



industriales  
etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Industrial

## PUESTO A PUNTO DE UNA NUEVA INSTRUMENTACIÓN PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DEL ASFALTO

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

**Autor:** JOSÉ JAVIER RUBIO RUBIO  
**Director:** JUAN FRANCISCO SÁNCHEZ  
PÉREZ  
**Codirector:** FRANCISCO MIGUEL MORAL  
MORENO

Cartagena, 2020



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

Puesto a punto de una nueva instrumentación para  
determinar las propiedades térmicas del asfalto





### ***Agradecimientos***

A mi tutor de la UPCT Juan Francisco y a mi tutor Fran en el Centro Tecnológico de la Construcción de la Región de Murcia (CTCON) por permitirme participar en este proyecto, brindándome su apoyo y consejo en aquello que he necesitado.

Por último, a mi familia y amigos por darme su visto bueno en todas mis decisiones y su valoración siempre positiva de mi trabajo.



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

Puesto a punto de una nueva instrumentación para  
determinar las propiedades térmicas del asfalto





## RESUMEN

Dentro de las diferentes propiedades térmicas que poseen los materiales, una de las más importantes es la conductividad térmica en la cual se centrará el presente estudio. Hoy en día existen diferentes métodos para obtener este parámetro de los materiales pero sí que es cierto que cuentan con desventajas como puede ser la restricción para ciertos materiales, tamaños, condiciones, etc.

El objetivo del presente estudio es conseguir poner a punto la máquina HFM 446 Lambda Medium para medida de conductividades térmicas y calores específicos en muestras sólidas de pequeño y mediano tamaño. Para ello, se estudiará los fundamentos de la máquina así como la preparación adecuada de las muestras.

Para diferentes tipos de asfaltos, en concreto una muestra tradicional de betún asfáltico y otra fabricada con materiales sintéticos pendientes de patente, se hará uso de la HFM 446 Lambda Medium para obtener sus conductividades térmicas y ver la diferencia entre ambos materiales. También se le realizará un ensayo a distintos tipos de morteros para construcción.

Finalmente, se mostrarán las conclusiones llevadas a cabo y se establecerá una línea futura de investigación para ampliar las posibilidades de la máquina, en concreto se desarrollará un método para medir conductividades térmicas en líquidos.

### Palabras clave:

Conductividad térmica, asfalto, HFM 446 Lambda Medium, muestras.



### ABSTRACT

The present research is focused on one of the most important thermal properties that materials have: thermal conductivity. Nowadays, there are different methods to obtain it but they have several disadvantages as restrictions for materials due to sizes, conditions...

The aim of this project is achieve to set up the HFM 446 Lambda Medium for measuring the thermal conductivity and specific heat of small and medium solid samples. In order to get this, the fundamentals of the machine will be studied as well as the preparation of the samples.

For different kinds of asphalt (one traditional and other one more innovative) the HFM 446 Lambda Medium will be used in order to get their thermal conductivities and to see the differences between both materials. Besides, a test to different compositions of mortar will be done.

Finalmente, se mostrarán las conclusiones llevadas a cabo y se establecerá una línea futura de investigación para ampliar las posibilidades de la máquina, en concreto se desarrollará un método para medir conductividades térmicas en líquidos.

Finally, the conclusions of the research will be shown as well as a future investigation line in order to amplify the possibilities of the machine: a method to measure thermal conductivity in liquids will be developed.

**Key words:**

Thermal conductivity, asphalt, HFM 446 Lambda Medium, sample.



## Tabla de contenido

1. Introducción y objetivos.....	11
1.1. Introducción .....	12
1.2. Objetivos .....	14
1.3. Alcance .....	14
1.4. Normativa y documentación.....	14
2. Fundamentos teóricos de la conductividad térmica.....	16
2.1. Fundamentos teóricos de la conductividad térmica .....	17
2.1.1. Equilibrio térmico .....	19
2.2. Métodos para la medición de conductividad térmica .....	19
2.2.1. Método de la placa caliente aislada .....	19
2.2.2. Método de barras concéntricas cortadas .....	20
2.2.3. Método por cámara de vapor .....	21
2.2.4. Método para materiales aislantes.....	22
2.2.5. Método de cilindros concéntricos.....	22
3. Fundamentos de la máquina HFM 446 Lambda Medium.....	23
3.1. Materiales y equipos. Cálculos internos para obtener las propiedades térmicas. ....	24
3.1.1. HFM 446 MEDIUM Lambda.....	24
3.1.2. Conexión de la máquina y el ordenador .....	26
3.1.3. Sistema de refrigeración .....	27
3.2. Cálculos internos de la instrumentación .....	28
3.2.1. Test de conductividad térmica.....	28
3.2.2. Test de calor específico.....	29
3.3. Proceso de medición.....	30
3.3.1. Condiciones de ensayo .....	30
3.3.2. Calibración del equipo .....	30
3.3.3. Resultados del ensayo al patrón de calibración .....	32
3.4. Preparación de las muestras.....	33
3.5. Abrir/cerrar la cámara para insertar una muestra .....	34
3.6. Kit de instrumentación .....	36
4. Experiencia real .....	43
4.1. Experiencia real .....	44
4.1.1. Dimensionamiento y preparación de las muestras .....	44
4.2. Muestras del estudio: resultados. ....	48
5. Conclusiones y líneas futuras .....	64



5.1.	Conclusiones .....	65
5.1.1.	Asfalto negro VS Asfalto blanco.....	65
5.1.2.	Morteros .....	66
5.2.	Análisis sobre muestras líquidas.....	66
5.2.1.	Problemática.....	66
5.2.2.	Propuesta de solución .....	68
6.	Bibliografía .....	72



## Índice de figuras

Figura 1 Conductividad térmica. [4] .....	17
Figura 2 Placa de ejemplo. [4] .....	17
Figura 3 Equilibrio térmico. [5].....	19
Figura 4 Método de la placa caliente aislada. [6] .....	20
Figura 5 Instrumental placa caliente aislada. [6] .....	20
Figura 6 Método de barras concéntricas cortadas. [6] .....	21
Figura 7 Método por cámara de vapor. [6] .....	21
Figura 8 Método para materiales aislantes. [6] .....	22
Figura 9 Método de cilindros concéntricos. [6] .....	22
Figura 10 HFM 446 Lambda Medium.....	24
Figura 11 HFM 446 Medium parte delantera. ....	25
Figura 12 HFM 446 Medium parte trasera.....	26
Figura 13 Conexión de la máquina y el ordenador. ....	26
Figura 14 Conexión del sistema de refrigeración.....	27
Figura 15 Sistema de refrigeración externo. ....	28
Figura 16 Muestra patrón IRMM-440A.....	31
Figura 17 Evolución de la Temperatura VS Tiempo para muestra patrón.....	32
Figura 18 Evolución del voltaje, Q, VS Tiempo para muestra patrón. ....	33
Figura 19 Dimensiones de la muestra.....	34
Figura 20 Primer paso para insertar la muestra.....	34
Figura 21 Segundo paso para insertar la muestra. ....	35
Figura 22 Tercer paso para introducir la muestra.....	36
Figura 23 Cuarto paso para introducir la muestra. ....	36
Figura 24 Niveles de resistencia térmica.....	37
Figura 25 Elementos del kit de instrumentación. ....	39
Figura 26 Lámina de espuma para tapar los conectores. ....	40
Figura 27 Fijación del termopar en la zona central.....	41
Figura 28 Lámina de caucho en el plato inferior.....	41
Figura 29 Muestra ya introducida en la cámara. ....	41
Figura 30 Termopares conectados.....	42
Figura 31 Termopares en su posición final. ....	42
Figura 32 Instrumental de medida.....	44
Figura 33 Muestra a medir.....	45
Figura 34 Fijación de los termopares. ....	45
Figura 35 Colocación en el interior de la muestra. ....	45
Figura 36 Plato superior bajado. ....	46
Figura 37 Pantalla de configuración del test de conductividad térmica.....	48
Figura 38 Betún asfáltico en carreteras. ....	49
Figura 39 Ticket de resultados para asfalto negro.....	50
Figura 40 Toma de datos para asfalto negro con termopares.....	50
Figura 41 Evolución Temperatura VS Tiempo asfalto negro con termopares. ....	51
Figura 42 Evolución del voltaje, Q, VS Tiempo asfalto negro con termopares.....	52
Figura 43 Ticket de resultados para asfalto negro sin termopares.....	53
Figura 44 Evolución Temperatura VS Tiempo asfalto negro sin termopares. ....	53
Figura 45 Evolución del voltaje, Q, VS Tiempo asfalto negro sin termopares.....	54
Figura 46 Isla de calor.....	55



Figura 47 Muestra de asfalto con materiales sintéticos. ....	55
Figura 48 Toma de datos para el asfalto blanco con termopares.....	56
Figura 49 Toma de datos para asfalto blanco con termopares. ....	56
Figura 50 Evolución Temperatura VS Tiempo asfalto blanco con termopares.....	57
Figura 51 Evolución del voltaje, Q VS Tiempo asfalto blanco con termopares.....	57
Figura 52 Toma de datos para el asfalto blanco sin termopares.....	58
Figura 53 Ejemplo mortero para construcción. ....	59
Figura 54 Evolución Temperatura VS Tiempo del Mortero 1.....	60
Figura 55 Evolución voltaje, Q, VS Tiempo en Mortero 1. ....	60
Figura 56 Evolución Temperatura VS Tiempo del Mortero 2.....	61
Figura 57 Evolución voltaje, Q, VS Tiempo en Mortero 2. ....	62
Figura 58 Evolución Temperatura VS Tiempo del Mortero 3.....	63
Figura 59 Evolución voltaje, Q, VS Tiempo en Mortero 3. ....	63
Figura 60 Variación de densidad con la temperatura en líquidos. ....	67
Figura 61 Ejemplo de contacto indirecto. ....	68
Figura 62 Geometría del recipiente. ....	68
Figura 63 Conductividad térmica de algunos materiales.....	69
Figura 64 Conductividad térmica típica de los plásticos. ....	70



# I

## 1. Introducción y objetivos

*En este primer apartado se expone la introducción al trabajo, así como los objetivos que se persiguen, el alcance del proyecto y la normativa utilizada.*

## 1.1. Introducción

El objeto de este trabajo es el estudio del funcionamiento de la instrumentación modelo HFM 446 MEDIUM Lambda cuyo uso principal es la medida de propiedades térmicas de materiales. En concreto, en este trabajo se van a describir el proceso que es necesario seguir para poder configurar correctamente la máquina así como diversos estudios llevados a cabo para medir la conductividad térmica de distintos materiales. Al final del mismo, se introducirá una línea de ampliación del uso de esta máquina para medir conductividades térmicas en líquidos ya que, como es de suponer por las características constructivas de la HFM 446 MEDIUM Lambda, está destinada únicamente a trabajar con sólidos.

La conductividad térmica es la propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. Sus unidades en el Sistema Internacional son  $\frac{W}{m \cdot K}$ . Es una magnitud intensiva y su magnitud inversa es la resistividad térmica (propiedad que también se ve involucrada en el presente trabajo) y que no es más que la capacidad de los materiales para oponerse al paso del calor.

Aunque es cierto que la instrumentación consigue darnos una idea de la conductividad térmica del material que estamos midiendo, el valor que obtenemos directamente de ella es el coeficiente de conductividad térmica,  $\lambda$  a partir de ahora, que es una característica de cada sustancia que expresa la magnitud de su capacidad de conducir el calor. Sus unidades en el Sistema Internacional son las mismas que para la conductividad térmica comentada en el apartado anterior. Para la instrumentación del estudio,  $\lambda$  queda definida como:

$$\lambda = q \cdot \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad (1)$$

donde:

- $q$  es el flujo de calor en  $W/m^2$ .
- $\Delta x$  es el espesor de la muestra que estamos midiendo en m.
- $\Delta T$  es la diferencia de temperatura a través de la muestra en K.

Por otro lado, tal y como se ha mencionado en el primer párrafo, el calor específico también puede ser medido. Este es una magnitud física que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia para elevar su temperatura en una unidad. Sus unidades en el Sistema Internacional son  $\frac{J}{kg \cdot K}$ .

En cuanto a los factores que pueden influir en la conductividad térmica, existen varios principalmente:

### Temperatura

El efecto de la temperatura en la conductividad térmica es diferente para metales y para no metales. En metales la conductividad es primariamente debido a electrones libres. De acuerdo con la ley Wiedemann-Franz la conductividad térmica de los metales es aproximadamente proporcional al producto de la temperatura absoluta expresada en Kelvin, multiplicada por la



conductividad eléctrica. En metales puros la resistividad eléctrica frecuentemente se incrementa de manera proporcional a la temperatura, y por tanto la conductividad térmica permanece aproximadamente constante. En aleaciones el cambio de conductividad eléctrica es usualmente menor y por tanto la conductividad térmica se incrementa con la temperatura, frecuentemente de manera proporcional.

Por otro lado, la conductividad en los no metales se debe fundamentalmente a las vibraciones de la red. Excepto para cristales de calidad alta a bajas temperaturas, el camino libre medio de un fonón no se reduce de manera significativa por altas temperaturas. Por tanto la conductividad de los no metales es aproximadamente constante. Así la conductividad térmica es baja siempre y cuando la temperatura no sea demasiado baja. A bajas temperaturas por debajo de la temperatura de Debye la conductividad decrece justo como lo hace la capacidad calorífica.

#### Cambios de fase del material

Cuando un material sufre cambios de fase de sólido a líquido o de líquido a gas, la conductividad térmica puede cambiar. Un ejemplo de esto sería el cambio en conductividad térmica que ocurre cuando el hielo (conductividad térmica de  $2,18 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  a  $0^\circ\text{C}$ ) se derrite formando agua líquida (conductividad térmica de  $0,90 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  a  $0^\circ\text{C}$ ).

#### Estructura del material

Las sustancias cristalinas puras pueden exhibir diferentes conductividades térmicas en diferentes direcciones del cristal, debido a diferencias en la dispersión de fonones según diferentes direcciones en la red cristalina.

#### Conductividad eléctrica

En metales, la conductividad térmica, varía muy a la par con la conductividad eléctrica de acuerdo con la ley de Wiedemann-Franz ya que los electrones de valencia que se mueven libremente transportan no sólo corriente eléctrica sino también energía calórica. Sin embargo, la correlación general entre conductancia eléctrica y térmica no se mantiene para otros materiales, debido a la importancia de la transmisión por fonones en no metales.

#### Convección

Los gases ligeros, como el hidrógeno y el helio típicamente tienen alta conductividad térmica. Gases densos como el xenón y el diclorodifluorometano tienen baja conductividad térmica. Una excepción, el hexafluoruro de azufre que se utiliza en interruptores de potencia en subestaciones eléctricas, un gas denso, tiene una conductividad térmica relativamente alta debido a su capacidad calorífica. El argón, un gas más denso que el aire, muchas veces se usa como aislante de cristales (en ventanas de cristal doble) para mejorar sus características aislantes al igual que en el interior de bombillas eléctricas. El aire y otros gases generalmente son buenos aislantes, en la ausencia de convección, por lo tanto, muchos materiales aislantes funcionan simplemente bajo el principio de que un gran número de huecos llenos de gas prevendrán la convección a gran escala. Ejemplos de esto incluyen el poliestireno expandido y extruido (popularmente conocido como "styrofoam") y el aerogel de sílice. Aislantes naturales



y biológicos como el pelaje y las plumas alcanzan efectos similares inhibiendo dramáticamente la convección del aire o el agua cerca de la piel del animal.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal es la puesta a punto del instrumental necesario para la determinación de la conductividad térmica de distintos asfaltos, lo que conlleva la consecución de los siguientes hitos:

1. Estudio de la metodología de utilización del instrumental.
2. Preparación y adecuación de las muestras.
3. Medición del calor específico de los asfaltos.
4. Medición de la conductividad térmica de los asfaltos.
5. Estudio de los resultados obtenidos.
6. Líneas futuras de investigación.
7. Elaboración de la memoria del proyecto que se corresponde con el presente estudio.

## 1.3. Alcance

Este procedimiento está basado en las normas UNE EN 12667/2002, “Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del mediador de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica.” y UNE EN 12664/2002, “Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos secos y húmedos de baja y media resistencia.” En estas dos normas se basa el funcionamiento y las medidas del modelo HFM 446 Medium Lambda.

El HFM 446 Lambda MEDIUM es capaz de medir conductividades térmicas y capacidades caloríficas de diferentes tipos de materiales.

## 1.4. Normativa y documentación

Los documentos indicados a continuación, en su totalidad o en parte, son elementos de consulta indispensables para la aplicación de este procedimiento:

- Norma UNE EN 12667/2002: “Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del mediador de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica.”



- Norma UNE EN 12664/2002: “Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos secos y húmedos de baja y media resistencia.”
- Manual de usuario y del software NETZSCH para HFM 446 MEDIUM Lambda.



## 2. Fundamentos teóricos de la conductividad térmica

*En este segundo apartado se desarrolla la teoría de la conductividad térmica así como ejemplificarse diversos métodos que se utilizan en la actualidad para medición de esta propiedad térmica.*



## 2.1. Fundamentos teóricos de la conductividad térmica

En la mayoría de procesos donde ocurren intercambio de energía, determinar las propiedades termofísicas de materiales es muy importante, sobre todo la conductividad térmica, cuando existe una diferencia de temperatura entre distintos puntos de un medio donde se generan procesos de intercambio de calor. Estos procesos se pueden dividir en tres mecanismos: conducción, convección y radiación. Para el presente trabajo, nos centraremos en los métodos de transferencia de calor por conducción.

De manera experimental es importante ver la capacidad de cada cuerpo para transferir calor y llegar a estar en un punto estable. Las constantes son un acercamiento a cómo se comporta cada material en cuanto a conductividad del calor se refiere.

La conductividad térmica,  $\lambda$  a partir de ahora, es la capacidad de un elemento para transferir energía térmica a través de él cuando los bordes del mismo se encuentran a diferente temperatura.

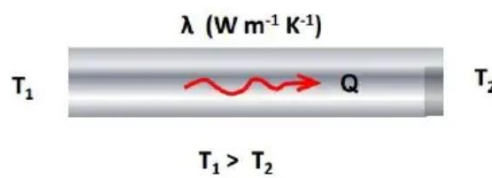


Figura 1 Conductividad térmica. [4]

Si una lámina de material se encuentra en contacto con dos focos térmicos a diferentes temperaturas en estado estacionario, la cantidad de calor por unidad de tiempo y superficie que atraviesa la placa será proporcional a la diferencia de temperaturas e inversamente proporcional a su espesor,  $e$ . El flujo de calor,  $H$ , irá desde la región de mayor temperatura,  $T_c$ , hacia la de menor temperatura,  $T_f$ . La ecuación que describe este proceso es la llamada Ley de Fourier que se muestra a continuación:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_c - T_f}{e} \quad (2)$$

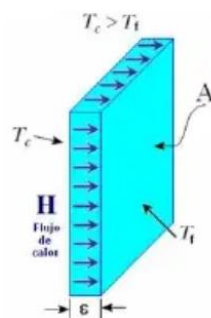


Figura 2 Placa de ejemplo. [4]

donde:



- $\Delta Q$  es el calor transferido en el intervalo de tiempo  $\Delta t$ .
- $A$  es el área transversal.
- $e$  el espesor de la lámina.
- $\lambda$  la conductividad térmica.
- $T_c$  la temperatura del foco caliente.
- $T_f$  la temperatura del foco frío.

