

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOSA PILOTADA DE CIMENTACIÓN ACTIVA PARA LA CLIMATIZACIÓN DE UNA NAVE INDUSTRIAL.

Ignacio Zuloaga Fábrega
Ingeniero Civil (CIV), Civil Engineer (ICE y ASCE)
MSc. Mecánica del Suelo (DIC)
Director General Ingeosolum, S.L.

Javier Alonso Sierra Galeano
Ingeniero Civil (SCI)
Master en Ingeniería Geológica (UCM)

Resumen

En este artículo se exponen los elementos básicos que se deben tener en cuenta para el diseño y ejecución de una losa pilotada de cimentación activa. Destacando las variables físicas principales, los métodos de análisis, los problemas más frecuentes durante la instalación del intercambiador de calor. Por último se presenta la instrumentación instalada en la losa de cimentación activa para el seguimiento de las temperaturas.

Keywords: Temperatura del terreno, del aire, conductividad térmica, capacidad térmica del suelo, sondas geotérmicas, pruebas de carga, instrumentación térmica, cimentación directa, losa pilotada, cimentación activa.

1 OBJETIVO

Presentar de forma general y resumida los requisitos necesarios para el análisis geotécnico, diseño e instalación de una Losa de Cimentación Pilotada Activa, que se utiliza como intercambiador de calor, en el proyecto de climatización de una nave industrial en Jaén, Andalucía, con una potencia térmica para climatización de 772 kW, de los cuales la Losa de Cimentación Pilotada Activa proporciona 140 kW al sistema.

2 PRINCIPIOS GENERALES

Una Losa Pilotada Activa es un elemento de cimentación con un doble propósito; el primero: de transmitir las cargas de la estructura al terreno, y el segundo: que sirva como elemento intercambiador de energía geotérmica para la calefacción y refrigeración de la edificación.

La posibilidad de aprovechar este potencial energético del subsuelo a través de elementos de cimentación depende de las dimensiones de la estructura, el tipo de cimiento, las condiciones térmicas del terreno y a las exigencias de carga térmica del proyecto.

En la Losa de Cimentación Activa se introducen intercambiadores de material sintético, a través de

los cuales fluye el líquido de absorción, que transporta la energía obtenida del terreno a la bomba de calor geotérmica (BCG) instalada en el edificio; dependiendo de las condiciones de intercambio térmico, este líquido puede ser agua + glicol.

A continuación, los circuitos de tuberías se conectan a un distribuidor mediante conductos de interconexión. Estos conductos se instalan en la zona inferior de la solera de la estructura, que están en contacto con la tierra.

Posteriormente los conductos se agrupan en un distribuidor o múltiple principal y, de ser posible, ubicado cerca de la BCG. El distribuidor consiste en un colector de flujo y reflujo, al que se conectan los circuitos de tuberías. Finalmente todos los ductos procedentes del colector deberán conducirse a la BCG, sin olvidarse que dichos tubos deben estar recubiertos con materiales que impidan la pérdida de calor del fluido de circulación.

3 PARÁMETROS GEOLÓGICOS

Geológicamente, el área de la parcela en estudio se asienta sobre terrenos del Guadalquivir y rellenos de valle del terciario-cuaternario.

Se trata de materiales de diversa naturaleza y edad en disposición caótica; arcillas y margas de colores variados, areniscas rojas, yesos, dolomías,

margas y margocalizas del Cretácico inferior y superior, Paleógeno y Mioceno inferior y parte del medio y calizas prebélicas.

En cuanto a los materiales correspondientes a fondos de valle y vertisoles del terciario y del cuaternario, predominan las margas limosas, arcillas con cantos esporádicos.

