



**Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.**  
**Posgrado en Materiales Poliméricos**

**PROPIEDADES MECÁNICAS, TÉRMICAS Y  
ACÚSTICAS DE UN MORTERO ALIGERADO CON  
PARTÍCULAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO  
(EPS) DE RECICLAJE PARA RECUBRIMIENTOS EN  
MUROS Y TECHOS**

**Tesis que presenta**  
**MARCO ANTONIO HERRERA GÓNGORA**

**En opción al título de**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS**  
**MATERIALES POLIMÉRICOS**

**Mérida, Yucatán, México**

**Noviembre, 2015**



## **DECLARACION DE PROPIEDAD**

Declaro que la información contenida en la sección de materiales y métodos experimentales, los resultados y discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el periodo que se me asigno para desarrollar mi trabajo de tesis, en las unidades y laboratorios del centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la ley federal del derecho de autor y la ley de la propiedad industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho centro de investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de los correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al centro de Investigación Científica, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Mérida Yucatán, México; a 6 de Noviembre de 2015



---

Ing. Marco Antonio Herrera Góngora





*CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA DE YUCATAN A.C.  
POSGRADO EN CIENCIAS EN MATERIALES POLIMÉRICOS*

## **RECONOCIMIENTO**

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis titulado

**PROPIEDADES MECÁNICAS, TÉRMICAS Y ACÚSTICAS DE UN  
MORTERO ALIGERADO CON PARTÍCULAS DE POLIESTIRENO  
EXPANDIDO (EPS) DE RECICLAJE PARA RECUBRIMIENTOS EN  
MUROS Y TECHOS**

Perteneciente al Programa de Maestría en Ciencias (Materiales Poliméricos) del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. fue realizado en los laboratorios de la Unidad de Materiales bajo la dirección del Dr. José Gonzalo Carrillo Baeza.

Atentamente,

**Dr. Manuel Martínez Estévez**

**Director de Docencia**

**Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.**



## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradezco a DIOS porque gracias a la fe en El, he podido mantener mi espíritu de superación para alcanzar esta meta.

A toda mi familia y en especial a mis padres por el apoyo incondicional que siempre me brindan, y por enseñarme a lograr las cosas con honestidad y esfuerzo.

A mis directores de Tesis, el Dr. José Gonzalo Carrillo Baeza y Dr. Carlos Vinajera Reyna, agradezco su conocimiento, su paciencia, sus consejos y sobre todo por la disponibilidad de apoyarme con mis dudas.

A los miembros de mi comité tutorial y revisores, Dr. Rolando Ríos Soberanis, Dr. Mario Pérez Cortes, Dr. Emilio Pérez Pacheco y Dr. Ricardo Herbé Cruz Estrada, por sus valiosas contribuciones en esta Tesis.

Al MC Ricardo Gamboa Castellanos por su gran apoyo en el trabajo experimental.

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) y a la Facultad de Ingeniería de la UADY por el uso de su infraestructura y sus equipos para la realización de mi trabajo de investigación.

Mi agradecimiento al CONACYT por la beca concedida durante la realización de esta tesis que corresponde al proyecto DESARROLLO DE UN MORTERO ALIGERADO CON CARACTERÍSTICAS DE AISLAMIENTO TERMO-ACÚSTICO, CONAVI-CONACYT 2015.

Agradezco a mis amigos de la maestría su confianza, su apoyo incondicional y sobre todo por los buenos momentos que se vivieron durante los estudios.

A mi novia Gelmy por su cariño y comprensión que siempre me brindó durante mis estudios.





# CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>10</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>HIPÓTESIS .....</b>	<b>13</b>
<b>OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>13</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>13</b>
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
1.1 Polímeros de Estireno.....	14
1.1.1 Poliestireno Cristal (PSC) o poliestireno de uso general.....	16
1.1.2 Propiedades del poliestireno Cristal (PSC) o de uso general.....	17
1.1.3 Poliestireno Expandido (EPS).....	18
1.1.4 Propiedades generales del poliestireno Expandido (EPS).....	19
1.1.5 Resistencia mecánica del EPS.....	20
1.1.6 Propiedades de aislamiento térmico del EPS.....	20
1.1.7 Propiedades acústicas del EPS.....	22
1.1.8 Comportamiento del EPS ante el agua.....	24
1.1.9 Uso del EPS como aislante térmico en la construcción.....	25
1.1.10 Aislamiento térmico con planchas de EPS en muros.....	27
1.1.11 Aislamiento térmico con EPS en techos.....	27
1.2 Aislamiento acústico en la construcción.....	27

1.2.1 Obtención de aislamiento acústico en una construcción.....	29
1.3 Morteros.....	29
1.3.1 Tipos y usos de los morteros. ....	29
1.3.2 Usos del mortero.....	30
1.3.3 Resistencia a compresión de los morteros.....	32
1.4 Determinación del coeficiente de conductividad térmica de materiales aislantes.....	34
1.5. Ley de enfriamiento de Newton. ....	36
1.6 Determinación del coeficiente de absorción acústica ( $\alpha$ ) de materiales. ....	37
1.7 Diseño factorial de experimentos.....	40
1.8 Trabajos de interés realizados por otros investigadores.....	42
<b>CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>45</b>
2.1 MATERIALES.....	45
2.1.1 Molido y tamizado del poliestireno expandido de desecho. ....	45
2.1.2 Dosificación del mortero aligerado con EPS reciclado.....	48
2.2 PRUEBAS MECÁNICAS. ....	49
2.2.1 Prueba de fluidez de las formulaciones establecidas.....	49
2.2.2 Preparación de los especímenes para pruebas de compresión.....	52
2.2.3 Pruebas de compresión de los morteros aligerados. ....	53
2.2.3 Fracción volumétrica de EPS en las mezclas cúbicas. ....	54
2.3 PRUEBAS TÉRMICAS. ....	54
2.3.1 Fabricación de las placas.....	54
2.3.2 Características del prototipo de la cámara térmica aislada.....	55

2.3.3	Análisis térmico usando la cámara térmica aislada.....	58
2.3.4.	Coeficiente de conductividad térmica de las formulaciones. ....	59
2.4	PRUEBAS ACÚSTICAS .....	61
2.4.1	Tubo de ondas estacionarias. ....	61
2.4.2.	Componentes para el armado del sistema del tubo de ondas estacionarias. ....	62
2.4.3.	Elaboración de los especímenes para las pruebas acústicas. ....	63
2.4.4.	Procedimiento para calcular el coeficiente de absorción acústica de las formulaciones.....	64
<b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>		<b>68</b>
3.1	Molido y tamizado del poliestireno expandido de desecho.....	68
3.2	Prueba de fluidez de las mezclas formuladas.....	69
3.4	Pruebas de compresión.....	73
3.4.1.	Pruebas de compresión de cada formulación después de 14 días de curado en la tina de cal. ....	73
3.4.2.	Pruebas mecánicas a compresión de cada formulación a los 28 días de curado. ....	76
3.4.3.	Modos de falla de las muestras cúbicas después de los ensayos a compresión.....	79
3.4.4.	Distribución del EPS en la matriz cementicia. ....	81
3.5.	Pruebas térmicas.....	83
3.5.1.	Análisis térmicos y sus mecanismos de transferencia de calor.....	83
3.5.2.	Efecto de la transferencia de calor por radiación en los materiales de estudio.....	87

3.5.3. Efecto de la transferencia de calor por conducción en los materiales de estudio.....	88
3.5.4. Efecto de la transferencia de calor por convección en los materiales de estudio.....	89
3.5.5. Determinación del coeficiente de conductividad térmica.....	90
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>107</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>115</b>
A.1 Reporte de confiabilidad de los termopares del data logger.....	115
<b>ANEXO B.....</b>	<b>119</b>
B1. Determinación del coeficiente de conductividad térmica de materiales conocidos para evaluar la confiabilidad del prototipo de cámara térmica aislada. .....	119
<b>ANEXO C.....</b>	<b>124</b>
C1. Uso del tubo de ondas estacionarias para medir el coeficiente de absorción acústica de materiales conocidos. ....	124

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Proceso de obtención de estireno.....	14
Figura 1.2. Estructura del poliestireno Cristal.....	16
Figura 1.3. Coeficiente de conductividad térmica del EPS en función de la densidad aparente.....	21
Figura 1.4. (a) Muestra de Material absorbente con terminación superficial en cuñas anecoicas. (b) Mecanismo por el cual las cuñas anecoicas logran gran absorción sonora.....	22
Figura 1.5. Efecto aislante y absorbente de algunos materiales. ....	24
Figura 1.6. Aplicaciones del EPS en la construcción. ....	25
Figura 1.7. Efectos del sonido cuando interactúa en un muro divisorio. ....	28
Figura 1.8 Orden de apisonado en el moldeo de los especímenes cúbicos. ....	33
Figura 1.9. Equipo primario para medir la conductividad térmica de materiales sólidos aislantes.....	35
Figura 1.10. Método secundario para medición de la conductividad térmica de materiales aislantes.....	36
Figura 1.11 Componentes del método del tubo de impedancia. ....	37
Figura 1.12. Representación de la máxima y mínima presión en un tubo de impedancia para ondas estacionarias.....	39
Figura 1.13. Combinaciones posibles para A y B.....	40
Figura 1.14. a) Gráfica cuando no existe interacción entre los factores, b) Gráfica cuando existe interacción entre los factores.....	41
Figura 2.1. Características del molino utilizado para la molienda del EPS recolectado.....	46

Figura 2.2. Mallas utilizadas en el proceso de tamizado del EPS triturado y equipo ROTAP perteneciente al CICY. ....	47
Figura 2.3. Mezcladora HOBART de 3 velocidades. ....	50
Figura 2.4. Mesa de fluidez. ....	51
Figura 2.10. Sistema armado de la cámara térmica aislada. ....	58
Figura 2.11. Tubo de impedancia acústica. ....	61
Figura 2.12. Componentes utilizados en el armado del sistema de impedancia acústica. ....	62
Figura 2.13. Moldes circulares para las pruebas acústicas. ....	63
Figura 3.1. Representación de tamaños de partícula obtenidos en el proceso de tamizado. ....	68
Figura 3. 2. Porcentaje de retención de EPS en las mallas utilizadas. ....	69
Figura 3. 3. Especímenes cúbicos de cada formulación, donde a) Mezcla con 0.8 % de EPS grueso, b) Mezcla con 0.8 % de EPS fino, c) Mezcla con 1.6 % de EPS grueso y d) Mezcla con 1.6 % de EPS fino. ....	72
Figura 3. 4. Densidad aparente de las muestras. ....	73
Figura 3. 10. Tipo de fractura extensional causado por las partículas de EPS. ....	80
Figura 3. 11. Cortes transversales de las muestras ensayadas a compresión. ....	82
Figura 3. 12. Placas para pruebas térmicas. ....	83
Figura 3. 13. Placa de Referencia (cemento – polvo fino de piedra caliza). ....	85
Figura 3. 14. Placa 0.8 % EPS-G. ....	85
Figura 3. 15. Placa 0.8 % EPS-F. ....	86
Figura 3. 16. Placa 1.6 % EPS-G. ....	86
Figura 3. 17. Placa 1.6 % EPS-F. ....	87

Figura 3. 18. Diferencia de temperaturas vs tiempo del T1 y T2 de las placas. ....	88
Figura 3. 19. Diferencia de temperatura vs tiempo del T2 y T3 de las placas. ....	89
Figura 3. 20. Diferencia de temperatura vs tiempo del T3 y T4 de las placas. ....	90
Figura 3. 21. Valores del coeficiente de conductividad térmica ( $k$ ) de la muestra de referencia. ....	91
Figura 3. 22. Coeficiente de conductividad térmica de las formulaciones. ....	92
Figura 3. 23. Gráfica de interacciones para valores de $k$ con respecto al porcentaje y granulometría de EPS. ....	93
Figura 3. 24. Gráfica de superficie de respuesta para valores de $k$ con respecto al porcentaje y granulometría de EPS. ....	93
Figura 3. 25. Muestras circulares de cada formulación. ....	94
Figura 3. 26. Patrón de ondas estacionaras del mortero sin EPS. ....	95
Figura 3. 27. Curvas de absorción acústica de las muestras que no tienen expuesto el contenido de EPS. ....	102
Figura 3.28. Curvas de absorción acústica de las muestras que tienen expuesto el contenido de EPS. ....	103
Figura 3. 29. Gráfica de interacciones de las muestras con EPS de acabado superficial cementicio. ....	104
Figura 3. 30. Gráfica de interacciones de las muestras con acabado de partículas de EPS expuestas en una de sus caras. ....	105
Figura 3. 31. Gráfica de superficie de respuesta de las muestras con EPS con acabado superficial cementicio. ....	106
Figura 3. 32. Gráfica de superficie de respuesta de las muestras con acabado de partículas de EPS expuestas en una de sus caras. ....	106

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Tamaño de las perlas de EPS típicas y sus aplicaciones.....	19
Tabla 1.3. Coeficientes de absorción ( $\alpha$ ) acústica de diversos materiales en función de la frecuencia. ....	23
Tabla 1.4. Conductividades térmicas de algunos materiales aislantes y materiales que se usan en la construcción.....	26
Tabla 1.5. Resistencia a la compresión de 5 tipos de morteros aceptados por la norma ASTM-270.....	31
Tabla 1.6. Aplicaciones de los morteros con diferentes proporciones <sup>[41]</sup> .....	32
Tabla 2. 1. Formulaciones del mortero aligerado con partículas de EPS reciclado dado en partes volumétricas .....	48
Tabla 2.2. Porcentaje de EPS en base a la masa total del cemento.....	49
Tabla 3.1. Resultados de la prueba de fluidez de cada formulación. ....	70



## RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo de investigación es el estudio de las propiedades mecánicas, térmicas y acústicas de un mortero aligerado con partículas de poliestireno expandido (EPS) de desecho, evaluando el efecto de la granulometría y la proporción de EPS en una mezcla típica de mortero, específicamente en aquellos que se emplean como recubrimientos o revoques en muros y techos para convertirse en un material con potencial para su aplicación como aislante termo-acústico. Se elige utilizar EPS reciclado para atacar la problemática medioambiental, donde actualmente este material se desecha indiscriminadamente por no tener un valor comercial de interés para las recicladoras. Para llevar a cabo los estudios térmicos y acústicos, se construyeron equipos capaces de estimar el coeficiente de conductividad térmica y el coeficiente de absorción acústica.

Los valores de resistencia mecánica a compresión obtenidos van desde 5 MPa a 13 MPa, lo cual satisface la resistencia requerida para los morteros de recubrimiento. Los valores de aislamiento térmico mostraron mejoras de hasta un 40 % aproximadamente para las formulaciones con alto contenido de EPS y en cuanto a las pruebas acústicas se obtuvieron valores moderadamente mejorados. Las propiedades mecánicas, térmicas y acústicas, se evaluaron de acuerdo a los criterios que se especifican en normas internacionales correspondientes para cada tipo de ensayo.

Esta es una investigación con alto impacto socioeconómico por el simple hecho de contribuir con el medio ambiente y con potencial de negocio, permitiendo la incorporación de un material altamente desechado y voluminoso como el EPS a un segundo ciclo de vida para sumarse o incluso competir con otras tecnologías de construcción que siempre van a la vanguardia al mejorar la eficiencia energética en las edificaciones, especialmente en zonas cálidas.

## ABSTRACT

The main objective of this research is the study of the mechanical, thermal and acoustic properties of a mortar lightened with particles of recycled waste expanded polystyrene foam (EPS), evaluating the effect of the particle size and proportion of EPS in a typical mortar mix, trying to innovate in the field of construction, specifically in mortars used as coatings or wall and ceiling to become a potential material for application as thermo-acoustic insulation. The recycled EPS is used to attack environmental issues where this material is currently indiscriminately discarded for not having a market value of interest to recyclers. Equipments capable of estimating the coefficient of thermal conductivity and sound absorption coefficient were built.

The compressive strengths showed range from 5 MPa to 13 MPa, which satisfies the strength requirement of coating mortars. Thermal insulation values showed improvements approximately 40 % for formulations with high content of EPS and acoustic testing values showed moderately improved of acoustic absorption. The mechanical, thermal and the acoustic properties were evaluated according to the criteria specified in international standards for each type of test.

This is a research with high socioeconomic impact for the simple fact of contributing to the environment and, allowing the incorporation of a material highly discarded and bulky as the EPS to a second cycle of life to join or even compete with other materials building technologies to improve energy efficiency in buildings, especially in warm areas.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación busca ampliar el conocimiento que relaciona el uso del poliestireno Expandido (EPS) como agregado en materiales de construcción, específicamente en morteros que se emplean como recubrimientos o revoques en muros y techos.

El EPS es un polímero termoplástico muy versátil y duradero de estructura rígida, que puede resistir temperaturas de hasta 88°C; es un material que se utiliza en el campo del envasado, embalado y en una serie de aplicaciones que involucran todos los sectores de la actividad humana. Después de su vida útil, se convierten en desechos sólidos no biodegradables y voluminosos, y ocasiona un impacto ambiental considerable, porque contribuye a que los rellenos sanitarios se saturen en menos tiempo de lo esperado <sup>[1-4]</sup>.

Actualmente, debido a sus propiedades benéficas de aislamiento térmico y acústico, el EPS ya es utilizado en el sector de la construcción y numerosos estudios demuestran que tiene facilidad de mezclado con aglomerantes como el cemento y que además proporciona ligereza gracias a su baja densidad <sup>[5-11]</sup>.

El EPS tiene coeficientes de conductividad térmica de 0.032 a 0.035 W/mK, mientras que los morteros convencionales tienen valores desde 0.42 hasta 1.16 W/mK de acuerdo a su composición, y con respecto a las propiedades de absorción acústica, el EPS reporta valores de 0.2 a 0.25, mientras que los materiales constructivos como el hormigón tienen valores de 0.02 <sup>[2, 7-10, 12-17]</sup>.

Estas diferencias importantes, es la motivación que lleva a plantear como objetivo principal, la determinación de las propiedades mecánicas, térmicas y acústicas de un mortero aligerado con partículas de EPS de desecho en diferentes granulometrías y proporciones, para identificar la mejor relación de propiedades físico-mecánicas.

La norma ASTM C-177 Y C-518, así como diversos estudios para la evaluación de análisis térmicos de materiales aislantes permitieron acoplar un sistema que involucra transferencias de calor por radiación, conducción y convección para estimar el coeficiente de conductividad térmica de cada formulación planteada y utilizarlo como un indicador de comparación entre las formulaciones <sup>[18-22]</sup>.

Para las pruebas acústicas, se utilizó el coeficiente de reducción de ruido (NRC), que concentra la información de la absorción acústica que se mide en diferentes frecuencias, en un solo valor unitario y se calcula como la media de los valores de absorción entre las bandas de octava de 250 Hz a 2000 Hz con redondeo a 0.05 <sup>[23]</sup>.

El diseño factorial de experimentos, es el método que se utiliza para evaluar la interacción y la influencia de los factores de estudio, que en este caso son: la granulometría y proporción de EPS en la mezcla de mortero. Las variables de respuesta son la resistencia mecánica a compresión, el coeficiente de conductividad térmica y el coeficiente de reducción del ruido <sup>[24, 25]</sup>.

En el capítulo 1 se encuentra el Marco teórico referente a los temas que dan fundamento a esta investigación, así como también una recopilación de trabajos realizados por otros investigadores que guardan relación con el tema.

En el capítulo 2 se describe el desarrollo de la Metodología experimental con el fin de llevar a cabo cada uno de los objetivos específicos. La metodología se basa en los criterios y estándares que se especifican en normas internacionales correspondientes para cada tipo de ensayo.

En el capítulo 3 se encuentran los Resultados obtenidos en cada prueba experimental con su respectivo análisis y discusión para determinar el impacto general de la investigación.

## **HIPÓTESIS**

Los desechos de poliestireno Expandido (EPS) en forma de partículas mezcladas con cemento y polvo fino de piedra caliza, conforman un mortero aligerado que favorece el aislamiento térmico y acústico con propiedades mecánicas adecuadas para su aplicación como recubrimiento en muros y techos.

## **OBJETIVO GENERAL**

Determinar las propiedades mecánicas, térmicas y acústicas de un mortero aligerado con partículas de EPS de reciclaje en diferentes granulometrías y proporciones, para identificar la mejor relación de propiedades físico-mecánicas.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

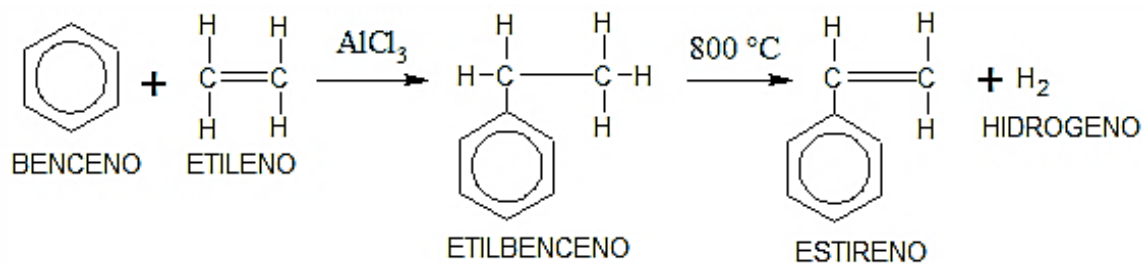
- ❖ Identificar y elaborar formulaciones de morteros con diferentes proporciones y granulometrías de EPS de desecho, adecuadas para el presente estudio.
- ❖ Determinar la resistencia mecánica a compresión de los morteros en cada una de sus formulaciones.
- ❖ Determinar el coeficiente de conductividad térmica de los morteros en cada una de sus formulaciones.
- ❖ Determinar el coeficiente de absorción acústica de los morteros en cada una de sus formulaciones.

# CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 Polímeros de Estireno.

Edgar Simon, farmacéutico Berlínés (1839) llevó a cabo la destilación del storax (líquido derivado de la corteza del árbol "*liquambar orientalis*"), y obtuvo un líquido muy reactivo al que llamó estireno. Más adelante observó la transformación del líquido transparente parecido al agua, en una masa viscosa y traslúcida. Posteriormente en 1845 los químicos J. Blyth y A.W. Hoffman, llevaron al estireno a temperaturas altas y con ello obtuvieron productos sólidos parecidos al vidrio. En 1868 Berthelot descubrió la primera obtención sintética de estireno, a partir de la eliminación de dos hidrógenos de la molécula etilbenceno. Esta ruta es la base de la síntesis de estireno. Para obtener el monómero de estireno, que es la materia prima básica de los polímeros de estireno, se debe partir del benceno y del etileno, que se obtienen de la refinación del petróleo. Al reaccionar el etileno con el benceno, se origina el etilbenceno y por deshidrogenación catalítica se obtiene el estireno. La

Figura 1.1 muestra la reacción química del proceso de obtención de estireno [3].



**Figura 1.1.** Proceso de obtención de estireno.

El desarrollo del poliestireno forma un grupo de plásticos que se denominan la familia de Polímeros de Estireno, en los que se incluyen <sup>[3]</sup>:

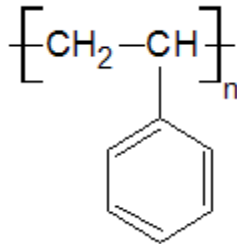
- poliestireno Cristal o de uso general (PSC)
- poliestireno Grado Impacto (PS-I)
- poliestireno Expandido (EPS)
- Estireno/Acrilonitrilo (SAN)
- Copolímero en Bloque de Estireno/Butadieno/Estireno (SBS)
- Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)

Estos polímeros se caracterizan por poseer la estructura del estireno en su composición. Los polímeros de estireno son de gran relevancia en el mercado, ocupan el cuarto lugar de consumo a nivel mundial gracias a sus propiedades y a su facilidad de moldeo. El estireno también se le conoce como vinilbenceno, feniletileno, estírol o estirolo y es un líquido transparente, muy reactivo, de olor dulce y apariencia aceitosa, insoluble en agua y con punto de ebullición de 145°C. Se autopolimeriza en presencia de oxígeno, a la luz o al calentarse, incluso a temperatura ambiente; por tal razón, se almacena con la adición de inhibidores <sup>[3]</sup>.

Esta investigación solamente considera las propiedades y características del poliestireno Cristal (PSC) y del poliestireno Expandido (EPS), que son polímeros termoplásticos amorfos que comparten la misma estructura química, por lo que son excelentes aislantes térmicos y acústicos <sup>[3]</sup>.

### 1.1.1 Poliestireno Cristal (PSC) o poliestireno de uso general.

El poliestireno Cristal tiene la siguiente estructura y la reacción puede ocurrir en dos procesos: la primera es por polimerización en masa y la segunda es por polimerización en suspensión. En ambos procesos, la reacción ocurre en forma desordenada y el radical fenil se distribuye aleatoriamente, de tal manera que se forma un polímero atáctico de naturaleza amorfa y por lo tanto transparente. El primer proceso es el que más se utiliza ya que presenta una aparente simplicidad y proporciona un polímero de alta calidad <sup>[3]</sup>.



**Figura 1.2.** Estructura del poliestireno Cristal.

#### a) Polimerización en masa:

Es un proceso que consiste en eliminar previamente los inhibidores que contiene el monómero de estireno, por medio de un lavado con sosa cáustica. En la primera etapa, se desarrolla la polimerización de estireno por medio de un calentamiento a 80°C con una conversión del 33-35 %. Posteriormente la mezcla polímero-monómero se introduce a una torre que tiene un sistema de enfriamiento para eliminar el calor que se desprende de la reacción de la polimerización; en la entrada de la torre la temperatura es de aproximadamente 100°C y aumenta a 180°C hasta el fondo. El poliestireno sale del reactor a 220°C como una masa viscosa que alcanza una conversión del 98 %. La masa de poliestireno se extruye, se enfría y se forman los pellets <sup>[3, 26]</sup>.



#### b) Polimerización en suspensión:

El monómero de estireno provisto de iniciadores (peróxidos), se dispersa en pequeñas gotas en un fluido que regularmente es agua. La reacción de polimerización comienza con un calentamiento de 70 a 90°C para activar el iniciador y se finaliza a una temperatura de 90 a 120°C y presión de 5 bar. Para eliminar más fácilmente el calor de la exotermia de la reacción, es importante lograr una buena dispersión con agentes como el alcohol polivinílico. El poliestireno que se fabrica por este método tiene forma de esferas pequeñas que se separan del agua por centrifugación o filtrado, después se lavan y secan para formular y pelletizar <sup>[3]</sup>.

#### **1.1.2 Propiedades del poliestireno Cristal (PSC) o de uso general.**

Es un material amorfo de alto peso molecular (200,000 a 300,000 g/mol), de baja densidad (1.05 g/cm<sup>3</sup>), estructura rígida, buenas propiedades ópticas, mínima absorción de agua, buena estabilidad dimensional, fácil procesamiento y aislamiento eléctrico. Resiste a ácidos orgánicos e inorgánicos concentrados y diluidos (excepto los altamente oxidantes), alcoholes, sales y álcalis. Es atacado por ésteres, cetonas, hidrocarburos aromáticos, clorados y aceites etéreos, al igual de ser insoluble en agua. Es sensible a la luz solar, por lo que para retardar su degradación se debe adicionar absorbentes de luz ultravioleta. Presentan baja resistencia al impacto y estabilidad térmica. Su resistencia a la tensión es de 544 kg/cm<sup>2</sup> (53.3 MPa). Su temperatura de reblandecimiento es de 180-200°C. Presentan una temperatura de transición vítrea (Tg) a los 100°C. Se utiliza en la fabricación de envases para productos alimenticios, farmacéuticos y cosméticos como vasos, tapas. En el sector consumo se incluyen estuches y cuerpos para bolígrafos, juguetes, instrumentos de dibujo y artículos para el hogar <sup>[3]</sup>.

### **1.1.3 Poliestireno Expandido (EPS).**

El poliestireno Expandido se presentó el 28 de febrero de 1950 a nombre de la compañía alemana BASF y sus inventores fueron el Dr. Fritz Stastny y Karl Buchholz, investigadores de los laboratorios de la empresa en Ludwigshafen. En años posteriores se desarrollarían diversos métodos para la obtención de perlas y su transformación en productos <sup>[1]</sup>.

El EPS es uno de los termoplásticos más versátiles de estructura rígida, que contiene hasta un 98 % de aire encapsulado que funciona como un excelente aislante térmico y acústico. Tiene la misma estructura química que el poliestireno Cristal, sin embargo contiene una concentración de 3 a 7 % de n-pentano como agente neumatógeno o expansor, lo cual altera sustancialmente su transparencia y su volumen. Para la producción del EPS se utiliza el proceso de polimerización en suspensión, donde el estireno se mezcla con agua y forma pequeñas gotas suspendidas en la fase acuosa. Al avanzar la polimerización se obtienen perlas de poliestireno que son impregnadas por el agente neumatógeno <sup>[3]</sup>.

En el proceso de expansión del EPS, se utiliza el pentano como agente expansor, este agente se dispersa en la matriz de PS y sufre una expansión al cambiar de fase por el aumento de la temperatura. El PS que rodea a cada una de las micelas de pentano no lo deja salir fácilmente y en cambio sufre un aumento de volumen para compensar la presión interna del gas que se forma, lo que conlleva a que se formen las celdas en la matriz del EPS. Este proceso se realiza a una temperatura que permita el proceso de expansión. <sup>[27]</sup>.

Por centrifugado o filtración se separan de la fase acuosa, se secan y a través de cribadoras (tamices), se seleccionan las perlas en diferentes tamaños de acuerdo a su aplicación final para acondicionarlas con lubricantes externos antes de su procesamiento.

El EPS se comercializa en forma de perlas blancas traslúcidas que al aplicar calor provoca que el poliestireno se reblandezca y crezca de tamaño, el grado de expansión se puede controlar para obtener desde dos hasta 60 veces el volumen original de la perla <sup>[3]</sup>.

Se puede clasificar el uso de los tamaños de las perlas para un fin específico, así como lo muestra la Tabla 1.1 <sup>[28]</sup>:

**Tabla 1.1. Tamaño de las perlas de EPS típicas y sus aplicaciones.**

<b>Tamaño de la perla (mm)</b>	<b>Aplicación</b>
0.4 a 0.7	Piezas moldeadas de paredes delgadas.
0.7 a 1	Piezas moldeadas de pared gruesa y placas para aislamiento térmico con densidad alta.
1 a 2	Piezas de aislamiento térmico y para amortización de ruido.
+ de 2	Placas de aislamiento térmico.

Cuando la perla está lista para su moldeo debe recibir un cuidadoso manejo, ya que es muy sensible a la temperatura del lugar donde se almacena y un descuido puede provocar la migración del agente expansor del interior de las esferas hacia la atmósfera.

#### **1.1.4 Propiedades generales del poliestireno Expandido (EPS).**

El EPS es un material relativamente dúctil y resistente a temperaturas bajo cero, pero a temperaturas elevadas, aproximadamente a 88°C empieza a perder sus propiedades debido a la proximidad de su transición vítrea.

El EPS absorbe la energía producida por golpes y vibraciones, flota en el agua y es completamente inerte a los metales, resiste a la mayoría de los ácidos, soluciones alcalinas y salinas sin importar la concentración. También resiste a la intemperie, no se pudre, no enmohece, no se descompone, no es tóxico, sin embargo, al ser expuesto bajo la acción prolongada de la luz UV, la superficie del EPS amarillea y se vuelve frágil, de manera que la lluvia y el viento logran erosionarla. No es resistente a los solventes orgánicos como tampoco a los aceites minerales. Es un material combustible y por tanto no debe ser expuesto a la flama, sin embargo existen grados especiales donde se emplean retardantes a la flama. Es resistente a los microorganismos. Tiene una densidad aparente de entre 10-30 kg/m<sup>3</sup> [2, 3, 29].

#### **1.1.5 Resistencia mecánica del EPS.**

La resistencia a la compresión está directamente relacionada con la densidad del material, la forma de la celdilla, el tiempo de uso y la temperatura. Al aumentar la densidad del material, aumenta el grosor de las paredes de las celdillas dentro de las perlas lo que permite reportar mayor resistencia a la compresión que va desde los 50 kPa para densidades de 10 kg/m<sup>3</sup> y 190 kPa para densidades de 30 kg/m<sup>3</sup> [16]. El Instituto Nacional Sueco de Ensayos e Investigación de Gothenburg, evaluó la fluencia a compresión de bloques de EPS en un periodo de aproximadamente 2 años, y permitió estimar mediante extrapolación valores de deformación por fluencia a compresión del 2 % o menos después de 50 años [30].

