

# Estudio de silo con modelos acoplados de interacción suelo-estructura

## *Soil-structure interaction in a silo coupled model*

Marta Pérez Escacho<sup>a</sup>, Belén Martínez Bacas<sup>b</sup>, Jose Antonio Barco Herrera<sup>c</sup>,

Carlos J. Bajo Pavía<sup>d</sup>, Davor Šimić<sup>e</sup>, Félix Lorenzo Martín<sup>f</sup>

<sup>a</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Coordinador de Proyectos Área de Estructuras de Obra Civil, Ferrovial Agromán S.A.

<sup>b</sup>Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Coordinador de Proyectos Área Geotecnia Zona II, Ferrovial Agromán S.A.

<sup>c</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Coordinador de Proyectos Área Geotecnia Zona I, Ferrovial Agromán S.A.

<sup>d</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Jefe del Área de Estructuras de Obra Civil, Ferrovial Agromán S.A.

<sup>e</sup>Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Jefe del Área de Geotecnia Zona II, Ferrovial Agromán S.A.

<sup>f</sup>Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, Jefe del Área de Geotecnia Zona I, Ferrovial Agromán S.A.

### RESUMEN

La aplicación de metodologías BIM en la Interacción Suelo-Estructura en fases tempranas de diseño y posterior control de obra se han observado como elemento clave para obtener soluciones globales óptimas. Este artículo muestra el estudio realizado para determinar la respuesta estructural de un silo de grandes dimensiones, cuándo se emplean métodos de cálculo acoplados que además de no requerir de la parametrización auxiliar con módulo de balasto, permiten integrar de forma directa mejoras en el modelo geotécnico con herramientas tipo Hardening Soil, que se observaron más adecuadas a los suelos arcillosos rígidos de la zona.

### ABSTRACT

BIM methodology applied to the Soil-Structure interaction at early stages of design and subsequent control on site have been observed as a key element in order to obtain optimum global solutions. This paper presents the analysis developed to determine the structural response of a large silo, when coupled calculation methods are applied. Working this way, the use of the auxiliary modulus of subgrade reaction is avoided and soil modelling improvements can be integrated directly as it was for this case when using a Hardening Soil constitutive soil model, much more adequate for the firm clay soil located in the area.

**PALABRAS CLAVE:** Silo, Interacción suelo-estructura, modelo acoplado.

**KEYWORDS:** Silo, soil-structure interaction, coupled model

## 1. Introducción

La Interacción Suelo-Estructura presente en cualquier proyecto de construcción, resulta en ocasiones un elemento clave en el diseño. Por ello, la aplicación de metodologías BIM no solo a nivel de plataforma de trabajo, sino como

medio para obtener soluciones integradas surge como una oportunidad para lograr un diseño global óptimo.

El presente artículo muestra el estudio realizado para determinar la respuesta estructural de un Silo de grandes dimensiones, 50 m de diámetro y 50 m de altura, cuando se emplean

métodos de cálculo acoplados, Estructura-Geotecnia, frente al obtenido mediante el empleo de métodos tradicionales de parametrización del suelo en el modelo estructural.

En el caso concreto de este Silo, en fases tempranas de diseño se había observado una respuesta estructural muy condicionada a su interacción con el suelo, y las metodologías convencionales empleando módulo de balasto y modelos tipo Mohr Coulomb introducían incertidumbres que se traducían en una gran diferencia en los resultados al calibrar los modelos mediante diferentes análisis de sensibilidad sobre los módulos de balasto. Se realizaron diversos ajustes de control de los módulos basados en el resultado deformacional observado en los silos en servicio en la zona, y adicionalmente, se decide realizar un estudio empleando una nueva herramienta de cálculo utilizando modelos acoplados, Sap2000-Plaxis3D, que prescindiendo de las convencionales parametrizaciones auxiliares lograba una compatibilidad directa entre modelos.

Con ello se obtuvieron ventajas no solo al reducir las incertidumbres derivadas del trabajo con módulo de balasto, sino que se pudieron integrar de forma directa en el proceso mejoras en el modelo geotécnico con herramientas tipo Hardening Soil, más adecuado para las capas de arenas arcillosas rígidas a muy rígidas de la zona, y se pudo verificar que los resultados tanto deformacionales como a nivel de esfuerzos se correlacionaban en ambos modelos de forma unívoca.

