



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstrucion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

SANHUEZA, C.; OTEO, C.

Aplicación de dos modelos de cálculo para el diseño de pantallas continuas en el metro de Madrid y
análisis de sus desplazamientos

Revista de la Construcción, vol. 10, núm. 3, diciembre, 2011, pp. 99-109
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127622721010>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Application of two design
procedures and analysis
of displacements of
continuous diaphragm walls
in the Madrid metro*

Aplicación de dos modelos de cálculo para el diseño de pantallas continuas en el metro de Madrid y análisis de sus desplazamientos



Autores

SANHUEZA, C. Pontificia Universidad Católica de Chile

OTEO, C. Universidade da Coruña - España

Fecha de recepción 01/11/2011

Fecha de aceptación 15/11/2011

Resumen

Este artículo presenta los principales resultados de la aplicación de dos modelos de cálculo al diseño de muros pantalla en el metro de Madrid, los cuales corresponden a: Método de reacción del terreno basado en el espacio de Winkler, en el cual se efectúan los cálculos por medio del programa RIDO; y el Método de elementos finitos, a través del programa PLAXIS. Posteriormente, se analizan los movimientos de la pantalla obtenidos de

ambos programas de cálculo y se comparan con los resultados de la instrumentación geotécnica implementada en los muros pantalla de la red de Metronorte, la cual pertenece al Plan de Ampliación y Construcción del Metro de Madrid llevada a cabo durante los años 2003 y 2007. Con los resultados obtenidos se validan los parámetros geotécnicos de los suelos de Madrid propuestos por R. Ortiz y C. Oteo en el año 2003.

Palabras clave: Modelos de cálculo, muro pantalla, desplazamientos.

Abstract

This article presents the results from two design procedures performed on continuous diaphragm walls of the Madrid Metro. The first case is based on a soil reacting on a Winkler space and was implemented in RIDO; the second case is based on the Finite Element method and

was implemented on PLAXIS. Site data was collected at the Metronorte line during the 2003-2007 Metro Extension Project in Madrid, and the results were compared to numerical predictions. This study validated the soil parameters proposed by R. Ortiz and C. Oteo (2003).

Keys words: Calculation models, diaphragm wall, displacements.

Introducción

Muchos estudios se han llevado a cabo a nivel mundial con el objeto de analizar las deformaciones que sufre el terreno al amparo de una excavación, cuyas principales conclusiones han estado enfocadas en estimar el orden de magnitud de los máximos desplazamientos, tanto horizontales como verticales, experimentados por el terreno y la estructura, así como, también, la influencia que han podido tener sobre las edificaciones adyacentes.

Actualmente, se emplean diferentes métodos de cálculo para estimar los movimientos de las estructuras que sostienen las paredes de una excavación, siendo los programas de cálculo basados en elementos finitos los de mayor uso.

La contrastación de las hipótesis planteadas durante la fase de diseño para el cálculo de los movimientos, con los valores reales producidos durante la ejecución de una obra, ha venido a ser posible con la implementación de planes de auscultación y control de movimientos, materializados mediante la instrumentación geotécnica.

Uno de los principales dispositivos de control de desplazamientos horizontales empleados a nivel mundial, lo constituyen los inclinómetros introducidos en las estructuras o en el propio terreno, dependiendo del objeto del estudio.

Dentro de las interrogantes planteadas al momento de contrarrestar los resultados obtenidos de las lecturas efectuadas en terreno a través de los inclinómetros y las hipótesis planteadas durante la fase de proyecto, una de las más importantes la constituye el grado de confianza de los parámetros geotécnicos empleados en la modelación numérica o cálculo.

De esta manera, y de acuerdo a lo expuesto anteriormente, es que el presente artículo ha planteado el aplicar dos modelos de cálculo, uno basado en el método de reacción del terreno mediante el uso del programa RIDO Vs. 4.01; y otro basado en elementos finitos a través del cálculo por medio del Software PLAXIS 2D – Vs. 8.0.

Con los resultados obtenidos de ambas modelaciones, en las cuales se han utilizado muros pantallas pertenecientes a la red de Metronorte de Madrid, se han podido comparar los desplazamientos producidos durante la construcción de estas obras instrumentadas geotécnicamente y validar los parámetros resistentes de los suelos de fundación encontrados en el sector norte de Madrid, mediante un análisis retrospectivo basado en el método observacional (Zimmerer y Schanz, 2006).

Es importante mencionar que el presente artículo corresponde a la continuación de una investigación llevada a cabo entre los años 2004 y 2008, a partir de la cual se han presentado los primeros resultados en otro artículo de esta misma Revista (diciembre de 2009).

