

Medida de la conductividad térmica del suelo en laboratorio. Fundamentos físicos, aplicaciones geotérmicas y relaciones con otros parámetros del suelo

Lab determination of soil thermal Conductivity. Fundamentals, geothermal applications and relationship with other soil parameters

Freddy Isidro Nope Gómez^{1*} y Cristina de Santiago²

Palabras clave

geotermia;
propiedades térmicas del terreno;
conductividad térmica;
ensayo de respuesta térmica;
estructuras termoactivas;

Sumario

Son cada vez más numerosas las aplicaciones de energía geotérmica de baja entalpía asociadas a elementos estructurales de obras civiles (túneles, pantallas, carreteras, estaciones de tren o metro) o en la edificación. Para el correcto dimensionamiento de tales instalaciones, es necesario conocer tanto los parámetros geotécnicos que describen el comportamiento estructural de los elementos, como los parámetros de comportamiento térmico, entre los que destaca por su importancia la conductividad térmica del terreno (λ), que condiciona la eficiencia energética del sistema geotérmico suelo-estructura. Este trabajo se ha centrado en la puesta a punto de un analizador de propiedades térmicas del suelo con el doble objetivo de comprender los fundamentos en los que se basa la técnica de medida y validar una metodología de trabajo lo más rigurosa y eficiente posible, minimizando las diferentes fuentes de error durante el protocolo de ensayo. Se realizaron 550 mediciones en diferentes tipos de muestras de carácter granular (gravas y arenas) y cohesivo (arcillas), en condiciones diferentes y controladas de densidad (índice de huecos) y grado de saturación. Se describen las diferentes tendencias observadas en función de cada uno de estos aspectos. Finalmente, teniendo en cuenta que las muestras fueron extraídas a diferentes profundidades del testigo de un sondeo geotérmico, se elaboró un perfil en profundidad con los rangos de conductividades térmicas de cada nivel estratigráfico de suelo en condiciones cercanas a la saturación con el fin de correlacionarlo con el valor de conductividad térmica obtenida del terreno mediante el ensayo in situ conocido como Prueba de respuesta térmica o TRT (Thermal Response Test).

Keywords

geothermics;
thermal properties of the ground;
thermal conductivity;
Thermal Response Test (TRT);
energy geostructures;

Abstract

Shallow geothermal energy applications in buildings and civil engineering works (tunnels, diaphragm walls, bridge decks, roads, and train/metro stations) are spreading rapidly all around the world. The dual role of these energy geostructures makes their design challenging and more complex with respect to conventional projects. Besides the geotechnical parameters, thermal behavior parameters are needed in the design and dimensioning to warrant the thermo-mechanical stability of the geothermal structural element. As for obtaining any soil thermal parameter, both in situ and laboratory methods can be used. The present study focuses on a lab test known as "the needle method" to measure the thermal conductivity of soils (λ). Throughout this research work, different variables inherent to the test procedure, as well as external factors that may have an impact on thermal conductivity measurements were studied. Samples extracted from the cores obtained from a geothermal drilling conducted on the campus of the Polytechnic University of Valencia, showing different mineralogical and nature composition (granular and clayey) were studied different (moisture and density) compacting conditions. 550 thermal conductivity measurements were performed, from which the influence of factors such as the degree of saturation - moisture, dry density and type of material was verified. Finally, a stratigraphic profile with thermal conductivities ranges of each geologic level was drawn, considering the degree of saturation ranges evaluated in lab tests, in order to be compared and related to thermal response test, currently in progress. Finally, a test protocol is set and proposed, for both remolded and undisturbed samples, under different saturation conditions. Together with this test protocol, a set of recommendations regarding the configuration of the measuring equipment, treatment of samples and other variables, are posed in order to reduce errors in the final results.

1. INTRODUCCIÓN

La conductividad térmica es la propiedad de mayor importancia de entre las que caracterizan el comportamiento

térmico de un material. Constituye un parámetro fundamental en el diseño de instalaciones de aprovechamiento geotérmico. Aunque en estudios preliminares es posible estimar el valor aproximado de conductividad térmica del terreno a partir de los diagramas que correlacionan densidad, textura y saturación del terreno, en proyectos de una cierta entidad es indispensable medir con precisión y fiabilidad la conductividad térmica del suelo mediante ensayos in situ o de laboratorio.

* Corresponding author: fredynope@gmail.com

¹ Endesa Chile, Santiago de Chile.

² Laboratorio de Geotecnia, (CEDEX), Madrid, España.

La conductividad térmica (W/m·K) se define como el flujo de calor transmitido por conducción a través de un cuerpo sometido a un gradiente de temperatura de 1K/m. Es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. Matemáticamente se expresa mediante la ecuación:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

Dónde el signo menos (–) indica que el flujo de calor se produce de caliente a frío, q es flujo de calor por unidad de tiempo o por unidad de área, λ es la conductividad térmica, dT/dx es el gradiente de temperatura a través del medio conductor.

