

COMPORTAMIENTO DE UNA PANTALLA VERTICAL DE MICROPILOTES EN GRANADA (ESPAÑA)

Behaviour of a micropile vertical wall in Granada (Spain)

Azucena Botello *

Carlos Oteo **

José Santos ***

RESUMEN – En el presente trabajo se presenta, de forma breve, la construcción de una pantalla vertical con micropilotes, ejecutada a fin de poder realizar una excavación de 20 m de altura para la edificación de un Hospital en Granada. Dicha pantalla fue instrumentada con inclinómetros y el trabajo presenta la interpretación de los resultados y diversas hipótesis sobre las propiedades geotécnicas, la rigidez de la pantalla y de los anclajes, etc., a fin de ajustar los resultados a los cálculos derivados de esas hipótesis. Finalmente se propone una ley de empujes para otros casos futuros y similares.

SYNOPSIS – In the present paper the construction of a vertical wall with micropiles is presented briefly. It was built in order to make a 20 m high excavation for the construction of a Hospital in Granada. This wall was instrumented with inclinometers and the paper presents the interpretation of the results and several hypotheses about the geotechnical properties, the stiffness of the wall and the anchors, etc., in order to adjust the results to the calculations derived from those hypotheses. Finally, an earth pressure law is proposed for future and similar cases.

Palabras Clave – Muro de micropilotes, deformaciones en pantallas, el terreno de Granada.

Keywords – Micropile wall, wall deformations, ground in Granada.

1 – INTRODUCCIÓN

Durante el comienzo de la segunda decena del siglo XXI, se inició la construcción del Hospital de Nuestra Señora de la Salud en Granada. Tras un concurso de ideas sobre el sistema de contención de la excavación que era necesario llevar a cabo, a media ladera, afectando a rellenos antrópicos y a la conocida Formación Alhambra – presente en gran parte de la ciudad – se adjudicó la obra a una solución de muro constituido por micropilotes, con niveles de anclaje cada 2-3 m. Posteriormente, se reforzaba ese conjunto resistente con un forro de hormigón armado. De esa forma la excavación se realizaba de arriba a abajo, pero con la pantalla ya construida, de 20 cm de espesor, cuya contribución destinaba, principalmente, a rigidizar el conjunto de cara a posibles acciones sísmicas.

La construcción de la obra corrió a cargo de Constructora Puerta Monaita, S.L. y la ejecución de las labores de contención (micropilotes, anclajes, etc.) corrió a cargo de la empresa especializada SITE, S. A., que llevó a cabo el diseño de esos elementos, con la colaboración de VALLADARES Ingenieros (proyectista general de la obra) y de COGOLEM Ingeniería (que llevó a cabo algunos análisis con el Código numérico PLAXIS y con el código CYPE para cálculos de pantallas ancladas.

* Dr. Ing. de C. C. y P. Acciona Ingeniería, Madrid, E-mail: azucenapilar.botello.rojas@acciona.com.

** Catedrático de Ingeniería del Terreno. E-mail: carlosoteo@telefonica.net

*** SITESUR, S.L. Granada

2 – BREVE DESCRIPCIÓN DE LA OBRA Y SU INSTRUMENTACIÓN

La pantalla se instrumentó con 4 inclinómetros (introducidos en los tubos de armadura de cuatro micropilotes), a efectos de controlar los desplazamientos horizontales del muro de contención durante las excavaciones pertinentes, a efectos de comprobar la seguridad del conjunto. La instalación de los inclinómetros y su lectura corrió a cargo de la empresa CEMOSA - Centro de Estudios de Materiales y Control de Obra, S.A. (Figura 1).

Desde el principio, gracias a la colaboración con SITE, se permitió a los autores de este trabajo que se pudiera disponer de dichas medidas para su procesamiento e interpretación, de cara a un mejor desarrollo de esta investigación, en el sentido de poder deducir los parámetros del terreno de Granada, a través de medidas del comportamiento de micropilotes trabajando a flexión. La mayor parte de lo que aquí se presenta se basa en Botello (2015).

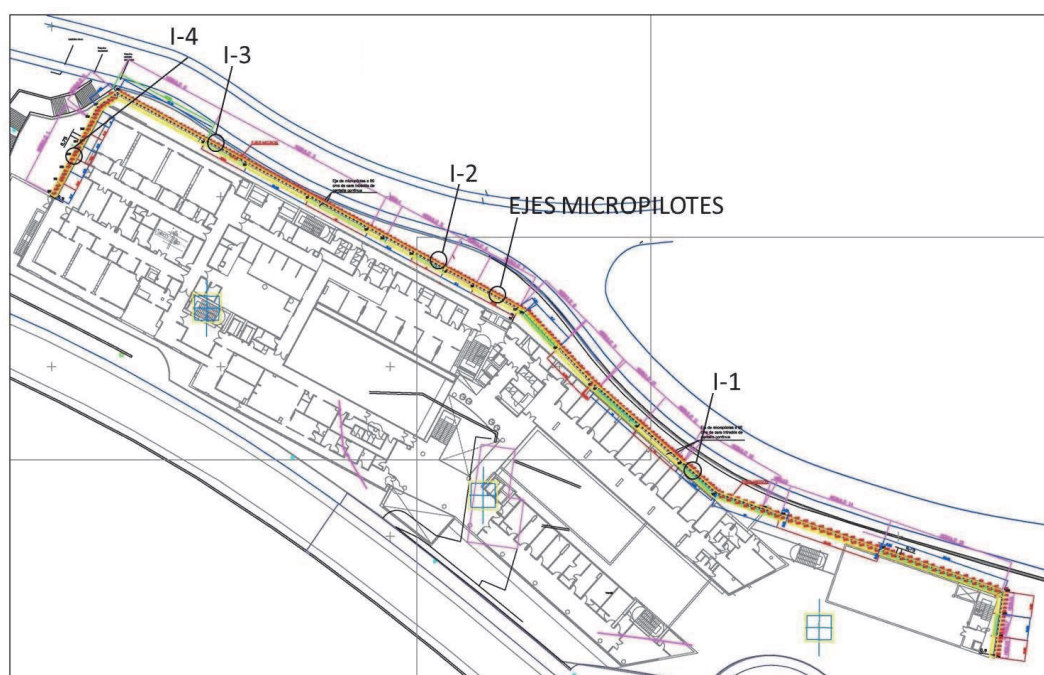


Fig. 1 – Planta de la pantalla de micros y de la situación de los inclinómetros I-1 a I-4

Los micropilotes, con el terreno de la Formación Alhambra, pueden verse en la Figura 2, en el momento en que se descubrieron para instalar el forro de hormigón.

En la Figura 3 pueden verse detalles del anclaje de barra utilizado y de la placa de anclaje y en la Figura 4 una máquina perforando el taladro para instalar un anclaje. Por último, en la Figura 5 puede verse la pantalla de micropilotes con todos los niveles de anclajes ejecutados.

En la Figura 6, se ha esquematizado la pantalla construida y la posición de los siete niveles de anclajes que se dispusieron. En la parte superior las filas de anclajes distan 3,0 m entre sí, llegando a acortarse esta distancia en la parte inferior hasta 1,0 m. La máxima excavación (considerando el trasdós de la pantalla) fue de 20,0 m.

Los micropilotes, de diámetro de perforación 180 mm, tienen las siguientes características mecánicas:

- E.A. = 3.529.679 kN/ml (inyectados).
- E.I. = 11.454 kN/m²/ml.

siendo E = el módulo de deformación del acero; A = sección transversal; I = momento de inercia.

Los anclajes fueron de barra, de $\varnothing$ 63 mm, con inclinación de 20° , con una longitud del orden de 25,0 m y separados del orden de 3,0 m en una misma fila, con 900 kN de capacidad. El bulbo sellado es del 30% de la longitud del anclaje. Para el cálculo se considera que gran parte del anclaje está libre y se puede acortar en un 70% de su longitud.

Si se considera trabajando el conjunto de micros y del forro de hormigón armado, el parámetro de rigidez a flexión, EI , aumenta del orden de un 100%. Sin embargo cuando se excava, en escalones de unos 4,0 m, no actúa el forro, por lo que se puede considerar (del lado de la seguridad) que éste actúa de forma secundaria y no introduciendo su efecto, en una primera aproximación.



Fig. 2 – Aspecto de la pantalla de micropilotes en un tramo en que se limpió el terreno para construir el forro exterior



Fig. 3 – Detalle de anclaje de barra y placa de anclaje



Fig. 4 – Máquina perforando el taladro para instalar un anclaje



Fig. 5 – Pantalla de micropilotes con todos los niveles de anclajes ejecutados

En estos análisis se ha tenido en cuenta la colaboración de la lechada alrededor de los micropilotes. Pero dada la cementación de la Formación Alhambra, solo se ha considerado un anillo de vez y medio el diámetro nominal del micropilote.

Para controlar los movimientos, se instalaron dentro de la pantalla cuatro inclinómetros (I-1 a I-4, Figura 1) hasta 25 m de profundidad (5 m por debajo del máximo nivel de excavación), dada la importancia de la excavación, el no conocerse con detalle los parámetros geotécnicos, etc. No se instrumentaron los anclajes.