Modelos de cálculo para el diseño de pantallas continuas

Actualmente se emplean varios de los métodos de cálculo desarrollados históricamente, tales como: métodos empíricos y métodos basados en modelos teóricos; métodos que consideran el comportamiento en servicio de la estructura (métodos de equilibrio límite); y métodos que consideran el comportamiento de la estructura en el momento de la falla. A partir de los años 70, se incorporan a este grupo los métodos basados en elementos finitos. Todos estos métodos son descritos en otro artículo de los mismos autores (Sanhueza y Oteo, 2007).

De los métodos anteriores, se han seleccionado dos: Método de reacción del terreno basado en el espacio de Winkler, en el cual se efectúan los cálculos por medio del programa RIDO Vs. 4.01; y Método de elementos finitos, a través del programa PLAXIS 2D – Vs. 8.0.

El programa RIDO fue desarrollado en Francia para la construcción de su primera línea subterránea y, actualmente, es un programa de cálculo ampliamente usado.

En este programa, la presión de tierras, que es considerada separadamente sobre cada lado del muro, tiene una ley de reacción de tipo lineal, limitada por las presiones activa y pasiva, comportándose en forma irreversible cuando estos límites son alcanzados (Kastner et al., 1993). La relación entre presión y desplazamiento está dada por el módulo de reacción del terreno K y por una relación de histéresis entre carga y deformación (Masrouri et al., 1995).

El cálculo sigue, fase por fase, la secuencia de trabajos y las condiciones particulares de fuerzas internas debidas al comportamiento irreversible del suelo en algunos casos, junto con la incidencia de los cambios de geometría durante la instalación de elementos de apoyo y cargas adicionales.

El cálculo elastoplástico de los elementos es llevado a cabo sobre un modelo cuyas hipótesis se centran en el espacio de Winkler. Además, el programa realiza una comprobación de la estabilidad global de la estructura,

indicando el valor del empuje pasivo movilizado con respecto al pasivo disponible en cada una de las etapas de cálculo, valor que sirve de referencia para estimar un nivel de seguridad de la obra.

El algoritmo de resolución consiste en una adaptación original del método *PRIMAL-DUAL* aplicado a la programación cuadrática, en la que la energía elástica es una función cuadrática de variables.

Las ventajas del programa es que permite introducir los parámetros K_a , K_p y K_o para casos especiales (método de Culmann); hace diferencias en cuanto al momento de construcción de las sobrecargas en el trasdós de la pantalla y permite variar el módulo de elasticidad en cualquier etapa.

Por otra parte, el avance en los medios computacionales ha permitido la introducción actual de nuevos programas para el cálculo de pantallas, los cuales están basados en métodos de elementos finitos. Estos programas tienen en cuenta la interacción suelo-estructura y proporcionan buenos resultados del comportamiento de la pantalla, teniendo en cuenta el efecto arco que se produce entre la pantalla y el terreno.

Para el caso en estudio se ha utilizado el programa PLAXIS creado en la Universidad de Delft, el cual se basa en elementos finitos bidimensionales que permiten realizar análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos. El programa permite modelar los diferentes componentes del problema mediante un conjunto de elementos discretos, conectados entre sí a través de puntos comunes denominados nodos.

Para efectuar los cálculos se han seleccionado dos modelos de comportamiento: el modelo de Mohr-Coulomb, para obtener una primera aproximación; y el modelo elastoplástico con endurecimiento (*Hardening Soil*). Este modelo considera la rigidez del suelo en forma más precisa que el de Mohr-Coulomb, puesto que el cálculo se basa en tres rigideces diferentes como datos de entrada: la rigidez triaxial en carga, por medio del módulo de deformación secante (E_{50}); la rigidez triaxial en descarga, a través del módulo de deformación de descarga-recarga (E_{ur}); y el módulo de deformación obtenido del edómetro (E_{oed}).

Presentación de los casos estudiados en el metro de Madrid

Las pantallas instrumentadas y cuyos movimientos han sido controlados corresponden a 16 casos 100% operativos que pertenecen al metro de Madrid, concretamente, a la red denominada Metronorte. Esta red

constituye una nueva línea con un total de 15.737 m de longitud, conformada por un total de 11 estaciones construidas con muros pantallas, beneficiando a una población aproximada de 184.000 personas. Las obras han sido iniciadas en octubre del año 2004 y han sido puestas en servicio en la primavera de 2007 (Sanhueza y Oteo, 2009).

El sistema constructivo de estas obras considera, en primer lugar, la ejecución de las pantallas, de espesor 1 m y profundidad variable (entre 20 m y 30 m), y las pilas-pilote. A continuación, se construye la losa de cubierta de espesor aproximado 1,20 m, la cual permite reponer todo lo que existe en superficie, incluyendo el tránsito vehicular. Posteriormente, se realiza la excavación entre pantallas, construyendo a su vez los niveles intermedios de losas y/o estampidores necesarios hasta la ejecución de la contrabóveda, las cuales tienen espesores entre 0,80 m y 1 m.

