VALORACIÓN DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA EN UN FALSO TÚNEL URBANO TERMOACTIVO EN MADRID

Assessment of the soil-structure interaction in a cut-and-cover thermoactive urban tunnel in Madrid

Ignacio González Tejada[a], Jesús González Galindo[a], Javier Muñoz Antón[b]

[a] Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno, Universidad Politécnica de Madrid, España.
[b] Departamento de Ingeniería Energética, Universidad Politécnica de Madrid, España.

RESUMEN – La termoactivación de estructuras de contención de tierras para su uso como intercambiador de calor en sistemas geotérmicos de baja temperatura, proporciona más eficiencia y menos emisiones de carbono que otros sistemas de calefacción y refrigeración convencionales. Las consecuentes variaciones de temperatura producen una interacción suelo-estructura que debe ser evaluada para garantizar que no se compromete ni la estabilidad ni el servicio, a la vez que se mantiene un rendimiento energético que garantiza la viabilidad económica. En este trabajo se analiza, mediante modelado numérico, el efecto de la termoactivación de las pantallas de pilotes un falso túnel urbano de casi 3 kilómetros en la ciudad de Madrid. Para el análisis de la interacción suelo-estructura se han utilizado datos climáticos reales. Los resultados muestran que, operando en un rango de temperaturas tal que se mantiene el rendimiento de la bomba de calor, el efecto estructural es muy limitado.

ABSTRACT – The thermoactivation of earth-retaining structures to be used as heat exchangers for low temperature geothermal energy systems allows for buildings heating and cooling at higher efficiency and lower carbon intensity than conventional HVAC systems. The resulting thermal loads affect the soil-structure interaction, so that an assessment of the safety and serviceability is necessary. At the same time, the energy performance must be enough to guarantee economic feasibility. In this article, the effect of the thermoactivation of the pile diaphragm walls of a 3 km long cut-and-cover tunnel in Madrid is investigated through numerical modeling. Real climate data are used as input in the model. The structural effect is very limited when operating within a temperature range chosen to maintain the performance of the heating and cooling system.

Palavras Chave – Cimentaciones termoactivas, interacción suelo-estructura.

Keywords – energy geostructures, soil-structure interaction.

1 – INTRODUCIÓN

Cerca de la mitad de la energía primaria en la UE se destina a calentamiento y enfriamiento (European Commission, 2016). Esta energía se reparte entre los usos residencial (45%), industrial (37%) y de servicios (18%). Actualmente, en el 75% de los casos se obtiene mediante combustibles fósiles (en casi la mitad mediante gas natural). Los combustibles fósiles son responsables de gran

E-mails: ignacio.gtejada@upm.es (I. Tejada), jesus.gonzalezg@upm.es (J. Galindo), javier.munoz.anton@upm.es (J. Antón)

ORCID: orcid.org/0000-0002-4734-7349 (I. Tejada), orcid.org/0000-0003-3371-5865 (J. Galindo), orcid.org/0000-0002-1980-0863 (J. Antón)

parte de las emisiones de gases de efecto invernadero. Se estima que los edificios podrían ser responsables de cerca del 35-40% del consumo energético y de las emisiones de CO_2 a nivel mundial, Song (2021). Además, la mayor parte de la energía utilizada para calefacción y refrigeración se pierde en forma de calor residual. Por estas razones, la calefacción y refrigeración de edificios mediante energía geotérmica de baja temperatura presenta una gran oportunidad para la descarbonización de la sociedad y el ahorro energético. Esta energía es estable frente a condiciones atmosféricas variables, tiene bajo impacto medioambiental y es competitiva en costes. Frente a los yacimientos geotérmicos profundos (que solo se localizan en determinadas zonas geográficas), la energía geotérmica de baja temperatura está disponible en todas partes (Lund et al. 2011). Se trata de aprovechar el potencial de intercambio de calor entre un ambiente frío (en invierno) o caluroso (en verano) con el edificio a calentar o enfriar. El subsuelo que mantiene una temperatura bastante constante durante todo el año y puede ser utilizado como fuente o sumidero de calor. Para conseguir el intercambio de calor se hace circular un fluido por un circuito, habitualmente cerrado. La termoactivación de estructuras de cimentación (pilotes y losas) o de estructuras de sostenimiento de tierras (túneles, pantallas y muros) permite la instalación de este intercambiador de calor dentro de la estructura, sin necesitar excavaciones o perforaciones *ad hoc*. Esto reduce la inversión inicial (Brandl, 2006; Fadejev et al., 2017; Laloui y Loria, 2019). El fluido transporta el calor desde o hacia bombas de calor eléctricas, que elevan (o reducen) la temperatura del fluido en el circuito secundario, situado en el edificio. La diferencia de temperatura entre el fluido y el subsuelo hace que se produzca la transferencia energética. El coeficiente de rendimiento medio en una temporada para las bombas de calor geotérmicas, COP, puede llegar a ser del orden de 5. Esto quiere decir que por cada 1 kWh de electricidad consumida se obtienen hasta 5 kWh de calor. El alto rendimiento se explica por la estabilidad de la temperatura del suelo a poca profundidad, lo que hace que la bomba de calor trabaje con un reducido salto de temperatura. Estos sistemas son especialmente eficientes cuando se acoplan con sistemas de calefacción tipo suelo radiante, en los que para el agua en el circuito secundario no se requieren temperaturas demasiado elevadas. Además, las bombas de calor son fácilmente combinables con otras tecnologías activas y pasivas de climatización eficiente. Todo esto hace que las cimentaciones y elementos de contención o sostenimiento termoactivos sean cada vez sean más frecuentes, aunque existen todavía importantes barreras administrativas, financieras, constructivas y tecnológicas que frenan su uso (CFMSG, 2017; Laloui y Rotta-Loria, 2019; Barla et al., 2023). Este trabajo se centra particularmente en los aspectos tecnológicos.

Para el diseño de una pantalla termoactiva es necesario realizar dos valoraciones: 1) recurso geotérmico explotable y 2) efecto estructural de la termoactivación. La primera valoración determina cuál es la longitud o superficie necesaria de un intercambiador de calor para suministrar una determinada potencia de calefacción y/o refrigeración. La segunda valoración cuantifica los cambios en las leyes de momentos flectores, esfuerzos cortantes, esfuerzos axiles o deformaciones causados por las acciones térmicas en la estructura. En este problema se acoplan los procesos mecánicos (interacción entre suelo y estructura) con otros de transferencia de calor y masa.

El comportamiento estructural de los pilotes termoactivos ha sido mucho más estudiado (Saggu and Chakraborty, 2017; Bourne-Webb at al., 2019; Arzanfudi et al., 2020; Bimaganbetova et al., 2022) que el de las pantallas termoactivas. Además, hay más pilotes que pantallas termoactivos en servicio. Una gran parte de los trabajos referidos a la termoactivación de pantallas se centra en la valoración del recurso geotérmico para optimizar la explotación, pero sin evaluar los aspectos estructurales. Por ejemplo, Xia et al. (2012) estudiaron experimentalmente la transferencia de calor en las pantallas termoactivas del Museo de Historia Natural de Shanghai. Sterpi et al. (2018) hicieron lo mismo en la pantalla de la excavación y en la losa de cimentación de un edificio con 3 plantas de sótano construido en Tradate (Italia). Algunos autores han recurrido a simulaciones numéricas (Rammal et al., 2020; Zeng et al., 2021; Peterson y Shafagh, 2022; Xu et al., 2023; Zhong et al., 2023; Zhu et al., 2024). Otros han analizado el efecto de la configuración de los tubos en la eficiencia de la transferencia de calor (Sun et al., 2013; Di Donna et al., 2017; Sterpi et al., 2020; Makasi y Narsilio, 2020; Zhou et al., 2023, Mi et al., 2024). Entre los trabajos que han valorado los efectos

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 164 – julho/julio/july 2025 – pp. 217-242
https://doi.org/10.14195/2184-8394_164_8 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

mecánicos de la termoactivación en las pantallas se encuentra el de Bourne et al. (2016), quienes estudiaron mediante simulación numérica, el comportamiento termomecánico de unas pantallas termoactivas de unos 20 m de longitud construidas en un falso túnel de unos 10 m de excavación. Estos autores concluyeron que el comportamiento estructural está más afectado por las variaciones estacionales de temperatura que por la propia termoactivación. Sterpi et al. (2017) hicieron algo similar para pantallas con movimiento libre en cabeza de 15 m de profundidad y excavación de unos 10 m y estimaron que los desplazamientos horizontales inducidos en cabeza inducidos por la geotermia serían inferiores al 5% de los debidos a la propia excavación. También estimaron un aumento del momento flector en las zonas intermedias de la pantalla, aunque no previeron un aumento de su valor máximo (esperado a la altura del fondo de la excavación). Barla et al. (2018) confirmaron mediante simulación numérica un limitado efecto estructural en pantallas en voladizo de 16 m de profundidad y 9 m de excavación. También estimaron unos movimientos horizontales adicionales a los debidos a la excavación de apenas 3 mm en la cabeza de la pantalla. La variación del momento flector resultó despreciable. Dai et al. (2023) se centraron en tres aspectos relevantes a estudiar en el caso de pantallas termoactivas: 1) el movimiento horizontal en la pantalla, 2) el asiento en superficie y 3) el levantamiento del fondo. Para ello realizaron un estudio paramétrico de la estación de metro de Totteham Court Road (Londres), con una excavación de casi 30 m en 5 niveles y nivel freático a 3 m de profundidad en terrenos principalmente arcillosos. Los movimientos horizontales, asientos y levantamientos estimados estuvieron siempre en el rango milimétrico. El estudio del comportamiento a largo plazo teniendo en cuenta la posible generación de exceso de presiones intersticiales, concluyó que no se producirían efectos estructurales relevantes por la termoactivación y que solo podrían aparecer algunas fisuras sin afección a la seguridad estructural. Zhou et al. (2023) estudiaron los movimientos horizontales en la cabeza libre de una pantalla termoactiva de 17 m de profundidad en el largo plazo en un material elastoplástico. Concluyeron que una explotación intensa y no equilibrada (que llevase a la pantalla a temperaturas de hasta 40°C o -15°C) la deformación en cabeza podría aumentar unos 15 mm con respecto al valor medio estimado sin termoactivación. Hu et al. (2024) estudiaron experimentalmente el comportamiento termomecánico mediante un ensayo en condiciones reales realizado en la pantalla termoactiva de una estación de metro en Najing (China). La pantalla tenía más de 50 m de profundidad, el terreno soportado incluía diferentes estratos (desde arcillas limosas hasta areniscas y glutenitas más o menos alteradas) y el nivel freático se situaba a 4 m de profundidad. Estos autores se centraron fundamentalmente en cómo las condiciones de contorno determinan las deformaciones y tensiones inducidas por la termoactivación.