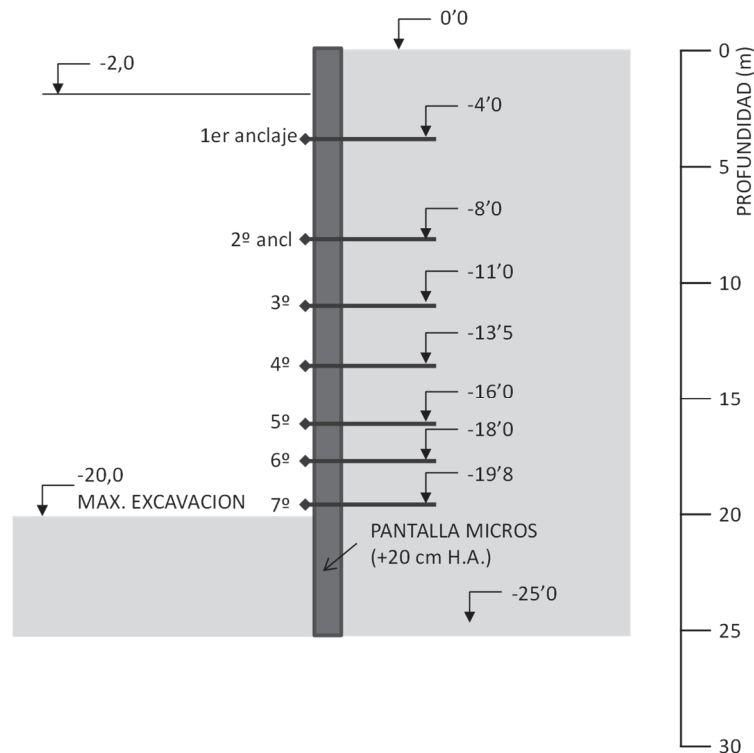


Fig. 6 – Croquis de la pantalla de micropilotes realizada en el Hospital de Granada

3 – MARCO GEOMECÁNICO

Según el Proyecto inicial, el corte geotécnico medio suponía la presencia de:

- Rellenos antrópicos flojos en la parte superior, cuyo espesor se consideró igual a 2,5 m, y así se ha supuesto en la mayoría de los casos analizados. En otros puntos de Granada (Metro Ligero) se ha llegado a 4,60 m.
- La Formación Alhambra, típica de Granada. Esta formación viene a representar un conjunto de materiales areno-arcillosos cementados, con presencia de niveles de gravas cementadas. Incluye gravas finas a gruesas, con intercalaciones de gravas arenosas y arenas limosas, de espesor decimétrico a métrico. No llega a ser una roca conglomerática, pero sí es un suelo bastante cementado, que admite cortes en vertical de diversos metros, sin problemas. Su potencia puede llegar a 250 m. El grado de cementación puede ser variable, de un punto a otro de Granada y/o en vertical. Su nombre deriva del hecho de estar instalado el Conjunto Monumental de la Alhambra y El Generalife sobre este material. A veces, se producen caídas de “chinos” (gravas) en taludes excavados en este material.

Dada la dificultad de tomar muestras realmente intactas o inalteradas en un suelo cementado como la Formación Alhambra, se realizaron nada más que tres sondeos mecánicos para esta obra, a fin de conocer el espesor de rellenos y, aproximadamente, el grado de cementación.

La interpretación de las medidas del Metro Ligero de Granada fueron realizadas por dos autores – bajo la supervisión de uno de los autores de este trabajo – y los valores deducidos para los

parámetros de cohesión, c' , ángulo de rozamiento interno, ϕ' y el coeficiente de reacción lateral, K_H , son relativamente similares, pero diferentes de los adoptados para el Proyecto de la obra en cuestión, redactado con anterioridad a la información procedente del Metro Ligerero. En la Tabla 1 se reproducen estos datos. Como se ve, los parámetros geotécnicos del Proyecto del Hospital (deducidos de muestras con la cementación alterada) eran más conservadores.

Tabla 1 – Parámetros geotécnicos de la Formación Alhambra

Hipótesis	Cohesión c' (kPa)	Rozamiento interno ϕ' (°)	Coefficiente K_H (kN/m ³)
Proyecto Hospital	6	36	45.000
Recomendados por el Proyecto de construcción del Metro Ligerero	5	30	100.000
Parámetros obtenidos por Reyes (2010)	45-50	32-35	900.000-1.300.000
Parámetros obtenidos por García Piqueras (2011)	60	30	200.000

4 – MOVIMIENTOS PREVISTOS EN PROYECTO Y CONTROLADOS

En la Figura 7, se han representado los movimientos horizontales medidos con los 4 inclinómetros instalados, cuya situación puede verse en la Figura 1. Cabe decir:

- Los inclinómetros 2 y 3 (más centrales) dan un comportamiento bastante similar (diferencias entre ellos del orden de 1-1,5 mm), con un movimiento máximo, en cabeza, de unos 4-5 mm y un movimiento horizontal máximo cerca del fondo de la excavación de unos 2-3 mm
- El inclinómetro 1 sigue una tendencia similar, en profundidad a los 2 y 3, salvo en cabeza, en que se ha registrado un movimiento de unos 11,5 mm.
- El inclinómetro 4 se parece muy poco al resto: El movimiento horizontal en cabeza es de unos 11,5 mm pero, hacia los 12,0 m de profundidad, también registra desplazamientos de unos 12 mm, que bajan a prácticamente nulos a partir de los 20,0 m de profundidad (máximo nivel de excavación). Además, está instalado (Figura 1) en una aleta de la pantalla con menos altura de excavación, y con menos filas de anclajes y algo más de rellenos en su parte superior.
- Puede decirse que ese inclinómetro 4 es claramente no representativo del conjunto general del muro. Incluso puede decirse lo mismo del n° 1, por lo que la modelación va a comprarse, principalmente con el 2 y 3. No hay instrumentación de anclajes.
- En la Figura 8, aparecen resultados que corresponden al Proyecto y analizados con el código CYPE (2005) (similar al conocido como RIDO), en que el comportamiento deformacional del terreno se introduce a través del coeficiente de reacción lateral del terreno, K_H . Los valores máximos de los empujes se determinan con las fórmulas de Coulomb, a partir de la densidad aparente del terreno, γ_{ap} , de su ángulo de rozamiento interno, ϕ' , y de su cohesión, c' .

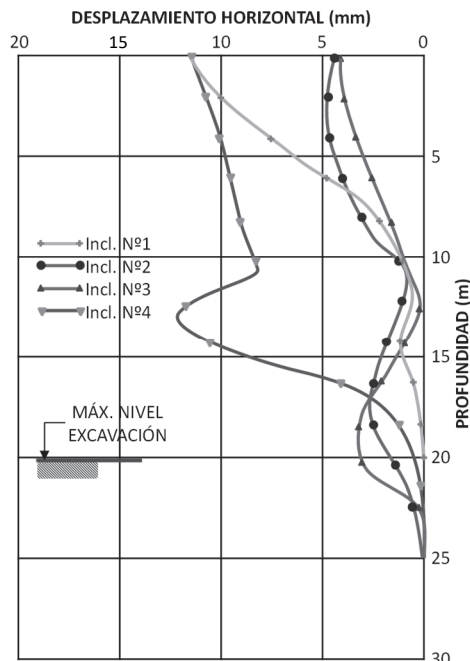


Fig. 7 – Medidas realizadas en 4 inclinómetros

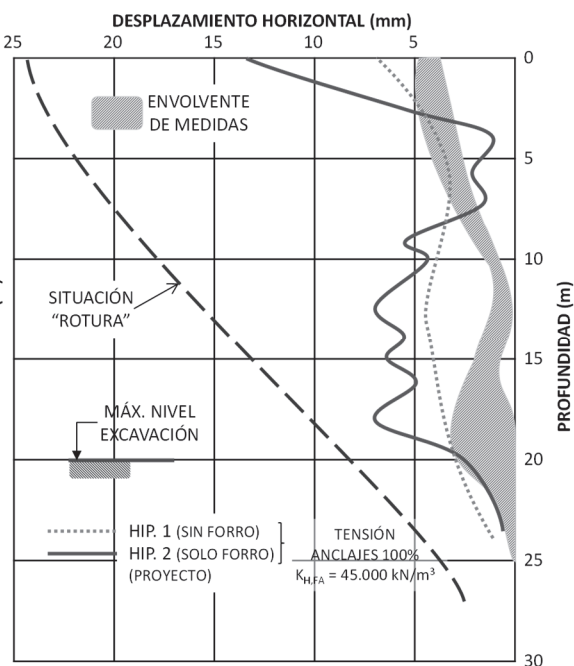


Fig. 8 – Cálculos de Proyecto y medidas realizadas en Hospital de Granada

En el Proyecto se consideraron los siguientes parámetros geotécnicos:

- Rellenos antrópicos: $\gamma_{ap}=19,1 \text{ kN/m}^3$, $c' = 0 \text{ kPa}$; $\varphi' = 30^\circ$; $K_H = 27.000 \text{ kN/m}^3$
- Formación Alhambra: $\gamma_{ap}=19,6 \text{ kN/m}^3$, $c' = 6 \text{ kPa}$; $\varphi' = 36^\circ$; $K_H = 45.000 \text{ kN/m}^3$
- A juicio de expertos en el terreno de Granada, las características geotécnicas adoptadas para la Formación Alhambra eran muy conservadoras, como se puede deducir de los parámetros geotécnicos obtenidos de la interpretación de las medidas realizadas durante la construcción del Metro de Granada (Botello, 2015), ver Tabla 1.
- El cálculo de Proyecto se hizo con varias hipótesis complementarias: a) Tensión en anclajes: 100%. b) Hipótesis 1: Sólo micropilotes, sin forro. c) Hipótesis 2: Micropilotes con forro. d) Introducción de condiciones sísmicas con forro.

