

Caracterización Térmica del Terreno

IGNACIO ZULOAGA FÁBREGA (*) y JAVIER A. SIERRA GALEANO (**)

RESUMEN En este artículo se exponen las propiedades térmicas de los suelos, el flujo de calor y el almacenamiento de calor en el terreno, los equipos de medición de las propiedades índice, la descripción del balance térmico e hidráulico de la estructura del suelo, finalmente se presentan modelos avanzados de transferencia de calor en el terreno.

THERMAL CHARACTERIZATION OF SOILS

ABSTRACT *This article presents the thermal properties of the soil, the heat flux and heat storage in the field, measuring equipment index properties, the description of thermal and hydraulic balance of the soil structure and finally develop advanced models of heat transfer in the field.*

Palabras clave: Conductividad, Difusividad, Calor específico, Temperatura superficial, Temperatura en profundidad, Modelos THM.

Keywords: Conductivity, Diffusivity, Specific heat capacity, Surface temperature, Temperature at depth, Thermal-Hydraulic-Mechanical models.

1. INTRODUCCIÓN

Este documento pretende realizar una descripción general de los principales conceptos que intervienen en la transferencia de calor entre el terreno y su entorno, con los aportes que ofrecen la geología, la geotecnia, la hidráulica y la termodinámica. Ya que la orientación de las partículas, el tipo de suelo, su densidad, el tamaño de los poros de su estructura interna, el flujo de agua en el terreno, entre otras propiedades, condicionan la transferencia de calor en el terreno.

También se presentan algunos de los modelos de transferencia de calor en el terreno, para la explotación de la energía geotérmica de baja temperatura, adicionalmente y de forma resumida se describen algunas de las técnicas usadas para determinar las propiedades físicas del terreno y los equipos empleados en laboratorio y en campo, para obtener las propiedades térmicas del terreno.

2. ESTRUCTURA DEL TERRENO Y PROPIEDADES ÍNDICE

Los suelos tienen su origen en los macizos rocosos preexistentes que constituyen la roca madre, sometida a la acción ambiental disgregadora de la erosión en sus tres facetas:

- Física, debida a cambios térmicos, a la acción del agua. Estas acciones físicas tienden a romper la roca inicial y

a dividirla en fragmentos de tamaño más pequeño, que pueden ser separados de la roca por agentes activos (agua, viento, gravedad) y llevados a otros puntos en los que continúa la acción erosiva. Es decir, tienden a crear las partículas que van a formar el suelo.

- Química, originada por fenómenos de hidratación, disolución, oxidación, cementación. Estas acciones, por lo tanto, tienen a disgregar como a cementar, lo que quiere decir que puede ayudar a la acción física y, posteriormente, cementar los productos formados, dando unión química de las partículas pequeñas de suelo.
- Biológica, producida por la actividad bacteriana, induciendo putrefacciones de materiales orgánicos y mezclando el producto con otras partículas de origen físico-químico, actuando de elemento catalizador.

Todo ello da lugar a fenómenos de disgregación y transformación de la roca, creándose el perfil de meteorización, de tal forma que, cuando el suelo permanece *in situ* sin ser transportado, se le conoce como suelo residual y cuando ha sufrido transporte, se denomina suelo transportado.

La estructura y fábrica de un suelo, es función del origen de los minerales, agentes cementantes, transformaciones químicas, medios de depositación, entre otros. Estas condiciones particulares para cada tipo de suelo, determina la presencia de huecos, poros o intersticios, con agua (suelos saturados), aire y agua (suelos parcialmente saturados) o solo aire (suelos secos).

Adicionalmente las deformaciones del conjunto del suelo, se producen por giros y desplazamientos relativos de las partículas y por expulsión del agua; solo en raras ocasiones se producen por roturas de granos.

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

(**) Ingeniero Civil (SCI)(SCG). Master en Ingeniería Geológica (UCM). Ingeniero Proyectos Ingeosolum, S.L.

2.1. DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Describir un suelo o una roca, puede ser una labor compleja, debido a su diferentes tipos de partículas y composiciones químicas, por lo que es necesario seguir una serie de metodologías con definiciones y sistemas de evaluación de las propiedades que la forman.

2.1.1. Tipos de suelo

Los suelos se han clasificado en cuatro grandes grupos en función de su granulometría:

- Gravas, con tamaños de grano entre unos 8-10 cm y 2 mm; se caracterizan porque los granos son observables directamente, no retienen agua y posee grandes espacios o huecos entre sus partículas.
- Arenas, con partículas comprendidas entre 2 y 0,060 mm, son observables a simple vista.
- Limos, con partículas comprendidas entre 0,060 y 0,002mm. Se caracteriza por retener más agua que los suelos anteriores.
- Arcillas, formadas por partículas con tamaños inferiores a los limos (0,002 mm). Están compuestas por estructuras internas y transformaciones químicas complejas. Todo esto produciendo que su capacidad de retener agua es muy grande

2.1.2. Distribución granulométrica

Para conocer la proporción de cada material que tiene un suelo se realizan análisis granulométricos utilizando la vía seca para partículas de tamaños superiores a 0,075mm, y la granulometría por sedimentación mediante hidrómetro (vía húmeda) para tamaños iguales o inferiores a 0,075 mm. Los primeros se llevan a cabo tomando una muestra representativa del suelo, secándola y disgregando en seco el conjunto de partículas. A esta muestra se le hace pasar por un conjunto de tamices, agitando el conjunto. Después se pesa lo retenido en cada tamiz, con lo que, conocido el peso inicial de la muestra, se determina el porcentaje de material que pasa por cada tamiz. Con éstos datos se elabora una curva granulométrica de un suelo, la cual está compuesta por diversas curvas que corresponden a: a) Arenas con gravas, b) Arena fina, c) Arena limosa, d) Limo, e) Arcilla limosa.

2.1.3. Plasticidad

La granulometría proporciona una primera aproximación a la identificación del suelo, pero en ocasiones no es claro diferenciar entre la fracción arenosa, limosa y arcillosa de un suelo, por lo que se emplean unos índices, derivados de la ingeniería agronómica, que definen la consistencia del suelo en función del contenido de agua, a través de la determinación de la humedad: peso del agua del suelo dividido por el peso del suelo seco.

De tal forma que, Atterberg definió tres límites: el de retracción o consistencia que separa el estado sólido seco y el semisólido, el límite plástico, que separa el estado semisólido del plástico y el límite líquido, que separa el estado plástico del líquido.

Determinados el límite líquido y el límite plástico, se encuentra el índice de plasticidad, el cual representa el intervalo de humedades, para pasar del estado semisólido al semilíquido. A partir de diversos estudios prácticos, Casagrande definió que los suelos con un límite líquido superior a 50, se definen de alta plasticidad que admiten mucha agua en su

estructura interna, experimentan deformaciones plásticas grandes.

2.1.4. Concentración de sólidos

Para determinar el volumen relativo de huecos y contenido relativo de agua en un volumen de suelo, se emplea el índice de porosidad, n el cual relaciona el volumen de huecos con el volumen total del elemento considerado y el índice de huecos o de poros, e el cual consiste en la relación entre el volumen de huecos y el volumen de sólidos.