Todos estos trabajos revelan que *a priori* no se espera que la termoactivación de muros pantallas produzca afecciones estructurales significativas cuando se opera en los rangos de temperatura habituales. En este artículo se presenta un estudio similar realizado para un falso túnel urbano en construcción en Madrid (España) y cuya termoactivación está prevista en su Proyecto de Construcción (ESTEYCO y SUBTERRA, 2023). Con sus casi 3 km de longitud, se espera que se convierta en el túnel termoactivo más largo del mundo. Su ejecución se prevé que concluya a principios de 2027.

La presentación de la investigación es la siguiente: primero se describe el túnel y las características del terreno en su traza (sección 2). A continuación, se repasan los aspectos más relevantes para el planteamiento del problema acoplado (sección 3) y los niveles de aproximación con los que se puede abordar la solución (sección 4). En la sección 5 se concreta el planteamiento del problema en el caso del Paseo Verde del Suroeste – Soterrameinto de la A5. En la sección 6 se presentan resultados y se discuten en la sección 7. Finalmente, en la sección 8 se presentan las conclusiones principales.

2 – SOTERRAMIENTO DE LA AUTOVÍA A-5 (PASEO VERDE DEL SUROESTE)

2.1 – Descripción de la actuación

El caso de estudio es el falso túnel termoactivo en construcción para el soterramiento de la Autovía A-5 en Madrid. Este túnel discurrirá desde boca del túnel de la Avenida de Portugal hasta el entorno de la Avenida del Padre Piquer. Su longitud total es de 2,788 m. La tipología es la de falso túnel ejecutado en "cut and cover", con losa ejecutada desde la superficie. Las pantallas de contención se han ejecutado con pilotes de 15 m de longitud media, profundizando bajo la solera del túnel unos 5 m de media. Los diámetros de los pilotes de las pantallas son de 0,65 m y 0,80 m. El túnel tiene una distribución de dos vanos y tres carriles por sentido y está condicionado por la proximidad de edificaciones cercanas en algunos tramos. La sección tipo (Figura 1) en las zonas sin incorporaciones ni salidas al túnel consta de una anchura interior de 30,75 m.

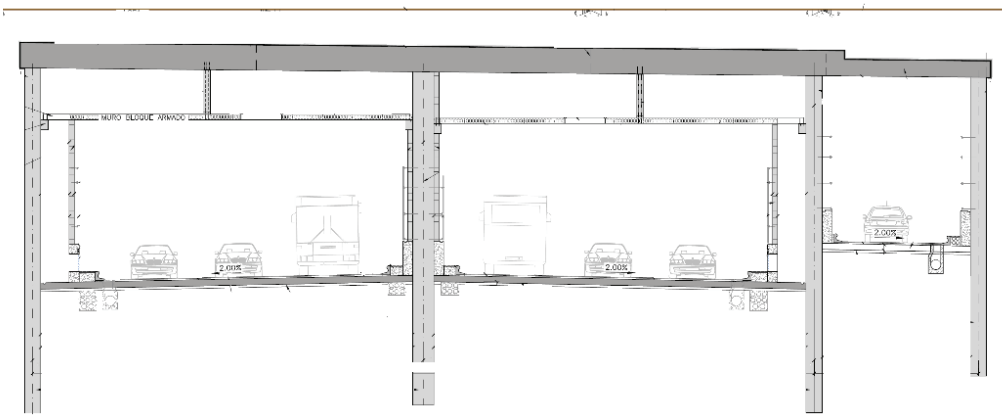

Fig. 1 – Sección tipo del falso túnel de la A-5. Paseo Verde del Suroeste (ESTEYCO y SUBTERRA, 2023).

2.2 – Geología y geotecnia

La ciudad de Madrid se encuentra en una antigua cuenca endorreica que se fue rellenando a lo largo del Mioceno con grandes espesores de sedimentos mediante sistemas de abanicos aluviales que convergen en la zona central, donde el ambiente es lacustre. Estos materiales comprenden una amplia gama de granulometrías, desde aquellos con menos de un 25% de finos (como la arena de miga) hasta aquellos con más del 60% de finos (tosco), pasando por aquellos con granulometrías intermedias (arenas tosquizas y tosco arenoso). Los estratos suelen tener espesores métricos (aunque a veces aparecen intercalaciones de espesor decimétrico), dispuestos prácticamente horizontales, con acuñamientos, variaciones de espesor o cambios laterales de granulometría. Al inicio del trazado del túnel, en la zona más próxima al río Manzanares, se encuentra una alternancia de niveles arenosos con arcillosos. A medida que el trazado se aleja del inicio predominará la componente arenosa (arena de miga y arena tosquiza), con escasas o nulas intercalaciones arcillosas. La clasificación geotécnica de estos materiales de acuerdo con el USCS es (Escario, 1986): arena de miga (arenas con arcillas, SC, y arenas con limos, SM), arena tosquiza (arenas con arcillas, SC, y arenas con limos, SM), tosco arenoso (arenas con arcillas, SC, y arcillas inorgánicas de baja plasticidad, CL) y tosco (arcillas inorgánicas de baja plasticidad, CL, arcillas y limos de alta plasticidad, MH-OH y limos y arcillas poco plásticas, ML-OL). La capa superior del terreno natural está cubierta con rellenos antrópicos.

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 164 – julho/julio/july 2025 – pp. 217-242
https://doi.org/10.14195/2184-8394_164_8 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

3 – PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 – Generalidades

Para comprender el comportamiento de una pantalla termoactiva es necesario resolver un problema en el que se acoplan los procesos mecánicos (interacción entre suelo y estructura) con otros de transferencia de calor y masa. Desde el punto de vista estructural, a las cargas y acciones ya contempladas en el proyecto, se añaden aquellas causadas por los cambios de temperatura estacionales en estructura y suelo. El cambio de temperatura se traduce en cambios de volumen, de tensión o de presión intersticial. Además, se producen transferencias de masa (flujos de aire y/o agua) y de calor (por conducción, convección o radiación). Los modelos termo-hidro-mecánicos, THM, permiten abordar el problema de un modo totalmente acoplado. En gravas con grados de saturación altos y bajos, la convección -en agua o aire, respectivamente-, es el principal mecanismo de transferencia térmica. En arcillas y limos con grados de saturación bajos, los principales mecanismos de transferencia de calor son la redistribución térmica de la humedad y la difusión de vapor. En el resto de las situaciones, la conducción térmica es la principal responsable de la transferencia de calor (Farouki, 1986). Cuando predomina la conducción, el acoplamiento THM es claramente más fuerte en una dirección, esto es, los cambios de temperatura inducen cambios de tensión o deformaciones, pero los cambios de tensiones apenas afectan a la trasmisión del calor por conducción. La resolución del problema de transferencia de masa y de energía permite conocer la distribución de temperatura del suelo en el espacio y en el tiempo. Este es un aspecto clave para valorar el recurso geotérmico y para asegurar que la bomba de calor satisfaga las demandas de calor y frío para las que fue instalada sin disminuir su rendimiento. Una vez resuelto el problema de transferencia de calor, y conocidos los cambios térmicos inducidos, se puede valorar cuáles serán las consecuencias mecánicas en el problema de interacción suelo-estructura asociado. En general, bastará con verificar los estados límite en las situaciones más extremas, esto es los de máxima y mínima temperatura, en concomitancia con otras acciones. Pero también es posible realizar una evaluación de la evolución de los esfuerzos en el tiempo. En el caso de pilotes termoactivos, estos cambios suelen traducirse en un incremento de los esfuerzos axiles. En el caso de pantallas, el principal problema podrían ser las deformaciones y el posible aumento de los momentos flectores o cortantes.

3.2 – Consideraciones termodinámicas

3.2.1 – Calor bombeado, intercambiado con el suelo y rendimiento

Una bomba de calor es una máquina térmica que toma calor de un espacio a relativamente baja temperatura y lo transfiere a otro de mayor temperatura gracias a un trabajo mecánico aportado desde el exterior, generalmente con un motor eléctrico. En los sistemas geotérmicos reversibles, durante el invierno el foco frío será el subsuelo y el foco caliente el edificio a calentar. En verano el calor se transferirá del edificio hacia el terreno. La geotermia de baja temperatura se aprovecha del hecho de que la temperatura del subsuelo se mantiene prácticamente constante a unos pocos metros de profundidad, a una temperatura que será la media del lugar (unos 15,6°C en Madrid, según los datos registrados en el periodo 2019 - 2024) y a la que hay que añadir en muchas ocasiones un incremento ocasionado por el efecto “isla de calor” (Román López et al., 2017). Esta temperatura media del subsuelo, más caliente que el exterior en invierno y más fría que el exterior en verano, hace que se obtenga una mayor eficiencia en el bombeo de calor que con sistemas de aerotermia.

La potencia de calefacción y de refrigeración suministradas al edificio por una bomba de calor geotérmica son diferentes de las potencias de calor intercambiadas con el suelo. Esto es debido al segundo Principio de la Termodinámica por el cual para que el calor vaya del foco frío al foco caliente es necesario realizar un trabajo. Cuando la bomba trabaja en modo calefacción, la potencia

de calefacción que se recibe en el edificio, P_c (W), será igual al calor que se extrae del suelo por unidad de tiempo, $\dot{Q}_{exc,c}$ (W), más la potencia eléctrica, P_{el} (W), que es la que hace trabajar a la bomba y que se transforma en calor:

$$P_C = \dot{Q}_{exc,C} + P_{el} \tag{1}$$

En modo refrigeración, por el contrario, la potencia de refrigeración, P_R (W), más la potencia eléctrica consumida por la bomba de calor igualarán al calor que se inyecta al suelo por unidad de tiempo:

$$P_R + P_{el} = \dot{Q}_{exc,R} \tag{2}$$

Las bombas de calor no generan calor, solo lo transportan de una región de menor temperatura relativa a otra de mayor temperatura. El coeficiente de eficiencia (COP por sus siglas en inglés "Coefficient of Performance) es la ratio entre la potencia térmica obtenida y la potencia eléctrica utilizada para hacer trabajar al compresor de la bomba. En modo calefacción el beneficio (P_C) es el calor depositado en el foco caliente, mientras que en modo refrigeración será el calor disipado en el edificio a refrigerar (P_R). Es decir:

$$P_C = \dot{Q}_{exc,C} \frac{COP_C + 1}{COP_C} \tag{3}$$

y

$$P_R = \dot{Q}_{exc,R} \frac{COP_R - 1}{COP_R} \tag{4}$$

donde COP_C y COP_R son, respectivamente, los coeficientes de eficiencia en modo calefacción y refrigeración. El COP máximo teórico es aquel que puede obtenerse mediante un ciclo de Carnot inverso operando entre dos focos térmicos con estas temperaturas. Sin embargo, la eficiencia es habitualmente menor, ya que hay pérdidas asociadas con el intercambio de calor entre evaporador y condensador, el uso de ventiladores, la compresión del gas, la formación de escarcha en el evaporador, el sistema de accionamiento del compresor y el rozamiento de los fluidos en los circuitos que ocasiona pérdidas de carga. Por todo esto, en las bombas de calor geotérmicas, el COP medio puede estar cerca de 5 (el doble de lo habitual en aerotermia).