#### **1.1.6 Propiedades de aislamiento térmico del EPS.**

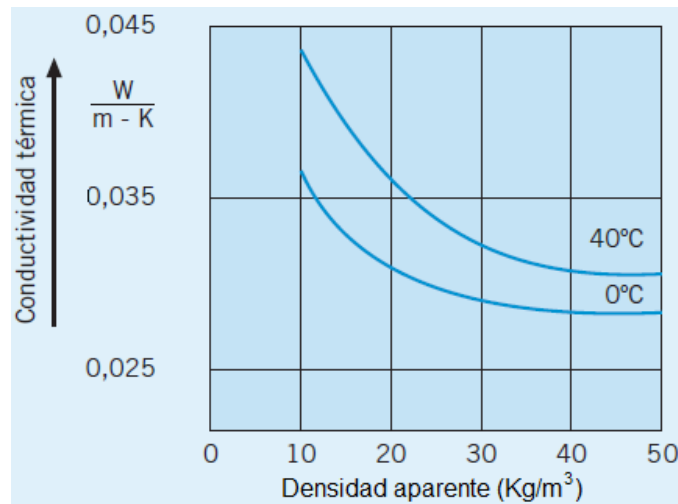
El EPS se construye con una gran cantidad de esferas de poliestireno empaquetadas unas a otras y que forman una estructura de geometría muy variada. Las perlas contienen aire en su interior de tal manera que son huecas en un 97-98 % de su volumen. El aire atrapado dentro de la estructura funciona como un magnífico aislante térmico.

La densidad aparente de una estructura de plástico determina la conductividad térmica del material. La conducción de calor en el EPS se puede dar de las siguientes maneras [7]:

- Conducción entre el aire atrapado del EPS.
- Convección por el movimiento de las moléculas de aire.
- Radiación a través de las paredes de las celdillas.

La densidad aparente del EPS representa un parámetro importante a considerar, ya que a densidades aparentes bajas, el coeficiente de conductividad térmica es relativamente alto debido al aumento que se produce en la transmisión de calor por el efecto de la radiación entre las paredes de las celdillas, sin embargo, este coeficiente de conductividad disminuye conforme aumenta la densidad aparente hasta  $50 \text{ kg/m}^3$  [4, 31].

En la Figura 1.3 se puede observar el efecto de la conductividad térmica con respecto a la densidad aparente [16].



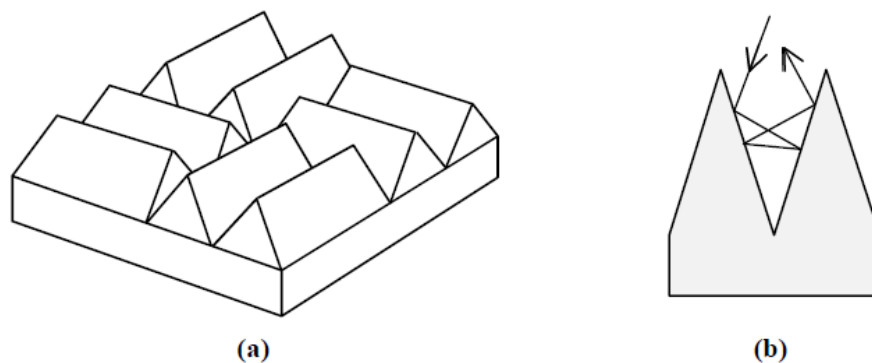
**Figura 1.3.** Coeficiente de conductividad térmica del EPS en función de la densidad aparente.

### 1.1.7 Propiedades acústicas del EPS.

Existe controversia entre el uso del EPS como aislante y como absorbente acústico. En primer lugar, es necesario definir qué es un material aislante y qué es un material absorbente.

Los materiales con aislamiento acústico, son materiales pesados, de gran masa e impermeables, mientras que los materiales absorbentes, son materiales livianos, porosos y permeables.

En los materiales aislantes es muy importante que tengan una terminación superficial lisa e impermeable para impedir el paso de ruidos, mientras que en los absorbentes es más ventajosa la terminación en forma de cuñas anecoicas como lo muestra la Figura 1.4. Esta estructura superficial se comporta como una trampa de sonido, ya que el sonido que incide sobre la superficie de una cuña se refleja varias veces en esa cuña <sup>[12, 32]</sup>.



**Figura 1.4.** (a) Muestra de material absorbente con terminación superficial en cuñas anecoicas. (b) Mecanismo por el cual las cuñas anecoicas logran gran absorción sonora.

Es muy común que se utilice un material absorbente acústico como aislante, sin embargo para aislar hace falta “masa”, ya que mientras más denso sea un material, será más difícil que las ondas sonoras hagan vibrar al material.

En este sentido el EPS no se puede considerar como aislante acústico porque le falta masa, y tampoco puede considerarse como absorbente porque no tiene permeabilidad, sin embargo, existen estudios donde el EPS obtuvo un coeficiente de absorción acústica de 0.88 para la frecuencia que mejor escucha el oído humano que es de 1,000 Hz <sup>[12, 17]</sup>.

Se dice que la capacidad de absorción acústica del EPS depende fundamentalmente de su densidad aparente y que también puede absorber sonidos en frecuencias entre 3,500 y 4,500 Hz <sup>[7]</sup>. En la Tabla 1.2 se dan los valores del coeficiente de absorción acústica ( $\alpha$ ) para varios materiales típicos de construcción.

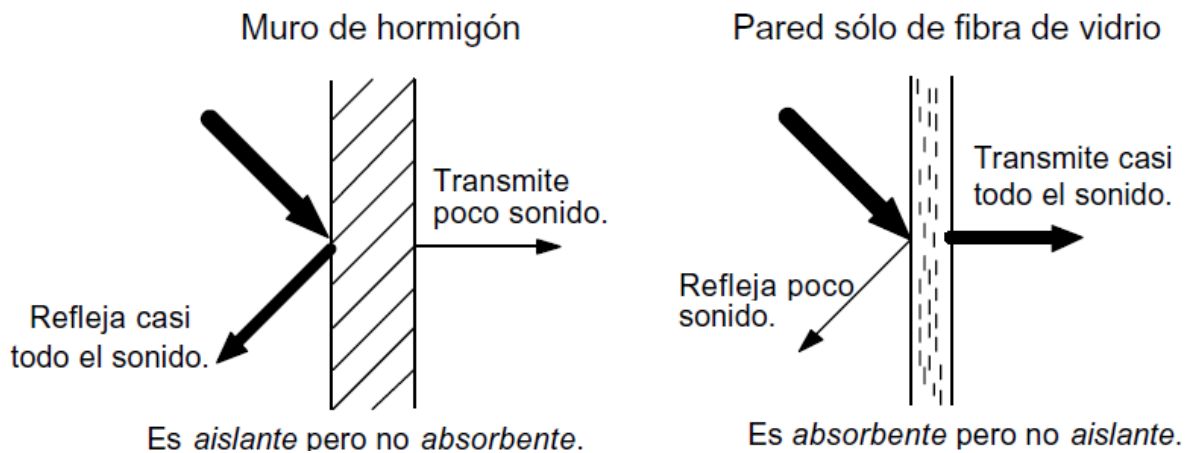
La absorción aumenta con la frecuencia, debido a que para frecuencias altas la longitud de onda es pequeña y entonces las irregularidades de la superficie o el propio espesor del material son más comparables con la longitud de onda <sup>[32]</sup>.

**Tabla 1.2.** Coeficientes de absorción ( $\alpha$ ) acústica de diversos materiales en función de la frecuencia.

Material	Frecuencia, (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Hormigón sin pintar	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04
Revoque de cal y arena	0.04	0.05	0.06	0.08	0.04	0.06
Madera (a 5 cm de la pared)	0.30	0.25	0.50	0.5	0.58	0.63
Lana de vidrio (14 kg/m <sup>3</sup> , 25 mm)	0.15	0.25	0.40	0.50	0.65	0.70
Lana de vidrio (14 kg/m <sup>3</sup> , 50 mm)	0.25	0.45	0.70	0.80	0.85	0.85
Vidrio	0.03	0.02	0.02	0.01	0.07	0.04
Espuma de poliuretano 50 mm	0.07	0.32	0.72	0.88	0.97	1.01

Los materiales duros, como el hormigón o el mármol, son muy reflectores y por lo tanto poco absorbentes del sonido, y en cambio los materiales blandos y porosos, como la lana de vidrio, son poco reflectores y por consiguiente muy absorbentes.

La Figura 1.5 ejemplifica la diferencia entre un material aislante y un material absorbente.



**Figura 1.5.** Efecto aislante y absorbente de algunos materiales.

### 1.1.8 Comportamiento del EPS ante el agua.

El EPS es un material hidrofóbico ya que su fase plástica se compone de átomos de carbono e hidrógeno en ausencia de grupos polares. No tiene capilaridad y aún sumergido en agua sus niveles de absorción son mínimos. Después de 28 días en ensayo, su absorción de agua está entre el 1 y 3 % en volumen<sup>[3]</sup>. Por otro lado, cuando la pieza presenta espacios por empaquetamiento deficiente, el agua podría adentrarse hacia el interior de la estructura <sup>[30]</sup>.

El vapor de agua sí puede llegar a difundirse hacia el interior de la estructura, esto sucede cuando en ambos lados de la pieza existe un gradiente de temperatura, el vapor de agua también tiende a ir de lugares de alta presión hacia otros donde hay menor presión, a este fenómeno, se le denomina “difusión del EPS”, esta difusión se debe a que el EPS es un material que no presenta propiedades de barrera de gases <sup>[33]</sup>.



### 1.1.9 Uso del EPS como aislante térmico en la construcción.

Actualmente, por su economía, ligereza y propiedades térmicas, las espumas rígidas de EPS se usan como material para aislamiento térmico en construcciones ligeras, que se comercializan como planchas y son muy apreciadas por sus características de reacción al fuego, ya que son de difícil inflamabilidad cuando se encuentra protegido por capas de revoque; esto es porque no hay aporte suficiente de oxígeno hacia el EPS. Otras razones son su notable estabilidad dimensional frente a los materiales tradicionales de construcción como el cemento, la cal y el yeso; en este sentido, no es atacada por morteros y hormigones. Su empleo como material aislante en la construcción, permite proponer soluciones viables para casi todas las exigencias de aislamiento térmico dentro de un rango de temperaturas entre  $-150$  y  $90$  °C [7, 34].

La Figura 1.6, muestra la gama de aplicaciones del EPS en la construcción.



**Figura 1.6.** Aplicaciones del EPS en la construcción [35].

Las prestaciones de aislamiento del EPS superan a muchos de los materiales comunes en la construcción.

La Tabla 1.3 muestra las conductividades térmicas de algunos materiales aislantes y materiales que se usan en la construcción [7, 34].

**Tabla 1.3.** Conductividades térmicas de algunos materiales aislantes y materiales que se usan en la construcción.

<b>Materiales</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Coefficiente de conductividad térmica (W/mK)</b>
<b>Materiales aislantes.</b>		
Asbesto pulverizado	130	0.046
Corcho, placas	145	0.042
Fibra de vidrio	80	0.0355
Fibra de madera	600	0.11
Hule espuma	20	0.036
Lana mineral, placa rígida	180	0.042
Poliuretano, espuma	30	0.026
Vermiculita	100	0.065
<b>Materiales para construcción.</b>		
Asbesto- cemento, placa	1,360	0.25
Asfalto	1,600	0.43
Cartón asfáltico	1,100	0.14
Cloruro de polivinilo expandido	25	0.04
Concreto	2,300	1.8
Mortero cemento-arena	2,000	0.63
Mortero con vermiculita	500	0.18
Mortero con arcilla exp	750	0.25
Tabique	2,200	1.3
Tablarroca	950	0.16
Yeso, aplanado	1,280	0.46

### **1.1.10 Aislamiento térmico con planchas de EPS en muros.**

Aislamiento exterior e interior: El aislamiento de fachadas es primordial en el ámbito de la construcción, ya que ahí se puede llegar a perder más del 20 % de la energía que se demanda para calentar o enfriar un edificio. Tanto en el aislamiento exterior como en el interior. Es común que la superficie de edificios se recubra con planchas de EPS adheridas a las paredes mediante masas adhesivas como el betún caliente. Una vez que la espuma se encuentra bien unida a la superficie de la construcción se pueden dar cualquier revoque, enlucido o acabado convencional [7, 36].

Aislamiento intermedio: También se le denomina aislamiento central o aislamiento sándwich, es una solución constructiva adecuada en los casos donde la humedad relativa del local a proteger es moderada. La solución comprende la colocación de un elemento aislante de espuma de EPS entre dos componentes constructivos [7].

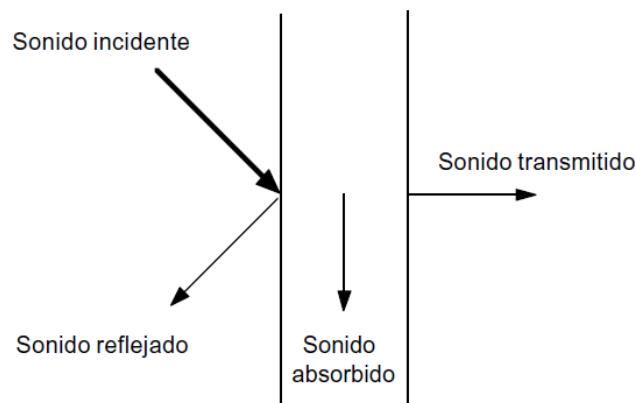
### **1.1.11 Aislamiento térmico con EPS en techos.**

Cuando se utilizan planchas de EPS en techos, se debe considerar la densidad de acuerdo a las cargas a las que estará expuesta el material, en este sentido, si sobre ella hay algún tipo de tránsito, la densidad de la espuma debe estar entre los 20 y los 25 kg/m<sup>3</sup> [7].

## **1.2 Aislamiento acústico en la construcción.**

El sonido se puede estudiar como un fenómeno físico, sin embargo, en esta investigación, nos interesa estudiar el efecto de la Acústica Arquitectónica en la actividad humana. El sonido es una serie de oscilaciones que se generan con la presión del aire, y el ruido es un tipo de sonido que es molesto, indeseado, inoportuno o desagradable [37].

La energía que transportan las ondas sonoras es minúscula, pero nuestros oídos son detectores muy sensibles capaces de reaccionar incluso a movimientos del aire del orden molecular. Para “eliminar” el ruido, tenemos que transformar la energía sonora en otras formas de energía como por ejemplo en calor. Un término importante a definir es la frecuencia de un sonido, esta representa el número de vibraciones de una onda sonora en una unidad de tiempo. Se acepta normalmente que el rango de frecuencias audibles por las personas va de 20 a 20,000 Hz. Las frecuencias bajas son sonidos graves y las frecuencias altas son sonidos agudos. En un muro divisorio, el sonido se puede transmitir, reflejar y devolver a la habitación colindante, o puede absorberse por el propio muro, y desaparecer en forma de calor como lo muestra la Figura 1.7 [38, 39].



**Figura 1.7.** Efectos del sonido cuando interactúa en un muro divisorio.

Se pueden diferenciar dos tipos de ruido según el mecanismo por el que son transmitidos: los ruidos aéreos y los ruidos de impactos. Los ruidos aéreos como las voces, aportan una energía sonora al aire, que puede pasar a los elementos de los que se compone el edificio; y los ruidos de impactos, como las pisadas, aportan la energía directamente a la estructura del edificio [39].

### **1.2.1 Obtención de aislamiento acústico en una construcción.**

Es posible obtener mejor aislamiento acústico por medio de paredes dobles o múltiples. Por ejemplo, si se tiene una pared de 20 cm de espesor de hormigón, se puede obtener mayor aislamiento si se divide en dos paredes de 10 cm y se deja un espacio de aire entre ellas. Si el espacio de aire se rellena con algún material absorbente, el resultado será un aislamiento mucho mejor, por otro lado, si solamente se adhiere un material absorbente a una pared simple no aumentará el aislamiento acústico. En otras palabras el material absorbente influye en el aislamiento final de la estructura si y sólo si se encuentra entre dos elementos que aporten masa a la estructura <sup>[27]</sup>.

### **1.3 Morteros.**

El mortero es una mezcla homogénea de un material cementante (cemento), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y en algunas ocasiones aditivos, prácticamente es hormigón sin el agregado grueso <sup>[6]</sup>.

#### **1.3.1 Tipos y usos de los morteros.**

Se consideran dos tipos de morteros: Los aéreos, que se endurecen al aire cuando pierden agua por secado y fraguan lentamente por un proceso de carbonatación, y los hidráulicos que endurecen con el agua, debido a que su composición desarrolla resistencias iniciales relativamente altas. Los morteros se clasifican de acuerdo a los materiales que lo constituyen, estos pueden ser <sup>[6]</sup>:

**Morteros calcáreos:** Estos utilizan cal aérea o hidráulica como aglomerante. La cal aérea más conocidas son la cal blanca y la cal gris; en los morteros aéreos la arena tiene como objetivo evitar el agrietamiento por las contracciones del mortero cuando pierde el agua. Este mortero es ideal para trabajos de embellecimiento de interiores que requieren esquinas perfectas.

**Morteros de yeso:** Se preparan con yeso hidratado con agua. El contenido de agua es variable según el grado de coacción, calidad y finura de molido de yeso. El mortero se prepara a medida que se necesita, ya que comienza a fraguar a los cinco minutos y termina aproximadamente en 15 minutos.

**Morteros de cal y cemento:** En estos morteros se sustituye parte del cemento por la cal. Tienen buena trabajabilidad, buena retención de agua y alta resistencia.

**Morteros de cemento:** Se componen de arena y cemento Portland. Tiene altas resistencias y sus condiciones de trabajabilidad son variables de acuerdo a la proporción de cemento y arena que se usan. Es hidráulico y debe prepararse con el menor tiempo posible entre el amasado y la colocación; se revuelve primero el cemento y la arena, y después se le adiciona el agua.

Las características de la arena, tales como la granulometría, módulo de finura, forma y textura de las partículas, juegan un papel importante en la calidad del mortero. Si el mortero tiene poco cemento, la mezcla se hace áspera y poco trabajable debido a que las partículas de arena se rozan entre si y no existe suficiente pasta de cemento que actúe como lubricante. Por otro lado, si el mortero es rico en cemento, es muy resistente pero será muy susceptible de agrietarse.

### **1.3.2 Usos del mortero.**

Los morteros que tienen función estructural, generalmente se utilizan en mampostería donde puede ser de pega o de relleno en las celdas de los muros. También existen morteros no estructurales, que se destinan a recubrimientos como pañetes o revoques <sup>[6]</sup>.

**Mortero de pega:** sus cualidades son especiales, ya que están sometidos a las condiciones especiales del sistema constructivo, por lo que necesita una resistencia adecuada para poder absorber esfuerzos de tensión y compresión.

**Morteros de relleno:** Se utilizan para llenar las celdas de los elementos en la mampostería estructural, y al igual que el mortero de pega debe tener una adecuada resistencia.

**Morteros de recubrimiento:** Ya que su función no es estructural sino de embellecimiento, o la de proporcionar una superficie uniforme para aplicar la pintura, no requieren una resistencia determinada.

La norma ASTM-270 acepta 5 tipos de mortero; en orden decreciente de resistencia, la Tabla 1.4 resume la clasificación <sup>[40]</sup>.

**Tabla 1.4.** Resistencia a la compresión de 5 tipos de morteros aceptados por la norma ASTM-270.

Tipo de mortero	Resistencia a la compresión	
	MPa	kg/cm <sup>2</sup>
M	17.2	175
S	12.4	126
N	5.2	53
O	2.4	25
K	0.5	5

La Tabla 1.6 menciona algunas proporciones de morteros para determinadas aplicaciones.

**Tabla 1.5.** Aplicaciones de los morteros con diferentes proporciones <sup>[41]</sup>.

<b>MORTERO</b>	<b>APLICACIONES</b>
1:1 (Cemento: Arena)	Mortero rico para impermeabilizaciones y rellenos
1:3 (Cemento : Arena)	Revoques impermeables (carpetas sobre contrapiso, pisos alisados de cemento, recubrimiento general, etc)
1:1:4 (Cemento : Cal : Arena)	Principalmente para adherir cerámicos
1:5 (Cemento : Arena)	Richeado, como capa base de acabados.
1:4:12 (Cemento : Cal: Arena)	Emparche, su objetivo es emparejar, alinear y plomear para preparar la superficie para el acabado decorativo
1:4:12 (Cemento : Cal : Arena fina)	Estuco, se usa como acabado final, puede sustituirse por otros tipos de acabados

### **1.3.3 Resistencia a compresión de los morteros.**

La norma ASTM C-109 provee un medio para la determinación de la resistencia a la compresión del mortero de cemento hidráulico. Para este ensayo se necesitan moldes cúbicos de 50 mm o 2 pulgadas y deben ser ajustados herméticamente. Los moldes no deben tener más de tres compartimientos cúbicos y deben ser separables en no más de dos partes. La mezcla debe realizarse con una mezcladora mecánica equipada con una paleta y un tazón. Los especímenes deben moldearse dentro de un tiempo total no mayor de 2 minutos y 30 segundos después de completar la mezcla inicial de la amasada del mortero.

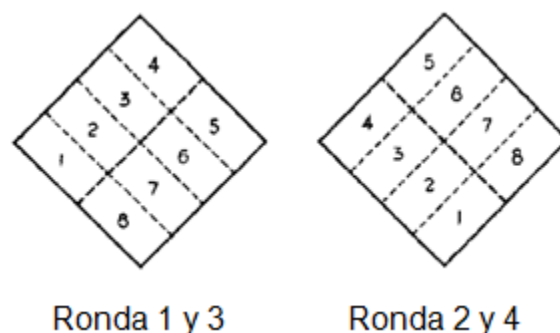
Se coloca una capa de mortero de alrededor de 25 mm (1 pulg) (aproximadamente la mitad de la profundidad del molde) en todos los compartimientos del cubo. Se apisona el mortero en cada compartimiento cúbico 32 veces en aproximadamente 10 segundos en 4 rondas, cada ronda debe ser en ángulos rectos respecto a las otras y debe consistir en ocho golpes adjuntos sobre la superficie del espécimen, como se ilustra en la Figura 1.8.



Las 4 rondas de apisonado (32 golpes) del mortero deben completarse en un cubo antes de seguir con el siguiente. Cuando el apisonado de la primera capa en todos los compartimientos cúbicos se completa, se llenan los compartimientos con el mortero restante y luego se apisonan como la primera capa. Todos los especímenes de ensayo, inmediatamente después del moldeo, deben mantenerse en sus moldes en un cuarto húmedo desde 20 a 72 h con sus superficies superiores expuestas al aire húmedo pero protegidas del goteo de agua.

Los especímenes, (excepto aquellos para ensayos de 24 h) se sumergen en agua saturada de cal, en tanques de almacenaje contruidos de materiales no corrosivos. Se ensayan los especímenes inmediatamente después de sacarlos del gabinete húmedo.

La máquina de ensayo debe ser del tipo hidráulico o de tornillo. Para realizar el ensayo, se debe aplicar la carga a las caras del espécimen que estuvieron en contacto con las superficies verdaderamente planas del molde. Se coloca cuidadosamente el espécimen en la máquina de ensayo debajo del centro del bloque del apoyo superior. El bloque del apoyo superior debe contener un asiento esférico que permita inclinarse en cualquier dirección. Se coloca el bloque de asiento esférico en contacto uniforme con la superficie del espécimen. Se aplica la velocidad de carga con un rango de velocidad entre 900 a 1800 N/s (200 a 400 lb/s).



**Figura 1.8** Orden de apisonado en el moldeo de los especímenes cúbicos.

#### 1.4 Determinación del coeficiente de conductividad térmica de materiales aislantes <sup>[42]</sup>.

Para determinar el coeficiente de conductividad térmica de materiales aislantes es necesario emplear la Ley de conducción de Fourier. Fourier fue un físico matemático francés, quien realizó importantes contribuciones en el tratamiento analítico de la transferencia de calor por conducción. La Ley de conducción de Fourier se expresa mediante la Ecuación (1.1).

$$q = - k A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.1)$$

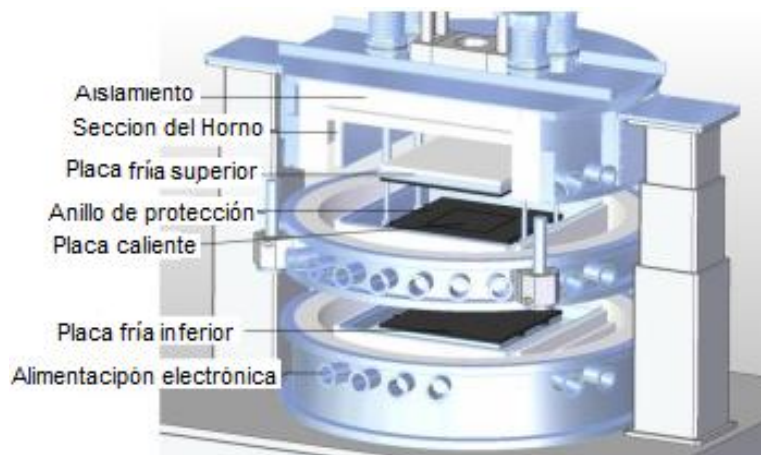
Donde  $q$  es la rapidez de transferencia de calor en Watts,  $A$  es el área perpendicular al flujo de calor en  $m^2$  y  $\partial T / \partial x$  es el gradiente de temperatura en la dirección de la transferencia de calor y puede estar en K o °C. A la constante  $k$  se le llama conductividad térmica del material, y el signo menos se inserta para que se cumpla con el segundo principio de la termodinámica, que indica que el calor fluye en sentido contrario al gradiente de temperatura. Las técnicas de medición de la conductividad térmica se pueden dividir en dos grupos: métodos de estado estacionario y método no estacionario o dinámico.

Las mediciones en estado estacionario se hacen sólo después de que se alcanza un régimen permanente de transferencia de calor. Aunque llevan gran cantidad de tiempo, tales métodos garantizan alcanzar la menor incertidumbre. Por otro lado, en métodos dinámicos, se observan gradientes térmicos en función del tiempo, esto posibilita que las mediciones se realicen de manera rápida sobre un amplio intervalo de temperaturas.

Las normas ASTM C-177 y ASTM C-518 utilizan a través de un aparato de placa caliente aislada (Figura 1.9), un sistema en estado estacionario de temperatura para calcular la conductividad térmica de materiales aislantes, en este sistema, la temperatura “T” y el flujo de calor “q” no cambian con el tiempo. De esta manera la Ecuación (1.1) se simplifica a la Ecuación (1.2) porque sólo se necesita separar e integrar la Ecuación (1) con los valores de los límites de integración de 0 a L y de T<sub>1</sub> a T<sub>2</sub>.

$$\lambda = \frac{ql}{A\Delta T} \quad (1.2)$$

Donde  $\lambda$  es la conductividad térmica de la muestra en W/m K,  $q$  es la energía del flujo de calor a través de la muestra en Watts,  $l$  es el espesor de la muestra en metros,  $A$  es el área de la sección transversal en m<sup>2</sup> y  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura a través de la muestra en K o °C.



**Figura 1.9.** Equipo primario para medir la conductividad térmica de materiales sólidos aislantes.

Durante las mediciones de conductividad térmica en el aparato, se realizan mediciones de calor ( $q$ ) y las temperaturas de las placas de manera periódica. Cuando la temperatura de las placas está cerca de su temperatura final y es estable y ( $q$ ) se encuentra en estado estacionario, los datos se colectan por varias horas y se promedian sobre un intervalo de tiempo. Las mediciones realizadas en este equipo de placa aislada se consideran métodos primarios por sus cualidades y precisión. Los métodos secundarios consisten en un equipo que contiene dos placas isotérmicas (una caliente y otra fría), medidores de flujo de calor, controlador de temperatura y materiales de referencia para calibrar el equipo. La Figura 1.1 muestra el esquema de tal aparato.



**Figura 1.10.** Método secundario para medición de la conductividad térmica de materiales aislantes.

Si la muestra es un compuesto laminar o contiene porosidades o celdas vacías en las que el calor se puede transmitir por convección y radiación, además de conducción, entonces  $\lambda$ , de la Ecuación (2), es la conductividad térmica aparente de la muestra. También es importante mencionar que la conductividad térmica es sensible a los pequeños cambios o diferencias en las propiedades físicas del material, tanto como el tamaño de grano, homogeneidad, porosidad, etc.

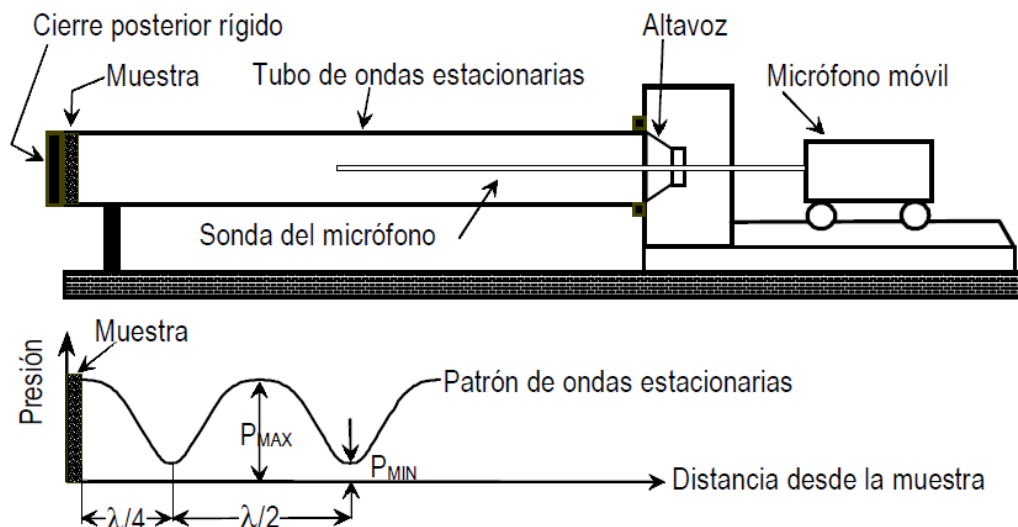
### 1.5. Ley de enfriamiento de Newton.

La Ley de enfriamiento de Newton, señala que cuando la diferencia de temperaturas entre un cuerpo y su medio ambiente no es demasiado grande, el calor transferido en la unidad de tiempo hacia el cuerpo o desde el cuerpo por conducción, convección y radiación es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el medio externo <sup>[43, 44]</sup>.

## 1.6 Determinación del coeficiente de absorción acústica ( $\alpha$ ) de materiales.

Para determinar el coeficiente de absorción acústica de materiales a nivel laboratorio, se utiliza el método que se basa en un tubo de impedancia regido por la norma ASTM C-384-04(2011) "Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method", y se describe de la siguiente manera <sup>[23]</sup>:

Una onda plana longitudinal, cuya amplitud de presión sonora es A, procede de un oscilador de frecuencias que es enviada a lo largo del tubo de impedancia, mediante un altavoz en el extremo del mismo. La citada onda incide sobre la muestra cuya absorción se desea medir, la muestra se pone en su porta-muestra y se coloca en el extremo opuesto del tubo, como lo muestra la Figura 1.11. Cuando las ondas inciden en la muestra, parte de la energía sonora se absorbe y otra parte se refleja con una amplitud de presión B. Como resultado del fenómeno de interferencia entre las ondas incidentes y reflejadas, se forma una onda estacionaria, cuyo estudio aporta los datos necesarios para el cálculo del coeficiente de absorción.



**Figura 1.11** Componentes del método del tubo de impedancia.

El tubo de ondas estacionarias se diseña para mediciones de coeficiente de absorción acústica de muestras circulares de materiales absorbentes de sonido. Para mediciones de baja frecuencia en el intervalo de 100 a 1800 Hz, se utiliza un tubo de diámetro de 100 mm, mientras que para mediciones de alta frecuencia en el intervalo de 800 a 6500 Hz, se utiliza un tubo de diámetro de 30 mm. La energía sonora total que choca contra una pared, una parte se refleja, otra parte se absorbe en la propia pared y la otra parte, se transmite al espacio detrás de la pared. Al dividir éstos, los fragmentos de energía quedan como:

El coeficiente de reflexión de energía=  $|r|^2$

El coeficiente de absorción =  $\alpha$

El coeficiente de transmisión de energía =  $|t|^2$

Al aplicar la conservación de energía se tiene:

$$|r|^2 + \alpha + |t|^2 = 1 \quad (1.3)$$

Se supone que cuando una onda plana armónica choca en dirección normal sobre una superficie, la onda plana viajera se va a reflejar con una disminución de intensidad que se debe a la absorción del material. Si la presión de la onda de sonido incidente y reflejada se les llama  $P_i$  y  $P_r$  respectivamente, el coeficiente de reflexión  $r$  a un punto, es definido por la Ecuación (1.4).

$$r = \frac{P_r}{P_i} \quad (1.4)$$

Las intensidades de las dos ondas son proporcionales a  $|P_i|^2$  y  $|P_r|^2$ , entonces el coeficiente de reflexión de energía es:

$$r^2 = \left| \frac{P_r}{P_i} \right|^2 \quad (1.5)$$

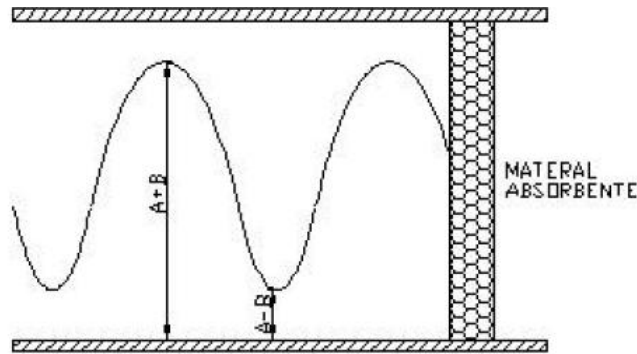
Si el fragmento de energía que traspasa la muestra es muy pequeña (despreciable) comparada con la absorbida, entonces el coeficiente de absorción de energía es representada por la Ecuación (1.6).

$$\alpha = 1 - r^2 \quad (1.6)$$

Las amplitudes de presión en los nodos y antinodos son medidas con un micrófono, el cual se desliza a lo largo del tubo y su posición es determinada por una regla graduada paralela al tubo.