De los diversos métodos existentes en la actualidad para determinar la conductividad mediante ensayos de laboratorio, este trabajo se ha centrado en dos de ellos, conocidos como “Método de la aguja térmica simple” y “Método de la aguja térmica doble” con el fin de conocer y controlar la diferentes variables que actúan e influyen en el resultado obtenido.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Se han estudiado 15 muestras de diferente naturaleza geológica, extraídas a diferentes profundidades del testigo del sondeo geotérmico perforado en el campus de la Universidad Politécnica de Valencia en el marco del proyecto PITERM “Caracterización termo-mecánica y nuevas técnicas de diseño de pilotes termoactivos”, desarrollando conjuntamente entre el CEDEX, Rodio Kronsa, Energesis y la Universidad Politécnica de Valencia UPV. En la tabla 1 se enumeran las muestras, la profundidad de sondeo a la que pertenecen, su clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (U.S.C.S.), así como los parámetros

básicos determinados previamente al estudio de sus propiedades térmicas: humedad inicial (W), peso específico seco de la muestra (γ_d), peso específico relativo de las partículas sólidas (γ_s), índice de huecos (e), porosidad (n) e índice de saturación (Sr).

2.2. Métodos

La conductividad térmica puede medirse directamente mediante ensayos de laboratorio en condiciones estacionarias o condiciones variables, o determinarse de una forma indirecta a partir de la medida de la difusividad térmica (tabla 2).

Tabla 2. Ensayos de determinación de la conductividad térmica en laboratorio

Métodos de Medición Directa	Condiciones estacionarias	Clarke et al. (2008)
		ASTM C 518-04
		ASTM C 177-04
Métodos de Medición Indirecta	Condiciones variables	ASTM E 1225-09
		ASTM C 1113-99
		ASTM D 5334-08
		Bristow et al. (1994)

De entre todos ellos, este estudio se ha centrado en los dos últimos, por considerarlos los más adecuados para el estudio de las propiedades térmicas de suelos y rocas. Para ello, el Laboratorio de Geotecnia de CEDEX adquirió durante 2013 un analizador de propiedades térmicas KD2-PRO de la casa DECAGÓN, cuyos elementos componentes se muestran en la figura 1.

Este equipo permite medir indistintamente mediante una sonda simple o doble.

Método de la aguja simple: Este método se llevó a cabo según las especificaciones descritas en la norma ASTM D

Tabla 1. Muestras utilizadas para la determinación de la conductividad térmica

Muestra	Prof. Sondeo (m)	U.S.C.S.	W (%)	γ_d (t/m ³)	γ_s	e	n	Sr (%)
M-7411	1,2 – 1,3	CL	17,14	1,75	2,67	0,53	0,35	87
M-7412	3,2 – 3,4	CL	17,20	1,58	2,66	0,68	0,40	67
M-7413	3,8 – 3,9	CL	19,81	1,69	2,66	0,54	0,35	92
M-7414	4,8 – 5,0	SM	19,05	1,76	2,67	0,52	0,34	98
M-7415	5,5 – 5,6	ML	13,33	1,75	2,67	0,53	0,35	68
M-7416	6,0 – 6,2	SC	3,45	1,71	2,67	0,56	0,36	16
M-7417	7,4 – 7,55	CL	22,00	1,53	2,67	0,75	0,43	79
M-7418	9,4 – 9,6	SW	0,00	2,00	2,68	0,34	0,25	0
M-7419	12,6 – 13,2	GM	1,60	2,22	2,69	0,21	0,17	20
M-7420	14,0 – 14,2	GM	0,50	2,26	2,67	0,18	0,15	7
M-7421	19,2 – 19,4	CL	18,45	1,79	2,69	0,50	0,33	100
M-7422	20,8 – 21,2	GP-GM	2,94	2,25	2,68	0,19	0,16	41
M-7423	21,6 – 21,8	GW-GM	3,66	2,25	2,68	0,19	0,16	51
M-7424	24,5 – 24,6	CL	13,01	1,94	2,67	0,38	0,28	92
M-7425	26,8 – 27,0	CL	14,29	1,68	2,66	0,58	0,37	65



Figura 1. Analizador de propiedades térmicas KD2-PRO (DECAGÓN).

5334-08: “Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure”. En este ensayo se hace pasar una corriente constante a través de un filamento calefactor ubicado en el interior de una aguja hipodérmica introducida en la muestra de suelo. Mientras tanto se debe registrar y controlar la variación de la temperatura en régimen estacionario. Para ello, la misma sonda contiene un elemento calefactor, que se controla en todo momento mediante el voltaje aplicado a una resistencia calibrada, y un termopar colocado en el punto medio de la sonda para medir la temperatura. Comparando la cantidad de energía aplicada a la aguja con el aumento registrado de temperatura, es posible deducir la cantidad de calor transferido al material que rodea la sonda. La interpretación de este ensayo, al igual que en caso anterior, se basa en la teoría de la fuente de calor lineal infinita en el seno de un medio homogéneo infinito.

