

Climatización de nave industrial mediante un sistema de captación geotérmica vertical

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

Javier A. Sierra Galeano; *Ingeniero Civil (SCI)(SCG). Master en Ingeniería Geológica (UCM). Ingeniero Proyectos Ingeosolum, S.L.*

El presente artículo, es desarrollado para tratar aspectos relativos al proyecto, cálculo, diseño y ejecución de intercambiadores verticales para la climatización de una Nave Industrial, en San Fernando de Henares, Madrid.

La Nave, es una estructura compuesta de paneles prefabricados de hormigón y con una altura correspondiente a 3 plantas aproximadamente, con una transmitancia térmica de 0,55kcal/hm²°C y con un espesor de 20 cm. La demanda térmica de la edificación es de 87 kW para refrigeración y 164 kW para calefacción, distribuidas según requerimientos arquitectónicos, en dos tipologías de estructura denominadas Nave Ligera y Nave Pesada.

La instalación geotérmica aportará el 85 % del total del requerimiento energético para la climatización del interior de la estructura.

1. Principios generales

Un intercambiador geotérmico vertical, es un elemento que sirve para transmitir la temperatura existente en el terreno hacia la estructura y viceversa, mediante un fluido de intercambio caloportador, que circula en su interior y el cual alimenta a una Bomba de Calor Geotérmica (BCG).

Dependiendo de las condiciones de intercambio entre la (BCG) y el intercambiador vertical, éste líquido puede contener un porcentaje de anticongelante. Seguidamente, los

circuitos de tuberías se conectarán a un conjunto de colectores/distribuidores mediante conductos de interconexión, los cuales deben estar aislados correctamente a fin de evitar pérdidas energéticas.

2. Parámetros geológicos

Geológicamente, la zona de San Fernando de Henares, se describe en el Mapa Geológico de España, hoja 560, escala 1:50.000, como depósitos continentales Mioceno y Cuaternarios, localizándose en su ángulo noroeste la cordillera central (Sierra de Gredos y Guadarrama), de materiales ígneos y metamórficos atribuidos a la orogenia herciniana, adosándose a estos en la vertiente sur materiales de edad Cretácica y probable Oligoceno. Donde se incluyen todos aquellos depósitos, más o menos sueltos, conectados, bien en la actualidad, bien en tiempos geológicos anteriores, a los cauces de los ríos.

Normalmente están formados por terrenos muy heterométricos en los que predominan las arenas y gravas en los situados al Oeste y Centro, y las arcillas y limos en los del Sur y Sureste.

El terreno de la parcela se considera en general, como semipermeable, si bien zonalmente podrá ser, totalmente permeable o impermeable. La posibilidad de aparición de niveles acuíferos a escasa profundidad es alta, destacando una red de escorrentía poco marcada.



Equipo de exploración geotécnica

3. Exploración del subsuelo

Durante la caracterización geomecánica del subsuelo se realizaron sondeos mecánicos, penetrómetros dinámicos, y geofísica empleando la técnica de refracción sísmica.

4. Parámetros geotécnicos

El terreno donde se encuentra emplazado el proyecto, está compuesto a nivel superficial por una capa de gravas, en matriz arcillosa muy densa, subyaciendo este estrato y en profundidad se encuentran arcillas, con niveles de yesos masivos y cristalinos altamente resistentes, eventualmente se pueden encontrar niveles de sílex.

Sus parámetros geomecánicos promedio son:

- Humedad natural: [33,88 – 37,55%]
- Límite líquido: [61,84 – 68,92%]
- Límite plástico: [31,23 – 35,72%]
- Índice plasticidad: [30,61 – 33,20%]
- Resistencia al corte no drenada: [50- 244 kPa]
- Compresión simple: [109 – 488 kPa]
- Tamiz 200: [64,13 – 91,51%]
- Tamiz 40: [66,40 – 92,16%]
- Peso unitario seco: [1,68 – 2,19 Ton/m³]
- Porosidad: [0,01 – 0,2]
- Permeabilidad: [10⁻⁹ – 6*10⁻⁶ m/s]

5. Estimaciones analíticas

Para el cálculo de los intercambiadores proyectados en el proyecto, se ha empleado los métodos IGSHA (International Ground Source Heat Pump Association) desarrollado por la Universidad de Oklahoma (BOSE, 1984), VDI 4046 y EED. Estos métodos, basan la solución del problema de la conducción de calor de una tubería de gran longitud y pequeño diámetro con una temperatura razonablemente uniforme.