4 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

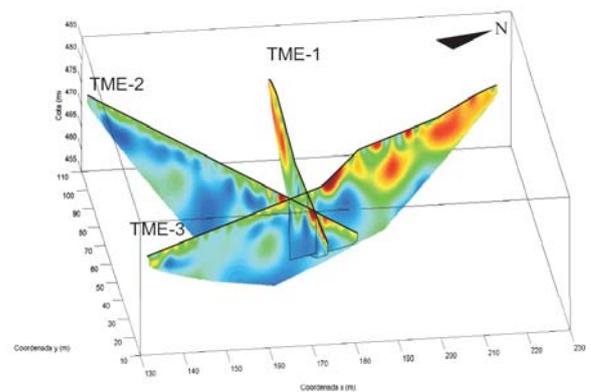
Para la caracterización del subsuelo de la parcela se realizaron sondeos mecánicos, penetrómetros dinámicos, ensayos de penetración estática con cono CPTu, ensayos de disipación mediante penetrómetro estático y geofísica empleando tomografía eléctrica. A continuación se muestran los equipos empleados y resultados:



Equipo de CPTu



Equipo de tomografía eléctrica.



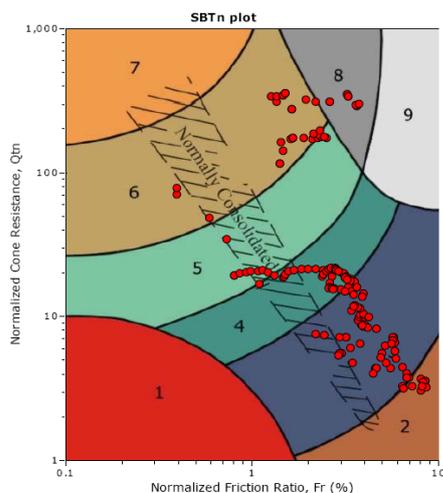
Modelo 3D de la tomografía eléctrica

5 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Para la realización de los cálculos se han establecido los siguientes niveles geotécnicos, en base a la exploración geotécnica.

Nivel I: Alternancia entre suelos finos y arenas, con presencia de materia orgánica

Está formado por materiales alterados o de relleno cuyo estado de compactación es bajo a medio y que presentan una gran heterogeneidad. Granulométricamente, predominan los materiales finos con cierto contenido en arenas y presencia de cantos dispersos. Los materiales presentan una compactación floja, y golpes NDPSH relativamente bajos, comprendidos entre 3 y 30 golpes. Las características geológicas y geomorfológicas descritas anteriormente dan lugar a una capacidad portante muy variable en el espacio y en el tiempo, y muy reducida en general.



SBT legend

1. Sensitive fine grained	4. Clay & silty clay	7. Silty sand & sandy silt	10. Sand
2. Organic material	5. Clay & silty clay	8. Sand & silty sand	11. Very dense/stiff soil
3. Clay	6. Sandy silt & clayey silt	9. Sand	12. Very dense/stiff soil

Gráfica Qtn Vs Fr Normalizados

$$c = 20 \text{ KPa}$$

$$\Phi = 28^\circ$$

$$v = 0,35$$

$E_{def} = 5 \text{ MPa}$
 $\gamma_{sat} = 18 \text{ KN/m}^3$
 $\gamma_d = 16 \text{ KN/m}^3$

Nivel II: Alternancia entre margas, arenas y arenas con finos

Los materiales presentes en éste nivel son de naturaleza similar a los del nivel anterior; si bien se encuentran a mayor profundidad y no han sido erosionados y redepositados, sino que forman parte de estructuras geológicas de la cobertera sedimentaria del mioceno. Se encuentran ligeramente alterados, si bien sus características mecánicas son sensiblemente mejores a las del nivel anterior.

$c = 20 \text{ KPa}$
 $\Phi = 30^\circ$
 $v = 0,32$
 $E_{def} = 20 \text{ MPa}$
 $\gamma_{sat} = 20 \text{ KN/m}^3$
 $\gamma_d = 18 \text{ KN/m}^3$

Nivel III: Alternancia de margas arenosas carbonatadas

Se trata de una sucesión de niveles de naturaleza margosa, margocalcárea y con presencia de arenas; de naturaleza similar a los anteriores, aunque representa en este caso el material sano bajo la profundidad de influencia de los procesos de retracción y lavado superficial. El grado de alteración es mínimo, y puede considerarse el terreno prácticamente en estado natural. En consideración de los fenómenos de expansividad citados anteriormente, la base de la zona activa marca el límite superior del terreno sin alterar. En Jaén, esta zona activa cuenta con espesores comprendidos entre los 5,00 y los 15,00 m. Si se tiene en cuenta la excavación realizada, este nivel aparecerá aproximadamente a los 6,00 m de profundidad.