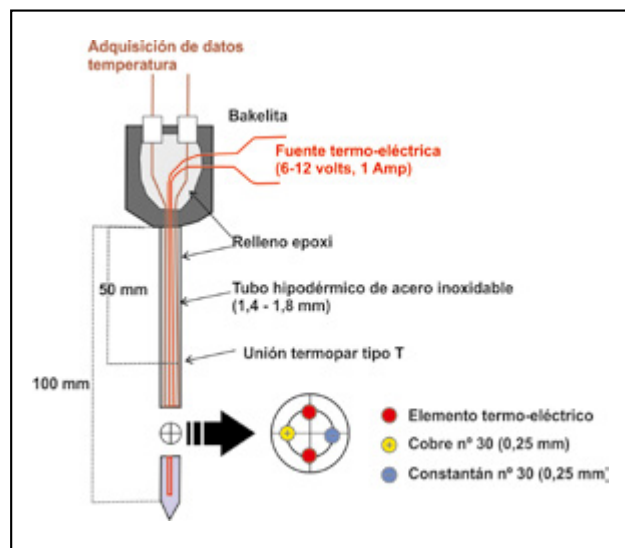


Figura 2. Elementos de la sonda simple.

Método de la sonda doble: Este método, a diferencia de anterior, no cuenta con una norma propia, aunque es ampliamente conocido y aceptado en la comunidad científico-técnica (Bristow et al., 1994). El equipo consiste en dos pequeñas sondas dispuestas muy cerca la una de la otra (figura 3). Una de las sondas emite un pulso de calor muy breve y la otra sonda mide la temperatura a una corta distancia. De esta forma se puede determinar la capacidad calorífica mediante la medida del máximo aumento de temperatura a una distancia conocida de la fuente de calor. Este método permite el cálculo directo de la difusividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica.

Si por otro lado se conoce la densidad del material, se calculará la conductividad térmica del material analizado.

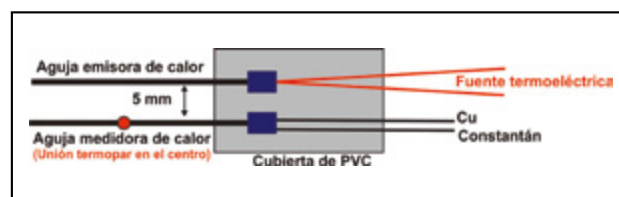


Figura 3. Elementos de la sonda doble.

Con el fin de poder estudiar independientemente las medidas obtenidas mediante los dos tipos de sondas, así como la influencia de aspectos como su posición en la muestra, su distancia del centro o el borde de la misma o su orientación paralela o perpendicular a la dirección del sondeo, se tomaron medidas de la conductividad térmica en 8 posiciones diferentes, siguiendo el esquema de la figura 4. Las posiciones 1 a 5 son tomadas con la sonda simple (TR-1) a diferentes distancias relativas del centro y del borde de la probeta, en la cara superior, superficie vertical y cara inferior respectivamente. Las posiciones 6 a 8 son diferentes orientaciones de la sonda doble en la cara superior y vertical.

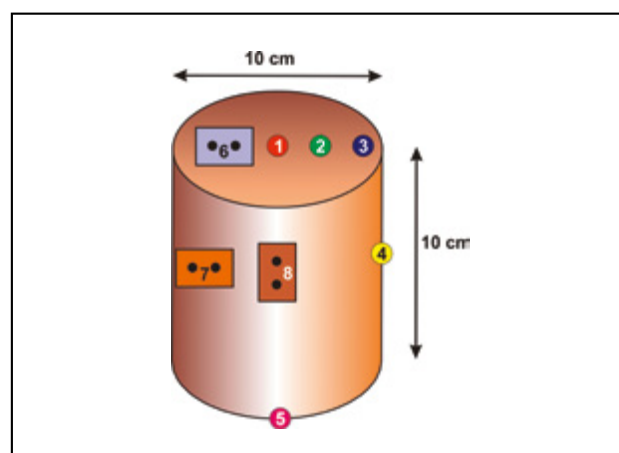


Figura 4. Posiciones de medida y tipos de sonda sobre muestras de geometría cilíndrica.

3. RESULTADOS

En la figura 5 puede observarse los valores de conductividad térmica (λ) obtenidos en las 8 posibles posiciones en dos de las muestras estudiadas, un material arcilloso (M-7412) y uno granular (M-7414).