## 2. Descripción general de la estructura

El proyecto consiste en el diseño e implantación de un tercer silo de 70 000 t en unas instalaciones existentes en Olmedo, 66.9 m entre ejes, con el silo inmediatamente anterior.

La estructura del silo se sustenta mediante cimentación directa, resuelta con losa armada de

planta circular de 48 m de diámetro. Su estructura principal de planta cilíndrica consta de muros de hormigón postesado, con diámetro interior de 46 m y una altura de 44.5 m. Ver Figura 1.

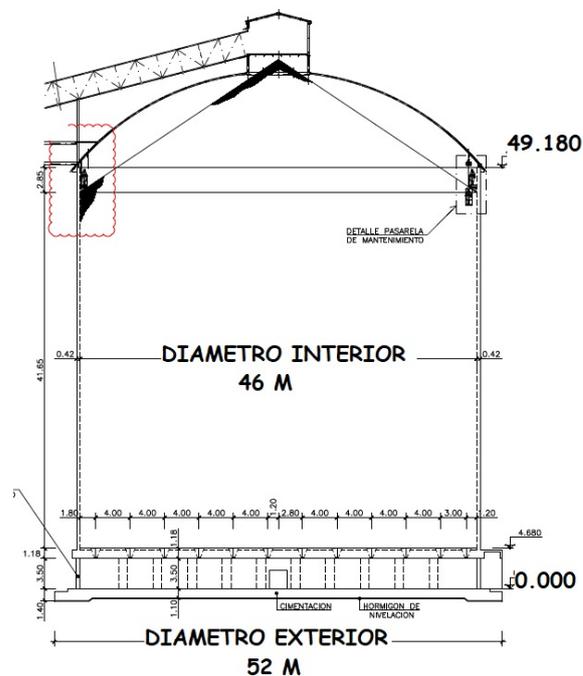


Figura 1. Alzado con las dimensiones principales del silo.

El postesado se ejecuta en el muro perimetral, anclando los tendones en machones equidistantes de eje vertical. Ver Figura 2.

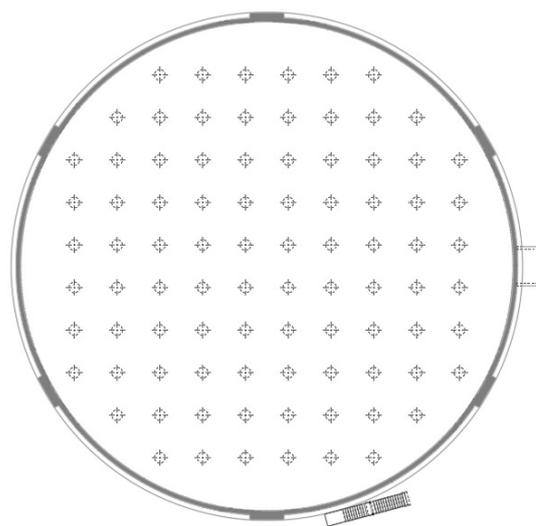


Figura 2. Planta con la disposición de pilares y la ubicación de los machones de postesado.

Sobre la losa de cimentación se dispone una malla ortogonal de 88 pilares separados 4 m

y sobre estos se dispone la losa de forjado de hormigón armado, que sirve de apoyo directo para el almacenamiento del material.

La cubierta se define como una estructura metálica, con cúpula de radio aproximado 30.6 m, constituida por vigas curvas radiales apoyadas sobre la parte superior de la pared y reaccionando sobre el anillo superior de la cubierta. Estas vigas se conectan a través de correas equidistantes. Ver Figura 3.

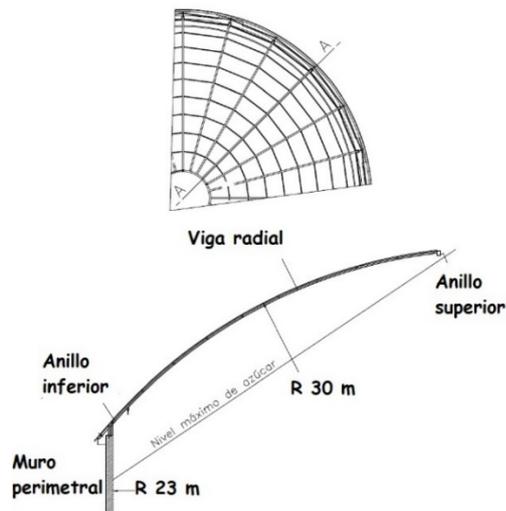


Figura 3. Corte de la cubierta en planta y alzado por viga radial.