La amplitud en un antinodo de presión (máxima presión) es  $(A+B)$ , y la amplitud en un nodo de presión (mínima presión) es  $(A-B)$ , las cuales se muestran en la Figura 1.12. No es posible medir  $A$  o  $B$  directamente pero se puede medir  $(A+B)$  y  $(A-B)$ , esto se logra al resonar la onda en el tubo, formándose de esta manera ondas estacionarias. Se puede definir la relación de presión máxima a presión mínima como SWR (standing wave ratio), mediante la Ecuación (1.7) <sup>[14]</sup>.

$$SWR = \frac{(A+B)}{(A-B)} \quad (1.7)$$



**Figura 1.12.** Representación de la máxima y mínima presión en un tubo de impedancia para ondas estacionarias.

La Ecuación (3) puede ser manipulada para determinar el coeficiente de reflexión de la potencia del sonido, expresada mediante la Ecuación (1.8).

$$R = \frac{B}{A} = \frac{SWR-1}{SWR+1} \quad (1.8)$$

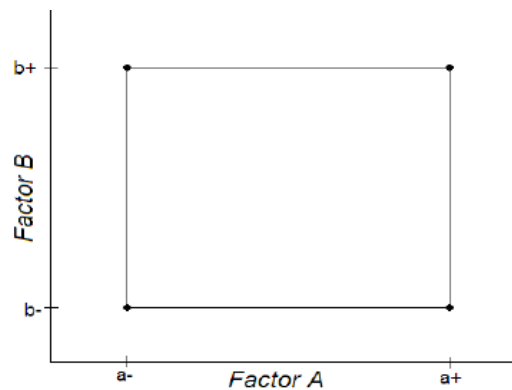
La energía reflejada es proporcional al cuadrado de las relaciones de amplitud de las ondas, por lo tanto, el coeficiente de absorción del sonido ( $\alpha$ ) de la muestra a una frecuencia dada se da por la Ecuación (1.9).

$$\alpha = 1 - R^2 \quad (1.9)$$

### 1.7 Diseño factorial de experimentos.

Los diseños factoriales se usan principalmente en experimentos que incluyen varios factores cuando es necesario estudiar el efecto conjunto de los factores sobre una respuesta. Estos estudios son importantes por su generalización en el trabajo de investigación y porque constituyen las bases de otros diseños de gran valor práctico <sup>[24]</sup>.

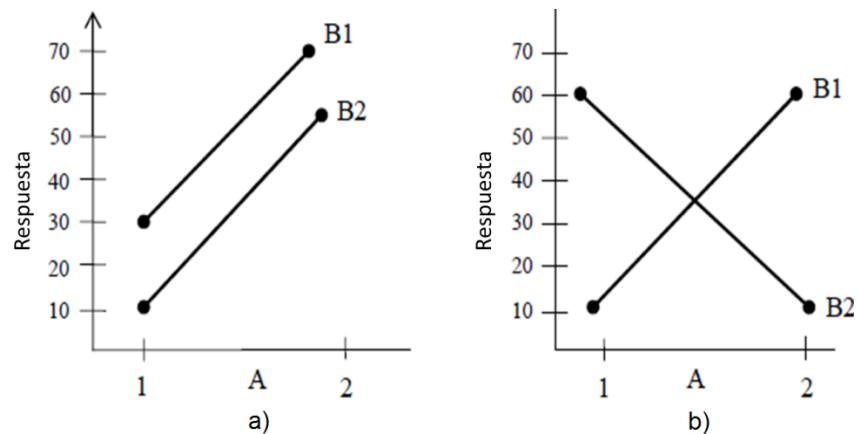
Con un diseño factorial  $2^2$ , se pueden analizar las posibles combinaciones de los niveles y de los factores de estudio en cada réplica del experimento. Por ejemplo, si el factor A tiene a niveles y el factor B tiene b niveles entonces cada replica tiene ab combinaciones posibles como muestra la Figura 1.13 <sup>[25]</sup>.



**Figura 1.13.** Combinaciones posibles para A y B.



El efecto de un factor se define como el cambio en respuesta producido por un cambio en el nivel del factor. En algunos experimentos podemos encontrar que la diferencia en respuesta entre los niveles de un factor no es la misma en todos los niveles del otro factor. Cuando esto ocurre se dice que hay interacción entre los factores. En la Figura 1.14 (a) la interacción no está presente ya que cuando cambia el factor A de su nivel 1 al nivel 2 la respuesta aumenta sin importar en qué nivel este el factor B. Sin embargo, en la Figura 1.14 (b) podemos apreciar el comportamiento del gráfico cuando existe interacción entre los factores <sup>[25]</sup>.



**Figura 1.14.** a) Gráfica cuando no existe interacción entre los factores, b) Gráfica cuando existe interacción entre los factores.

La Ecuación fundamental de ANOVA se da por la suma de los cuadrados y se expresa de la siguiente manera cuando se tiene el factor A con a niveles y el factor B con b niveles:

$$SS_{total} = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_{error} \quad (1.10)$$

## **1.8 Trabajos de interés realizados por otros investigadores.**

María Rejón Santana (2012), estudió el efecto del EPS (virgen y reciclado) como agregado en un mortero. Realizó pruebas de compresión y conductividad térmica en diferentes proporciones respecto al volumen: 70-30 %, 60-40 %, 50-50 % mortero y EPS respectivamente. La resistencia a compresión del mortero sin EPS resultó de 9.8 MPa, esta resistencia disminuye en gran medida conforme aumenta el contenido de EPS en la mezcla. Los valores mínimos de resistencia a compresión de mortero con EPS reciclado fueron con la proporción 50-50 % con un valor resultante de  $1.36 \text{ MPa} \pm 0.60$ , mientras que para la proporción 70-30 % se obtuvo  $3.64 \text{ MPa} \pm 0.90$ . Referente a los estudios de conductividad térmica se caracterizaron 3 placas: mortero sin EPS, mortero-EPS reciclado 80-20 % y mortero-EPS reciclado 50-50 %. Los resultados reportados fueron 0.47 W/mK, 0.44 W/mK y 0.39 W/mK respectivamente <sup>[8]</sup>. En esta investigación no se consideró el tamaño de partícula del EPS.

Matthew Trussoni, estudió la diferencia entre poliestireno expandido fabricado en forma de perlas esféricas y poliestireno expandido de desecho triturado, como agregado de remplazo en el concreto. Las proporciones de mezcla del hormigón se mantuvieron constantes, mientras que el poliestireno expandido de desecho y el fabricado de perla esférica remplazaron una porción del agregado fino. En esta investigación se reportó las medidas de consistencia, contenido de aire, peso unitario, resistencia a la compresión, módulo elástico, relación resistencia-peso y resistencia a flexión. Los resultados indican que las mezclas con EPS de perlas esféricas exhiben mejor trabajabilidad y también reducen la oclusión de aire en comparación con las mezclas con EPS de desecho, debido a las diferencias en las características de la superficie de las partículas. Las partículas de EPS esféricas también obtuvieron resultados estadísticamente significativas en sus propiedades relacionadas a la capacidad de absorción de energía que las de EPS triturado <sup>[10]</sup>.

Laukaitis (2003) del Instituto de Aislamiento de Vilnius Lithuania analizó el uso de residuos de EPS triturados, como agregados en compuestos de cemento. Estudió granulometría gruesa, fina y molida, con perlitas vírgenes de EPS para los gránulos gruesos y finos y EPS triturado para los gránulos molidos. Usó proporciones de 1:1, 1:2, 1:3 en relación al volumen del cemento y gránulos de EPS respectivamente. Las superficies de los gránulos molidos se mostraron con una morfología segmentada. La relación 1:3 no se pudo llevar a cabo al usar gránulos molidos debido a la extrema fragilidad de las mezclas. La densidad más baja que se obtuvo fue de  $150 \text{ kg/m}^3$  con una relación 1:3 con gránulos finos y tuvo una resistencia a la compresión de 0.25 MPa. Los coeficientes de conductividad térmica que se obtuvieron para las densidades entre  $150 - 170 \text{ kg/m}^3$  fueron de  $0.060 - 0.064 \text{ W/mK}$  respectivamente [45].

Abdulkadir Kan y Ramazan Demirboga (2009), utilizaron el poliestireno expandido reciclado como agregado para concretos aligerados. En este estudio, hicieron una modificación térmica al poliestireno, a través de un tratamiento donde se calentó con aire caliente hasta  $130^\circ\text{C}$  por 15 minutos. Reemplazaron agregado natural por el EPS modificado, en 0, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % en fracción volumétrica. Se obtuvieron valores de densidad de  $900$  a  $1700 \text{ kg/m}^3$  y valores de resistencia a compresión de  $12.58$  a  $23.34 \text{ MPa}$  [11].

Margarita, Villasmil e Igor Rodríguez (2012) estudiaron el comportamiento mecánico de mezclas de concreto aligerado con EPS, bajo las relaciones de agua-cemento (a/c) de 0.50, 0.55 y 0.60, y densidades de  $1600$  y  $1800 \text{ kg/cm}^3$ . La resistencia mecánicas para la densidad de  $1600 \text{ kg/cm}^3$ , presentó un promedio de  $154 \text{ kg/cm}^2$  ( $15 \text{ MPa}$ ) a los 28 días, y para la densidad de  $1800 \text{ kg/cm}^3$  se obtuvo en promedio  $250 \text{ kg/cm}^2$  ( $24.5 \text{ MPa}$ ). Sin embargo, el material tuvo un comportamiento visco-elástico por lo que su uso no es aceptable en elementos estructurales ni tampoco para elementos sometidos a cargas estáticas menores [46].

W.C. Tang, y A. Nadeem (2008) evaluaron concretos con densidades entre 1400 y 2100 kg/m<sup>3</sup>, hicieron una sustitución parcial del agregado grueso por poliestireno. El agregado grueso convencional se sustituyó en proporciones de 20, 40, 60 y 80 %. En el estudio se utilizó perlas con diámetro y densidad aparente de aproximadamente 4 mm y 24 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Los restantes materiales que se utilizaron fueron: cemento Portland ordinario, arena de río con módulo de finura de 2.75 y granito triturado con un tamaño nominal de 10 mm. Macroscópicamente se pudo observar que el agregado de poliestireno mostró una distribución uniforme en el mortero y en la matriz de concreto; sin que se adicionara ningún agente especial de unión. Los estudios concluyeron que un concreto con agregado de poliestireno con densidad oscilante entre 1400 a 2100 kg/m<sup>3</sup>, obtuvo resistencias a compresión entre 13 y 40 MPa, además de mostrar buena trabajabilidad <sup>[9]</sup>.

V.Ferrándiz Mas y E. García Alcocel (2012), evaluaron la influencia de la adición de EPS tanto comerciales como reciclados, sobre las características físicas y mecánicas de morteros de cemento Portland. Demostraron que usar aditivos mejora la trabajabilidad y la porosidad, permitiendo fabricar morteros con altos contenidos de residuo de EPS, con propiedades mecánicas adecuadas para su empleo con morteros de albañilería, revoco y enlucido. El uso de aditivos no mejoró la resistencia a la flexión. El coeficiente de absorción acústica a incidencia normal mostró mínima variación independientemente del porcentaje y el tipo de EPS. El valor de este coeficiente oscila en torno a cero, valores que no se modifican al emplear aditivos <sup>[47]</sup>.

## **CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.**

### **2.1 MATERIALES.**

Los materiales seleccionados para la fabricación de los especímenes de mortero aligerado son los siguientes:

Aglomerante: Cemento Portland de uso general, marca Cemex, bulto de 20 kg.

Agregados:

- Polvo fino de piedra caliza, bulto de 20 kg (Materama).
- Poliestireno expandido recolectado en el centro de acopio del CICY en perfecto estado y limpio, cuyas densidades aparentes varían en un rango de 10 a 20 kg/m<sup>3</sup>.
- Agua de la tubería de agua potable.

#### **2.1.1 Molido y tamizado del poliestireno expandido de desecho.**

La molienda del poliestireno expandido de desecho se llevó a cabo en un molino de cuchillas de doble eje y baja velocidad las cuales ayudan a trozar los bloques del material. El molino contiene una malla con huecos circulares de 12.7 mm. Un metro cúbico de EPS se puede trozar alrededor de 90 minutos, luego queda listo el material para clasificarse en tamaños de partículas con apoyo de una columna de tamices. La Figura 2.1 muestra las características del molino para la obtención del EPS triturado.



**Figura 2.1.** Características del molino utilizado para la molienda del EPS recolectado.

Después de triturar el EPS, se tamizó con una columna de mallas y un equipo ROTAP para automatizar el proceso y para tener control en el tiempo de tamizado. La Figura 2.2 muestra las mallas que se utilizaron y el equipo ROTAP. El tiempo de tamiz fue de 4 minutos, porque que es el tiempo máximo recomendable para la reclasificación de las partículas.



**Figura 2.2.** Mallas utilizadas en el proceso de tamizado del EPS triturado y equipo ROTAP perteneciente al CICY.

Se eligieron dos perfiles de tamaño basado en la facilidad de obtención y manipulación del material. En este sentido, se descartó la utilización de partículas menores a 2 mm porque resultaron muy volátiles. La malla N° 10 contiene tamaños de partícula que van desde los 2 mm hasta los 4.76 mm de diámetro, este tamaño de partícula resultó ideal para considerarlo como la granulometría fina. La granulometría gruesa se eligió de las partículas provenientes de la malla N° 4, donde se obtuvieron tamaños de partícula que van desde los 4.76 mm hasta los 9.52 mm de diámetro.

### 2.1.2 Dosificación del mortero aligerado con EPS reciclado.

El mortero aligerado con EPS se fabricó en base a las dosificaciones comunes para morteros de recubrimiento o revoques, así como lo muestra la Tabla 1.4. Resistencia a la compresión de 5 tipos de morteros aceptados por la norma ASTM-270. Sin embargo, al utilizar partículas de EPS reciclado en la mezcla, debe procurarse que el mortero simple tenga la mejor resistencia mecánica posible, por lo que se eligió una dosificación constante de 1:1 (cemento: polvo fino). Se eligió trabajar con polvo fino, porque le brinda a la mezcla características tales como: acabado más liso, mayor densidad, mayor resistencia a la compresión y también es el más indicado para rellenar los espacios vacíos que puedan formarse entre las partículas de EPS. De acuerdo con las fichas técnicas del aglomerante en cuestión, se utilizó la relación agua/cemento (a/c) de 0.5 en relación a la masa del cemento, ya que es la cantidad que se recomienda para lograr valores de resistencia mecánica óptimos. Se realizaron 4 diferentes dosificaciones con la variación de la cantidad y de la granulometría del EPS reciclado. La cantidad de EPS, se estableció previamente en partes volumétricas siendo 1:1:1 (cemento: polvo fino: EPS) y 1:1:2 (cemento: polvo fino: EPS). La Tabla 2.1 muestra las dosificaciones en partes volumétricas de las 5 formulaciones que se desarrollaron en esta investigación.

**Tabla 2.1.** Formulaciones del mortero aligerado con partículas de EPS reciclado en partes volumétricas

Formulaciones	Partes de cemento	Partes de arena	Relación Agua/Cemento	Partes de partículas de EPS reciclado	Granulometría del EPS
Referencia	1	1	0.5	0	N/A
0.8 % EPS-G	1	1	0.5	1	GRUESO
0.8 % EPS-F	1	1	0.5	1	FINO
1.6 % EPS-F	1	1	0.5	2	FINO
1.6 % EPS-G	1	1	0.5	2	GRUESO



Para hacer un cálculo más exacto en el proceso de medición del EPS para cada formulación, se efectuó un cálculo porcentual en base a la masa del cemento. Esto se realiza para obtener resultados más exactos y reproducibles. La Tabla 2.2 muestra el porcentaje de EPS en base a la masa de cemento, de tal manera que sea equivalente a la cantidad de material que se mostró en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.2.** Porcentaje de EPS en base a la masa total del cemento.

Formulaciones	Partes de cemento	Partes de arena	Relación agua/cemento	% de EPS en base a la masa total del cemento	Granulometría del EPS
	Mortero simple				
Referencia	1	1	0.5	0	N/A
0.8 % EPS-G	1	1	0.5	0.8	GRUESO
0.8 % EPS-F	1	1	0.5	0.8	FINO
1.6 % EPS-G	1	1	0.5	1.6	GRUESO
1.6 % EPS-F	1	1	0.5	1.6	FINO

El mortero simple como el de referencia, se considera como un mortero caro y denso, sin embargo al agregarle partículas de EPS reciclado, se puede convertir en un mortero económico y ligero.

## **2.2 PRUEBAS MECÁNICAS.**

### **2.2.1 Prueba de fluidez de las formulaciones establecidas.**

La consistencia de las mezclas, se evaluó mediante los ensayos de fluidez para morteros como lo establece la norma ASTM C-1437 *“Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar”*.

La trabajabilidad, es un término que se define como aquella propiedad del mortero recién mezclado que determina la facilidad y homogeneidad para mezclar, colocar, compactar y acabar la mezcla” [48]. En este sentido, la norma ASTM C-1437 establece que la trabajabilidad óptima para un mortero debe tener un porcentaje de fluidez de  $110 \pm 5 \%$ , con este porcentaje de fluidez, también se puede determinar la cantidad necesaria de agua que necesita un mortero de cemento para la homogeneización entre el cemento y el árido (arena), con el fin de obtener la mayor efectividad de la mezcla [49].

A continuación se muestra el proceso para la medición del porcentaje de fluidez de las mezclas que se formularon:

1.- Con la ayuda de una mezcladora HOBART (Figura 2.3. Mezcladora HOBART de 3 velocidades.) se mezclaron los componentes de las mezclas de la siguiente manera:

Primeramente, se colocaron las partículas de EPS reciclado en la mezcladora, después se agregó en forma de cráter el cemento para que atrape el EPS. En el centro del cráter se le agregó el agua y se mezcló por un minuto a velocidad lenta y luego se agregó poco a poco el polvo fino durante 2 minutos a velocidad intermedia para lograr una mezcla homogénea.



**Figura 2.3.** Mezcladora HOBART de 3 velocidades.

2.- El mortero previamente mezclado se vertió en el molde cónico en 2 capas de a 25 apisonadas cada una. La última capa se dejó sobresalir un poco para que cuando se enrace con la espátula se deje una superficie lisa. La Figura 2.4 muestra la mesa de fluidez con sus respectivos componentes.



**Figura 2.4.** Mesa de fluidez.

3.- Después de 1 minuto, se retiró el molde cónico en forma vertical y se giró 25 veces en 15 segundos la mesa de fluidez.

4.- Con un vernier se midieron 4 diámetros resultantes en la mesa de fluidez. Para calcular el porcentaje se utiliza la fórmula expresada en la Ecuación 2.1

$$\% F = \left( \frac{\text{diámetro promedio} - \text{diámetro original}}{\text{diámetro original}} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

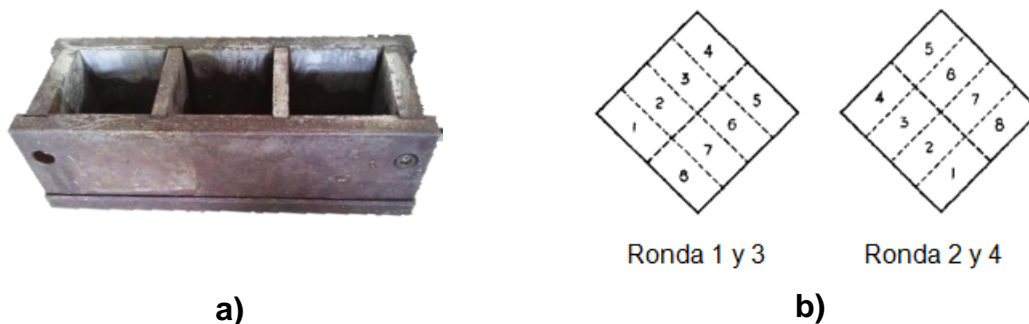
El diámetro original, se refiere al diámetro de la base inferior del molde cónico, en este caso fue de 101 mm.

Es importante señalar que en los estudios de fluidez se pueden obtener valores mayores al 100 % debido a la gran diferencia que puede haber entre el diámetro promedio conseguido en la mezcla después de hacer la prueba y el diámetro original, esto sucede en las mezclas que resultan con muy poca viscosidad.

### 2.2.2 Preparación de los especímenes cúbicos para pruebas de compresión.

Inmediatamente después de la prueba de fluidez, y en base a los criterios de la norma ASTM C109, se fabricaron las muestras cúbicas mediante el uso de un molde metálico que tiene capacidad para formar 3 cubos de 5x5x5 cm así como lo muestra la Figura 2.5 (a), cada molde se recubrió con una película desmoldante a base de polietileno para evitar que la mezcla se pegue en el molde.

Para el vaciado de la mezcla en los moldes, se colocó primeramente una capa de mortero aproximadamente a la mitad de la profundidad del molde y se apisonó 32 veces en 4 rondas cada espacio. Cada ronda debe ser en ángulos rectos respecto a las otras y debe consistir en ocho apisonadas adjuntas sobre la superficie del espécimen como se muestra indicado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.5** (b). En la segunda capa se realizó el mismo procedimiento y se golpeó 8 veces los moldes por la parte inferior para eliminar las formaciones de burbujas. Por último se enrazó con una espátula para obtener una superficie lisa y uniforme.

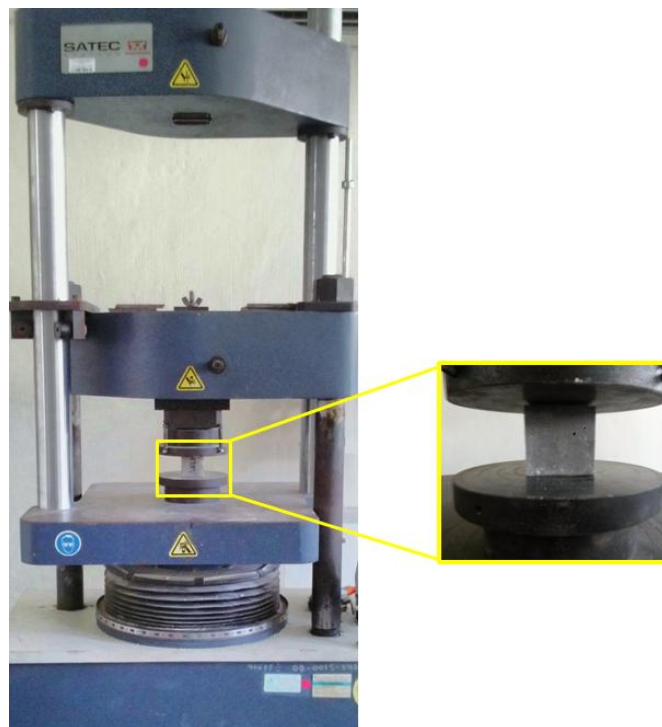


**Figura 2.5.** (a) Moldes para formar las probetas cúbicas de 5x5x5 cm y (b) Orden de apisonado

Los especímenes se desmoldaron después de 24h y luego se sumergieron en tanques de almacenaje que contienen agua saturada de cal durante 14 y 28 días.

### 2.2.3 Pruebas de compresión de los morteros aligerados.

Se realizaron las pruebas de compresión a 14 y 28 días de curado de cada formulación, en una máquina de pruebas universales SATEC perteneciente a la facultad de ingeniería de la UADY y se muestra en la Figura 2.6. Se utilizó una velocidad de cabezal de 3.03 mm/min. Las muestras se colocaron de tal manera que la placa de carga tenga contacto con las superficies planas del molde.



**Figura 2.6.** Máquina para pruebas de compresión de concretos.

Se realizó un diseño factorial  $2^2$  con el fin de determinar si existe interacción entre los factores de la granulometría y la proporción de EPS con respecto a la resistencia mecánica a compresión y una gráfica de superficie de respuesta para determinar que factor es más influyente en la disminución de la resistencia mecánica a compresión.

### **2.2.3 Fracción volumétrica de EPS en las mezclas cúbicas.**

El cálculo de la fracción volumétrica de EPS con respecto a la matriz cementicia se llevó a cabo mediante el uso de la regla de mezclas para materiales compuestos particulados de acuerdo con la Ecuación (2.2).

$$\rho_c = f_i \rho_i + f_m \rho_m \quad (2.2)$$

Dónde:

$\rho_c$  = Densidad del compuesto

$f_i$  = Fracción volumen del EPS

$\rho_i$  = Densidad del EPS

$f_m$  = Fracción volumen de la matriz cementicia

$\rho_m$  = Densidad de la matriz cementicia

### **2.3 PRUEBAS TÉRMICAS.**

La caracterización térmica, se centra en observar el comportamiento de los materiales con las formulaciones planteadas frente a los fenómenos de transferencia de calor de radiación, conducción y convección. Por otra parte, también se desarrolló un método secundario para estimar el coeficiente de conductividad térmica (k) con el fin de comparar cada formulación. Todo esto, se realiza de acuerdo a los fundamentos que señala las normas ASTM C-518 Y C-177.

#### **2.3.1 Fabricación de las placas.**

Para la fabricación de las placas, se diseñó un molde de madera que pueda contener dos placas de 25 x 25 x 3.8 cm, así como lo muestra la Figura 2.7. El molde se cubrió cuidadosamente con película de poliéster (Mylar) para facilitar el desmolde de las mezclas curadas.

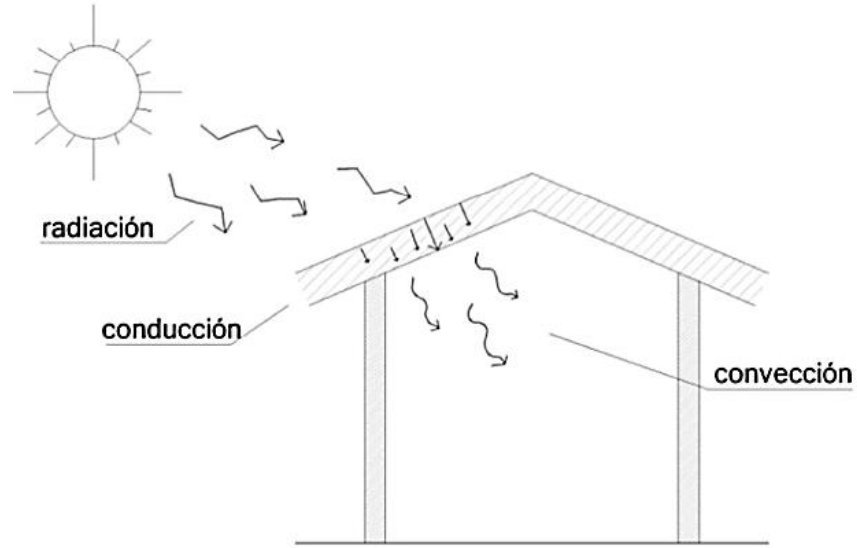


**Figura 2.7.** Molde de madera para 2 placas.

Las mezclas se realizaron de acuerdo a las dosificaciones de estudio y se procuró realizar un vaciado uniforme en el molde. Después del vaciado, se enrazó la mezcla con una espátula para dejar una superficie lisa y se dejó curar por 48 horas.

### **2.3.2 Características del prototipo de la cámara térmica aislada.**

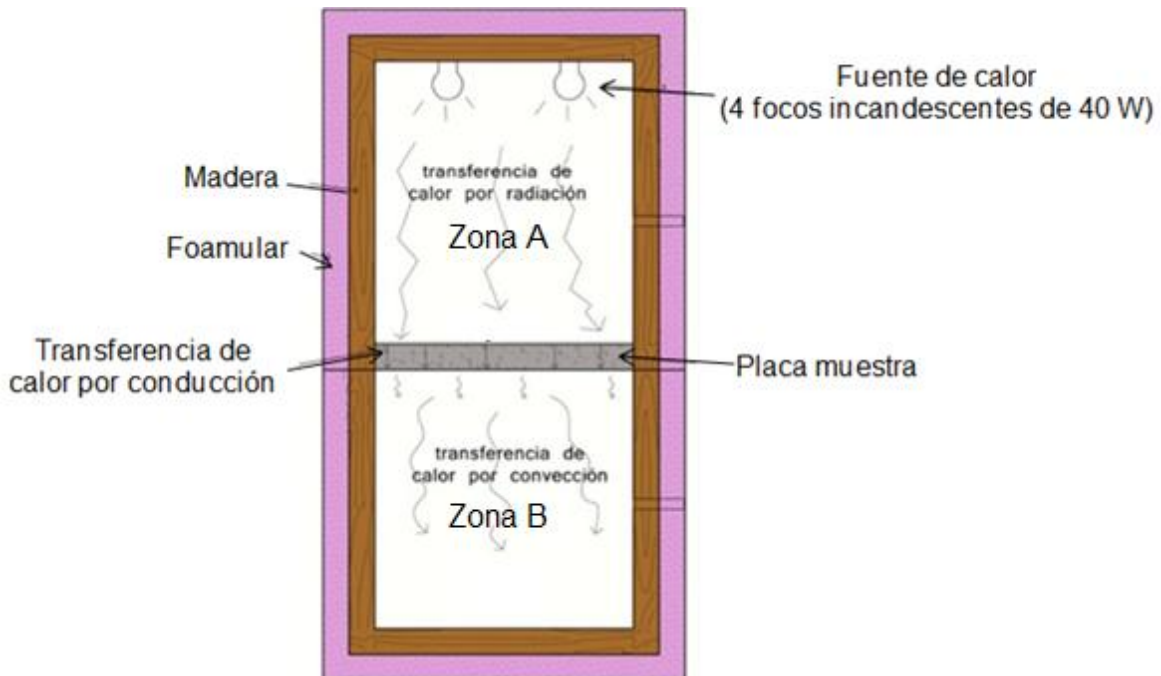
El modelo de prueba se diseña de tal manera que se puede representar las condiciones a las que pudiera estar expuesto el material en condiciones reales (ej. como acabado de techo) y para calcular el coeficiente de conductividad térmica. Para esto, es necesario tomar en cuenta los 3 modos de transferencia de calor que se dan en una edificación. En primera instancia, se tiene una transferencia de calor por radiación, ya que el sol impacta directamente sobre la superficie (muro o techo), luego, el calor se absorbe y se transmite por conducción a través del cuerpo del material y por último el calor se transmite hacia el interior de la edificación por convección. La Figura 2.8 ejemplifica los modos de transferencia de calor que se dan en una edificación.



**Figura 2.8.** Transferencia térmica en un edificio <sup>[8]</sup>.

María Rejón <sup>[8]</sup>, diseñó un prototipo que consiste en 2 espacios aislados, uno que representa el ambiente natural exterior (Zona A) y la otra representa el ambiente interior (Zona B). En medio de ambos espacios se coloca la placa muestra del material a estudiar en dimensiones de 25 x 25 x 3.8 cm. La Figura 2.9 muestra el prototipo de la cámara térmica aislada.





**Figura 2.9.** Prototipo de la cámara térmica aislada.

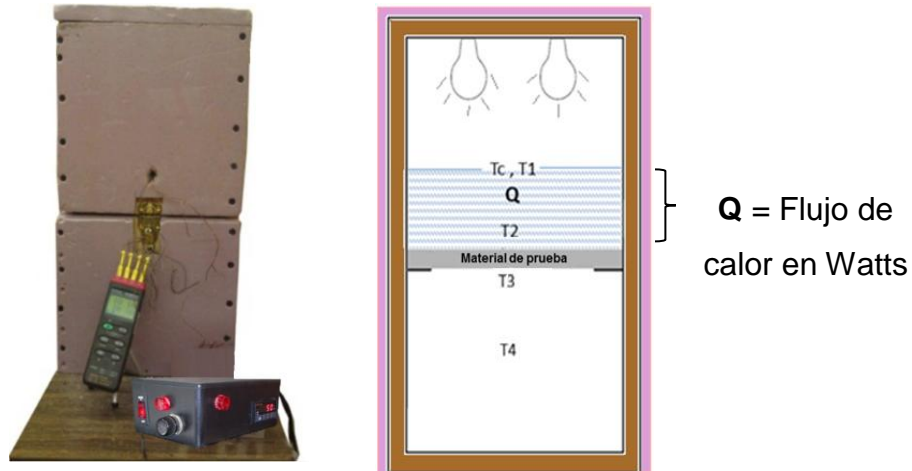
En la zona A se colocó una fuente de calor que incluye 4 focos incandescentes de 40 W cada uno. Para lograr un ambiente más controlado, ambas cajas se sellaron con un aislante de poliestireno extruido (Foamular). La idea de la cámara térmica es la obtención de un registro de temperaturas en puntos específicos que permitan un análisis térmico. Para lograr tal registro, se utilizó un termómetro electrónico con data logger, que contiene 4 termopares tipo K.