La medición de la conductividad térmica de manera experimental se puede realizar de dos formas distintas: la primera se realiza en un estado en condiciones estables en la transferencia de calor y el segundo cuando existe un estado transitorio.

En los líquidos y en los gases existen muchas dificultades para la determinación de la conductividad térmica. Si el calor fluye por medio de una película gruesa en algún líquido o gas, existe una convección libre. Además, como la conductividad térmica es realmente elevada, para poder disminuir la convección se necesita utilizar películas demasiado delgadas y una diferencia de temperaturas reducida. Si a esto se le añade los errores de medición, es de vital importancia ser cuidadosos. Por todo esto, los métodos suelen ser limitados.

La temperatura y la presión influyen notablemente en la conductividad térmica. Destacar también que la conductividad térmica es mayor en los sólidos que en los líquidos y gases o, dicho de otro modo, es más sencillo transmitir calor por medio de un sólido que a través de un líquido o gas.

En algunos sólidos, por ejemplo los metales, se les denomina conductores por tener una conductividad térmica alta. En el otro extremo se encuentran los aislantes, cuya conductividad térmica es baja. En la determinación de manera experimental se supone que la conductividad térmica es independiente de la temperatura en cualquier punto del material, por lo que los valores reportados de  $\lambda$  son los promedios de todo el objeto, aunque puede existir un pequeño error despreciable.

La conductividad térmica en los sólidos puede aumentar o disminuir con la temperatura y, en algunos casos, esto puede alterar la velocidad de cambio hasta invertirla, pasando de la disminución hacia el aumento. En la mayoría de los casos no es necesario un factor de corrección para la variabilidad de la conductividad en función de la temperatura, pero dicha variación puede expresarse según la siguiente ecuación lineal:

$$\lambda = \lambda_0 + b \cdot T \quad (3)$$

Donde  $\lambda_0$  es la conductividad térmica y  $b$  es una constante que representa el cambio de conductividad dada la temperatura. En los líquidos la conductividad decrece cuando la temperatura aumenta pero se tiene una excepción importante con el agua. Para los gases y vapores comunes, la conductividad y la temperatura son directamente proporcionales.

Otro factor que origina un error en la determinación de la conductividad térmica es la forma de unión entre el fluido u objeto y la fuente de calor. Por ejemplo, si un sólido recibe calor por medio de un contacto con otro sólido, es casi imposible excluir la presencia de aire u otro fluido en el punto de contacto. También ocurriría algo parecido si es un líquido con un metal ya

que la presencia de pequeñas rugosidades puede atrapar de manera permanente burbujas de aire que pueden arrastrar consigo errores considerables.

### 2.1.1. Equilibrio térmico

Este concepto termodinámico es de vital importancia para poder entender el funcionamiento de la máquina de este estudio. De ahí que se introduzca este apartado para explicar sus fundamentos teóricos.

El instrumental de este trabajo toma medidas de conductividades térmicas sobre muestras cada cierto tiempo y el criterio que sigue es, precisamente, que se haya alcanzado el equilibrio térmico en la muestra durante el test.

El equilibrio térmico es aquel estado en el cual se igualan las temperaturas de dos cuerpos, las cuales en sus condiciones iniciales presentaban diferentes temperaturas. Una vez que las temperaturas se equiparan se detiene el flujo de calor, llegando ambos cuerpos al equilibrio térmico.

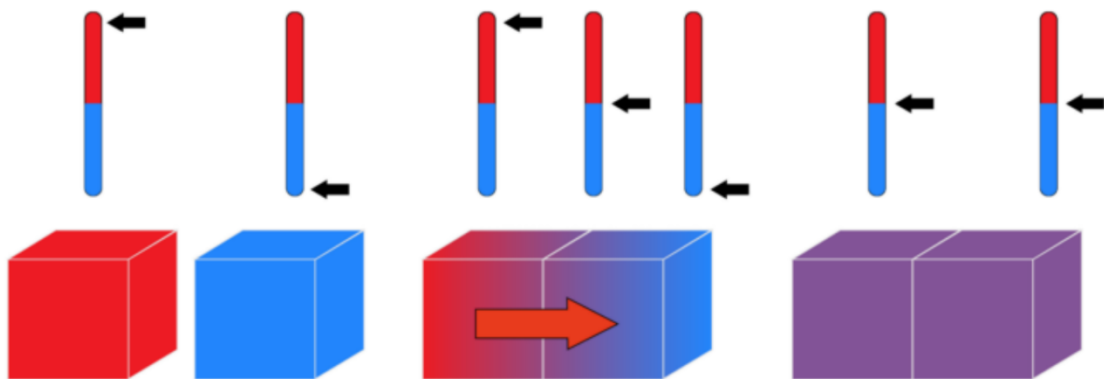


Figura 3 Equilibrio térmico. [5]

## 2.2. Métodos para la medición de conductividad térmica

### 2.2.1. Método de la placa caliente aislada

Este método está dentro del grupo experimental para estado estable y que tiene una amplia utilidad para la medida de conductividad térmica de alimentos, además de objetos secos y homogéneos en forma de tabla.

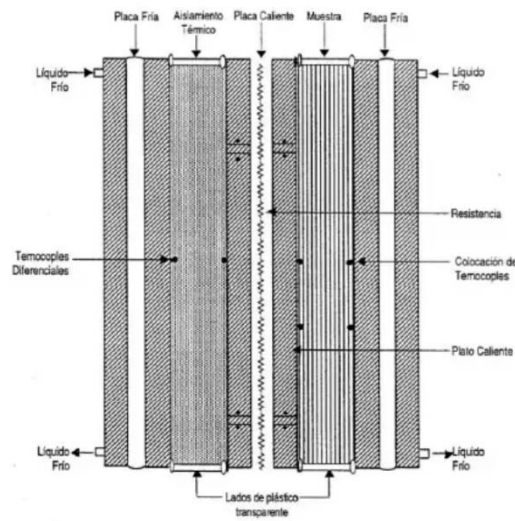


Figura 4 Método de la placa caliente aislada. [6]

Se pone en contacto una placa aislada calentada eléctricamente con la fuente de calor hasta que se mantengan a una temperatura constante por lo que no existe infiltración de calor de la misma. La medición de la energía de entrada y el cómo se transfiere a través del objeto se hace a través de la diferencia de temperatura de la muestra y de la temperatura de entrada que se mantiene.



Figura 5 Instrumental placa caliente aislada. [6]

### 2.2.2. Método de barras concéntricas cortadas

Este sistema está formado por una barra de un material de referencia con propiedades conocidas, la barra del material con conductividad térmica a determinar y otra barra del material de referencia.

La barra metálica se encuentra en su exterior cubierta con un material aislante. En un extremo de la barra se coloca una fuente de calor y en el extremo opuesto se tiene un sumidero de calor. Entonces, mediante las mediciones de temperatura y longitud se puede determinar la conductividad térmica del material de la muestra haciendo uso de la ecuación de conducción de calor para la barra cilíndrica y aplicando las condiciones necesarias.

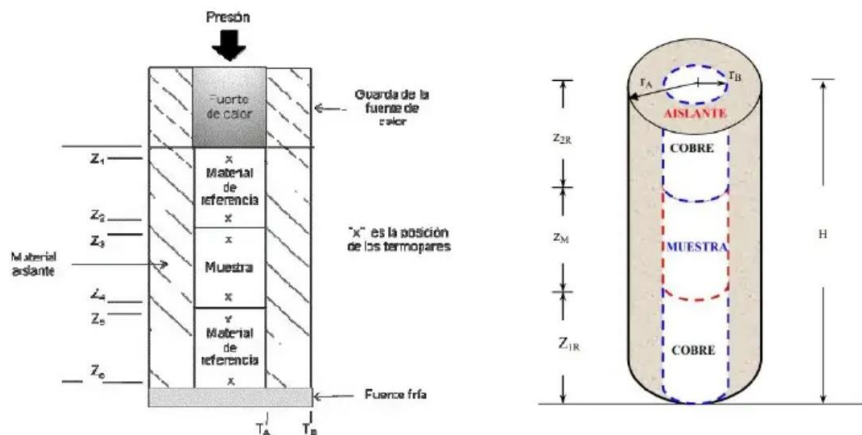


Figura 6 Método de barras concéntricas cortadas. [6]

### 2.2.3. Método por cámara de vapor

Para medir la conductividad térmica mediante este método se utiliza un aparato como el mostrado en la siguiente figura:



Figura 7 Método por cámara de vapor. [6]

Está formado por una cámara de aluminio que cuenta con un orificio cuadrado en el que se posiciona la lámina del material que se desea medir. Esta cámara se utiliza como foco térmico de alta temperatura,  $T_c$ , ya que a través de ella se hace circular el vapor de agua.

Sobre el material se ubica un trozo cilíndrico de hielo el cual cumple la función de foco térmico de baja temperatura,  $T_f$ , y además es utilizado para determinar la cantidad de calor que fluye a

través del material. Por lo tanto, midiendo la cantidad de hielo que se funde en un determinado intervalo de tiempo, podemos conocer la cantidad de calor que fluyó desde el depósito caliente hacia el hielo en ese mismo intervalo de tiempo haciendo uso de la ley de Fourier.

#### 2.2.4. Método para materiales aislantes

El sistema mostrado en la figura cuenta con un plato caliente colocado entre dos platos fríos que generan un gradiente de temperatura sobre las muestras colocadas entre los platos.

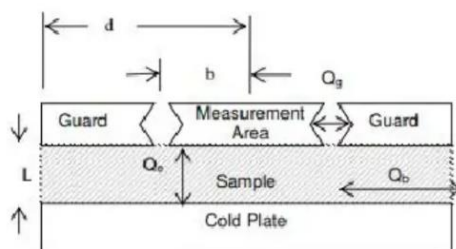


Figura 8 Método para materiales aislantes. [6]

El principio de operación del aparato es la conducción de calor en estado permanente. Cuando se establece una diferencia de temperatura entre los platos caliente y frío, se genera un flujo de calor a través de la muestra.

#### 2.2.5. Método de cilindros concéntricos

Este método se considera en estado estable y cuenta con un cilindro donde se introduce la muestra. El cilindro se considera como si tuviera longitud infinita para despreciar su efecto. El calor se provee de una fuente para ser transferido directamente al material y la conductividad térmica se obtiene con una expresión que relaciona la potencia de la fuente de calor, los radios de los cilindros, la longitud de la muestra y las temperaturas involucradas.

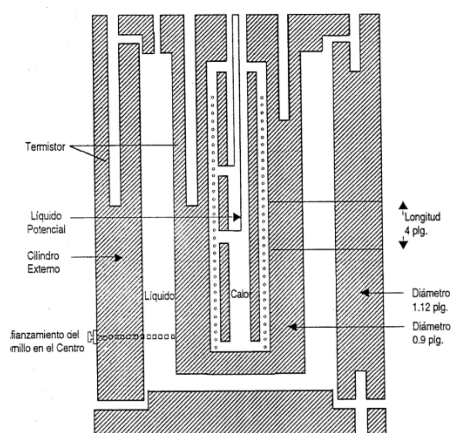


Figura 9 Método de cilindros concéntricos. [6]



### 3. Fundamentos de la máquina HFM 446 Lambda Medium

*En este tercer apartado se desarrollarán todos los conceptos de funcionamiento de la máquina protagonista de este estudio. La mayor parte de información mostrada en este apartado ha sido obtenida de la referencia bibliográfica [1].*



### 3.1. Materiales y equipos. Cálculos internos para obtener las propiedades térmicas.

#### 3.1.1. HFM 446 MEDIUM Lambda

Las muestras que son sometidas a las pruebas para medir sus propiedades térmicas mediante el uso del HFM 446 Lambda Medium se colocan entre dos sensores de flujo de calor fijos o con la posibilidad de ajustar el gradiente térmico entre ambos. Tras unos minutos para que el sistema llegue a alcanzar el equilibrio, el controlador interno o el ordenador que conectemos al instrumento determina la conductividad térmica y la resistividad térmica de la muestra.



Figura 10 HFM 446 Lambda Medium.

El sistema de control de temperatura de los platos y el par de sensores de flujo de calor proveen de datos precisos a la hora de realizar las medidas. Los datos durante la medida son medidos continuamente hasta que converjan hacia el valor buscado. Para indicar en qué estado se encuentra el análisis, contamos con tres nomenclaturas: run, rough y fine (indicadas con leds en el panel de la máquina). La diferencia entre ellas es:

- Run: la máquina está lista para comenzar el análisis.
- Rough: el análisis ha comenzado pero aún no son estables las mediciones.
- Fine: las medidas están siendo estables y se va acercando al valor final.

Una vez que se llega al valor final, el panel led de la máquina vuelve al estado rough para comenzar con otra medición. En la gráfica de Temperatura VS Tiempo que se observa en el software durante el análisis puede verse una línea vertical que aparece cuando se ha tomado un valor (se tomarán tantos como “setpoints” indiquemos en la configuración del test).



Especificaciones	HFM 446 Lambda Medium
Rango de temperatura de los platos	-20 a 90°C
Sistema de refrigeración	Externa
Control de temperatura de los platos	Sistema Peltier
Número de setpoints	Hasta 10
Dimensiones máximas de la muestra (Largo x Ancho x Alto) (mm)	305 x 305 x 105
Rango de resistencias térmicas **	0,02 a 3 m2W/K
Rango de conductividades térmicas */**	Hasta 2 W/m*K
Repetibilidad	0,5%
Precisión	+ - 1 a 2%
Reproducibilidad	+ - 0,5%
Carga variable (opcional)	0 a 1930 N (21 kPa sobre 305 x 305 mm2)
Kit de instrumentación	Disponible

\*El espesor para materiales con muy alta o muy baja conductividad debe ser coherente con el límite superior e inferior de la resistencia térmica (el ratio entre espesor y conductividad térmica). Una muestra con una conductividad térmica de 0,002 W/mK debe tener un espesor igual o inferior a 0,016 m (16 mm) para poder estar por debajo del límite de resistencia térmica de 8 m2K/W. Además, cuando al conductividad térmica se incrementa hasta 1 "/mK, el espesor mínimo requerido está en torno a 0,1 m (100 mm). Cuando se están realizando las pruebas en condiciones cercanas a los límites de estos rangos, se necesitan técnicas especiales para la preparación de la muestra, la calibración del instrumento y la medida de temperatura.

\*\* Valores de 0,05 m2K/W y 2 W/mK se pueden realizar haciendo uso del kit de instrumentación.

El modelo usado en cuestión, el HFM 446 Lambda Medium cuenta con:

#### Parte frontal

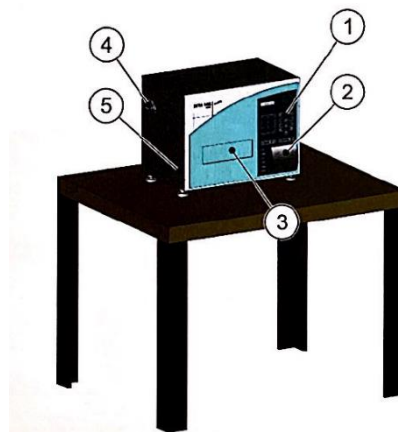


Figura 11 HFM 446 Medium parte delantera.

4. Panel de control.
5. Impresora de tickets con los resultados finales de cada estudio.
6. Puerta de entrada a la cámara para insertar la muestra.
7. Conexiones para instalar el sistema de refrigeración.
8. Botón de seguridad.

#### Parte trasera

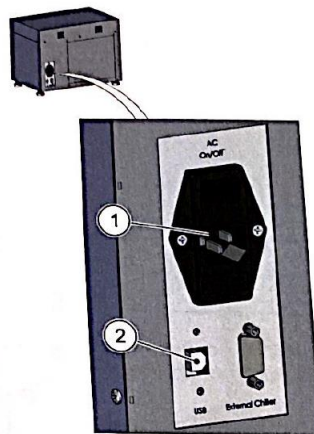


Figura 12 HFM 446 Medium parte trasera.

1. Botón ON/OFF.
2. Puerto USB para conectar el PC.

#### 3.1.2. Conexión de la máquina y el ordenador

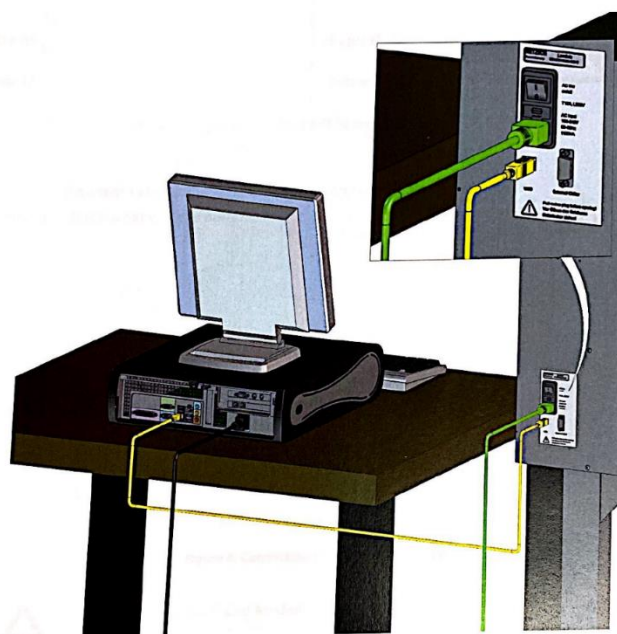


Figura 13 Conexión de la máquina y el ordenador.

El cable verde es el que conecta la máquina a la fuente de energía y el amarillo se conecta al puerto USB de la máquina y al del PC.