La conducción de calor se ha definido con el criterio de línea infinita, donde el flujo de calor tiene una dirección radial. El mecanismo de



Equipo de sísmica de refracción

transmisión de calor es la conducción, resolviéndose por un modelo de resistencias térmicas donde se conectan en serie la resistencia R_t de la tubería y la resistencia R_s del suelo.

Diversos autores (INGERSOLL, 1948, Ramey, 1962), han propuesto formulaciones para calcular la resistencia térmica del suelo R_s . En todas ellas, R_s depende de la distancia a la tubería (r), de la difusividad térmica (α) y del tiempo (t), es decir, desde cuando se esté cediendo o tomando calor. Lo que viene a reflejar que el terreno no es un foco de capacidad infinita, sino que se va “cargando” o “descargando” por efecto del calor de intercambiado. Conocida ambas resistencias y el salto térmico entre el agua (T_f) y el terreno (T_s), se calcula la longitud requerida para disipar la potencia térmica, tal como se describe a continuación:

5.1. Flujo de calor

$$q = \frac{T_f - T_s}{R_t + R_s}$$

Donde

q : Flujo de calor (W/m)

T_f : Temperatura del agua dentro del intercambiador ($^{\circ}\text{K}$)

T_s : Temperatura del terreno en contacto con el intercambiador ($^{\circ}\text{K}$)

R_t : Resistencia de la tubería (kW-1)

R_s : Resistencia del terreno (kW-1)

5.2. Resistencia térmica de la tubería

$$R_f = \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 * \pi * k_t}$$

Donde,

R_f : Resistencia térmica de la tubería (kW-1)

D_e : Diámetro exterior de la tubería (m)

D_i : Diámetro interno de la tubería (m)

k_t : Conductividad térmica del terreno (W/mk)

5.3. Resistencia térmica del suelo

$$R_s = R_s(r, \alpha_s, t)$$

Donde,

R_s : Resistencia térmica del terreno (kW-1)

r : distancia a la tubería (m)

α_s : difusividad térmica del terreno (m^2/s^2)

t : tiempo desde cuando el terreno cede o toma calor ($^{\circ}\text{K}$)

5.4. Longitud de disipación de potencia térmica

$$L = \frac{Q}{T_f - T_s} (R_t + R_s)$$

Donde,

L : Longitud para disipar la potencia térmica (m)

Q : Flujo de calor (W/m)

T_f : Temperatura del agua dentro del intercambiador ($^{\circ}\text{K}$)

T_s : Temperatura del terreno en contacto con el intercambiador ($^{\circ}\text{K}$)

R_t : Resistencia de la tubería (kW-1)

R_s : Resistencia del terreno (kW-1)

5.5. Longitud de disipación de potencia térmica con factor de utilización

$$L = \frac{Q}{T_f - T_s} (R_t + R_s * F_u)$$

Donde,

L : Longitud para disipar la potencia térmica

Q : Flujo de calor (W/m)

T_f : Temperatura del agua dentro del intercambiador ($^{\circ}\text{K}$)

T_s : Temperatura del terreno en contacto con el intercambiador ($^{\circ}\text{K}$)

R_t : Resistencia de la tubería (kW-1)

R_s : Resistencia del terreno (kW-1)

F_u : Factor de utilización

5.6. Temperatura del terreno en contacto con el intercambiador

$$T_s(y, t) = T_m - A * e^{-\sqrt{\frac{\pi}{360 * \alpha}} * y} * \cos\left[\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - T_s \frac{y}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi * \alpha}}\right)\right]$$

Donde,

T_s : Temperatura del terreno en contacto con el intercambiador ($^{\circ}\text{K}$)

y : Profundidad (m)

t : Tiempo (seg)
 A : Amplitud de la oscilación ($^{\circ}\text{k}$)
 T_m : Temperatura media durante 1 año ($^{\circ}\text{k}$)
 α_s : Difusividad térmica del terreno (m^2/s^2)
 t_o : Tiempo con la temperatura media más baja en todo el año