En la Figura 8, aparecen:

- Las deformadas calculadas con la Hipótesis 1, más conservadora (micropilotes, sin forro).
- La envolvente de las medidas inclinométricas realizadas.
- Una deformada de la “situación de rotura”, obtenido bajo condiciones pésimas de cálculo, la cual, evidentemente, no es representativa de lo que ha sucedido durante las excavaciones.

Comparando las medidas y los cálculos de proyecto, se tiene:

- El forro amortigua los picos de deformación que se obtienen en el cálculo por la presencia de los anclajes. (picos que si vienen a aparecer en las medidas de los inclinómetros 1 a 3, ver pesar de la mayor inercia del conjunto forro-micropilotes, el forro sólo amortigua un 30% las deformaciones de “pico” en la situación de los anclajes. El forro se iba construyendo a medida que se bajaba la excavación. Interpretación de las medidas de movimientos realizadas en el hospital de Nuestra Señora de la Salud (Granada).

Se ha considerado que los parámetros geotécnicos utilizados para la Formación Alhambra eran muy conservadores, como ya hemos indicado anteriormente. Por ello se decidió realizar una serie de simulaciones numéricas para intentar ajustar mejor las deformadas teóricas a las medidas, variando en ellas:

- Tensión inicial de anclajes (referida a la máxima). Se han hecho dos supuestos: 70% y 100%. En la realidad (según información de SITE), se dio una tensión a los anclajes del orden de la primera de estas cifras, que suele ser una práctica habitual en España.
- Cohesión de la Formación Alhambra: Se ha considerado el valor de 6 kPa del Proyecto y otros dos valores claramente superiores: 40 y 60 kPa.
- Rozamiento interno de la Formación Alhambra: Se mantuvo el valor de proyecto de 36°, pero en los casos de máxima cohesión se ha calculado también con 30°.
- El coeficiente de balasto o de reacción lateral del terreno, K_H , de la Formación Alhambra se ha adoptado inicialmente igual a 45.000 kN/m³ (proyecto) y se ha variado hasta 150.000 kN/m³ y 1.500.000 kN/m³.
- El peso específico de la Formación Alhambra se tomó similar al de Proyecto.
- Las características geotécnicas de los rellenos antrópicos se tomaron como los de Proyecto.

Las variaciones de K_H , c' y ϕ' se han basado en los valores deducidos de la interpretación de las medidas de deformaciones horizontales registradas en el Metro de Granada (Botello, 2015).

De esa forma se han llevado a cabo las hipótesis de simulación numéricas señaladas en la Tabla 2: Un total de 16 hipótesis de cálculo.

- Las tres primeras hipótesis vienen a ser repetición de las de Proyecto, a fin de comprobar que los resultados eran los mismos (con 100% de la carga del anclaje). En las hipótesis 4ª a 8ª se han mantenido las cohesiones y rozamientos en la Formación Alhambra adoptados en Proyecto, pero variando el coeficiente K_H y la carga del anclaje (bajándola al 70% de la nominal, para ser más similares a lo llevado a cabo en la realidad).
- Como se deduce de la Figura 9, en que se han representado los movimientos de la pantalla, comparados con los valores extremos de las mediciones (huso envolvente), las deformadas de cálculo se parecen mucho a lo medido en los inclinómetros números 2 y 3 en la parte superior de la pantalla (entre 3 y 10 m de profundidad). Pero, por debajo se sitúan o en un intermedio entre lo medido en esos inclinómetros y lo deducido del nº 4, o se parecen más a lo de éste último (ver Fig. 7).
- Como puede verse en esa Figura 9, el variar el módulo K_H de 45.000 kN/m³ (hipótesis 4ª) a 1.500.000 kN/m³ (hipótesis 8ª), con un 70% de la carga máxima de anclaje, supone pasar de un desplazamiento máximo de unos 9,5 mm a unos 7,5 mm. Es decir, a pesar de multiplicar por 33 el coeficiente de reacción lateral del terreno de casi toda la excavación, solo se consigue reducir el movimiento en unos 2,0 mm. Es decir su influencia es menor que el inverso de la raíz cuarta de la variación de K_H .

Además, estos movimientos (incluso con el 100% de la carga nominal de los anclajes) son de 4 a 5 veces mayores que los medidos en la parte central e inferior de la pantalla en los inclinómetros 1 a 3. Ello puede interpretarse en el sentido de:

- Los parámetros resistentes del terreno adoptados son muy bajos y dan más empujes que los reales (Inclinómetros 2 a 3).
- El coeficiente de reacción del terreno tiene poca influencia al ser una pantalla con un gran número de anclajes, lo que condiciona totalmente la deformabilidad del elemento de contención.

Tabla 2 – Hipótesis de cálculo para analizar el caso del Hospital de Granada ¹

Hipótesis	Grado Tensión en anclaje (%)	Cohesión formación Alhambra (kPa)	Ángulo rozamiento en formación Alhambra (°)	Coefficiente de reacción lateral (kN/m ³)	Elemento estructural ²
1	100	6	36	45.000	PM
2	100	6	36	45.000	PMS
3	100	6	36	45.000	MS
4	70	6	36	45.000	PM
5	100	6	36	150.000	PM
6	70	6	36	150.000	PM
7	100	6	36	1.500.000	PM
8	70	6	36	1.500.000	PM
9	100	40	36	45.000	PM
10	70	40	36	45.000	PM
11	70	40	36	150.000	PM
12	70	40	36	1.500.000	PM
13	70	60	30	150.000	PM
14	70	60	30	1.500.000	PM
A ³	60	6	36	45.000	PM
B	60	6	36	45.000	PM

En la Figura 10, se han representado los casos analizados con una mayor cohesión que en Proyecto (40 kPa frente a 6 kPa), aunque con igual rozamiento (36°). Todo ello en la Formación Alhambra y con la tensión inicial de los anclajes de 70%. Se ha supuesto que el ángulo de 36° era similar a los resultados obtenidos con triaxiales.

Las hipótesis 10, 11 y 12 se corresponden con el caso de mayor cohesión, variando el coeficiente de reacción lateral, K_H , y siempre con un 70% de la carga nominal en los anclajes. En esa Figura 10, puede verse que estas hipótesis se asimilan mucho más que las anteriores a los resultados medidos en los inclinómetros 1, 2 y 3, sobre todo las hipótesis con módulos K_H del orden de 150.000 y 1.500.000 kN/m³.

También se ha estudiado el caso de cohesión de 60 kPa y rozamiento de 30°, (que son los valores deducidos en la interpretación de las medidas hechas en el Metro de Granada, Tabla 1), con dos valores de K_H . Los resultados teóricos se representan en la Figura 11, a la misma escala que las Figuras 9 y 10. Puede verse que los movimientos son aún más pequeños que antes e, incluso, algo inferiores a los medidos en los inclinómetros 1, 2 y 3.

En la Figura 12, se ha aumentado la escala de movimientos horizontales y se han incluido las medidas de los inclinómetros 1 a 3 y los resultados de las hipótesis 4 (baja cohesión y baja K_H); 12 (cohesión de 40 kPa); 13 y 14 (cohesión de 60 kPa).

¹ Se consideran 2,5 m superiores de rellenos granulares, caracterizados por: a) Densidad aparente: 19,1 kN/m³. b) ángulo de rozamiento: 30°. c) Cohesión: 0. d) Coeficiente de reacción lateral del terreno: 27.000 kN/m³. e) $K_0 = 0,5$. En la formación Alhambra $\gamma_{ap} = 20$ kN/m³.

² PM = Pantalla micropilotes sin tener en cuenta el forro de hormigón que se coloca entre los micropilotes

MS= Micropilotes más forro de hormigón. Fase definitiva y efecto sísmico

PMS= Pantalla micropilotes fase definitiva sin forro y caso sísmico (durante el momento de acabar la excavación).

³ En el caso A, el espesor de los rellenos superiores es de 5 m y en el caso B, de 8 m. La rigidez de los anclajes es 1/3 de la de los casos anteriores (tanto en el caso A como en el B).