En cuanto al procedimiento de ejecución del silo, tras el hormigonado de losa de cimentación, losa de fondo, muro inferior y pilares se procedió al montaje de la cubierta, para su izado durante el hormigonado continuo de los muros principales. La figura 4 muestra imagen tomada durante el izado de los muros.

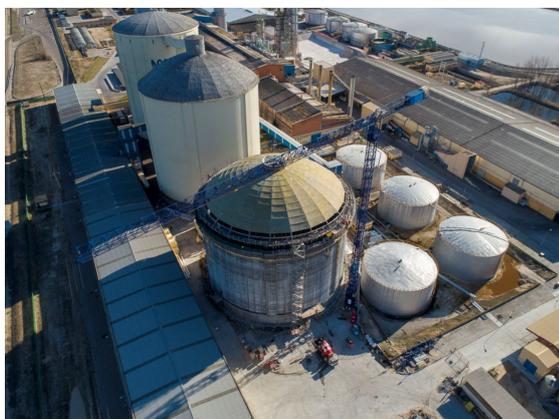


Figura 4. Fase intermedia de izado de los muros.

Una vez se completaron los muros se procedió a las labores de tesado e izado del casetón mediante grúa, así como a completar trabajos de acabados e instalaciones.

Por último, comentar que para el diseño de esta estructura se emplearon Eurocódigos, Instrucción de hormigón estructural EHE08, y la Instrucción de acero estructural EAE-11 entre otras.

### 3. Estado del arte de la situación de diseño en modelos de interacción suelo-estructura

En las últimas décadas, los avances técnicos en materiales, procedimientos y soporte informatizado han orientado al mundo de la ingeniería hacia la especialización. Este posicionamiento técnico, ha permitido alcanzar grandes estándares en todas las áreas de trabajo, pero a su vez ha promovido formatos de trabajo con metodologías y procedimientos cerrados, donde la interacción entre especialidades requiere en muchas ocasiones de elementos de correlación que permitan el ensamblaje del conjunto, y una coordinación eficaz que la dote de sentido y permita el entendimiento del proyecto de forma global.

De este modo, los métodos de cálculo más habituales que abordan la interacción suelo-estructura suelen presentar las siguientes características:

- Equipos de trabajo separados, geotecnia vs. estructura, donde el objetivo último en ambos casos es la parametrización y respuesta aislada de su elemento ante las diferentes acciones a las que puede verse sometido.

- Procesos y metodologías de cálculo independientes, que requieren de la colaboración entre equipos en un proceso iterativo donde interviene directamente la persona y donde la interacción entre suelo y estructura se observa como un condicionante impuesto.

- Procesos que requieren un alto grado de coordinación, donde la gestión de equipos resulta básica para evitar sobrecostes en materiales y/o tiempo, y donde la influencia de los parámetros transicionales de correlación entre áreas puede llegar a influir gravemente en el coste final de las soluciones.

Por otra parte, el siglo XXI nos ofrece una amplia gama de tecnologías y aplicaciones cada vez más potentes. Surgen nuevas herramientas que permiten la producción de modelos cada vez más complejos en capacidad y velocidad de tratamiento de datos, y cada área de trabajo las integra con el objetivo de lograr una mejora de su competencia en el proyecto.

En este sentido, a nivel de proyecto, la convergencia entre la mejora tecnológica y la forma de trabajo con equipos globales, ha dado como resultado la integración en estos procesos tecnológicos de los formatos coordinados. La metodología BIM está trascendiendo de forma natural, generando plataformas donde hay una única solución conjunta y todos los equipos independientemente de su misión y localización física intervienen en el proceso. Los resultados incrementan su solidez, y se minimiza la posibilidad de fallo, con lo que cada vez más las administraciones demandan este tipo de modelos 3D-4D-5D globales. Sin embargo, no siempre se logra la optimización del proceso, y en ocasiones los resultados quedan relegados a la no interferencia. Por lo tanto, lograr una mejora del proceso mediante la búsqueda de soluciones óptimas integradas basadas en una metodología colaborativa ha sido el objetivo fundamental de este trabajo.