En la tabla 1 se presenta un resumen de las pantallas estudiadas y los desplazamientos máximos obtenidos al final de la excavación para la losa de contrabóveda (última fase de excavación).

Tabla 1. Resumen de pantallas estudiadas y los movimientos experimentados

Estación	Pantalla	Desplazamiento horizontal máximo medido en campo (mm)
Estación 2	P38	10,22
	P54	5,46
	P65	(0,91 medido en la fase anterior)
Estación 3	P6	4,89
	P15	8,80
	P27	3,78
	P56	7,83
Estación 4	P5	12,67
	P45	14,55
	P52	16,69
Estación 5	P10	23,06
	P21	14,47
	P35	11,28 (medido en la fase anterior)
Estación 6	P8	15,93
	P29	13,84
	P50	9,14

Aplicación de los modelos de cálculo al diseño de las pantallas continuas en el metro de Madrid

En la primera parte de la modelación se ha empleado el programa de cálculo RIDO Vs. 4.01, mientras que en la segunda parte, el programa PLAXIS 2D - Vs. 8.0. Para efectuar los cálculos ha sido necesario establecer determinadas hipótesis, con el fin de efectuar la posterior comparación con los desplazamientos horizontales medidos en campo a través del uso de inclinómetros.

Hipótesis 1: Cálculo de empujes basados en la teoría de Rankine, en la cual se ha considerado, además, que el rozamiento entre pantalla y terreno es nulo ($d/f = 0$).

Esta hipótesis se basa en las recomendaciones efectuadas por Schneebeli en 1974 y en el empleo de la teoría de Rankine en la cual se supone un diseño conservador, en que se tiende a reducir el empuje activo mientras que aumenta el pasivo (Ortuño, 2005).

La ROM 0.5-94 en la tabla 3.7.1 sugiere un valor nulo de rozamiento, para paramentos perfectamente lisos como el caso de las pantallas hormigonadas contra terreno, pero con uso de lodos bentoníticos. Lo cual es corroborado en el Código Técnico de la Edificación Española (CTE, 2006).

En el caso del programa RIDO, esta hipótesis se ha traducido en el empleo de un valor de d/f , tanto para el caso activo como pasivo, de cero. Mientras que en el caso del programa PLAXIS, debido a las condiciones hidrológicas que obligan al empleo de una interfaz, que permita dar ciertas condiciones de impermeabilidad a la pantalla al estar en contacto con el agua, se ha empleado un valor de resistencia de la interfaz equivalente al menor posible que no interfiriese en los procedimientos de cálculo del propio programa. Para ello, se han empleado valores de R_{inter} comprendidos entre 0,05 y 0,1.

Hipótesis 2: Empleo de los parámetros geotécnicos propuestos por los profesores C. Oteo y J. Rodríguez Ortiz en el año 2003 (Sanhueza y Oteo, 2009).

Los parámetros resistentes c' y f' fueron variados dentro de un rango consistente con la naturaleza de dichos materiales. Esta variación ha sido resultado de análisis de sensibilidad en el cual también fueron incluidas las variaciones de la constante de balasto horizontal del terreno y del módulo de deformación. Sin embargo, y de acuerdo a la experiencia de otros autores (Schanz, 1998; Calvello & Finno, 2002, 2004,

2005; Zimmerer & Schanz, 2006; Kastner et al., 2007), la variación del ángulo de rozamiento del terreno en comparación con el resto de los parámetros geotécnicos, ha sido el que mayor influencia ha presentado en los resultados de los análisis de sensibilidad.

Hipótesis 3: Estado de tensiones iniciales del terreno.

Dado que K_0 depende de la historia tectónica del material y de factores como la cementación, diagénesis y expansividad, entre otros (Rodríguez Ortiz, 2000), se han propuesto valores del coeficiente de empuje en reposo en el área de Madrid entre 0,4 y 1,8, correspondiendo los valores inferiores a los rellenos, aluviales y arenas de miga, mientras que los más altos serían aplicables a toscos y peñuelas.

Estudios efectuados por el CEDEX, mediante presómetros autoperforadores en el tosco, revelaron valores de K_0 comprendidos entre 2 y 2,5. Estos datos pueden estar sujetos a discusión debido, fundamentalmente, a que de ser ciertos habrían provocado estados tensionales anormales en muros pantalla.

Investigaciones sobre los sistemas y parámetros geotécnicos de diseño durante la ampliación del metro de Madrid entre 1999 y 2003, sugirieron emplear valores de $K_0 = 0,8$ en materiales terciarios (Oteo et al., 2003).

De esta manera, se han considerado las recomendaciones del profesor C. Oteo para los materiales presentes en la zona en estudio, salvo para el caso de los rellenos antrópicos, en los cuales se ha mantenido la relación propuesta por Jaky en función del ángulo de fricción del material ($K_0 = 1 - \text{sen}f'$).

