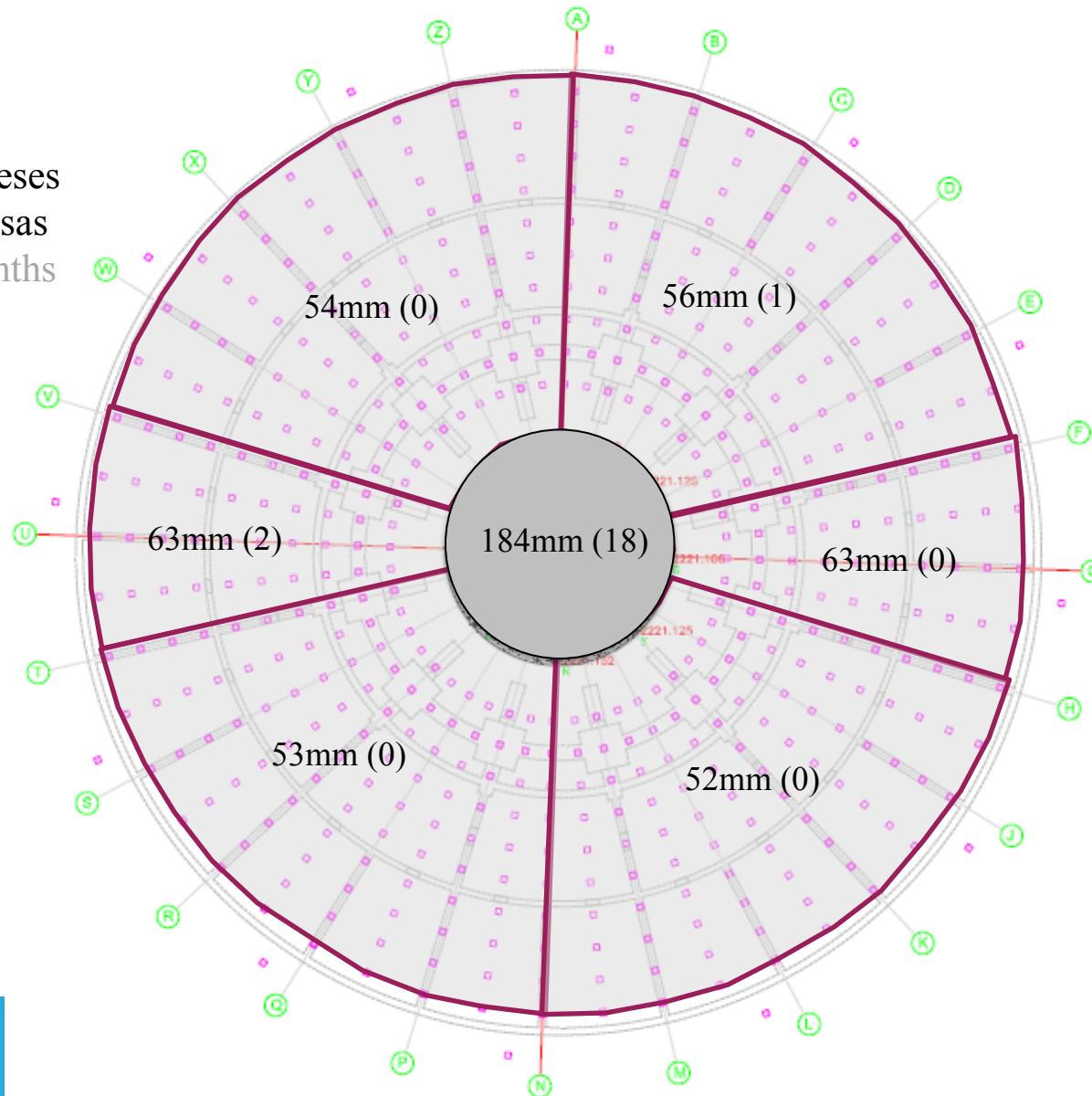
## ATCT foundation: construction settlements