3.2.2 – Mecanismo de intercambio de calor con el suelo

El intercambio de calor entre la bomba de calor y el suelo se realiza mediante un fluido que circula por un circuito cerrado en contacto con el suelo y con una temperatura diferente a la de éste. Este es el denominado circuito primario. El circuito secundario es aquel dispuesto en el edificio para su calefacción o refrigeración (radiadores, suelo radiante, etc.) y conectado a la bomba de calor. La potencia de calor intercambiado por el circuito primario viene dada por:

$$-\dot{Q}_{exc} = \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot (T_{out}^{CHP} - T_{in}^{GHP}) \tag{5}$$

donde $\dot{m}$ (kg/s) es el caudal que sale de la bomba, $c_{p,f}$ (J/(kg·ºC) es el calor específico del fluido y $\Delta T = T_{out}^{CHP} - T_{in}^{GHP}$ (ºC) es el salto de temperatura que la bomba da al fluido, es decir, la diferencia entre las temperaturas a las que entra en la bomba de calor, T_{in}^{GHP} (ºC), y sale de la misma, T_{out}^{GHP} (ºC). Nótese que la temperatura de salida de la bomba de calor es la de entrada en el intercambiador de calor primario y que la temperatura de salida del circuito será la de entrada en la bomba de calor.

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 164 – julho/julio/july 2025 – pp. 217-242
https://doi.org/10.14195/2184-8394_164_8 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Idealmente, el salto térmico dado por la bomba de calor se revierte tras recorrer el intercambiador primario. Esto dependerá de la longitud del circuito, de la diferencia de temperatura entre el suelo y el fluido y de la resistividad térmica de los tubos y otros elementos en el intercambiador. En efecto, tomando un elemento diferencial de tubo en una posición se cumplirá que:

$$\dot{q}_{(x,t)}\pi D dx = h\left(T_{w(x,t)} - T_{S(x,t)}\right)\pi D dx = \rho_f c_{p,f} u_f dT \tag{6}$$

siendo D (m) el diámetro del tubo, h (W/(ºC ·m^2)) el coeficiente de intercambio térmico por convección entre fluido y tubo, $T_{S(x,t)}$ (ºC) la temperatura local del suelo alrededor del tubo y $T_{w(x,t)}$ (ºC) la temperatura del agua. El flujo de calor variaría en cada punto, $h\left(T_{w(x,t)} - T_{S(x,t)}\right)$ incluso aunque la temperatura del suelo fuera constante, ya que la temperatura del fluido no lo sería. En este caso la transferencia sería mayor al inicio del circuito, porque es donde la diferencia de temperaturas entre fluido y suelo es mayor. Por ejemplo, suponiendo $T_{S(x,t)} = T_{0,S} = cte.$, la integración de la ecuación (6) anticipa que, cuando el fluido entra con una temperatura T_{out}^{GHP}, se produciría un intercambio de calor global en un recorrido de longitud L (m) dado por:

$$\dot{Q}_{exc} = h\pi DL \frac{T_{in}^{GHP} - T_{out}^{GHP}}{\ln\left(\frac{T_{0,S} - T_{in}^{GHP}}{T_{0,S} - T_{out}^{GHP}}\right)} \tag{7}$$

Igualando las ecuaciones (4) y (7) se podría conocer la longitud total que debería tener un circuito para dar un determinado salto térmico si la temperatura del suelo se mantuviera constante a lo largo de la superficie de intercambio. También se podría obtener la variación de temperatura del fluido en cada punto y por tanto el valor del flujo de calor local. Sin embargo, ni la temperatura varía linealmente a lo largo del recorrido ni el flujo de calor es constante. Si se tiene en cuenta que en el circuito cerrado no se dispone en modo lineal, se producirán interacciones entre tramos próximos del circuito. En ese caso el planteamiento presentado hasta ahora es insuficiente. En ocasiones es posible simplificar y suponer que en un circuito cerrado embebido en un pilote, pantalla, losa o elemento de sostenimiento se produce un intercambio de calor constante en su longitud o superficie. Asumiendo esta simplificación, la valoración del recurso geotérmico consiste en la determinación de la longitud o superficie del elemento termoactivo para que la potencia unitaria de calor intercambiado permita mantener la eficiencia de la bomba geotérmica. En el caso de pantallas termoactivas se define la potencia unitaria por unidad de superficie, $\dot{q}_{exc}$ (W/m^2) Si el intercambiador embebido en la pantalla tiene una superficie S (m^2) resulta:

$$\dot{q}_{exc} = \frac{\dot{Q}_{exc}}{S} \tag{8}$$

Para un pilote la potencia unitaria se definiría en cambio por longitud de pilote termoactivo.

3.2.3 – Factor de utilización

Las bombas de calor no trabajarán a máxima potencia durante toda la temporada. Se define como factor de utilización (tanto de calefacción como de refrigeración), referido a un periodo de tiempo τ (p.e. horas, días, meses o temporadas), $f_{\tau,C(t)}$ o $f_{\tau,R(t)}$ al porcentaje de ese tiempo en el que las bombas tendrían que trabajar a la máxima potencia para, estando paradas el resto del tiempo, bombear el mismo calor al final de esa temporada. Indistintamente, se puede definir como el

porcentaje de la potencia máxima que debería tener la bomba para, trabajando sin interrupción durante todo ese tiempo, haber bombeado el mismo calor al final del periodo.

Con cualquiera de estas dos definiciones del factor de utilización y teniendo en cuenta las ecuaciones (3), (4) y (6) se puede decir que el calor intercambiado unitario medio en modo calefacción durante un periodo τ viene dado por:

$$\langle \dot{q}_{exc,c} \rangle_{\tau} = f_{\tau,C} \dot{q}_{exc,c} = f_{\tau,C} p_C \frac{COP_C}{COP_C + 1} \tag{9}$$

donde $p_C = \mathrm{P_C}/S$ (W/m^2) es la potencia unitaria de calefacción instalada y $\dot{q}_{exc,c}$ es el calor unitario intercambiado por unidad de tiempo cuando la bomba trabaja en modo calefacción a potencia máxima. En modo refrigeración:

$$\langle \dot{q}_{exc,R} \rangle_{\tau} = f_{\tau,R} \dot{q}_{exc,R} = f_{\tau,R} p_R \frac{COP_R}{COP_R - 1} \tag{10}$$

donde $p_R = \mathrm{P_R}/S$ (W/m^2) es la potencia unitaria de refrigeración instalada y $\dot{q}_{exc,R}$ es el calor unitario intercambiado por unidad de tiempo cuando la bomba trabaja en modo refrigeración a potencia máxima.

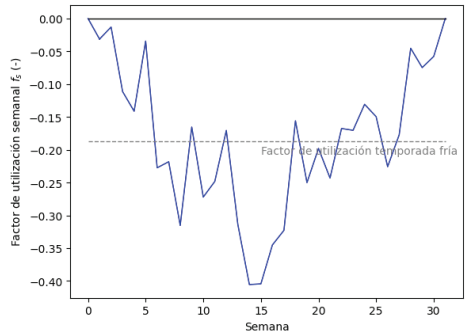

Fig. 2 – Variación del factor de utilización semanal durante una temporada fría de 31 semanas y factor de uso medio de esa temporada.

El factor de utilización de un periodo además varía con el tiempo, ya que la demanda de calefacción o refrigeración varía con la temperatura exterior. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de factor de utilización semanal estimado para una temporada fría en Madrid. En la semana más fría del invierno se alcanzaría un valor de $f_{w,C} = 0{,}4$, lo cual quiere decir que durante esa semana es como si la bomba hubiera trabajado el 40% del tiempo a máxima potencia. El factor medio de toda la temporada fría, en base a las hipótesis consideradas (ver sección 5.1) se situaría alrededor de $f_{s,C} = 0{,}19$.

3.2.4 – Planteamiento del problema de calor

El calor intercambiado unitario medio expresado mediante las ecuaciones (9) y (10) se puede utilizar para modelar el flujo que se aplicará en el problema de contorno a estudiar. La solución de este problema permitirá conocer la variación de temperatura en el suelo y las consecuencias de la interacción suelo-estructura asociada. El problema de transmisión de calor para un medio con

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 164 – julho/julio/july 2025 – pp. 217-242
https://doi.org/10.14195/2184-8394_164_8 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

conductividad térmica constante, consiste en la resolución de la siguiente ecuación de derivadas parciales junto con las condiciones iniciales y de contorno del problema:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda_s \Delta T = \dot{q}_{vol} \tag{11}$$

donde $\dot{q}_{vol}$ (W/m^3) representa las posibles fuentes o sumideros de energía, ρ (kg/m^3) es la densidad del suelo, c_p (J/(kg· ºC) es su calor específico y λ_s (W/(m· ºC) es su conductividad térmica. Las condiciones de contorno habituales son las de temperatura impuesta (tipo Dirichlet), flujo de calor impuesto (Neumann) y flujo de calor dependiente linealmente de la temperatura (Robin). En este caso, en los contornos termoactivos se impondrá:

$$(\lambda_s \boldsymbol{\nabla} T) \cdot \boldsymbol{n} = \langle \dot{q}_{exc} \rangle_{(t)} \tag{12}$$

donde n (m) es el vector normal al contorno y $\langle \dot{q}_{exc} \rangle_{(t)}$ (W/m^2) es flujo de calor medio a aplicar en el contorno.

3.3 – Consideraciones termomecánicas

El terreno y el hormigón y acero de las pantallas experimentan dilataciones y contracciones con los aumentos y disminución de temperatura. En la escala de variación térmica esperada en una pantalla termoactiva se puede asumir un comportamiento termoelástico de acuerdo con el cual las deformaciones unitarias longitudinales, ε_{ii} (-), se pueden asociar con los cambios de temperatura mediante la expresión siguiente:

$$\varepsilon_{ii} = \alpha (T - T_0) \tag{13}$$

donde α (1/K) es el coeficiente de expansividad térmica, T_0 (ºC) es la temperatura de referencia y T (ºC) es la temperatura en cada punto. La temperatura en cada punto se obtiene de la resolución de la ecuación (11) con sus condiciones iniciales y de contorno.

4 – RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

4.1 – Niveles de aproximación

Tanto la valoración del recurso geotérmico como la evaluación de los efectos estructurales producidos por la termoactivación se pueden abordar con diferentes niveles de aproximación (González Tejada et al., 2022), a saber:

- Nivel 0: Valores de referencia obtenidos de la literatura técnica u obtenidos en experiencias anteriores.
- Nivel 1: Modelos basados en soluciones analíticas de la ecuación del calor y de mecánica de medios continuos o teoría de estructuras.
- Nivel 2: Modelos numéricos que resuelven un problema de contorno en el que la termoactivación se introduce como condición de contorno (flujos térmicos) o fuentes o sumideros de calor.
- Nivel 3: Modelos numéricos que resuelven un problema de contorno en el que la termoactivación se introduce teniendo en cuenta la temperatura del fluido, su caudal y su recorrido.