Hipótesis 4: Cálculo de rigidez en determinadas losas por métodos clásicos para vigas empotradas.

Simulación numérica mediante el programa RIDO Vs. 4.01

De acuerdo a las curvas de desplazamientos horizontales de las pantallas medidas en campo, se ha podido observar que en determinados casos los empujes del terreno sobre la pantalla a la altura de las losas de cubierta, e incluso algunas de vestíbulo, era bastante mayor que lo que podría indicar el cálculo teórico por métodos de equilibrio límite. Esto ha llevado a plantearse la necesidad de reducir o acortar entre 1 y 2 mm el ancho de las losas entre pantallas.

Algunos autores que han estudiado esta situación, como la influencia de la temperatura o la secuencia

de hormigonado seguida durante la construcción de los apoyos (Oteo *et al.*, 1988; Batten & Powrie, 2000; Boone & Crawford, 2000), han concluido que cuando se coloca el hormigón, este ejerce una presión sobre la pantalla menor a la del terreno, con lo cual el apoyo trabaja menos en forma temporal. Por otra parte, al producirse una carga axial residual en la losa y al aumentar la tensión horizontal del terreno debido al peso del hormigón, el apoyo no trabaja al 100% de su capacidad de diseño, pudiendo llegar a valores subestimados del orden del 30% (Boone & Crawford, 2000).

De esta manera, se ha efectuado la modelación con una función especial que ha permitido considerar el acortamiento de la losa, ya sea para simular el efecto de la retracción, o bien, por causas específicas de carácter ingenieril, arquitectónico o constructivo de esta, en la cual la losa no queda en contacto directo con la pantalla.

Una vez ingresados los datos estructurales y geométricos de la pantalla en estudio, se han especificado los materiales presentes en el trasdós de la estructura

junto con sus propiedades geotécnicas y la posición del nivel freático.

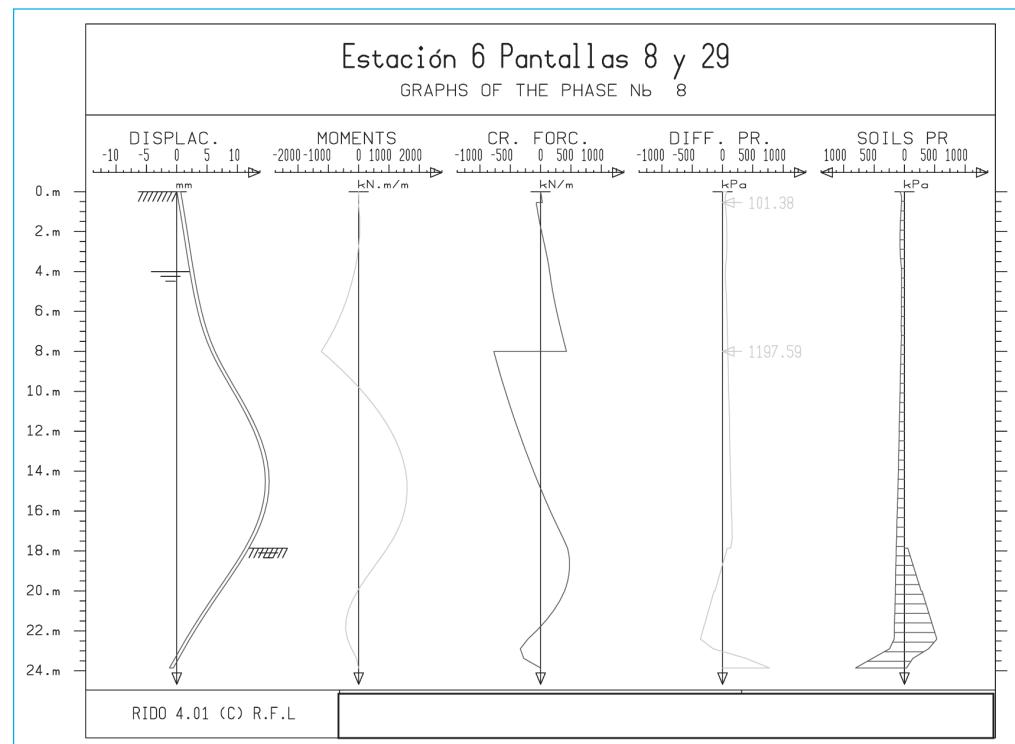
Para el cálculo de la rigidez de los diferentes elementos, se ha considerado un módulo de deformación del hormigón calculado según las recomendaciones del instructivo EHE (2003), con lo cual se ha obtenido un valor de 27.264 MPa para las pantallas y de 28.576 MPa para las losas.

En la figura 1 se presenta la salida gráfica de resultados obtenidos para las pantallas P8-P29 de la Estación 6 de Metronorte.