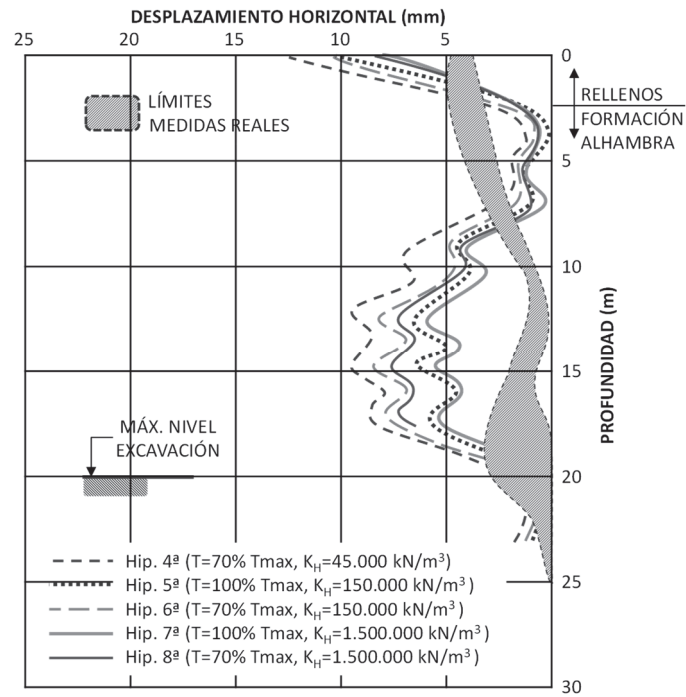


Fig. 9 – Casos analizados ($c' = 6 \text{ kPa}$, $\phi' = 36^\circ$ en la Formación Alhambra)

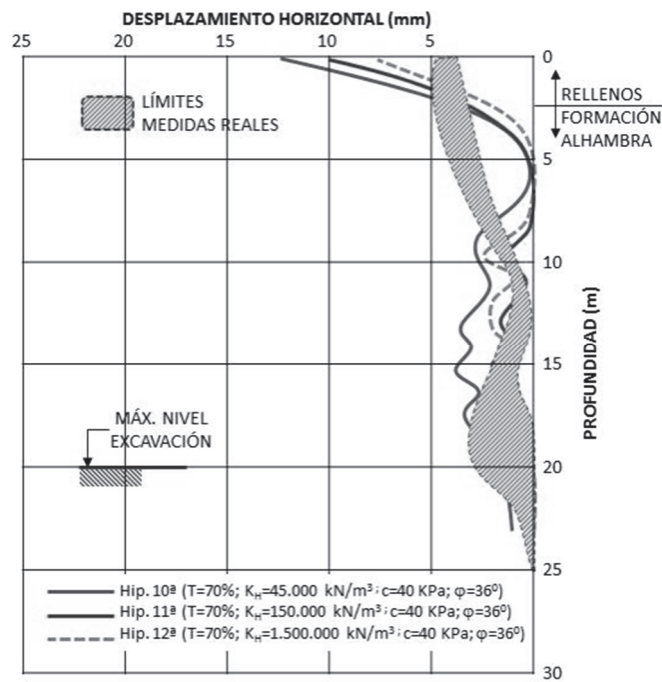


Fig. 10 – Casos analizados ($c' = 40 \text{ kPa}$, $\phi' = 36^\circ$ en la Formación Alhambra)

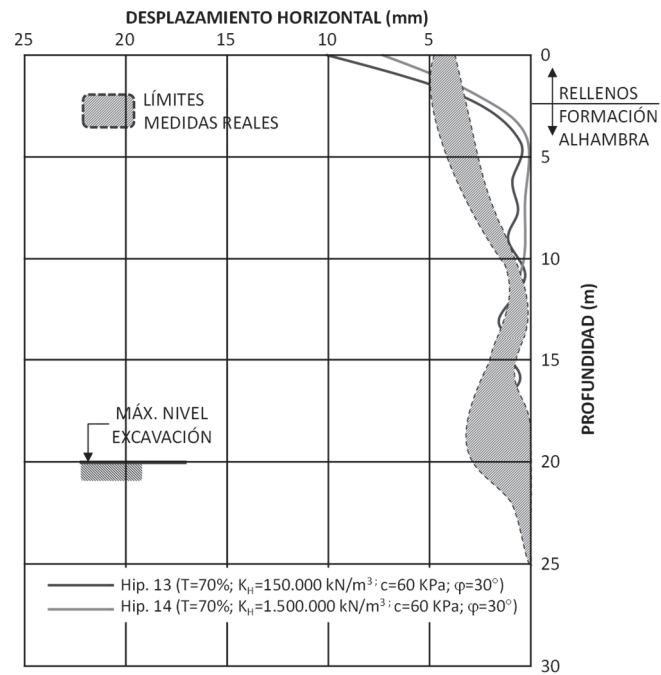


Fig. 11 – Casos analizados ($c' = 60$ kPa, $\varphi' = 30^\circ$ en la Formación Alhambra)

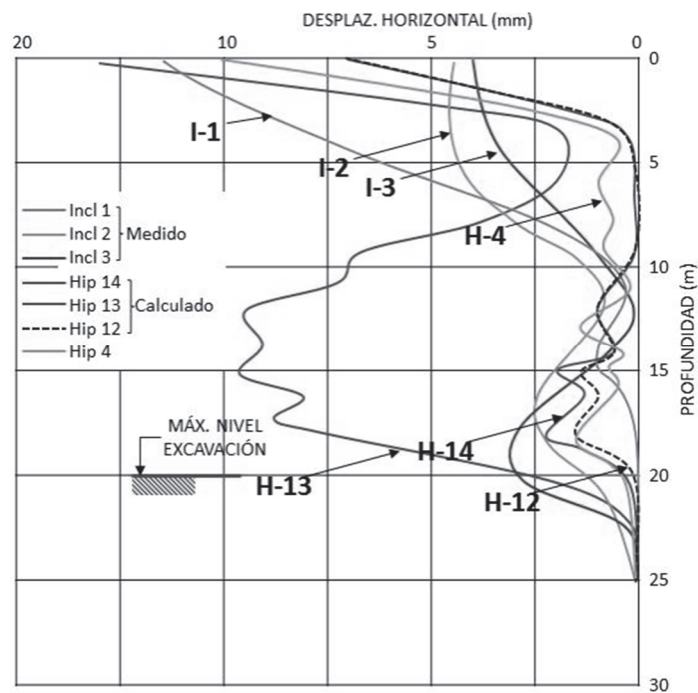


Fig. 12 - Comportamiento entre las medidas de los inclinómetros 1 a 3 con las hipótesis 4, 12, 13 y 14

Ningún ajuste es perfecto, pero la comparación indica que:

- La cohesión de la Formación Alhambra puede estimarse entre 40 y 60 kPa (probablemente más cerca del primer valor que del segundo).
- El rozamiento interno de la Formación Alhambra está entre 30 y 36°.
- Un conjunto de valores de cohesión 40 kPa y rozamiento de 33° puede ser muy representativo y llevar a un cálculo de movimientos similares a los medidos en los inclinómetros 2 y 3.
- El coeficiente K_H queda muy influido por la presencia de anclajes y puede estimarse en un valor intermedio entre 150.000 y 1.500.000 kN/m³, quizás más próximo al valor de 150.000 que al otro. Un valor intermedio del orden de 500.000 kN/m³ parece que puede resultar suficientemente representativo.

El inclinómetro 4 resulta anómalo respecto a los otros. Puede deberse a varios factores: a) Mala instalación. b) Golpeos durante la obra (poco probable, sólo influiría en la parte superior). c) Mayor espesor de rellenos del previsto. d) Irregularidades en el orden de tesado (poco o nada probable). e) Zona de Formación Alhambra más débil. f) Además, está instalado (Figura 1) en una aleta de la pantalla con menos altura de excavación, y con menos filas de anclajes y algo más de rellenos en su parte superior, etc. por lo tanto no es representativo.

A efectos de poder comparar teoría y realidad, se han calculado las hipótesis A y B (Tabla 2) en que el espesor de rellenos podrá llegar a 5,0 y 8,0 m, respectivamente, con una carga de anclaje del 60% de la nominal (como se hizo en algunos casos). Bajo estas condiciones no quedaría claro que los bulbos de los dos niveles de anclajes superiores quedaran en la Formación Alhambra, por lo que se ha tenido en cuenta la posibilidad de que se mantenga su rigidez y que pueda reducirse a 1/3 de la del resto de anclajes. Recuérdese que no hay medida de fuerzas en los anclajes.

Los casos calculados dan una deformada de la pantalla que se coloca entre las determinadas para la Formación Alhambra más débil y el inclinómetro nº4, por lo que la hipótesis de mayor espesor de terreno cuaternario parece que queda como la más razonable. Si se disminuye la rigidez de los anclajes superiores a 1/3 de la prevista, los desplazamientos pasan a ser enormes (80 mm) y la carga en los anclajes aumentaría al doble (de 270 kN a 550 kN), lo cual supondría prácticamente su rotura. Por eso, un mayor espesor de suelo cuaternario (unos 5,0 m) viene a explicar el comportamiento del inclinómetro 4, ya que los movimientos horizontales son del orden de 30 mm en la mayor parte del micropilote. Si el espesor de rellenos alcanza los 8,0 m, los desplazamientos obtenidos serían del orden de 90 mm. Por eso lo lógico es que los desplazamientos medidos en el inclinómetro 4, se deban a la presencia de un mayor espesor cuaternario (3,0 – 4,0 m, respecto a los 2,0 m previstos) y a una cierta mayor deformabilidad de los anclajes en la parte superior, precisamente por haber más terreno cuaternario.

Si se comparan los resultados obtenidos con las hipótesis de resistencia y deformabilidad deducidas en otras obras y en el Proyecto, para la Formación Alhambra (Tabla 1), puede decirse:

- Las recomendaciones adoptadas en el Proyecto de Construcción del Metro Ligero fueron conservadoras (aunque ya eran atrevidas respecto a las del Proyecto original de dicho Metro).
- Los parámetros adoptados en el Proyecto del Hospital son aún más conservadores.
- Los valores deducidos por Reyes (2010) se parecen bastante a los ahora deducidos, aunque con un coeficiente de reacción lateral algo más elevado (lo que no influiría considerablemente en las deformadas).
- Los valores deducidos por García Piqueras (2011) también están en el orden de magnitud con lo ahora deducido, aunque con una cohesión del lado superior.