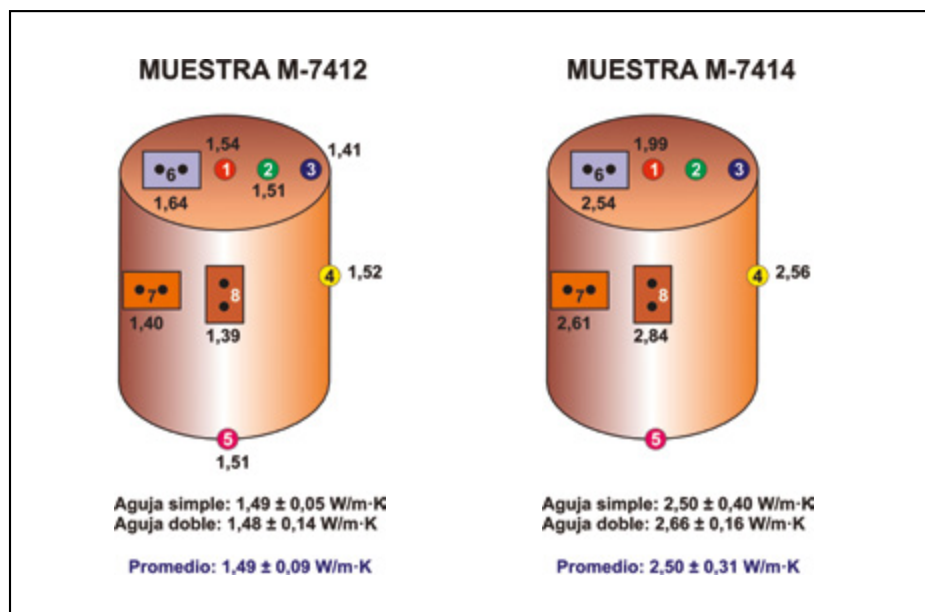


Figura 5. Valores obtenidos de conductividad térmica en la muestra M-7412 (CL) y M-7414 (SM).

Tabla 3. Resultados de conductividad térmica según la posición y tipo de sonda

	Posición	7411	7412	7413	7414	7415	7416	7417	7421	7424	7425
Aguja simple	1	1,698	1,54	1,604	1,987	1,544	1,592	1,606	1,903	2,042	1,508
	2		1,514	1,66		1,766	1,457	1,698	1,702	2,026	1,571
	3		1,41	1,04		1,337	1,067	1,421	1,272	1,622	1,48
	4	1,702	1,518	1,534	2,556	1,604	1,321	1,656	1,806	2,149	1,512
	5	1,366	1,506	1,583		1,67		1,352	1,877	1,637	1,491
	Promedio	1,589	1,490	1,533	2,505	1,625	1,416	1,567	1,783	2,000	1,509
	Desv. Est	0,193	0,051	0,252	0,402	0,161	0,224	0,152	0,258	0,247	0,035
Aguja doble	6	1,755	1,645	1,782	2,535	1,687	1,458	1,484	1,957	2,161	1,531
	7	1,631	1,4	1,657	2,605	1,665	1,578	1,638	1,997	2,23	1,471
	8	1,679	1,387	1,403	2,84	1,728	1,442	1,68	1,753	2,129	
	Promedio	1,688	1,477	1,614	2,660	1,693	1,493	1,601	1,902	2,173	1,501
	Desv. Est	0,063	0,145	0,193	0,160	0,032	0,074	0,103	0,131	0,052	0,042
TOTAL	Promedio	1,639	1,490	1,533	2,505	1,625	1,416	1,567	1,783	2,000	1,509
	Desv. Est	0,139	0,087	0,227	0,314	0,135	0,179	0,130	0,229	0,237	0,034

Todos los resultados se encuentran resumidos en la tabla 3, junto con unos índices estadísticos que facilitan la comprensión de los valores obtenidos.

4. DISCUSIÓN

A partir de los datos obtenidos en los ensayos realizados, es posible deducir y confirmar los factores del terreno que pueden modificar el valor neto de conductividad térmica resultante (Brandon & Mitchell, 1989), como son la composición mineralógica y granulométrica, la densidad seca aparente y el grado de saturación.

4.1. Influencia de la composición mineralógica y granulométrica

Resultan fundamentales tanto la composición mineralógica como la granulométrica en la conductividad térmica

resultante de la muestra geológica. En términos generales, el contenido de cuarzo aumenta la conductividad térmica del suelo. Por otro lado, atendiendo a la granulometría, los suelos bien graduados conducen el calor mejor que los suelos pobremente graduados, ya que las partículas de menor tamaño se introducen en los poros existentes entre las partículas de mayor tamaño, aumentando la densidad, disminuyendo la porosidad y aumentando el número de contactos entre partículas. Ambas afirmaciones resultan congruentes con los resultados obtenidos en este trabajo (tabla 4).

Se observa claramente que las arenas y gravas presentan valores de λ considerablemente superiores a los materiales arcillosos, siendo en general los primeros superiores a $2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, mientras los últimos se encuentran siempre por debajo de este valor umbral. Los rangos definidos en la tabla se encuentran en función del grado de saturación.