### 3.1.3. Sistema de refrigeración

#### 3.1.3.1. Conexión

Se debe conectar un sistema de refrigeración externo para que el HFM 446 Lambda pueda operar correctamente. La función principal de este sistema es regular la temperatura de los platos durante el test. El flujo de calor medio fluye entre el sistema de refrigeración y la máquina a través de los tubos conectados al conexionado mencionado anteriormente. El conexionado se hace tal y como indica la figura siguiente:

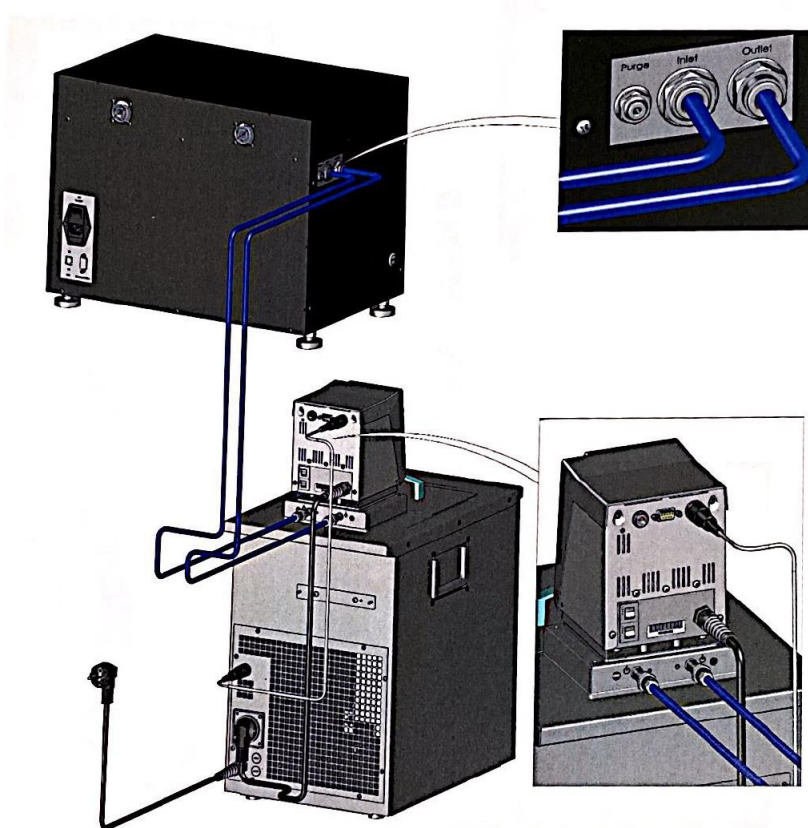


Figura 14 Conexión del sistema de refrigeración.

#### 3.1.3.2. Funcionamiento

El HFM 446 Lambda Medium puede operar sin la necesidad de tener conectado un ordenador externo. Cuenta con una impresora que proporciona un ticket con los resultados finales una vez finalizada la prueba. La refrigeración utilizada se basa en el efecto Peltier y únicamente requiere refrigeración externa para mejorar la eficiencia y evitar costes de mantenimiento y

tiempo. Todos los parámetros del flujo de calor son operados de manera interna mediante el propio software de la máquina a través de un microprocesador embebido.



Figura 15 Sistema de refrigeración externo.

La instrumentación cuenta con un transductor integrado con resolución micrométrica, permitiendo la medida del espesor de la muestra en pocos segundos.

### 3.2. Cálculos internos de la instrumentación

#### 3.2.1. Test de conductividad térmica

Definimos el flujo de calor  $q$  (en  $W/m^2$ ) como la cantidad de flujo de calor  $Q$  (en  $W$ ) a través de un área específica (en  $m^2$ ) de la muestra. Los transductores de flujo de calor de la instrumentación únicamente miden el flujo de calor en la parte central de la muestra (100 x 100 mm) y producen un voltaje  $V$  que es proporcional al flujo de calor  $q$  en esta región. La magnitud de  $q$  ( $[q]=Q/A$ ) depende de diversos factores:

- La conductividad térmica de la muestra ( $\lambda$ )
- El espesor de la muestra ( $\Delta x$ )
- La diferencia de temperatura a través de la muestra ( $\Delta T$ )
- Área a través de la cual fluye el calor ( $A$ )

La ecuación de la ley de Fourier (2) proporciona la relación entre estos parámetros cuando la sección del test alcanza el equilibrio térmico:

$$q = \frac{Q}{A} = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (4)$$

Los dos transductores de flujo de calor miden el flujo de calor a través de la mezcla. En cualquier caso, el voltaje de salida  $V$  es proporcional al flujo de calor  $q$  en el área de medida (área central), y se hace uso de una constante de proporcionalidad  $N$  para convertir la señal de voltaje en flujo de calor:



$$q = N \cdot V \quad (5)$$

La calibración del factor N es determinada mediante una calibración externa haciendo uso de una muestra standard de referencia con una conductividad térmica trazada por el Laboratorio Nacional de Meteorología. Como el valor de N es dependiente de la temperatura, la calibración es llevada a cabo en un rango de temperatura adecuado para poder obtener la curva de calibración N (T). Combinando las dos ecuaciones anteriores y resolviendo para  $\lambda$ , la expresión de la conductividad térmica resultante es:

$$\lambda = N \cdot V \cdot \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad (6)$$

El método de medida de flujo de calor utilizado es una técnica estándar. La serie HFM 446 MEDIUM Lambda está basada en los siguientes estándares:

- ISO 8301
- ASTM C 518
- DIN EN 12667
- JIS A 1412
- DIN EN 12664
- ASTM C 1784

### 3.2.2. Test de calor específico

A pesar de que el presente trabajo únicamente va a analizar la conductividad térmica de los materiales del estudio, se debe mencionar que la HFM 446 Lambda Medium también cuenta con la posibilidad de obtener el valor del calor específico de los materiales.

Para determinar la capacidad calorífica específica de una muestra se hace uso de la siguiente fórmula:

$$C_p = \frac{N_\lambda \cdot A \cdot (Q - Q_E)}{m \cdot \Delta T} \quad (7)$$

- m: masa de la muestra.
- $Q_E$ : energía total absorbida por los platos.
- Q: energía total absorbida por los platos y la muestra.
- *Incremento de T*: SALTO DE TEMPERATURA.
- $N_\lambda$ : factor de calibración de los sensores de flujo de calor.
- A: área específica.

Pasos a seguir:



1. Usar los parámetros de calibración utilizados en el test de conductividad térmica. El propósito de este paso es relacionar la señal de los sensores de flujo de calor con el correspondiente flujo de calor que atraviesa los platos. Hay que asegurarse de que la muestra esté seca y de que no se producirá condensación en la misma que pueda afectar a la medida.
2. Es necesario hacer una calibración antes del test para tener en cuenta la contribución térmica de las placas. Hay que realizarlo con la cámara vacío y existiendo una separación entre ambos platos de 2-3 mm (sin las láminas de caucho del kit de instrumentación). Es recomendable que el salto de temperatura sea de 10 K a 20 K.
3. El test para obtener la capacidad calorífica debe realizarse con el mismo salto de temperatura programado para la calibración.

### 3.3. Proceso de medición

#### 3.3.1. Condiciones de ensayo

Para operar en condiciones adecuadas, el HFM 446 Lambda debe ser instalado en un área de trabajo donde las condiciones ambientales sean de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y lo más seco posible. La temperatura del plato de abajo depende fuertemente de la humedad del medioambiente y debe ser mantenida, al menos, 5 K por encima del punto de rocío de las condiciones en las que nos encontremos.

#### 3.3.2. Calibración del equipo

##### 3.3.2.1. Características del patrón

En primer lugar y antes de explicar el procedimiento de calibración, se debe mencionar las características de la muestra patrón con la que se realiza la calibración del equipo, el cual se trata de un patrón certificado con el cual se asegura que las mediciones de la máquina está dentro de los márgenes aceptables.

<b>Código CRM</b>	IRMM-440A
<b>Descripción</b>	Fibra de vidrio aglomerada con resina
<b>Masa neta</b>	200 g
<b>Temperatura de almacenaje</b>	+18°C
<b>Dimensiones</b>	30 x 30 cm 34,6 mm



Figura 16 Muestra patrón IRMM-440A.

### 3.3.2.2. Procedimiento de calibración

1. Seleccionar la herramienta “HFT Calibration”.
2. Rellenar todos los datos necesarios:
  - a. “Section Basic Data”: “Identity or Name” lo genera el software automáticamente por defecto. El usuario puede introducir un nombre específico.
  - b. “Section Reference Description”: seleccionar el material de referencia.
  - c. “Section Setpoints”: seleccionar los puntos de medida e introducir la temperatura media, el incremento de temperatura, “Upper Plate” y “Lower Plate”.
  - d. “Section Run Parameter”: completar la información que se requiera.
3. Si todas las secciones aparecen en verde es porque están correctas y ya se puede pulsar “Start”.
4. Una vez haya terminado el proceso de calibración, pulsar “Accept” para confirmar la calibración.

### 3.3.3. Resultados del ensayo al patrón de calibración

Una vez conocidos los parámetros necesarios del patrón y el procedimiento para realizar su análisis en la HFM 446 Lambda Medium, podemos proceder a realizar el test.

Configurado ya el software e introducida la muestra en la máquina, los resultados que arroja son los siguientes:

	Mean Temp. °C	Delta Temp. K	Thermal Conductivity W/(m·K)	Thermal Resistance (m²·K)/W	Temp. Gradient K/m	Duration hh:mm:ss
1	24,0	20,0	0,03297	1,0464	579,27	00:57:39

Como se puede observar, el valor de la conductividad térmica resulta  $\lambda = 0,03297 \frac{W}{m \cdot K}$ .

La gráfica de evolución de la temperatura a lo largo del tiempo resulta:

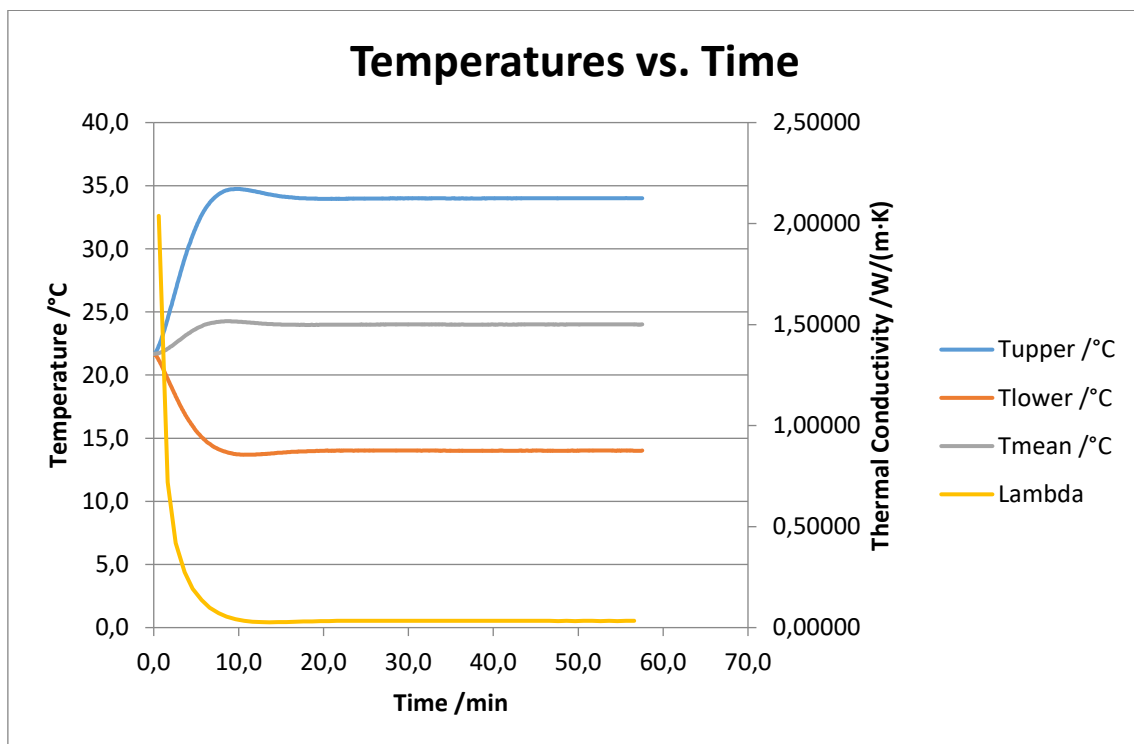


Figura 17 Evolución de la Temperatura VS Tiempo para muestra patrón.

Y la del voltaje de los termopares:



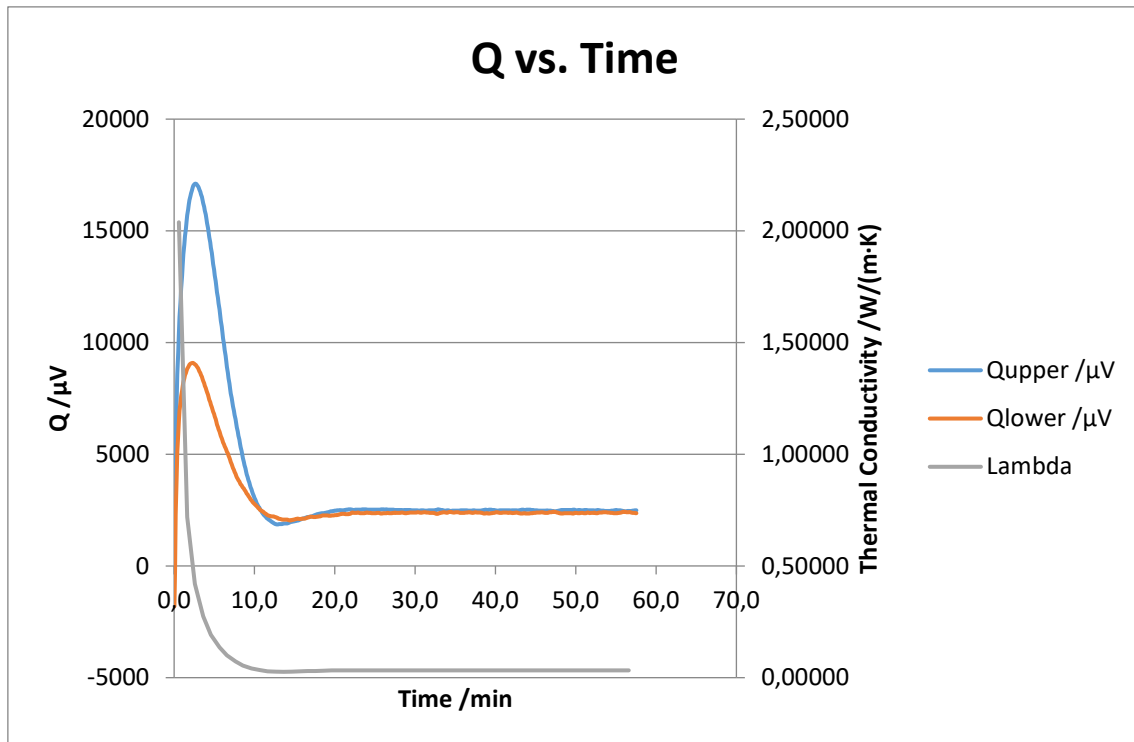


Figura 18 Evolución del voltaje, Q, VS Tiempo para muestra patrón.

### 3.4. Preparación de las muestras

El HFM 446 Lambda Medium puede ser usado para muestras sólidas (más adelante hablaremos de las pruebas en líquidos) en un amplio rango de tipos, desde aquellos objetos que son rígidos y casi incompresibles hasta objetos que son bastante compresibles sin forma ni tamaño fijo. También podemos incluir en estas categorías aquellos materiales formados por pequeñas partículas, tales como polvo, materiales granulados o fibrosos...

#### Muestras sólidas

Las dimensiones de la muestra a medir deben cumplir unos requisitos para poder realizar el análisis correctamente. Esto se debe, principalmente, a que las dimensiones de la cámara permiten cierto tipo de muestras en función del modelo que usemos y también para asegurar un correcto estudio puesto que piezas demasiado grandes pueden alargar en exceso el análisis por tener más dificultades para alcanzar una temperatura estable. En la figura 19 se muestran cuáles deben ser estas dimensiones.

El material de la muestra debe ser homogéneo y la relación masa/área, al menos en la zona central de la muestra (102x102 mm) debe ser constante en todos los puntos.

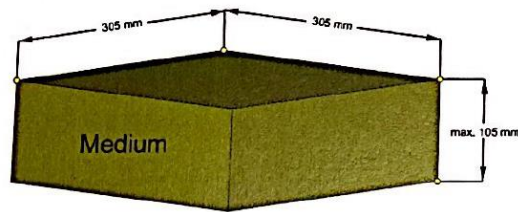


Figura 19 Dimensiones de la muestra.

La presencia de cualquier tipo de burbuja de aire en la muestra puede llevar a resultados erróneos. Para poder solucionar esto, se hace uso del kit de instrumentación proporcionado por el fabricante, del que se hablará más adelante.

### **Muestras con dimensiones pequeñas**

Es posible realizarle el test a muestras con una longitud o anchura inferior a las dimensiones mostradas anteriormente. En estos casos, es necesario colocar algún tipo de marco a la muestra para poder cubrir toda el área del plato de la instrumentación. Sin embargo, la muestra no debe tener unas dimensiones inferiores a 150 x 150 mm y debe estar centrada respecto al plato inferior.

Otro detalle importante es que el material del marco utilizado debe ser lo más parecido posible al de la muestra y con una conductividad térmica no superior a la de la muestra a medir. Además, es importante que al unir este marco con la muestra no se produzcan ningún tipo de burbujas de aire. El marco debe tener, obviamente, el mismo espesor que la muestra a no ser que sea ligeramente superior y sea lo suficientemente compresible para alcanzar el espesor de la muestra permitiendo al plato tener buen contacto sobre toda la superficie de la muestra.

### 3.5. Abrir/cerrar la cámara para insertar una muestra

1. Pulsar “door Δ” en el panel de control hasta que la puerta pare.



Figura 20 Primer paso para insertar la muestra.

2. Colocar la muestra en el interior de la cámara. Si el plato está bajado habrá que elevarlo para poder introducirla. Para ello, mantener pulsado el botón del panel de control “stack  $\Delta$ ” y el botón de seguridad (situado en el lateral izquierdo de la instrumentación) hasta que el plato llegue al final del recorrido y pare.



Figura 21 Segundo paso para insertar la muestra.

3. Cuando se haya introducido la muestra, mantener pulsado “stackv  $\nabla$ ” y el botón de seguridad hasta que el plato tenga contacto con la superficie superior de la muestra. El plato superior parará automáticamente una vez que este límite haya sido alcanzado.
  - a. En caso de tener muestras compresibles, realizar el mismo procedimiento que en 3 con la salvedad de que habrá que dejar de pulsar el botón “stackv  $\nabla$ ” y el botón de seguridad cuando se alcance el espesor deseado para la prueba.

- b. Comprobar que el plato superior está haciendo buen contacto con la superficie superior de la muestra.

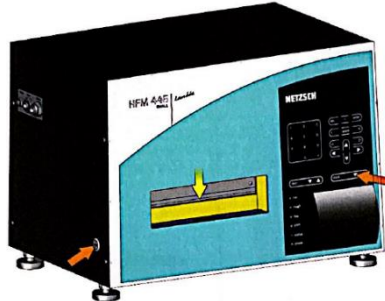


Figura 22 Tercer paso para introducir la muestra.