Simulación Numérica mediante el programa PLAXIS 2D - Vs. 8.0

La simulación de cada uno de los casos estudiados ha considerado, en primer lugar, la definición de las variables de la modelación numérica: modelo de deformación plana con 15 nodos y las condiciones de borde estándar del programa.

Figura 1. Salida gráfica de resultados en el programa RIDO



En cuanto al dimensionamiento de la malla, se han considerado las siguientes recomendaciones: la menor influencia de los bordes sobre el problema en estudio, que no se produzcan puntos de plasticidad cerca de los bordes y que los movimientos próximos a los bordes laterales sean pequeños con respecto a los que se produzcan tanto en la zona excavada como en el trasdós de la pantalla. Esto ha llevado a considerar un modelo cuyo límite inferior, medido a partir del pie de la pantalla, estuviese dado por un rango entre 0,3 L y 0,5 L, siendo L la longitud total de la pantalla. En cuanto al límite lateral, este ha quedado definido a partir del trasdós de la pantalla en 1,5 L (De la Fuente, 2002).

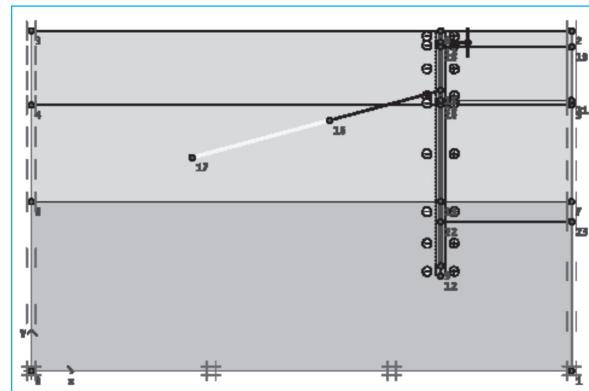
En cuanto a los modelos constitutivos, se han seleccionado dos tipos de comportamiento del terreno: el modelo de Mohr-Coulomb y el modelo de Hardening Soil.

Hipótesis adicionales:

- Relación módulo de deformación y constante de balasto horizontal del terreno, según la formulación propuesta por Vésic para vigas (Rodríguez Ortiz, 1982).
- Valor de dilatancia para suelos granulares equivalente a $\gamma = f' - 30^\circ$ (Bolton, 1986), aplicado tanto en el modelo de Mohr-Coulomb como en el de Hardening Soil.
- En las modelaciones se ha empleado una relación entre módulos igual a $E_{\text{ref}, \text{ur}}^{\text{ref}} = 2 E_{\text{ref}, 50}^{\text{ref}}$; y $E_{\text{ref}, \text{oed}}^{\text{ref}} = E_{\text{ref}, 50}^{\text{ref}}$.

En la figura 2 se presenta el modelo de cálculo para la pantalla P5 de la Estación 4 de Metronorte.

Figura 2. Modelo de cálculo PLAXIS



Comparación de los modelos de cálculo con los resultados de los inclinómetros

En la tabla 2 se presenta un resumen con los desplazamientos horizontales máximos que se han obtenido en cada una de las 16 pantallas analizadas con los dos modelos de cálculo y los resultados de la instrumentación geotécnica.

En la figura 3 se presenta un ejemplo de las gráficas obtenidas y la comparación llevada a cabo entre los máximos desplazamientos horizontales.

Con el fin de validar la simulación numérica de las 16 pantallas de Metronorte y poder establecer un grado de aproximación entre el modelo de cálculo y los valores reales medidos en campo, se han efectuado los gráficos que se ven en las figuras 4 y 5. A partir de ellos, se han podido deducir, con un cierto grado de confianza y mediante un análisis retrospectivo, los parámetros mecánicos y resistentes de los materiales presentes en el trasdós de cada una de las pantallas analizadas.

Tabla 2. Resumen de desplazamientos horizontales máximos obtenidos en terreno y en cada simulación numérica

Desplazamiento horizontal máximo (mm)			
Pantalla	RIDO	PLAXIS	Lectura en terreno
P38	10,06	12,13	10,22
P54 – P65	4,51	8,26	5,46
P6	5,98	9,70	4,89
P15	8,92	15,37	8,80
P27	5,90	11,66	3,78
P56	6,91	15,14	7,83
P5	14,88	19,32	12,67
P45	17,13	21,36	14,55
P52	17,85	22,92	16,69
P10	23,10	19,80	23,06
P21	13,66	13,17	14,47
P35	11,63	14,89	11,28
P8 – P29	14,94	14,53	P8: 15,93 P29: 13,84
P50	12,49	12,96	9,14

Figura 3. Desplazamientos horizontales máximos medidos y simulados en RIDO y PLAXIS. Estación 4, Pantalla P45