Adicionalmente, para estimar la concentración relativa de sólidos y agua se utilizan varios parámetros:

- Peso específico de partículas, G , es el valor medio correspondiente a las diversas partículas. Se determina en laboratorio, midiendo el volumen que ocupa una muestra de partículas por desplazamiento de un volumen de líquido en un recipiente lleno de agua y previamente tasado.
- Peso específico aparente seco, λ_d , es la relación entre el peso de sólidos de la muestra y el volumen aparente que ocupan.
- Peso específico aparente saturado, λ_{sat} , es la relación entre el peso de sólidos más el peso de agua de los huecos, y el volumen aparente de referencia.
- Peso específico aparente, λ_{ap} , es la relación entre el peso de la muestra y su volumen aparente.
- Peso específico del agua, λ_w , es el peso del fluido intersticial.
- Humedad natural, es la relación entre el peso del agua que contiene la muestra y el peso de sus sólidos, a determinar por secado en estufa.
- Grado de saturación, S_r , es la relación entre el peso del agua que contiene la muestra y el que tendría si estuviera saturado.
- Densidad, ρ , es la relación entre la masa de suelo y su volumen.
- Densidad relativa, D_r , es la relación existente entre la relación de e máxima, menos la e , sobre la e máxima y la e mínima.

2.1.5. Permeabilidad

Este criterio describe las condiciones de flujo en medios porosos y otros aspectos relacionados con el agua en el suelo. Tal como se ha expresado anteriormente, un suelo es un conjunto de partículas entre las que existen huecos o poros interconectados, de manera que el agua puede fluir a través de ellas.

En consecuencia, la mayor o menor facilidad para que se produzca flujo será función de la granulometría del suelo. Por lo que es necesario definir el coeficiente de permeabilidad, k , de un suelo como un parámetro que mide la facilidad para que el agua circule a través de él, dicha permeabilidad dependerá de:

- La granulometría, la distribución de tamaños de los granos del suelo.
- La densidad del suelo, para las mismas condiciones de granulometría, cuanto más denso el terreno menor será su volumen de huecos y menor será su k .
- La forma y orientación de las partículas, ya que si las condiciones de sedimentación dan lugar a orientaciones preferenciales, la permeabilidad podrá variar sustancialmente en función de la dirección del flujo.

3. PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El calor se puede transferir de tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee mayor temperatura hacia uno que posee la temperatura más baja.

3.1. CONDUCCIÓN

La conducción es la transferencia de la energía de las partículas más energéticas de un suelo hacia las adyacentes menos energéticas. Si se considera una conducción de calor en estado estacionario, la razón de transferencia de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero inversamente proporcional al espesor de esa capa; es decir:

$$\dot{Q} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

En donde la constante de proporcionalidad k , es la conductividad térmica, ΔT , la diferencia de temperaturas se define el gradiente térmico y Δx , el espesor terreno a atravesar. También se conoce como la Ley de Fourier de la Conducción de Calor ($\text{W/m}^2\text{K}$).

3.2. CONVECCIÓN

La convección es la transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencia de densidad debidas a la variación de la temperatura del fluido.

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es obligado a circular sobre una superficie mediante medios externos, en contraste, se dice que es convección natural si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencia de densidad debidas a la variación de la temperatura del fluido.

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa mediante la Ley de Newton de de Enfriamiento (W):

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Donde, h es el coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{W/m}^2\text{K}$), A_s , es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección, T_s , es la temperatura de la superficie y T_∞ , es la temperatura del fluido alejado de la superficie.

3.3. RADIACIÓN TÉRMICA

Es la energía emitida por los cuerpos debido a su temperatura, la radiación es un fenómeno volumétrico, donde se absorbe o se transmite energía. La razón máxima de radiación térmica que se puede emitir desde una superficie a una temperatura T_s , es expresada por la Ley de Stefan-Boltzmann (W):

$$\dot{Q}_{emitida,máx} = \alpha A_s T_s^4 \quad (3)$$

Donde, σ , es la constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma=5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$.

4. TÉRMINOS EMPLEADOS EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR

A continuación se realiza un breve listado de los términos y conceptos más empleados en la transferencia de calor y que son empleados con bastante frecuencia, en la modelación de sistemas de captación geotérmica y cimentaciones termo activas:

- Energía térmica, es aquella liberada en forma de calor.
- Calor, Q , es la forma de energía que se puede transmitir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura.
- Trabajo, W , es la forma de energía que no puede transmitirse de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura.
- Potencia, W , es el trabajo realizado por unidad de tiempo.
- Temperatura, T , es una magnitud referida a las nociones comunes de calor o frío. Físicamente es una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico.
- Energía total, E , es la suma de las diferentes formas de energía, térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear.
- Energía interna, U , es la suma de todas las formas microscópicas de energía. Se puede considerar que la energía interna es la suma de las energías cinética y potencial de las moléculas.
- Energía sensible o calor sensible, es la parte de la energía interna de un sistema que está asociada con la energía cinética de las moléculas.
- Calor específico, c , es la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de suelo. ($\text{kJ/Kg}^\circ\text{K}$).
- Calor específico a presión constante, c_p , es la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de suelo, mientras la presión se mantiene constante. ($\text{kJ/Kg}^\circ\text{K}$).
- Calor específico a volumen constante, c_v , es la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de suelo, mientras el volumen se mantiene constante. ($\text{kJ/Kg}^\circ\text{K}$).
- Razón de transferencia de calor, Q , es la cantidad de calor transferido por unidad de tiempo.
- Flujo de calor, q , es la razón de transferencia de calor por unidad de área perpendicular, en la dirección de transferencia de calor.
- Gasto de masa, m , es la cantidad de masa que fluye a través de una sección transversal por un medio de flujo, por unidad de tiempo.
- Conductividad térmica, k , es una medida de la capacidad de un material para conducir calor. ($\text{W/m}^\circ\text{K}$).
- Capacidad calorífica, Representa la cantidad de calor almacenado en el terreno y es el producto entre la densidad del suelo y su calor específico ρc . ($\text{J/kg}^\circ\text{K}$).
- Difusividad térmica, α , Representa cuán rápido se difunde el calor por el terreno, para análisis de conducción de calor en régimen transitorio. $\alpha=k/\rho c_p$. (m^2/s).
- Resistividad térmica: Propiedad de los materiales que define la dificultad de la conducción de calor a través de ellos. ($\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$).

- Inercia térmica: Propiedad que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con que la cede o absorbe del entorno. Depende de la masa, del calor específico de sus materiales y del coeficiente de conductividad térmica de éstos.
- Calor latente: es la energía absorbida por las sustancias al cambiar de estado, de sólido a líquido.

4.1. TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL TERRENO

El terreno es un sistema multifase con un complejo mecanismo de intercambio de calor, compuesto por:

- Conducción.
- Radiación.
- Convección.
- Vaporización y condensación.
- Intercambio iónico.
- Congelación y deshielo.

La transferencia de calor presente en el terreno, ocurre principalmente por conducción y en segundo lugar por convección. La transferencia de calor por convección es posible cuando el agua cambia de fase (calor latente durante la vaporización y condensación). En el terreno, usualmente la radiación contribuye negativamente en el intercambio de calor, en materiales arenosos su efecto es menos del 1% del total de la transferencia de calor (Rees et al., 2000). Conjuntamente los procesos de congelación y de descongelación del terreno, pueden transferir calor de forma significativa, pero estos procesos deben ser evitados en las cimentaciones termo activas.