Los análisis efectuados nos permiten obtener algunos resultados adicionales (con los inclinómetros 2 y 3), como en la influencia del coeficiente K_H en los desplazamientos máximos horizontales (lo que se ha ido comentando en páginas anteriores). La Figura 13 muestra esa relación y de ella se deduce mayor que 500.000 kN/m³:

- A partir de valores de K_H del orden de 500.000 kN/m³ hacia arriba, la influencia de este parámetro es mínima, ya que se debe superponer su influencia con la de los anclajes. Precisamente con estos valores superiores, las medidas se parecen más a los resultados teóricos.
- El pasar de K_H del orden de 40.000 a 500.000 kN/m³ prácticamente disminuye a la mitad el máximo desplazamiento en el centro de la pantalla, aunque en el desplazamiento en cabeza sólo una disminución del 40%.
- La cohesión, lógicamente, influye apreciablemente en los empujes y, por lo tanto, en los desplazamientos horizontales, sobre todo en el centro de la pantalla: La cohesión de 6 kPa da movimientos en el centro de la pantalla de casi tres veces más que si la cohesión alcanza valores de 40 a 60 kPa.
- El paso de una cohesión de 40 a 60 kPa tiene poca influencia.
- En la cabeza, las diferencias de cohesión tienen poca influencia, al haber anclajes – que se tensan enseguida – cerca de ella.
- Los dos anclajes superiores condicionan extraordinariamente la deformada de la pantalla.

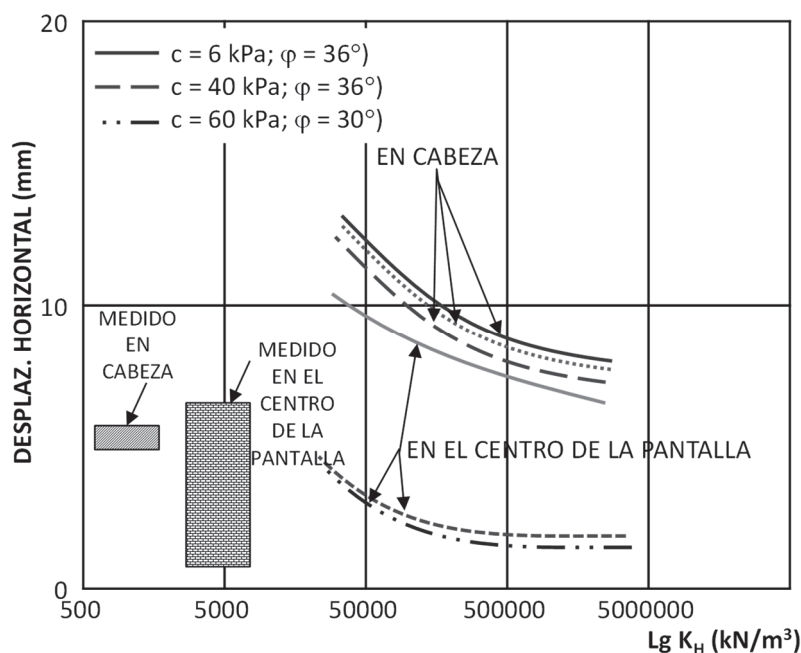


Fig. 13 – Variación de los movimientos de la pantalla en función del Coeficiente de reacción lateral de la Formación Alhambra (Tensión de anclajes 70%)

En cuanto a los esfuerzos de flexión (momento flector máximo en la pantalla), se resumen los valores obtenidos en la Figura 14.

El pasar de K_H del orden de 500.000 a 1.500.000 kN/m³ prácticamente no influye – en estos casos – en el máximo momento flector en la pantalla de micropilotes. Con valores bajos de K_H (del

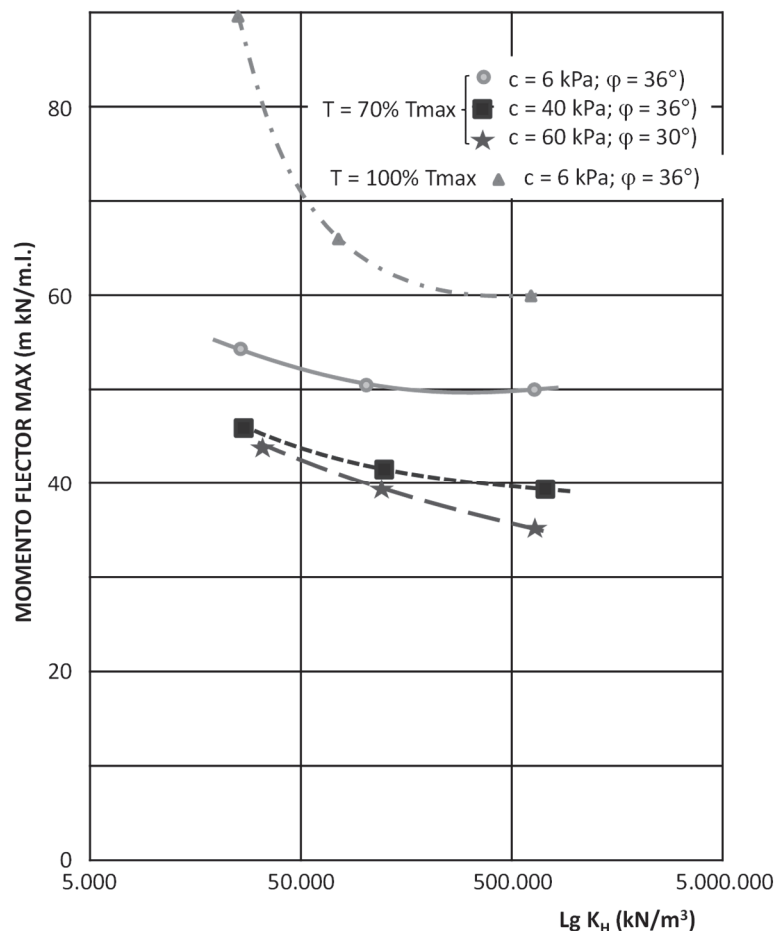


Fig. 14 – Variación del momento flector máximo con el coeficiente de reacción lateral de la Formación Alhambra

orden de 45.000 kN/m³), este parámetro si puede influir en el momento máximo y añadir un 35% a este valor (con tensión máxima de anclaje). Si el tesado es del 70%, valores de K_H bajos sólo aumentan un 5-12% el momento, respecto a un suelo con deformabilidad muy inferior.

El considerar una cohesión baja (6 kPa) lleva a obtener máximos momentos flectores superiores a los de las otras hipótesis. Si K_H es bajo (45.000 kN/m³, como se consideró en Proyecto) el momento máximo puede ser del 20% mayor que para las otras cohesiones consideradas, siempre que el tesado de los anclajes se mantenga en el 70%. Si este valor se incrementa hasta el 100%, el momento puede duplicarse, al pasar de cohesión alta (40-60 kPa) a baja (6 kPa). Precisamente con esto, los resultados teóricos se parecen más a los de las medidas en los inclinómetros 2 y 3.

Es decir, en este caso en que son necesarios muchos anclajes para mantener a los micropilotes con momentos flectores admisibles (hasta unos 90-100 mkN/ml) resulta que:

- El considerar una cohesión más representativa (como la de 40 kPa) puede reducir el momento flector a la mitad, para la máxima carga de tesado de los anclajes, lo que puede permitir reducir el diámetro de los micropilotes en una próxima obra, de características similares.

- El equivocarse en el valor de K_H tiene pocas consecuencias, siempre que se esté en torno de los 200.000-1.500.000 kN/m³.
- La presencia de los anclajes, que se van instalando y tesando a medida que se profundiza la excavación es, en este caso, de gran influencia, ya que condiciona los desplazamientos, la luz en la que se producen las flexiones (entre dos anclajes consecutivos, por lo general), etc. Sobre todo influyen los dos primeros niveles de anclajes, es decir, los más superficiales.
- Los parámetros deducidos como representativos de la Formación Alhambra, están en consonancia con los deducidos de las medidas disponibles realizadas en el Metro Ligerio de Granada.
- Si el espesor de rellenos es mayor en alguna zona y/o la Formación Alhambra es más débil, la pantalla de micropilotes se deformaría más y sus movimientos podrían quedar, anómalamente, representados por lo medido en el inclinómetro nº4.

Una interesante discusión sobre el significado del coeficiente de reacción lateral del terreno, K_H , puede verse en la Tesis Doctoral de Pedro Arozamena (2013), presentada en la Universidad de Sevilla. Si se utilizan los ábacos de Chadeisson y Monnet (Chadeisson, 1961; Monnet, 1994), representados en la Figura 15, para un rozamiento del orden de 32-35° y una cohesión de 40 a 60 kPa, el coeficiente K_H vale del orden de 50.000 kN/m³, es decir un valor claramente inferior al aquí obtenido. Si se utiliza el ábaco de Arozamena (2013), Figura 16, puede decirse que K_H valdría del orden de 5.000-10.000 kN/m³; también un valor claramente inferior a lo que en este análisis se ha deducido, probablemente porque el ábaco de Arozamena es más adecuado para terrenos con poca cohesión (como las gravas y el cuaternario superior de Sevilla) y menos adecuado para materiales cementados como los de Granada. Por ello, en el análisis que aquí se presenta – fruto de la interpretación de medidas reales – los valores son del orden de 10 veces mayores. Ello no debe de extrañar, ya que la interpretación de las medidas del Metro Ligerio de Granada dan también valores claramente superiores a los de Arozamena, debido, a nuestro juicio, a la cementación de estos materiales.