Se llevó a cabo una prueba para determinar la confiabilidad del termómetro electrónico con data logger, el reporte se puede ver en el anexo A.

Para mantener una temperatura constante dentro de la cámara térmica se utilizó un controlador de temperatura XMT-7100 que utiliza un termopar tipo K para regular el flujo de calor de los focos incandescentes según la temperatura del interior de la zona A, esto también permite usar parámetros de temperatura ambiente a los que podría estar expuesto el material a caracterizar.

### 2.3.3 Análisis térmico con la cámara térmica aislada.

La Figura 2.10 representa el sistema que debe armarse dentro de la cámara para los cálculos térmicos.



**Figura 2.10.** Sistema armado de la cámara térmica aislada.

Dónde:

$T_c$ : Se refiere a la temperatura que regula el termostato del controlador de temperatura.

$T1, T2, T3$  Y  $T4$  representan los 4 termopares del data logger.

$Q$ : Indica el flujo de calor existente entre el punto donde se localiza el  $T1$  y el  $T2$ .

El  $T2$  Y  $T3$  se colocaron pegados al material de prueba, tanto en su parte superior como en la parte inferior para generar la diferencia de temperaturas ( $\Delta T$ ).

El  $T4$  se colocó 5 cm debajo del material de prueba.

El método para evaluar las condiciones de radiación, conducción y convección consiste en simular el ambiente exterior de un día soleado. Para esto, se graba con el data logger los cambios de temperatura de los termopares cada 2 segundos.

En total se graban 10 horas, las primeras 2 horas, representan el inicio de un día soleado (desde el amanecer hasta el medio día), en las siguientes 2 horas, el sistema se mantiene a la temperatura constante de 50°C, el cual es representativo de las temperaturas más altas del medio día que se llegan a alcanzar en épocas muy calurosas. Las últimas 5 horas, representan el final del atardecer y sirven para analizar la pérdida de calor cuando se interrumpe la fuente de radiación.

#### **2.3.4. Coeficiente de conductividad térmica de las formulaciones.**

El coeficiente de conductividad térmica de las formulaciones, se calcula con las diferencias de temperaturas que registran los termopares dentro de la cámara térmica aislada, sin embargo, es necesario esperar hasta que el termopar del controlador de temperatura logre mantener una temperatura constante de 50°C. Este método toma como referencia las características de un sistema estacionario de placa caliente aislada establecidas por las normas ASTM C-177 y ASTM C-518. Sin embargo, en vez de utilizar la energía generada por la resistencia de la placa caliente aislada, se utilizó la energía que existe entre el Tc y el T2. Esta energía debe representarse en unidades de Watts, por lo que se utilizó la Ecuación de enfriamiento de Newton (2.3)

$$Q = h_{aire} * A * \Delta T \quad (2.3)$$

Dónde:

Q= Flujo de calor en Watts

$h_{aire}$  = Se refiere al coeficiente de radiación o convección del aire a una temperatura dada.

A = Es el Área transversal al flujo de calor que tiene contacto con el material de muestra.

$\Delta T$  = Es la diferencia de temperatura entre el T1 y el T2 en grados Celsius o Kelvin.

Las ecuaciones (2.4 y 2.5) se utilizan para determinar la magnitud de los coeficientes de radiación y convección natural del aire respectivamente.

$$h_{RAD} = 5.67 \times 10^{-8} \varepsilon (T_{Superficie}^2 (K)^2 + T_{Air}^2 (K^2)) \cdot (T_{Superficie} (K) + T_{Air}) \quad (2.4)$$

Dónde  $\varepsilon$  se refiere a la emisividad del material de prueba.

$$h_{CN} = 3.76 ((\Delta T_{Superficie\ aire} (K))^{0.25} \quad (2.5)$$

Una vez obtenido el flujo de calor en Watts, se puede utilizar la Ecuación de conducción de calor de Fourier (1.2).

Sin embargo, se debe considerar que el material de prueba tiene una pérdida de calor por convección hacia la zona B de la cámara térmica, debido a esto, se realizó una modificación de la Ecuación (1.2) que combina los efectos de conducción y convección del calor. La Ecuación modificada se da en (2.6).

$$k = \frac{e}{\left\{ \frac{[\Delta(T_3 - T_4) + \Delta(T_2 - T_3)] * A}{Q} - \frac{1}{h} \right\}} \quad (2.6)$$

Dónde:

$k$  = coeficiente de conductividad térmica

$e$  = espesor del material de prueba

$A$  = área transversal al flujo de calor

$h$  = coeficiente de convección del aire

$Q$  = flujo de calor en Watts

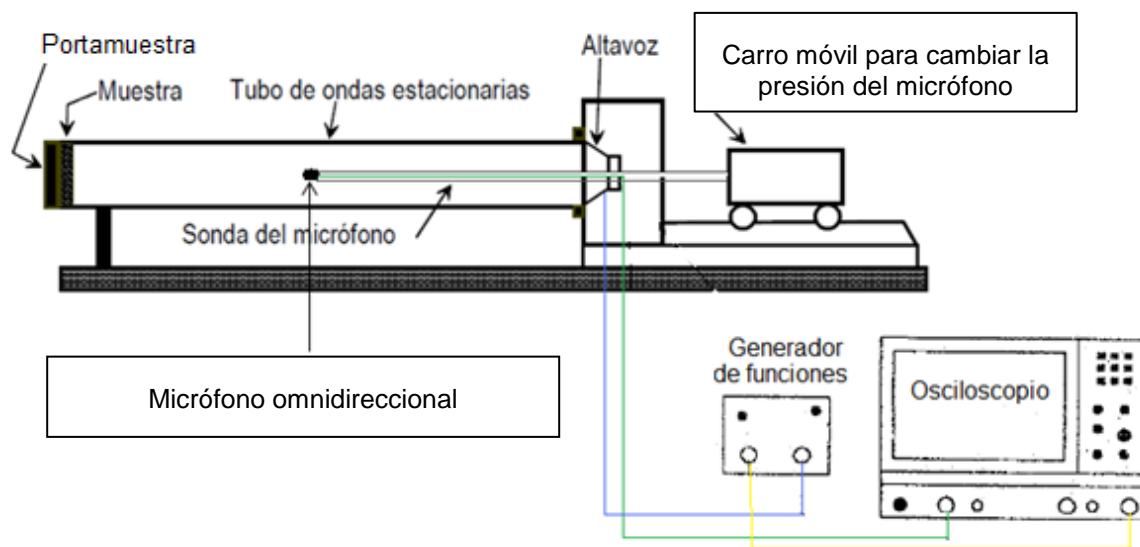
Se utilizó el Foamular 250 y un mortero de cemento como materiales de referencia para evaluar la confiabilidad de la cámara térmica aislada. Los resultados de estas pruebas se pueden ver en el anexo B.

Para visualizar la tendencia y la manera como interaccionan los factores de la granulometría y la proporción de EPS en las mezclas, se utilizó una gráfica de interacciones y una gráfica de superficie de respuesta como herramientas de diseño experimental.

## 2.4 PRUEBAS ACÚSTICAS

### 2.4.1 Tubo de ondas estacionarias.

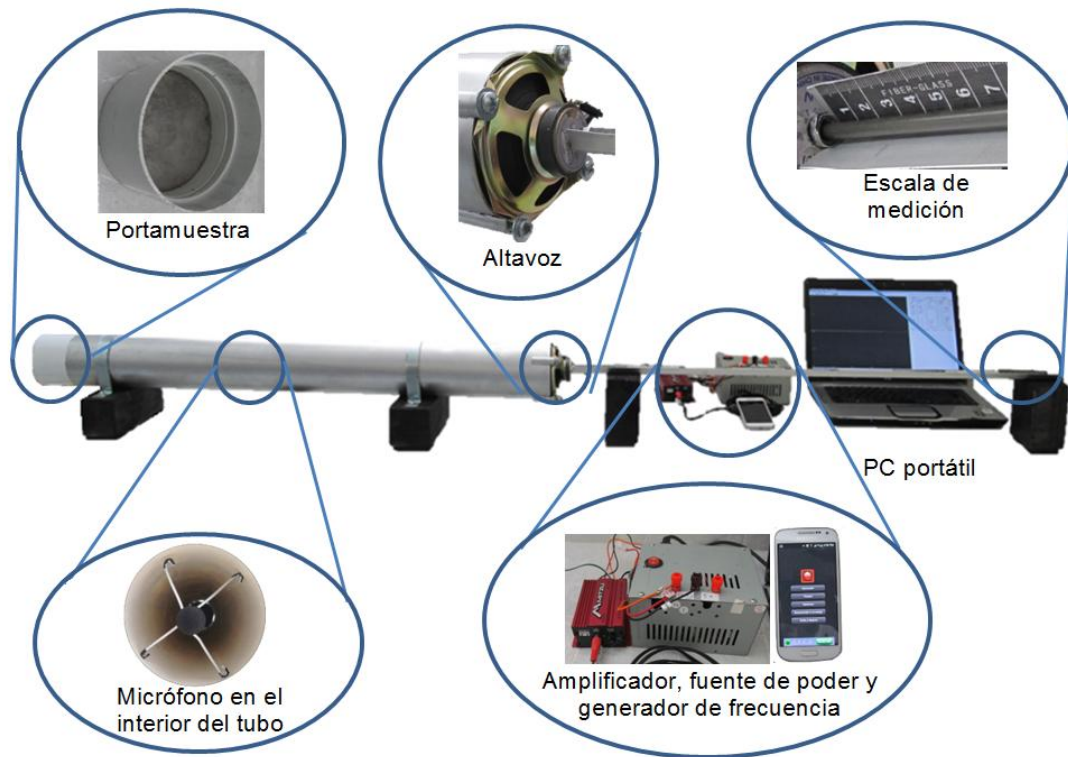
En la Figura 2.11 puede observarse el diagrama correspondiente al sistema del tubo de ondas estacionarias para determinar el coeficiente de absorción acústica de los materiales de este estudio.



**Figura 2.11.** Tubo de impedancia acústica.

#### 2.4.2. Componentes para el armado del sistema del tubo de ondas estacionarias.

A continuación se muestran los componentes que fueron ensamblados para conformar el equipo correspondiente al tubo de ondas estacionarias.



**Figura 2.12.** Componentes utilizados en el armado del sistema de impedancia acústica.

**Tubo:** Se utilizó un tubo de PVC de 110 mm de diámetro y 1 m de longitud. El tubo debe tener su superficie interior lisa y libre de polvo u otras partículas para que la atenuación sea mínima.

**Portamuestra:** Se utilizó una tapa de PVC correspondiente al tubo de 110 mm diámetro y un cople también de PVC para sujetarlo. Dentro del portamuestra se colocó una placa circular de acero inoxidable de 2.5 cm de espesor para evitar que las ondas emitidas traspasen el portamuestra.

Altavoz: Se utilizó un altavoz de 10 watts de potencia y 4 Ohms de impedancia. El altavoz se conecta a un amplificador de audio que funciona con una fuente de poder de 12V.

Generador de funciones: Se utilizó un generador de señales digital, que funciona desde un teléfono móvil con sistema Android.

Micrófono: Se utilizó un micrófono condensador omnidireccional. Este micrófono se colocó dentro de un tubo delgado de acero reforzado para que pueda atravesar el altavoz y funcionar como una sonda dentro del tubo de PVC. En el extremo del tubo donde se encuentra la cabeza del micrófono se le adaptó un soporte para mantener el micrófono en la parte central del tubo.

Osciloscopio: El software “Scope” se implementó en una computadora portátil, para analizar las ondas estacionarias detectadas por el micrófono sonda.

Escala de medición: se rotuló un perfil de aluminio en forma de V con una cinta métrica para medir las distancias del micrófono sonda.

### **2.4.3. Elaboración de los especímenes para las pruebas acústicas.**

Las muestras que utiliza este método son de forma circular con un diámetro de 110 mm y un espesor de 38 mm. Para fabricar los moldes, se utilizó un tubo de PVC de 110 mm de diámetro. La Figura 2.113 muestra el molde con las mezclas vertidas.



**Figura 2.13.** Moldes circulares para las pruebas acústicas.

Para la fabricación de las probetas se siguió la siguiente metodología:

- Se mezcló los materiales requeridos en las proporciones establecidas para cada probeta.
- Se colocó una película de poliéster en la base de madera y en el interior de los moldes para facilitar el desmolde.
- Se llenaron los moldes y se ejerció una ligera presión con la espátula para conseguir que la superficie exterior aparezca con la máxima uniformidad posible.
- Transcurridas 24 horas de curado, se procedió a desmoldar las muestras.

Todas las formulaciones que contienen EPS mostraron el mismo acabado que la muestra de referencia, por lo que se optó en lijar una de las caras de cada muestra para que pueda quedar expuesto el contenido de EPS de acuerdo a su proporción y granulometría, sin embargo, las pruebas de absorción acústica se realizaron en las muestras con y sin el EPS expuesto para su comparación.

#### **2.4.4. Procedimiento para calcular el coeficiente de absorción acústica de las formulaciones.**

Las pruebas acústicas se realizaron las siguientes acciones:

- Se calculó la velocidad del sonido dentro del tubo para determinar con exactitud las distancias a las que se encuentran las amplitudes máximas y mínimas de las ondas estacionarias, para esto, se puso un termómetro dentro del tubo y luego se calculó la velocidad del sonido de acuerdo a la Ecuación (2.7):

$$c = 20.05 (T + 273.1)^{1/2} \quad (2.7)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido dentro del tubo y  $T$  es la temperatura.

- Se calculó la longitud de onda ( $\lambda$ ) en metros de acuerdo a la Ecuación (2.8):

$$\lambda = c/f \quad (2.8)$$



Donde  $f$  es la frecuencia utilizada para cada prueba. El primer mínimo se ubica exactamente en  $\lambda/4$  desde la cara de la muestra, mientras que el primer máximo se encuentra en  $\lambda/2$ .

- Las pruebas se realizaron en un laboratorio con poco ruido de fondo y se evitó trabajar en días lluviosos, porque el ruido de fondo se incrementa.
- Se verificó que la posición de la muestra sea perpendicular a la dirección del tubo, para garantizar incidencia normal.
- Se conectó el micrófono directamente a la computadora portátil, y el generador de señales al amplificador que conecta el altavoz. La amplitud de la señal debe ser al menos 10 veces más fuerte que la amplitud del ruido de fondo en un mínimo de onda estacionaria.

Una vez que la muestra se colocó en el extremo del tubo, se procedió a fijar el generador de señales en frecuencias de 250, 500, 1000 y 2000 Hz, y en cada frecuencia se sacaron los valores de las amplitudes máximas y mínimas con respecto a la distancia entre el micrófono y la muestra. Los valores máximos y mínimos forman una relación de onda estacionaria que permite el cálculo del coeficiente de absorción acústica. Esta relación se representa por SWR “*Standing wave ratio*” por sus siglas en inglés, y se da por la Ecuación (2.9):

$$SWR(x) = V_{\max}(x) / V_{\min}(x) \quad (2.9)$$

Los valores de  $V_{\max}(x)$  y  $V_{\min}(x)$  dependen del número de máximos y mínimos que se formen en el patrón de ondas estacionarias de cada prueba y se desarrollan de acuerdo a lo siguiente:

*Para dos o más mínimos presentes:* Cuando dos o más mínimos son presentes, uno o más máximos se observan claramente. Si hay solamente un voltaje máximo, este debería se usa como  $V_{\max}(0)$ . Si hay dos o más máximos, el máximo más cercano a la cara de la muestra es el que se usa como el  $V_{\max}(0)$ . El  $V_{\min}(0)$  se encuentra mediante una extrapolación lineal de acuerdo con la Ecuación (2.10):

$$V_{\min}(0) = V(x_1) - x_1[V(x_2) - V(x_1)] / (x_2 - x_1) \quad (2.10)$$

*Para un mínimo y un máximo presente:* Donde solamente hay un mínimo y un máximo, se toma el voltaje máximo como  $V_{\max}(0)$ . El  $V_{\min}(0)$  no se puede calcular con extrapolación lineal porque solamente existe un  $V(x_1)$ . Sin embargo, una aproximación válida para el voltaje mínimo se puede calcular con la Ecuación (2.11):

$$V_{\min}(0) = V(x_1) - \xi x_1 V_{\max}(0) \quad (2.11)$$

Donde  $\xi$  es la constante de atenuación desarrollado por Kirchhoff y se describe mediante la Ecuación (2.12):

$$\xi = 0.02203 f^{1/2} / (cd) \quad (2.12)$$

*Para solamente un mínimo, sin máximo presente:* En estos casos, el valor máximo es inferido mediante la Ecuación (2.13).

$$V_{\max} = (2V_{\lambda/8}^2 - V_{\min}^2)^{1/2} \quad (2.13).$$

- Después de calcular el valor de SWR, es necesario calcular el coeficiente de presión de reflejada (R) mediante la Ecuación (2.14).

$$R = [SWR(0) - 1] / [SWR(0) + 1] \quad (2.14)$$

El coeficiente de absorción acústica ( $\alpha_n$ ) involucra un balance de energías entre la energía reflejada y la absorbida y se calcula con la Ecuación (2.15) .

$$\alpha_n = 1 - |R|^2 \quad (2.15)$$

Para el cálculo del coeficiente de absorción acústica es necesario obtener el patrón de ondas estacionarias característico para cada banda de frecuencia de octava. El coeficiente de absorción acústica de cada formulación, se determinó a partir del promedio de 3 muestras con la misma formulación y los valores obtenidos para cada muestra fueron el resultado del promedio de 3 repeticiones.

Para englobar toda la información del análisis acústico de cada formulación que contiene EPS, se utilizó el valor NRC (Coeficiente de Reducción del Ruido). Este valor, se refiere al promedio de los valores de absorción acústica que se obtienen en las bandas de octava de 250, 500, 1,000 y 2,000 Hz con redondeo a 0.05.

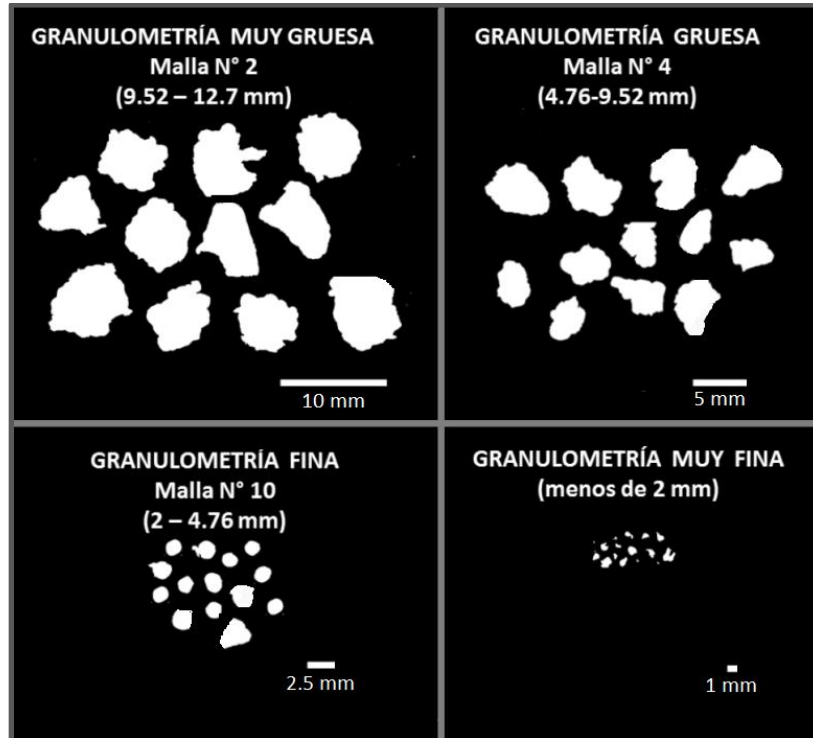
Se utilizaron materiales de referencia para evaluar la confiabilidad del tubo de ondas estacionarias. Los materiales que se utilizaron como referencia fueron la fibra de vidrio 701 de 25 y 50 mm, y una placa circular de poliestireno expandido de 35 mm de espesor. Los resultados fueron favorables para avalar la utilización del equipo y se pueden ver en el reporte del Anexo C <sup>[50]</sup>.

El diseño factorial se realizó exclusivamente para las muestras que contienen EPS. Se evaluó para las muestras con EPS que tienen acabado superficial cementicio y para las que tienen acabado superficial con partículas de EPS expuesto en una de sus caras.

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Molido y tamizado del poliestireno expandido de desecho.

En la Figura 3.1 se muestran las fotos de los tamaños de partícula obtenidos en cada malla del proceso de tamizado.

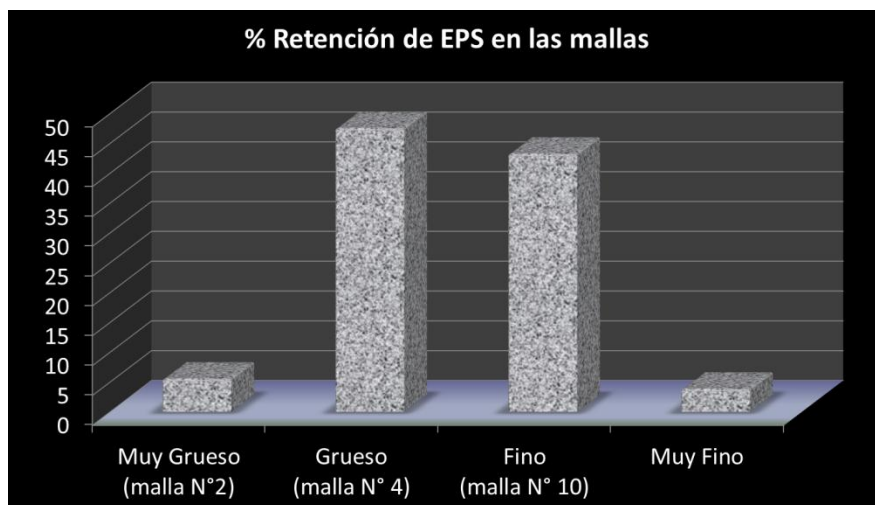


**Figura 3.1.** Representación de tamaños de partícula obtenidos en el proceso de tamizado.

Las partículas más pequeñas son las que pasaron la malla N°10. Estas partículas se descartaron para la investigación porque resultaron muy sensibles al viento, de difícil manipulación y obtención muy lenta.

Las partículas atrapadas entre la malla N° 4 y N° 10 tienen un diámetro máximo de 4.76 mm. Estas partículas son las que presentaron las características más adecuadas para ser consideradas como la granulometría fina ya que su obtención es más abundante y su manipulación no es tan complicada.

Las partículas atrapadas entre la malla N° 2 y la N° 4 tienen un diámetro máximo de 9.52 mm. Estas partículas presentaron material abundante dentro de las mallas y su manipulación es muy fácil, por lo que fueron consideradas como las de granulometría gruesa. En la Figura 3. 2 se puede observar el porcentaje de retención de EPS en las mallas utilizadas.



**Figura 3. 2.** Porcentaje de retención de EPS en cada una de las mallas utilizadas.

### 3.2 Prueba de fluidez de las mezclas formuladas.



En la Tabla 3. 1. Resumen de los resultados de la prueba de fluidez de cada formulación. se muestran los resultados obtenidos de la fluidez o trabajabilidad de cada mezcla cuando se mantiene constante la cantidad de cemento, polvo fino y agua. En el Capítulo 2, se mencionó que la norma ASTM C-1437 establece una trabajabilidad óptima cuando se tiene un porcentaje de fluidez del  $110 \pm 5 \%$ .



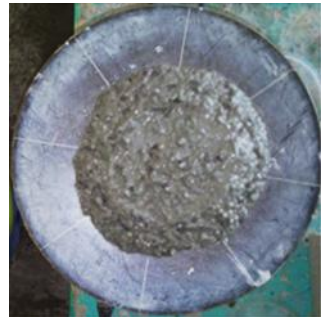
La mezcla que no contiene partículas de EPS, resultó con un porcentaje de fluidez de 130 %, esto se debe a que el agregado de polvo fino de piedra caliza es insuficiente para darle viscosidad a la mezcla.

En las mezclas que contienen EPS se observó que el porcentaje de fluidez disminuye considerablemente conforme se le agrega mayor porcentaje de EPS a la mezcla. El porcentaje de fluidez disminuye aproximadamente 20 % cuando se le agrega 0.8 % de EPS a la mezcla y cerca de un 70 % cuando se le agrega 1.6 % de EPS.

Cuando se comparan las mezclas que contienen granulometría fina y granulometría gruesa de EPS, se tiene un porcentaje ligeramente mayor en la granulometría fina, ya que la granulometría gruesa empieza a actuar como si fuera un agregado grueso ofreciéndole mayor estabilidad dimensional a la mezcla y por tanto menor porcentaje de fluidez.

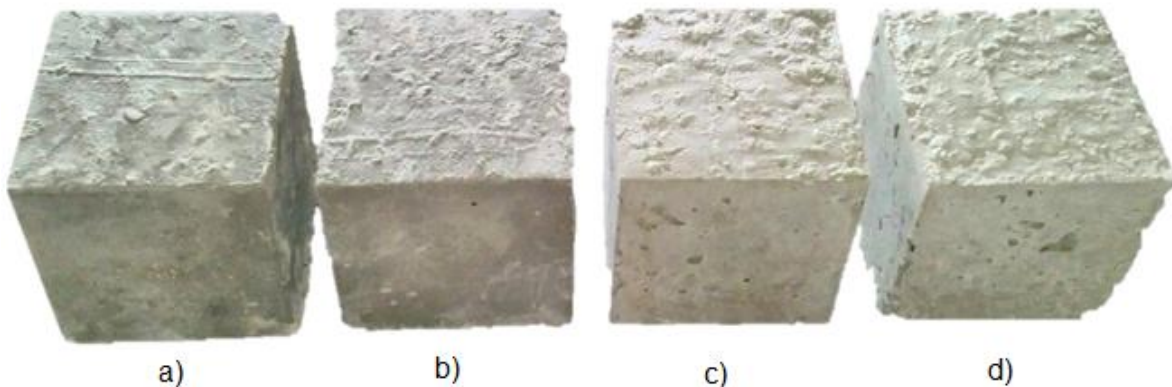
**Tabla 3. 1.** Resumen de los resultados de la prueba de fluidez de cada formulación.

Formulación	Promedio de diámetros (mm)	Porcentaje de fluidez (%)	Imagen
Referencia	232.25	130	
0.8 % EPS-G	201	99 %	

0.8 % EPS-F	205	103 %	
1.6 % EPS-G	141	39.6 %	
1.6 % EPS-F	147.75	46.28 %	

Las mezclas que contienen 0.8 % de EPS resultaron con valores de fluidez cercanos a lo que recomienda la norma, mientras que las formulaciones con contenido de 1.6 % de EPS obtuvieron valores muy bajos, sin embargo, no se descartó la utilización de las mezclas con 1.6 % de EPS porque el EPS queda embebido dentro del cemento y tampoco se aumentó la cantidad de agua, porque a mayores valores de la relación agua/cemento, la resistencia máxima tiende a disminuir.

Las mezclas utilizadas en las pruebas de fluidez, son las que se utilizaron para fabricar las muestras cúbicas para las pruebas mecánicas a compresión. La Figura 3.3 muestra los especímenes representativos de cada formulación después de 24 horas de curado. Se puede observar que las muestras que contienen 1.6% de EPS presentan algunas imperfecciones (huecos) en las caras del cubo, y es aun mas notorio en aquellas que contienen el EPS grueso. Esto hace pensar que a esas porporciones, el EPS empieza a ser excesivo.



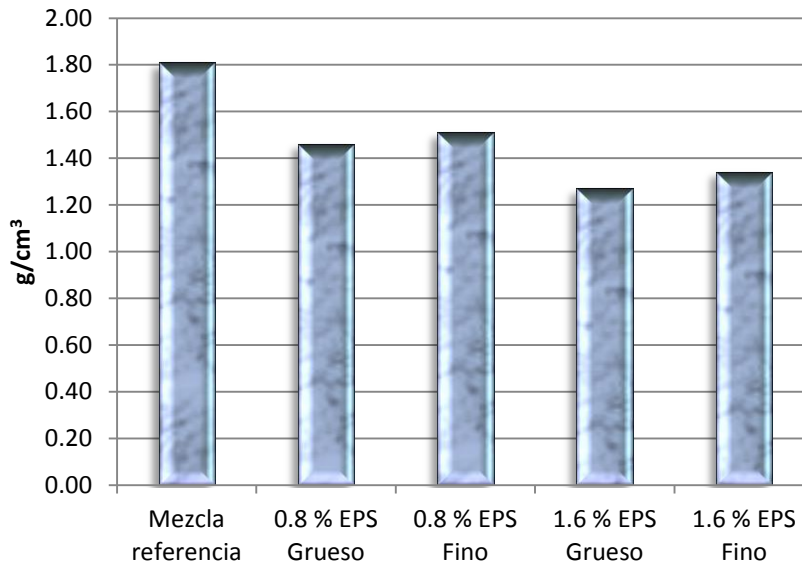
**Figura 3. 3.** Especímenes cúbicos de cada formulación, donde a) Mezcla con 0.8 % de EPS grueso, b) Mezcla con 0.8 % de EPS fino, c) Mezcla con 1.6 % de EPS grueso y d) Mezcla con 1.6 % de EPS fino.

### **3.3 Densidad aparente de las formulaciones.**

La Figura 3.4 muestra la densidad aparente de cada formulación después de eliminarle la humedad en un horno durante 3 días a 60 °C. Se puede ver que existe diferencia significativa entre la mezcla de referencia y las formulaciones con EPS. La densidad aparente disminuye en relación a la mezcla de referencia en un 19 % cuando le agrega un porcentaje de 0.8 % de EPS Grueso y un 17 % cuando se le agrega 0.8 % de EPS Fino. Con respecto a las formulaciones con 1.6 % de EPS, la mezcla que contiene granulometría gruesa disminuye en un 30 %, mientras que la mezcla con granulometría fina disminuye en un 25 %.



La granulometría gruesa tiene mayor influencia sobre la granulometría fina para reducir la densidad aparente, y se atribuye a que las partículas gruesas de EPS tienen más aire atrapado.



**Figura 3. 4.** Densidad aparente de las muestras.

### **3.4 Pruebas de compresión.**

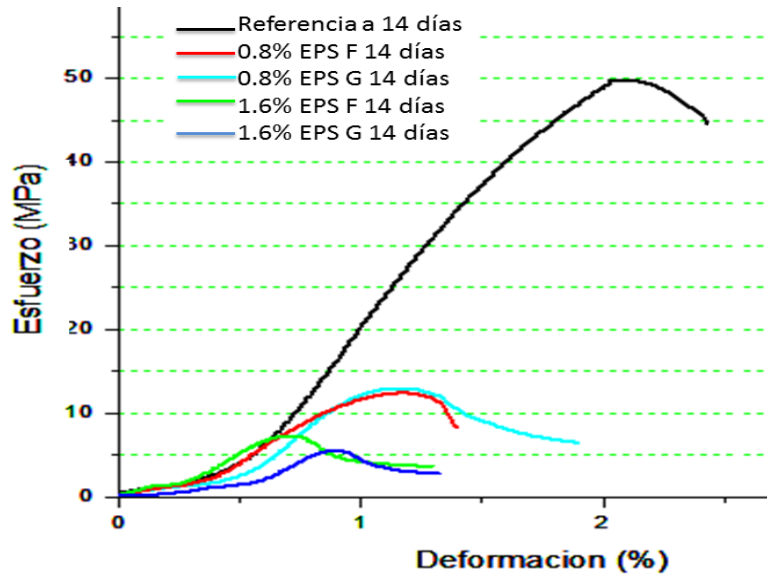
#### **3.4.1. Pruebas de compresión de cada formulación después de 14 días de curado en la tina de cal.**

La formulación 1:1 cemento y polvo fino con una relación agua/cemento de 0.5 obtuvo excelentes propiedades mecánicas a compresión (50 MPa) considerando que la resistencia de un mortero de buena calidad oscila entre los 17 MPa <sup>[51]</sup>. Las excelentes propiedades que se obtuvieron se deben a que es un mortero rico en cemento, sin embargo, no conviene utilizarlo en las construcciones convencionales porque sería muy costoso, pero es ideal cuando se mezcla con el EPS, ya que este polímero reduce el uso del mortero y a la vez le proporciona volumen, ligereza y aislamiento térmico.

La importancia de utilizar este mortero de alta resistencia con el EPS, se debe a que este polímero puede reducir la resistencia en más de un 70 % al incorporarse en la mezcla. La Figura 3.5 muestra las curvas típicas de esfuerzo-deformación de las formulaciones, se puede observar la diferencia que guarda la mezcla de referencia con las mezclas que contienen EPS de desecho, sin embargo, los morteros aligerados con EPS, si se pueden considerar como morteros de recubrimiento, ya que la norma ASTM C-270 acepta morteros incluso con una resistencia de 0.5 MPa.