#### **4. Metodología de trabajo con modelos acoplados**

Como se introdujo en el apartado anterior, se observó como una oportunidad de mejora del diseño la exploración de nuevas herramientas de cálculo colaborativo orientadas al desarrollo de estructuras con elevada componente de

interacción suelo-estructura y por ello tras un proceso de selección de herramientas compatibles se decide iniciar el análisis empleando modelos acoplados de interacción Plaxis3D y Sap2000, geotecnia y estructuras respectivamente [1, 2].

La mejora objetiva de emplear este tipo de metodología con modelos acoplados radica en la propia gestión interna de la interfaz. Los modelos del suelo y de la estructura, dejan de ser independientes para fundirse mediante una interfaz de acoplamiento iterativo en un único modelo de cálculo que, en el caso de esta estructura situó la interacción a nivel de la base del silo.

A nivel geotécnico requirió el análisis de los resultados de los sondeos y posteriores ensayos in-situ y de laboratorio, con objeto de caracterizar el comportamiento del suelo y la toma de decisiones sobre el mejor modelo mecánico que sería capaz de simular su comportamiento antes, durante y tras la ejecución de la estructura. Sobre esta hipótesis se trabajó con diferentes modelos de suelo, Mohr Coulomb y Hardening Soil, con objeto de comparar resultados que permitieran tras la ejecución y control topográfico en obra la validación de la metodología.

A nivel estructural, se consideraron tanto para la fase de servicio como para la fase de construcción la respuesta del suelo ante las acciones que solicitan la estructura, corto y largo plazo, función de la rigidez del suelo, tanto a nivel de asientos, como de desplazamientos horizontales. En este sentido, esta interacción que hasta la fecha se venía realizando mediante la determinación geotécnica de coeficientes de caracterización aproximados, como son los coeficientes de balasto, se estableció de forma directa gracias a la propia gestión interna que hace de la interfaz de acoplamiento iterativo que, como se ha señalado anteriormente, permite que modelos que se desarrollan en programas de cálculo diferentes pasen a funcionar a todos los efectos como uno solo.

### 3.1 Metodología general

El primer paso para trabajar con modelos acoplados consiste en desarrollar sendos modelos, en sus respectivos softwares de cálculo cuidando de identificar claramente antes del proceso cuáles serán los nodos comunes entre ambos, y las propiedades mecánicas de los elementos que los sustentan, con intención de no duplicar elementos en el proceso, ni generar picos de carga.

El siguiente paso se realiza de forma automática por la herramienta de acoplamiento que identifica los puntos de conexión definidos en el modelo estructural y los aplica en su misma localización sobre el modelo geotécnico.

Para el caso que se presenta en este artículo ambos programas quedaron conectados mediante una batería de puntos previamente seleccionados y ubicados en la losa de cimentación, bajo y entre pilares.

Las ecuaciones de equilibrio entre ambos modelos se resuelven internamente mediante la herramienta de compatibilidad, conociendo las condiciones de contorno y las acciones del

sistema. Los desplazamientos calculados por el software geotécnico se transfieren al estructural para cada nodo conectado. A continuación, el modelo estructural evalúa las reacciones debidas a las deflexiones impuestas y las actualiza en el modelo geotécnico en proceso iterativo hasta convergencia. Ver figura 6.

Las iteraciones se detienen cuando la diferencia entre los desplazamientos de los nodos conectados es menor que un valor objetivo dado que, en el caso concreto de este silo se acordó estuviera en el entorno de 1 mm. Ver figura 5.