Tabla 4. Valores de conductividad térmica de las muestras ensayadas

Muestra	USCS	γ_d (t/m ³)	Sr (%)	λ W/m-K
M-7411	CL	1,75	80	1.75 – 1.85
M-7412	CL	1,58	65	1.65 - 1.75
M-7413	CL	1,69	80	1.50 – 1.70
M-7414	SM	1,76	75	2.20 – 2.70
M-7415	ML	1,75	80	1.70 – 1.90
M-7416	SC	1,71	90	1.90 - 2.10
M-7417	CL	1,53	80	1.50 - 1.70
M-7418	SW	2,00	75	2.20 – 2.50
M-7419	GM	2,22	75	2.60 – 3.00
M-7420	GM	2,26	75	2.60 – 3.00
M-7421	CL	1,79	90	1.90 – 2.00
M-7422	GP-GM	2,25	75	2.00 - 2.70
M-7423	GW-GM	2,25	75	2.00 - 2.70
M-7424	CL	1,94	85	2.10 - 2.60
M-7425	CL	1,68	80	1.50 - 1.75

La tabla 5 presenta valores recomendados de conductividades ofrecidos por las normas Alemana VDI 4640 y la norma Suiza SIA 384-6. Se observa en primer lugar la fuerte dependencia del valor de λ según el tipo de material geológico. En segundo lugar, los valores obtenidos en este estudio están dentro de los rangos esperados en función de su litología y por tanto se consideran fiables.

Tabla 5. Valores de conductividad térmica según las normas Alemanas VDI 4640 y Suiza SIA 384-6.

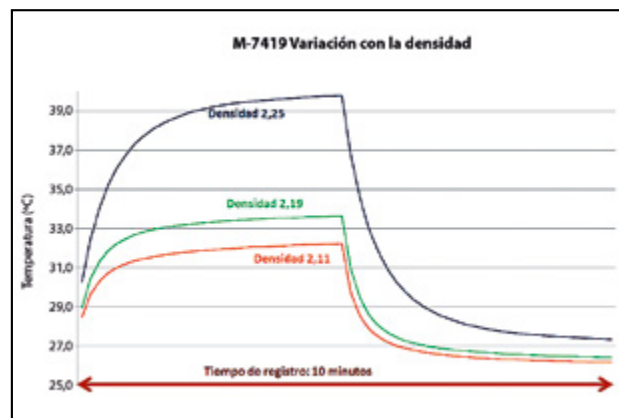
Materiales geológicos	Conductividad térmica λ (W/m-K)		
	VDI 4640		SIA 384-6
	Rango	Valor recomendado	Valor recomendado
Limo/Arcilla seca	0,4 – 1,0	0,5	0,6
Limo/Arcilla saturada	1,1 – 3,1	1,8	1,4
Arena seca	0,3 – 0,9	0,4	0,5
Arena húmeda	1,0 – 1,9	1,4	1,4
Arena saturada	2,0 – 3,0	2,4	2,3
Gravas secas	0,4 – 0,9	0,4	0,4
Gravas saturadas	1,6 – 2,5	1,8	1,7
Marga	1,1 – 2,9	2,4	2,4
Turba	0,2 – 0,7	0,4	0,4

4.2. Influencia de la densidad

No son muy numerosos, pero existen ya en la literatura estudios sobre la influencia de determinados parámetros del suelo sobre su comportamiento térmico, entre los que parecen destacar la densidad o porosidad y el grado de saturación (Shannon & Wells, 1947; Mitchell & Kao, 1978; Fricke et al., 1992; Villar, 2001; Abuel et al., 2009; Hotz & Ge, 2010).

En la figura 6 se muestra la variación de la temperatura registrada durante el ensayo en la muestra M-7419 en función de la densidad seca de compactación. Se puede observar claramente que a medida que la densidad seca

aumenta, o el índice de huecos y porosidad disminuyen, la temperatura registrada se incrementa. Esto obedece a la importancia de la conducción entre partículas sólidas como principal mecanismo de transmisión de calor. Un mayor empaquetamiento implica un mejor contacto entre partículas sólidas que favorece la transmisión de calor y por tanto genera una mayor conductividad.

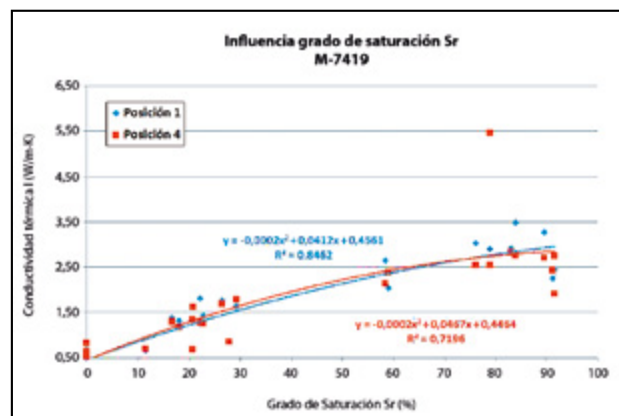
**Figura 6.** Variación de la conductividad térmica con la densidad de la muestra (M-7419).

4.3. Influencia del grado de saturación

Dado que se han realizado mediciones de las muestras en diferentes condiciones de humedad y densidad, se puede determinar el grado de influencia del grado de saturación en la conductividad térmica. Se analizan por separado los suelos granulares gruesos y los suelos de granulometría fina.