4. Cerrar la puerta manteniendo pulsado "door ∇" en el panel de control hasta que la puerta pare.



Figura 23 Cuarto paso para introducir la muestra.

### 3.6. Kit de instrumentación

El instrumental HFM es usado principalmente para medir aislantes térmicos y otros materiales de baja conductividad, con un rango óptimo de medidas de  $0,5$  a  $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . El hecho de que el proceso de medición sea tan sencillo invita a medir la conductividad térmica en materiales con valor alto de este parámetro. Antes de afrontar las dificultades que implica intentar realizar este tipo de medidas es necesario introducir los principios básicos del método de medida:

Resistencia térmica por debajo de 0,02 (m²K)/W	Resistencia térmica entre 0,1 y 0,02 (m²K)/W	Resistencia térmica entre 0,03 y 0,1 (m²K)/W	Resistencia térmica entre 0,5 y 0,3 (m²K)/W	Resistencia térmica por encima de 0,5 (m²K)/W
<ul style="list-style-type: none"> <li>Fuera del rango de medida de la máquina para resistencias térmicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistencia térmica en su límite mínimo</li> <li>Siempre uso del kit de instrumentación</li> <li>Precisión reducida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mayor conductividad, superficie más dura</li> <li>Siempre uso del kit de instrumentación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Materiales ligeramente más duros pero con conductividades menores</li> <li>El límite requiere que también los materiales más blandos con resistencias térmicas altas deban ser medidos con el kit de instrumentación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La mayoría de los materiales con baja conductividad y blandos o espumosos.</li> <li>Medir sin el kit de instrumentación</li> </ul>

Figura 24 Niveles de resistencia térmica.

Los ensayos de medida de conductividad térmica requieren de tres valores básicos: la cantidad de flujo de calor (es decir, la transferencia de energía térmica), temperatura y dimensiones de la muestra. La relación entre estas está definida por la Ley de Fourier, la cual indica que el flujo de calor en una muestra de espesor  $L$  es directamente proporcional a su gradiente de temperatura,  $\frac{\Delta T}{L}$ , donde  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre el foco caliente y el foco frío. Si definimos el flujo de calor,  $q$ , como la cantidad de flujo de calor por unidad de área, podemos escribir la Ley de Fourier para un test HFM como:

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{L} \quad (8)$$

Donde  $\lambda$  es la conductividad térmica.

Otra propiedad que es crucial es la resistencia térmica,  $R_{th}$ , una medida de cómo de buena es la resistencia de la muestra al flujo de calor para un incremento de temperatura dado y definido como

$R_{th} = \frac{\Delta T}{q}$ . La resistencia térmica queda definida como:

$$R_{th} = \frac{L}{\lambda} \quad (9)$$

La razón por la cual el test en la máquina HFM es tan simple para materiales aislantes térmicos es porque las medidas de  $q$ ,  $\Delta T$  y  $L$  tomadas por los sensores internos representan el valor preciso de estos parámetros sin necesidad de que el operario haga ningún esfuerzo adicional para introducir ningún dato extra.

El HFM 446 Medium Lambda mide automáticamente  $q$ ,  $L$  y las temperaturas de sus platos cada pocos segundos y calcula la conductividad térmica instantánea mediante la Ley de Fourier para luego comprobar si se ha alcanzado el equilibrio térmico. Si la respuesta es que sí, el software termina el test. Esto permite que el operario únicamente tenga que introducir la muestra, apretar un botón y esperar.

Esto únicamente funciona si los valores medidos por los sensores internos representan verdaderamente los parámetros que necesitamos. Para ser más exactos, únicamente funciona



si existe una resistencia térmica insignificante entre el plato y la muestra, lo que significa que esta resistencia térmica es muy pequeña comparada con la de la muestra para el test. Estas condiciones se cumplen casi siempre en este tipo de pruebas.

Por otro lado, estas condiciones son muy difíciles de conseguir cuando se está realizando la prueba en materiales de alta conductividad térmica, principalmente por dos razones:

- Tienen a ser rígidos y a tener superficies irregulares. Además, suelen ser densos y duros lo que dificulta el poder mecanizarlos en caso de que sea necesario para conseguir una superficie lisa que permita la correcta toma de medidas.
- Pueden tener un contacto térmico pobre con los platos y la resistencia térmica ser elevada.

Incluso cuando la resistencia térmica puede ser minimizada, necesitamos aún que esta sea pequeña comparada con la resistencia térmica de la muestra. Los materiales con una conductividad térmica elevada poseen normalmente una resistencia térmica intrínseca cuyo valor es 30 o 40 veces más pequeño que la de muestras de aislamiento térmico del mismo espesor. Estas condiciones tienen dos consecuencias:

1. Asumir que la temperatura de los platos es la misma que la de las superficies de la muestra no tiene tanto sentido ahora.
2. Tampoco es del todo cierto afirmar que el flujo de calor es uniforme tanto hacia como desde la muestra.

Todas estos inconvenientes nos llevan a no poder confiar completamente en las lecturas de los sensores internos del HFM 446 Medium Lambda excepto, posiblemente, en el espesor de la pieza. El valor del flujo de calor y del incremento de temperatura dista mucho, seguramente, de su valor real. Por lo tanto, necesitamos alguna forma de poder obtener estas medidas de forma precisa y de conseguir que el flujo de calor sea uniforme a través de toda la superficie de la muestra.

Para ello, el HFM 446 Medium Lambda cuenta con un kit de instrumentación que permite solventar estos problemas. Este kit de instrumentación permite a los usuarios realizar las pruebas evitando errores de medidas. El kit está compuesto por:

- Dos láminas de caucho finas y compresibles para mejorar los problemas de contacto térmico debido a los desniveles que existan en la superficie de la muestra.
- Dos sensores de temperatura auxiliares (termopares) para realizar las medidas directamente sobre la superficie de la muestra.
- Conectores especiales para los termopares auxiliares.
- Rollo de aluminio con una alta conductividad térmica para fijar los termopares auxiliares sobre la superficie de la muestra.

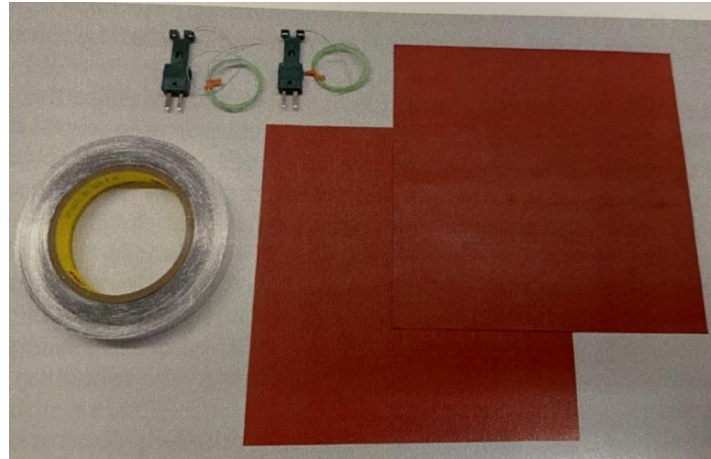


Figura 25 Elementos del kit de instrumentación.

Los pasos a seguir con el uso de los termopares son los siguientes:

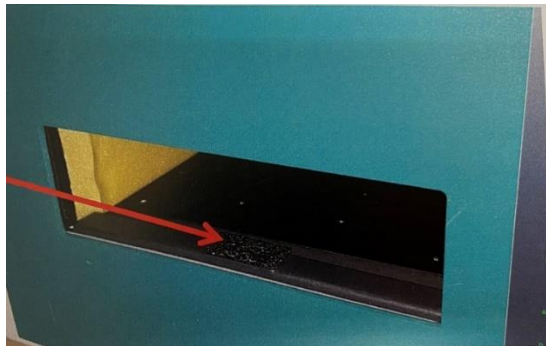
- Antes de fijar los termopares a la muestra a la que se le va a realizar el test, es necesario medir su espesor en diferentes puntos (al menos 5) y la zona central y calcular el espesor medio en la zona medida. Hay que guardar este valor e introducirlo como "User Thickness" en el SmartMode y Q-Test.
- Para reducir al máximo los errores debidos al mal contacto del plato y la superficie de la muestra, hay que asegurarse que el espesor de las zonas extremas de la muestra está muy cerca del valor medido en la zona central.
- El HFM test cuenta con el par de láminas de caucho mencionadas anteriormente y que se colocan en cada uno de los platos. Los termopares auxiliares son fijados directamente sobre las superficies de la muestra usando un trozo de cinta de aluminio para permitir medir precisamente la diferencia de temperatura entre la superficie caliente y la fría.
- La distancia entre los puntos donde se han fijado los termopares deben ser medidas externamente e introducidas por el operario cuando se esté configurando el test para que el software sea capaz de calcular correctamente el gradiente de temperaturas.

Haciendo uso de estos termopares y midiendo externamente el espesor de la muestra, los posibles errores que pudieran aparecer son eliminados. El kit de instrumentación está recomendado ser utilizado para muestras con resistencias térmicas inferiores a  $0,1 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ , especialmente para muestras rígidas con superficies rugosas.

### 3.6.1. Montaje del kit de instrumentación

1. Medir el espesor de la muestra cuidadosamente.

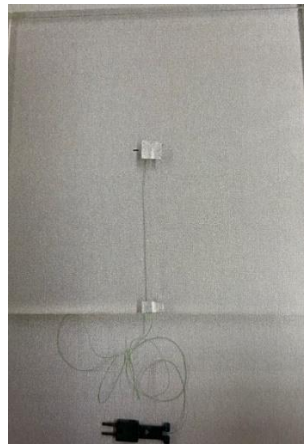
- a. Para conseguir suficiente resistencia térmica y diferencia de temperatura, es necesario que la muestra tenga al menos 10 mm de espesor. El espesor máximo permitido es, aproximadamente, 40 mm para permitir que exista espacio entre las láminas de caucho y la instalación, además de para poder extraer e introducir la pieza cómodamente.
  - b. Colocar las láminas en contacto con la superficie de la forma más precisa para que el contacto con los platos sea lo más homogéneo y paralelo posible.
2. Calibración del HFM: para ello se hace uso de muestras de referencia con una alta conductividad térmica proporcionada por el fabricante. En este caso, el patrón que se utiliza es el material IRMM-440A.
  3. Los termopares se deben conectar a las salidas colocadas en la parte frontal de la apertura por donde se introducen las muestras. Cuando no se utilice, se puede tapar con una lámina de espuma.



*Figura 26 Lámina de espuma para tapar los conectores.*

4. El final de la sonda debe ser colocado lo más centrado posible sobre la superficie de la muestra, tanto en la cara superior como en la inferior. Para ello, se utiliza una pequeña lámina del aluminio para fijarla.





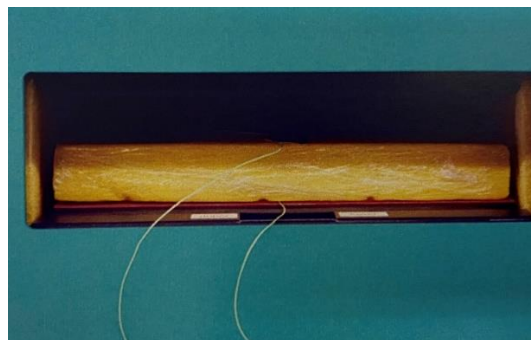
*Figura 27 Fijación del termopar en la zona central.*

5. Colocamos una de las láminas de caucho en la parte baja de la cámara donde va situada la muestra.



*Figura 28 Lámina de caucho en el plato inferior.*

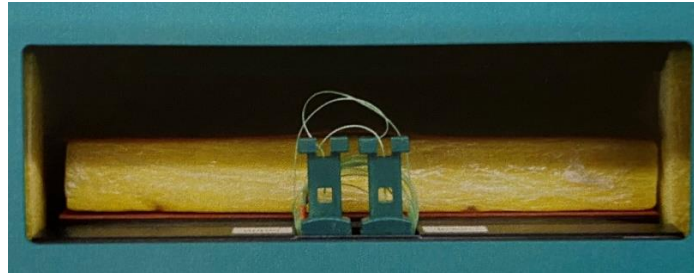
6. Introducimos la muestra, con los termopares ya colocados, en la cámara.



*Figura 29 Muestra ya introducida en la cámara.*

7. Colocamos la otra lámina de caucho encima de la muestra.
8. Bajamos el plato haciendo uso del panel de la máquina hasta que el plato para automáticamente.

9. Conectamos los termopares.



*Figura 30 Termopares conectados.*

10. Enrollamos los termopares y situamos las bobinas detrás de los conectores para que no molesten.



*Figura 31 Termopares en su posición final.*

11. Tras su uso, retiramos los termopares cuidadosamente y colocamos la lámina de espuma si no vamos a volver a utilizarlo.



## IV

### 4. Experiencia real

*En este cuarto apartado se mostrarán los resultados obtenidos para distintos materiales: asfalto negro, asfalto con materiales sintéticos y morteros para construcción.*

#### 4.1. Experiencia real

En este apartado se va a comentar el análisis llevado a cabo sobre dos muestras de diferentes tipos de asfaltos, uno de ellos construido con los procedimientos típicos usando betún y el otro haciendo uso de materiales sintéticos pendientes de ser patentados.

En ambos se ha hecho uso del kit de instrumentación (medida directa con los termopares) puesto que, a pesar de no ser considerados como aislantes térmicos, generalmente los asfaltos cuentan con una conductividad térmica baja y, por consiguiente, con una resistencia térmica del orden de  $0,1 \frac{m^2 \cdot K}{W}$  o inferior. Además, el hecho de que la superficie de este tipo de muestras sea rugosa implica que la medida directa sobre su superficie sin el uso de los termopares induzca a errores graves o, incluso, a no encontrar el equilibrio térmico.

##### 4.1.1. Dimensionamiento y preparación de las muestras

El primer paso en el procedimiento es medir y pesar las muestras. Para obtener los valores más cercanos a la realidad posibles, se realizan tres medidas para todos los parámetros. En concreto medimos: altura, anchura, espesor y peso.

El instrumental de medida en cuestión es el siguiente:

- Balanza de pesaje.
- Calibre o pie de rey.
- Escuadra.



Figura 32 Instrumental de medida.

Ya que la preparación de las muestras para ser introducidas en la máquina es igual para los dos casos de este estudio, se mostrará por imágenes la puesta a punto para uno de los dos asfaltos.

- 1) Selección de la muestra a medir.



Figura 33 Muestra a medir.

- 2) Colocación de los termopares en cada una de las caras de la muestra colocando un pequeño trozo de cinta de aluminio para dejar fijo el extremo del cable a la zona central.

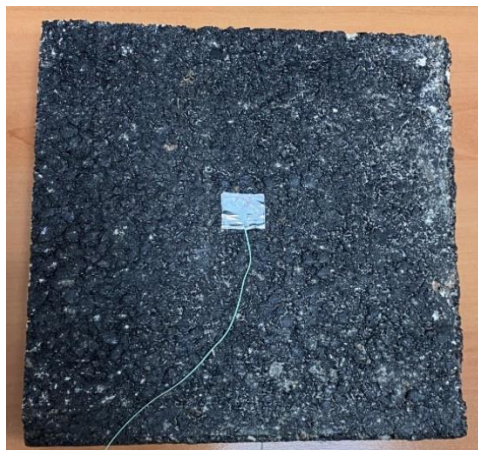


Figura 34 Fijación de los termopares.

- 3) Colocación en el interior de la máquina de la muestra con las dos láminas de caucho para asegurar buen contacto así como conectar los termopares.

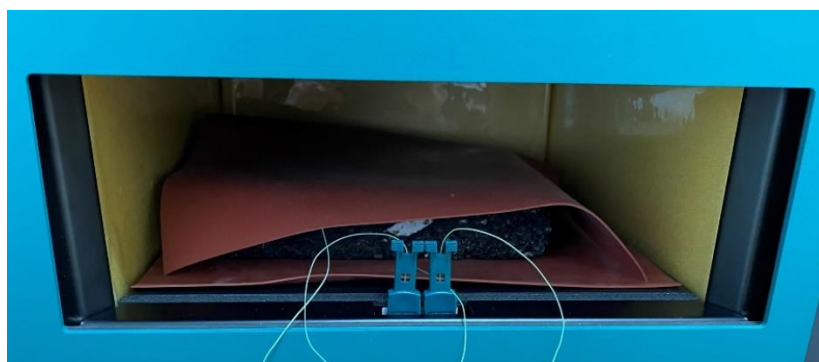
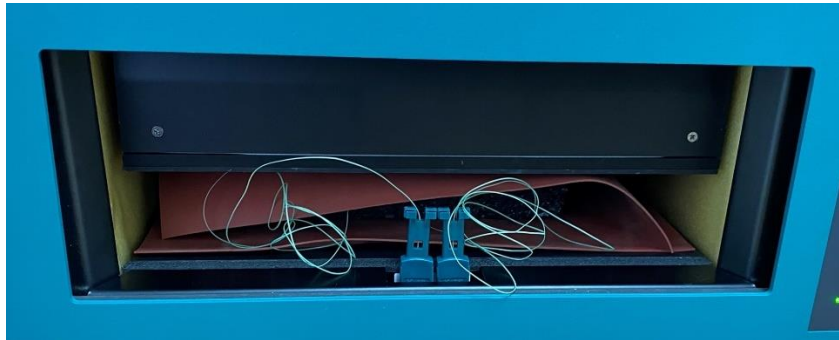


Figura 35 Colocación en el interior de la muestra.



- 4) Bajar el plato superior hasta que se detenga al entrar en contacto con la lámina de caucho.



*Figura 36 Plato superior bajado.*

- 5) Bajar la puerta hasta que quede completamente cerrada la cámara.
- 6) Configuración de los parámetros necesarios antes de iniciar el test:
  - a. En el apartado “Basic Data” se introducen los nombres que se consideren y el directorio para guardar los resultados.
  - b. En “Specimen Description” se incluye el nombre que queramos darle a la muestra así como el material y sus características físicas.
  - c. En “Setpoints” configuramos para que el análisis finalice al tomar 3 medidas y el único parámetro que cambiamos es “Mean Temp. [°C]” a 24,0.
  - d. Por último, en “Run Parameters” seleccionamos “NIST SRM 1450 D” para “Heat Flux Sensor Calibration” y seleccionamos con la primera opción “Change” que vamos a usar el “Instrumentation Kit” (termopares). El resto de valores se dejan por defecto.
  - e. Pulsamos en “Start” para dar comienzo al test.