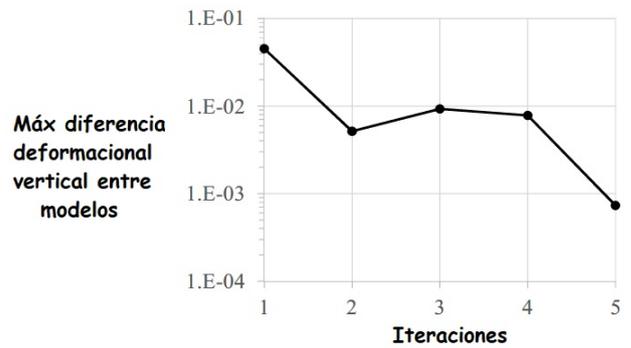
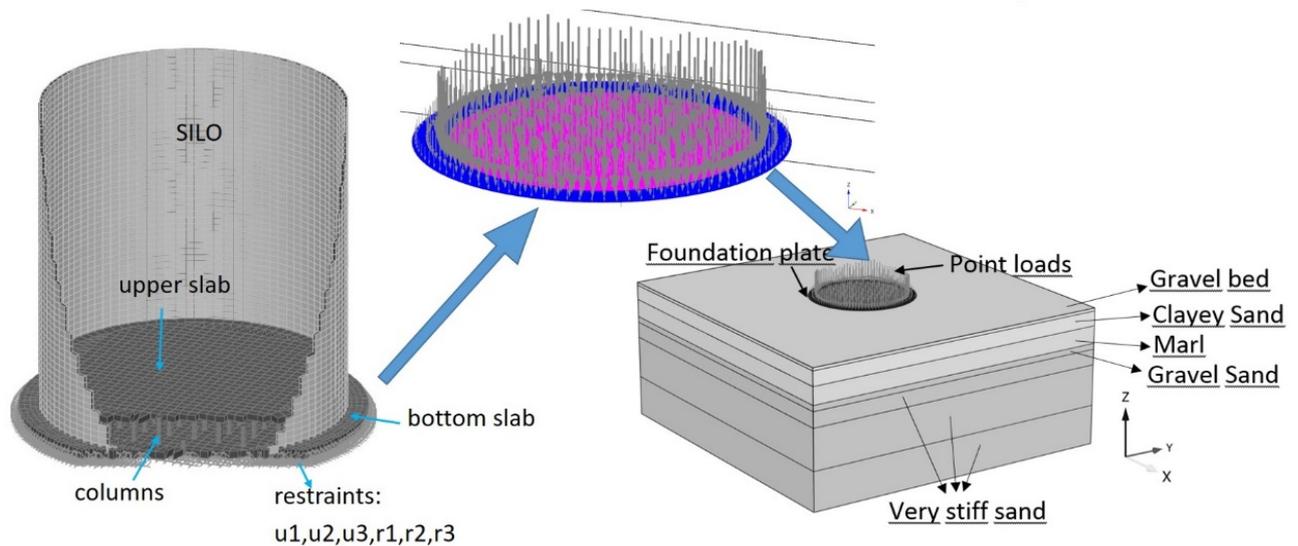


Figura 5. Convergencia deformacional vs. iteraciones realizadas.



### 3.2 Modelado del silo

A continuación, se explica brevemente el proceso de modelado seguido para el análisis del

silo, así como los condicionantes principales considerados en su definición.

### 3.2.1. Modelo estructural

La simulación de la estructura se ha modelado con el software de elementos finitos Sap2000, mediante elementos lámina en muros, de 0.42 m de espesor y losas de espesor 1.0 m la superior y 1.10 m la situada en contacto con el suelo. La conexión entre ambas losas mediante pilares de diámetro 1 m y cuadrícula aproximada de 4x4 m se ha generado mediante barras.

En cuanto a las vinculaciones con el suelo, a una batería de nodos previamente seleccionados de la losa de cimentación, bajo pilares y en puntos intermedios, se les confiere propiedades de transferencia, es decir son identificados claramente como nodos responsables de transferir la respuesta estructural del modelo, reacciones y a su vez asumir los asentamientos observados en el modelo geotécnico simulado en Plaxis3D.

En este sentido se observó que resulta conveniente acordar un número mínimo de puntos de transferencia para que los mallados no sean excesivamente pesados, pero a su vez aporten la información suficiente al modelo.

En cuanto a las cargas adicionales a las deformaciones impuestas introducidas por los nodos de compatibilidad, encontramos el peso propio de la estructura, cargas permanentes, y el material contenido en el interior de la estructura, con un valor de carga vertical aproximado de 300 kN/m<sup>2</sup> y un valor friccionante en las paredes actuando como carga vertical en anillo bajo los muros de 2350 kN/m.

Como comentario adicional para este tipo de estructura con cimentación tipo sándwich, dos losas conectadas por pilares, se observó necesario realizar el modelado completo de la losa de cimentación en el modelo estructural para permitir compatibilizar no solo los nodos bajo pilares, sino también los pertenecientes a la propia losa de cimentación y respetar a su vez la condición de empotramiento de los mismos con los pilares.

### 3.2.1. Modelo geotécnico

La simulación del modelo geotécnico se ha generado con el software de elementos finitos Plaxis3D. Este consiste en una serie de capas de suelo con la caracterización correspondiente al modelo constitutivo seleccionado y a las características del mismo basadas en los ensayos y test de laboratorio, incluyendo adicionalmente un elemento tipo placa para la interfaz de transferencia.