4.2 – Nivel 0: Valores de referencia

El nivel más básico de análisis consiste en utilizar valores de referencia obtenidos de la literatura científica o basarse en experiencias anteriores. Por ejemplo, para estimar la potencia unitaria instalada de calefacción es habitual considerar los en los siguientes rangos propuestos por Brandl (2006):

- Para pilotes termoactivos con diámetro entre 0,3 y 0,5 m: $p_C = 40 - 60$ W/m de tramo termoactivo.
- Para pilotes termoactivos con diámetro superior a 0,6 m: $p_C = 35$ W/m^2 de contacto con el terreno.
- Para muros pantalla, pantallas de pilotes: $p_C = 30$ W/m^2.
- Para losas de cimentación: $p_C = 10 - 30$ W/m^2.

En cuanto a los esfuerzos o deformaciones esperables en pilotes o pantallas hay menos información.

El uso de valores de referencia debe considerarse como una primera aproximación que puede ser conservadora en algunos casos y optimista en otros. Las razones de esta variabilidad son varias. Según Narsilio et al. (2014) existen diversos factores que condicionan el rendimiento de la bomba de calor, tales como la geología y la presencia o no de agua y flujos subterráneos, las propiedades térmicas de los materiales de la estructura y del suelo, el clima local, las dimensiones de la estructura, el uso de la bomba de calor, la configuración y posición de los circuitos y, muy importante, el equilibrio o desequilibrio de los usos entre las temporadas de calefacción y refrigeración. Se concluye que este enfoque es muy limitado y puede conllevar problemas de rendimiento y de retorno de la inversión.

4.3 – Nivel 1: Soluciones analíticas

Existen soluciones analíticas de la ecuación del calor, ecuación (11), en régimen transitorio, Con condiciones de contorno dadas pueden ser muy útiles para predecir la variación con el tiempo del campo de temperaturas en el suelo en los problemas de termoactivación. Estos métodos, para el caso de intercambiadores verticales aislados, se pueden encontrar en recomendaciones como IDAE (2012) o IGSHPA (2000). En el caso de pantallas se puede recurrir a la solución del caso de un medio semi-infinito con un flujo de calor constante en su superficie. En esta situación tenemos que la temperatura a una profundidad z en un instante t viene dada por (Carslaw y Jaeger (1959):

$$T_{(z,t)} = T_0 + \langle \dot{q}_{exc} \rangle \left[\frac{2}{\lambda_s} \sqrt{\frac{\alpha_s t}{\pi}} exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha_s t} \right) - \frac{z}{\lambda_s} erfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha_s t}} \right) \right] = T_0 + \langle \dot{q}_{exc} \rangle G_{(z,t)} \qquad (14)$$

donde $\alpha_s = \lambda_s / \rho c_p$ (m^2/s) es la difusividad térmica del suelo.

Con la ecuación (14), y conocidos los parámetros termodinámicos del suelo, se puede estimar el máximo valor de $\langle \dot{q}_{exc} \rangle$ que limita la variación de temperatura a un cierto nivel tras un tiempo t de operación. Por ejemplo, si se desea limitar la temperatura de trabajo del fluido, se debe limitar la temperatura en la interfaz. Haciendo $z = 0$ la ecuación (14) se transforma en:

$$T_{(z=0,t)} = T_0 + \langle \dot{q}_{exc} \rangle \frac{2}{\lambda_s} \sqrt{\frac{\alpha_s t}{\pi}} \geq T_{min} \qquad (15)$$

donde T_{min} (ºC) es la temperatura mínima que se desea imponer en la interfaz.

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 164 – julho/julio/july 2025 – pp. 217-242
https://doi.org/10.14195/2184-8394_164_8 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

La ecuación (15) puede ser útil para predecir la dilatación o retracción térmica del suelo. Una vez conocida la variación de temperaturas en el terreno, usando las ecuaciones (13) y (14) se puede predecir cuál es el desplazamiento de la superficie libre como:

$$\Delta z_{sup\,(t)} = \int_0^\infty \alpha\left(T_{(z,t)} - T_0\right) dz = \langle \dot{q}_{exc} \rangle \alpha \int_0^\infty G_{(z,t)}\, dz \tag{16}$$

Si se está inyectando calor en el suelo, este aumentará su temperatura en la zona superficial y se producirá una expansión por dilatación térmica. Si la superficie estuviera totalmente libre esta vendría determinada por la ecuación (16). Si por el contrario el movimiento estuviera totalmente impedido, se produciría una variación de las tensiones. En GHSP (2012) se puede consultar el incremento de los esfuerzos en pilotes ejecutados en Londres. Rotta Loria y Laloui (2017) elaboraron algunos ábacos de diseño de pilotes obtenidos mediante simulación numérica. Para pantallas hay menos información. Como primera aproximación al incremento de la presión exterior, se podría estimar utilizando un módulo de balasto equivalente para el suelo. Con esta hipótesis la pantalla será flexible y puede tener algunos movimientos impedidos El cambio en la ley de momentos flectores, cortantes y axiles será más complejo y dependerá de la interacción entre suelo y estructura en cada caso.

Una de las ventajas de la aproximación en nivel 1 frente a los valores de referencia es que estos modelos sí tienen en cuenta las propiedades termodinámicas del suelo (λ_s y α_s), los límites de variación de temperatura que se quieren imponer, (por ejemplo. T_{min}), y el factor de utilización (implícitamente incluido en $\langle \dot{q}_{exc} \rangle$). Su principal desventaja es que desestiman la capacidad de intercambio en suelo bajo el pie de la pantalla. Además, no pueden considerar contornos diferentes al termoactivado y, sobre todo, que no resuelven bien el problema de interacción suelo-estructura, (aunque sí pueden ser útiles para obtener un orden de magnitud del problema).

4.4 – Nivel 2: Modelos numéricos que asumen un intercambio de calor uniforme a lo largo del circuito.

En este nivel de aproximación, se modela el suelo reproduciendo lo más fielmente posible la geometría del problema, las propiedades del suelo, las condiciones iniciales y de contorno. Las ecuaciones del calor y las del problema termomecánico se resuelven numéricamente. La termoactivación se incluye como un intercambio de calor unitario que es uniforme en los contornos termoactivos y que modula su intensidad en el tiempo en base a los factores de utilización en cada instante. La variación en el tiempo puede abordarse con distintos niveles de precisión utilizando factores de utilización medios para toda la temporada o por meses, semanas, días o incluso horas. Para factores de utilización variables en el tiempo, la ecuación del calor se puede resolver aplicando el principio de superposición. A medida que se utilizan factores de utilización medios se suaviza esta respuesta. Se pierde precisión, pero la elevada inercia térmica hace que estas diferencias generalmente no sean importantes.

4.5 – Nivel 3: Modelos numéricos que estiman el flujo de calor en base a la temperatura del fluido y a la temperatura local del suelo

Se plantea el mismo problema de contorno que en el caso anterior y también se resuelve numéricamente. La diferencia se produce en la manera de incluir la termoactivación: se define el recorrido del fluido, se impone el caudal y su temperatura de entrada en el circuito y a partir de ahí se produce una interacción de doble sentido como consecuencia de la trasferencia de calor entre fluido y suelo.

5 – APLICACIÓN AL FALSO TÚNEL DE LA A-5 – APROXIMACIÓN EN NIVEL 2

5.1 – Caracterización de la demanda

La caracterización de la demanda se ha hecho considerando las temperaturas horarias registradas en la estación meteorológica de Casa de Campo, situada a unos 1,15 km del eje del inicio túnel. Los datos provienen de la base de datos del Ayuntamiento de Madrid (2024). Se ha analizado un periodo de 5 años transcurrido entre octubre de 2019 y septiembre de 2024.

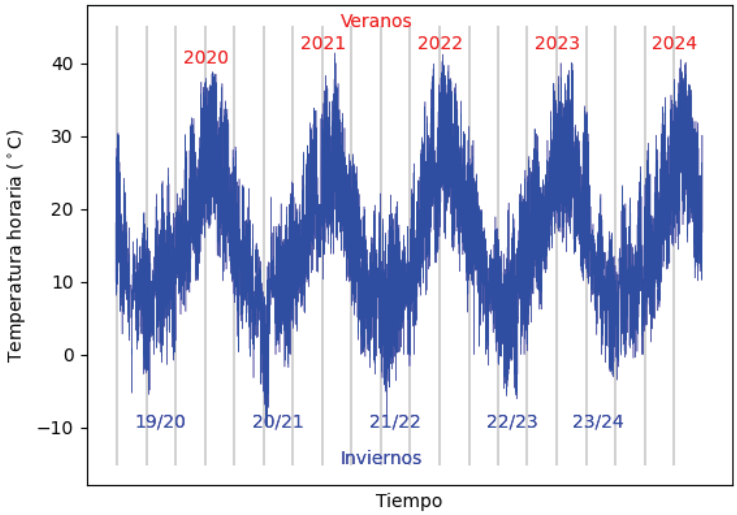

Fig. 3 – Temperaturas horarias exteriores registradas en la estación de Casa de Campo entre octubre de 2019 y septiembre de 2024.

La temperatura media registrada en este periodo fue de 15,6°C y las temperaturas máxima y mínima fueron 41,4°C y -9,9°C, respectivamente.

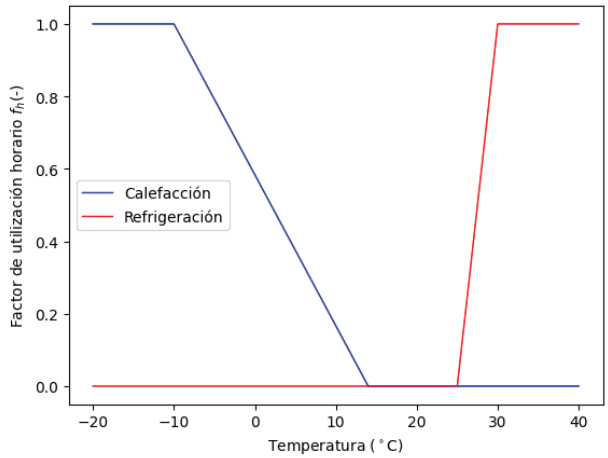

Fig. 4 – Funciones de demanda sintéticas utilizadas para determinar la demanda horaria de calefacción o refrigeración medios en función de la temperatura exterior.

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 164 – julho/julio/july 2025 – pp. 217-242
https://doi.org/10.14195/2184-8394_164_8 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Las temperaturas horarias se han utilizado para estimar los factores de utilización horarios mediante curvas de demanda sintéticas basadas en funciones de tipo rampa (Figura 4). Se ha supuesto que la demanda de calefacción se produce entre octubre y abril cuando la temperatura exterior baja de 14°C. Una segunda hipótesis es considerar que la potencia demandada crece linealmente hasta alcanzar $f_{h,C} = 1{,}0$ por debajo de -10°C.