Como se ve los valores obtenidos en los ábacos, son claramente inferiores a los deducidos de las medidas para la Formación Alhambra, sin duda debido a que esos ábacos corresponden, principalmente, a terrenos arenosos sin cohesión y los suelos granadinos están cementados. De ahí el mayor valor de K_H . No se debe olvidar que las medidas han coincidido mejor con las hipótesis de cohesiones de 40-60 kPa (con rozamientos mayores de 30°), lo que implica que en esta formación Alhambra no puede establecerse sus propiedades deformacionales con recomendaciones propias de terrenos incoherentes (como las gravas y arenas de Sevilla).

Ábacos de Chadeisson (1961) y Monnet (1994)

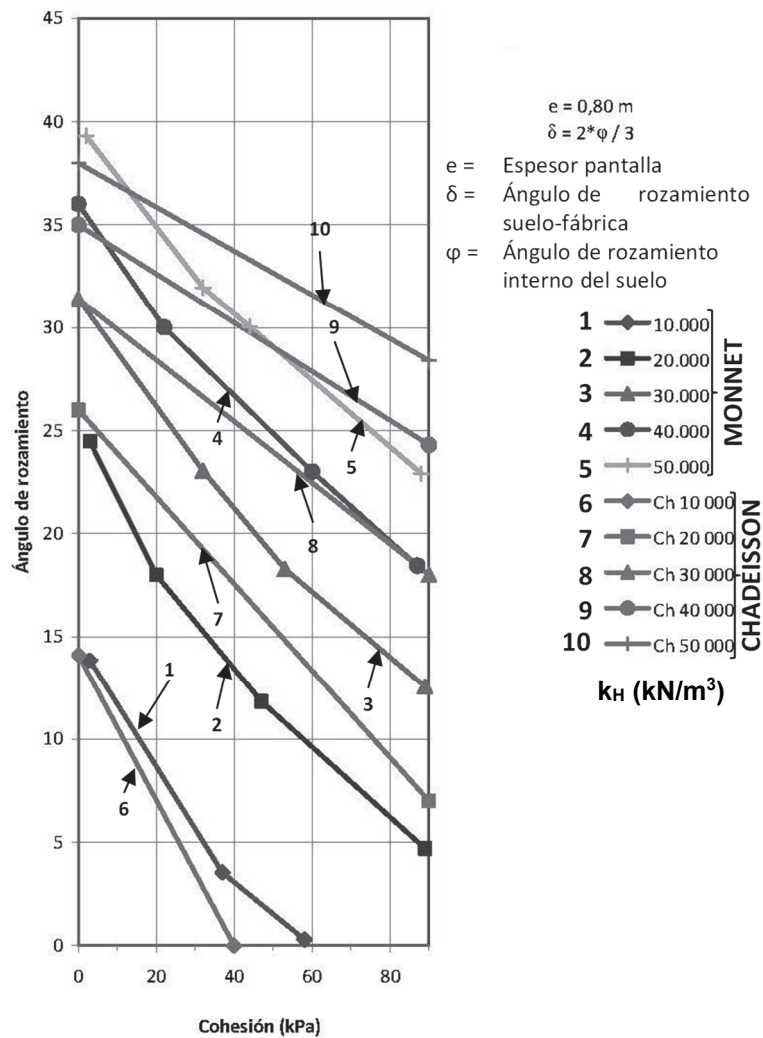


Fig. 15 – Superposición de los ábacos de Chadeisson y Monnet para K_H (Arozamena, 2013)

Ábaco de Arozamena

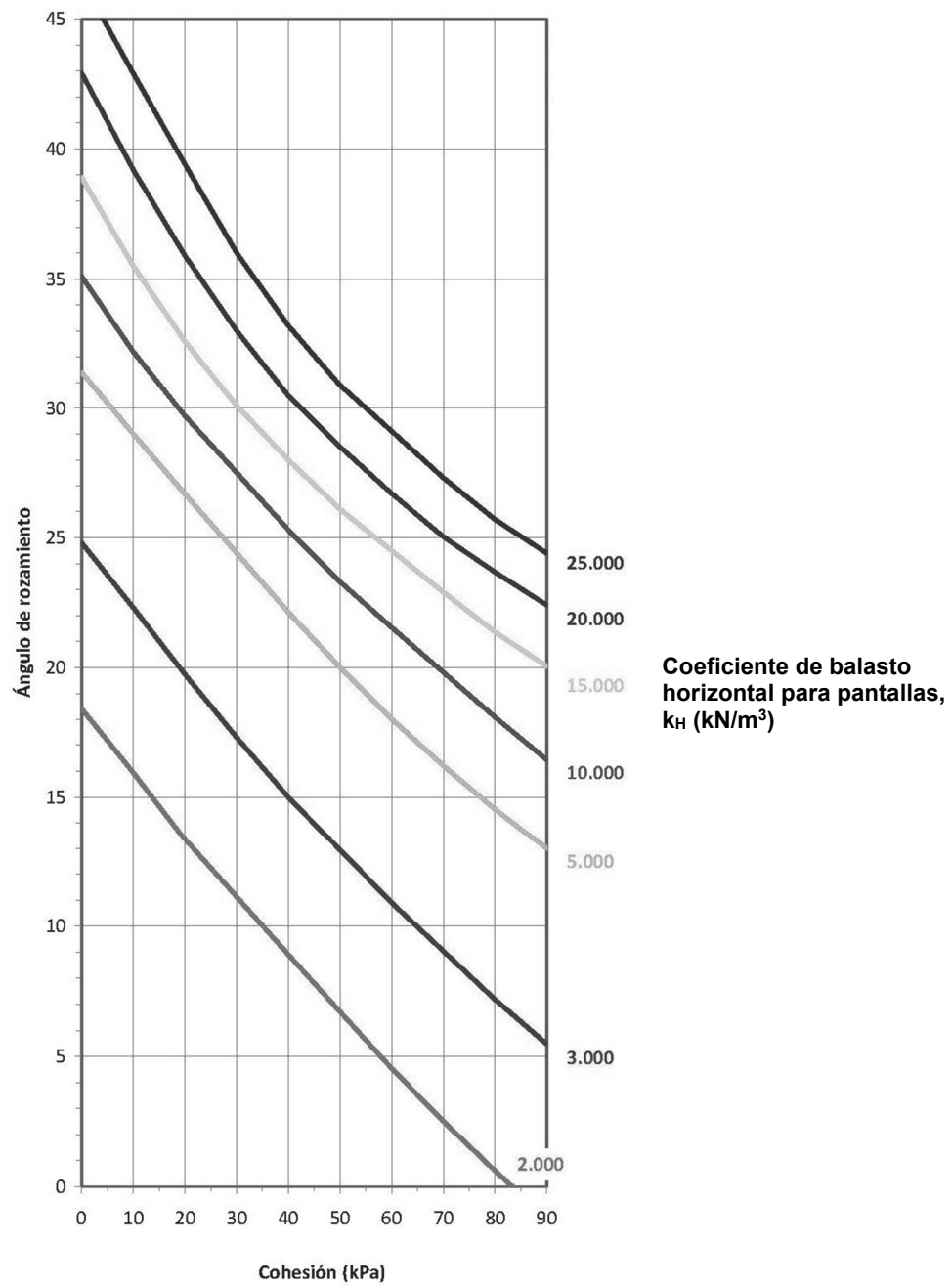


Fig. 16 – Ábaco de Arozamena para K_H (2013)

5 – EMPUJES DEDUCIDOS EN LA PANTALLA VERTICAL DE MICROPILOTES PARA VARIOS TIPO DE SUELO

Utilizando el modelo geotécnico y los resultados considerados en el análisis de los capítulos anteriores, este estudio se amplificó para varios tipos de suelos, con y sin cohesión, con el objetivo de elaborar leyes de empujes para otros casos futuros y similares.

Una de las cosas que hay que tener en cuenta, además de lo comentado, en el caso de la pantalla del hospital de Granada, es que se trata de una pantalla que puede calificarse como flexible, en que el empotramiento bajo el máximo nivel de excavación no es importante y sí lo son los apuntalamientos que tiene a lo largo de toda la profundidad excavada (en este caso, anclajes).

Ello recuerda el caso de las excavaciones entibadas clásicas en que, primero, se hincan unos perfiles metálicos y, después, se van apuntalando a medida que se excava. Es el caso de la típica entibación del “muro berlines” o de la tablestaca. Ya hace bastantes años, se hicieron medidas en este tipo de sistemas de contención flexibles y hasta se recomendaron los empujes con que deberían calcularse dichos elementos. En la Figura 17, se reproducen las recomendaciones de Peck (1969) en su Ponencia General al Congreso Internacional de Mecánica del Suelo de México. Como se aprecia en dicha figura, por ejemplo, para arenas sobre el nivel freático los empujes se pueden considerar constantes con la profundidad e iguales a $0,65 \gamma H_{KA}$, es decir, algo menores que el máximo valor del empuje activo en el fondo de la excavación (γH_{KA}), pero mayores que los activos en la mitad superior de la excavación. Esto viene a suponer que las entibaciones no permiten la descarga del terreno (para alcanzar el estado activo) y que en la parte superior de la excavación el empuje viene a ser el del reposo e, incluso, algo de pasivo en el caso de arcillas y limos muy sobreconsolidados por desecación, los empujes equivalen a un empuje menor, claramente, que el activo (Figura 17).