En cuanto al modelo constitutivo, se hizo un análisis de caracterización planteando dos posibles respuestas, modelo tipo: Mohr Coulomb y modelo tipo Hardening Soil. Las respectivas parametrizaciones se incluyen a continuación en tablas. Ver Tablas 1 y 2.

**Tabla 1. Parámetros tipo Mohr Coulomb**

Parámetros	G	CS	M	GS	VSS
$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	21	20	21	21	21
E' (MPa)	100	103	280	144	347
$\nu$	0.33	0.3	0.3	0.3	0.3
$k_0$	1	3.7	1.23	1.13	0.47
$\phi'$ (°)	-	35	25	32	32
$c'$ (kPa)	0	10	15	5	10

**Tabla 2. Parámetros tipo Hardening Soil**

Parámetros	CS	M	GS	VSS
$E_{50}^{\text{ref}}$ (MPa)	103	280	144	347
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ (MPa)	103	280	144	347
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (MPa)	309	840	432	1041
$\nu_{\text{ur}}$	0.2	0.2	0.2	0.2
$m$	0.05	0.05	0.05	0.05
$\phi'$ (°)	35	25	32	32
$c'$ (kPa)	10	15	5	10
$p_{\text{ref}}$ (kPa)	100	150	195	100
$k_0^{\text{sc}}$	0.43	0.57	0.47	0.47
$k_0$	3.7	1.23	1.13	0.47
OCR	20	3	4	1

En cuanto a la estratificación de la zona se simuló, un lecho de gravas (G) de espesor aproximado 1.4 m, sobre una capa de margas (M) de 9 m, y a continuación una capa de arenas

arcillosas (CS) de 9 m de potencia y una última capa de arena con gravas (GS) de 3 m sobre la capa final de arenas muy densas (VSS).

Adicionalmente para completar el análisis y poder comparar los resultados con la metodología convencional que trabaja con módulos de balasto, se muestra el valor que se obtuvo para este parámetro operando en modelo Plaxis 3D con suelo constitutivo tipo Mohr Coulomb. Este valor durante las fases de estudio convencional con análisis de sensibilidad sobre el módulo se varió para considerar rigidización perimetral, pero a efectos comparativos de este estudio se muestra con valor único constante. Ver Figura 7.

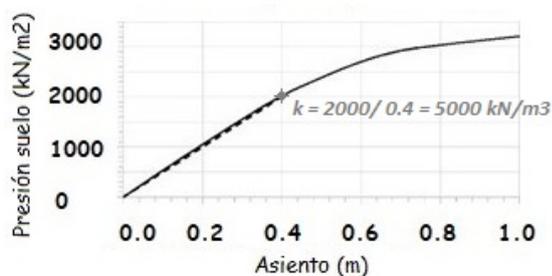


Figura 7. Módulo de balasto auxiliar obtenido en suelo con modelo constitutivo tipo Mohr Coulomb

### 3.2.1. Proceso iterativo

Con ambos modelos, geotécnico y estructural, definidos y caracterizados se procedió a lanzar los cálculos, estableciendo como límite de compatibilidad un valor previamente fijado de 1 mm. Una vez finalizado el proceso, se verificó que todos los asentos/deformaciones impuestas se encontraban por debajo de esa diferencia y a su vez que las reacciones del modelo estructural y las cargas introducidas de forma automática en el modelo de Plaxis3D a través de la red de nudos de transferencia mantenían la correlación requerida.

## 4. Análisis de resultados

Los resultados que se observaron en los modelos analizados, modelo tipo Mohr Coulomb con parametrización auxiliar mediante módulo de balasto, modelo tipo Mohr Coulomb con

metodología acoplada y modelo tipo Hardening Soil, diferían a nivel de esfuerzos y deformaciones. Para ilustrar esto se muestran a continuación los asentos observados según estas tres casuísticas. Ver Figura 8.