5.7. Temperatura mínima del terreno debida a la variación estacional

$$T_{\min} = T_m - A * e^{-\sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}}$$

Donde,

T_{\min} : Temperatura mínima del terreno ($^{\circ}\text{k}$)
 T_m : Temperatura media ($^{\circ}\text{k}$)
 A : Amplitud de la oscilación (m)
 α_s : Difusividad térmica del terreno (m^2/s^2)

5.8. Temperatura máxima del terreno debida a la variación estacional

$$T_{\max} = T_m + A * e^{-\sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}}$$

Donde,

T_{\max} : Temperatura máxima del terreno ($^{\circ}\text{k}$)
 T_m : Temperatura media ($^{\circ}\text{k}$)
 A : Amplitud de la oscilación (m)
 α_s : Difusividad térmica del terreno (m^2/s^2)

5.9. Longitud de intercambiador necesaria para satisfacer la máxima carga de calefacción en el instante de menor temperatura del terreno

$$\Delta L_c = \frac{P_f}{T_{\min} - T_{fc}} (R_t + R_s * F_{u_c})$$

Donde,

ΔL_c : Longitud de intercambiador necesaria para satisfacer la máxima carga de calefacción en el instante de menor temperatura del terreno (m)
 P_f : Potencia frigorífica de la bomba de calor
 T_{\min} : Temperatura mínima transcurrido un año ($^{\circ}\text{k}$)
 T_{fc} : Temperatura mínima dentro del intercambiador ($^{\circ}\text{k}$)

R_t : Resistencia de la tubería (kW-1)
 R_s : Resistencia del terreno (kW-1)
 F_u : Factor de utilización en calefacción

6. 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 área de proyecto, está compuesto por de gravas, en matriz arcillosa muy densa, subyaciendo este estrato y en profundidad se encuentran arcillas, con niveles de yesos masivos,
- 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: 35,75%

LL: 65,38%

LP: 33,47%

IP: 31,91%

Su: 180 kPa

λ_s : 1,7 ton/m³

λ_h : 1,9 ton/m³

η : 0,01 – 0,2

k : 10-9 – 6*10-6 m/s

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

$\rho \times C_v$: [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 Henares,
- Las precipitaciones más importantes ocurren durante el verano [Junio-Octubre],

7. Descripción del intercambiador

Está constituido por dos circuitos principales, cada uno de ellos compuesto por 25 circuitos internos.

Circuito A

- Área de intercambio: 949 m²
- Colectores de entrada: 25 und
- Colectores de salida: 25 und

Circuito B

- Área de intercambio: 952 m²
- Colectores de entrada: 25 und
- Colectores de salida: 25 und

8. Equipo empleado

Cada tubería instalada en los intercambiadores, se ha sometido 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.

9. Comentarios finales

El aprovechamiento energético del terreno para la climatización de edificios de viviendas o oficinas, naves industriales, centros comerciales, aeropuertos, 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 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.



Equipo de control de presión



Equipo empleado para la medición de la temperatura del terreno

10. Referencias

- Bowles, J. E. (1988). *Foundation Analysis and Design*. Fourth Edition, McGraw-Hill Book Co., 1221 Avenue of the Americas, New York.
- 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.
- Gehlin S., 2002. *Thermal response test – method development and evaluation*. Doctoral Thesis 2002:39. Luleå, University of Technology, Sweden.
- Gehlin S. and Hellström G., 2003. *Comparison of four models for thermal response test evaluation*. ASHRAE, Transaction V. 109, Pt. 1.
- Ingersoll, L.R. & Plass, H.J.: *Theory of the ground pipe heat source for the heat pump*. Heating, Piping & Air Conditioning 20/7, 119-122, 1948.
- Jumikis, A (1966). *Thermal Soil Mechanics*, Rutgers University Press, New Jersey, 267 pp.
- Mogensen P. (1983). *Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages*. Proc. Int. conf. On subsurface heat storage in theory and practice. Stockholm, Sweden, June 6-8, 1983, p. 652-657.
- 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.
- 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.

Equipo de inyección controlada



Equipo de Perforación para la ejecución de los intercambiadores verticales