Suelos granulares gruesos

Como se observa en la figura 7 correspondiente al comportamiento térmico de la grava M-7419, la conductividad térmica aumenta con el incremento en el grado de saturación. Ello es debido fundamentalmente a que la conductividad térmica del agua es mayor a la del aire. Cuanto mayor es el porcentaje de poros llenos de agua en lugar de aire, mejor será la transmisión de calor a través de los mismos. Se observa en esta misma figura que a altos grados de saturación la conductividad térmica tiende a ser constante. Esto es razonable dado que los poros ya se encuentran completamente llenos de agua y no hay más factores que

**Figura 7.** Influencia del grado de saturación en la conductividad térmica de suelos granulares gruesos.

induzcan a cambios relevantes en la conductividad térmica del suelo. Cabe destacar que en todas las muestras de materiales granulares gruesos, la conductividad en estado saturado resultó ser hasta cinco veces superior a la conductividad en estado seco.

Suelos de grano fino

Los suelos de grano fino estudiados presentaron un comportamiento semejante en la conductividad térmica en relación a su grado de saturación. En todos los casos se obtuvo una curva de morfología similar a la obtenida en los ensayos de compactación tipo Proctor (figura 8), independientemente del tipo de sonda y posición de la misma en la muestra.

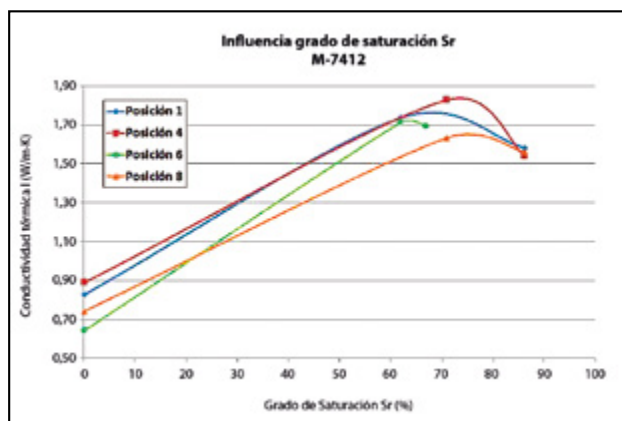


Figura 8. Influencia del grado de saturación en la conductividad térmica en suelos de grano fino.

En todos los casos se define una curva de tipo convexo hacia arriba, con un valor máximo de conductividad térmica localizado en torno al 80% de grado de saturación.

En su lado seco (S_r entre 0 y 60%) se observa un incremento lineal de λ con el incremento en la saturación del suelo. Ello es totalmente coherente con la explicación dada en el caso de los suelos granulares gruesos. A medida que los poros van llenándose de agua en lugar de aire, la mayor conductividad térmica de ésta mejora la transmisión de calor a través de los poros del material.

En el intervalo comprendido entre 70 y 80% de saturación, las curvas definen un máximo y por encima de estos grados de saturación, la conductividad se mantiene relativamente estable e incluso puede mostrar ligeras disminuciones. Este fenómeno puede explicarse de forma similar a la distribución de esfuerzos en un ensayo de compactación Proctor. Por encima de un valor umbral óptimo de saturación, los fenómenos de convección del agua intersticial asumen una importancia fundamental en la transmisión del calor a través del conjunto, en detrimento de la conductividad a través de los contactos entre las partículas sólidas. Ello puede condicionar el comportamiento térmico del conjunto en estados cercanos a la saturación.

4.4. Influencia del tipo de sonda y posición de la misma

En la figura 9, se pueden observar los registros de conductividad térmica obtenida en 10 de las muestras, en diferentes posiciones, tanto de la aguja simple como de la doble.

En la mayoría de las muestras se observan disminuciones drásticas del valor medido de conductividad térmica en las posiciones 3 y 5. Este fenómeno puede ser debido al poco distanciamiento de la sonda respecto a los bordes externos axial y longitudinal de las muestras, por lo que se decide no considerar fiables estas posiciones.

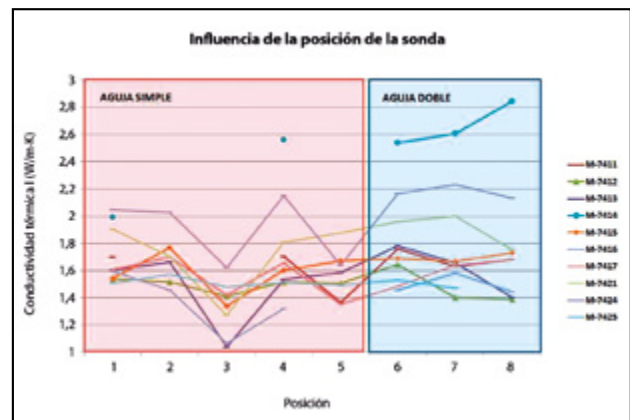


Figura 9. Variación de la conductividad térmica según el tipo de sonda y su posición.

También se observa una tendencia general a mostrar resultados similares en las posiciones 1 (en el eje del cilindro) y 2 (a 3 cm del borde). Ello da una idea del diámetro o radio mínimo de muestra imprescindible para una correcta medida.