4.2. CONDUCCIÓN TÉRMICA EN EL TERRENO

Es un proceso según el cual la energía pasa de una región a un medio por medio de la transferencia molecular, según la Ley de Transferencia de Calor de Fourier, tal como se ha mencionado anteriormente. El principio se basa en que una transferencia de calor estacionaria Q , atraviesa arbitrariamente un área durante un tiempo t , lo que describe el flujo de calor en el terreno, el cual se expresa:

$$\dot{q}_{cond} = \frac{Q}{At} = \frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (4)$$

Donde, λ , es la conductividad térmica y $\partial T/\partial n$, es el gradiente de temperatura actual en la dirección del flujo n :

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial T}{\partial x} e_x + \frac{\partial T}{\partial y} e_y + \frac{\partial T}{\partial z} e_z = gradT \quad (5)$$

Si el tamaño de grano de las partículas del terreno y el tamaño de los poros son pequeños en relación con el volumen de suelo considerado, el complejo proceso de transferencia de calor puede reducirse sólo a la conducción. La ecuación de flujo de calor en el terreno, puede escribirse en coordenadas rectangulares como:

$$\dot{q} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} e_x + \frac{\partial T}{\partial y} e_y + \frac{\partial T}{\partial z} e_z \right) = -\lambda gradT \quad (6)$$

Si la conductividad térmica y el gradiente de temperatura son constantes bajo un área y en su sentido del flujo conocido, la ecuación de flujo de calor en el terreno, puede ser asociada a un intercambiador térmico vertical, o a pilotes y micropilotes termoactivos, donde su radio R y longitud L , pueden ser modificados en función de las necesidades de transferencia de calor, tal como se muestra a continuación:

$$\dot{Q} = 2r\lambda L \frac{dT}{dr} \quad (7)$$

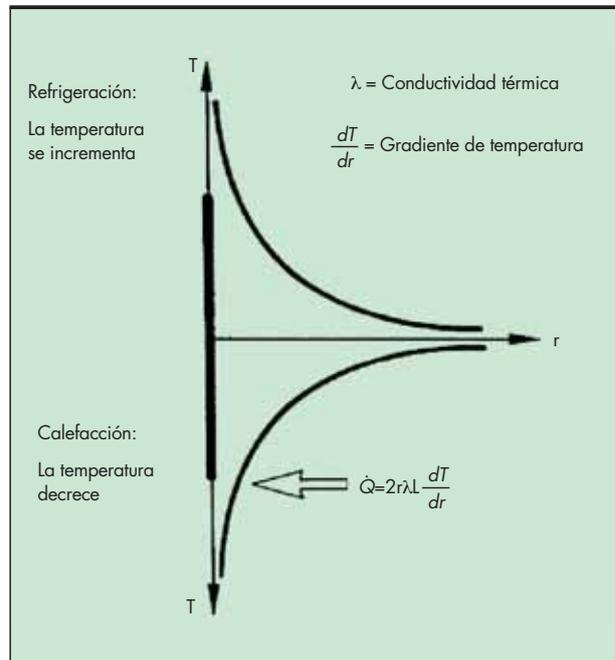


FIGURA 1. Curvas de temperatura en el suelo alrededor de un intercambiador geotérmico—Prof. Heinz Brandl.

La temperatura del suelo alrededor de un intercambiador vertical, horizontal o pilotes y micropilotes termo activos, se incrementa en el ciclo de refrigeración y en el caso de calefacción la temperatura del terreno decrece, tal como se muestra en la figura 1.

El cambio de temperatura en el terreno es producto de una alteración del flujo de calor en un periodo dado, lo que produce un cambio de la energía interna:

$$-\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \dot{q}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{q}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{q}}{\partial z} \quad (8)$$

Derivando la ecuación de flujo de calor en el terreno con respecto a las coordenadas espaciales y combinándola con la ecuación de cambio de energía interna se obtiene:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \alpha div(gradT) = \alpha \Delta T \quad (9)$$

Con la difusividad térmica α (m²/s) dada por :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (10)$$

Donde, λ (W/mK), es la conductividad térmica, c_p (J/kg°K), es la capacidad calorífica específica (capacidad térmica), y ρ , (kg/m³) es la densidad del medio sólido del terreno. Si existe una fuente de calor interno (generación de calor interno) en un volumen de suelo la ecuación básica de conducción de calor se convierte en:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \Delta T + \frac{Q_i}{\rho \cdot c} \quad (11)$$

Ecuación de cambio de energía interna, en coordenadas rectangulares se puede transformar en coordenadas cilíndricas con radio r , ángulo Φ un eje z , tal como se muestra a continuación:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (12)$$

4.3. CONVECCIÓN TÉRMICA EN EL TERRENO

Ocurre entre sistemas termodinámicos, que se mueven uno respecto a otro, (por medio de flujos de circulación). El suelo durante su fase sólida es estático, por lo tanto, solo se presenta la convección con agua y la convección por gas, presentes en sus poros o intersticios. La transferencia de calor por fluidos de convección puede describirse de la siguiente manera:

$$q_{1,conv} = c_w \rho_w v_w (T - T') \quad (13)$$

Donde c_w , es la capacidad calorífica específica del agua en el suelo, ρ_w , es la densidad del agua en el suelo, v_w , es el vector de velocidad del agua ($v_w=ki$), y T' , es la temperatura de referencia.

Una ecuación de convección similar se obtiene por vapor o gas presente en los poros del terreno:

$$q_{1,conv} = c_v \rho_v v_v (T - T') \quad (14)$$

Donde c_v , es la capacidad calorífica específica del vapor de suelo.

La transferencia de calor latente en el terreno, ocurre como resultado de un cambio de fase del agua (vaporización), que depende principalmente de la cantidad de transferencia de calor que ocurre en los poros del suelo. Este se incrementa cuando decrece el contenido de agua, y puede ser expresada mediante la expresión:

$$\dot{q}_{lat} = L_0 \rho_w \bar{v}_v \quad (15)$$

Donde L_0 , es el calor latente de vaporización a una temperatura T' .

Por lo tanto, la transferencia de calor total en el terreno, puede ser definida según (Rees et al., 2000), como:

$$\dot{q}_{tot} = \dot{q}_{cond} + \dot{q}_{1,conv} + \dot{q}_{v,conv} + \dot{q}_{lat} \quad (16)$$

Donde q_{cond} , es el flujo de calor, $q_{1,conv}$, es el flujo de calor generado por la convección líquida, $q_{v,conv}$, es el flujo de calor generado por la convección de vapor, y q_{lat} , es el flujo debido al calor latente.

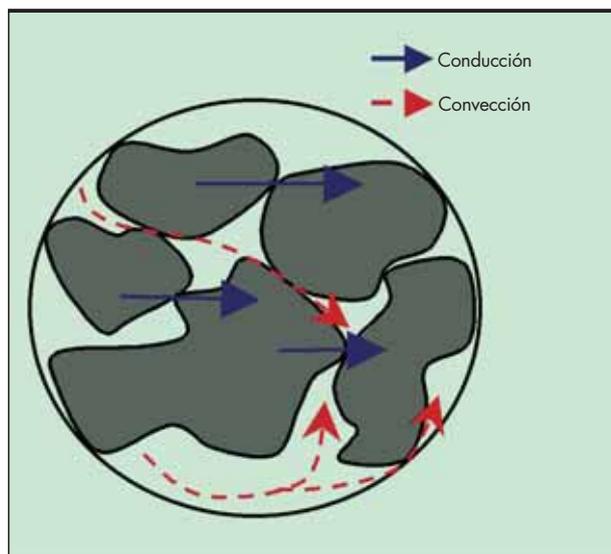


FIGURA 2. Principios de intercambio geotérmico en el terreno.

Finalmente la completa descripción matemática de la transferencia de calor en el terreno, requiere de la suposición de condiciones iniciales y de frontera. El estado inicial considera que la distribución de la temperatura respecto al tiempo. En cuanto a las condiciones de frontera, Adam & Markiewicz, 2002, Hofinger, 2002, proponen tres diferentes hipótesis:

- Condición de frontera de Dirichlet. La temperatura de la superficie T_s , es constante o sólo depende del tiempo t .
- Condición de frontera Neuman. El flujo de calor q de la superficie es constante o que únicamente depende del tiempo t .
- Condición de frontera de Cauchy o mixta Neuman. En la superficie del cuerpo se considera que el intercambio de calor ocurre con los líquidos o gaseosos alrededores de la entidad que muestran una temperatura T_u . Según la ley de enfriamiento Newton, el flujo de calor es proporcional a la diferencia de temperatura entre el ambiente y la temperatura de la superficie, $T_{interfaz}$. El factor de proporcionalidad se define como el coeficiente de transferencia de calor α ($W/m^2 K$).