Las curvas esfuerzo-deformación de todas las formulaciones, muestran un aumento rápido en la deformación en los valores iniciales de carga. Este comportamiento se trata de una deformación sin cambio de volumen característico de los materiales geológicos como las rocas y se debe a la interacción de la placa de carga con respecto a las irregularidades y desniveles que presenta la superficie del material.

El módulo de elasticidad se obtiene de la pendiente de la gráfica esfuerzo-deformación en la zona elástica (segmento lineal). Como experimentalmente no se obtuvo una gráfica con zona elástica bien definida, se tomaron los puntos que tuvieron la mayor tendencia lineal de la zona plástica, para indicar el comportamiento mecánico referente a la rigidez del material conforme se le añade EPS a la mezcla.



**Figura 3. 5.** Curvas típicas de esfuerzo deformación de las muestras estudiadas a 14 días de curado.

Los resultados reportados se basan en el promedio del resultado de al menos dos muestras, tal como lo señala la norma ASTM C-109 <sup>[52]</sup>. En la

Tabla 3.2 se muestran los resultados promedio de la resistencia y el módulo de elasticidad correspondiente a cada formulación después de 14 días de curado.

**Tabla 3.2.** Esfuerzo máximo y módulo de elasticidad de las formulaciones después de 14 días de curado.

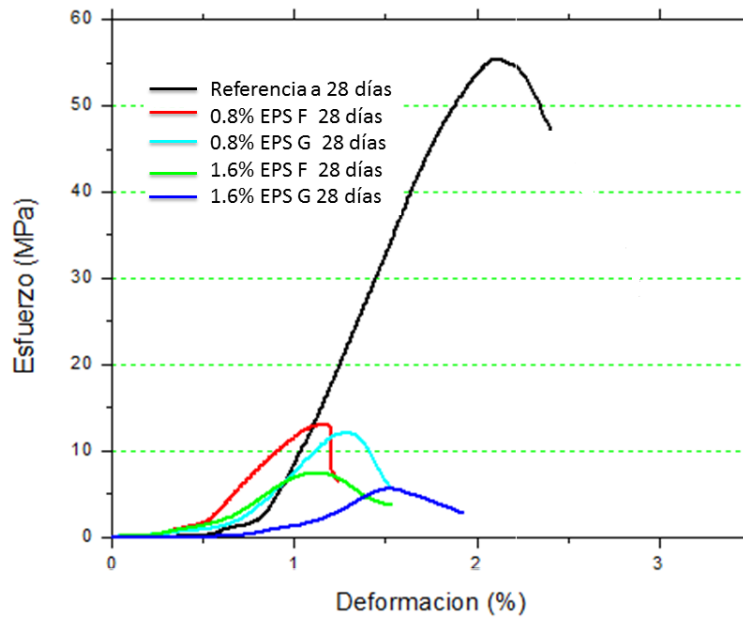
Muestra	Resistencia (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
Referencia	50 ± 0.25	35.56 ± 3.3
0.8 % EPS Grueso	12.97 ± 0.27	19.34 ± 3.66
0.8 % EPS Fino	11.71 ± 0.99	19.55 ± 2.53
1.6 % EPS Fino	7.22 ± 0.06	14.86 ± 0.78
1.6 % EPS Grueso	5.25 ± 0.40	12.28 ± 1.36

Se observa que las mezclas con proporciones de 0.8 % de EPS tienen valores prácticamente iguales, una vez más se manifiesta que a estos porcentajes de EPS se obtienen valores no significativos. La mezcla con 0.8% EPS fino, disminuyó su resistencia a compresión en un 76 % en relación a la mezcla de referencia, la mezcla con 1.6 % EPS fino disminuyó en un 85 % y la mezcla con 1.6 % de EPS grueso en un 90 %. El módulo elástico de cada formulación indica que a mayor cantidad de EPS la mezcla se vuelve menos rígida.

La incursión del EPS a las mezclas propuestas, indica que este polímero expandido funciona meramente como relleno, lo cual se puede interpretar dentro del mortero, como espacios vacíos o macrocavidades que debilitan al material de construcción. Debido a lo anterior, es importante encontrar una relación de mezcla que permita al mortero, ser útil para una aplicación específica, por ejemplo: el de acabados. Este tipo de acabado se espera ofrezca mayor aislamiento térmico, aprovechable para aplicaciones en viviendas.

#### **3.4.2. Pruebas mecánicas a compresión de cada formulación a los 28 días de curado.**

En la Figura 3. 6 se observan los resultados de las pruebas de compresión de las de todas las formulaciones después de 28 días de curado en un contenedor saturado de cal. Para todas las formulaciones, el aumento en la resistencia a los 28 días es mínima en comparación al curado de 14 días, esto quiere decir que la presencia de EPS acelera el proceso de curado debido a su baja absorción de agua y que a su vez, sustituye espacios importantes dentro de la mezcla donde se dan las reacciones químicas correspondientes al curado. La Tabla 3.3 permite comparar con valores numéricos los resultados.

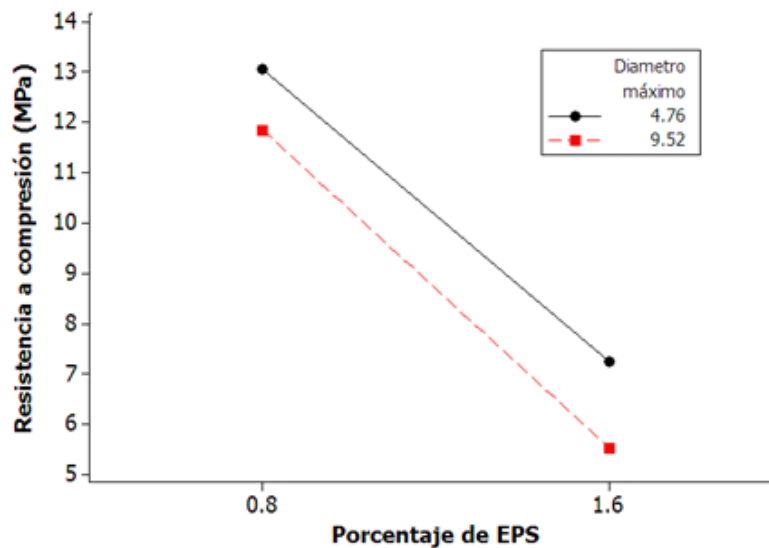


**Figura 3. 6.** Gráficas esfuerzo-deformación de las formulaciones a 28 días de curado.

**Tabla 3.3.** Valores comparativos del esfuerzo máximo y el módulo de elasticidad de las formulaciones después de 14 y 28 días de curado.

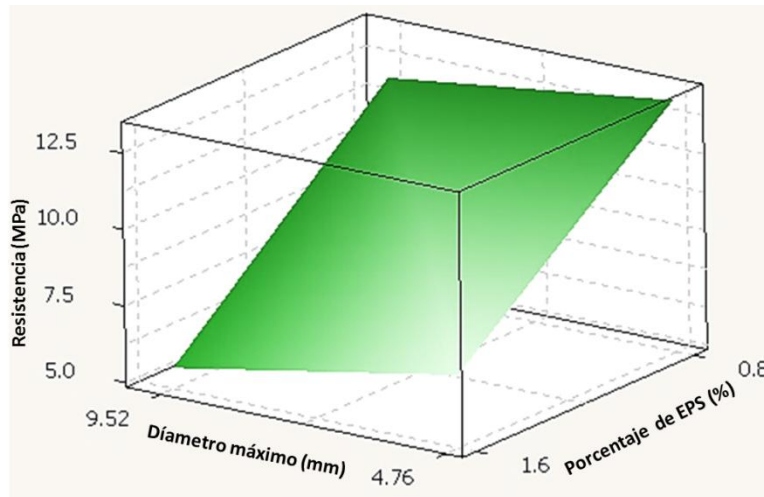
Muestra	14 días		28 días	
	Resistencia (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Resistencia (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
Referencia	50 ± 0.25	35.56 ± 3.3	53.29 ± 3	45.85 ± 2.43
0.8 % EPS Grueso	12.97 ± 0.27	19.34 ± 3.66	11.86 ± 0.24	20.82 ± 1.05
0.8 % EPS Fino	11.71 ± 0.99	19.55 ± 2.53	13.07 ± 0.38	20.64 ± 0.72
1.6 % EPS Fino	7.22 ± 0.06	14.86 ± 0.78	7.24 ± 0.20	10.37 ± 1.22
1.6 % EPS Grueso	5.25 ± 0.40	12.28 ± 1.36	5.53 ± 0.39	14.05 ± 3.32

En la Figura 3.7 se puede observar los resultados del diseño factorial  $2^2$ , y se demuestra que no existe interacción entre los factores de estudio en la mezcla, ya que cuando cambia el factor del porcentaje de EPS de su nivel bajo a su nivel alto, la respuesta disminuye sin importar en qué nivel este el factor de la granulometría.



**Figura 3. 7.** Gráfica de interacción de factores donde la variable de respuesta es la resistencia a compresión.

Para evaluar que factor tiene más influencia en la resistencia mecánica, se realizó una gráfica de superficie de respuesta, donde la variable de respuesta es la resistencia mecánica y los factores son el porcentaje de EPS en la mezcla y la granulometría del EPS. La Figura 3. 8 muestra la gráfica de superficie de respuesta.

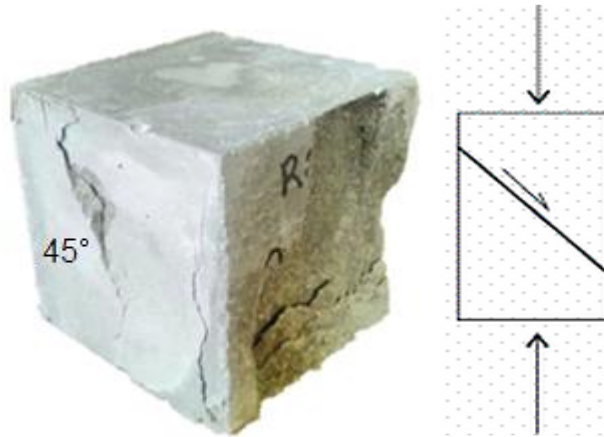


**Figura 3. 8.** Gráfica de superficie de respuesta para determinar que factor es más influyente en la resistencia mecánica a compresión a 28 días de curado.

Esta gráfica permite observar que los tamaños de partícula no tienen efectos sobresalientes sobre la resistencia mecánica a compresión, esto hace suponer que los concentradores de esfuerzo que se generan por la granulometría fina no son lo suficientemente bajos para lograr mayor resistencia que los concentradores de esfuerzo que provoca la granulometría gruesa.

### 3.4.3. Modos de falla de las muestras cúbicas después de los ensayos a compresión.

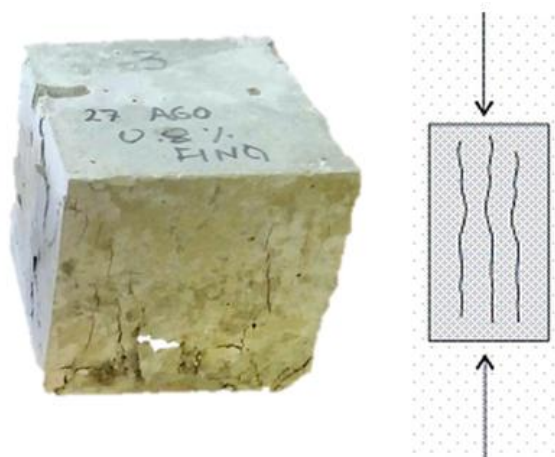
El análisis de fractura confirma el comportamiento de las curvas esfuerzo-deformación. Las muestras de referencia exhiben una fractura frágil por cizallamiento, que se debe a la rápida propagación de las microfisuras por la alta presión de confinamiento, una característica común de este tipo de fractura es que ocurre un desliz con un ángulo de  $45^\circ$  aproximadamente, también se le conoce como fracturas tipo Mohr-Coulomb <sup>[53, 54]</sup> y se muestran en la Figura 3.9.



**Figura 3.9.** Tipo de fractura por cizallamiento de la muestra sin EPS.

La fractura por cizallamiento, normalmente ocurre a lo largo de planos cristalográficos específicos denominados planos de fractura que son perpendiculares a la tensión aplicada. Tiene como desventaja principal la carencia de deformación debido a la rápida propagación de las microgrietas enlazadas que conllevan a la rotura de la probeta.

Las muestras que contienen EPS representan una fractura tipo extensional, que ocurre porque las partículas de EPS le disminuyen la presión de confinamiento al material compuesto interrumpiéndole la dirección de propagación de la fractura a  $45^\circ$  <sup>[55]</sup>. La Figura 3. 10 muestra la fractura de tipo extensional.



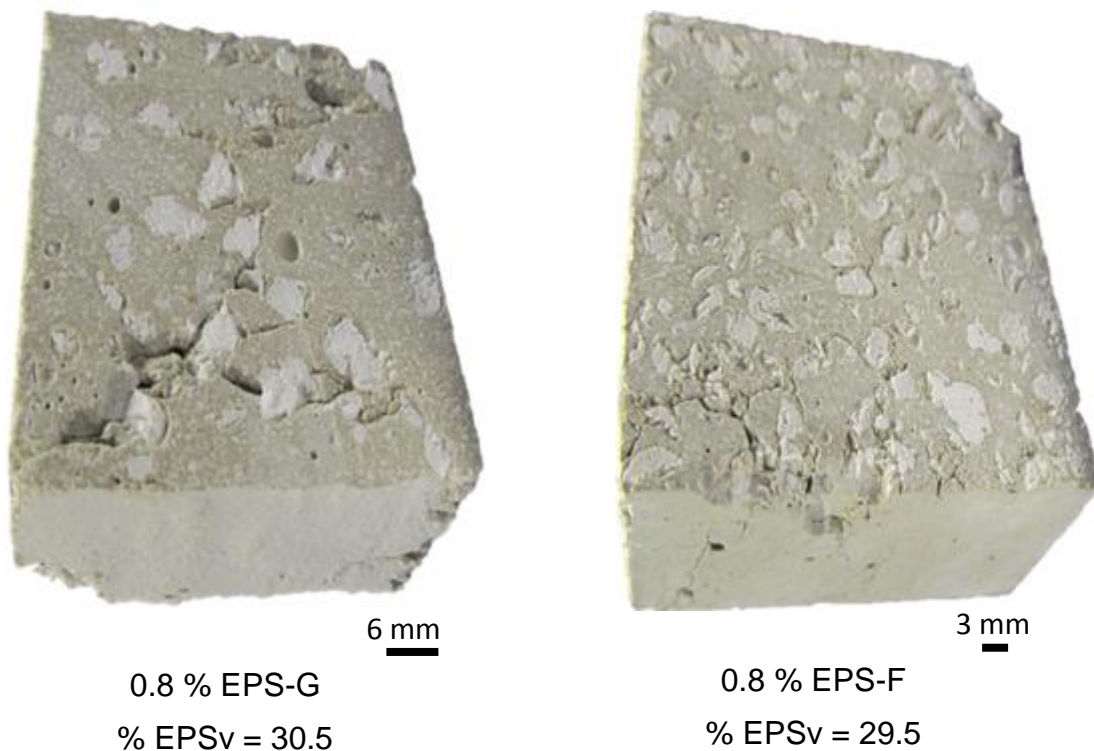
**Figura 3. 10.** Tipo de fractura extensional de las muestras con EPS.

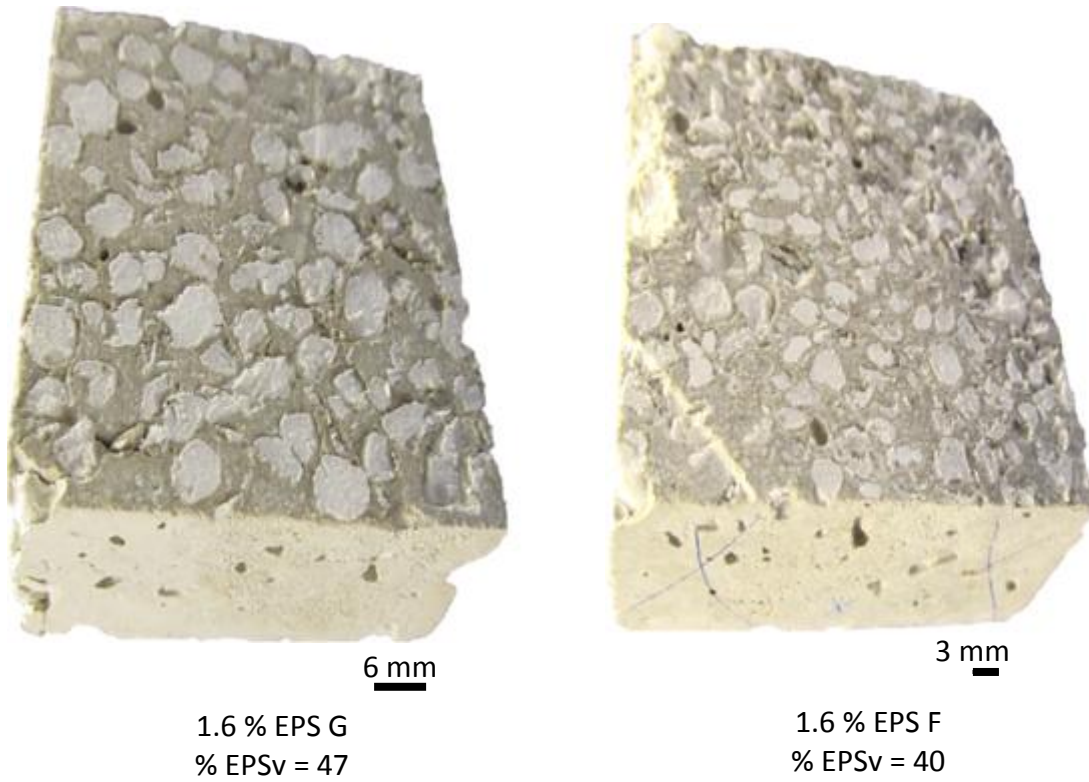


La fractura de tipo extensional presenta ventajas con respecto a la fractura de cizallamiento en el sentido de que le brinda al material cierto grado de ductilidad, y también le reduce la velocidad de propagación de las grietas que ocasionan la fractura catastrófica.

#### 3.4.4. Distribución del EPS en la matriz cementicia.

Los cortes transversales de las muestras cúbicas ensayadas a compresión permiten observar la distribución del relleno de EPS en la mezcla, destacando su flotabilidad a migrar hacia la superficie. La mezcla con 0.8 % EPS-G, fue la mezcla que se observó con menos distribución, mientras que la mezcla con 0.8 % EPS-F si mostró mejor distribución, resaltando el efecto positivo de la granulometría fina. La distribución del EPS contribuye a aumentar las propiedades anisotrópicas del material compuesto para que pueda tener el mismo comportamiento en todas sus direcciones. La Figura 3.11, muestra los cortes transversales y su fracción volumétrica de EPS de acuerdo a la Ecuación (2.2) señalado en el Capítulo 2.



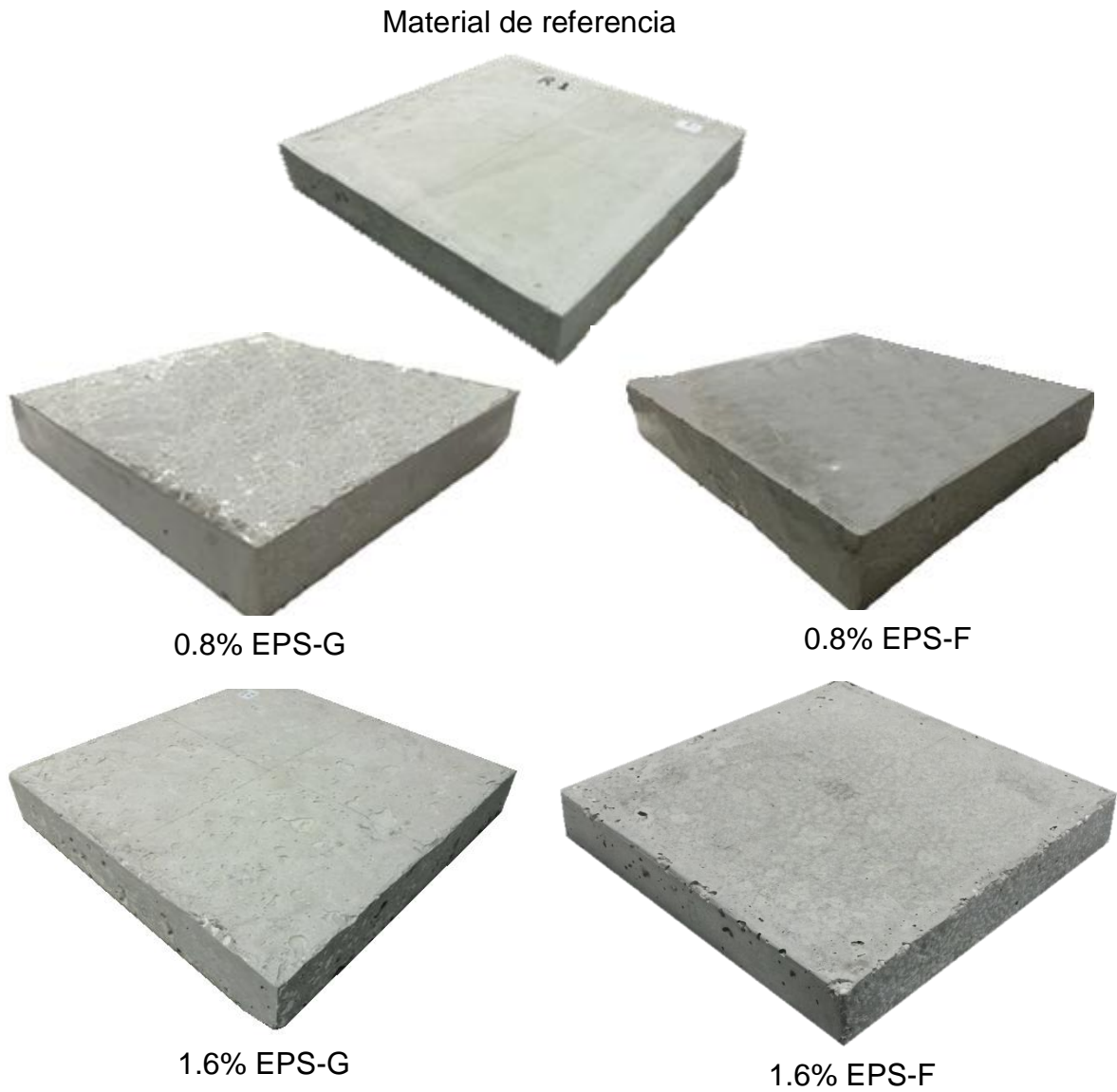


**Figura 3.11.** Cortes transversales de las muestras cúbicas ensayadas a compresión.

### 3.5. Pruebas térmicas.

#### 3.5.1. Análisis térmicos y sus mecanismos de transferencia de calor.

En la Figura 3.12 se muestran las placas que se obtuvieron de acuerdo a su granulometría y proporción de EPS.

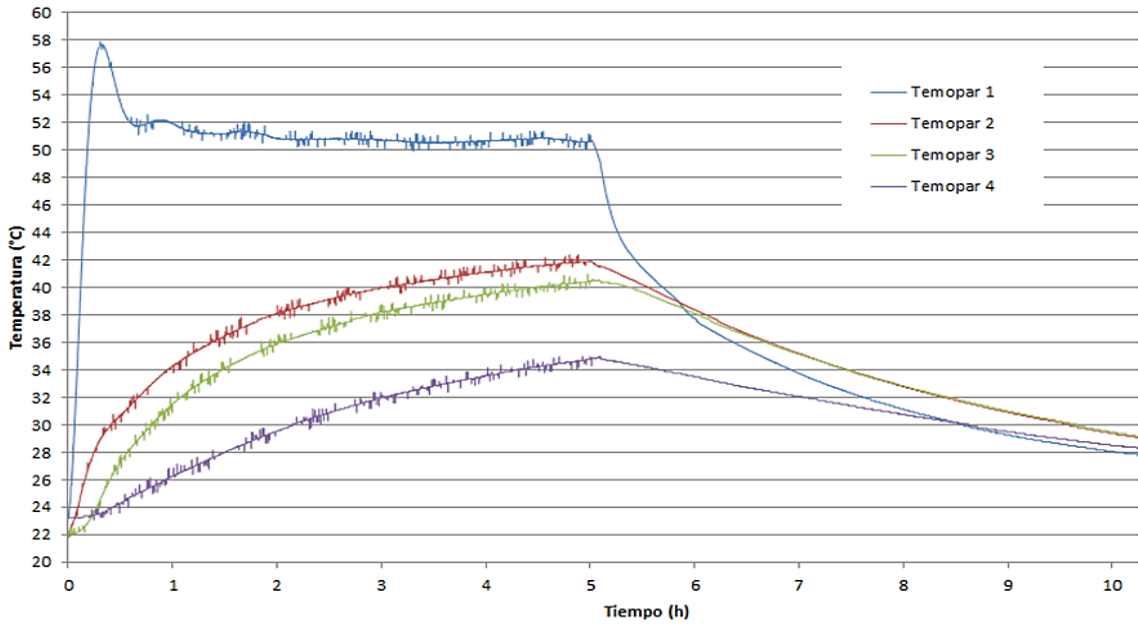


**Figura 3. 12.** Placas para pruebas térmicas.

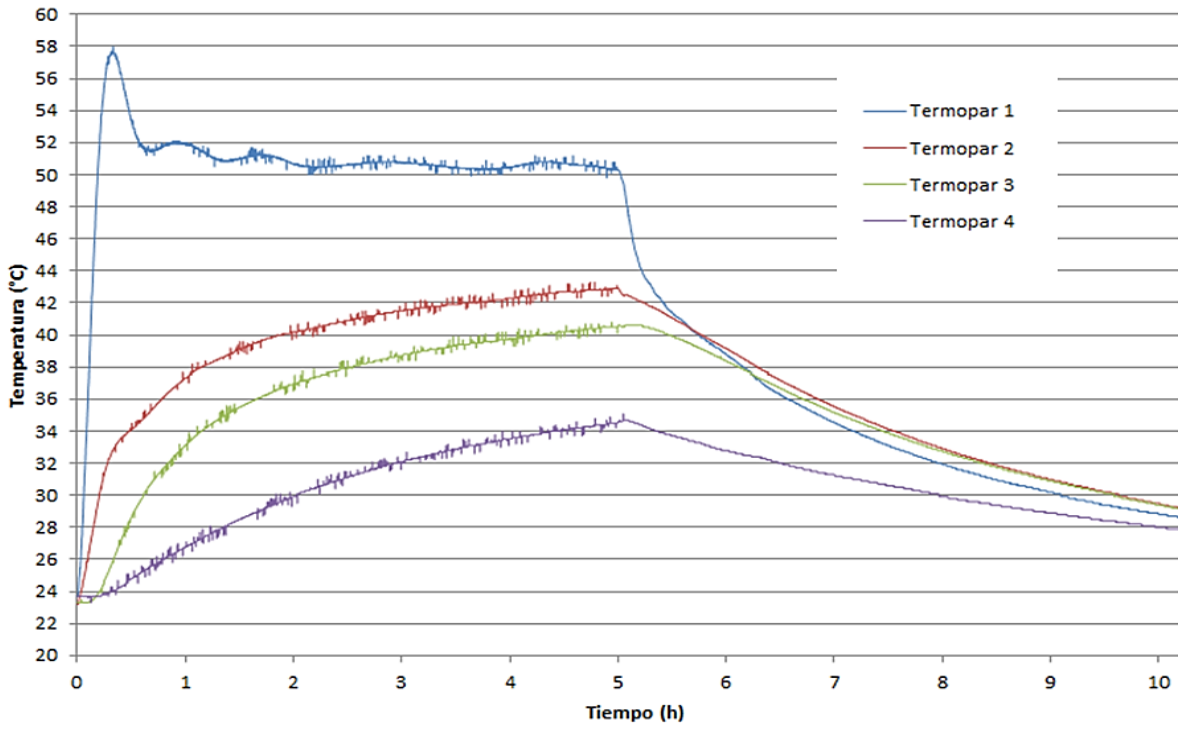
A continuación se presentan las gráficas de los registros de temperaturas de los termopares que se obtuvieron con el prototipo de cámara térmica aislada (Figuras. 3.13-3.17). Se puede ver que la estabilización del controlador de temperatura a 50°C se logró después de 2 horas.

En el intervalo donde la temperatura del controlador se mantiene constante a 50°C (3 a 5 horas), se puede observar un comportamiento creciente y proporcional en los registros de los termopares 2, 3 y 4. Este comportamiento señala que el material acumula energía calorífica de forma proporcional, sin embargo, no se alcanzó el equilibrio térmico en ninguna de las placas después de 5 horas exposición a la radiación de los focos.

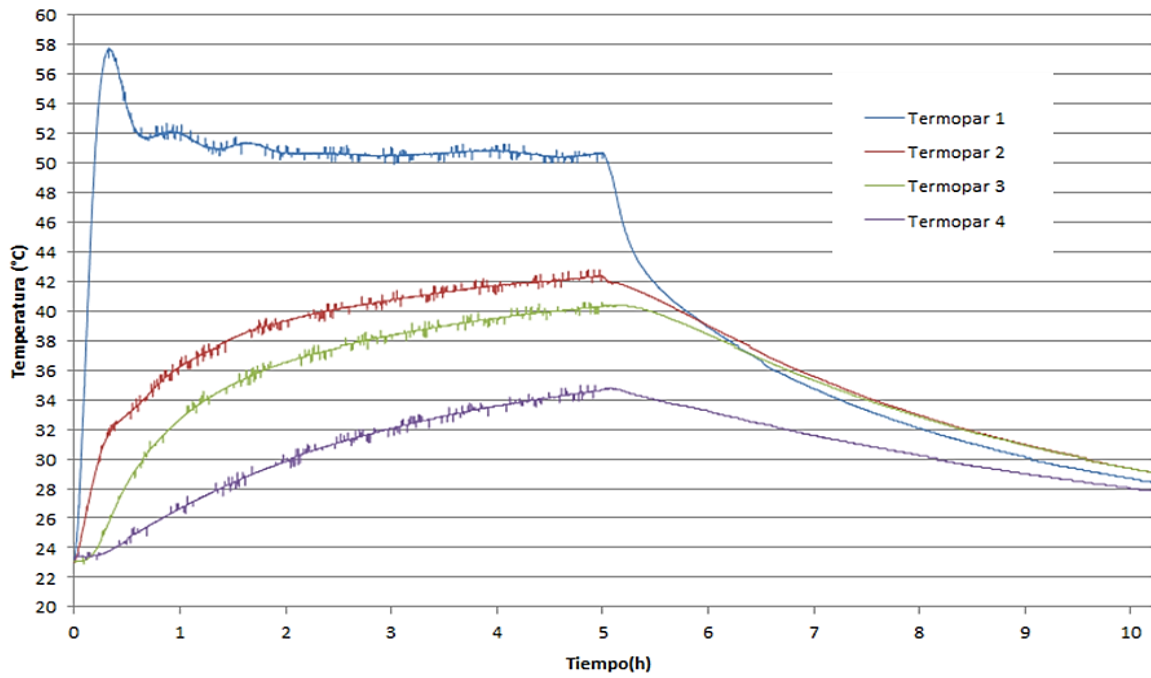
El comportamiento que se presenta después de interrumpir la fuente de calor, indica que la transferencia de calor en la placa de referencia es mayor que en las placas que contienen EPS, ya que el termopar 1, que representa al ambiente exterior, registra cambios que indican pérdidas de temperatura con mayor rapidez que la superficie de la placa, de igual manera, la transferencia de calor para alcanzar el equilibrio térmico entre la parte superior e inferior de la placa se alcanzó más rápido en la placa de referencia y más lentamente en las placas con 1.6 % de EPS. El equilibrio térmico entre el ambiente exterior e interior de la cámara térmica, se representa por los termopares 1 y 4 respectivamente, se alcanzó en la placa de referencia alrededor de las 8 horas y media, mientras que en la placas con 0.8 % EPS no se alcanzó después de las 10 horas, y mostró una diferencia poco menor a 1°C, mientras que las placas que contienen 1.6 % EPS mostraron una diferencia de casi 2°C, esto indica que la buena dispersión de las altas concentraciones de EPS, logran distribuir el aire encapsulado que tienen las partículas de EPS, y esto contribuye para aumentar el aislamiento térmico, ya que la conductividad térmica es la resultante de la conductividad de la estructura cementicia más la del aire que tiene valores muy bajos de 0.02 W/mK [56].