A la vista de las curvas obtenidas, se considera que las posiciones 1 y 4 en la sonda simple y las posiciones 6, 7 y 8 en la sonda doble son las que parecen ser más fiables. Analizando con más detalle estos valores, se puede concluir que los dos tipos de sondas arrojan resultados confiables y cuantitativamente similares.

Finalmente, la estrategia de las posiciones 1 con respecto a 4 en la sonda simple y 6 con respecto a 8 en la sonda doble permite estudiar si existe o no isotropía-anisotropía en el comportamiento térmico de la muestra. Un comportamiento térmico muy diferente en las dos direcciones perpendiculares indicaría sin lugar a dudas una anisotropía en la fábrica del material geológico. Los resultados obtenidos fueron muy similares en todos los casos, lo que permite deducir una fábrica isotrópica con ausencia de fuertes orientaciones preferentes que condicionen la transmisión de calor.

4.5. Perfil de conductividades térmicas del sondeo

Una vez conocidos los rangos de posibles valores de conductividad térmica de las muestras, extraídas del testigo del sondeo geotérmico del proyecto PITERM, “Caracterización termo-mecánica y nuevas técnicas de diseño de pilotes termoactivos”, desarrollando conjuntamente entre el CEDEX, Rodio Kronsa, Energis y la Universidad Politécnica de Valencia UPV, es posible establecer un perfil de conductividades térmicas en función del perfil litológico y la profundidad, que permitirá en un futuro analizar posibles correlaciones con las determinaciones de conductividad térmica realizadas mediante Pruebas de Respuesta Térmica o TRT (Thermal Response Test).

La Figura 10 presenta el perfil estratigráfico de la perforación asignando frente a cada capa, el rango de valores de conductividad medidos, para condiciones totalmente secas ($S_r=0\%$) a condiciones de saturación total ($S_r \approx 100\%$).

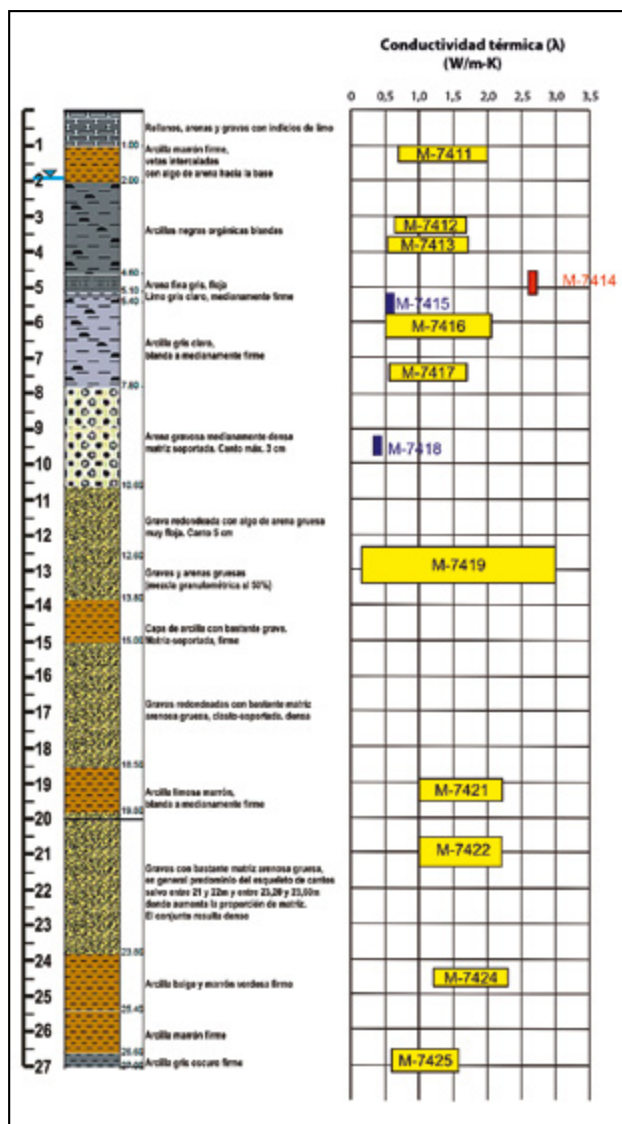


Figura 10. Perfil estratigráfico de la perforación y resultados de conductividad térmica de las muestras seleccionadas para condiciones de saturación $S_r = 0\%$ a $S_r = 100\%$.

5. CONCLUSIONES

Se ha realizado una extensa campaña experimental de medidas de conductividad térmica en laboratorio con el medidor KD2PRO adquirido recientemente por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. Este trabajo experimental ha servido en primer lugar para poner a punto el protocolo de ensayo, tanto en medidas con aguja simple (TR-1) como doble (SH-1). Los valores obtenidos mediante estos dos tipos de sondas han resultado ser similares entre sí, fiables y acordes a valores encontrados en la literatura, lo que refuerza la validez de los mismos.