Debido a las dificultades matemáticas, soluciones analíticas de estas ecuaciones, sólo son posibles para los casos sencillos. Los problemas unidimensionales pueden ser resueltos fácilmente, ya que la ecuación de flujo de calor, que sólo depende de un sistema de coordenadas. En dos y tres dimensiones los problemas se pueden resolver, en algunos casos, en una dimensión mediante la combinación de soluciones.

5. ESTIMACIONES ANALÍTICAS Y NUMÉRICAS

Los intercambiadores de calor geotérmicos (verticales, horizontales o estructuras termo activas), empleados para la extracción o el almacenamiento de calor, dependen de la forma y de los materiales empleados y son modelados como cilindros; las consideraciones energéticas, se estiman con sofisticadas consideraciones geométricas. Los siguientes casos básicos, se emplean para simular la mayoría de los elementos de absorción diseñados comúnmente:

- Caso 1, cuerpo semi infinito: Simula el plano de las interfaces entre el suelo y la atmósfera (losas de cimentación, muros de sótano, muros de contención, pantalla de micropilotes, micropilotes, muros diafragma, colectores horizontales y colectores trinchera).

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \theta(x, t) = \frac{1}{\alpha \Delta t} \theta(x, t) \quad (17)$$

- Caso 2, cuerpo cilíndrico infinito: Simula la longitud vertical de intercambiadores de calor en el terreno, y el potencial de almacenamiento y de extracción de calor del terreno.

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} \theta(r, t) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \theta(r, t) = \frac{1}{\alpha \Delta t} \theta(r, t) \quad (18)$$

- Caso 3, cuerpo esférico infinito: Simulación esférica termo activa del terreno en un sistema abierto (estructuras subterráneas), es un modelo más aproximado para el cálculo de almacenamiento y extracción de calor en pozo.

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} \theta(r, t) + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \theta(r, t) = \frac{1}{\alpha \Delta t} \theta(r, t) \quad (19)$$

Soluciones analíticas están sólo disponibles para el caso 1 (cuerpo semi infinito), considerando simples condiciones de frontera. Condiciones de frontera más complicadas requieren

soluciones semi analíticas que reduzcan la ecuación diferencial. Para lograrlo Adam & Markiewicz, 2002, Hofinger, 2002, proponen la llamada función de error de Gauss, la cual actúa como complemento a la función para darle una solución numérica, de la siguiente manera:

$$erfc(\zeta) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\zeta} e^{-\omega^2} d\omega \quad (20)$$

Donde ζ , es el límite de integración y w , es la variable de integración. Esta función de error es también la base para la solución del caso 3 (cuerpo esférico infinito). Independientemente de condiciones de frontera, el caso 2 (cuerpo cilíndrico infinito) sólo puede encontrar numéricamente usando ecuación diferencial.

5.1. CUERPO SEMI INFINITO (CASO 1)

Este modelo matemático ha sido elaborado para diferentes condiciones de frontera y de suministro o de la pérdida de calor en la superficie, Adam & Markiewicz, 2002, Hofinger, 2002.

En primer lugar, se supone una oscilación armónica temperatura en la superficie (o mixto Cauchy Neuman condición de frontera), con la transferencia de calor entre el suelo y el aire. Así, el diario o las fluctuaciones estacionales de temperatura entre el suelo y la atmósfera pueden ser tratadas, en virtud del un lapso de tiempo. Esto dependerá de la profundidad considerada para el intercambiador, y puede incluso provocar un comportamiento anticíclico estacional en el histograma de la media diaria de temperatura del aire $T_{m,out}$. La superficie de un cuerpo semi infinito, supone que el intercambio de calor con el aire, que realiza una oscilación sinusoidal de temperatura T_t .

Además, suponiendo que el período transitorio de las primeras vibraciones se encuentran en estado de equilibrio. En estas condiciones la temperatura del suelo, fluctúan de acuerdo con el promedio anual de temperatura del aire $T_{m,out}$, si los efectos de la radiación y la energía geotérmica gradiente

de temperatura varían. Sin embargo, la disminución de amplitud con profundidad debido a la inercia térmica del suelo. Una función que cumple la ecuación diferencial de cambio de energía interna, con las anteriores condiciones de frontera es:

$$T(z,t) = T_{m,out} + \Delta T_{out} \bar{\eta} e^{-z/d} \cos\left[\omega(t - \bar{\epsilon}) - \frac{z}{d}\right] \quad (21)$$

Donde,

$$d = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{\alpha P}{\pi}} \quad (22)$$

$$\bar{\eta} = \frac{1}{\sqrt{1+2k+2k^2}} \quad (23)$$

$$\bar{\epsilon} = \arctan \frac{k}{1+k} \quad (24)$$

$$k = \frac{\lambda}{\alpha d} = \frac{\lambda}{\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha P}} \quad (25)$$

$T_{m,out}$, es el promedio anual de temperatura del aire (°C), $Tm^{*,out}$ es el promedio diario de la temperatura del aire (°C), ΔT_{out} , es la temperatura de amplitud (°C), $w=2\pi/P$ (1/s), ΔT_{out} , es el período de duración de la oscilación de temperatura (s), d , es la amortiguación de profundidad, y α , es el coeficiente de transmisión de calor entre el suelo y el aire.

En la superficie ($z = 0$), la solución se reduce a:

$$T(0,t) = T_{m,out} + \Delta T_{out} \eta \cos(\omega t - \bar{\epsilon}) \quad (26)$$

Como puede apreciarse, la amplitud de la temperatura de la superficie se reduce en función del factor $\eta < 1$, en relación con la temperatura del aire y, además, sufre un desfase de condicionado por ϵ . La siguiente ilustración presenta la profundidad de las curvas de tiempo para un período completo en diferentes momentos.

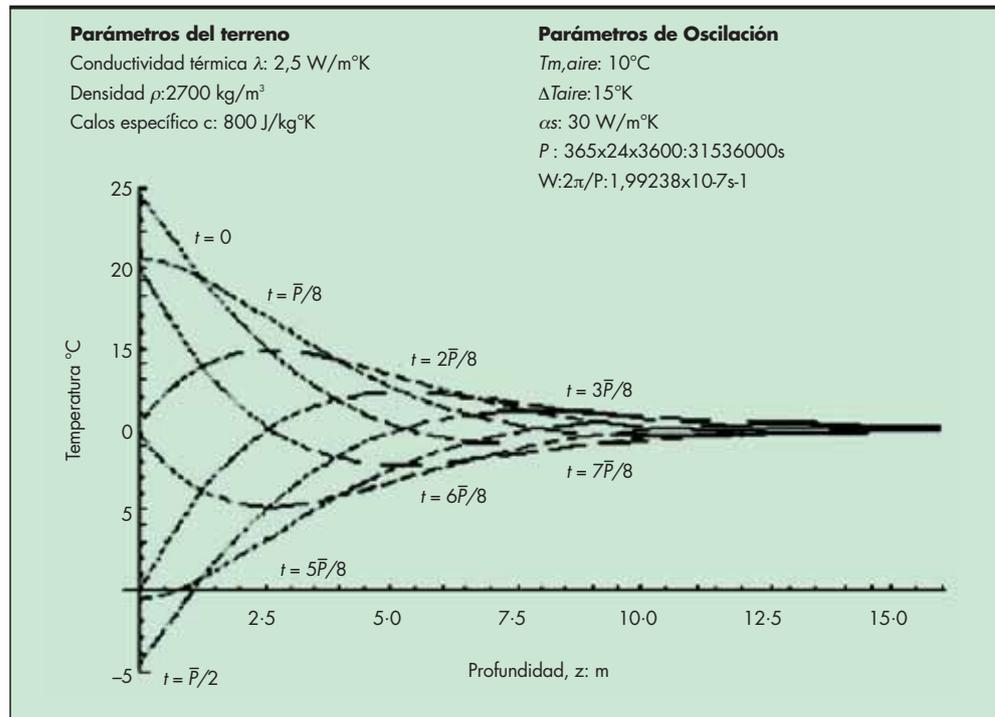


FIGURA 3. Distribución de temperatura del terreno debida a la oscilación armónica de la temperatura exterior-Prof. Heinz Brandl.