Para la refrigeración se ha supuesto que esta se produce entre mayo y septiembre cuando la temperatura exterior supera los 25°C, y que la máxima potencia se produce por encima de 30°C. En sistemas hibridados, la elección de estos umbrales es arbitraria, siempre y cuando se garantice que el calor inyectado y extraído estén compensados al final del periodo considerado. Si no se cumple esta hipótesis deben existir sistemas de calefacción y refrigeración alimentados con otras fuentes de que puedan complementar la demanda cuando sea necesario.

Por cuestiones de practicidad y para reducir el coste de computación, en esta investigación se han considerado variaciones semanales del factor de utilización., esto es, el uso medio de la calefacción o refrigeración en cada semana.

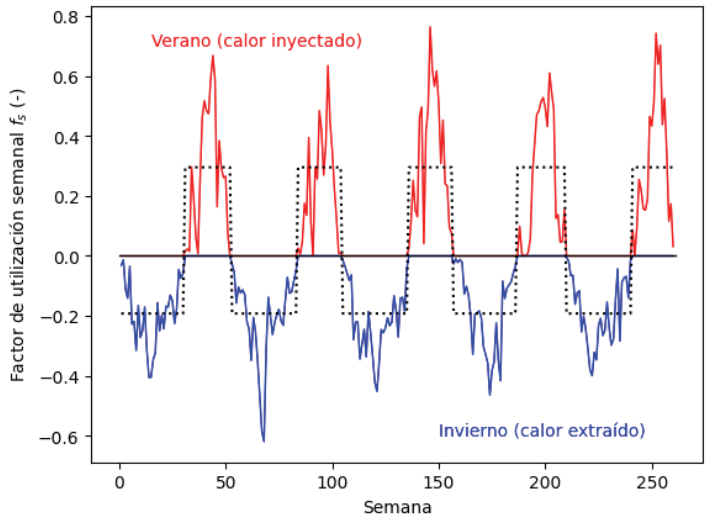

Fig. 5 – Factores de utilización semanales obtenidos tras promediar sobre los factores de utilización horarios de cada semana.

En la Figura 5 se muestran los factores de utilización semanales, tanto para el uso en calefacción (calor extraído del suelo) como en refrigeración (calor inyectado al suelo). En el periodo contemplado, los factores de utilización parciales medios de la temporada para calefacción y refrigeración fueron $f_{s,C} = 0{,}19$ y $f_{s,R} = 0{,}30$, respectivamente.

5.2 – Modelado numérico (nivel 2)

Para estudiar la interacción entre el suelo y la estructura termoactiva se ha realizado un modelo de elementos finitos de una sección representativa del falso túnel. Los cálculos se han realizado con el programa MIDAS GTS-NX. Se ha escogido una sección en la que las sobrecargas de uso en el terreno son mayores (40 kPa) y de las de mayor profundidad. Las dimensiones serían: solera situada se han supuesto elásticos y lineales, con un criterio de rotura de tipo Mohr-Coulomb. Las características geométricas y los materiales se muestran en la Figura 6.

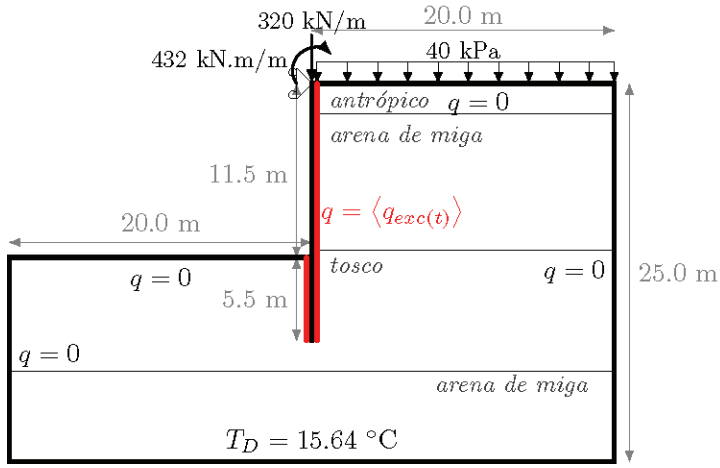

Fig. 6 – Esquema del modelo termomecánico utilizado para evaluar el recurso geotérmico y la interacción suelo-estructura.

Los parámetros geotécnicos utilizados en este trabajo (Tabla 1) se han estimado escogiendo valores típicos situados dentro de los rangos referidos por Oteo Mazo et al. (2003) y tratando de reproducir lo más fielmente posible las deformaciones y leyes de esfuerzos estimados en el Proyecto de Construcción.

Tabla 1 – Propiedades mecánicas y térmicas de los materiales tipo suelo utilizadas en este estudio.

Material	**Módulo de Young**	**Módulo de Poisson**	**Ángulo de rozamiento**	**Cohesión**	**Peso específico**
	E (kPa)	ν (-)	ϕ' (°)	c'(kPa)	γ_{ap} (kN/m^3)
Relleno antrópico	8000	0,35	28	0	18
Arenas de miga / tosquizas	55000	0,30	33	10	20
Tosco	150000	0,30	30	25	21

Los parámetros termodinámicos se han estimado de acuerdo con los valores habitualmente reportados para este tipo de suelos y contenidos de humedad (Pahud, 2002; CFMSG, 2017). De acuerdo con la granulometría de las arenas de miga y toscos y con el grado de saturación se puede concluir (Farouki, 1986) que en este caso el mecanismo de transferencia de calor principal será la conducción térmica. Tras considerar valores de referencia reportados en la literatura (CFMSG, 2017) se ha establecido una conductividad térmica de $\lambda_s = 1.0$ W/(m· ºC) para los suelos y de $\lambda_c = 1{,}5$ W/(m· ºC) para el hormigón. La capacidad calorífica se ha tomado $c_{p,s} = 800$ J/(kg· ºC) de media para los suelos y $c_{p,h} = 1500$ J/(kg ºC). E coeficiente de expansividad térmica empleado ha sido $\alpha_s = 1{,}2\text{E-}5$ (1/ ºC).

La pantalla se ha modelado con elementos tipo viga unidimensionales con sección transversal circular de 0,8 m de diámetro y espaciamiento entre ejes de 0,95 m. Estas dimensiones se corresponden con las de los pilotes de la pantalla estudiada. Entre pantalla y suelo se ha introducido una interfaz elástica lineal. La resistencia máxima al desplazamiento se ha definido un criterio tipo Mohr-Coulomb.

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 164 – julho/julio/july 2025 – pp. 217-242
https://doi.org/10.14195/2184-8394_164_8 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

El tipo de cálculo desarrollado ha sido termo-mecánico acoplado. Las etapas de excavación se modelaron en régimen permanente, mientras que la termoactivación se resuelve en régimen transitorio con pasos temporales de $\Delta T = 1{,}0$ día. No se ha recurrido a un modelo termo-hidro-mecánico debido a la no presencia de niveles freáticos estables en la zona afectada.

El modelo contempla las siguientes etapas:

- Situación inicial con pantalla de pilotes y sobrecarga en el trasdós.
- Excavación del relleno antrópico y ejecución de la losa superior.
- Excavación bajo la losa superior hasta la profundidad de 11,5 m y ejecución de la losa inferior.
- Termoactivación.

La última etapa consiste en un estudio en régimen transitorio en el que la pantalla inyecta o extrae calor en función de la demanda, con una variación semanal.

La condición termodinámica inicial es la de temperatura constante $T_0 = 15{,}64$ºC. La simulación comienza al principio del otoño, cuando la temperatura media diaria se acerca mucho a la temperatura media anual.

Las condiciones de contorno consideradas fueron:

- Temperatura constante igual a la temperatura inicial en la parte inferior (T_0=15,64ºC).
- Condiciones de contorno adiabáticas en los laterales, en el fondo del túnel y en la parte superior del terreno del trasdós.
- Flujo de calor uniforme y variable en el tiempo en la pantalla termoactiva. se ha supuesto que los circuitos pueden intercambiar a ambos lados y que, por tanto, ahí la inyección o extracción de calor es el doble de la que ocurre en el tramo correspondiente con la zona excavada.

$$\langle \dot{q}_{exc} \rangle_{exc,eq} H_t = \langle \dot{q}_{exc} \rangle_{exc} H_{ex} + 2 \langle \dot{q}_{exc} \rangle_{exc} H_{em} \tag{17}$$

  donde $\langle \dot{q}_{exc} \rangle_{exc,eq}$ (W/m^2) es el calor unitario intercambiado por unidad de tiempo equivalente de la pantalla, $\langle \dot{q}_{exc} \rangle_{exc}$ (W/m^2) es el calor unitario intercambiado por unidad de tiempo en la interfaz entre suelo y pantalla y H_t (m), H_{ex} (m) y H_{em} (m) son, respectivamente, las alturas total de la pantalla, de la zona de excavación y del empotramiento.
- Según el Proyecto de Construcción (ESTEYCO y SUBTERRA, 2023), los esfuerzos máximos en la losa son un esfuerzo axil de 320 kN/m y un momento flector de 432 kN·m /m. La losa tiene coaccionado el desplazamiento lateral.

Con este modelo se probaron diferentes niveles de potencia instalada unitaria, intentando maximizar el calor intercambiado y evitando que la temperatura del trasdós aumentase o disminuyera más de 13°C. En base a las curvas de funcionamiento de las bombas de calor seleccionadas, se puede contrastar si este límite está justificado en lo que se refiere al rendimiento térmico. En cuanto a la interacción suelo estructura, se debe valorar si los desplazamientos o esfuerzos impuestos son asumibles para no comprometer la seguridad ni el servicio. Finalmente conviene evitar temperaturas negativas que pudieran congelar localmente el agua intersticial.

6 – RESULTADOS

6.1 – Potencia unitaria y variación de temperatura

Se han analizado los resultados en las semanas de los años 1 y 5 con el pico de demanda más intenso (mayor factor de utilización), tanto de calefacción como de refrigeración. Se ha comprobado el valor de las estimaciones 5 semanas después, ya que, debido a la inercia térmica del suelo, los

valores extremos se producen después de los picos de demanda. En la Figura 7 se muestran los campos de temperatura y de movimientos estimados tras el fin del primer invierno y en las Figura 8 y 9 se muestran las temperaturas y movimientos tras el último verano de la serie.