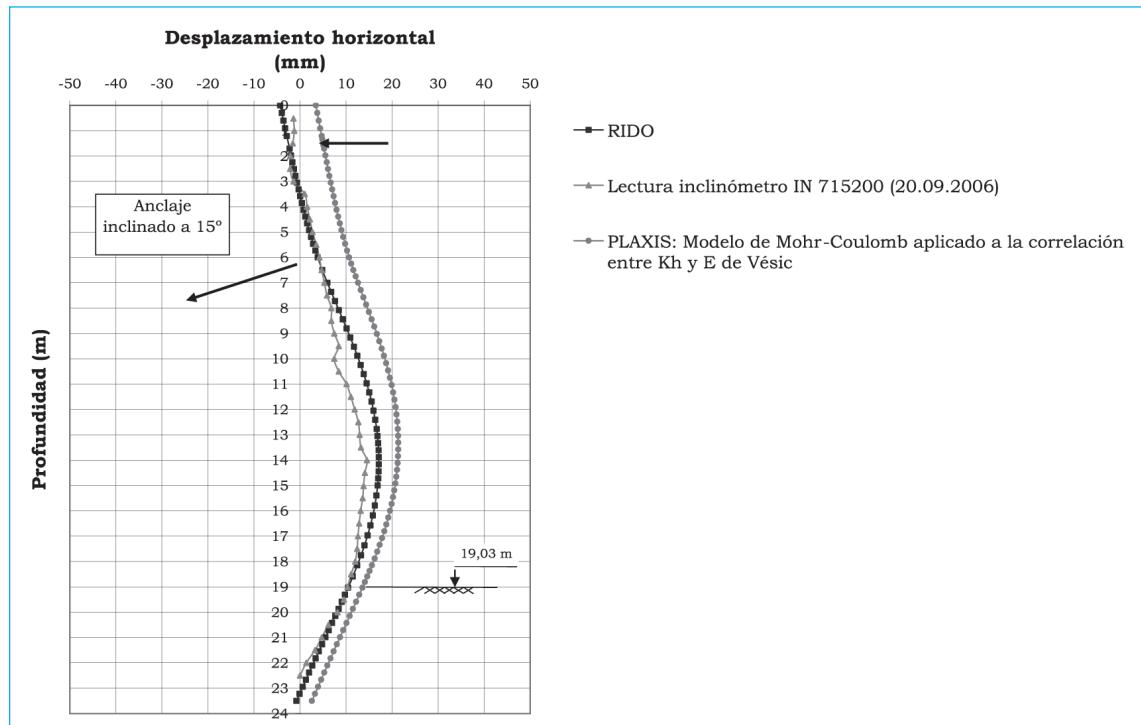
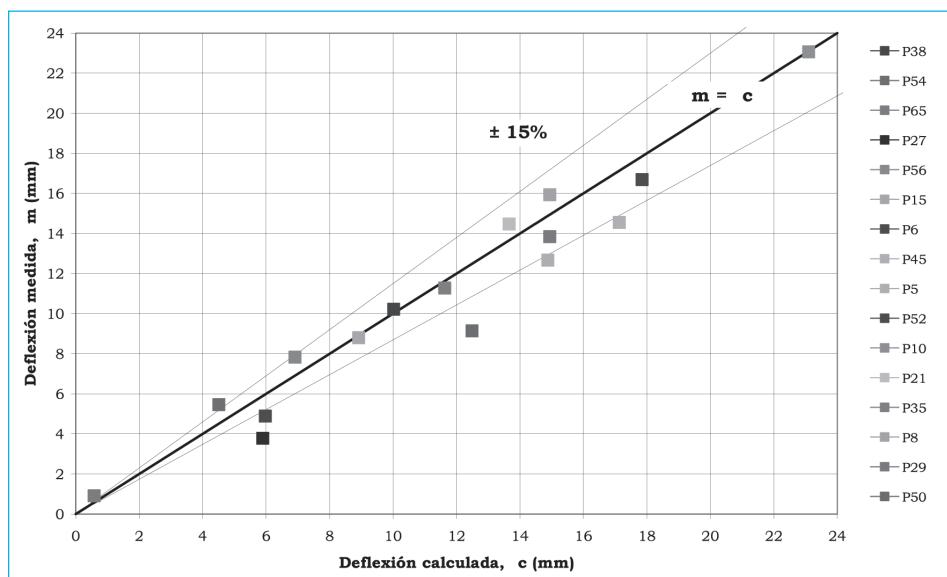