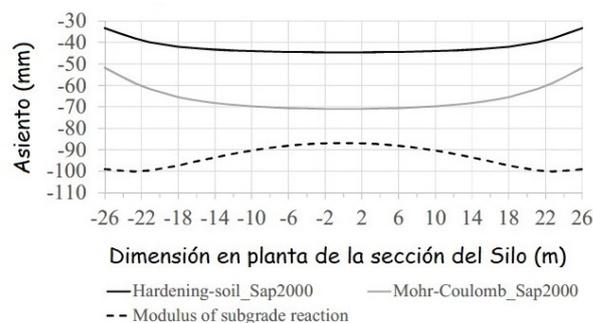


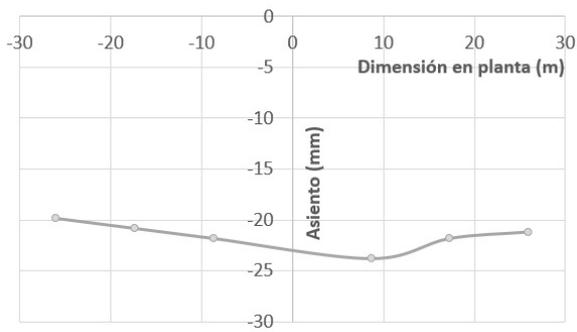
Figura 8. Asientos teóricos observados en los diferentes análisis.

En el caso del análisis con el modelo convencional no acoplado, al no realizarse iteraciones, y tener su origen en un único valor de módulo constante se puede observar claramente una relación lineal entre la carga aplicada y la deformación del suelo, con una geometría de asentos que claramente muestra un hundimiento mucho más acusado bajo los muros debido a la carga de fricción introducida en los mismos.

Sin embargo, los modelos acoplados sí consideran la colaboración del suelo que rodea a la base y en ambos casos, aún a pesar de contener también la carga friccionante, la zona con mayor deformación se observa en centro de losa.

A nivel cuantitativo, entre los modelos acoplados, se observa también una diferencia función del modelo constitutivo considerado, siendo el modelo tipo Hardening Soil el que resulta con un nivel de asentos menor.

Llegado a este punto y antes de entrar en evaluar los resultados de esfuerzos, se presenta a continuación una planta con la ubicación de los hitos de control topográfico de la zona, y gráfica con la medición de asentos tomados en la fase final de llenado a lo largo de dos ejes, concretamente ejes 9-8-33 y 36-37-38. Ver respectivamente Figura 10 para la localización de hitos y Figura 9 para el registro de asentos.