NETZSCH SmartMode

**NETZSCH**  
SmartMode

HFM 446  
IDLE  
22,6 °C

Thermal Conductivity Test

Basic Data

Laboratory: CTON  
Project: TFG  
Operator Name: CTON  
Remark: P

Directory: C:\NETZSCH\Proteus72\data  
File Name: TFG\_AsfaltoNegro .ngb-sh3

Specimen Description

Product Type: [Select] [Manage]

Sample ID: AN01  
Sample Name: AN01  
Material: Asfalto Negro  
Spacers: Optional

Mass: 3724,00 g  
 Density: 2242,9 kg/m<sup>3</sup>  
 Use thickness gauge: 4,7099 cm  
 User defined thickness: 4,4117 cm

Width: 19,4 cm  
Depth: 19,4 cm

[Reload] [Start] [Save]

NETZSCH SmartMode

**NETZSCH**  
SmartMode

HFM 446  
IDLE  
22,7 °C

Thermal Conductivity Test

User defined thickness: 4,4117 cm

Width: 19,4 cm  
Depth: 19,4 cm

Setpoints

	Use	Mean Temp. [°C]	ΔT [K]	Upper Plate [°C]	Lower Plate [°C]
1	<input checked="" type="checkbox"/>	24,0	20,0	34,0	14,0
2	<input checked="" type="checkbox"/>	24,0	20,0	34,0	14,0
3	<input checked="" type="checkbox"/>	24,0	20,0	34,0	14,0
4	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0
5	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0
6	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0
7	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0
8	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0
9	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0
10	<input type="checkbox"/>	0,0	0,0	0,0	0,0

Idle Setpoint: 23,0 0,0 23,0 23,0

Run Parameters

Heat Flux Sensor Calibration: NIST SRM 1450 D  
Reference material: NIST SRM 1450D (1450 D)  
Calibration date: 30/05/2019 10:31

[Reload] [Start] [Save]

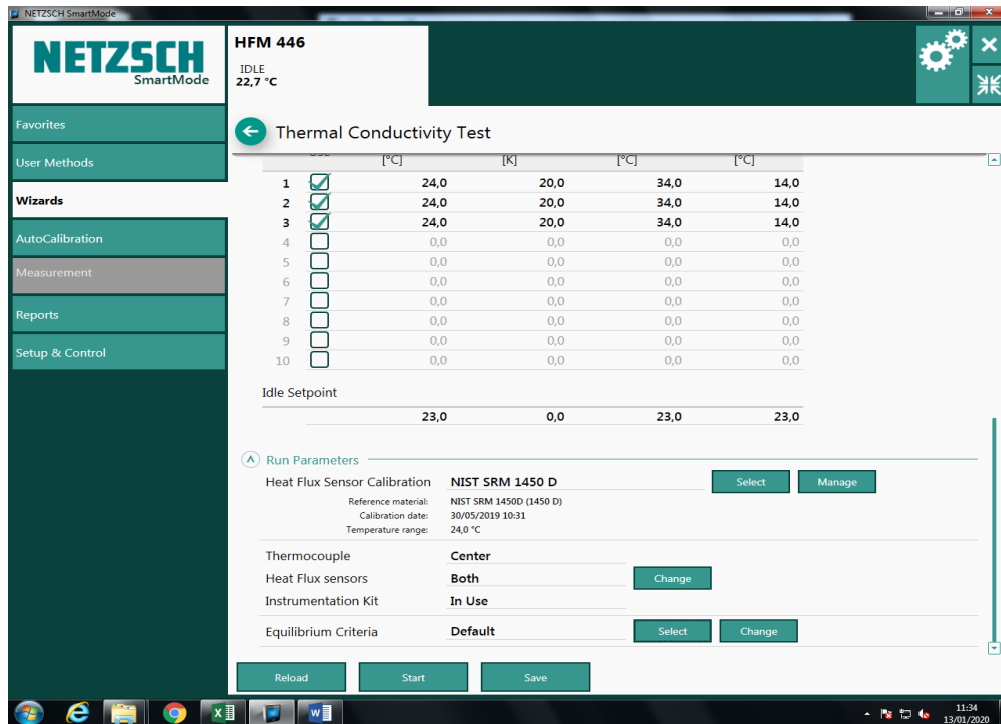


Figura 37 Pantalla de configuración del test de conductividad térmica.

## 4.2. Muestras del estudio: resultados.

Las muestras para este estudio son las siguientes: muestra de asfalto con materiales tradicionales y muestra de asfalto con materiales sintéticos. Una vez aplicado el procedimiento descrito en el apartado anterior y completado el test, se obtienen los resultados que se van a comentar a continuación.

Además, se ha realizado para ambos casos como funcionalidad extra la medida tanto con termopares (método adecuado puesto que este tipo de materiales tiene la resistencia térmica baja) como directamente sobre la superficie.

### 4.2.1. Asfalto negro

Esta es la primera de las muestras mencionadas en el párrafo anterior. En concreto, su composición es la típica de las mezclas asfálticas. No conocemos los materiales que la componen exactamente pero sí una pequeña idea de cuáles son. Principalmente hormigón asfáltico que no es más que un agregado de asfalto y materiales minerales (mezcla de varios tamaños de áridos y finos).

A continuación se muestra una imagen de la muestra:





Figura 7.1. 2 Muestra de asfalto con betún.

El primer paso para poder realizar el estudio es tomar las dimensiones y el peso. Como se ha comentado en la descripción del procedimiento, se toman tres medidas y se saca la media aritmética.

<b>Peso (g)</b>	3722	3722	3722	<b>3722</b>
<b>Largo (cm)</b>	19,4	19,4	19,4	<b>19,4</b>
<b>Ancho (cm)</b>	19,4	19,4	19,4	<b>19,4</b>
<b>Espesor (cm)</b>	4,449	4,386	4,400	<b>4,4117</b>

Uno de los principales problemas que podríamos encontrarnos al realizar el análisis a este tipo de material en concreto (betún asfáltico) es la posibilidad de alcanzar en el interior de la máquina una temperatura cercana a la temperatura de fusión del material.

La temperatura de fusión del betún asfáltico suele situarse en el rango de 78 – 85 °C, superándose cuando se utiliza para pavimentos ya que se echa sobre la superficie a urbanizar o pavimentar en estado líquido para que luego solidificar.



Figura 38 Betún asfáltico en carreteras.

A pesar de esto, como se verá más adelante en los resultados del ensayo, la temperatura que alcanzan los platos de la máquina dista mucho de la temperatura de fusión del betún asfáltico por lo que es prácticamente imposible que se produzca la fusión de alguna capa de la muestra.

A continuación, se llevaría a cabo el procedimiento necesario para el caso del estudio con termopares y el mismo procedimiento pero sin el uso de termopares.

#### 4.2.1.1. Resultados con termopares

Tras superar las 2 horas desde que se comenzó el ensayo, los resultados obtenidos para tres puntos de medida son los siguientes:

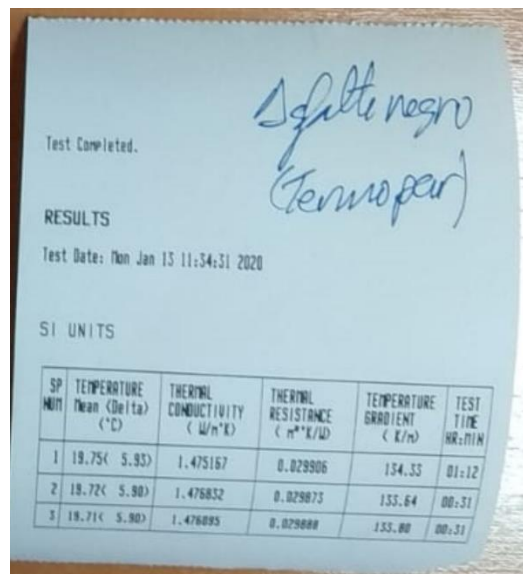


Figura 39 Ticket de resultados para asfalto negro.

	Mean Temp. °C	Delta Temp. K	Thermal Conductivity W/(m·K)	Thermal Resistance (m²·K)/W	Temp. Gradient K/m	Duration hh:mm:ss
1	19,8	5,9	1,47517	0,0299	134,33	01:12:29
2	19,7	5,9	1,47683	0,0299	133,64	00:31:00
3	19,7	5,9	1,47610	0,0299	133,80	00:31:00

Además, nos ofrece en el Excel de resultados una pestaña con todos los puntos tomados a lo largo del análisis, siendo los de la medida final los nombrados como "TakeData". A continuación, se muestra los tres puntos tomados que, a pesar de no coincidir exactamente en todos los decimales con los mostrados en la tabla, son igualmente válidos. Esta falta de coincidencia exacta es propia de la máquina y de su configuración interna la cual no puede ser modificada y tampoco se conoce el por qué exacto de la inexactitud entre los puntos tomados y los resultados finales arrojados.

Time	Time	Setpoint	State	Tupper /°	Tlower /°	Tmean /°	Tdelta /°	Qupper /j	Qlower /j	Hmeter /c	PeakAver	ndardDev	Referenc	Lambd	imbdaAve	ge
71,465800	01:11:27	1	TakeData	34,0	14,0	19,8	5,9	20790	29847	4,7061	0,000995	0,001566	0,007850	1,476402	1,474974	
102,423250	01:42:25	2	TakeData	34,0	14,0	19,7	5,9	20901	29433	4,7060	0,000301	0,001381	0,007850	1,476494	1,476845	
133,449183	02:13:26	3	TakeData	34,0	14,0	19,7	5,9	20853	29440	4,7057	0,000756	0,001044	0,007850	1,475798	1,476225	

Figura 40 Toma de datos para asfalto negro con termopares.

El valor de la conductividad térmica no es necesario que cuente con excesivos decimales por lo que utilizaremos dos para asegurar el resultado lo más exacto posible. Por lo que la conductividad final tomada será de  $\lambda = 1,47 \frac{W}{m \cdot K}$ .

Además de obtener los valores numéricos, también obtenemos gráficas de cómo evolucionan distintos parámetros:

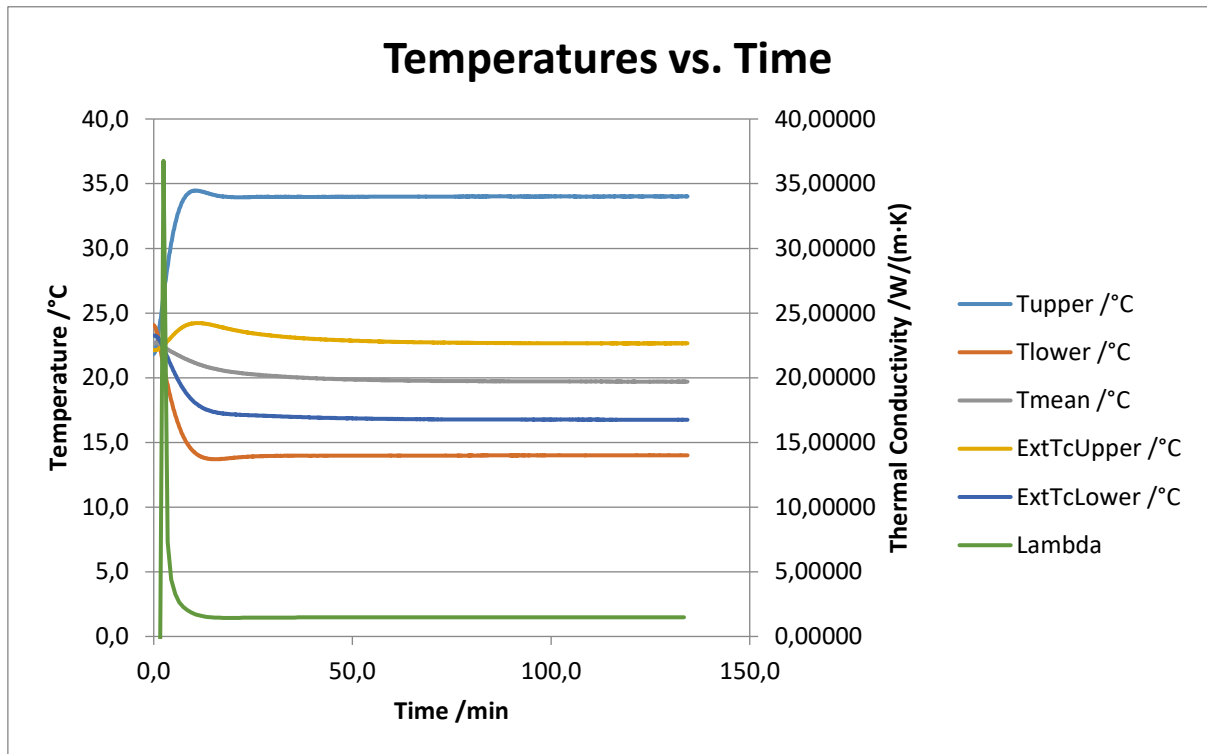


Figura 41 Evolución Temperatura VS Tiempo asfalto negro con termopares.

Como se puede observar, antes de llegar a la hora del test se consigue la estabilidad en la temperatura de los platos, de los termopares y en el valor de la conductividad térmica.

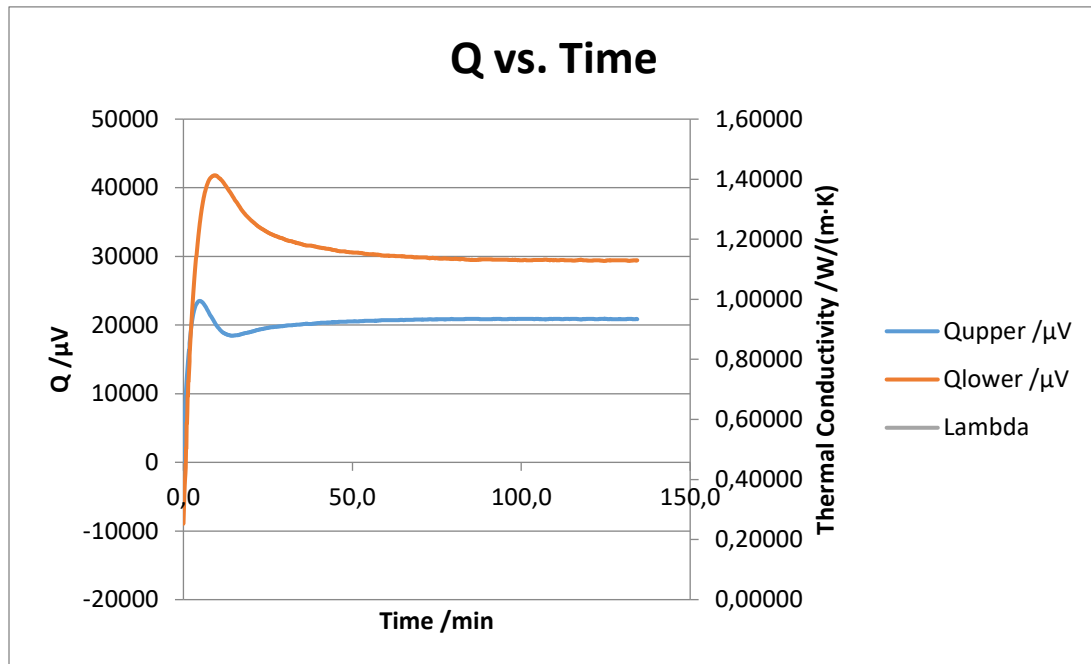


Figura 42 Evolución del voltaje, Q, VS Tiempo asfalto negro con termopares.

La evolución mostrada en la gráfica anterior no es más que una representación de la variación del voltaje de salida que miden los termopares y que se utiliza para obtener el flujo de calor en el área medida para, posteriormente, obtener el valor de la conductividad térmica.

#### 4.2.1.2. Resultados sin termopares

A pesar de que de antemano ya se conocía que los resultados que iba a arrojar el test para el caso sin termopares iban a estar lejos de la realidad, se decidió realizar el ensayo para corroborarlo. En este caso, únicamente se hizo para dos tomas de medida para ahorrar tiempo puesto que, como ya se ha comprobado, la duración de los ensayos es prolongada.

	Mean Temp. °C	Delta Temp. K	Thermal Conductivity W/(m·K)	Thermal Resistance (m <sup>2</sup> ·K)/W	Temp. Gradient K/m	Duration hh:mm:ss
1	24,0	20,0	0,52184	0,0871	440,36	01:39:55
2	24,0	20,0	0,52127	0,0872	440,26	00:11:00*

Test Completed. *Asfalto negro*

**RESULTS**  
Test Date: Wed Dec 11 15:28:20 2019

SI UNITS

SP NUM	TEMPERATURE Mean (Delta) (°C)	THERMAL CONDUCTIVITY (W/m²K)	THERMAL RESISTANCE (m²K/W)	TEMPERATURE GRADIENT (K/m)	TEST TIME HR:MIN
1	24.00( 20.01)	0.521841	0.087057	440.36	01:39
2	24.00( 20.00)	0.521270	0.087152	440.26	00:11

Figura 43 Ticket de resultados para asfalto negro sin termopares.

Como podemos observar, la conductividad térmica obtenida aquí dista mucha de la hallada con los termopares. En primera instancia, no podríamos saber a ciencia cierta si este resultado es erróneo pero, haciendo caso de las instrucciones del fabricante, para resistencias térmicas inferiores a 0,1 m²K/W es necesario el uso de termopares para asegurar una buena medida y, tal y como se puede ver en los resultados, la muestra de asfalto negro cuenta con una resistencia térmica inferior a este valor, en concreto del orden de 0,08 m²K/W.

A continuación, se incluyen también las gráficas de evoluciones al igual que en el caso de los termopares:

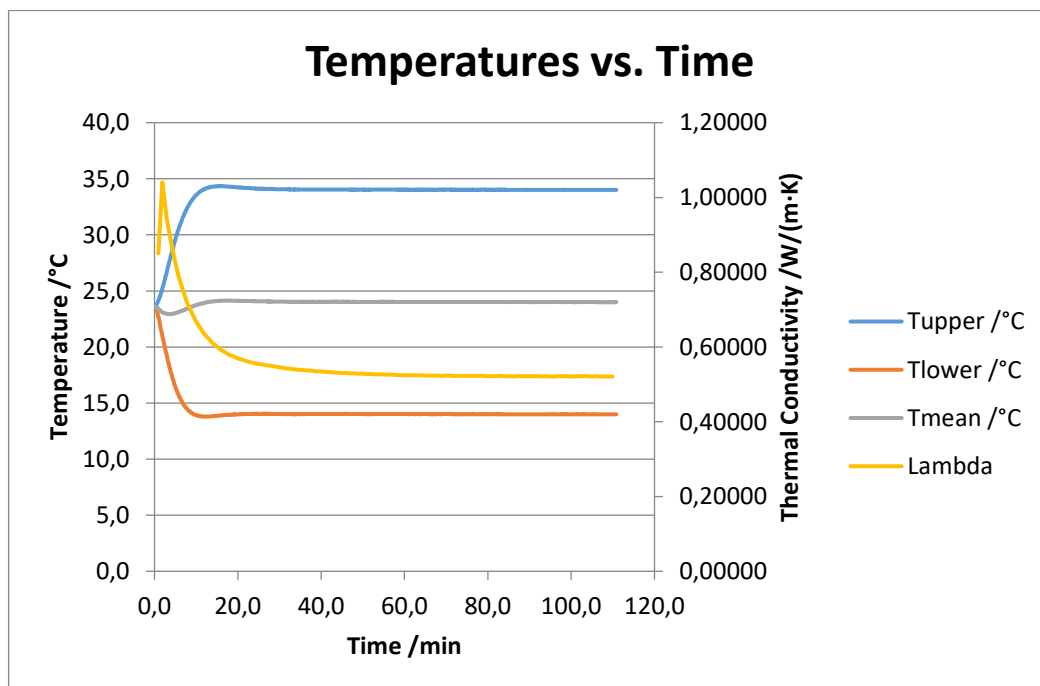


Figura 44 Evolución Temperatura VS Tiempo asfalto negro sin termopares.