5.2. TRANSFERENCIA TÉRMICA ENTRE EL FLUIDO INTERCAMBIADOR, EL CONCRETO Y EL TERRENO

El uso práctico de todos los conceptos anteriormente descritos, proporcionan las herramientas para la explotación eficiente de la energía geotérmica superficial, para la cual es necesaria la interacción de varias disciplinas como lo son la termodinámica, la hidráulica y la ingeniería del terreno reunidas en una sola.

Para modelar la transferencia de calor entre un intercambiador geotérmico (intercambiador vertical, pilotes o micropilotes termo activos), el terreno, el fluido intercambiador y las paredes de la tubería de polietileno de alta densidad, tienen la misma o similar temperatura que la lechada u hormigón. Este supuesto depende inicialmente del comportamiento del flujo y de su régimen hidráulico, si es laminar o turbulento. En la figura 4 se muestra una ilustración con las variables térmicas que intervienen en un micropilote termo activo.

6. ENSAYOS TIPO Y EQUIPOS DE MEDICIÓN

Para una adecuada caracterización térmica del suelo, es necesario conocer sus propiedades índice, sus propiedades térmicas y sus respuesta térmica ante flujos de calor controlados, tal como se presenta a continuación:

6.1. PROPIEDADES ÍNDICE DEL TERRENO

- Humedad natural, UNE_103300.
- Plasticidad, UNE_103103/04/05.
- Peso unitario,
- Densidad, UNE_103302
- Índice de poros, UNE_103405
- Granulometría, UNE_103101.
- Grado de Saturación,
- Permeabilidad, UNE_103403.

6.2. PROPIEDADES TÉRMICAS Y SU RESPUESTA ANTE FLUJOS DE CALOR CONTROLADOS

6.2.1. Conductividad en laboratorio y en campo

- ASTM E1225-04, la muestra monta entre dos discos de material conocido. La potencia por unidad de superficie transferida a través del material, debe equipararse a la potencia a la potencia requerida para materiales estándar de conductividad conocida. Esta prueba contrasta la conductividad térmica de un material conocido con uno de un material estándar.
- ASTM C518-04, la muestra es instalada entre dos láminas delgadas, de un material de conductividad térmica conocida y la energía que fluye a través del sistema se infiere de las medidas exactas de la caída de temperatura a través de las placas delgadas.
- ASTM C177-99, método de plato caliente, se utiliza para medir la conductividad de muestras para aislamiento térmico. Este método es apropiado para los suelos, aunque su rango de medición de conductividad es baja, debido al tamaño de las muestras requeridas.
- ASTM C1113-99, método de aguja caliente, es muy usado para determinar la conductividad térmica en suelos y rocas blandas tanto en laboratorio como *in situ*. Posee un calorímetro que se introduce, en un prehuero realizado sobre la muestra, midiendo la diferencia de temperatura radial en toda la muestra.
- ASTM D5334-00, procedimiento de sonda térmica con aguja de corriente constante. La variación en la temperatura se controla con el tiempo, y así determinar la conductividad en condiciones estacionarias. Esta sonda se utiliza en las muestras de laboratorio de suelos y en los suelos cercanos a la superficie.

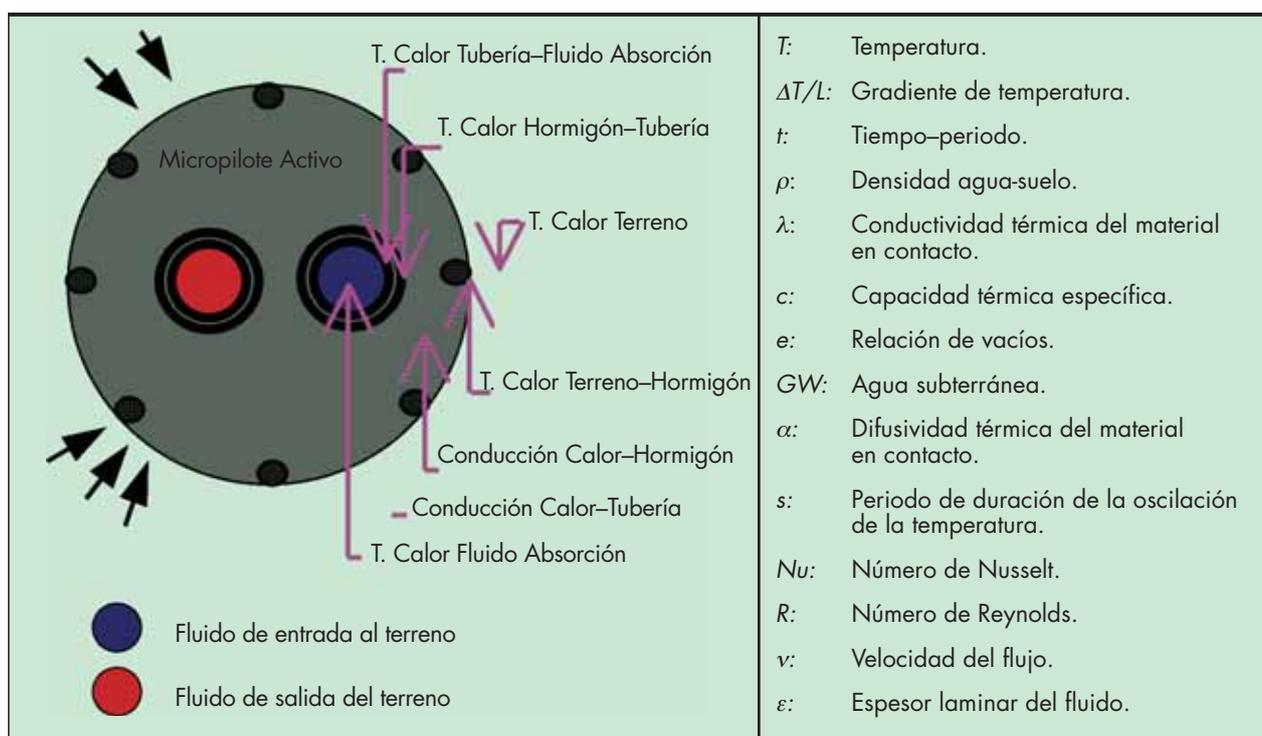


FIGURA 4.