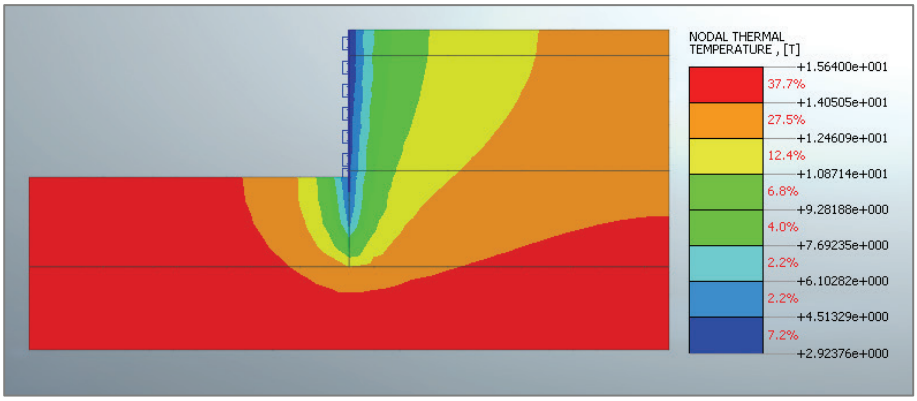

Fig. 7 – Temperatura estimada en el suelo después del primer invierno simulado, con valores comprendidos entre 2,9 y 15,64ºC. Los porcentajes indican el área con temperatura comprendida dentro de cada intervalo.

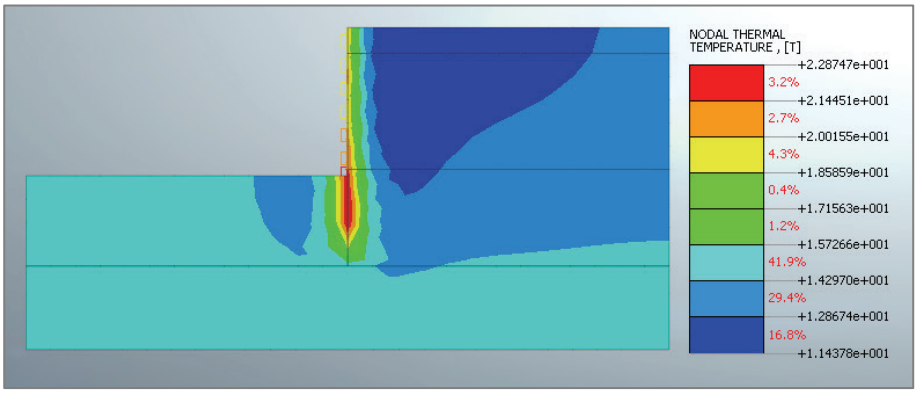

Fig. 8 – Temperatura estimada en el suelo después del quinto verano simulado (temperaturas entre 11,4 y 22,9ºC). Los porcentajes indican el área con temperatura comprendida dentro de cada intervalo.

6.2 – Potencia unitaria y variación de temperatura

Se han realizado varias simulaciones hasta garantizar que en los instantes de control la temperatura mínima esté en todo momento por encima de 0°C. El valor más bajo se ha hallado el primer año: $T_{min} = 2{,}3$ °C. Esto se ha conseguido fijando un calor unitario intercambiado por unidad de tiempo a potencia máxima de $\dot{q}_{exc,R} = q_{exc,C} = 12{,}0$ W/m^2. Si $f_{season,C} = 0{,}19$,se corresponde, mediante la Equacione 9, con un calor medio intercambiado en la temporada fría de $\langle \dot{q}_{exc} \rangle_{exc,C} = -3{,}0$ W/m^2, es decir, que es como si la bomba hubiese estado 7 meses extrayendo de media 3,0 W/m^2 de calor del suelo. Si además $COP_C = 4{,}0$, mediante la Ecuación (9) se obtendría una potencia unitaria instalada de $p_C = 20{,}0$ W/m^2.

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 164 – julho/julio/july 2025 – pp. 217-242
https://doi.org/10.14195/2184-8394_164_8 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

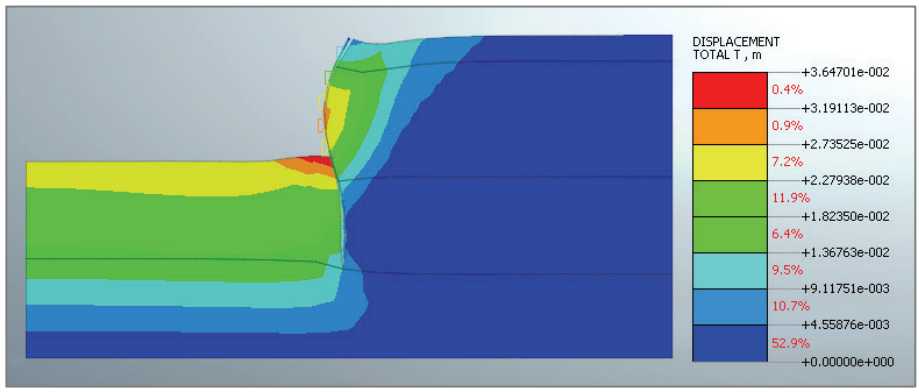

Fig. 9 – Movimientos totales estimados en el suelo después del quinto verano simulado (entre 0 y 36,5 mm). Los porcentajes indican el área con desplazamiento comprendido dentro de cada intervalo.

6.3 – Efecto estructural

En las Figuras 10 y 11 presentan las variaciones en las leyes de momentos flectores causadas por al termoactivación a diferentes profundidades de la pantalla y del tiempo. Estos se comparan con los reportados en el Proyecto de Construcción tras la excavación, cuyo cálculo se realizó modelando la interacción entre la pantalla y el suelo mediante resortes. Lo mismo se hace en las Figuras 12 y 13 para los esfuerzos cortantes y en las Figuras 14 y 15 para los desplazamientos horizontales.

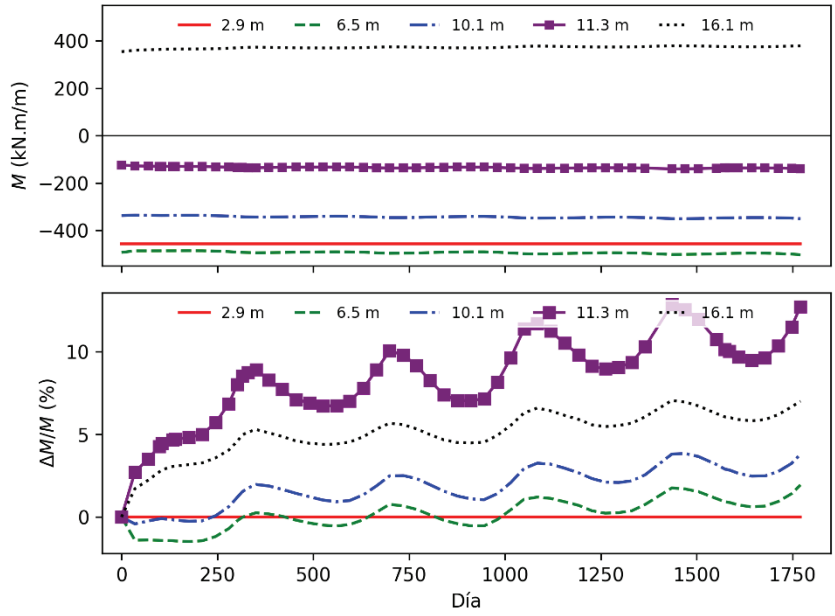

Fig. 10 – Variación con el tiempo del momento flector medido a varias profundidades de la pantalla (desde su cabeza) en valor absoluto y porcentual causado por la termoactivación.

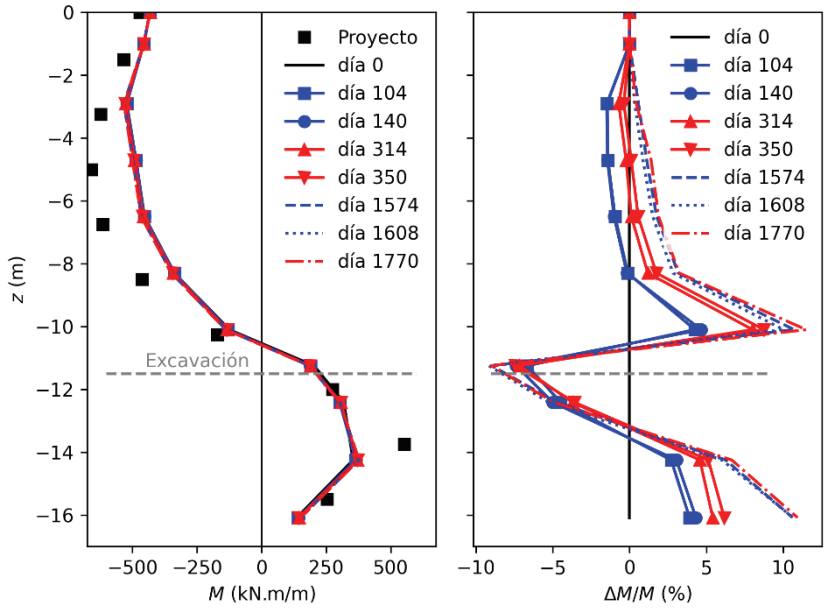

Fig. 11 – Ley de momentos flectores en la pantalla y efecto de la termoactivación en varios instantes.

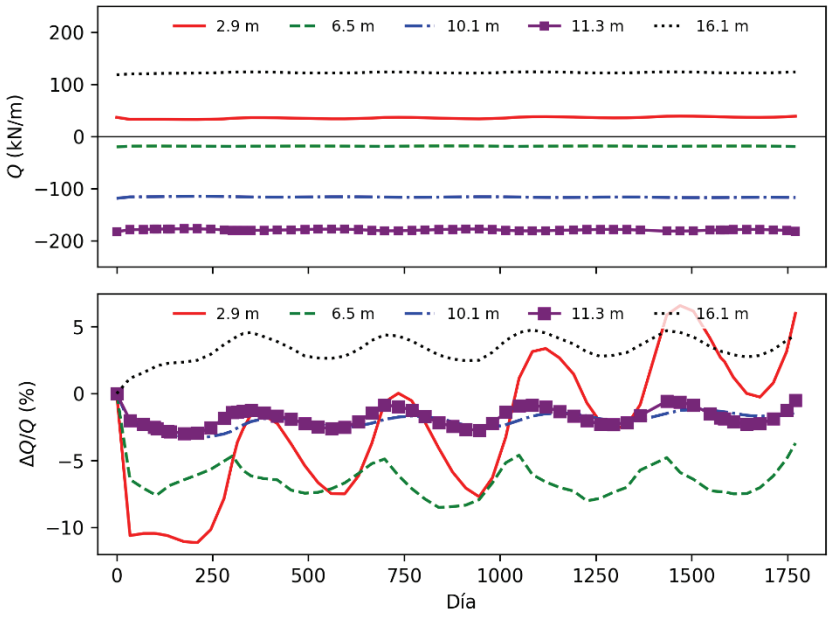

Fig. 12 – Variación con el tiempo del esfuerzo cortante medido a varias profundidades de la pantalla (desde su cabeza, apuntalada) en valor absoluto y porcentual causado por la termoactivación.