$c = 40 \text{ KPa}$
 $\Phi = 30^\circ$
 $v = 0,30$
 $E_{def} = 60 \text{ MPa}$
 $\gamma_{sat} = 21 \text{ KN/m}^3$
 $\gamma_d = 19 \text{ KN/m}^3$

6 DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

La solución adoptada para la cimentación de la estructura, dada la gran magnitud de las cargas, es una losa pilotada de hormigón armado, compuesta por una losa de 60 cm de canto y dos tipologías de pilotes $\Phi 80 \text{ cm}$, con una longitud variable entre 10 y 13 m, para controlar los asientos, tal como se muestra a continuación:



Proceso de instalación de pilotes precavados y hormigonados in situ



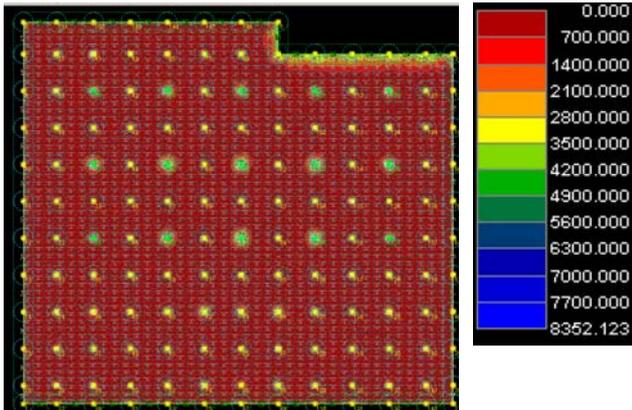
Proceso de armado de losa de cimentación y elementos de conexión pilotes, losa y pilares

El análisis asientos se ha realizado empleado métodos numéricos avanzados. Los esfuerzos y deformaciones en la losa se han estimado mediante el software PLATE del paquete GEO4, que emplea el método de elementos finitos para resolver losas en un espacio elástico de espesor limitado.

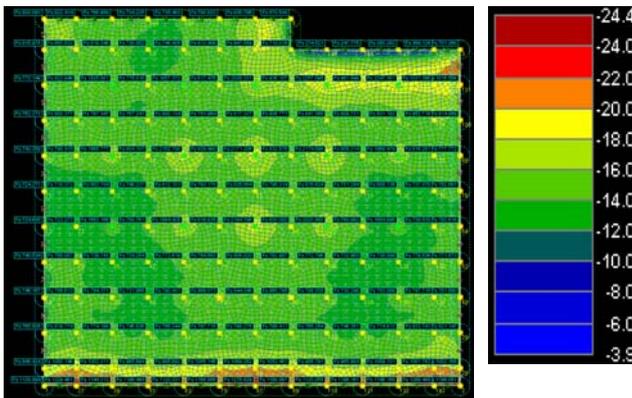
Para el cálculo de los desplazamientos, el modelo constitutivo es el de Winkler-Pasternac, asumiendo un espacio elástico caracterizado por

una profundidad, un módulo de elasticidad y un coeficiente de Poisson promedio.

Se han generado mallas con elementos de dimensión 1,0 m. Dicha malla se ha refinado en el entorno de los principales puntos y líneas, a un tamaño de 0,25 m. Posteriormente se han generado nuevas mallas y se han realizado refinamientos adicionales en las zonas donde se ha estimado necesario.