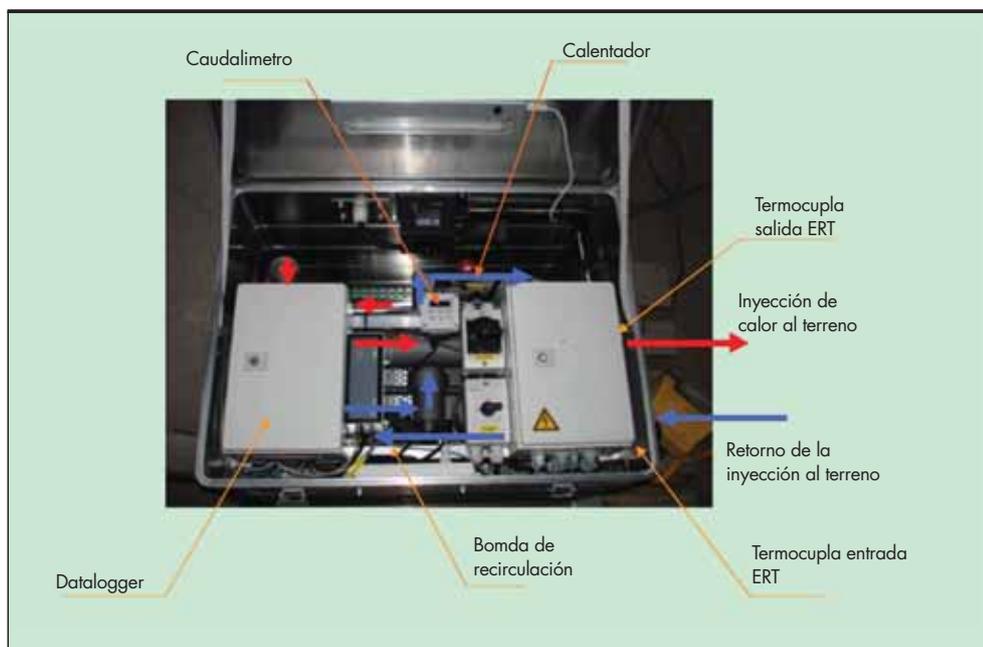


FIGURA 5. Equipo para la realización del Ensayo de Respuesta Térmica ERT de INGEOSOLUM.

6.2.2. Resistividad en laboratorio y en campo

- IEEE 442-1981, método basado un conocimiento profundo de las propiedades térmicas del terreno, que permite instalar correctamente y establecer la carga adecuada de los cables subterráneos.

6.3. ENSAYOS DE RESPUESTA TÉRMICA IN SITU

Para el cálculo de cualquier sistema de captación geotérmica de baja temperatura, es necesario conocer las propiedades térmicas del terreno, con el fin de aumentar la eficiencia energética de los intercambiadores geotérmicos.

El Ensayo de Respuesta Térmica ERT, es un método para determinar las propiedades térmicas del terreno in-situ, mediante la inyección constante de calor a un sondeo y así medir la temperatura de respuesta térmica del mismo.

6.3.1. Componentes del equipo

A continuación se describen los componentes del equipo desarrollado por INGEOSOLUM.

- Termómetro para la temperatura del aire exterior.
- Termómetro para la temperatura del aire interior.
- Regulador de llenado y válvulas de purga de todo el sistema.
- Termómetro para la temperatura del fluido de entrada.
- Termómetro para la temperatura del fluido de salida.
- Sistema de seguridad que interrumpe el ensayo cuando cae la presión por debajo de 1bar.
- Termostato que regula la temperatura del fluido a 80°C.
- Sistema de seguridad de apagado de emergencia si la temperatura del fluido supera los 95°C.
- Bomba de circulación de velocidad ajustable.
- Contador de energía.
- Válvula de liberación de presión >3 Bar.
- Calentador con una potencia de 9 kW, ajustable en pasos de 1 kW.

- Medidor de presión.
- Medidor de caudal.
- Data-logger para la toma y almacenamiento de los datos recogidos.
- Modem GSM para la consulta de datos.

6.3.2. Base teórica

Calor de Conducción:

La extracción de calor se basa en la ecuación clásica de conducción de calor [4], desarrollada por Fourier en 1822, la cual considera que el medio es homogéneo, isotrópico y continuo:

$$\alpha \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (27)$$

Donde T es la temperatura (°K), t es el tiempo en (s) y α es la difusividad térmica (m²/s), y definida por:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_m} \quad (28)$$

Donde λ es la conductividad térmica (w/m°K), ρ es la densidad del terreno kg/m³ y c_m es el calor específico por unidad de masa.

Por consiguiente a mayor difusividad térmica α , más rápida es la propagación de calor en el medio. A partir de la ecuación [4], puede observarse que, cuando el proceso de conducción de calor llega a un punto constante o de equilibrio, la temperatura sobre el terreno se hace independiente del tiempo y a su vez de la difusividad térmica. En este punto el calor por conducción pasa de ser transitorio a un estado de equilibrio de intercambio térmico. Por otra parte, cuando el coeficiente de almacenamiento ρc_m de un material disminuye, la influencia del estado de equilibrio térmico, se convierte en una condición de estado muy importante para determinar la duración del tiempo de duración del ERT, y de la capacidad máxima de extracción de calor que podemos obtener en un terreno específico.

La conductividad térmica λ , es uno de los parámetros más importantes para diseñar un intercambiador geotér-

mico. Esta propiedad del terreno depende de la densidad, la temperatura, la forma de las partículas, la porosidad, el contenido de humedad y la composición mineral del suelo. Aunque en la literatura existen valores de referencia publicados para los diferentes tipos de terrenos, el gran impacto y diversidad de factores específicos de la conducción térmica de una determinada formación de suelo o roca, hace muy difícil pronosticar la conductividad térmica λ , sin realizar un ERT in-situ.

El diseño de un intercambiador geotérmico, también depende en gran manera de la resistencia térmica R_b , entre el calor del fluido intercambiador y el exterior de la pared de perforación ($^{\circ}\text{K}/(\text{w}/\text{m})$). R_b depende del diámetro de la perforación, del tipo de avance, de los materiales empleados y sus propiedades térmicas.

6.3.3. Ensayo de respuesta térmica (ERT)

Una vez realizado el sondeo e incorporada la sonda geotérmica, se conecta al circuito del equipo de ERT. La prueba se inicia con la circulación del fluido intercambiador, sin calefacción, hasta que la temperatura encuentre su equilibrio. Esta operación proporciona la temperatura inicial y su duración oscila entre 12 y 16 horas. Seguidamente el equipo de calefacción se enciende con la potencia necesaria para una inyección de calor según la ecuación [28].

Durante la prueba, se debe registrar la siguiente información:

- Temperatura de entrada y salida de las sondas geotérmicas.
- Temperatura interna y externa del equipo de ERT.
- Presión y caudal en el sistema.
- Consumo eléctrico (contador).

Finalmente se prepara un informe de la prueba con el siguiente contenido: Gráficos con la evolución de la temperatura, el caudal y la presión, antes y después de la inyección de calor al terreno, determinación del perfil de temperatura, conductividad térmica del terreno y respuesta térmica del sondeo.

Problemas comunes durante la realización del ERT:

A continuación se mencionarán algunas de las acciones ajenas al ensayo que pueden afectar la calidad de la prueba:

- Seleccionar un tipo perforación inadecuado que altere térmicamente el terreno.
- Dosificación bentonita-cemento del relleno.
- Selección de las sondas geotérmicas. Deben cumplir los requerimientos térmicos, de presión de instalación y de presión de funcionamiento.
- Un ERT no debe realizarse, en la medida que sea posible, inmediatamente después de realizar el sondeo, ya que los elementos de corte sobre el terreno le proporcionan calor al sistema. Es necesario iniciar la prueba varios días después.
- Se debe garantizar el suministro continuo de energía, ya que una caída del suministro eléctrico, se reflejaría en el perfil de conductividad térmica del proyecto, el cual debe reportarse y posteriormente interpretarse.

6.3.4. Configuración de los parámetros de la prueba

El nivel de potencia eléctrica a suministrar, debe mantener la temperatura del fluido intercambiador, con la mínima posible desde el inicio hasta el final de la prueba. El rango de valores más usados de calor de inyección suelen estar entre 9-50 w/m

durante la prueba. Este nivel de potencia depende además del flujo de calor q , y de la profundidad del intercambiador:

$$P = q \times H \quad (29)$$

Durante la prueba, normalmente, el flujo presenta régimen turbulento, sin embargo el tipo de flujo (*Laminar o Turbulento*), debe elegirse en función de la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del intercambiador de calor. Lo ideal sería que la diferencia de temperatura se mantenga entre 3 y 5 $^{\circ}\text{K}$, para ello podemos emplear la siguiente expresión:

$$P = C_v * Q * \Delta T_{\text{entrada-salida}} \quad (30)$$

Donde C_v es la capacidad calorífica volumétrica específica del agua ($\text{J}/\text{m}^3\text{K}$), Q es el flujo a través de la sonda geotérmica (m^3/s) y $\Delta T_{\text{entrada-salida}}$ es la diferencia de temperatura del fluido a la entrada y salida en ($^{\circ}\text{K}$).