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 164 – julho/julio/july 2025 – pp. 217-242
https://doi.org/10.14195/2184-8394_164_8 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

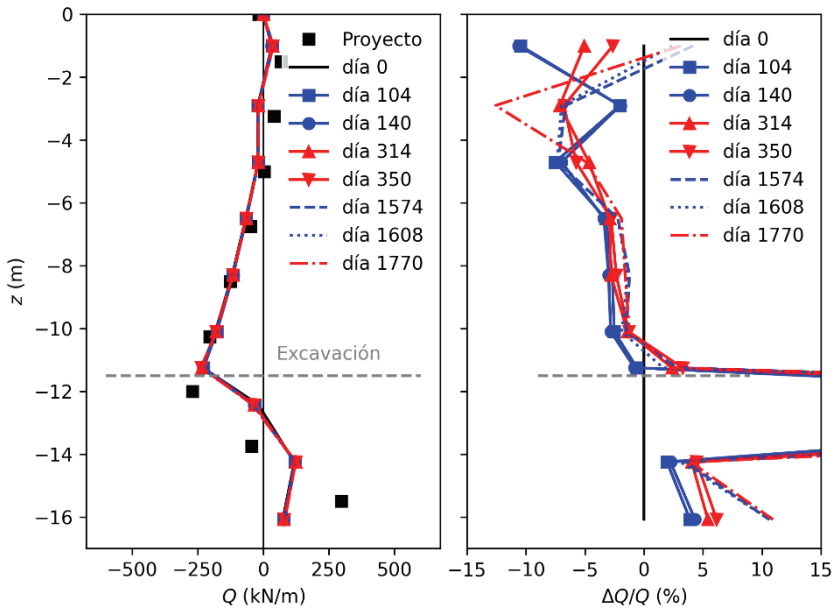

Fig. 13 – Ley de esfuerzos cortantes en la pantalla y efecto de la termoactivación en varios instantes.

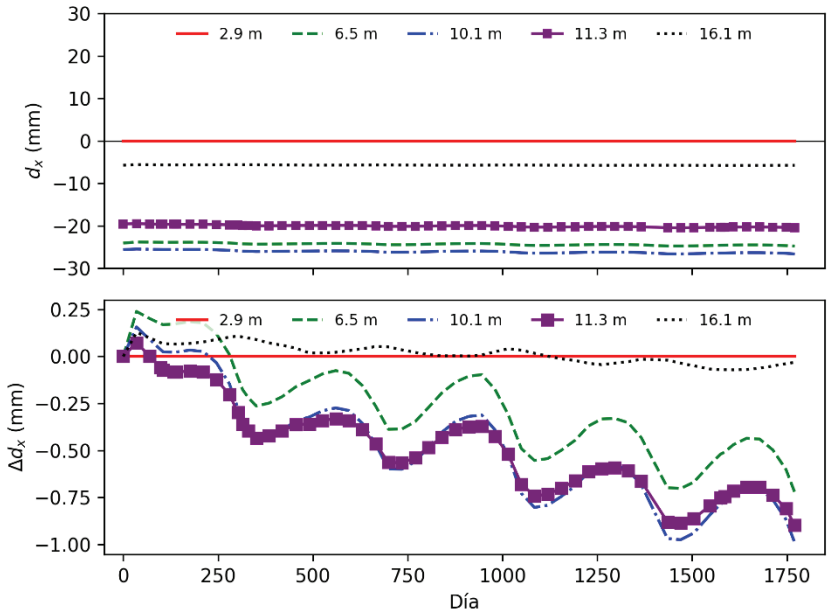

Fig. 14 – Variación con el tiempo del desplazamiento horizontal medido a varias profundiades de la pantalla (desde su cabeza) en valor absoluto e incremental causado por la termoactivación.

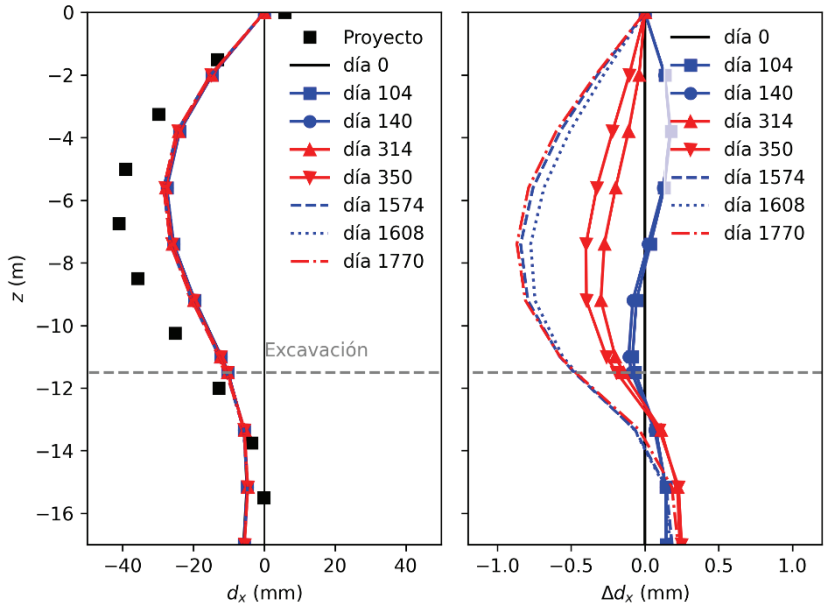

Fig. 15 – Ley de desplazamientos horizontales en la pantalla y efecto de la termoactivación en varios instantes.

7 – DISCUSIÓN

Se observa que, con la termoactivación, y aunque la temperatura en la interfaz suelo-pantalla varíe cíclicamente, se produce también una variación de la temperatura media cada temporada. Si bien los factores de utilización mostrados en la Figura 5 están pensados para equilibrar las extracciones de calor en las temporadas frías con las inyecciones de calor en las temporadas cálidas, la realidad es que se produce una transferencia de calor desde la pantalla al terreno o a la inversa Esto explica que haya histéresis y no se recupere la temperatura inicial en la interfaz. Un cambio en los patrones de consumo (p.e. reducir la inyección de calor durante una temporada) permitiría recuperar las temperaturas iniciales.

Otro aspecto importante que condiciona la evolución de las temperaturas es el momento en el que se empieza a operar. En este caso, se comenzó con una extracción de calor en temporada fría. Si luego se inyectase el mismo calor en la temporada cálida siguiente, se prevería un trabajo en el rango situado entre la temperatura mínima y una temperatura ligeramente por encima de la inicial. Esto hace que se produzcan fundamentalmente una contracción térmica del suelo, con un menor impacto en la pantalla que lo que supondría la dilatación térmica que ocurriría con un rango de trabajo por encima de la temperatura inicial. Se concluye que el comportamiento vendrá condicionado por la estrategia de explotación, por ejemplo, se podría comenzar en la temporada cálida o seguir haciéndolo en la fría pero aumentando la inyección de calor en la primera temporada caliente para que la bomba trabajase en contacto con un suelo en un rango centrado en la temperatura inicial (por ejemplo, $T \in [3{,}30]$ °C). Además, de cara al diseño del sistema, la estrategia de explotación debe tener en cuenta la variación de temperaturas en el largo plazo (evaluando típicamente el comportamiento esperado tras 25 o 30 años de explotación).

En relación con la potencia unitaria instalable para evitar temperaturas por debajo de 2°C se obtiene un valor $p_C = 20{,}0$ W/m^2 más bajo del reportado para pantallas por Brandl (2006),

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 164 – julho/julio/july 2025 – pp. 217-242
https://doi.org/10.14195/2184-8394_164_8 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

30,0 W/m^{2}. Esto se explica por la relativamente baja conductividad térmica asignada al terreno y por la poca profundidad de la pantalla.

Como puede verse el efecto estructural de la termoactivación en este caso es muy limitado, algo que ya han reportado otros autores en pantallas (Bourne et al., 2016; Sterpi et al., 2017; Barla et al. 2020; Dai et al., 2023; Zhou et al., 2023; Hu et al., 2024). Las variaciones máximas de momento flector o esfuerzo cortante están próximas al 10% pero no se producen en los puntos que ya estaban más solicitados. Con los factores de seguridad habituales (p.e. 1,5) esta variación sería asumible. Aunque los esfuerzos aumenten cada temporada esto se explica por el hecho de que la variación de la temperatura en la interfaz también lo hace. Bastaría con cambiar el patrón de uso para corregir este fenómeno, que además estaría limitado por los umbrales establecidos para garantizar el rendimiento de la bomba de calor. Con respecto a los desplazamientos, se esperan movimientos en la zona central inferiores a 1 mm, cuando de la propia excavación ya se esperaban variaciones de unos pocos centímetros.

Para reforzar estas ideas, se puede recurrir a los modelos aproximados del nivel 1. En efecto, teniendo en cuenta un calor medio extraído durante la temporada de $\langle \dot{q}_{exc} \rangle_{exc,C} = -3{,}0$ W/m^2 en cada superficie de contacto pantalla-suelo, se podría obtener mediante la ecuación (13) cuál es la variación de temperatura representada tras 7 meses de operación (Figura 15). El mínimo se esperaría en $T_{min} = 4{,}5$°C, próximo al obtenido mediante nivel 2. Las diferencias se deben a que en aquel caso el calor extraído no fue constante y a las condiciones de contorno.

El modelo aproximado de nivel 1 también puede usarse para entender el efecto de la conductividad del suelo. En efecto en la Figura 15 se también cómo si la conductividad del suelo fuera el doble, las temperaturas mínimas alcanzadas cuando se extrae el mismo calor medio durante 7 meses, son sensiblemente superiores ($T_{min} = 4{,}5$ °C para $\lambda_s = 1{,}0$ W/(m·°C) frente a $T_{min} = 10$°C para $\lambda_s = 2{,}0$ W/(m·°C). Por lo tanto, con una conductividad mayor se podría extraer más calor del suelo. Esto demuestra que la baja conductividad del suelo es la responsable de la relativamente baja potencia unitaria instalable en el caso investigado.

Finalmente, mediante la Ecuación (16) se puede estimar la retracción térmica que experimentaría el suelo debido a una disminución de la temperatura. El resultado es del orden de 0,2 mm. Si bien la interacción suelo estructura es la que condicionará la deformación en cada punto, se puede ver que tras el pico de demanda del primer invierno la deformación horizontal máxima era de ese orden (Figura 15).