**Día 172**

Fecha: 19/Feb/2018

Asentamiento acumulado tres meses después del final de colado de losas

Cumulative settlement three months after end of raft casting





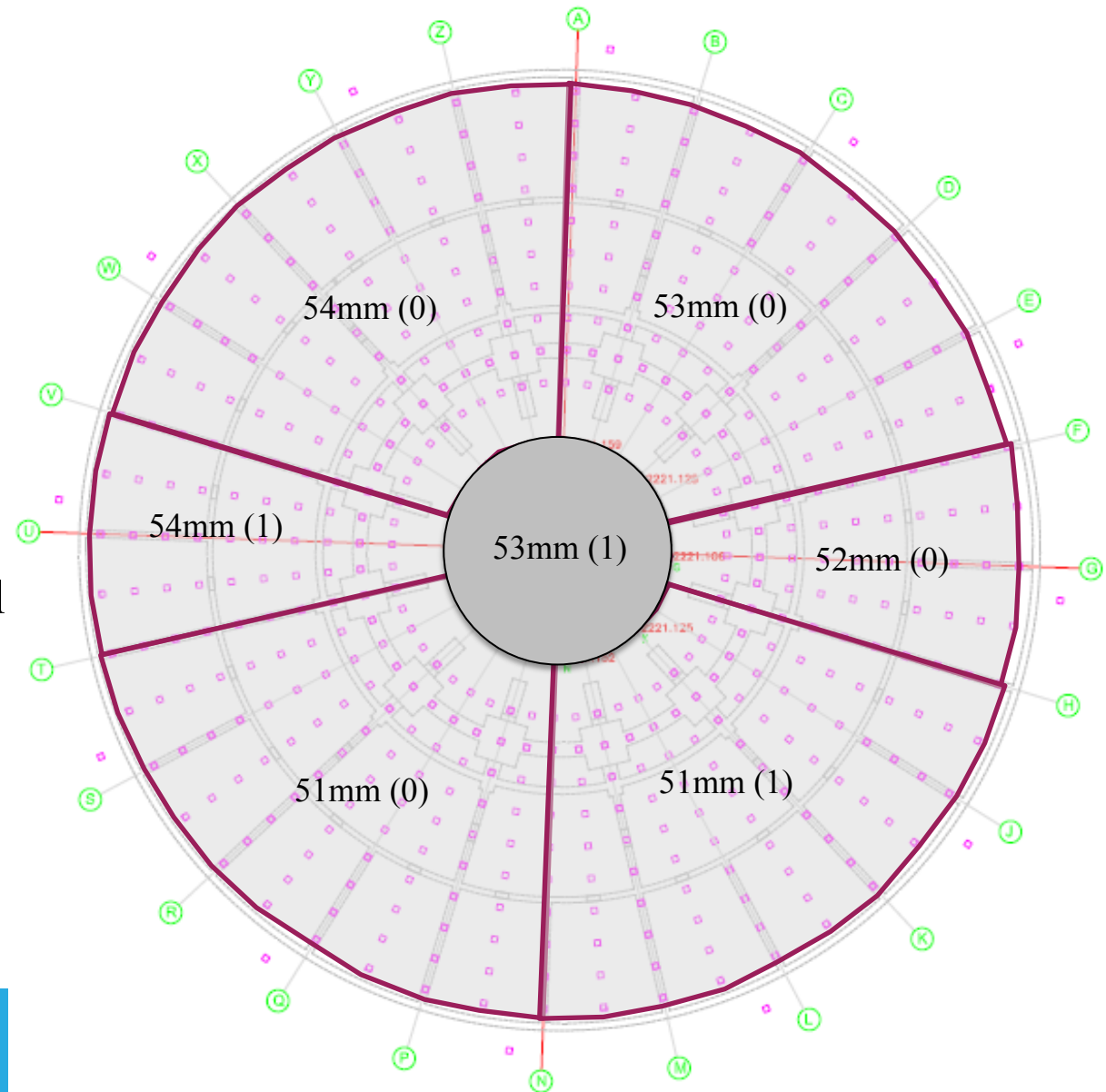
# Cimentación de TCTA: asentamientos constructivos

## ATCT foundation: construction settlements

**Asentamientos de Nov/17 a Feb/18: 90 días tras fin de colado de losa**

Settlement day 84 to day 172: 90 days after completion of all raft cells

- 80% del peso total de la TCTA ejecutado / 80% of Total ATCT weight already placed
- Losa moviéndose con la subsidencia regional / Raft moving with regional subsidence
- No existen movimientos diferenciales / No differential settlements



# Cimentación de TCTA. Situación actual

## Current status of ATCT foundation



**Masa de la estructura y cimentación del TCTA en este momento es del orden del 80% del total**  
Current mass of ATCT structure and foundation is 80% gross of final weight

## Resumen / Summary

- Cuidadosas investigaciones de suelos y trabajos de calibración desde el 2015 han permitido un proceso constructivo seguro y predecible / Careful ground investigation and calibration work since 2015 has enabled a safe and predictable foundation construction process.
- La capacidad de los pilotes se encuentra dentro de nuestras estimaciones / Pile capacities are within our estimates
- Excavaciones de hasta 10m de profundidad en arcillas muy blandas se han realizado de manera segura / Excavations up to 10m depth in very soft clays have been safely completed.
- Los asentamientos registrados en ET, CTT y TCTA han estado dentro de nuestras estimaciones / Settlements of PTB, GTC and ATCT are within our estimates
- Cimentaciones parcialmente construídas se comportaron de acuerdo a las predicciones durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 / Partially built foundations behaved as predicted during 19 September 2017 Puebla earthquake