Durante la ejecución de la prueba, el fluido intercambiador eleva su temperatura, el cual puede inducir un proceso de convección interna, para evitar esta perturbación a lo largo de la sonda geotérmica, el incremento de la temperatura durante la prueba $\Delta T_{\text{entrada-salida}}$ no debe exceder de 30 $^{\circ}$ a 35 $^{\circ}\text{C}$, este aumento se estima empleando las siguientes relaciones (Eskilson, 1987).

$$\Delta T = (R_q + R_b) * q \quad (31)$$

Donde R_q es la respuesta técnica del suelo ($\text{K}/(\text{w}/\text{m})$), y se puede determinar a partir de:

$$R_q = \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln \frac{4\alpha t}{r_b} \right) - \gamma \quad (32)$$

Y λ es la conductividad térmica ($\text{w}/\text{m}^{\circ}\text{K}$), α es la difusividad térmica (m^2/s), t es el tiempo en (s), r_b es el radio del sondeo y γ es la constante de Euler (0.5772).

El tiempo mínimo requerido para una correcta medición del ensayo de ERT, presenta diferentes criterios según las recomendaciones de diferentes investigadores, es así que Austin, *et al.* (2000), encontraron que la duración de la prueba debe ser de 50 horas para ser considerada como satisfactoria, para las instalaciones de intercambiadores energéticos verticales típicos. Gehlin (1998) recomienda que la prueba tenga una duración de unas 60 horas. Smith y Perry (1999a) afirman que 12-20 horas de medición es suficiente. En general, los ensayos de corta duración dan una respuesta conservadora, es decir, una baja estimación de la conductividad térmica. Witte, *et al.* (2002) realizaron ensayos con más de 250 horas de prueba para fines de investigación; sus ensayos comerciales son de 50 horas de duración. Austin, *et al.* (2000) y Witte, *et al.* (2002) han comparado diferentes pruebas de duración, que aún están en proceso de estandarización.

6.3.5. Cálculo de la conductividad térmica

La respuesta térmica del terreno λ y la resistencia térmica de sondeo R_b , no pueden medirse directamente, sino que deben inferirse, de las mediciones registradas durante la elaboración de la prueba.

Para dar solución a ello varios autores han proporcionado soluciones. En este artículo sólo se presenta la empleada con mayor frecuencia:

Fuente de línea continua

Este modelo asume que la transferencia de calor cerca del sondeo, durante la prueba, es puramente conductiva en dirección

radial y constante a lo largo de la perforación. Al inyectar calor, la relación entre la temperatura del fluido y la temperatura en la pared del orificio es:

$$T_f^q(t) = T_b^q(t) + q * R_b \quad (33)$$

Donde; R_b es la resistencia térmica entre el fluido contenido en las tuberías y la pared del sondeo, q es el cambio de temperatura debido al flujo de calor.

De tal forma que la temperatura del flujo en función del tiempo puede escribirse de la siguiente forma:

$$T_f(t) = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \ln(t) + \left[\frac{Q}{H} \frac{1}{4\pi\gamma} \left(\ln\left(\frac{4\alpha}{r_b^2} - \gamma\right) - R_b \right) + T_0 \right] \quad (34)$$

Para

$$t \geq \frac{5r_b^2}{\alpha} \quad (35)$$

donde:

$T_f(t)$: temperatura media del fluido de intercambio ($(T_{\text{entrada}} + T_{\text{salida}})/2$).

Q : potencia inyectada (W).

λ : conductividad térmica (W/m²K).

H : profundidad efectiva del sondeo (m).

t : tiempo después de inyección de calor (s).

α : difusividad térmica (m²/s).

r_b : radio del sondeo (m).

γ : Constante de Euler (0,5772).

R_b : resistencia térmica (K/(W/m)).

T_0 : temperatura no perturbada de la tierra °C.

La ecuación anterior se asocia con la siguiente ecuación de la recta $y = mx+b$:

$$T_f(t) = k * \ln t + m \quad (36)$$

donde:

$$k = \frac{Q}{4\pi\lambda H} \quad (37)$$

$$m = \left[\frac{Q}{H} \frac{1}{4\pi\gamma} \left(\ln\left(\frac{4\alpha}{r_b^2} - \gamma\right) - R_b \right) + T_0 \right] \quad (38)$$

Por consiguiente encontrando la pendiente de la temperatura media del fluido con relación al logaritmo neperiano de la curva del tiempo de respuesta térmica, es posible determinar el valor de λ , con la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi k H} \quad (39)$$

Una vez estimado el valor de λ , se calcula la magnitud de R_b , mediante la siguiente expresión:

$$R_b = \frac{H}{Q} x(T_f - T_0) - \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4\alpha t}{r_b^2}\right) - \gamma \right) \quad (40)$$

donde:

$T_f(t)$: temperatura media del fluido de intercambio.

T_0 : temperatura no perturbada del terreno (°C).

H : profundidad efectiva del sondeo (m).

Q : potencia inyectada (W).

λ : conductividad térmica (W/m²K).

α : difusividad térmica (m²/s).

t : duración la fase de calentamiento (s).

r_b : radio del sondeo (m).

γ : Constante de Euler (0,5772).

6.3.6. Métodos alternativos

Existe una amplia gama de ensayos para determinar la conductividad térmica del terreno en laboratorio, desarrolladas en los Estados Unidos y en el Reino Unido, las cuales están diseñadas en su mayoría para muestras cilíndricas, obtenidas en la exploración geotécnica.

Estos ensayos son realizados en laboratorios con temperatura ambiente controlada, donde la muestra antes de ser ensayada, no debe experimentar cambios térmicos.

La preparación de la muestra es similar a la de un espécimen para un triaxial convencional, la cual se introduce dentro de dos piezas que contienen elementos de calefacción, con instrumentos de medición de temperatura incorporados en la muestra de terreno, en las platinas confinantes superior e inferior y en el medio ambiente.

El modelo de análisis asume que el suelo ensayado es homogéneo e isotrópico y que la conducción térmica es radial y constante.

Las etapas generales de este tipo de pruebas son:

- Suministro de una fuente constante de calor durante 6 minutos y medición de la temperatura inicial.
- Mantener el flujo de calor y medir la temperatura durante 5 horas.
- Determinar la temperatura de equilibrio térmico.
- Medición de la temperatura en la fase de enfriamiento, después de cortar el flujo de calor.

Las propiedades térmicas de la muestra de terreno son:

- Conductividad térmica.
- Resistividad térmica.
- Capacidad calorífica específica.
- Difusividad térmica.

Desventajas de los métodos alternativos

Las pruebas en laboratorio para determinar las características térmicas de los suelos, son difíciles y delicadas de llevar a cabo debido a las siguientes razones:

- La calidad de la muestra, ya no está bajo sus condiciones de confinamiento natural, para tratar de reconstruir estas condiciones se necesitaría un triaxial.
- No se tienen en cuenta las condiciones hidrogeológicas del terreno.
- Las condiciones de volumen y porosidad iniciales han variado bruscamente.
- Existe un cambio de la humedad natural, densidad y condiciones de frontera.

En síntesis los métodos alternativos, pueden servir de apoyo y de información complementaria a la medición de respuesta térmica realizada in situ, la cual es la que representa mejor las propiedades térmicas del terreno bajo todas sus condiciones de frontera.