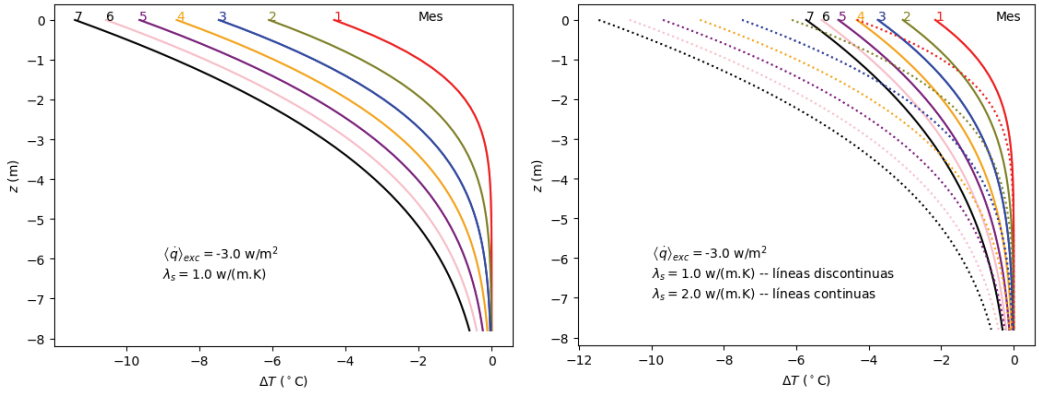

Fig. 16 – Variación de temperatura estimada con la profundidad tras 7 meses de operación y de acuerdo con un modelo analítico simplificado (Ecuación (9)).

8 – CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha analizado cómo la termoactivación de los muros pantallas afectan a la interacción suelo-estructura. Primero se han presentado los niveles de aproximación del problema, tanto para valorar el recurso geotérmico como para limitar el efecto estructural. Después se han aplicado estos modelos a un caso real de un falso túnel en construcción en Madrid. Al no esperarse la existencia de un nivel freático estable en la zona de actuación, no ha sido necesario recurrir a una modelización termo-hidro-mecánica.

Debido a la relativamente baja conductividad asignada en esta investigación a los suelos de Madrid ($\lambda_s = 1{,}0$ W/(m·°C) y a la profundidad de las pantallas (17 m de profundidad en la sección considerada, con profundidad bajo solera de 5,5 m), la potencia unitaria instalable parece estar en este caso más cerca de 20 W/m^2 que de los 30 W/m^2 usados como valor de referencia. Este límite se impone para evitar que la temperatura disminuya por debajo de 2°C en en cualquier punto durante el periodo de explotación. No obstante, una estrategia más inteligente y un control en tiempo real podría permitir un rango de temperaturas de trabajo más amplio, lo que al final se traduciría en una mayor potencia instalable.

Con respecto al efecto estructural este se prevé muy reducido y además no ocurrirá en los puntos inicialmente sometidos a mayores esfuerzos. En cuanto a los desplazamientos adicionales quedan por debajo de un milímetro para una pantalla que ya esperaba un desplazamiento tras la operación de unos pocos centímetros.

La conclusión principal de esta investigación es que el rendimiento termodinámico es el aspecto más limitante en este caso, ya que va a imponer un rango de temperaturas de trabajo durante la operación en el que los efectos estructurales serán muy limitados. No obstante, las condiciones de contorno y el modo de operación son las que determinan el efecto final en la estructura.

9 – AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la asociación Madrid Subterra su labor promoviendo la exploración y explotación del potencial de energía limpia y renovable del subsuelo de Madrid y en particular su influencia para que el Paseo Verde del Suroeste (Soterramiento de la A5) se haya proyectado como un túnel termoactivo. También agradecen a las Direcciones Generales de Planificación e Infraestructuras de Movilidad y de Energía y Cambio Climático del Área de Gobierno de Urbanismo, Medio Ambiente y Movilidad del Ayuntamiento de Madrid por la información facilitada y por la promoción y ejecución del Paseo Verde del Suroeste (Soterramiento de la A5) como túnel termoactivo.

10 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ayuntamiento de Madrid. (2024). Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid.

Arzanfudi, M. M.; Al-Khoury, R.; Sluys, L. J.; Schreppers, G. M. A. (2020). *A thermo-hydro-mechanical model for energy piles under cyclic thermal loading*. Comput. Geotech., 125. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103560

Barla, M.; Di Donna, A.; Santi, A. (2018). *Energy and mechanical aspects on the thermal activation of diaphragm walls for heating and cooling.* Renew. Energy, 147. pp. 2654-2663, https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.074

Barla, M.; Insana, A.; Di Caravacio, A. B. (2023). *Lessons learnt from a full-scale installation of energy walls.* Symposium on Energy Geotechnics 2023, https://doi.org/10.59490/seg.2023.517

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 164 – julho/julio/july 2025 – pp. 217-242
https://doi.org/10.14195/2184-8394_164_8 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Bimaganbetova, M.; Zhang, D.; Kim, J. (2022). *Structural responses of energy storage pile foundations under thermal-mechanical loadings*. J. Build. Eng., 45. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103539

Brandl, H. (2006). *Energy foundations and other thermo-active ground structures*. Geotechnique, 56 (2), pp. 81-122. https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81

Bourne-Webb, P.J., Bodas Freitas, T. M.; da Costa Gonçalves, R. A. (2016). *Thermal and mechanical aspects of the response of embedded retaining walls used as shallow geothermal heat exchangers*. Energy and Buildings, 125, pp. 130-141. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.075

Bourne-Webb, P.J.; Bodas Freitas, T.M.; Freitas Assunção, R.M. (2019). *A review of pile-soil interactions in isolated, thermally-activated piles*. Comput. Geotech., 108, pp. 61-74. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.008

Carslaw, H. S.; Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids*. London, Oxford University Press.

CFMSG (2017). Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en oeuvre des géostructures thermiques. Le Comité Francais de Mécanique des Sols et de Géotechnique /SYNTEC INGENIERIE/ SOFFONS-FNTP.

Dai, Q.; Zhang, D.; Li, Z. (2023). *Mechanical assessment of energy wall in the long term*. Acta Geotechnica, 18 (1), pp. 1-34. https://doi.org/10.1007/s11440-022-01579-5

Di Donna, A.; Cecinato, F; Loveridge, F. (2017). *Energy performance of diaphragm walls used as heat exchangers*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 170 (3), pp. 232-245. https://doi.org/10.1680/jgeen.16.00092

Escario, V. (1986). *Síntesis geotécnica de los suelos de Madrid y su alfoz*. Ministerio de Fomento.

ESTEYCO y SUBTERRA (2023). *Proyecto de Ejecución del Paseo Verde Del Suroeste*. Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad, Ayuntamiento de Madrid. Soterramiento de la A5 – Paseo de Extremadura.

European Commission (2016). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. An EU strategy on heating and cooling.* COM/2016/051 final.

Fadejev, J.; Simson, R.; Kurnitski, J.; Haghighat, F. (2017). *A review on energy piles design, sizing and modelling*. Energy, 122, pp. 390-407. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.097

Farouki, O. T. (1986). *Thermal Properties of Soils*. Series on Rock and Soil Mechanics, vol. 11. Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld.

GSHP (2012). Thermal Pile Design, Installation & Materials Standards. Ground Source Heat Pump Association.

González Tejada, I.; Muñoz Antón, J.; Antolín, P. (2022). *Valoración del recurso geotérmico en una pantalla termoactiva*. Boletín de la SEMSIG. 211.

Hu, S.; Kong, G.; Aboel-Naga, H.; Yang, Q. (2024). *Thermomechanical response of field-scale energy wall under different heating operations.* J. Geotech. Geoenviron. Eng., 150 (3),, Article 06023011. https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-12066

IDAE (2012). Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía.

IGSHPA, (2000). Grouting for Vertical Geothermal Heat Pump Heat Pump Systems, Engineering Design and Field Procedures Manual. Hoklaoma State University, Stillwater.

Laloui, L.; Loria, A. R. (2019). *Analysis and design of energy geostructures: theoretical essentials and practical application*. Academic Press.

Lund, J. W.; Freeston, D. H.; Boyd; T. L. (2011). *Direct application of geothermal energy 2010 worldwide review*. Geothermics, 40, pp. 159-180. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.07.004

Makasis, N.; Narsilio, G. A. (2020). *Energy diaphragm wall thermal design: the effects of pipe configuration and spacing.* Renew. Energy, 154, pp. 476-487, https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.112

Mi, M.; Cai, G.; Li, X.; Li, H.; Zheng, W.; Shi, Y. (2024). *Investigation on heat transfer performance of energy diaphragm walls under groundwater flow condition*. Journal of Building Engineering, 88, pp. 109076. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109076

Narsilio, G.A.; Bidarmaghz, A.; Colls, S. (2014). *Geothermal energy: introducing an emerging technology*. Proceedings of International Conference on Advances in Civil Engineering for Sustainable Development, pp. 141-154.

Oteo Mazo, C.; Rodríguez Ortíz, J. M.; Mendaña Saavedra, F. (2003). *Sobre los sistemas y parámetros geotécnicos de diseño en la Ampliación del Metro de Madrid*. Revista de Obras Públicas, 3429, pp. 49-67.

Pahud, D. (2002). Geothermal Energy and Heat Storage. SUPSI DCT LEEE Laboratorio di Energia, Ecologia ed Economia, p. 133.

Peterson, E. L.; Shafagh, I. (2022). *Evaluation of diaphragm wall heat exchanger potential*. Energy Build., 266. pp. 112107. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112107

Rammal, D.; Mroueh, H.; Burlon, S. (2020). *Thermal behaviour of geothermal diaphragm walls: evaluation of exchanged thermal power*. Renewable Energy, 147, pp. 2643-2653, https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.068

Román López, E.; Gómez Muñoz, G.; De Luxán García de Diego, M. (2017). *Urban heat island of Madrid and its influence over urban thermal comfort*. P. Mercader-Moyano (Ed.), Sustainable Development and Renovation in Architecture, Urbanism and Engineering, pp. 415-425. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51442-0_34

Rotta Loria, A.F.; Laloui, L.; (2017). *Displacement interaction among energy piles bearing on stiff soil strata*. Comput Geotech., 90, pp. 144-154. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.06.008

Rui,Y.; Yin, M. (2018). *Thermo-hydro-mechanical coupling analysis of a thermo-active diaphragm wall*. Canadian Geotechnical Journal, 55 (5), pp. 720-735. https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0158

Saggu, R.; Chakraborty, T. (2017). *Thermomechanical analysis and parametric study of geothermal energy piles in sand*. Int. J. GeoMech., 17 (9). https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000962

Sailer, E.; Taborda, D. M.G.; Zdravković, L; Potts, D. M. (2019) *Fundamentals of the coupled thermo-hydro-mechanical behaviour of thermo-active retaining walls*. Computers and Geotechnics, 109, pp. 189-203. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.01.017

Sailer, E.; Taborda, D. M.; Zdravković, L.; Potts, D. M. (2022). *A novel method for designing thermo-active retaining walls using two-dimensional analyses*. Proceedings of the Institution

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 164 – julho/julio/july 2025 – pp. 217-242
https://doi.org/10.14195/2184-8394_164_8 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 175 (3), pp. 289-310. https://doi.org/10.1680/jgeen.19.00291

Sterpi, D.; Coletto, A.; Mauri, L. (2017). *Investigation on the behaviour of a thermo-active diaphragm wall by thermo-mechanical analyses*. Geomech. Energy Environ., 9, pp 1-20. https://doi.org/10.1016/j.gete.2016.10.001