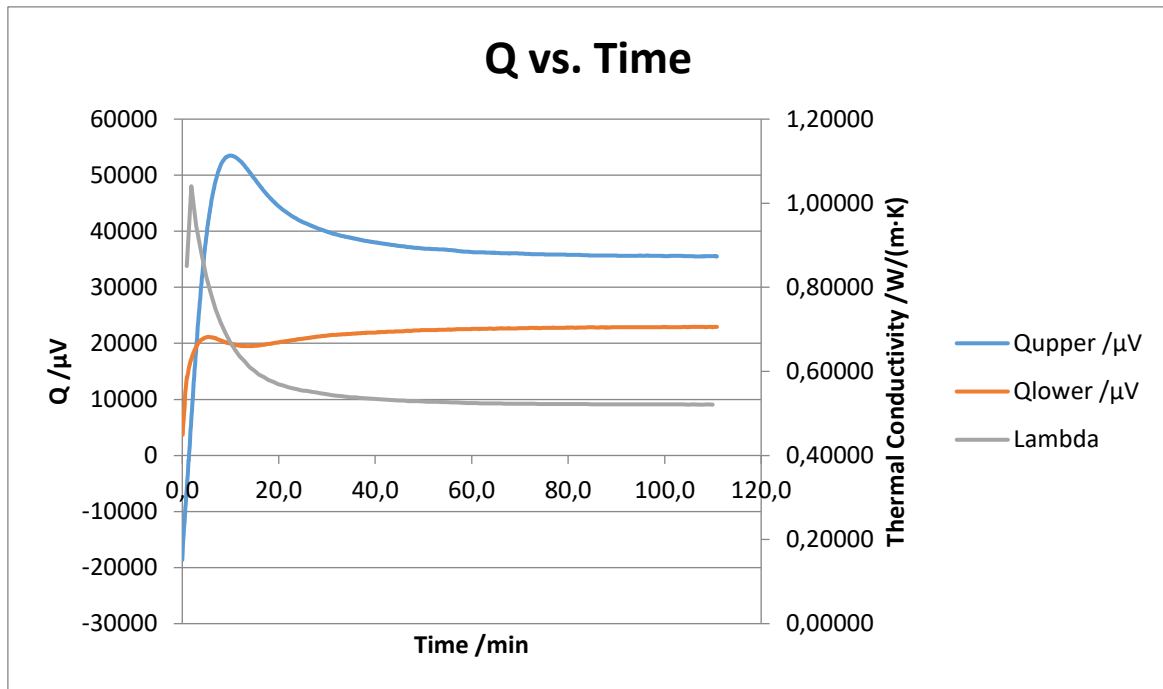


Figura 45 Evolución del voltaje, Q, VS Tiempo asfalto negro sin termopares.

#### 4.2.2. Asfalto con materiales sintéticos

Esta es la segunda de las muestras con la que se ha llevado a cabo el estudio. En este caso, no contamos con el mismo hormigón asfáltico del caso anterior si no que este asfalto está compuesto de materiales sintéticos pendientes de patentar por una empresa privada por lo que su composición exacta la desconocemos.

Lo que sí podemos comentar es que este asfalto está destinado para pavimentar zonas urbanas y que su principal ventaja respecto al asfalto común es que reduce el conocido como efecto de isla de calor. Este efecto es una situación urbana de acumulación de calor por la gran cantidad de edificios fabricados con diversos materiales, entre ellos hormigón, y que consiste en la dificultad de la disipación del calor durante las horas nocturnas.

El centro urbano, donde los edificios y el asfalto desprenden por la noche el calor acumulado durante el día provoca vientos locales desde el exterior hacia el interior. Comúnmente se da el fenómeno de elevación de la temperatura en zonas urbanas densamente construidas causado por una combinación de factores tales como la edificación, la falta de espacios verdes, los gases contaminantes o la generación de calor.

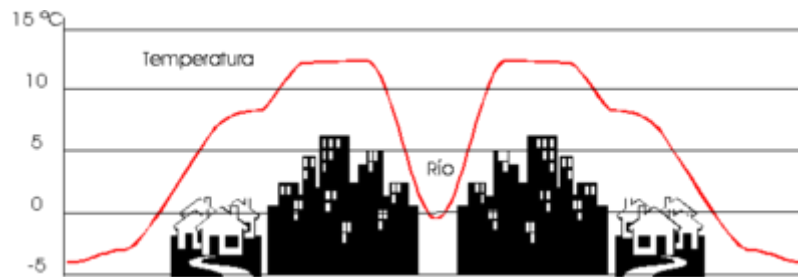


Figura 46 Isla de calor.

A continuación, se muestra una imagen de la muestra a analizar:



Figura 47 Muestra de asfalto con materiales sintéticos.

En primer lugar, medimos las dimensiones y el peso de la muestra objeto de estudio tres veces y realizamos su media para obtener un valor que introducir en la configuración inicial del test que vamos a realizar.

<b>Peso (g)</b>	3920	3920	3920	<b>3920</b>
<b>Largo (cm)</b>	19,3	19,3	19,3	<b>19,3</b>
<b>Ancho (cm)</b>	19,5	19,5	19,5	<b>19,5</b>
<b>Espesor (cm)</b>	4,638	4,570	4,521	<b>4,5763</b>

A continuación, al igual que para el asfalto negro, se llevaría a cabo el procedimiento necesario para el caso del estudio con termopares y el mismo procedimiento pero sin el uso de termopares.

#### 4.2.2.1. Resultados con termopares

En este caso se han seleccionado cuatro puntos de medida, no por nada en concreto si no por comprobar si existen excesivas variaciones en los resultados finales (obviamente cuantos más puntos de medida se tomen más exacto es el resultado pero también más largo es el test).

Los resultados para cuatro puntos de medida con termopares tomados son:



	Mean Temp. °C	Delta Temp. K	Thermal Conductivity W/(m·K)	Thermal Resistance (m²·K)/W	Temp. Gradient K/m	Duration hh:mm:ss
1	21,9	7,6	1,68497	0,0272	165,72	01:19:57
2	22,0	7,6	1,68762	0,0271	166,57	00:31:00
3	22,0	7,7	1,68556	0,0272	167,17	00:31:00
4	21,5	9,6	1,68180	0,0272	210,72	00:46:00

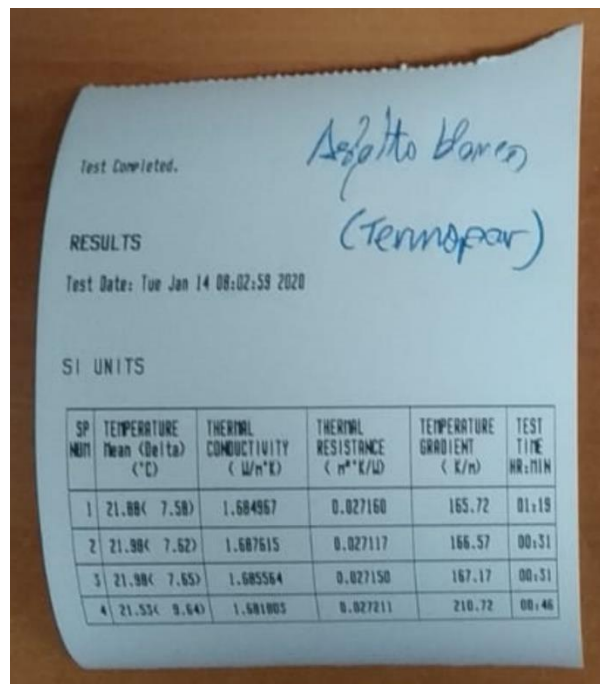


Figura 48 Toma de datos para el asfalto blanco con termopares.

En la pestaña del Excel de resultados donde aparecen los puntos tomados, obtenemos que:

Time	Time	Setpoint	State	Tupper /°	Tlower /°	Tmean /°	Tdelta /°	Qupper /j	Qlower /j	Hmeter /e	PeakAver	StdDev	Referenc	Lambda	lambdaAve	pe
78.910150	01:18:54		1	TakeData	34.0	14.0	21.9	7.6	33695	37555	4.7563	0.000942	0.001381	0.007850	1.686270	1.684767
109.907900	01:49:54		2	TakeData	34.0	14.0	22.0	7.6	33116	38529	4.7556	0.000347	0.000904	0.007850	1.687503	1.687665
140.933417	02:20:56		3	TakeData	34.0	14.0	22.0	7.7	33001	38648	4.7550	0.000451	0.001566	0.007850	1.683375	1.685661
186.900483	03:06:54		4	TakeData	36.5	11.5	21.5	9.6	40909	49312	4.7529	0.000710	0.001381	0.007850	1.680394	1.681950
187.887833	03:07:53		4	TakeData	36.5	11.5	21.5	9.6	40915	49302	4.7531	0.000594	0.001279	0.007850	1.680436	1.681803

Figura 49 Toma de datos para asfalto blanco con termopares.

Por lo que la conductividad final tomada será de  $\lambda = 1,68 \frac{W}{m \cdot K}$ .

En la gráfica de evolución de la temperatura VS tiempo en este caso podemos observar como para la última medida se produce una pequeña interferencia que provoca que la diferencia de temperatura entre la zona superior e inferior se eleve y que, por consiguiente, la conductividad térmica incremente. Posteriormente, esta vuelve a estabilizarse cerca del valor de las tres medidas anteriores.

Es complicado saber a ciencia cierta a qué puede deberse la interferencia, por lo que no ahondaremos en hacer especulaciones sobre qué ha podido ocurrir ya que, cómo se puede observar, el valor que vamos persiguiendo (la conductividad térmica) se ha vuelto a estabilizar.



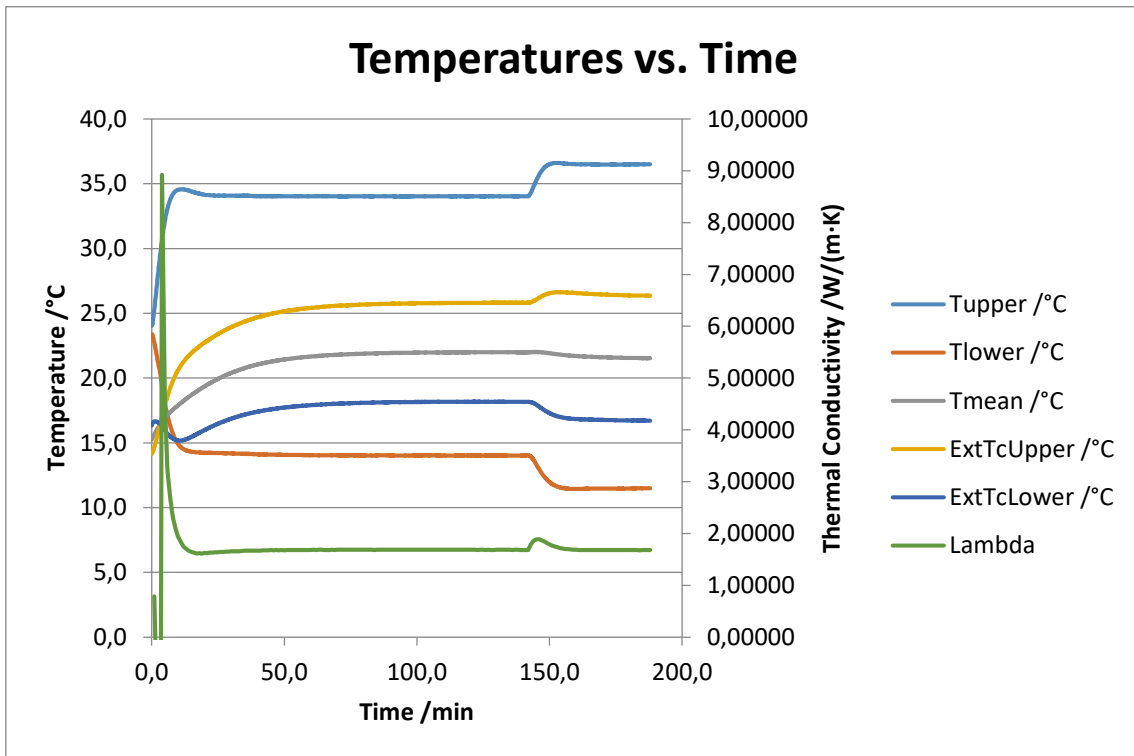


Figura 50 Evolución Temperatura VS Tiempo asfalto blanco con termopares.

Y la gráfica de evolución del voltaje:

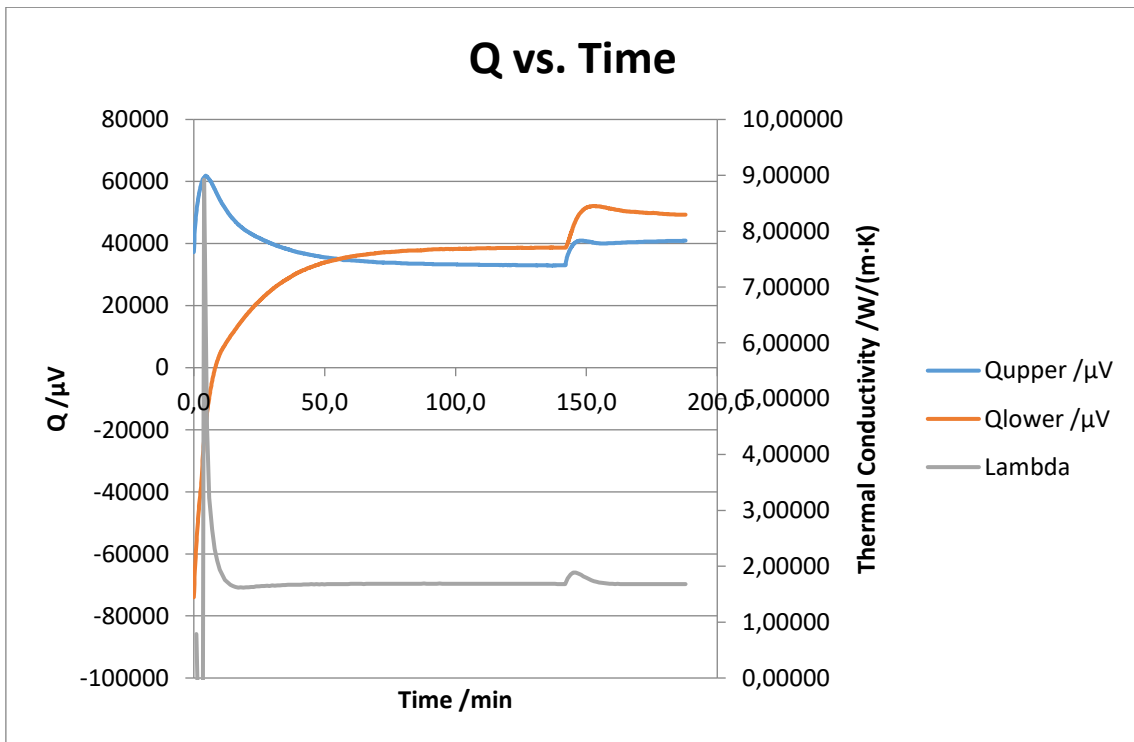


Figura 51 Evolución del voltaje, Q VS Tiempo asfalto blanco con termopares.

#### 4.2.2.2. Resultados sin termopares

Al igual que para el asfalto negro, los resultados sin termopares para el asfalto blanco distan mucho de la realidad.

Los valores obtenidos son:

	Mean Temp. °C	Delta Temp. K	Thermal Conductivity W/(m·K)	Thermal Resistance (m <sup>2</sup> ·K)/W	Temp. Gradient K/m	Duration hh:mm:ss
1	24,0	20,0	0,65141	0,0705	436,09	00:46:06
2	24,0	20,0	0,65050	0,0705	435,70	00:31:00
3	24,0	20,0	0,65030	0,0706	435,76	00:31:00

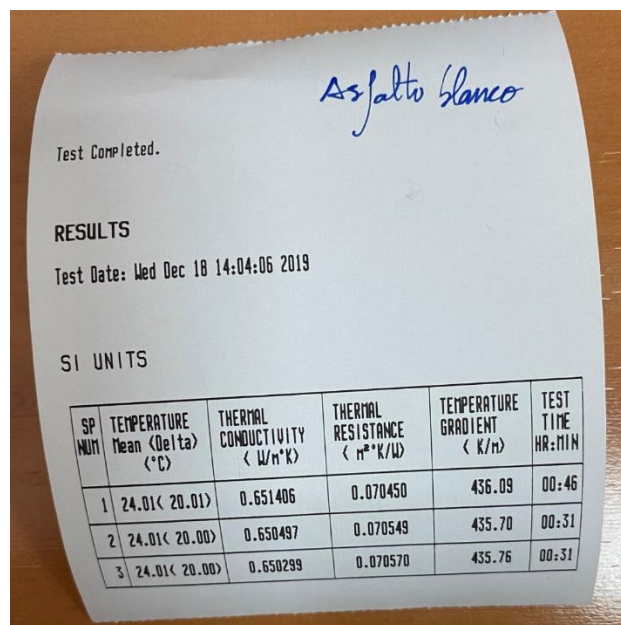


Figura 52 Toma de datos para el asfalto blanco sin termopares.

Como ocurría con la anterior muestra, la resistencia térmica de este material está por debajo de 0,1 m<sup>2</sup>K/W por lo que el uso del kit de instrumentación (termopares) para obtener un valor real de la conductividad térmica es indispensable, de ahí que estos resultados no se deban tener en cuenta.

#### 4.2.3. Ejemplo adicional: mortero.

A pesar de que las muestras asfálticas de los dos apartados anteriores eran el objeto principal de estudio del presente trabajo, se ha decidido incluir también un análisis de un mortero para construcción por tratarse de un material con utilización distinta a los anteriores.

El mortero es un compuesto de conglomerantes inorgánicos, agregados finos y agua, y posibles aditivos que sirven para aparejar elementos de construcción tales como ladrillos, piedras, bloques de hormigón, etc. Además, se usa para rellenar los espacios que quedan entre los

bloques y para el revestimiento de paredes. Los conglomerantes más comunes en la actualidad son los de cemento, aunque históricamente han sido la cal, la tierra y el yeso los más utilizados.