En nuestro caso, si consideramos el terreno, en principio, sin cohesión, y consideramos como válidos los empujes medidos (deducidos del cálculo) para los casos que mejor se han aproximado (en movimientos) a los medidos en obra, los empujes unitarios movilizados por la pantalla (bien como acciones, bien como reacciones), e_z , pueden ser claramente superiores a los correspondientes al empuje activo, e_{zKA} , como puede verse en la Figura 18. Esta hipótesis se ha hecho como comprobación de la tesis de Peck. En ella se aprecia que en el centro de la zona excavada se llegan a empujes del orden de dos veces el empuje activo, lo que puede equivaler al empuje en reposo, considerando que no hay cohesión, si esto se tuviera en cuenta, los empujes activos de referencia serían menores, con lo que los empujes movilizados podrían ser del orden de 2,50 veces el empuje activo (considerado con variación lineal desde superficie). Esto solo es para valores con sólo rozamiento.

En la Figura 19 y siempre con la hipótesis que los empujes horizontales deducidos de los cálculos, que dan los movimientos más próximos a los medidos, son los correctos (aunque no se hayan medido), se puede representar el intervalo de variación de dichos empujes. Tienen una cierta tendencia al aumento de empujes con la profundidad, aunque en el tercio inferior de la zona excavada vienen a mantenerse constantes para disminuir prácticamente a cero por debajo de la excavación máxima. En esa figura, estos valores de referencia se han comparado con los empujes activos, e_{zKA} , deducidos de cuatro hipótesis: a) Dos de ellas sin ninguna cohesión, con un ángulo de rozamiento interno de 30° en el relleno y un ángulo de rozamiento interno en la Formación Alhambra entre 30 y 36° . b) Para una cohesión global de 60 kPa y análogas hipótesis sobre el ángulo de rozamiento interno en los rellenos y en la Formación Alhambra. Estas leyes, lógicamente aumentan linealmente con la profundidad y proporcionan valores, en general, menores que los deducidos como válidos en estos nuevos cálculos (hasta unos 9 m de profundidad, en que no hay un descenso de estos valores, seguramente porque la distribución de anclajes o su tesado tuvo alguna irregularidad en esa zona).

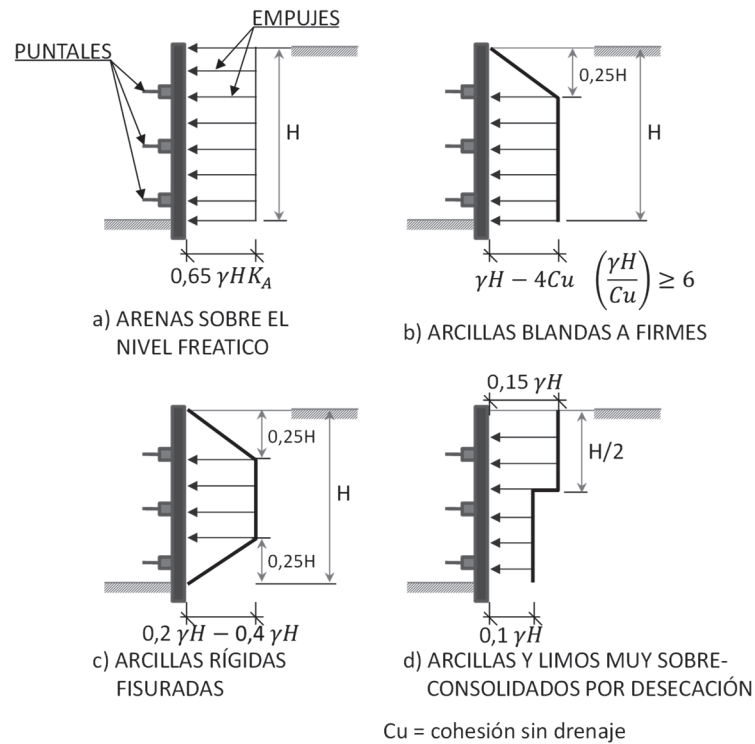


Fig. 17 – Recomendaciones de Peck (1969)

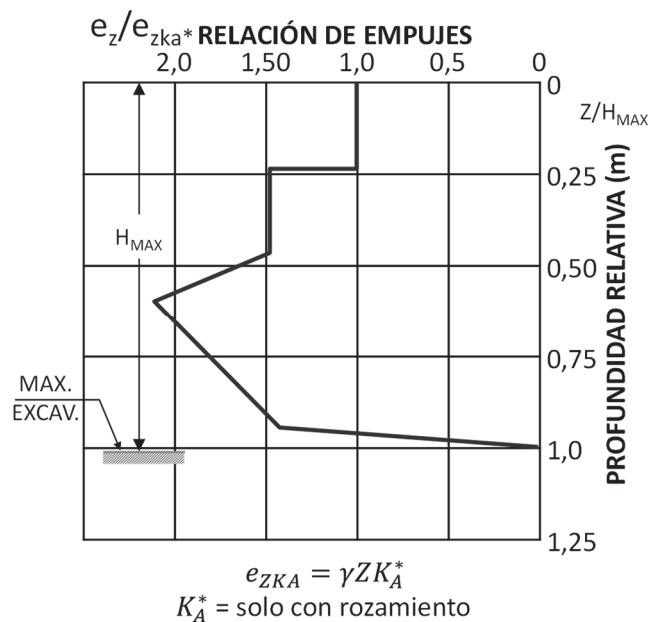


Fig. 18 – Empuje movilizado en relación con empujes del terreno con solo rozamiento

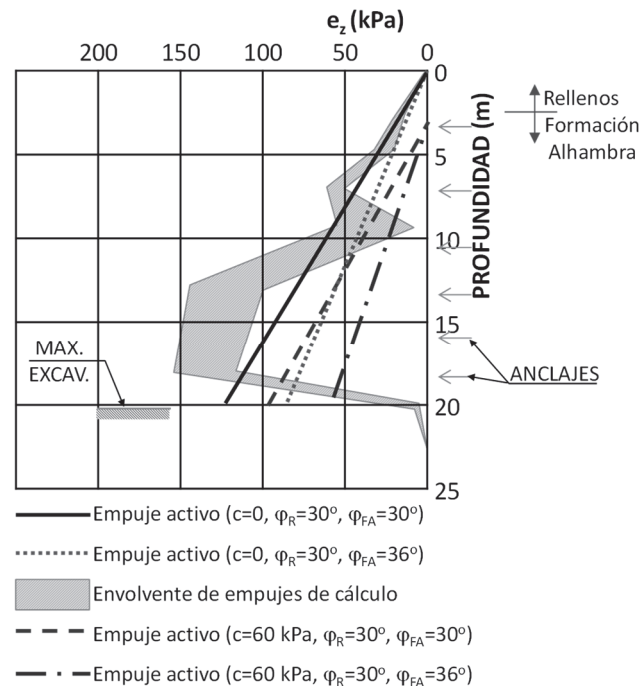


Fig. 19 – Relación entre empujes sobre la pantalla y la profundidad
(Relación entre carga de anclajes entre 70% y 100%)

Esa ley de empujes deducida como válida se ha simplificado, con el resultado representado en la Figura 20, en que en la mitad inferior de la excavación se han mantenido constantes los empujes y se han suavizado las reacciones en la parte media superior. De esta forma los empujes máximos sobre la pantalla de micropilotes se sitúan entre el 60% y el 90% de la profundidad máxima, con valores máximos que pueden oscilar entre 0,80 y 1,25 veces el empuje activo ($e_{ZK} = \gamma Z K_A$, siendo Z la altura considerada desde superficie y K_A el coeficiente de empuje del terreno, considerando sólo el rozamiento, sin cohesión).

Todo lo anterior indica la clara interacción que hay entre el terreno y la pantalla, aunque ésta sea flexible. Ello muestra que la Figura 20 da una idea de lo que se trata, aunque no tenga cohesión el terreno.

En la Figura 21, se ha representado el valor máximo de esta oscilación de empujes, para ser conservadores, considerando dicha ley de variación de la reacción con la profundidad como una ley recomendable a efectos de cálculo práctico. La comparación con el caso del valor mínimo del empuje activo que se suele considerar habitualmente, indica una clara superioridad de lo obtenido en el cálculo y una diferencia notable en la variación de empujes con la profundidad.

Por último, se ha representado la Figura 22, en la que se han comparado las diversas teorías de empuje de Peck (1969), con los resultados antes comentados sobre empujes recomendados.

Las leyes correspondientes a empujes de arcillas fisuradas sobre entibaciones flexibles se parecen en forma (trapezoidal, aproximadamente), pero con valores que son claramente superiores, a los obtenidos en estos cálculos en la mitad superior de la zona excavada. La ley de empuje de arenas sobre entibaciones flexibles (ley de empujes constantes) infravalora los empujes en la mitad inferior de la zona excavada (respecto a los ahora obtenidos denominados “análisis prácticos” en la Figura 22) pero los supervalora en la mitad superior y la ley de empujes activos infravalora también los empujes en esa zona.