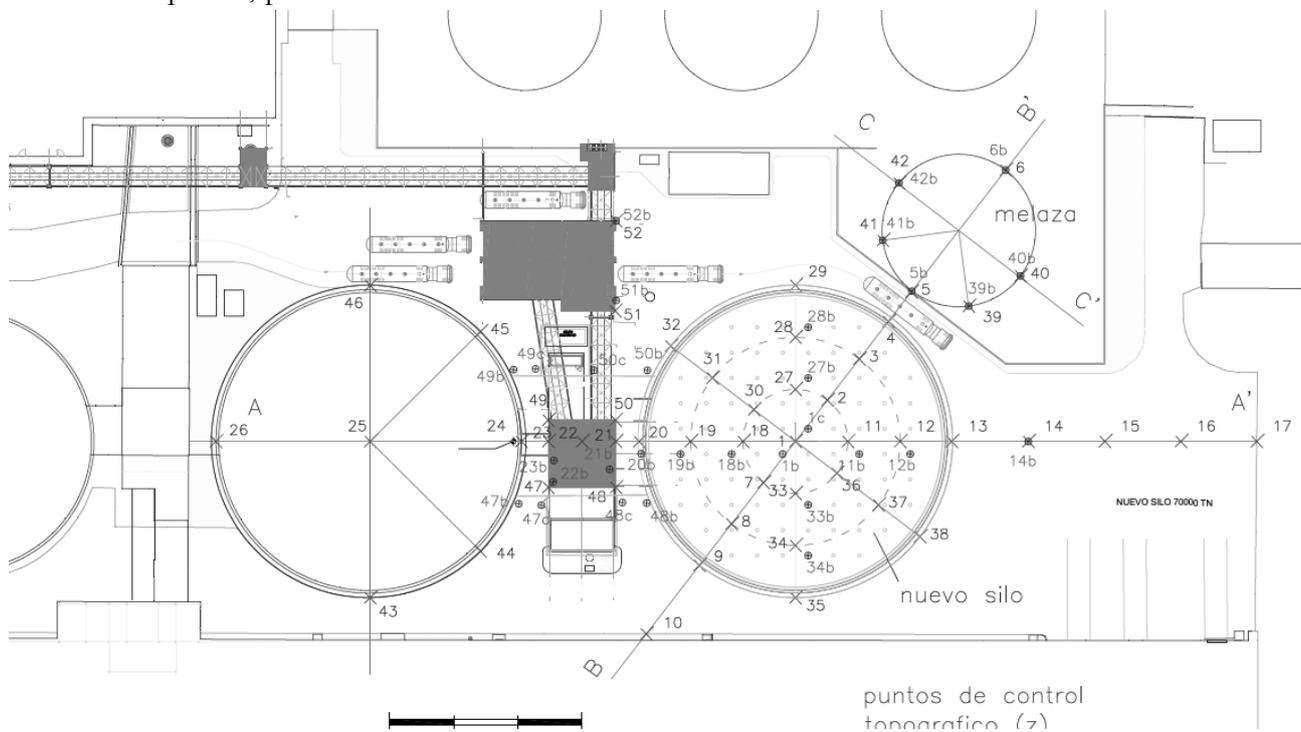


**Figura 9. Registro de asentamientos con carga 68897 t**

En la figura anterior se muestra el efecto de llenado con aproximadamente el 98% del volumen total, pudiendo observarse en la misma una tendencia similar a la generada por los modelos acoplados, pero con un valor absoluto

que extrapolado a la carga máxima de 70 000 t se encontrará por debajo incluso de los modelos tipo Hardening, esperándose en este momento para llenado completo una previsión de asiento no superior a los 2.5 cm.

Resulta interesante comentar también que durante los meses en los que se realizó la toma de datos de control de asentamientos se verificó también la situación deformacional en el silo 2, observándose procesos de deformación positiva y negativa función de los ciclos de carga y descarga en el mismo con valores en el entorno de los 2 a 3 cm.



**Figura 10. Puntos de control topográfico del silo.**

Por último comentar brevemente que, a nivel de esfuerzos en pilares y losas, estos guardan una relación directa con la deformación relativa, observándose resultados muy superiores en el modelo con módulos de balasto uniformes, y resultados menores en los modelos acoplados, con escasa diferencia observable entre ambos.

En cuanto a la influencia de variaciones de la rigidez en la losa de cimentación, se realizó también un estudio para determinar si

modificaciones en su caracterización se observaban relevantes, y se observó una muy baja influencia en los esfuerzos, ya que como se ha señalado anteriormente estos se encontraban determinados por la geometría del asiento y no tanto por la rigidez de este elemento, que por otra parte mostraba una rigidez conjunta en su combinación con la losa de fondo y la malla de pilares.

## 5. Conclusiones

Entre las ventajas observadas del empleo de metodologías BIM de cálculo integrado, el empleo de procedimientos acoplados que permitan no solo eliminar la necesidad de elementos de correlación auxiliares entre modelos estructurales y geotécnicos, sino que faciliten la selección de modelos de suelo más adecuados a las características de las ubicaciones, se ha observado como una mejora del escenario de desarrollo de la ingeniería fundamentalmente en aquellas estructuras con respuesta estructural muy condicionada por su interacción suelo-estructura.

### *Agradecimientos*

Agradecer el trabajo de todos los profesionales que han intervenido en el desarrollo de este estudio, así como en el Proyecto constructivo de este Silo, tanto en las fases de diseño, como de ejecución y posterior control de obra. Entre ellos destacar la labor de Luis Moratinos perteneciente al Área de Carreteras de la Dirección Técnica de Ferrovial Agromán y responsable del control Topográfico de la misma, al equipo de Tecpresa y Editesa, encargados de las labores de tesado y deslizado, y por supuesto a todo el Equipo de Obra de Ferrovial Agromán sin los cuales no hubiera sido posible este proyecto, Javier Gonzalez, Miguel Moledo, Jose Ignacio Gonzalez y Santiago Martín. Por último, agradecer también a Pondio su trabajo en las labores de diseño y validación de la estructura, y al personal de desarrollo e innovación de Plaxis que tan amablemente contestaron a las dudas y modificaciones que se realizaron durante el estudio con los modelos acoplados. A todos vosotros y los que no se citan, pero también estuvieron involucrados en el proyecto, muchas gracias.

### *Referencias*

- [1] Plaxis3D Coupling Tool Manual
- [2] Balazs Moozar, et all, Bacl analysis of

settlements beneath the foundation of a sugar silo by 3D finite element method, Plaxis Bulletin 2016.