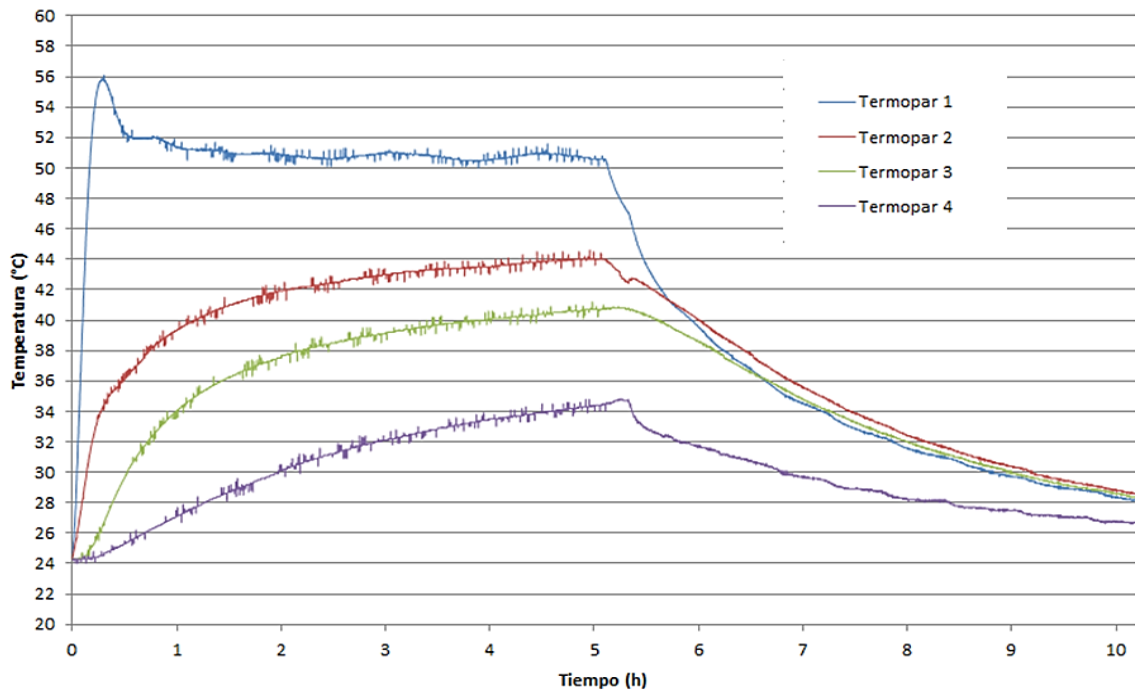
**Figura 3. 13.** Placa de Referencia (cemento – polvo fino de piedra caliza).



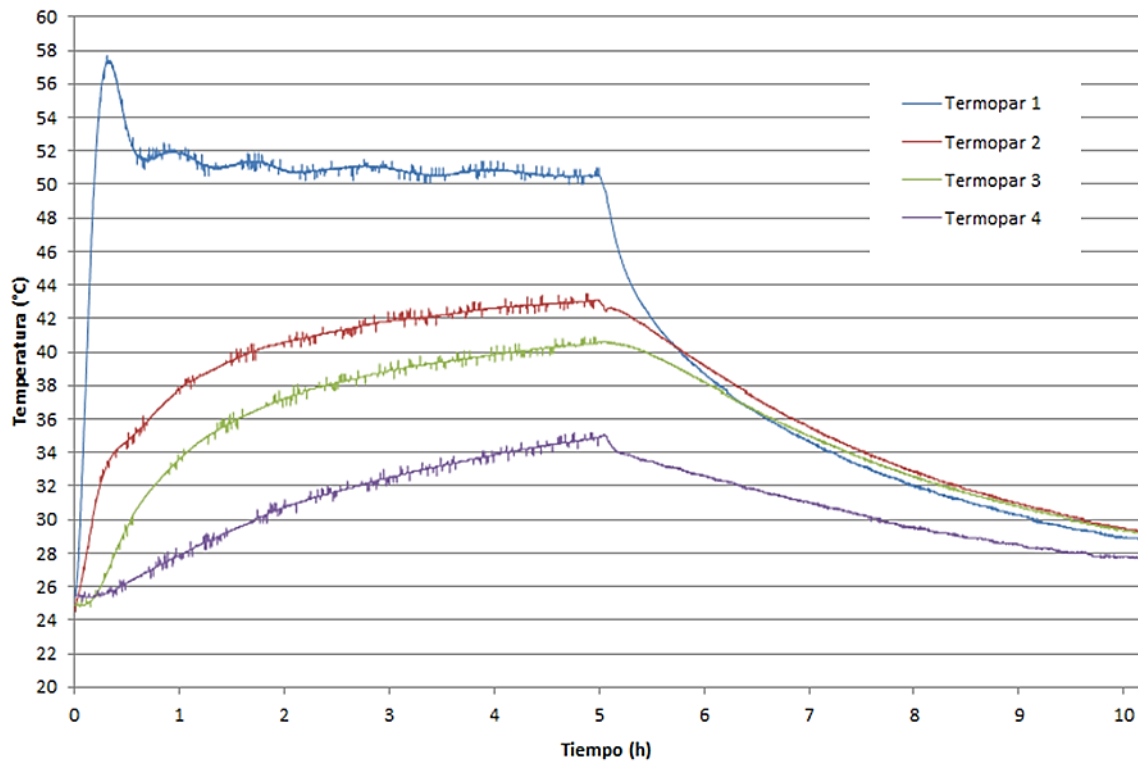
**Figura 3. 14.** Placa 0.8 % EPS-G.



**Figura 3. 15.** Placa 0.8 % EPS-F.



**Figura 3. 16.** Placa 1.6 % EPS-G.



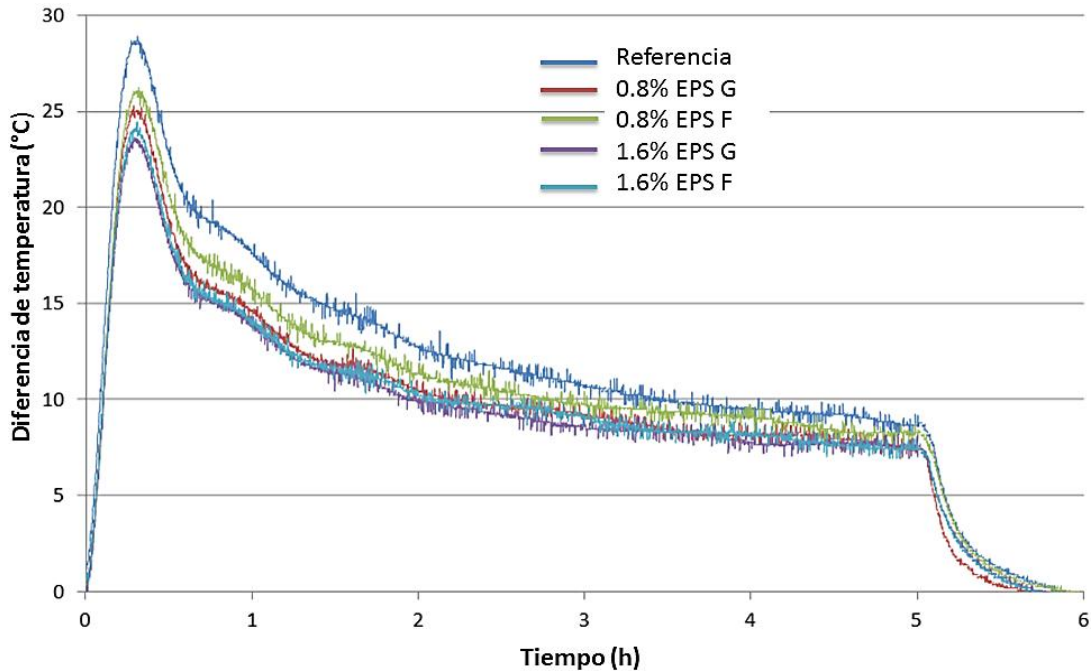
**Figura 3. 17.** Placa 1.6 % EPS-F.

### 3.5.2. Efecto de la transferencia de calor por radiación en los materiales de estudio.

Para evaluar el efecto de la radiación en cada una de las formulaciones, se realiza una gráfica donde se evalúa el diferencial de temperatura de los termopares T1 y T2 en función del tiempo. La Figura 3. 18 muestra el gráfico correspondiente para cada una de las formulaciones. La mezcla de referencia tiene mayor diferencia de temperatura, por ser un material completamente cerámico que tiene una estructura atómica altamente ordenada. Estudios de conductividad térmica en sólidos con estructuras atómicas ordenadas, señalan que las vibraciones de la red de átomos (fonones) son los únicos responsables de la conducción térmica, y a mayor ordenamiento, mayor transferencia de calor existe, esto a su vez, provoca que se almacene la energía calorífica en la parte superficial de la placa ya que la energía se transmite a través de los fonones.

Las partículas de EPS provocan dispersión entre los fonones, lo cual contribuye a disminuir la conductividad térmica, y en este sentido, la energía se queda almacenada en la superficie hasta que pueda ser transmitida [57].

Cuando se interrumpe la fuente de energía del sistema, tarda entre 35 y 50 minutos aproximadamente para que el ambiente exterior (T1) alcance el equilibrio térmico con la superficie de las muestras (T2).



**Figura 3. 18.** Diferencia de temperaturas vs tiempo del T1 y T2 de las placas.

### 3.5.3. Efecto de la transferencia de calor por conducción en los materiales de estudio.

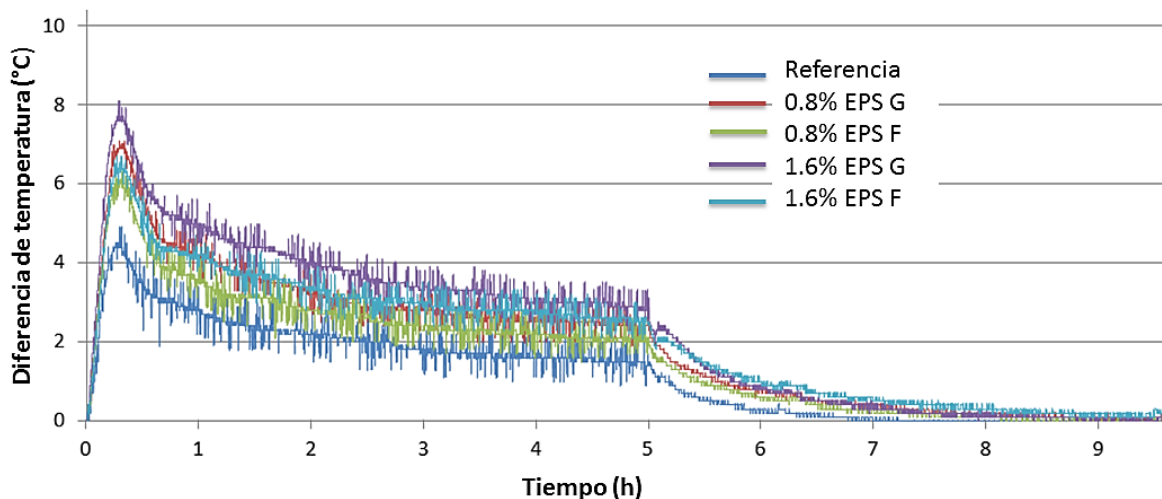
Para evaluar el efecto de la conducción en cada una de las formulaciones, se realiza una gráfica que evalúa el diferencial de temperatura de los termopares T2 y T3 en función del tiempo. La Figura 3.9 muestra el gráfico correspondiente para cada una de las formulaciones. La mayor diferencia de temperatura se traduce en una mayor capacidad de aislamiento térmico, en este sentido, las formulaciones con 1.6 % de EPS, mostraron mayor diferencia de temperatura que las de 0.8 % de EPS después de 2 horas de exposición al calor de los focos.



Esto se debe a que la energía no entra simplemente por un extremo y va directamente en línea recta hasta el otro, si no que más bien, se difunde a través de la muestra experimentando varios eventos de dispersión, en este caso, las partículas de EPS son los elementos que causan dispersión, debido a que pueden generar dislocaciones o defectos puntuales.

De igual manera, el aumento de la fracción volumen de poros conduce a una reducción de la conductividad térmica y los poros de EPS contienen aire, el cual tiene una conductividad muy baja (0.02 W/mK). Por lo tanto, la conductividad térmica en estos materiales tiende a aumentar con la densidad del material [57].

El equilibrio térmico en el material de referencia ocurre aproximadamente 2 horas después de haber interrumpido la fuente de calor, mientras que las formulaciones con EPS, lo alcanzan después de 4 horas aproximadamente.



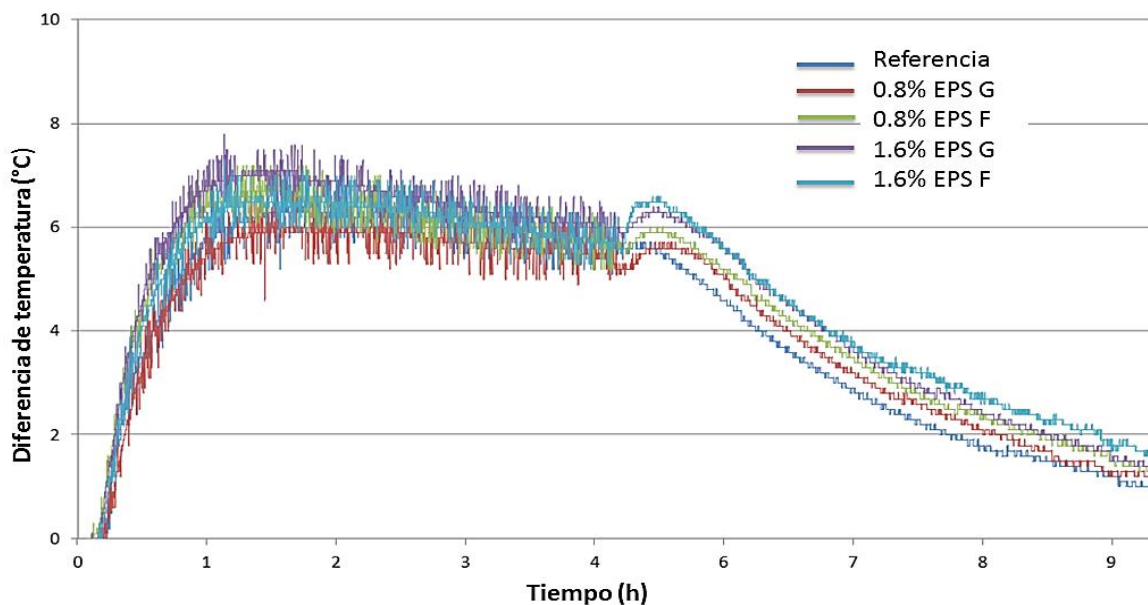
**Figura 3.19.** Diferencia de temperatura vs tiempo del T2 y T3 de las placas.

### 3.5.4. Efecto de la transferencia de calor por convección en los materiales de estudio.

Para evaluar el efecto de la convección en cada una de las formulaciones, se realizó una gráfica que evalúa el diferencial de temperatura de los termopares T3 y T4 en función del tiempo.

La importancia de analizar el efecto de la convección, es para evaluar la energía calorífica que se transmite a través del material de prueba hacia el ambiente interior desde que se interrumpe la fuente de radiación hasta que alcanza su equilibrio térmico con el ambiente interior.

En la Figura 3.20, puede observarse que la fuente de radiación se interrumpió después de 4.5 h, y el comportamiento de los materiales mostró que las formulaciones con mayor cantidad de EPS (1.6 % EPS) son las que transmiten más lento la cantidad de calor desde el material de prueba hacia el ambiente interior. Por otro lado, granulometría fina de EPS tarda más en transmitir el calor que la granulometría gruesa, atribuido a que la granulometría fina genera más dislocaciones y espaciamientos, que son factores importantes en la conductividad térmica de sólidos como lo señala Freddy Fernandez en [57].

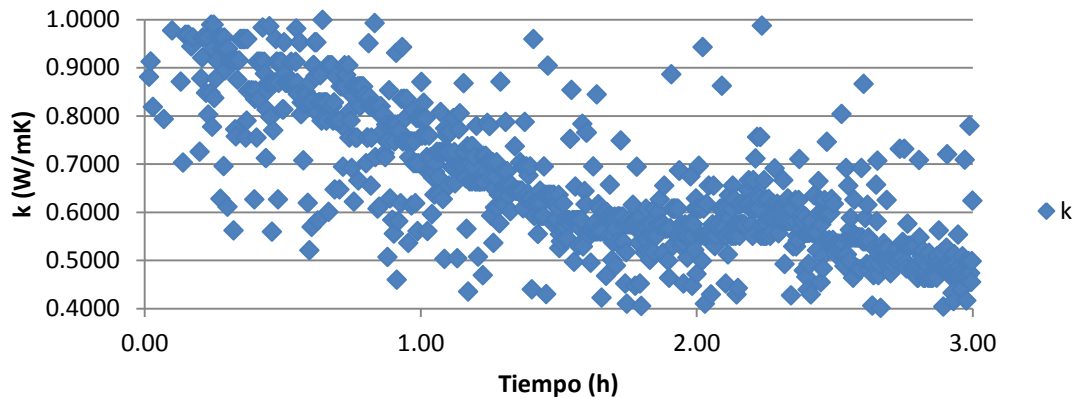


**Figura 3.20.** Diferencia de temperatura vs tiempo del T3 y T4 de las placas.

### 3.5.5. Determinación del coeficiente de conductividad térmica.

En la Figura 3. 21 se puede ver una gráfica representativa del material de referencia, que corresponde al análisis del valor del coeficiente de conductividad térmica (k) durante el intervalo de tiempo donde el controlador de temperatura se mantiene a 50°C.

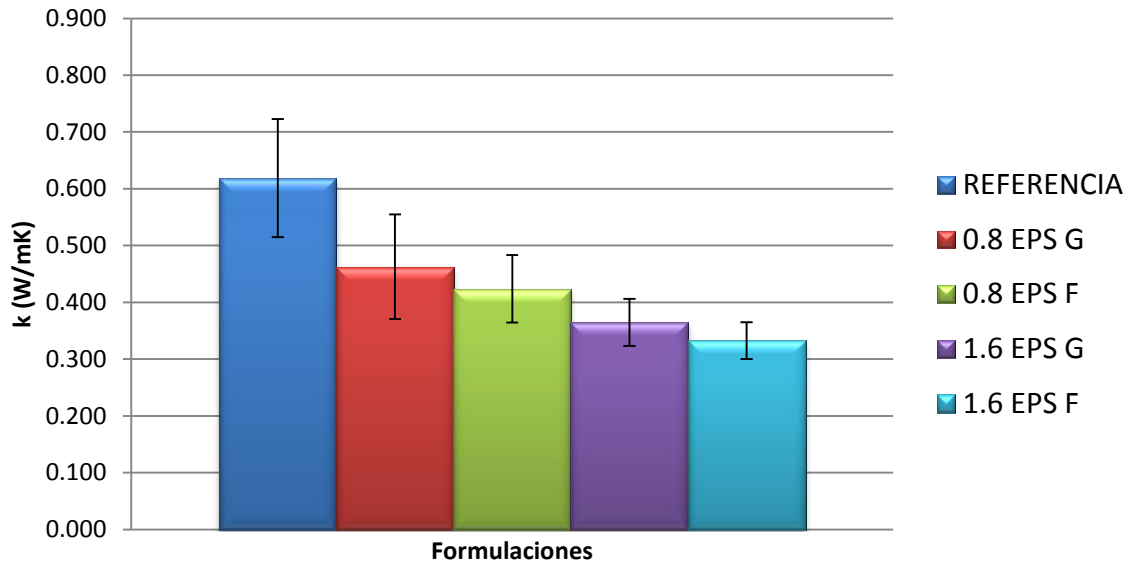
La dispersión de datos que se observa, es promediada para determinar el valor de  $k$  correspondiente. Para este material de referencia se obtuvo un coeficiente de conductividad térmica promedio de  $0.58 \text{ W/mK}$ , lo cual es un valor que se encuentra dentro del rango de los valores reportados para morteros de revoque que pueden ir desde  $0.43$  hasta  $0.72 \text{ W/mK}$  según las características de su composición [13, 15, 43].



**Figura 3. 21.** Valores del coeficiente de conductividad térmica ( $k$ ) de la muestra de referencia.

Las gráficas del coeficiente de conductividad térmica vs tiempo de cada formulación se puede ver en el ANEXO C.

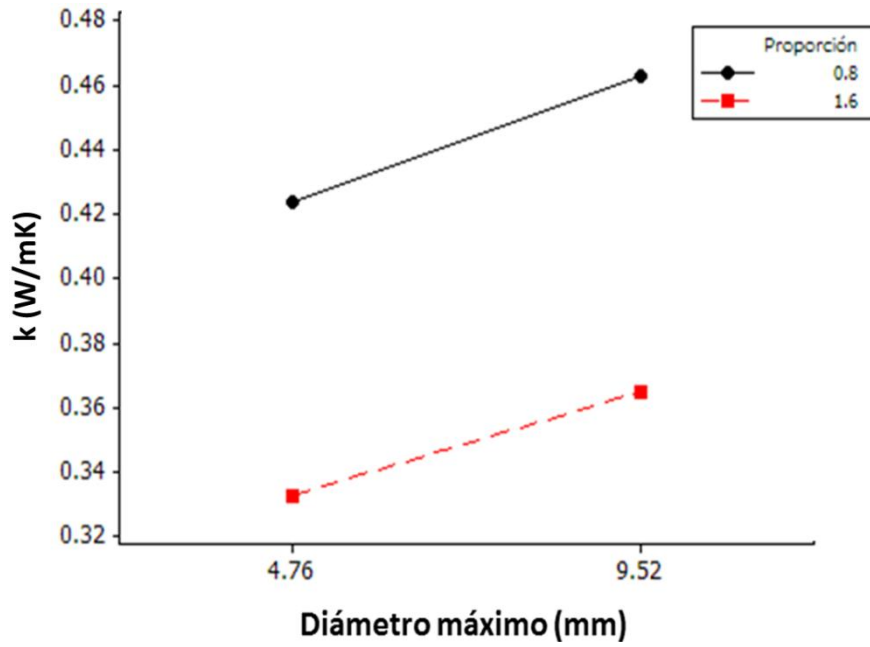
Los resultados del promedio de al menos 2 placas de cada formulación se resumen en la Figura 3. 22. Se utilizó una desviación estándar con un intervalo de confianza del 95 %.



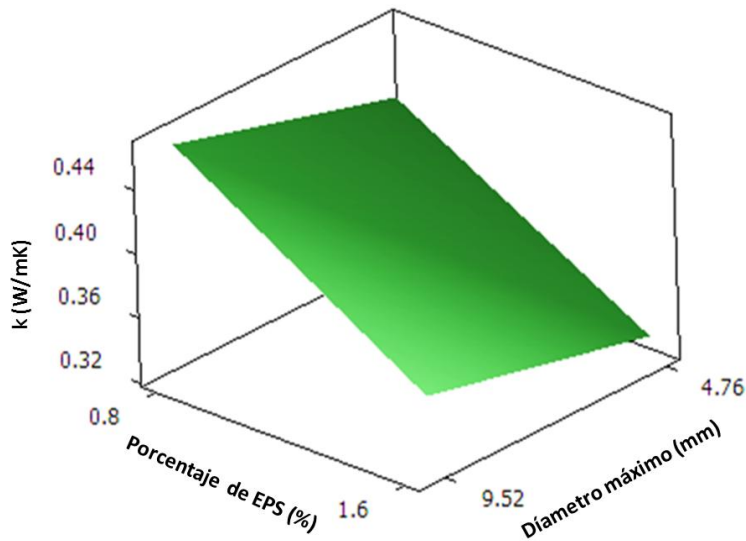
**Figura 3. 22.** Coeficiente de conductividad térmica de las formulaciones.

Las Figuras 3.23 y 3.24 muestran la gráfica de interacciones y la gráfica de superficie de respuesta respectivamente.

En la gráfica de interacciones (Figura 3. 23), se confirma que no existe interacción entre los factores, mientras que la gráfica de superficie de respuesta (Figura 3. 24) permite visualizar que las mejores condiciones de aislamiento térmico van encaminadas hacia las formulaciones que tienen altas proporciones de granulometría fina, seguido por las que tienen altas proporciones de granulometría gruesa.



**Figura 3. 23.** Gráfica de interacciones para valores de  $k$  con respecto al porcentaje y granulometría de EPS.



**Figura 3. 24.** Gráfica de superficie de respuesta para valores de  $k$  con respecto al porcentaje y granulometría de EPS.

### 3.6. Pruebas acústicas.

#### 3.6.1. Placas circulares para pruebas de absorción acústica.

La Figura 3.25 muestra las placas circulares lijadas en una de sus caras de cada formulación.

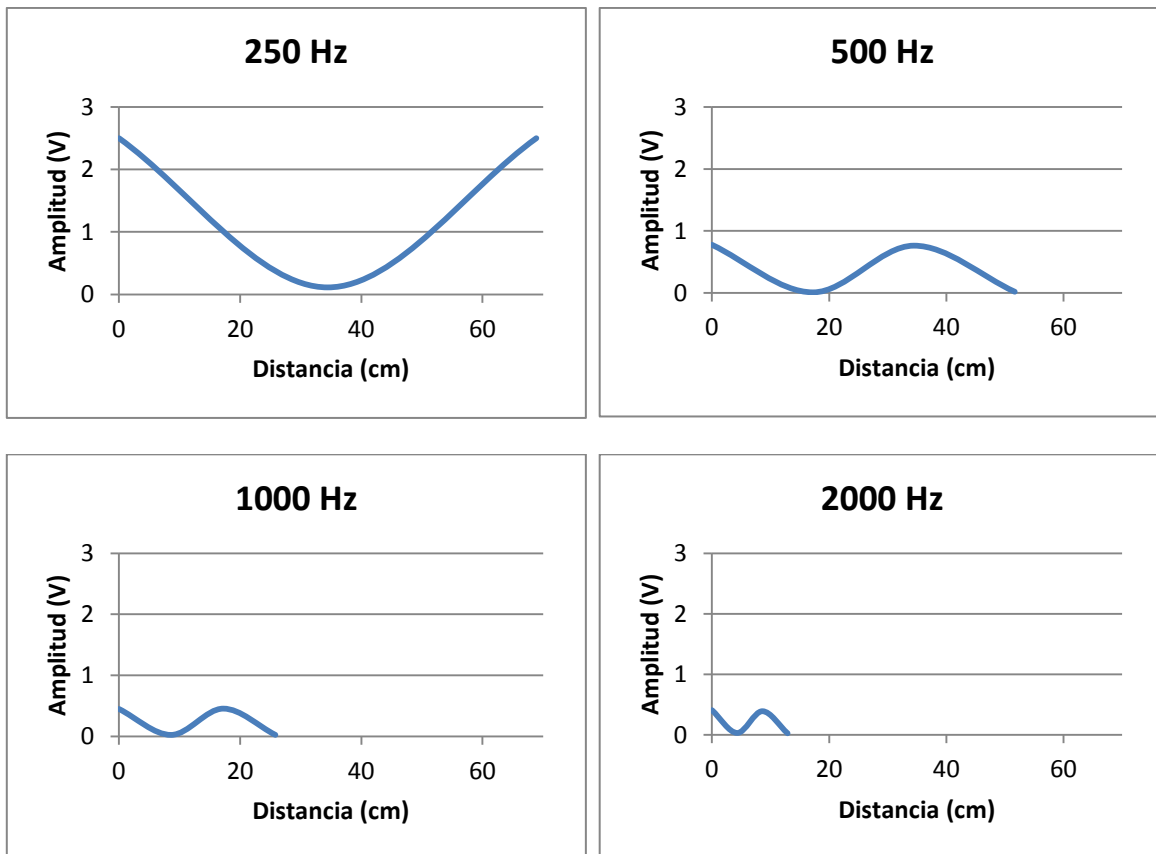


**Figura 3. 25.** Muestras circulares de cada formulación.

La importancia de observar la cara superficial de las placas circulares, es para sustentar los efectos ocurridos en la caracterización acústica, en este sentido, la distribución y la cantidad de EPS que resalta en las caras superficiales son los factores más importantes que contribuyen a los resultados de las pruebas de absorción acústica. Por ejemplo, la placa con 0.8 EPS-G tiene baja distribución y escasa cantidad de EPS en su cara superficial, por lo que se espera que tenga valores de absorción acústica similares a la placa de Referencia. Nuevamente se hizo presente el efecto positivo de la granulometría fina para migrar hacia la cara superficial con buena distribución como lo muestran las placas 0.8 EPS-F y 1.6 EPS-F.

#### 3.6.2 Determinación del coeficiente de absorción acústica.

La Figura 3.26 muestra un ejemplo del patrón de ondas estacionarias que se obtuvo con el mortero sin EPS. Se puede observar que existe linealidad entre los puntos de amplitud máxima, que indica atenuación o pérdidas despreciables de energía en el tubo de ondas estacionarias, esto es benéfico para reducir el margen de error en los resultados.



**Figura 3. 26.** Patrón de ondas estacionaras del mortero sin EPS.

A continuación se presentan las tablas con los valores que se obtuvieron en las pruebas de absorción acústica en cada formulación con sus respectivas repeticiones. En la Tabla 3. 4 se presentan todos los valores para la muestra blanco o de referencia.

**Tabla 3. 4.** Coeficientes de absorción acústica de la muestra de referencia.

Material de prueba	Frecuencias centrales en bandas de octavas, Hz				NRC
	250	500	1000	2000	
R1_1	0.13	0.03	0.30	0.12	0.15
R1_2	0.12	0.03	0.27	0.19	0.15
R1_3	0.17	0.04	0.27	0.19	0.17
Promedio	0.14	0.03	0.28	0.17	0.15
Desviación estándar	0.03	0.01	0.02	0.04	0.02
R2_1	0.16	0.03	0.16	0.32	0.17
R2_2	0.15	0.03	0.18	0.28	0.16
R2_3	0.16	0.03	0.18	0.21	0.14
Promedio	0.16	0.03	0.17	0.27	0.16
Desviación estándar	0.01	0.00	0.01	0.06	0.02
R3_1	0.18	0.05	0.25	0.28	0.19
R3_2	0.17	0.03	0.20	0.26	0.16
R3_3	0.17	0.03	0.22	0.25	0.17
Promedio	0.17	0.04	0.22	0.26	0.17
Desviación estándar	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02
<b>PROMEDIO GLOBAL</b>					<b>0.16</b>
<b>DESVIACIÓN ESTANDAR PROMEDIO</b>					<b>0.02</b>



En las Tabla 3.5 a la Tabla 3.6 se presentan los valores de los coeficientes de absorción acústica de las formulaciones que contienen EPS. Se muestran los valores de las muestras sin EPS expuesto y con EPS expuesto.