En cuanto al método, tras probar diferentes alternativas experimentales, se recomienda que las mediciones se efectúen bajo las siguientes condiciones:

- El periodo de registro debe ser de 10 minutos.
- En múltiples mediciones sucesivas a una misma muestra, se debe permitir un tiempo de equilibrio térmico de al menos 15 minutos entre medida y medida.
- Se debe garantizar un ambiente adecuado para que no haya pérdida de humedad en la muestra y evitar

efectos externos que induzcan cambios de temperatura en la muestra o el sensor.

- Se recomiendan, por su fiabilidad, las posiciones de medida 1 y 4 con la sonda simple (TR-1) y las posiciones 6, 7 y 8 con la sonda doble (SH-1)

La extensa experimentación realizada sobre muestras de distinta naturaleza geológica y en estado inalterado o remoldeado, compactadas en diferentes condiciones de saturación, ha permitido deducir que la conductividad térmica neta de una muestra geológica depende fundamentalmente del tipo de material, su composición mineralógica y granulométrica, su densidad seca y su grado de saturación. El valor de λ tiende a aumentar:

- Al aumentar el % de cuarzo del material. Los materiales arenosos con partículas de cuarzo mostraron conductividades mayores que los arcillosos.
- Al aumentar el número de contactos entre partículas sólidas, que a su vez depende del nivel de gradación granulométrica del material y de la densidad. Por ello, en general, para un mismo material, una mayor densidad implica una mayor conductividad térmica.
- Al aumentar el grado de saturación. Las medidas obtenidas en condiciones cercanas a la saturación fueron de 2 a 5 veces superiores a las correspondientes a las obtenidas en estado seco.

En muestras remoldeadas compactadas, es relevante un adecuado proceso de compactación, así como un buen número de mediciones que permitan establecer un rango de valores para condiciones de densidad y humedad deseada.

Finalmente, se ha definido un perfil de conductividades térmicas para los niveles estratigráficos evaluados y dentro de los rangos de saturación $SR=0$ a $SR=100\%$, que servirán para establecer correlaciones con los ensayos in situ TRT que se encuentran en desarrollo con el proyecto PITERM.

6. AGRADECIMIENTOS

El autor del estudio agradece al CEDEX por permitir el uso de sus laboratorios para la experimentación. Así mismo se agradece María de Groot, por permitir el uso de la información, muestras y ensayos de su tesis doctoral dentro del proyecto PITERM "Caracterización termo-mecánica y nuevas técnicas de diseño de pilotes termoactivos", desarrollando conjuntamente entre el CEDEX, Rodio Kronsa, Energesis y la Universidad Politécnica de Valencia UPV.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abuel-Naga, H., Bergado D., Bouazza, A. & Pender, M. (2009). *Thermal conductivity of soft Bangkok clay from laboratory and field measurements*. Engineering Geology, 2009. Vol. 105, pp. 211–219.
- ASTM International. (2008). *Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure* No. D 5334-08.
- Brandon, T. & Mitchell, J.K. (1989). *Factors Influencing Thermal Resistivity of Sands*. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 1989. Vol. 115, No. 12, pp. 1683 – 1698.

Bristow, K.L., Kluitengerg, G.J. & Horton, R. (1994). *Measurement of soil thermal properties with a dual-probe heat-pulse technique*. Soil Science American Journal, 1994. Vol. 58, pp. 1288-1294.

DECAGON DEVICES, INC. (2008). *KD2 Pro Thermal Properties Analyzer, Operator's Manual, Versión 9*. pp. 1 – 68.

Fricke, B.A., Misra, A., Becker, B.R. & Steward, JR., W.E. (1992). *Soil Thermal Conductivity: Effects of Saturation and Dry Density*. University of Missouri-Kansas City Independence, MO 64050-1799.

Hotz, R. & Ge, L. (2010). *Investigation of the Thermal Conductivity of Compacted Silts and Its Correlation to the Elastic Modulus*. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, pp. 408 – 412.

SIA 384/6. *Sondes géothermiques. Erdwärmesonden*. Schweizer Norm no. 546 384/6, Ref.no. SN 546384/6:2010de, 76p. 2010 (www.sia.ch)

Michell, J.K. & Kao, T.C. (1978). *Measurement of soil thermal resistivity*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1978. Vol. 104, GT10, pp. 1307-1320.

Hotz, R. & Ge, L. (2010). *Investigation of the Thermal Conductivity of Compacted Silts and Its Correlation to the Elastic Modulus*. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 2010. pp. 408 – 412.

Shannon, W. & Wells, W. (1947). *Tests for Thermal Diffusivity of Granular Materials*. Proceedings, American Society for Testing Materials. ISSN: 0097-4153, pp. 1044 – 1054.

VDI 4640. (2010). *Thermische Nutzung des Untergrundes – Richtlinie VDI 4640, Blatt 1 – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte*. Beuth Verlag, Berlin.

Villar, M.V. (2001). *Caracterización termo-hidro-mecánica de una bentonita de Cabo de Gata*. Tesis doctoral U.C.M. 2001. ISBN: 84-669-1790-X.