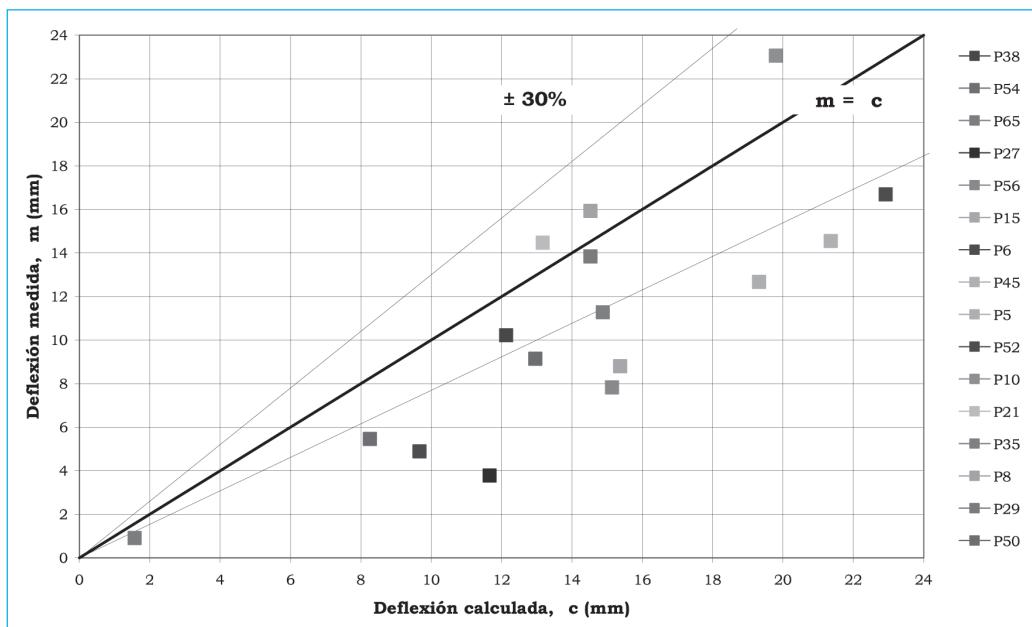
Figura 4. Comparación entre los máximos desplazamientos horizontales medida en campo y los calculados por el modelo teórico del programa RIDO



A partir de la figura 4, se puede observar que existe un grado de aproximación entre lo medido en terreno y calculado por el programa RIDO, en promedio, de un 87%. Mientras que, según lo observado en la figura 5, la diferencia entre los valores calculados en PLAXIS

y los medidos en terreno están, en su mayoría, fuera de la banda de $\pm 30\%$. De esta manera, el grado de aproximación entre el desplazamiento máximo medido y calculado está por debajo del 70%.

Figura 5. Comparación entre los máximos desplazamientos horizontales medidos en campo y los calculados por el modelo teórico del programa PLAXIS



Conclusiones

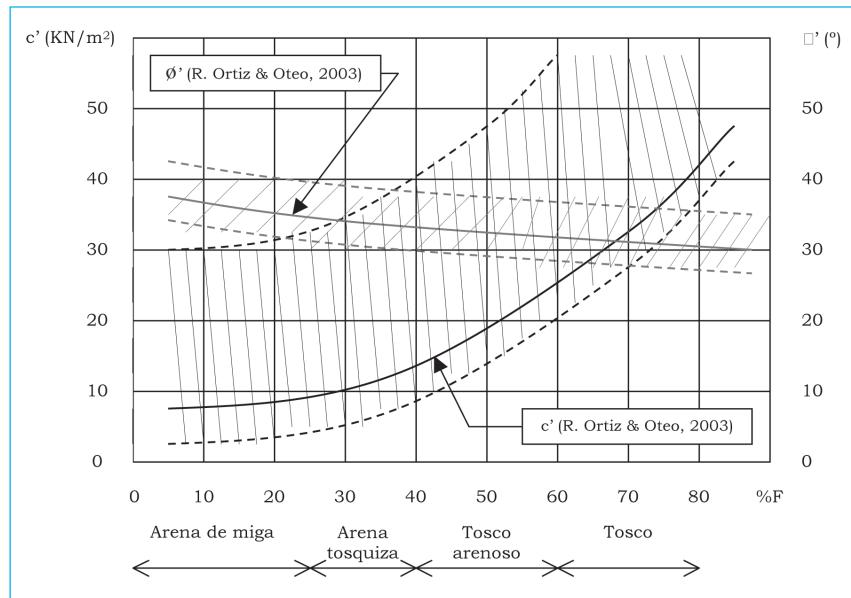
Comparando los resultados obtenidos tras cada una de las simulaciones con los datos de los inclinómetros correspondientes a cada pantalla auscultada, se ha podido deducir que:

- La formulación de Vésic ha sido la que ha presentado la mejor correlación entre K_H y E_{50} , en un 44%.
- En el programa PLAXIS, los modelos de Mohr-Coulomb y Hardening Soil se han adecuado de igual manera al comportamiento de las obras en terreno, es decir, cada uno en un 50% de los casos.
- El grado de aproximación entre los desplazamientos horizontales máximos medidos en terreno y los

simulados con RIDO, ha sido del orden del 87%, mientras que con PLAXIS, por debajo del 70%.