**Tabla 3.5.** Coeficientes de absorción acústica de la muestra con 0.8 % EPS-G.

MATERIALES SIN EL EPS EXPUESTO						MATERIALES CON EL EPS EXPUESTO					
Material de prueba	Frecuencias centrales en bandas de octavas, Hz				NRC	Material de prueba	Frecuencias centrales en bandas de octavas, Hz				NRC
	250	500	1000	2000			250	500	1000	2000	
0.8EPSG1_1	0.14	0.05	0.18	0.31	0.17	0.8EPSG1_1	0.17	0.04	0.20	0.38	0.20
0.8EPSG1_2	0.14	0.04	0.20	0.23	0.15	0.8EPSG1_2	0.17	0.03	0.19	0.35	0.18
0.8EPSG1_3	0.14	0.04	0.18	0.32	0.17	0.8EPSG1_3	0.17	0.03	0.20	0.38	0.19
Promedio	0.14	0.05	0.18	0.29	0.16	Promedio	0.17	0.03	0.19	0.37	0.19
Desviación estándar	0.00	0.00	0.01	0.05	0.02	Desviación estándar	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
0.8EPSG2_1	0.14	0.03	0.19	0.21	0.14	0.8EPSG2_1	0.18	0.03	0.10	0.38	0.17
0.8EPSG2_2	0.15	0.04	0.18	0.19	0.14	0.8EPSG2_2	0.18	0.04	0.11	0.35	0.17
0.8EPSG2_3	0.15	0.03	0.20	0.33	0.18	0.8EPSG2_3	0.18	0.04	0.14	0.38	0.18
Promedio	0.15	0.03	0.19	0.24	0.15	Promedio	0.18	0.03	0.12	0.37	0.18
Desviación estándar	0.01	0.00	0.01	0.08	0.02	Desviación estándar	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01
0.8EPSG3_1	0.13	0.04	0.18	0.25	0.15	0.8EPSG3_1	0.14	0.05	0.21	0.24	0.16
0.8EPSG3_2	0.15	0.04	0.19	0.21	0.15	0.8EPSG3_2	0.14	0.05	0.25	0.28	0.18
0.8EPSG3_3	0.14	0.05	0.19	0.32	0.18	0.8EPSG3_3	0.15	0.05	0.22	0.29	0.18
Promedio	0.14	0.04	0.19	0.26	0.16	Promedio	0.14	0.05	0.23	0.27	0.17
Desviación estándar	0.01	0.01	0.01	0.06	0.02	Desviación estándar	0.01	0.00	0.02	0.03	0.01
<b>PROMEDIO GLOBAL</b>					<b>0.16</b>	<b>PROMEDIO GLOBAL</b>					<b>0.18</b>
<b>DESVIACIÓN ESTANDAR PROMEDIO</b>					<b>0.02</b>	<b>DESVIACIÓN ESTANDAR PROMEDIO</b>					<b>0.01</b>

**Tabla 3. 6.** Coeficientes de absorción acústica de la muestra con 1.6 % EPS-G.

<b>MATERIALES SIN EL EPS EXPUESTO</b>						<b>MATERIALES CON EL EPS EXPUESTO</b>					
<b>Material de prueba</b>	<b>Frecuencias centrales en bandas de octavas, Hz</b>				<b>NRC</b>	<b>Material de prueba</b>	<b>Frecuencias centrales en bandas de octavas, Hz</b>				<b>NRC</b>
	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>			<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	
1.6EPSG1_1	0.11	0.06	0.29	0.30	0.19	1.6EPSG1_1	0.14	0.05	0.21	0.52	0.23
1.6EPSG1_2	0.12	0.05	0.28	0.30	0.19	1.6EPSG1_2	0.14	0.05	0.20	0.60	0.25
1.6EPSG1_3	0.11	0.06	0.28	0.25	0.17	1.6EPSG1_3	0.15	0.05	0.19	0.55	0.24
Promedio	0.11	0.06	0.28	0.28	0.18	Promedio	0.14	0.05	0.20	0.56	0.24
Desviación estándar	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	Desviación estándar	0.01	0.00	0.01	0.04	0.01
1.6EPSG2_1	0.16	0.04	0.22	0.25	0.17	1.6EPSG2_1	0.20	0.04	0.19	0.18	0.15
1.6EPSG2_2	0.16	0.05	0.22	0.35	0.20	1.6EPSG2_2	0.21	0.04	0.18	0.28	0.18
1.6EPSG2_3	0.16	0.04	0.22	0.29	0.18	1.6EPSG2_3	0.21	0.03	0.20	0.24	0.17
Promedio	0.16	0.05	0.22	0.30	0.18	Promedio	0.21	0.04	0.19	0.23	0.17
Desviación estándar	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	Desviación estándar	0.01	0.01	0.01	0.05	0.02
1.6EPSG3_1	0.14	0.05	0.26	0.28	0.18	1.6EPSG3_1	0.17	0.05	0.20	0.35	0.19
1.6EPSG3_2	0.14	0.05	0.25	0.33	0.19	1.6EPSG3_2	0.18	0.05	0.19	0.44	0.21
1.6EPSG3_3	0.14	0.05	0.25	0.26	0.18	1.6EPSG3_3	0.18	0.04	0.20	0.40	0.20
Promedio	0.14	0.05	0.25	0.29	0.18	Promedio	0.18	0.04	0.20	0.40	0.20
Desviación estándar	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	Desviación estándar	0.00	0.00	0.01	0.05	0.01
<b>PROMEDIO GLOBAL</b>					<b>0.18</b>	<b>PROMEDIO GLOBAL</b>					<b>0.20</b>
<b>DESVIACIÓN ESTANDAR PROMEDIO</b>					<b>0.01</b>	<b>DESVIACIÓN ESTANDAR PROMEDIO</b>					<b>0.02</b>

**Tabla 3. 7.** Coeficientes de absorción acústica de la muestra con 0.8 % EPS-F.

<b>MATERIALES SIN EL EPS EXPUESTO</b>						<b>MATERIALES CON EL EPS EXPUESTO</b>					
<b>Material de prueba</b>	<b>Frecuencias centrales en bandas de octavas, Hz</b>				<b>NRC</b>	<b>Material de prueba</b>	<b>Frecuencias centrales en bandas de octavas, Hz</b>				<b>NRC</b>
	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>			<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	
0.8EPSF1_1	0.18	0.06	0.19	0.28	0.18	0.8EPSF1_1	0.22	0.05	0.22	0.48	0.24
0.8EPSF1_2	0.17	0.06	0.21	0.29	0.18	0.8EPSF1_2	0.22	0.04	0.20	0.52	0.24
0.8EPSF1_3	0.17	0.05	0.20	0.28	0.18	0.8EPSF1_3	0.21	0.06	0.18	0.47	0.23
Promedio	0.17	0.05	0.20	0.28	0.18	Promedio	0.22	0.05	0.20	0.49	0.24
Desviación estándar	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	Desviación estándar	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02
0.8EPSF2_1	0.17	0.06	0.21	0.29	0.18	0.8EPSF2_1	0.25	0.05	0.28	0.49	0.27
0.8EPSF2_2	0.16	0.06	0.14	0.30	0.16	0.8EPSF2_2	0.25	0.03	0.28	0.50	0.26
0.8EPSF2_3	0.16	0.06	0.21	0.27	0.17	0.8EPSF2_3	0.26	0.04	0.27	0.52	0.27
Promedio	0.16	0.06	0.18	0.28	0.17	Promedio	0.25	0.04	0.28	0.50	0.27
Desviación estándar	0.01	0.00	0.04	0.02	0.02	Desviación estándar	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
0.8EPSF3_1	0.15	0.05	0.20	0.29	0.17	0.8EPSF3_1	0.23	0.06	0.17	0.34	0.20
0.8EPSF3_2	0.15	0.06	0.18	0.30	0.17	0.8EPSF3_2	0.24	0.04	0.13	0.24	0.16
0.8EPSF3_3	0.15	0.06	0.21	0.25	0.17	0.8EPSF3_3	0.22	0.05	0.19	0.27	0.18
Promedio	0.15	0.05	0.19	0.28	0.17	Promedio	0.23	0.05	0.16	0.28	0.18
Desviación estándar	0.00	0.00	0.02	0.03	0.01	Desviación estándar	0.01	0.01	0.03	0.05	0.03
<b>PROMEDIO GLOBAL</b>					<b>0.17</b>	<b>PROMEDIO GLOBAL</b>					<b>0.23</b>
<b>DESVIACIÓN ESTANDAR PROMEDIO</b>					<b>0.01</b>	<b>DESVIACIÓN ESTANDAR PROMEDIO</b>					<b>0.02</b>

**Tabla 3. 8.** Coeficientes de absorción acústica de la muestra con 1.6 % EPS-F.

MATERIALES SIN EL EPS EXPUESTO						MATERIALES CON EL EPS EXPUESTO					
Material de prueba	Frecuencias centrales en bandas de octavas, Hz				NRC	Material de prueba	Frecuencias centrales en bandas de octavas, Hz				NRC
	250	500	1000	2000			250	500	1000	2000	
1.6EPSF1_1	0.10	0.04	0.22	0.37	0.18	1.6EPSF1_1	0.13	0.03	0.16	0.31	0.16
1.6EPSF1_2	0.14	0.03	0.24	0.32	0.18	1.6EPSF1_2	0.13	0.03	0.17	0.23	0.14
1.6EPSF1_3	0.13	0.03	0.20	0.38	0.19	1.6EPSF1_3	0.12	0.02	0.18	0.24	0.14
Promedio	0.12	0.03	0.22	0.36	0.18	Promedio	0.13	0.03	0.17	0.26	0.15
Desviación estándar	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	Desviación estándar	0.01	0.01	0.01	0.04	0.02
1.6EPSF2_1	0.14	0.06	0.23	0.33	0.19	1.6EPSF2_1	0.26	0.06	0.12	0.55	0.25
1.6EPSF2_2	0.17	0.08	0.22	0.31	0.19	1.6EPSF2_2	0.26	0.04	0.17	0.64	0.28
1.6EPSF2_3	0.16	0.05	0.20	0.34	0.18	1.6EPSF2_3	0.24	0.03	0.14	0.57	0.25
Promedio	0.16	0.06	0.22	0.32	0.19	Promedio	0.25	0.04	0.15	0.59	0.26
Desviación estándar	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	Desviación estándar	0.01	0.01	0.02	0.05	0.02
1.6EPSF3_1	0.18	0.08	0.24	0.28	0.20	1.6EPSF3_1	0.28	0.04	0.14	0.45	0.23
1.6EPSF3_2	0.20	0.12	0.20	0.29	0.20	1.6EPSF3_2	0.31	0.06	0.17	0.48	0.25
1.6EPSF3_3	0.18	0.06	0.19	0.29	0.18	1.6EPSF3_3	0.30	0.03	0.14	0.52	0.25
Promedio	0.19	0.09	0.21	0.29	0.19	Promedio	0.30	0.04	0.15	0.48	0.24
Desviación estándar	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02	Desviación estándar	0.02	0.01	0.02	0.04	0.02
<b>PROMEDIO GLOBAL</b>					<b>0.19</b>	<b>PROMEDIO GLOBAL</b>					<b>0.22</b>
<b>DESVIACIÓN ESTANDAR PROMEDIO</b>					<b>0.02</b>	<b>DESVIACIÓN ESTANDAR PROMEDIO</b>					<b>0.02</b>

De manera general, los valores que se obtuvieron en los promedios globales de NRC, indican que los coeficientes de absorción acústica van desde  $0.16 \pm 0.02$  para las muestras sin EPS hasta  $0.23 \pm 0.02$  para las muestras con EPS-F. Estos valores caen dentro de la clasificación de materiales poco absorbentes, sin embargo, puede notarse una mínima tendencia a aumentar cuando tienen las partículas de EPS expuestas en su cara superficial, esto se debe a que las ondas sonoras interactúan directamente con el EPS que tienen mayor coeficiente de absorción acústica que el material cementicio.

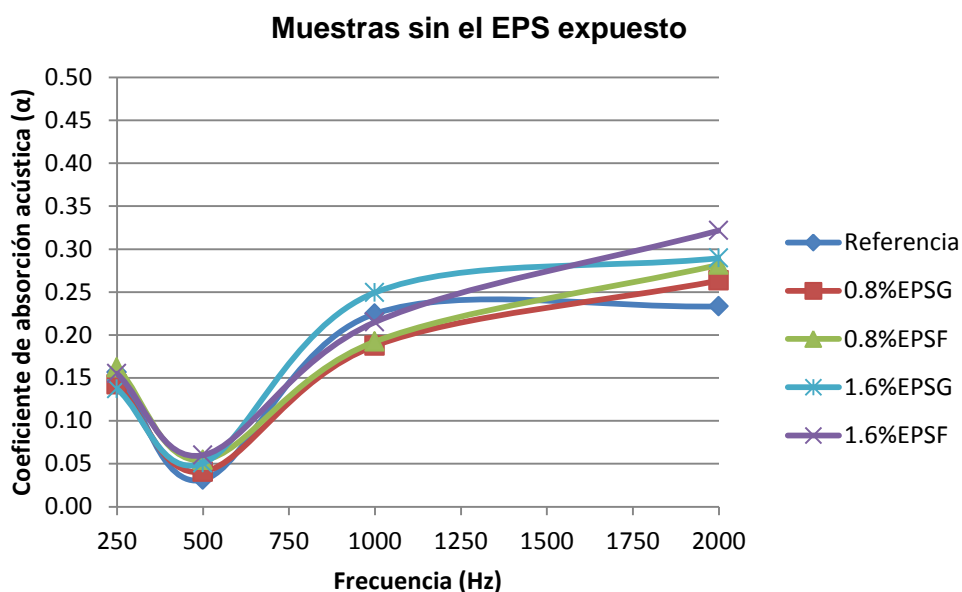
Las altas proporciones de EPS tienen valores más altos de NRC que las proporciones bajas, esto se atribuye a que se generan mayor número de macrocavidades dentro del material donde las ondas sonoras se absorben. La granulometría fina tiende a aumentar su NRC más que la granulometría gruesa, y se cree que esto sucede porque las partículas finas tienden a emigrar hacia la superficie más fácilmente gracias a que tienen menor densidad que las partículas de granulometría gruesa.

### **3.6.3. Curvas de absorción acústica.**

Las curvas de absorción acústica permiten identificar el comportamiento específico de los materiales frente a cada una de las frecuencias de las bandas de octavas establecidas (250, 500, 1000 y 2000 Hz). En la Figura 3. 27 se puede ver la comparación de la muestra de referencia con respecto a las muestras que contienen EPS de acabado superficial c. La norma ISO 11654, clasifica a los materiales como: extremadamente absorbentes, cuando tiene valores de 0.8 a 1; muy absorbente, cuando los valores van de 0.6 a 0.75; absorbente, cuando el intervalo es de 0.3 a 0.55; poco absorbente, cuando esta de 0.15 a 0.25 y reflectante para valores menores a 0.05.

En este sentido, a frecuencias de 250 Hz, todas las formulaciones muestran valores de absorción acústica de 0.15, esto indica que los materiales tienen poca absorción acústica, mientras que para las frecuencias de 500 Hz se hace notar un comportamiento reflectante con valores de 0.03 a 0.05. En la frecuencia de 1000 Hz también se registra poca absorción ya que se obtienen valores de 0.18 a 0.25. A los 2000 Hz empiezan a comportarse como materiales absorbentes aquellos que tienen contenido de EPS, mientras que el material de referencia se queda dentro de la clasificación de poco absorbente.

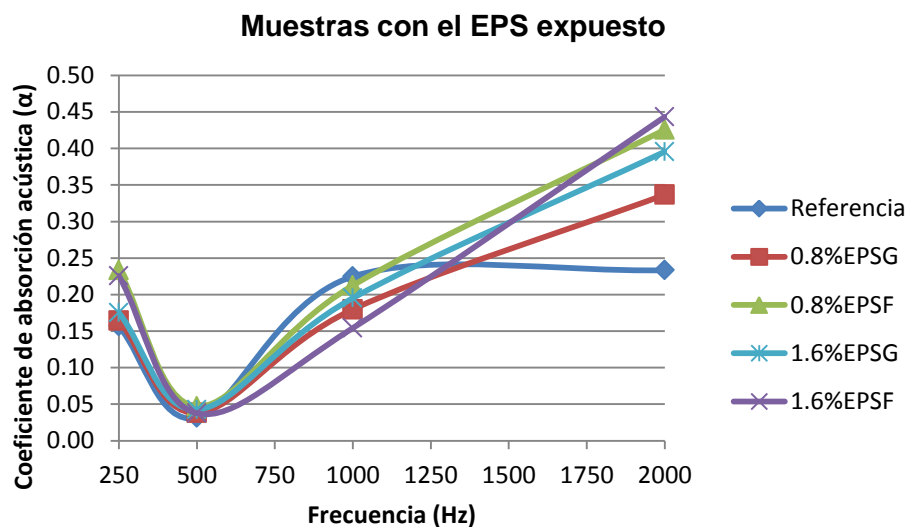
Las ondas sonoras a frecuencias altas de 2,000 Hz, tienden a una mayor interacción con las partículas de EPS, que provoca pérdidas de energía, traduciéndose en mayor absorción acústica, y eventualmente las formulaciones con mayor contenido de EPS tienden a aumentar su absorción. También se observa la tendencia de la granulometría fina de aumentar su absorción conforme aumentan las bandas de frecuencia.



**Figura 3. 27.** Curvas de absorción acústica de las muestras que no tienen expuesto el contenido de EPS.

Las pruebas acústicas en un tubo de ondas estacionarias, son muy sensibles a los cambios superficiales que pudieran presentarse en las muestras. La Figura 3.8 muestra los valores de absorción que se obtuvieron en las muestras con partículas de EPS expuestas. A frecuencias de 250 Hz, la granulometría fina se impuso ante la granulometría gruesa, porque aumentó en un 35 % su absorción acústica. A 500 Hz, no se observan cambios significativos y mantiene sus valores en rangos reflectantes de 0.03 a 0.05.

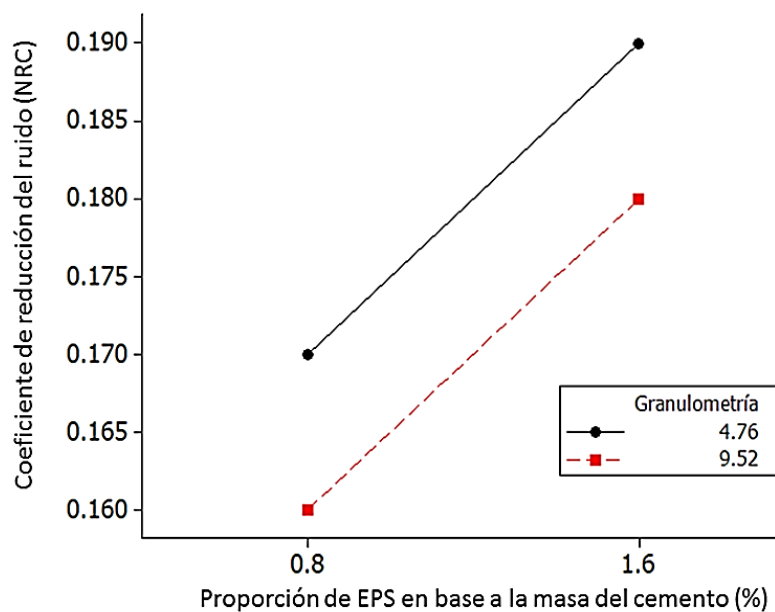
A frecuencias de 1000 Hz, se observan valores que se consideran poco absorbentes y son muy similares a las muestras sin EPS expuesto. Los cambios más notorios se observan a las frecuencias de 2000 Hz, en donde puede verse que las dos formulaciones con granulometría fina se imponen de nuevo, incluso por encima de la formulación con 1.6 % de EPS G, esto se atribuye a la mejor distribución y dispersión de la granulometría fina en el material.



**Figura 3.28.** Curvas de absorción acústica de las muestras que tienen expuesto el contenido de EPS.

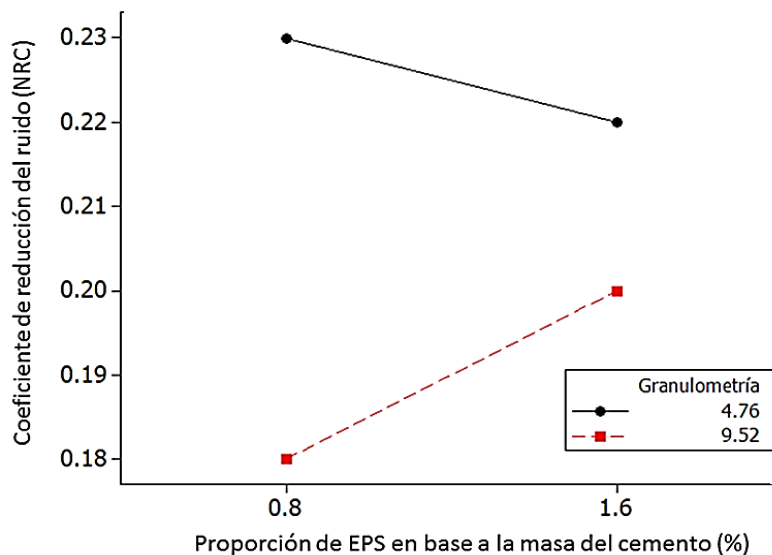
La Figura 3.29 y Figura 3.30 permiten observar la gráfica de interacciones de acuerdo al acabado superficial de las muestras con EPS. Las muestras con acabado superficial cementicio, no muestran interacción existente entre los factores, ya que conforme aumenta el factor del porcentaje de EPS de su nivel bajo a su nivel alto, la variable de respuesta aumenta proporcionalmente con la granulometría fina.

Las desviaciones estándares de los resultados que se muestran en las Tabla 3.7 y Tabla 3.8 indican que no ocurren cambios significativos entre las mezclas con y sin EPS expuesto. Sin embargo, las proporciones de 0.8 % de EPS expuesto, tienden a tener mayor absorción acústica que las muestras con 1.6 % de EPS expuesto, este efecto se puede atribuir a que se absorbe más energía cuando las ondas sonoras interactúan con partículas de EPS con mejor dispersión dentro de la matriz cementicia. La saturación de partículas de EPS en las mezclas con 1.6 %, no permite que se formen espacios de matriz cementicia iguales o mayores que en las mezclas con 0.8 %, esto ocasiona que las ondas sonoras tiendan a mostrar menor coeficiente de absorción acústica.



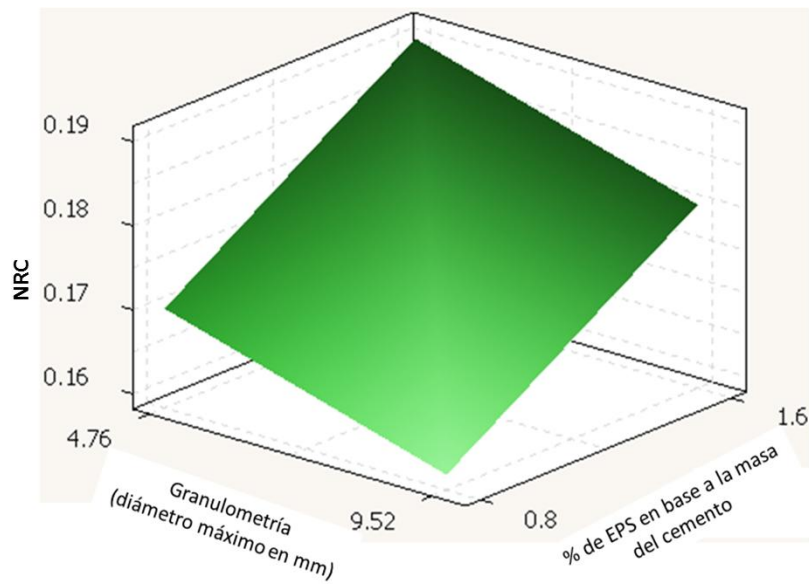
**Figura 3.29.** Gráfica de interacciones de las muestras con EPS de acabado superficial cementicio.



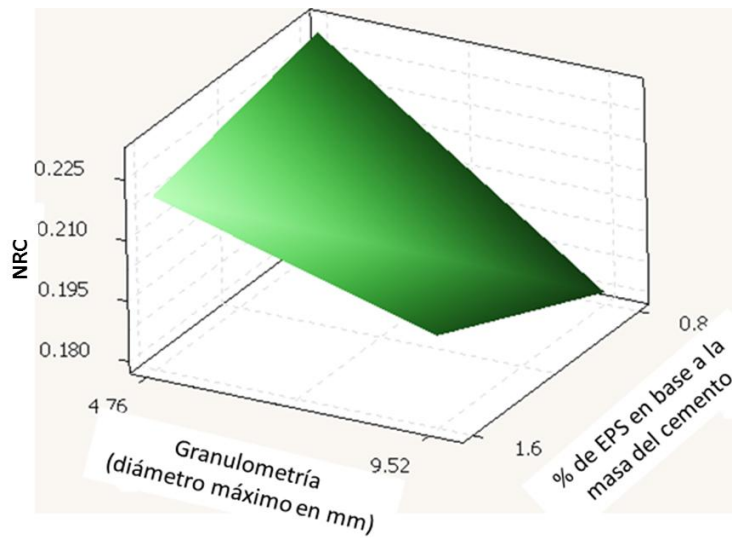


**Figura 3. 30.** Gráfica de interacciones de las muestras con acabado de partículas de EPS expuestas en una de sus caras.

En las Figura 3. 31. Gráfica de superficie de respuesta de las muestras con EPS con acabado superficial cementicio. y Figura 3. 32 se pueden ver las gráficas de superficie de respuesta representativa de las muestras con EPS. Estas gráficas permiten analizar el panorama completo para predecir el comportamiento del coeficiente de reducción del ruido (NRC) con respecto a la granulometría y a la proporción de EPS dentro de las mezclas. Los resultados indican que los factores con mayor influencia para aumentar la capacidad de absorción del ruido en estos materiales son: las altas proporciones de EPS cuando no se tiene expuesto el polímero en la cara superficial, atribuido al mayor número de macrocavidades generadas y la granulometría fina sobre las gruesas cuando se tiene expuesto el polímero en la cara superficial del material, a causa de la menor densidad de la granulometría fina que tiende a flotar hacia la superficie. Los valores más bajos de NRC, se obtuvieron para proporciones de 0.8 % de EPS-G para las muestras con y sin el polímero expuesto, esto indica que a esa proporción el EPS no tiene contribución significativa.



**Figura 3. 31.** Gráfica de superficie de respuesta de las muestras con EPS con acabado superficial cementicio.



**Figura 3. 32.** Gráfica de superficie de respuesta de las muestras con acabado de partículas de EPS expuestas en una de sus caras.

## CONCLUSIONES

La presente tesis tuvo como objetivo determinar las propiedades mecánicas, térmicas y acústicas de un mortero aligerado con partículas de EPS reciclable en diferentes granulometrías y proporciones, con el fin de elegir las mejores combinaciones de las variables de estudio para el diseño de un mortero ligero que pueda reducir efectos térmicos y acústicos.

Para los estudios térmicos y acústicos, se construyó una cámara térmica aislada y un tubo de ondas estacionarias, ambos reflejaron resultados aceptables dentro de los rangos reportados en las fichas técnicas para materiales conocidos.

La granulometría fina elegida fueron las partículas no mayores a 4.76 mm de diámetro, mientras que la granulometría gruesa fueron las partículas entre 4.76 y 9.52 mm de diámetro.

Los estudios de fluidez, permitieron elegir la proporción de 0.8 % de EPS como la mezcla con menor contenido de EPS, mientras que la mezcla con alto contenido de EPS fue con proporciones de 1.6 % de EPS en base a la masa del cemento.

La densidad aparente disminuyó en un 18 % en relación a la mezcla de referencia cuando se le agregó un porcentaje de 0.8 % de EPS y aproximadamente un 28 % cuando se le agregó 1.6 % de EPS. La influencia de la granulometría no obtuvo diferencias significativas en la disminución de densidad aparente.

Las pruebas mecánicas a compresión, mostraron que la muestra con 0.8 % de EPS disminuyó su resistencia a compresión en un 75 % aproximadamente, mientras que las muestras con 1.6 % de EPS disminuyó en un 88 % aproximadamente. Sin embargo los valores de resistencia que se obtuvieron, quedaron dentro del rango permisible para utilizarse como morteros de recubrimiento. Por otra parte, debido a la presencia de EPS, no se obtuvieron diferencias significativas entre las muestras que se probaron a 14 y 28 días de curado como típicamente se obtiene con los morteros convencionales.

El cálculo del coeficiente de conductividad térmica ( $k$ ) de cada formulación, indicó que las formulaciones con 0.8 % EPS-F, 1.6 % EPS-G y 1.6 % EPS-F obtuvieron valores de  $0.42 \pm 0.05$  W/mK,  $0.36 \pm 0.04$  W/mK y  $0.33 \pm 0.03$  W/mK, respectivamente, lo cual se traduce en disminuciones significativas de 33, 42 y 47 % respectivamente.

El coeficiente de reducción del ruido (NRC) mostró que sólo las formulaciones con 0.8 % EPS-F, 1.6 % EPS-G y 1.6 % EPS-F de EPS expuesto, obtuvieron diferencias significativas en relación a la formulación de referencia, porque aumentó de un 18 % hasta un 40 % aproximadamente, mientras que todas las demás formulaciones no obtuvieron diferencias estadísticamente significativas. De acuerdo a estos resultados, el material de referencia y el de 0.8 % EPS-G caen dentro de la clasificación de materiales reflectantes, mientras que las demás formulaciones si entran dentro de la clasificación de materiales poco absorbentes con valores máximos de 0.25 de NCR. En este sentido, se demostró que el EPS no representa un material con buenas propiedades de absorción acústica, sin embargo, en algunas formulaciones del mortero aligerado con EPS, se lograron alcanzar valores máximos de 0.25 que reporta el EPS.

El diseño factorial  $2^2$  de las pruebas mecánicas, térmicas y acústicas de cada formulación, mostraron proporcionalidad entre las variables de estudio (granulometría y proporción de EPS) con respecto a las variables de respuesta (resistencia mecánica a compresión, coeficiente de conductividad térmica y coeficiente de reducción del ruido), de tal manera que no existen rasgos de interacción entre dichas variables de estudio. Por otra parte, se confirmó que el porcentaje de EPS es el factor que más influencia tiene sobre las variables de respuesta tanto, mecánicas, térmicas y acústicas.

En las pruebas térmicas, se destacó la influencia de la granulometría fina sobre la granulometría gruesa para obtener mejores resultados de aislamiento térmico, mientras que en las pruebas acústicas, la influencia de la granulometría fina fue más notoria en las muestras que tenían el EPS expuesto.

De manera general, se obtuvieron valores de resistencia mecánica a compresión aceptables para los morteros de recubrimiento, valores muy buenos de aislamiento térmico para las formulaciones con alto contenido de EPS y valores moderadamente mejorados en las pruebas acústicas. Esta información permite destacar la aportación principal de este trabajo, que se relaciona a la importancia de utilizar correctamente los residuos del EPS como agregado en un mortero para obtener beneficios de aislamiento térmico y acústico.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ANAPE, *Manual de aligeramiento de estructuras*, Asociación Nacional de Poliestireno Expandido, 2009, p. 11.
2. ANAPE, *Ficha técnica 3.1. Propiedades del EPS*, 2009.
3. Industrial, I.M.d.p., *Polimeros de estireno*, *Enciclopedia del plástico*, México. 1997.
4. Klempler, D. and K.C. Frisch, *Handbook of polymeric foams and foam technology*, Hanser Munich etc. 1991.
5. L.Lira-Cortés, G.R., O.J, Méndez-Lango, E., *Medición de la conductividad térmica de algunos materiales utilizados en edificaciones*, 2008.
6. Libia, G.d.L., *El concreto y otros materiales para la construcción*, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2003.
7. Madariaga, F.J.G., *Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción*, Universidad Politécnica de Catalunya: Barcelona, 2005.
8. Santana, M.d.Á.R., *Vivienda económica sustentable*, *Facultad de Arquitectura.*, UADY: Mérida, Yucatán, 2012.
9. Tang, W.C.L., Y; Nadeem, A, *Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete*", *Cement and Concrete Composites*, 2008, p. 403-409.
10. Trussoni, M., C.D. Hays, and R.F. Zollo, *Comparing lightweight polystyrene concrete using engineered or waste materials*, *ACI Materials Journal*, 2012, p109(1).
11. Kan, A. and R. Demirboğa, *A novel material for lightweight concrete production*, *Cement and Concrete Composites*, 2009, p. 489-495.

12. FONAC. *El confort acústico (Segunda parte)*. Available from: <http://sonoflex.com/fonac/el-confort-acustico-segunda-parte/>.
13. Grupo Cetya, S.A., S.A., *Ficha técnica, Mortero de revoco gris hidrofugo*, 2007.
14. Jaime Andrés Castañeda, H.Á.G., *Medición del coeficiente de absorción del sonido*, Scientia et Technica, 2004.
15. Lazzaris, F.S.p.A.-V., *Ficha Técnica: KC 1 Revocos cal cemento*, 2014.
16. Praxsa, *Propiedades físicas de las planchas de espuma rígida de poliestireno obtenidas de bloque*, 2012.
17. TECNOPOR. *Aislación Acústica. Placas Acusticas*. Available from: <http://www.tecnopor.com.ar/placas-acusticas.php>.
18. C177-13, A., *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*, 2013.
19. Standard, A., *C518-10 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010.
20. Guenin, B., *calculation corner: don't underestimate radiation in electronics cooling*, Electronics Cooling, 2001, p. 15-15.
21. Salmon, D., *Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference materials*, Measurement Science and Technology, 2001, p. R89.
22. Smith, D.R. and L.J. Van Poolen, *A Guarded Hot Plate Apparatus for Effective Thermal Conductivity of Insulations at 80–360 K*, in *Thermal Conductivity*, Springer, 1985, p. 237-246.

23. C384, A., *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method*, 2011.
24. Montgomery, D.C., *Diseños y análisis de experimentos*, 2010.
25. David Gonzales, C.R., Ángela Anaya, *Manual de Diseño y Análisis de Experimentos*, 2011, p. 52,60.
26. Garrido, L.L.M. Ibarra; C. Marco, *Ciencia y tecnología de materiales poliméricos*, Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (CSIC), 2004.
27. Leydy Katherine Ardila Pinto; M.A.C.R., *Implementación de un proceso que utilice el poliestireno post-consumo contenido en residuos sólidos, para obtener aglomerados a partir de emulsiones de poliestireno*, Universidad industrial de santander. 2010
28. De Grave, I., *Poliestireno expandido*, in *Revista Plásticos universales*, Munich, 1981.
29. Billmeyer, F.W., *Ciencia de los polímeros*, Barcelona, 1975.
30. ANAPE, *El poliestireno expandido y el medio ambiente*. 2003.
31. Neufert, E. and B.B. Musté, *Manual del Styropor*, Herder, 1970.
32. Porras, Y.R.I., *Diseño de aislamiento y acondicionamiento acústico para los estudios de emisión y grabación de la nueva sede de la emisora Kennedy, Facultad de Ingeniería*, Universidad de San Buenaventura, Bogota D.C, 2005
33. Neufert, *Manual del Styropor*, Barcelona, 1970, p. p:006.
34. Cusa, J., *Aplicaciones del plástico en la construcción*, CEAC, Barcelona, 1979.