Generalmente se utilizan para obras de albañilería como material de agarre, revestimiento, etc.



Figura 53 Ejemplo mortero para construcción.

En esta presentación de resultados se va a mostrar cómo varía la conductividad térmica con respecto a un mortero de referencia (Mortero 1) de otros dos tipos de morteros con el mismo porcentaje de material añadido, uno vidrio (Mortero 2) y otro cerámico (Mortero 3).

#### 4.2.3.1. Resultados del ensayo.

El procedimiento de preparación de las muestra es exactamente igual al resto comentado en este trabajo. La media de las dimensiones físicas de las tres muestras son las siguientes:

	Mortero 1	Mortero 2	Mortero 3
<b>Masa (g)</b>	3408	3468	3537
<b>Ancho (cm)</b>	25	25	25
<b>Alto (cm)</b>	2,668	2,668	2,668
<b>Profundo (cm)</b>	25	25	25

Los resultados de conductividad térmica y demás parámetros junto con sus gráficas se muestran a continuación:

#### Mortero 1

	Setpoint Temperatures		Measured Temperatures		Thermal Conductivity W/(m·K)	Thermal Resistance (m <sup>2</sup> ·K)/W	Temp. Gradient K/m	Duration hh:mm:ss
	Mean °C	Delta K	Mean °C	Delta K				
1	24,0	20,0	28,4	4,6	1,73702	0,0154	171,68	01:42:11
2	24,0	20,0	28,4	4,6	1,72907	0,0154	172,31	00:31:00
3	24,0	20,0	28,3	4,6	1,72367	0,0155	172,36	00:31:00

La conductividad térmica de este mortero, que no olvidemos que es el de referencia, es de  $\lambda = 1,72 \frac{W}{m \cdot K}$ .

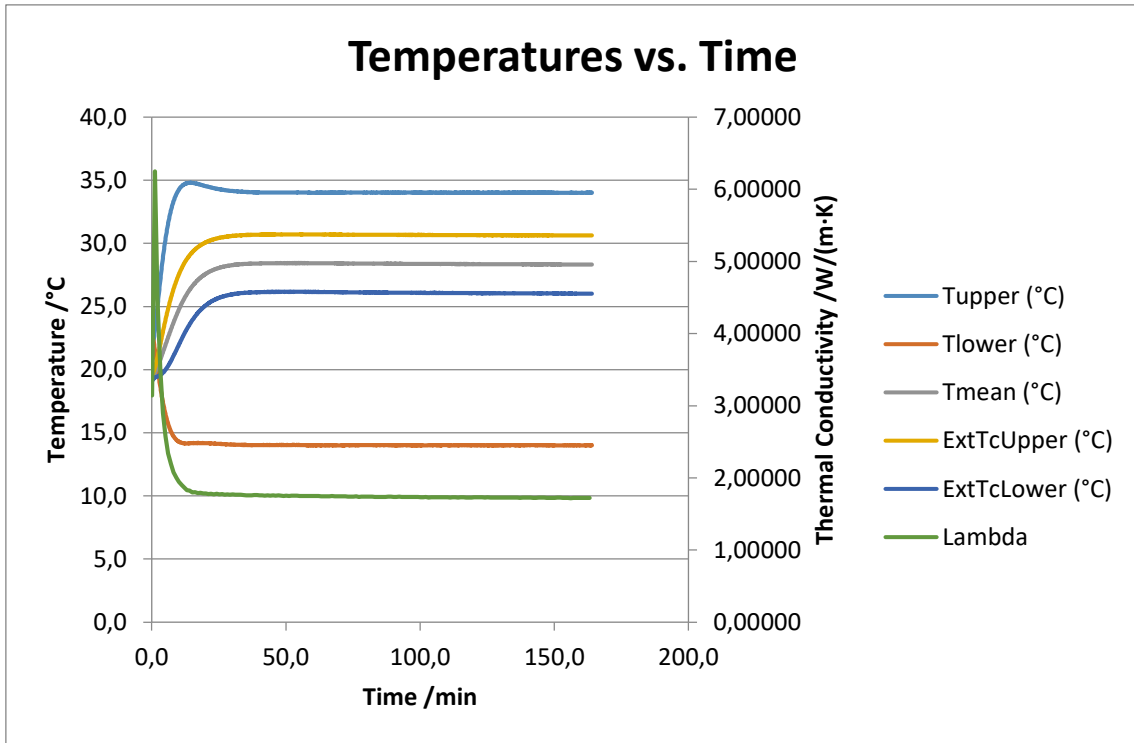


Figura 54 Evolución Temperatura VS Tiempo del Mortero 1.

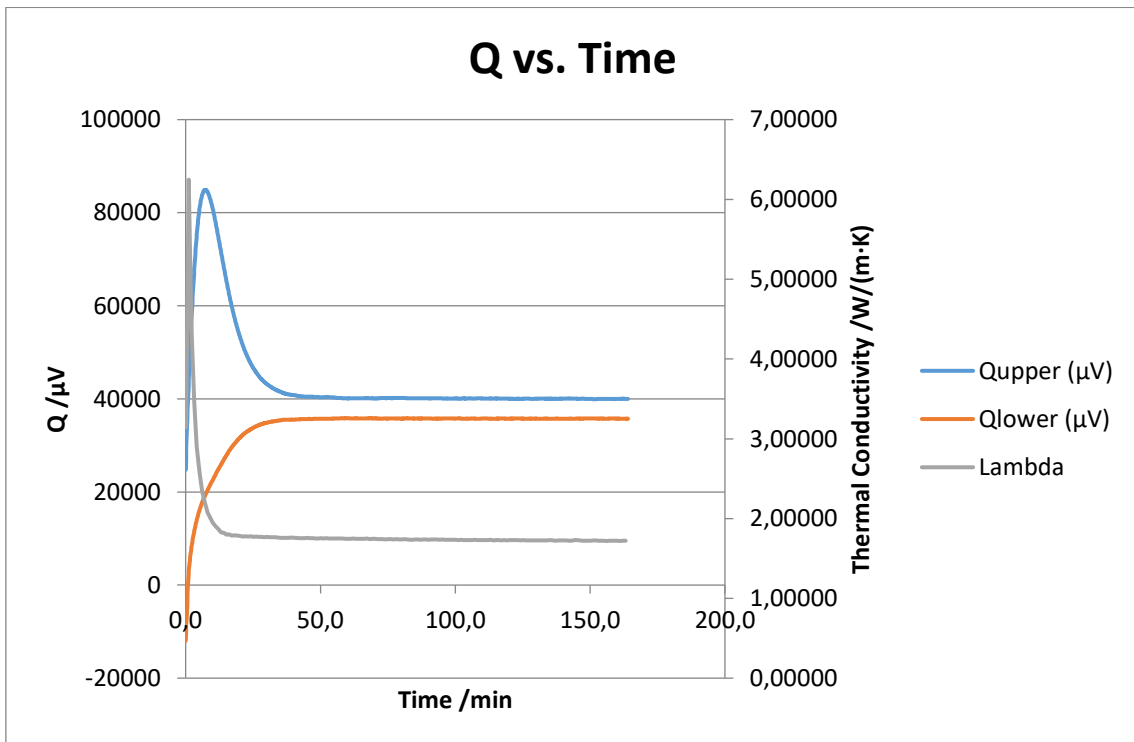


Figura 55 Evolución voltaje, Q, VS Tiempo en Mortero 1.

**Mortero 2**

	Setpoint Temperatures		Measured Temperatures		Thermal Conductivity W/(m·K)	Thermal Resistance (m <sup>2</sup> ·K)/W	Temp. Gradient K/m	Duration hh:mm:ss
	Mean °C	Delta K	Mean °C	Delta K				
1	24,0	20,0	27,5	5,9	1,50744	0,0177	220,45	01:21:45
2	24,0	20,0	27,5	5,9	1,50142	0,0178	220,92	00:31:00
3	24,0	20,0	27,4	5,9	1,49673	0,0178	221,87	00:34:00

La conductividad térmica de este mortero, con vidrio añadido es de  $\lambda = 1,50 \frac{W}{m \cdot K}$ .

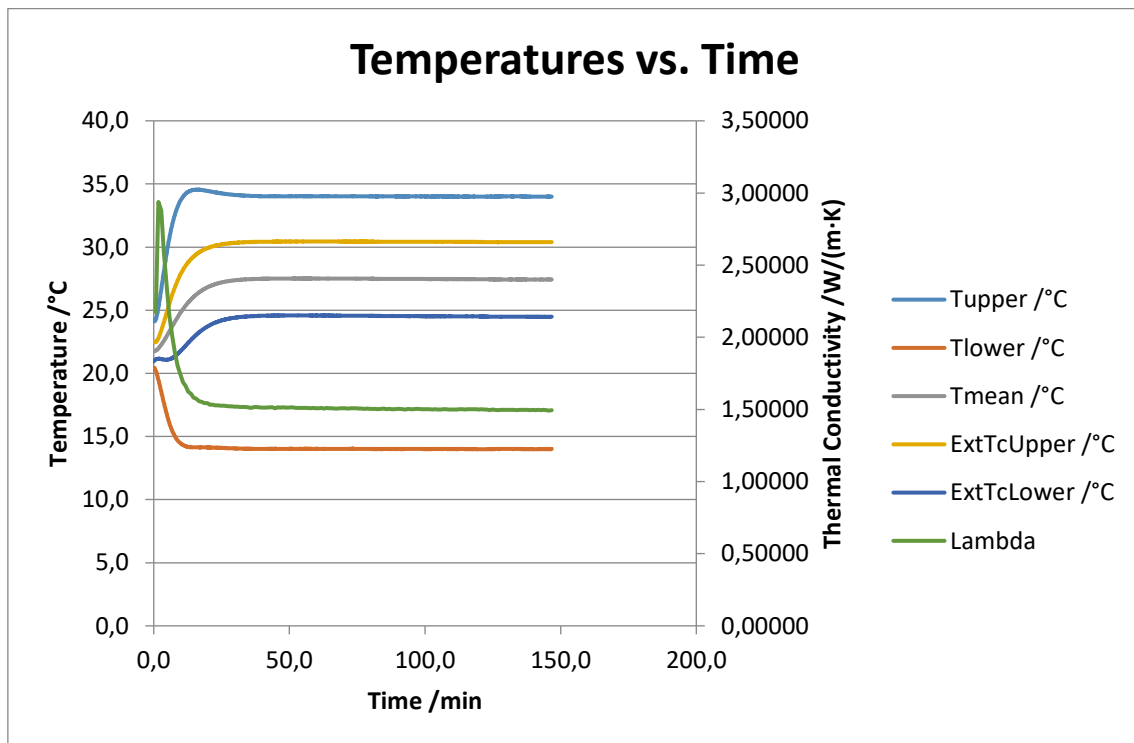


Figura 56 Evolución Temperatura VS Tiempo del Mortero 2.

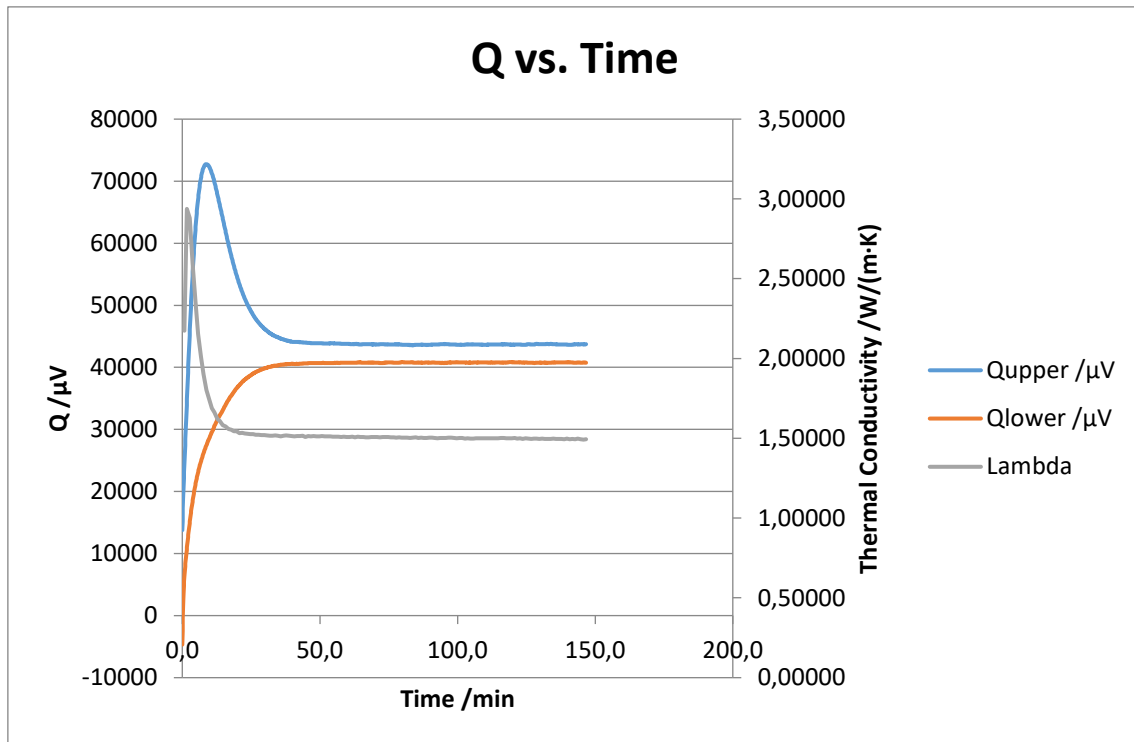


Figura 57 Evolución voltaje, Q, VS Tiempo en Mortero 2.

### Mortero 3

	Setpoint Temperatures		Measured Temperatures		Thermal Conductivity W/(m·K)	Thermal Resistance (m <sup>2</sup> ·K)/W	Temp. Gradient K/m	Duration hh:mm:ss
	Mean °C	Delta K	Mean °C	Delta K				
1	24,0	20,0	27,7	6,0	1,48943	0,0179	225,94	00:49:55
2	24,0	20,0	27,6	6,1	1,48130	0,0180	226,74	00:35:00
3	24,0	20,0	27,7	6,0	1,48190	0,0180	225,92	00:31:00

La conductividad térmica de este mortero, con cerámica añadida es de  $\lambda = 1,48 \frac{W}{m \cdot K}$ .

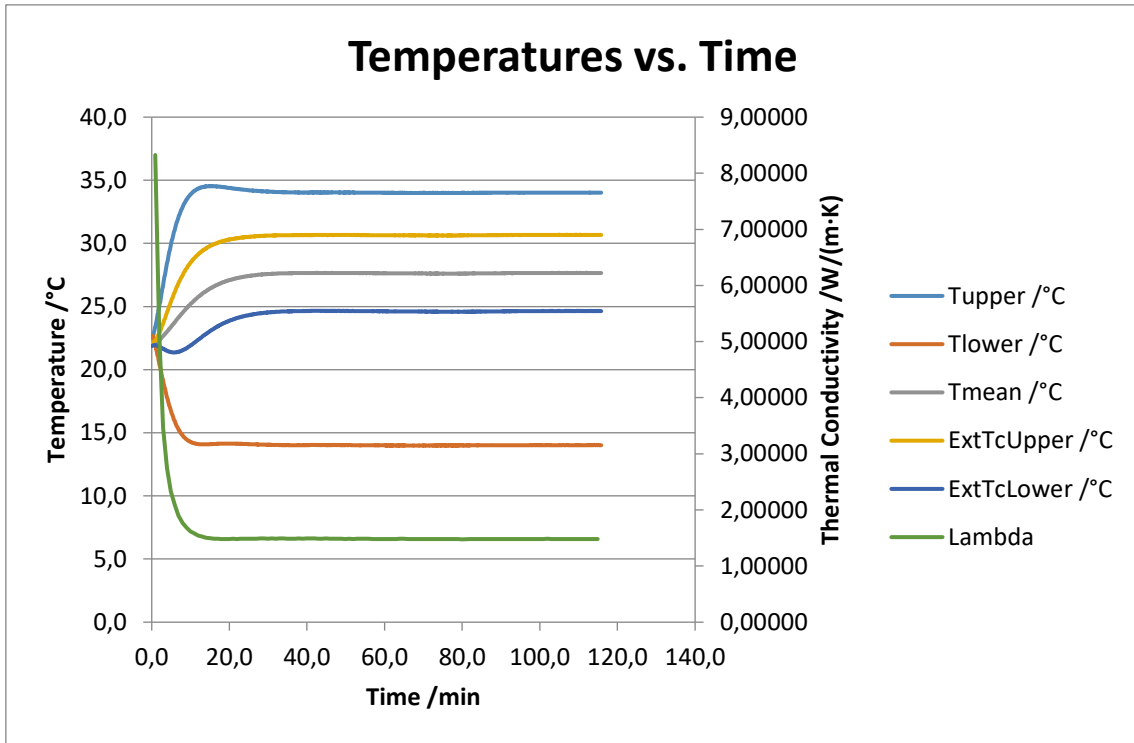


Figura 58 Evolución Temperatura VS Tiempo del Mortero 3.

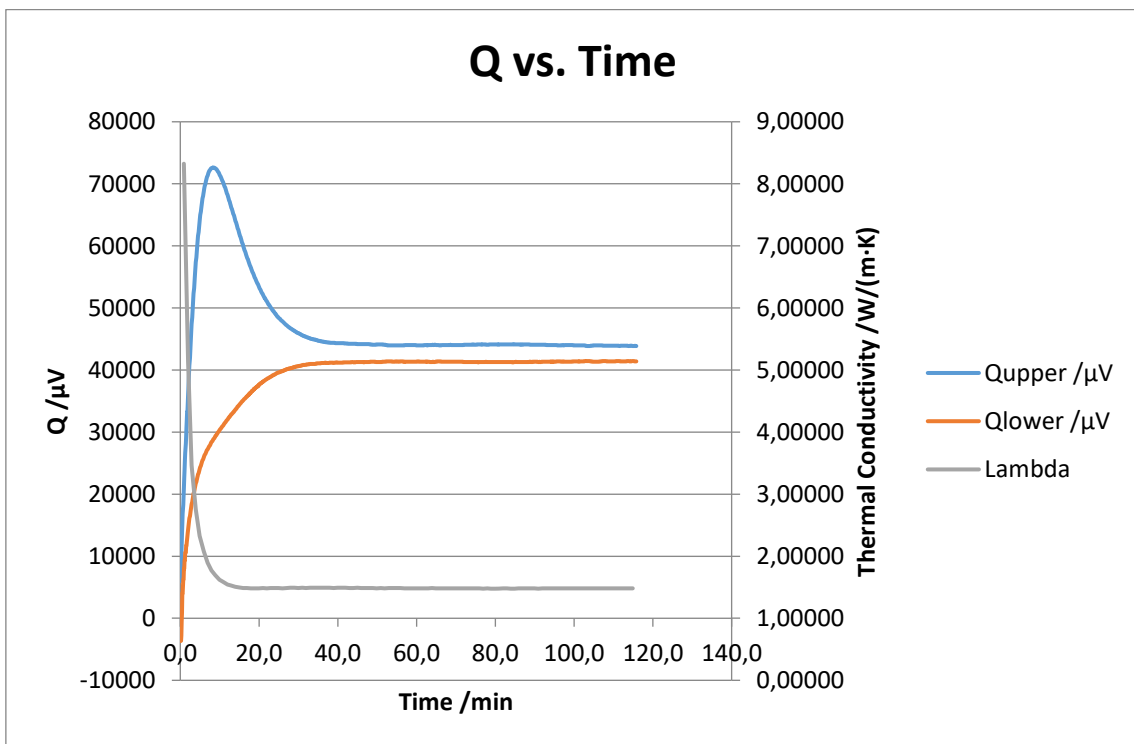


Figura 59 Evolución voltaje, Q, VS Tiempo en Mortero 3.