6.4. MÉTODOS ALTERNATIVOS

- Teledetección, sensores remotos, para determinar la difusividad térmica, de la capa superficial del terreno.
- Gravimetría, técnica geofísica que se emplea para encontrar focos calientes en el subsuelo.
- Diagrafías, técnica geoelectrica que registra propiedades físicas del terreno, mediante el uso de sondas en sondeos verticales.



FIGURA 6. Equipo para la realización del ensayo de Respuesta Térmica del Terreno en laboratorio desarrollado por Peter Keeton.

7. MODELOS AVANZADOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL TERRENO

El terreno es un material difícil de modelar debido a que se encuentra sujeto a una serie de procesos que actúan conjuntamente y de forma acoplada, es decir, que dichos procesos se relacionan entre sí. El modelo Térmico-Hidráulico-Mecánico (THM), ofrece una serie de códigos numéricos, que permiten la simulación de procesos de flujo multifásicos y resolver ecuaciones constitutivas que regulan el comportamiento termo, hidro, mecánico del suelo, desarrolladas principalmente por la Universidad Politécnica de Cataluña. En las figuras 7 y 8 se presenta una breve descripción del modelo y de sus leyes constitutivas realizadas por el profesor Lyesse Laloui, quien ha realizado modelos THM, para geoestructuras y cimentaciones

termo activas, como pilotes, muros de contención y losas de cimentación.

8. COMENTARIOS FINALES

La caracterización térmica del suelo ofrece herramientas que ayudan a los diseñadores de intercambiadores geotérmicos y de estructuras termo-activas a incrementar el grado de conocimiento de las propiedades térmicas, hidráulicas y mecánicas de los suelos, muy enfocadas en determinar la respuesta térmica, ante diferentes escenarios de inyección o extracción de calor.

Las propiedades índice del terreno, como la humedad natural, el peso unitario, la densidad y el índice de poros, del mismo modo parámetros térmicos como, la conductividad

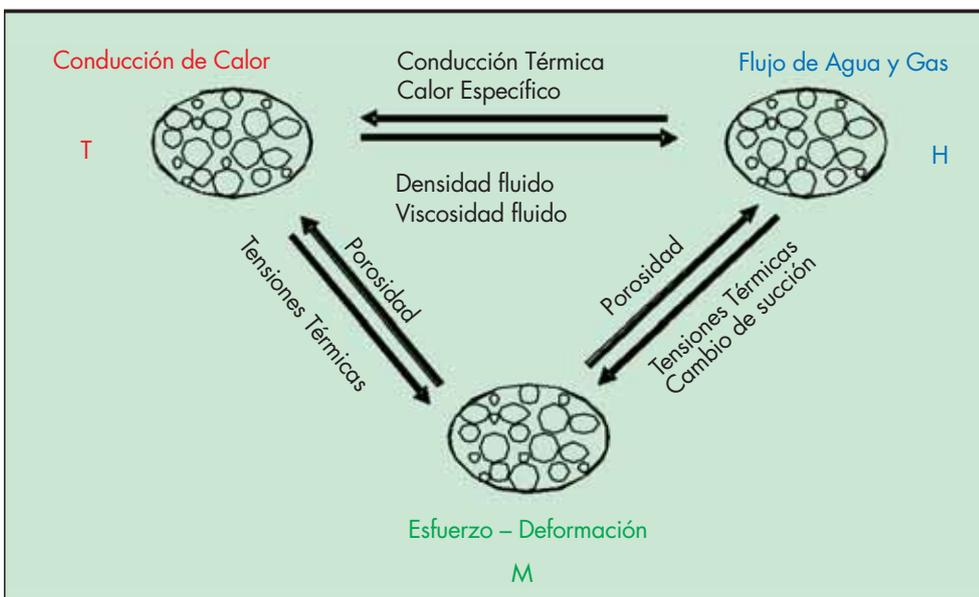


FIGURA 7. Esquema básico del Modelo THM del Prof. Lyesse Laloui.

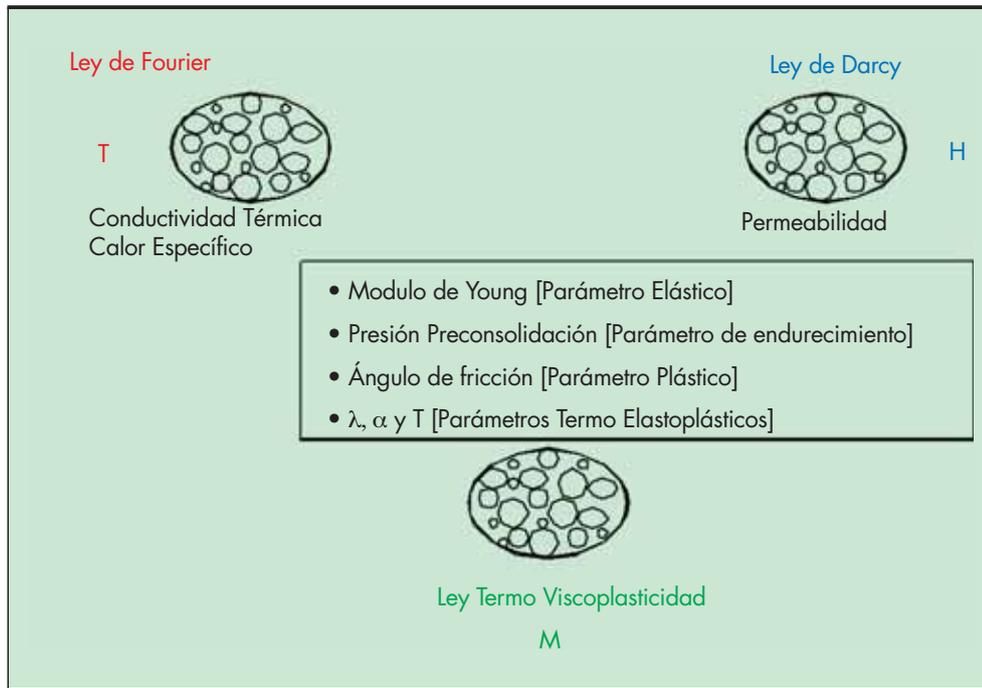


FIGURA 8. Leyes Constitutivas para un modelo THM del Prof. Lyesse Laloui.

térmica, la difusividad térmica y la capacidad calorífica del material, son determinantes en el diseño de intercambiadores geotérmicos y de geoestructuras activas energéticamente.

Finalmente el conocimiento de las propiedades físicas y térmicas del terreno, contribuye en el diseño de estructuras ecoeficientes que se beneficien del uso de la geotermia de baja temperatura. En dichos proyectos, intervienen especialistas de diferentes áreas, generando equipos de trabajo multi e interdisciplinarios, debido a que el intercambio de calor entre las estructuras y el terreno, No puede considerarse de forma separada y requiere de un trabajo mancomunado entre especialistas en las áreas de climatización, bombas de calor geotérmicas e intercambio de calor en el terreno.

9. 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.

Burland, J. B., Broms, B. B. & de Mello, V. F. B. (1977). *Behaviour of foundations and structures*. Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng, Tokyo 2, 495±546.

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.

González de Vallejo. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson – Prentice Hall. Madrid.

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.

Katzenbach, R., Arslan, U., Moorman, C. & Reul, O. (1998). Piled raft foundation: interaction between piles and raft. Darmstadt Geotechnics (Darmstadt University of Technology), No. 4, 279±296.

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.

Zuloaga, I. Sierra, J (2008), *Micropiles, as heat exchangers, for geothermal heating and cooling. A case study in Madrid Spain*. Euroengeo 2008. Cities and Their Underground Environment. Madrid.