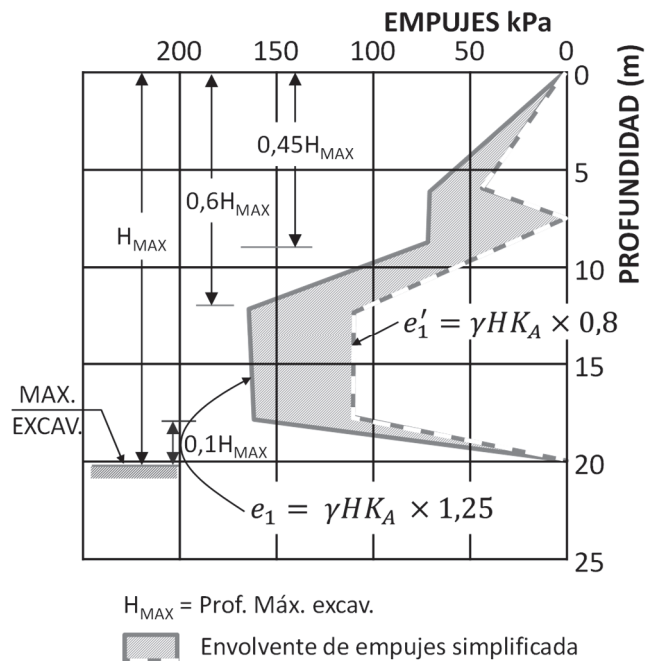


Fig. 20 – Empujes simplificados con la profundidad (con cohesión de 40-60 kPa, $\phi' = 30-36^\circ$, $T = 70$ a 100%). Sólo para valores de más alta presión

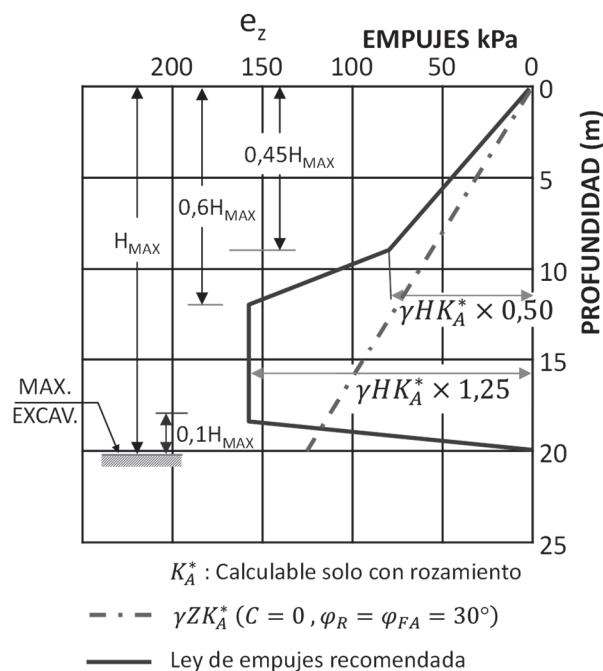


Fig. 21 – Posible ley simplificada de cálculo para pantallas de micropilotes con varias filas de anclajes

En la realidad parece que toda la parte superior (en que los anclajes se separan más), permite una decompresión relativa del terreno que rebaja los empujes. Sin embargo en las entibaciones flexibles pero con muchos puntales, se consigue una rigidez relativa mayor en la zona superior excavada, por lo que los empujes pueden ser mayores a los que aquí resultan. La deformabilidad de los anclajes permite, además, una cierta relajación en la parte superior que hace que disminuyan los empujes (y los momentos flectores, en consecuencia).

El caso estudiado en este capítulo (pantalla anclada con las características medias de la aquí empleada), permite una mayor flexibilidad, lo que conduce a una ley de empujes a recomendar (Figuras 21 y 22); con un volumen de empujes total de menor magnitud que las leyes propuestas por Peck (1969), incluso aunque consideremos las arcillas rígidas fisuradas. Así se ha simplificado el análisis. En el caso que nos ocupa (arenas cementadas, con cohesión) estaríamos en un rango intermedio entre las arcillas fisuradas y las arenas sueltas. Aun así, los empujes se parecen más a los de las arcillas fisuradas, pero con menor magnitud que los que recomienda Peck en la mitad superior de la zona excavada.

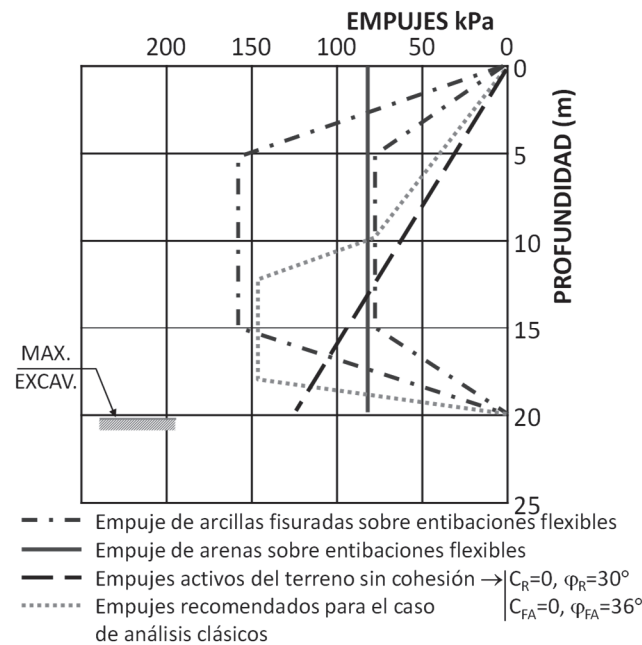


Fig. 22 – Comparación de diversas teorías de empujes con los recomendados para análisis prácticos ($c'=40-60$ kPa, $\phi'=30-36^\circ$, $R_h=500.000$ kN/m² y una fuerza de 70% de anclaje final)

6 – CONCLUSIONES

A manera de conclusiones pueden destacarse los siguientes puntos:

- En una solución, no convencional, como la aquí descrita, es indispensable la auscultación – como mínimo – con varios inclinómetros, a fin de poder comparar las previsiones de cálculo con el comportamiento real. Esta auscultación debería completarse con el control de la medida de esfuerzos en los anclajes.
- En suelos cementados el establecer los parámetros geotécnicos es difícil, ya que lo es la toma de muestras inalteradas, el disponer de muestras intactas para introducir en los aparatos de laboratorio, etc. Por eso, la interpretación de la instrumentación de una obra de

este tipo, puede permitir el determinar unos parámetros geotécnicos adecuados. O, al menos, un intervalo representativo bastante acotado.

- La introducción de un número elevado de anclajes disminuye la influencia de la deformabilidad del terreno, pero no la de la cohesión y el rozamiento interno.
- Los parámetros obtenidos están en el orden de magnitud de los deducidos de la obra del Metro de Granada, aunque con pocas secciones interpretadas.
- Para obras futuras en la Ciudad de Granada (Ampliación del Metro Ligero y otras excavaciones profundas) los parámetros geotécnicos deducidos en este trabajo (siempre difíciles de determinar, al ser suelos cementados) pueden servir para diseñar obras de forma menos conservadora.
- Se puede adoptar una ley de empujes simplificados entre las leyes tipo de suelos arenosos y arcillas rígidas recomendadas por Peck (1969). En este artículo se han comparado los resultados obtenidos con las leyes de Peck (para excavaciones a cielo abierto y con muchos puntales). En este caso, el gran número de anclajes (7 niveles) puede asimilarse a un muro muy apuntalado. La ley recomendada está entre la de la arcilla rígida y la de suelos arenosos de densidad media-alta, con los mayores empujes similares a los de la arcilla rígida, pero con un volumen menor de empujes. El máximo valor está por debajo de la mitad de la excavación. Como en el caso de los parámetros geotécnicos, esta conclusión puede utilizarse para suelos cementados como los de Granada.

7 – AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren expresar su agradecimiento a la Dirección de Obra del Hospital de Nuestra señora de la Salud de Granada, así como a la Constructora Puerta Monaita, S.L., por las facilidades dadas para disponer de las medidas de los inclinómetros y el conocimiento de las fases de Obra.

8 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arozamena, P. (2013). *Comportamiento del Terreno durante las obras de construcción de la Línea 1 del Metro de Sevilla en los tramos de túnel entre pantallas y en las estaciones subterráneas*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- Botello, A. (2015). *Sobre el comportamiento de micropilotes trabajando a flexión y/o cortante en estructuras de tierra*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Chadeisson, R. (1961). *Parois continues moulées dans le sol*. Proceedings of the 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Volumen 2, pp. 563-568. París.
- CYPE (2005) *Cálculo de pantallas continuas*. Empresa de Esquema de cálculo para calcular hormigón armado.
- García Piqueras, M. A. (2011). *Deformabilidad en pantallas de hormigón. Obras del Metro Ligero de Granada*. Tesis del VI Master en Túneles y Obras Subterráneas. AETOS-CICCP-U.P.M. No publicado.
- Monnet, A. (1994). *Module de reaction, coefficient de décompression, au sujet des paramètres utilisés dans la méthode de calcul élasto-plastique des soutènements*. Revue Française de Géotechnique (65), pp. 67-72.
- Peck, R. B. (1969). *Deep excavations and tunnelling in soft ground*. Proc. 7th ICSM FE. México.

Reyes, D. (2010). *Estudio de pantallas en ámbito urbano. Análisis de movimientos en pantallas discontinuas en suelos cementados: Metro de Granada*. Tesis del V Master en Túneles y Obras Subterráneas. AETOS-CICCP-U.P.M. No publicado.