- En la figura 6 se puede observar con línea segmentada el rango de variación de los parámetros mecánicos de los suelos de Madrid, empleados en las distintas modelaciones de las pantallas de Metronorte, junto con los parámetros de los profesores Oteo y Rodríguez Ortiz (2003). Como se puede ver, los valores de f' recomendados vienen a ser los medios o algo inferiores a los que actuarían en la realidad (según la interpretación y ajuste de medidas reales). En cuanto a la cohesión, la variación de c' deducida de valores reales es considerable, estando los valores recomendados por Rodríguez y Oteo del lado inferior, lo que hace que dichas recomendaciones no puedan calificarse de "atrevidas".

Figura 6. Rango de variación de c' y ϕ' empleado en las modelaciones



Referencias bibliográficas

- Bolton, M. D. (1986) "The strength and dilatancy of sands". *Géotechnique* 36, N° 1, 65-78.
- Calvello, M. & Finno, R. J. (2002) "Calibration of soil models by inverse analysis". In. G. N. Pande and S. Pietruszczak (Eds.), Numerical models in Geomechanics NUMOG VIII. A. A. Balkema.
- Calvello, M. & Finno, R. J. (2004) "Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis". *Computer and Geomechanics* 31, 411-425.
- Código Técnico de la Edificación (2006) "Seguridad estructural – Cimentaciones". Documento básico SE-C. Ministerio de Fomento, España.
- De la Fuente, P. (2002) "Reflexiones sobre la simulación numérica de una excavación al amparo de una pantalla". Métodos Numéricos en Ingeniería. Eds. J. M. Goicolea, C. Mota Soares, M. Pastor y G. Bugida. SEMNI, España; 1-15.
- Instructivo EHE (2003) "Instrucción de Hormigón Estructural". 3ª edición.
- Kastner, R & Ferrand, J. (1993) "Performance of a cast in situ retaining wall in a sandy silt". *Retaining structures*, 291-300. London.
- Kastner, R., Dias, D. & Eclaircy-Caudron, S. (2007) "Assessment of soil parameters met during a tunnel excavation. Use of inverse analysis on in situ measurements. Case of Bois de Peu (France)". GSP 173 Advances in Measurement and Modelling of Soil Behavior, ASCE, 1-10.
- Masrouri, F. & Kastner, R. (1995) "Earth pressure on braced flexible walls – Model tests and field investigations". *Underground Construction in Soft Ground*, 135-138. Balkema, Rotterdam.
- Ortuño, L. (2005) "Empujes sobre Muros. Muros Convencionales". Máster en Mecánica del Suelo e Ingeniería de Cimentaciones, CEDEX. Madrid, España.
- Oteo, C., Santacruz, M. y Moya, J.F.(1988) "Comportamiento de pantallas continuas en el metro de Sevilla". *Revista de Ingeniería Civil* N° 65, 45-53.
- Oteo, C.; Rodríguez Ortiz, J. y Melis, M. (2003) "Criterios de diseño de pantallas continuas en la ampliación del

Metro de Madrid". Revista de Ingeniería Civil N° 129, 5-15.

Oteo, C., Rodríguez Ortiz, J. y Mendaña, F. (2003) "Sobre los sistemas y parámetros geotécnicos de diseño en la ampliación del metro de Madrid". Revista de Obras Públicas N° 3.429, 49-67.

Rodríguez Ortiz, J. (1982) "Curso aplicado de cimentaciones". Ed. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 235.

Rodríguez Ortiz, J. (2000) "Propiedades geotécnicas de los suelos de Madrid". Revista de Obras Públicas N° 3.405, 59-84.

ROM 0.5-94 "Recomendaciones Geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias". Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente.

Sanhueza, C. y Oteo, C. (2007) "Estudio comparativo sobre diferentes modelos de cálculo aplicados a la construcción de muros pantalla". Revista de la Construcción N° 1, volumen 6, 13-27.

Sanhueza, C. y Oteo, C. (2008) "Criterios y parámetros de diseño para pantallas continuas en Madrid". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, ETSCCP. España.

Sanhueza, C. y Oteo, C. (2009) "Control de movimientos reales producidos en pantallas continuas en Madrid". Revista de la Construcción N° 2, volumen 8, 72-84.

Schanz, T. (1998) "Zur Modellierung des mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien". Universität Stuttgart: Mitteilung 45 des Instituts für Geotechnik.

Schneebeli, G. (1974) "Muros Pantalla. Técnicas de Realización. Métodos de Cálculo". Ed. Técnicos Asociados.

Zimmerer, M. & Schanz, T. (2006) "Determination of soil parameter for modelling of deep excavations utilizing an inverse approach". International Conference on "Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment. Bochum, Germany, 21-28.