Área de acero de cortante (mm^2/m^2)



Asientos estimados (mm)

7 PARÁMETROS ESTRUCTURALES

El análisis estructural de la losa pilotada se realiza en base a los esfuerzos de flexión y corte aportados por el software de GEO4 PLATE. Los resultados se reflejan en términos de áreas de acero por metro lineal o metro cuadrado, en el caso del acero de corte.

- Zuncho perimetral: Se dispondrá un zuncho perimetral consistente en 12 barras Φ 20 mm con cercos Φ 12 mm cada 15 cm, a lo largo de todo el perímetro de la losa.

- Cara superior: El armado consiste en barras Φ 16 mm con separación de 20 cm x 20 cm.
- Cara inferior: El armado consiste en barras Φ 16 mm con separación de 20 cm x 20 cm.
- Armadura de cortante: Bajo los pilares se dispondrán elementos para mejorar la resistencia a punzonamiento de la losa.
- Tipo I: Pilares con cargas superiores a 350 Ton (Φ 16 mm + Φ 12 mm c/10 cm)
- Tipo II: Pilares con cargas inferiores a 350 Ton (Φ 16 mm + Φ 10 mm c/10 cm).

8 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LA ESTRUCTURA TERMOACTIVA

De la caracterización geológico- geotécnica realizada se extrae la siguiente información relevante para la descripción térmica del material de contacto entre las estructuras de hormigón y el terreno.

- El subsuelo del proyecto en Jaén está compuesto por suelos margo-calcáreos y presencia de arenas,
- Topografía plana de pendientes suaves y relativamente plana,
- No existe una red de drenaje plenamente desarrollada, no obstante en los sondeos se detecto niveles de agua.
- Arcillas con arena fina de baja plasticidad

HN:	24.11%
LL:	45.6%
LP:	17.1%
IP:	28.5%
Su:	328 kPa
γ_s :	1,52 ton/m^3
γ_d :	1,89 ton/m^3
n :	0,20 – 0,60
k:	$10^{-5} - 10^{-8}$ m/s

λ : [1,1 – 3,5] W/mk (Conductividad térmica del terreno CLAYSTONE)

$\rho \cdot C_p$: [2,1 – 2,4] MJ/m³k (Capacidad térmica volumétrica del terreno CLAYSTONE)

α : [0,32 – 0,68]*10⁻⁶ m²/s (Difusividad térmica del terreno arcilla con arena fina).

- La zona de estudio es de clima cálido y con cierta humedad, propias del valle del Guadalquivir,
- Las precipitaciones más importantes ocurren durante el verano [Junio-Octubre],
- Los datos de temperatura del aire y precipitación, corresponden a una estación ubicada al Oeste de Jaén.

9 DESCRIPCIÓN DEL INTERCAMBIADOR

Está constituido por dos circuitos principales, cada uno de ellos compuesto por 10 circuitos internos.

Circuito A

- Metros lineales de intercambiador: 7788,62 m
- Área de intercambio: 3277,81 m²
- Colectores de entrada: 10 und
- Colectores de salida: 10 und

Circuito B

- Metros lineales de intercambiador: 7967,21 m
- Área de intercambio: 3114,75 m²
- Colectores de entrada: 10 und
- Colectores de salida: 10 und

10 PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Los intercambiadores de calor geotérmicos empleados para la extracción o el almacenamiento de calor, dependen de las propiedades térmicas del terreno, de la geometría de las estructuras utilizadas como elementos termo-activos y de los requerimientos de climatización del proyecto.

La Losa de Cimentación Activa es un intercambiador de calor con el terreno que puede

ser modelada como placa de intercambio, o cuerpo de diferentes materiales, suelo – hormigón, que poseen inicialmente diferente temperatura en su área directa de contacto. Este contacto térmico entre los dos materiales, generan una superficie de temperatura denominada T_c , que puede llegara a tener un comportamiento razonablemente constante, dependiendo de las condiciones de frontera y que no depende del tiempo:

$$T_c = \frac{b_1 * T_1 + b_2 * T_2}{b_1 + b_2}$$

Esta expresión de temperatura de contacto es solamente válida para estructuras termoactivos que no se encuentren bajo la influencia de la variación estacional como la nuestra que se enterrada 8 m en el subsuelo. La efusividad térmica b ($W \sqrt{s} / m^2 K$), es una propiedad muy importante del nuevo material y se define como:

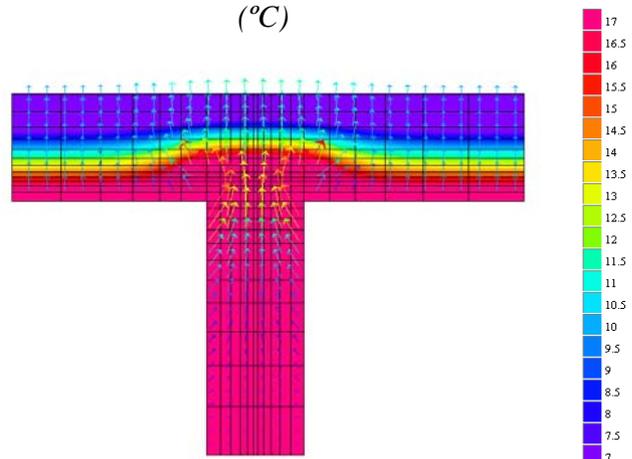
$$b = \sqrt{\lambda * \rho c} = \frac{\lambda}{\sqrt{\alpha}}$$

En resumen el parámetro b , refleja la habilidad del material en absorber calor y la capacidad calorífica de almacenarlo, por lo que el flujo de calor en la superficie Q , del material se expresa como:

$$Q(t) = \frac{b_1 * b_2}{b_1 + b_2} * \frac{A(T_1 - T_2)}{\sqrt{\pi t}}$$

Finalmente las consideraciones energéticas, se estiman con el modelo de cuerpo semi infinito: El cual simula el plano de las interfaces entre el suelo y as estructuras de hormigón, desarrollan para diferentes condiciones de frontera, por Adam & Markiewicz, 2002, Hofinger, 2002.

Modelo de transferencia térmica entre el terreno y una sección de Losa Pilotada Activa (°C)



11 PROBLEMAS COMUNES EN LA INSTALACIÓN

Son muy importantes las actividades preliminares como la planificación de la instalación, con el ánimo de conocer con exactitud la ubicación de cada elemento, sus conexiones, el tipo de válvulas. Adicionalmente es necesario trabajar coordinadamente con el contratista para verificar los trabajos de armado y vaciado de la losa pilotada.



Distribución de sondas geotérmicas en la Losa pilotada de Cimentación Activa



Distribución de sondas geotérmicas en la Losa pilotada de Cimentación Activa

12 PRUEBAS DE CARGA HIDRÁULICA

Cada tubería instalada en los intercambiadores, debe ser sometida a una prueba de presión de 10 bar, durante 30 minutos en el caso de circuitos pequeños, para el caso de diseños complejos se debe hacer una prueba de presión a 1,5 veces la presión de funcionamiento, elaborando una ficha de realización de la prueba, para ser entregada a la dirección del proyecto.



Ejecución de pruebas de carga en las sondas geotérmicas

13 INSTRUMENTACIÓN TÉRMICA DE LA LOSA PILOTADA ACTIVA

Para conocer las condiciones de operación de la losa de cimentación activa, se han dejado termocuplas de medición en el terreno, dentro de las losas, en el interior del sótano y al aire libre, adicionales a las lecturas proporcionadas por la Bomba de Calor Geotérmica BCG, dimensionada para el proyecto.



Termocupla embebida en la Losa de Cimentación Activa

14 AHORRO ENERGÉTICO CON LA LOSA DE CIMENTACIÓN ACTIVA

El uso de la cimentación como intercambiador térmica produce una reducción importante en emisiones de CO₂ y en la demanda energética de la estructura generando beneficios económicos, reflejados en un descenso en la facturación por concepto de climatización. A continuación se muestran gráficas del ahorro proyectado.