## V

### 5. Conclusiones y líneas futuras

*En este penúltimo apartado se comentan las conclusiones obtenidas y razonadas de los resultados del apartado anterior así como se establece una posible línea de investigación futura que puede añadir posibilidades extra a la máquina: la medición de conductividad térmica en líquidos.*





## 5.1. Conclusiones

Contar con un aparato de medida de propiedades térmicas como es la HFM 446 Lambda Medium permite obtener valores de la conductividad térmica de los materiales sólidos precisos que de otro modo sería muy complicado conseguir. Es muy importante resaltar la posibilidad única de medir materiales en estado sólido puesto que, en el siguiente apartado, se introducirá una propuesta de investigación que servirá para realizar medidas de conductividad térmica con la máquina HFM 446 Lambda Medium en líquidos.

Hay que tener en cuenta que cualquier perturbación en el ambiente influye sobre las medidas, principalmente en el tiempo de análisis, puesto que una temperatura demasiado baja en el exterior de la sala donde se encuentre instalada puede hacer que la estabilidad en el test se alcance pasadas varias horas de haberlo iniciado. De ahí que se deba acondicionar correctamente la habitación, no necesariamente con gran precisión pero sí en un rango de temperatura en torno a los 20°C que permita alcanzar la estabilidad en torno a los 45 minutos o la hora del inicio.

Por norma general, teniendo en cuenta los análisis llevados a cabo en este estudio, un test medio para tres puntos de medida suele llevar en torno dos horas y media, lo que convierte a este aspecto en la principal desventaja de esta metodología de medida.

De cualquier modo, la HFM 446 Lambda Medium se puede considerar como un instrumento de medición de propiedades térmicas, en concreto de la conductividad térmica, de los materiales sólidos que proporciona resultados con gran exactitud.

Si analizamos de una forma general los resultados obtenidos en los diferentes ensayos mostrados en este estudio, podemos dividir las conclusiones para los dos estudios realizados: asfaltos y morteros.

### 5.1.1. Asfalto negro VS Asfalto blanco

Como se ha comentado anteriormente, la principal novedad del asfalto blanco (nombrado así para facilitar diferenciarlo con el tradicional) es que su composición permite reducir el efecto de isla de calor propio de las zonas urbanizadas. Sus materiales de construcción se desconocen por motivos de confidencialidad de la empresa responsable de su fabricación por lo que no podemos adentrarnos en la discusión de por qué se produce la reducción de este efecto.

Sin embargo, sí que podemos observar como la conductividad térmica en ambos materiales,  $1,47 \frac{W}{m \cdot K}$  para el asfalto negro y  $1,68 \frac{W}{m \cdot K}$  para el asfalto blanco, es muy similar. Esto se debe a que la característica principal del asfalto blanco no recae en la conductividad térmica si no en su emisividad y reflectancia. Para entender esto mejor, es necesario definir que son estas dos propiedades:

- Emisividad (o emitancia): se refiere a la habilidad que tiene la superficie de los materiales de emitir energía radiante.
- Reflectancia (o reflectividad): se refiere a la fracción de energía radiante entrante que se refleja de una superficie.



La reflectividad y la emisividad están relacionadas y una emisividad baja es indicador de que una superficie es altamente reflectante. Esto nos lleva a concluir que el asfalto blanco tiene una emisividad inferior al asfalto negro (betún asfáltico tradicional) y, por consiguiente, es más reflectante lo que le permite reducir el efecto de isla de calor.

### 5.1.2. Morteros

Aunque estos morteros no eran el objeto principal del presente documento sí que es significativo su análisis. Una de las líneas de investigación dentro de la construcción es la de variar la composición de los materiales tradicionales, en este caso mortero, para poder conseguir que su conductividad térmica se disminuya y así reducir la transferencia de calor entre exterior e interior de construcciones.

En nuestro caso, hemos obtenido conductividades térmicas para el mortero tradicional de  $1,72 \frac{W}{m \cdot K}$ , para el mortero con vidrio de  $1,50 \frac{W}{m \cdot K}$  y para el mortero con cerámica de  $1,48 \frac{W}{m \cdot K}$ . Como se puede observar, la adición de nuevos materiales al mortero tradicional implica una reducción de la conductividad térmica de en torno a un 15%. La significancia de esta reducción habría que analizarla en base al criterio económico puesto que el precio de las nuevas composiciones del mortero nos diría si la introducción de estos materiales en construcción implicaría un gasto asumible o, por el contrario, si esa reducción de la conductividad térmica y el coste de implantarlos no resulta rentable.

## 5.2. Análisis sobre muestras líquidas

La máquina HFM 446 Lambda Medium está destinada, como se ha podido observar a lo largo de este estudio, para medir única y exclusivamente conductividades térmicas en materiales sólidos. Sin embargo, a continuación se va a proponer un método para poder realizar el estudio para muestras líquidas intentando reducir el error al máximo posible.

### 5.2.1. Problemática

El primer inconveniente de medir líquidos dentro de la máquina es obvio ya que no es más que la necesidad de delimitar el espacio ocupado por el mismo para poder realizar la medida. Ahora bien, el recipiente que se utilice para almacenar el líquido tiene que estar construido con materiales que permitan un análisis lo más cercano a la realidad posible. Esto se comentará más adelante.

Otra de los problemas que podría llegar a afectar está relacionado con el efecto de la temperatura en los líquidos y el diseño del recipiente donde iría introducido.

Aunque la temperatura afecta a diversas propiedades de los líquidos, la viscosidad entre ellas, la que nos interesa en especial es la expansión o dilatación térmica que no es más que la propiedad de los líquidos que hace incrementar su volumen a medida que aumenta la temperatura. Cuando la temperatura aumenta, el volumen aumenta y cuando disminuye el volumen también disminuye.

Además, esta está relacionada con la variación en la densidad del líquido. Con el calor, la distancia entre las moléculas se incrementa, por lo tanto el número de estas por unidad de volumen (densidad del líquido) disminuye. Al contrario ocurre cuando la temperatura disminuye.

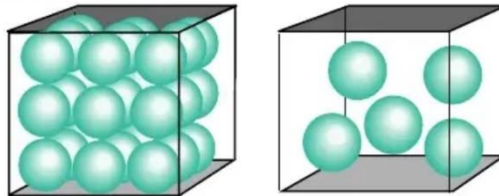


Figura 60 Variación de densidad con la temperatura en líquidos.

El coeficiente de dilatación volumétrico,  $\alpha_V$ , es un parámetro que sirve para hacernos una idea del cambio de volumen que se produce. No es más que el cociente que mide el cambio relativo de volumen que se produce cuando un fluido dentro de un recipiente cambia de temperatura provocando una dilatación térmica.

$$\alpha_V \approx \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (10)$$

Donde:

- $\Delta V$  es la diferencia de volumen con el cambio de temperatura.
- $\Delta T$  es el incremento de temperatura.

Sin embargo, para que el líquido que pretendamos medir experimente grandes variaciones de volumen necesitaríamos un incremento de temperatura lo suficientemente significativo. Esto es bastante, por no decir imposible, poco probable que ocurra en nuestra máquina puesto que, como se ha visto en los estudios mostrados, la temperatura máxima que alcanzan los platos es en torno a 35 °C y el líquido debería introducirse a la temperatura ambiente, que suele situarse 10 - 15 °C por debajo.

Aparte de los problemas o posibles desventajas propias de los líquidos también hay que tener en cuenta las características de la máquina. Como hemos visto en los diferentes ensayos y explicaciones anteriores, existe un voltaje entre los platos superior e inferior de la HFM 446 Lambda Medium y, dependiendo del material de construcción del recipiente, esto podría dar lugar a un contacto indirecto entre los platos y producir una conexión eléctrica entre ambos que provoque medidas erróneas (sin tener en cuenta que podría llegar a dañar la máquina). Este contacto indirecto se debería al fallo de aislamiento entre platos que permitiría el paso de toda la corriente a través del material situado entre ambos platos.

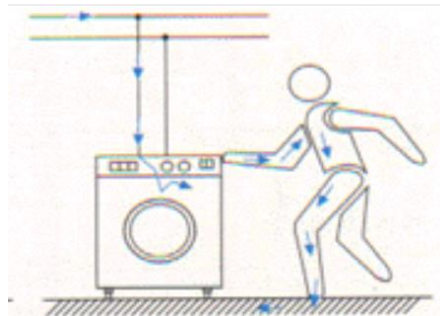


Figura 61 Ejemplo de contacto indirecto.

En la figura anterior se ve un ejemplo de lo que sería el contacto indirecto eléctrico. Para nuestro caso, el material del envase sería la lavadora, la línea eléctrica el plato superior y la persona el plato inferior.

Por consiguiente, la propuesta para poder medir la conductividad térmica en líquidos se va a detallar a continuación.

## 5.2.2. Propuesta de solución

### 5.2.2.1. Geometría

Para simplificar la geometría del recipiente y facilitar su construcción se seleccionará forma de paralelepípedo tal y como se muestra en el siguiente boceto:

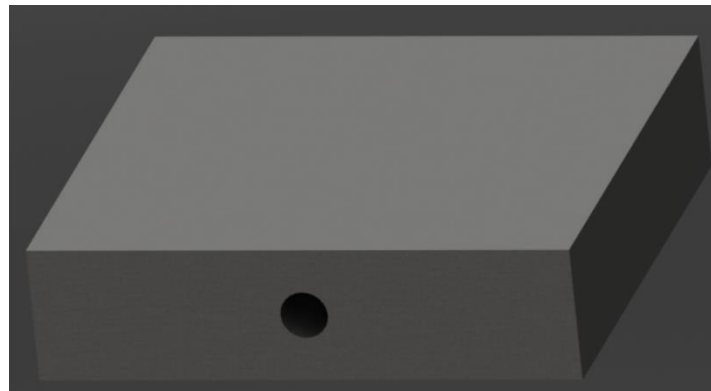


Figura 62 Geometría del recipiente.

Debido a las dimensiones del interior de la máquina, el recipiente debe estar acotado. Tal y como se comentó en el apartado correspondiente a la descripción del funcionamiento, la zona de medida principal de los platos es el área central de la muestra a analizar. Por ello, las dimensiones del recipiente serán de 200x200x50 mm para asegurar contacto suficiente en esta zona central y ahorrar costes de fabricación por construirlo con dimensiones superiores a las necesarias.

Además, el espesor de cada cara deberá ser de varios centímetros.



### 5.2.2.2. Materiales de construcción

La geometría es un paso poco significativo en relación a los materiales elegidos. Este punto es el más importante puesto que el líquido objeto de estudio no va a estar en contacto directo con los platos calentadores de la máquina si no que estará separado por una capa del material del envase. Además, también hay que tener en cuenta lo último comentado en el apartado 8.1. respecto a la posible existencia de contacto indirecto entre los platos.

Ya que la geometría del recipiente va a ser de paralelepípedo, tendremos dos caras horizontales (las que estarán en contacto con los platos) y cuatro verticales. Comentamos ahora las características principales que deben cumplir ambos tipos de caras y el material escogido.

#### 5.2.2.2.1. Caras horizontales (en contacto con los platos)

Como es lógico, se necesita que las caras en contacto con los platos, y que serán la principal barrera de separación entre el líquido a analizar y la máquina, tenga una alta conductividad térmica para que su influencia en el ensayo sea la mínima posible.

En consecuencia, habrá dos criterios principales que se seguirán para elegir el material: su conductividad térmica y durabilidad en el tiempo. Este último es importante puesto que fabricar piezas a medida no es sencillo y elegir el material adecuado para evitar posibles defectos en el recipiente con el paso del tiempo es fundamental.

El material de estas caras deberá ser metálico ya que poseen buena conductividad térmica. Debido a que el recipiente será usado a lo largo del tiempo y por ser usado comúnmente como material de fabricación, el acero inoxidable parece buena opción para estas caras por poseer una buena conductividad térmica y por reducir la posibilidad de aparición de óxidos en las caras internas del recipiente que puedan contaminar los líquidos a analizar.

Material	$\lambda$ W/(m·K)	Material	$\lambda$ W/(m·K)
Acero	47 - 58	Hielo	2
Acero inoxidable	12 - 45	Hierro	80,2
Agua	0,58	Hormigón	1,7
Aire	0,025	Ladrillo	0,80
Alcohol	0,16	Ladrillo refractario	0,47 - 1,05
Alpaca	29,1	Latón	81 - 116
Aluminio puro	237	Litio	301,2
Amianto	0,04	Madera	0,04 - 0,4
Bronce	116 - 186	Mercurio	83,7
Caucho	0,16	Mica	0,35
Cemento Portland	0,29	Níquel	52,3
Cinc	106 - 140	Oro	318
Cobre	401	Parafina	0,21
Corcho	0,03 - 0,04	Piedra arenisca	2,4
Diamante	900 - 2300	Plata	429
Estaño	64,0	Plomo	35,0
Fibra de vidrio	0,03 - 0,07	Polipropileno	0,12
Glicerina	0,29	Tierra húmeda	0,8
Helio (superfluidez)	infinito	Vidrio	0,6 - 1,1

Figura 63 Conductividad térmica de algunos materiales.

#### 5.2.2.2.2. Caras verticales

Como se ha comentado anteriormente, estas caras son también de vital importancia para evitar que los platos superior e inferior de la máquina puedan a llegar a conectarse eléctricamente.

Al contrario que con las caras horizontales, la conductividad térmica del materiales elegido aquí debe ser baja para asegurar un buen aislamiento entre ambos platos. Por ello y por facilidad para ser moldeados y su bajo precio, lo más lógico de emplear es plástico (polímeros orgánicos de alto peso molecular).

Material	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Cond. Term. (W/mK)	Cond. Elec. (S)
Plásticos	0.9-2.3	0.15-0.5	---
PE	0.9-1.0	0.32-0.4	---
PC	1.0-1.2	---	---
PVC	1.2-1.4	---	10 <sup>-15</sup>

Figura 64 Conductividad térmica típica de los plásticos.

Se daría por concluida la elección de los materiales de construcción que aseguren una buena conductividad térmica para no interferir en el estudio, que eviten defectos a lo largo del tiempo y que aseguren un buen aislamiento entre los platos superior e inferior.

#### 5.2.3. Forma de introducir el líquido

Una vez que se ha seleccionado la geometría y los materiales de construcción es necesario plantearse otros detalles tales como el procedimiento a seguir para introducir el líquido dentro del recipiente.

Tal y como se puede observar en el boceto del recipiente de la figura 62, en una de las caras se realizará un orificio roscado para introducir el líquido. Uno de los problemas que puede surgir aquí es la dificultad a la hora de realizar la limpieza del interior del recipiente para cambiar de líquido para el análisis. Este paso es muy importante para evitar la contaminación por muestras antiguas de las nuevas a las que se le quiera realizar el estudio. Para solucionarlo, una posible configuración del recipiente es que esté dividido en dos partes (separadas a través de la línea media del plano horizontal) y unidas por algún tipo de bisagra en una de las caras verticales para poder asegurar un buen contacto y sellado en todas las uniones una vez que se cierre de nuevo tras el proceso de limpieza.

Este mecanismo necesitaría ser ensayado para comprobar que asegura que no se filtre líquido del interior del recipiente al exterior y que el sellado es el adecuado por eso se trata únicamente de una proposición de investigación.



Al orificio roscado se le introduciría un tapón roscado o un tornillo con la métrica adecuada para impedir la salida de líquido desde el interior del recipiente.

La tarea de limpieza debería llevarse a cabo tras cada estudio realizado para evitar lo ya mencionado anteriormente de posibles modificaciones en la composición del líquido a estudiar y, por consiguiente, errores en las medidas.

#### *5.2.4. Conclusiones de la propuesta*

La solución propuesta en el presente trabajo para poder realizar la medida sobre líquidos con la máquina HFM 446 Lambda Medium es simplemente una idea sobre el papel. Para poder comprobar su validez debería de procederse a la fabricación del recipiente con las especificaciones adecuadas y a realizar estudios para diferentes líquidos con conductividades térmicas conocidas (al menos el rango de valores óptimos) para poder asegurar su acierto en un alto porcentaje de ocasiones.

En resumidas cuentas, la propuesta llevada a cabo cumple con varios requisitos clave:

- Material en contacto con los platos de la máquina con una alta conductividad térmica para no interferir en el objeto de estudio, el líquido.
- Material de las caras laterales con baja conductividad térmica para asegurar el aislamiento entre los platos y evitar su conexión eléctrica.
- Orificio para introducir el líquido.
- Recipiente dividido en dos partes para facilitar tareas de limpieza.

Estos requisitos no son únicamente aplicables para los materiales y soluciones elegidas en este documento si no que son aplicables a cualquier alternativa que se plantee y que, por consiguiente, deben cumplirse para asegurar una buena construcción y funcionalidad el recipiente.



## VI

### 6. Bibliografía

*En este último apartado se expone la bibliografía utilizada en el presente documento.*





[1] NIETZSCH. Manual de usuario y de software para HFM 446 Lambda.

[2] UNE EN 12667: 2002. Materiales de construcción: determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del mediador de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica.

[3] UNE EN 12664: 2002. Materiales de construcción: determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos secos y húmedos de baja y media resistencia.

[4] *Conductividad térmica* [en línea] [consulta: 14 febrero 2020]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Conductividad\\_t%C3%A9rmica](https://es.wikipedia.org/wiki/Conductividad_t%C3%A9rmica)

[5] *Equilibrio térmico* [en línea] [consulta: 16 febrero 2020]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Equilibrio\\_t%C3%A9rmico](https://es.wikipedia.org/wiki/Equilibrio_t%C3%A9rmico)

[6] CORTÉS BUSTOS, C.; ROMERO SANDOVAL, L. *Conductividad térmica*. Universidad nacional de Colombia.