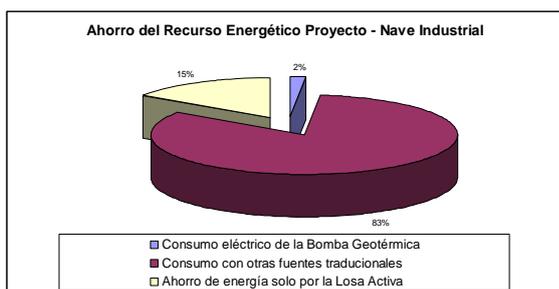


Gráfico del ahorro porcentual sólo con el uso de la losa de cimentación activa

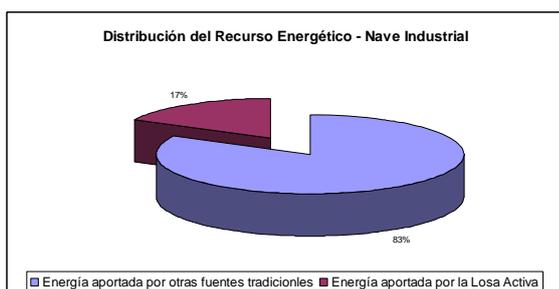


Gráfico de la distribución del recurso energético

15 COMENTARIOS FINALES

El aprovechamiento energético para la climatización de edificios de viviendas o oficinas, naves industriales, centros comerciales, aeropuertos empleando su cimentación y estructuras en contacto con el terreno, ofrece una oportunidad importante de ahorro energético y económico, frente a otros sistemas de climatización. Para ello deben tenerse en cuenta aspectos como: la respuesta térmica de suelo, las características estructurales del proyecto, los requerimientos de climatización, dimensionamiento de la Bomba de Calor Geotérmica (BCG) y las características finales de aislamiento térmico, de tal forma que un adecuado manejo de estos aspectos ofrece al proyectista una obra de calidad, que garantice el confort térmico con eficiencia y economía.

16 REFERENCIAS

Brandl, H., (1998), Energy piles for heating and cooling buildings, 7th International Conference on Piling and Deep Foundations, Vienna, Austria.

Brandl, H., (1998), Energy piles for heating and cooling buildings, 7th International Conference on Piling and Deep Foundations, Vienna, Austria.

Brandl, H. & Markiewicz, R. (2001), Geothermische Energienutzung mittels Pfählen, Schlitzwänden und Stützbauwerken. Pfahl-Symposium 1999, Braunschweig, 329-356.

Burland, J.B, Broms, B.B and de Mello, V.F.B (1977). Behaviour of Foundations and Structures. Proc. ICSMFE, Tokyo, 2, 495-546.

Davis, E.H. and Poulos, H.G. (1972). The Analysis and Design of Pile Raft Systems. Aust. Geomechs. J., G2: 21-27.

Jumikis, A (1966). Thermal Soil Mechanics, Rutgers University Press, New Jersey, 267 pp.

Katzenbach, R., Arslan, U., Moormann, C. and Reul, O. (1998). Piled Raft Foundation – Interaction Between Piles and Raft. Darmstadt Geotechnics, Darmstadt Univ. of Technology, No. 4, 279-296.

Rees, S. W., Adjali, M. H., Zhou, Z., M. & Thomas, H. R. (2000). Ground Heat Transfer Effects on the Thermal Performance of Earth-Contact Structures. Renewable and Sustainable Energy.

Report TC18. Methods of Analysis of Piled Raft Foundations. Technical Committee TC18 on Piled Foundations. ISSMGE. (2001).

Randolph, M.F. (1983). Design of Pile Foundations. Cambridge Univ. Eng. Dept., Res. Rep. Soils TR143.

Sanchez-Guzman, J & Garcia de la Noceda, C (2005), Geothermal Energy Development in Spain – Country Update Report, Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turquía, 446-456.

Zuloaga, I. (2006), Aprovechamiento de la Energía Geotérmica en Cimentaciones y otras Estructura Geotécnicas Activas. Ingeosolum, S.L.