35. Empolime. 2012; Available from: <http://www.empolime.com/aplicaciones-poliestireno-expandido-edificacion.htm>.
36. Espeso, J.P., E., *El Poliéstireno expandido, aplicaciones en la construcción, Revista de Plásticos modernos*, Madrid, 2002.
37. Isbert, A.C., *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, Universitat Politècnica de Catalunya, Iniciativa Digital Politècnica, 2004, Vol. 4.
38. Bellver Sanz, I., *Estudio calidad acústica del Aula Master del nuevo edificio (1C) de la Escuela de Ingeniería de la Edificación*, 2011.
39. Eilas, S., *Jornada sobre "criterios acusticos en el diseño de centros docentes"*, 2001.
40. ASTM 270, A., *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*, 2014.
41. Casanonne, H.G.C., *Albañilería estructura*, tercera ed, Perú, 2004.
42. Fuentes, V.M., *Sistema primario de medición de conductividad térmica de aislantes térmicos. diseño y construcción*, Instituto Politécnico Nacional, Queretaro.
43. Cengel, Y.A., *Transferencia de calor y masa*, Editorial McGraw–Hill, 2007, p. 873.
44. Reyes, O., O. Cadena, and R. Correa, *Diseño de un prototipo para la medición de flujo de calor mediante calorimetría directa usando sensado por variación de temperatura*, Ingeniería y Desarrollo, 2007, p. 85-106.
45. Laukaitis, A; R. Žurauskas, *The effect of foam polystyrene granules on cement composite propertie..* Cement and Concrete Composites, 2005, p. 41-47.

46. Margarita, V.I., Rodriguez, *Comportamiento mecánico de mezclas de concreto aligerado con poliestireno expandido*, *Revista arbitrada venezolana del Núcleo Luz-Costa Oriental del Lago*, 2012, p. 276-288.
47. Alcocel, V.F.M.E.G., *Physical and mechanical characterization of Portland cement mortars made with expanded polystyrene particles addition (EPS)*, 2012.
48. ACI 116R-90: *Cement and Concrete Terminology*, Technical Documents, 2000: p. 58.
49. C1437, A., *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. 2013.
50. Plastiformas de México, S.A.D.C.V., *Ficha técnica serie 700*, 2007.
51. De Guzman, D.A.S., *Tecnología del concreto y del mortero*, Pontificia Universidad Javeriana, 2001.
52. ASTM C-109-13, A., *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, 2013.
53. Oertel, G., *The mechanism of faulting in clay experiments*, *Tectonophysics*, 1965, p. 343-393.
54. Coulomb, C.A., *Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture*. Mem. Acad. Roy. Div. Sav, 1776, p. 343-387.
55. Nelson, R., *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs*, Gulf Professional Publishing, 2001.
56. Andrew S, W.K., *Concretos ligeros*. 1980.
57. Fernández, F., et al., *Conductividad térmica en sólidos a altas temperaturas*. *Revista de la Facultad de Ingeniería (UCV, Caracas)*, 2006. **21(2)**: p. 21-27.

## **ANEXO A.**

### **A.1 Reporte de confiabilidad de los termopares del data logger**

#### **MATERIAL:**

- Recipiente con agua
- Termómetro de mercurio de -20 a 110°C
- Soporte de laboratorio universal
- Lápiz y libreta de apuntes

#### **EQUIPO:**

- Data logger con 4 canales para 4 termopares tipo K
- Balanza termo gravimétrica

#### **PROCEDIMIENTO:**

1.- Se llenó el recipiente con el agua necesaria para bañar los termopares y el termómetro de mercurio.

2.- Se amarraron las puntas de los termopares tipo K con la punta del termómetro de mercurio con el fin de registrar las temperaturas en un mismo punto. Se utilizó el termómetro de mercurio como referencia de una temperatura confiable, ya que tiene menos margen de error que los termopares tipo K.

3.- Se colocó el recipiente con agua encima de la placa de agitación y en el soporte de laboratorio se coloca verticalmente el termómetro de mercurio con los termopares del data logger de tal manera que quede introducido en la parte central del recipiente con agua.

4.- La placa de agitación se encendió a una temperatura de 60°C y se utilizó una mosca de agitación mediana a velocidad media para homogeneizar la temperatura del agua en el recipiente.

5.- Se grabó el registro de los termopares y al mismo tiempo se registró en la libreta de apuntes los grados centígrados que marca el termómetro de mercurio en lapsos de 5 minutos, hasta alcanzar la temperatura de 60°C.

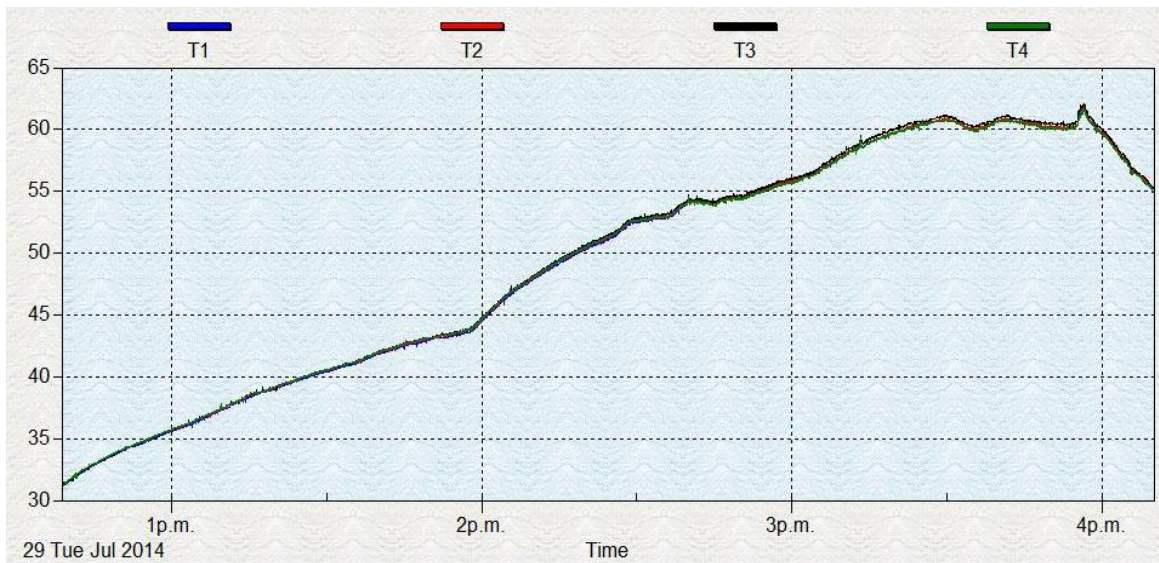
6.- Se graficó el registro de los termopares del data logger junto con el registro de temperaturas del termómetro de mercurio para observar el comportamiento y las diferencias que puedan existir, para su correspondiente ajuste.

El sistema para medir la confiabilidad de los termopares del data logger quedó como lo muestra la Figura A1. Los cables de los termopares se encintaron en la parte superior del termómetro de mercurio y en la parte inferior para que las puntas se encuentren en un mismo punto dentro del recipiente con agua.



**Figura A1.** Sistema para medir la confiabilidad de los termopares del data logger.

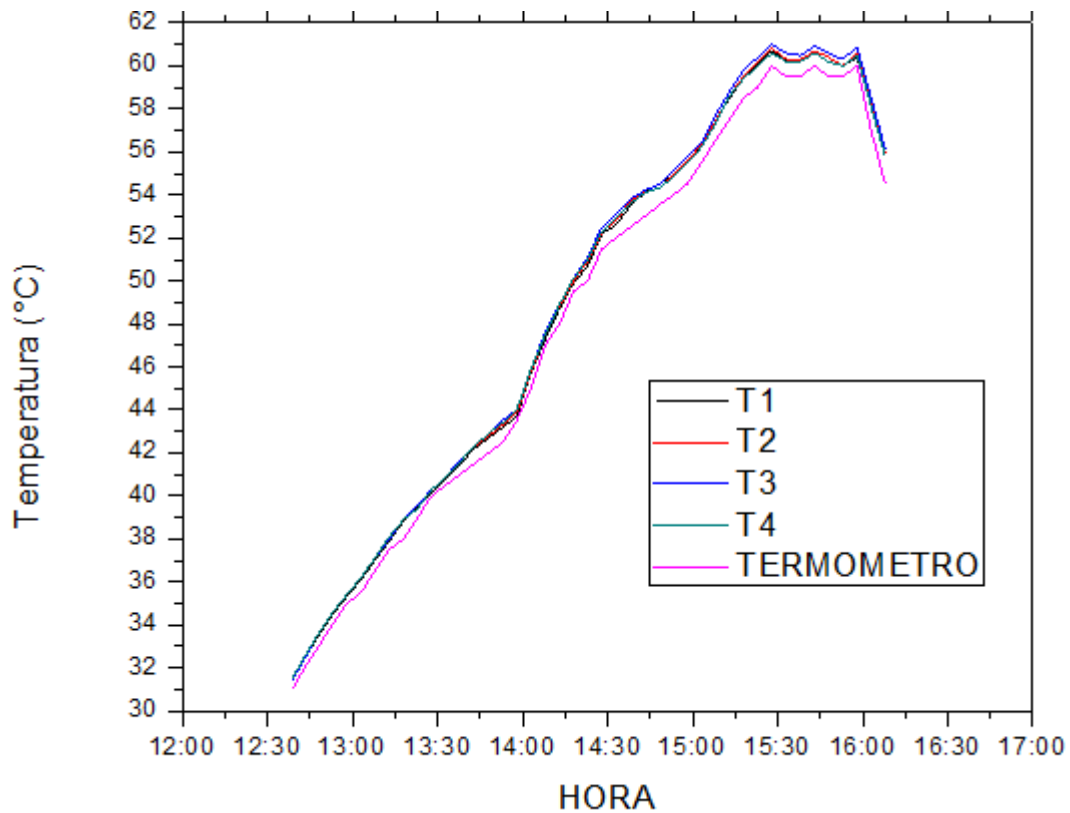
El registro de datos de cada 2 segundos de los 4 termopares del data logger se muestran en la Figura A2:



**Figura A2.** Registro de datos cada 2 segundos de los 4 termopares del data logger.

Se puede observar que las líneas de los 4 termopares se encuentran sobrepuestas lo cual indica que no existe cambio significativo entre algún termopar.

También se realizó una Tabla de datos cuyo registro fue de cada 5 minutos, donde se incluyen las temperaturas marcadas por el termómetro de mercurio. Estos datos se graficaron y se muestran en la Figura A3.



**Figura A3.** Gráfica de temperaturas con respecto al tiempo en lapsos de 5 minutos donde se incluye las temperaturas marcadas por el termómetro de mercurio.

La diferencia máxima de temperatura que se registró entre el termómetro de mercurio y los termopares fue de 1.1°C entre 14:33 y 14:38 h, resaltando que a temperaturas inferiores a 50°C, las diferencias fueron menores a 0.5°C

## **ANEXO B.**

**B1. Determinación del coeficiente de conductividad térmica de materiales conocidos para evaluar la confiabilidad del prototipo de cámara térmica aislada.**

**OBJETIVO:** Determinar la confiabilidad de la cámara térmica aislada con la medición del coeficiente de conductividad térmica de materiales conocidos.

### **MATERIALES:**

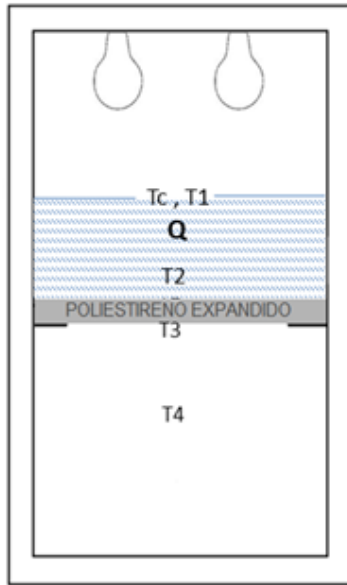
- Placa de EPS Foamular 250
- Placa de mortero de cemento-arena con densidad de  $2,000 \text{ kg/m}^3$

### **EQUIPO:**

- Controlador de temperatura XMT-7100 con termopar tipo K.
- Data logger de temperatura con 4 canales para termopares tipo K.
- PC portátil para analizar los registros de datos.

### **PROCEDIMIENTO:**

1. Se armó el controlador de temperatura de acuerdo a las instrucciones del manual y se programó para mantener una temperatura constante de  $50^\circ\text{C}$  ( $T_c$ ).
2. Se cortaron las placas de EPS en dimensiones de  $250 \times 250 \text{ mm}$  y se pesaron para calcular su densidad aparente.
3. Los termopares del data logger ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  Y  $T_4$ ) se colocaron como lo muestra la Figura B.1. El  $T_2$  y  $T_3$  se pegaron al material de prueba. Para poder calcular el coeficiente de conductividad térmica es necesario calcular el flujo de calor resultante entre el  $T_1$  y el  $T_2$ . Este cálculo se realizó de acuerdo a la “Ley de enfriamiento de Newton” como lo muestra la Ecuación (B1).



$$Q = k_{aire} * A * \Delta T \quad (B1)$$

Dónde:

$k_{aire}$  = Coeficiente de convección térmica del aire a 50°C

Q = Calor en Watts

A = Área transversal al flujo de calor que tiene contacto con el material de muestra.

$\Delta T$  = Diferencia de temperaturas entre las caras opuestas transversales al flujo de calor

**Figura B.1.** Cámara térmica armada para calcular el coeficiente de conductividad térmica donde se muestra el flujo de calor entre T1 y T2 cuando se mantiene Tc y T1 a una temperatura constante de 50°C.

El coeficiente de convección y radiación térmica del aire se reporta en los estudios de Bruce Gueni, de acuerdo a las siguientes ecuaciones.

$$h_{RAD} = 5.67 \times 10^{-8} \epsilon (T_{Superficie}^2 (K)^2 + T_{Air}^2 (K^2)) \cdot (T_{Superficie} (K) + T_{Air}) \quad (B2)$$

$$h_{CN} = 3.76 ((\Delta T_{Superficie\ aire} (K))^{0.25}) \quad (B3)$$



3.- Una vez obtenido el flujo de calor entre el T1 y el T2, se calculó el coeficiente de conductividad térmica con la Ecuación propuesta basada en la “Ley de Fourier” de conducción y convección expresado en la Ecuación 4.

$$k = \frac{e}{\left\{ \frac{[\Delta_{(T3-T4)} + \Delta_{(T2-T3)}] * A}{Q} - \frac{1}{h} \right\}} \quad (B4)$$

Dónde:

$k$  = coeficiente de conductividad térmica.

$e$  = espesor del material de prueba.

$A$  = Área transversal al flujo de calor.

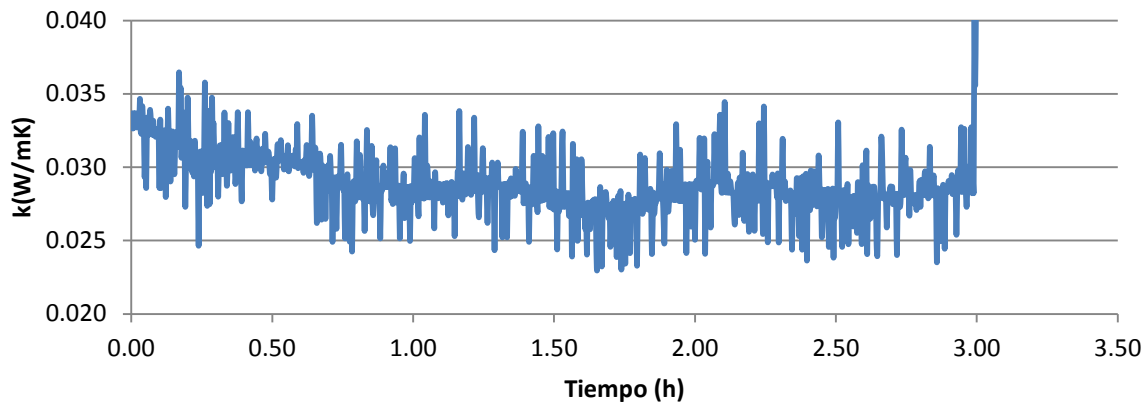
$h$  = coeficiente de convección del aire.

$Q$  = flujo de calor en Watts.

4.- Se compararon los resultados obtenidos en la experimentación con los resultados reportados por la ficha técnica del EPS Foamular y por los valores reportados para el mortero de cemento-arena de 2,000 kg/m<sup>3</sup>

#### **Cálculo del coeficiente de conductividad térmica (k) del Foamular 250.**

En el intervalo de tiempo donde el controlador de temperatura se mantuvo a 50°C, se obtuvo el coeficiente de conductividad promedio de 0.028 W/mK



**Figura B2.** Coeficientes de conductividad térmica (k) del Foamular 250 durante un periodo de 3 horas.

La ficha técnica del Foamular 250 (Figura B3) indica que a una densidad aparente de  $30.18 \text{ kg/m}^3$ , le corresponde un coeficiente de conductividad térmica de  $0.0288 \text{ W/m K}$ . En la experimentación con la cámara térmica aislada se registró una densidad de  $28.5 \text{ kg/m}^3$  del Foamular 250 y un coeficiente de conductividad térmica de  $0.0282 \text{ W/m K}$ .

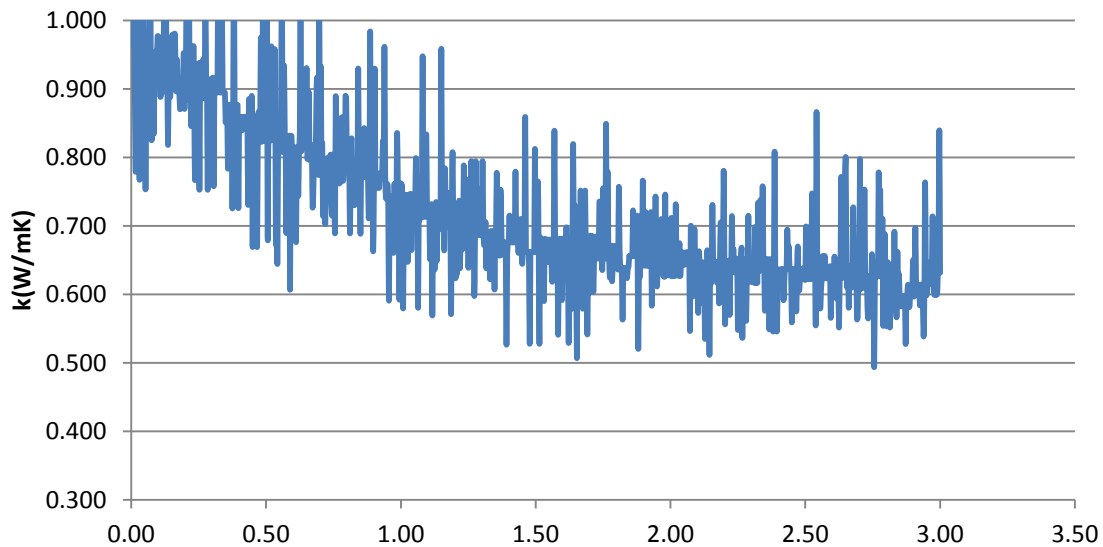
### Propiedades I\*

PROPIEDADES	PRODUCTO / VALORES			
	Método ASTM 2*	Foamular 250/AGTEK	Foamular 400	Foamular 600
Conductividad térmica K W/m-K(Btu in/°F ft² h) máxima	C518 @ 24°C (75 °F)	0.0288 (0.20)	0.0288 (0.20)	0.0288 (0.20)
@ Temperatura media de 24°C (75°F) @ Temperatura media de 4.4°C (40°F)	C518 @ 4.4°C (40 °F)	0.0259 (0.18)	0.0259 (0.18)	0.0259 (0.18)
Resistencia térmica R m²·K/W(°Fft²h/Btu) mínima	C518 @ 24°C (75 °F)	0.88 (5.0)	0.88 (5.0)	0.88 (5.0)
@ Temperatura media de 24°C (75°F) @ Temperatura media de 4.4°C (40°F)	C518 @ 4.4°C (40 °F)	0.95 (5.4)	0.95 (5.4)	0.95 (5.4)

**Figura B3.** Ficha técnica del Foamular 250

### Cálculo del coeficiente de conductividad térmica (k) del mortero cemento-arena de 2,000 kg/m<sup>3</sup>.

En el intervalo de tiempo donde el controlador de temperatura se mantuvo a 50°C, se obtuvo el coeficiente de conductividad promedio de 0.65 W/mK para el mortero.



**Figura B4.** Coeficientes de conductividad térmica de un mortero de cemento-arena de 2,000 kg/m<sup>3</sup>.

El valor que reporta un mortero de cemento- arena de 2,000 kg/m<sup>3</sup> es de 0.63 W/mK, este es un valor muy cercano a lo que se obtuvo experimentalmente con el método propuesto.

Se concluye que el prototipo de cámara térmica aislada si puede ser útil como una alternativa para estimar el coeficiente de conductividad térmica en materiales aislante porque se lograron obtener valores de coeficientes de conductividad térmica del EPS Foamular 250 y del mortero de cemento- arena de 2,000 kg/m<sup>3</sup> con valores que van de acuerdo a lo que se reporta.

## ANEXO C.

### C1. Uso del tubo de ondas estacionarias para medir el coeficiente de absorción acústica de materiales conocidos.

#### OBJETIVO:

Determinar la confiabilidad del tubo de ondas estacionarias con la medición del coeficiente de absorción acústica de materiales con coeficiente de absorción acústica conocidos.

#### MATERIALES:

- Placas circulares de fibra de vidrio modelo 701 de 25 y 50 mm de espesor.
- Placa de poliestireno Expandido de 35 mm de espesor.
- Cinta de doble cara.

#### EQUIPO:

- Tubo de ondas estacionarias.
- Fuente de poder de 12 V.
- Amplificador de sonido 500W.
- Generador de frecuencias portátil.
- PC portátil para analizar los registros de datos.

#### PROCEDIMIENTO:

1. Recortar placas circulares de 105 mm de diámetro de cada material de prueba.
2. Elegir la frecuencia de prueba. Todos los materiales que se prueban se miden en frecuencias de 250, 500, 1000 y 2000 Hz.
3. Determinar filtros de banda de un décimo de octava mediante:

$$F_i = f / (2^{1/10}) \text{ y } F_s = f \times (2^{1/10})$$

Dónde:

Fi= Filtro inferior

Fs=Filtro superior

f= frecuencia

4. Colocar cinta doble cara en el respaldo metálico del portamuestra y colocar la muestra para evitar separaciones de la muestra con el respaldo metálico.
5. Mover la sonda del micrófono hasta que logre tener contacto con la muestra de prueba y ajustar la escala de medición para iniciar en cero.
6. Calcular la velocidad del sonido de acuerdo a la temperatura en el interior del tubo mediante:

$$c= 20.05 (T*273.15)^{1/2}$$

Dónde:

c= velocidad del sonido

T= Temperatura en°C

7. Calcular la longitud de onda  $\lambda$  de acuerdo a la temperatura que está dentro del tubo mediante:

$$\lambda = c/f$$

8. Obtener los valores correspondientes a los máximos y mínimos de las ondas estacionarias dados en:

$\lambda/4$  = 1er mínimo.

$\lambda/2$  = 1er máximo.

$3\lambda/4$  = 2do mínimo.

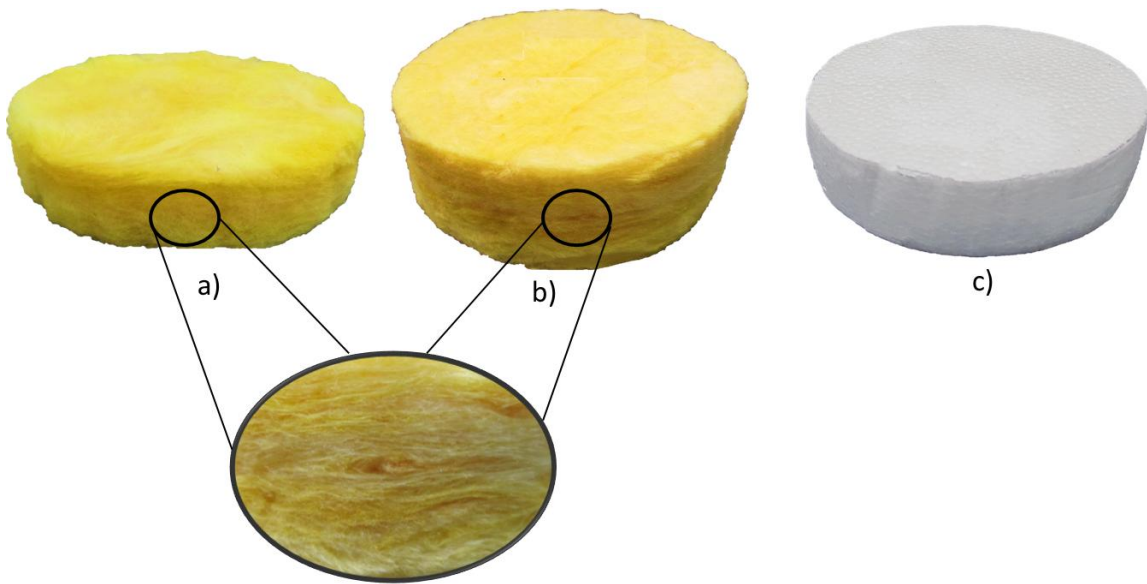
$\lambda$  = 2 máximo.

9. Utilizar las ecuaciones siguientes para calcular el coeficiente de absorción acústica.

Ecuación.	Función
$SWR(x) = V_{\max}(x) / V_{\min}(x)$	Relación de ondas estacionarias.
$V_{\min}(0) = V(x_1) - x_1[V(x_2)-V(x_1)] / (x_2- x_1)$	Para dos o más mínimos presentes.
$V_{\min}(0) = V(x_1) - \xi x_1 V_{\max}(0)$ $\xi = 0.02203 f^{1/2} / (cd)$	Para solamente un mínimo y un máximo presente.
$V_{\max} = (2V_{\lambda/8}^2 - V_{\min}^2)^{1/2}$	Para solamente un mínimo, sin máximo presente.
$R = [SWR(0) - 1] / [SWR(0) + 1]$	Coefficiente de presión reflejada.
$A = 1 -  R ^2$	Coefficiente de absorción acústica para cada frecuencia.
$NRC = (\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}) / 4$	Coefficientes de reducción de ruido determinado como la media de los valores de absorción entre 250 Hz y 2000 Hz

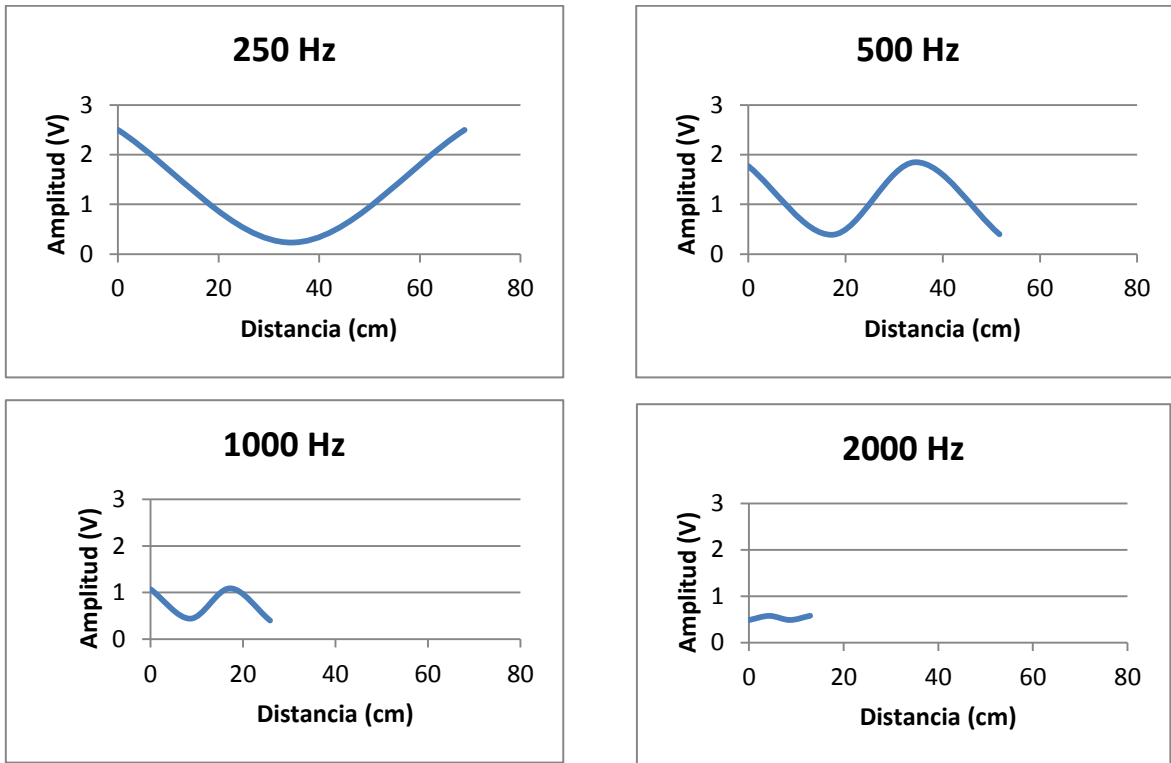
Los valores de  $V_{\max}(0)$  siempre corresponde al valor máximo que se encuentra en  $\lambda/2$ .

En la Figura C1 se encuentran los materiales que se utilizan para evaluar la confiabilidad del tubo de ondas estacionarias.



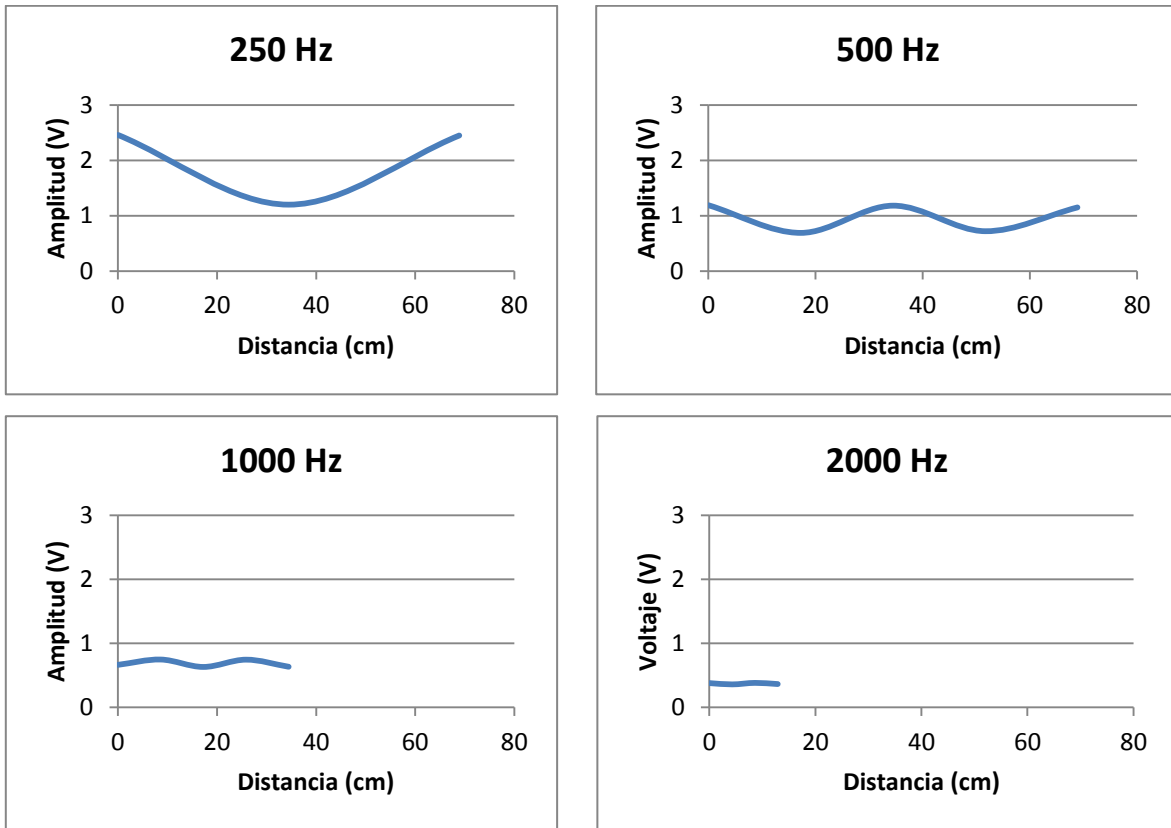
**Figura C1.** Materiales de referencia con coeficientes de absorción acústica conocidos. En a) y b) se muestra la fibra de vidrio 701 de 25 y 50 mm respectivamente y c) es el poliestireno expandido (EPS).

El coeficiente de absorción acústica se obtiene mediante el análisis del patrón de ondas estacionarias que se genera en cada frecuencia. A continuación se muestran las gráficas que representan el patrón de ondas estacionarias de cada frecuencia de los materiales de referencia que se prueban. Las gráficas muestran en el eje vertical, la amplitud de las ondas estacionarias medido en Volts, y en el eje horizontal, la distancia que existe entre el micrófono y el material de prueba.

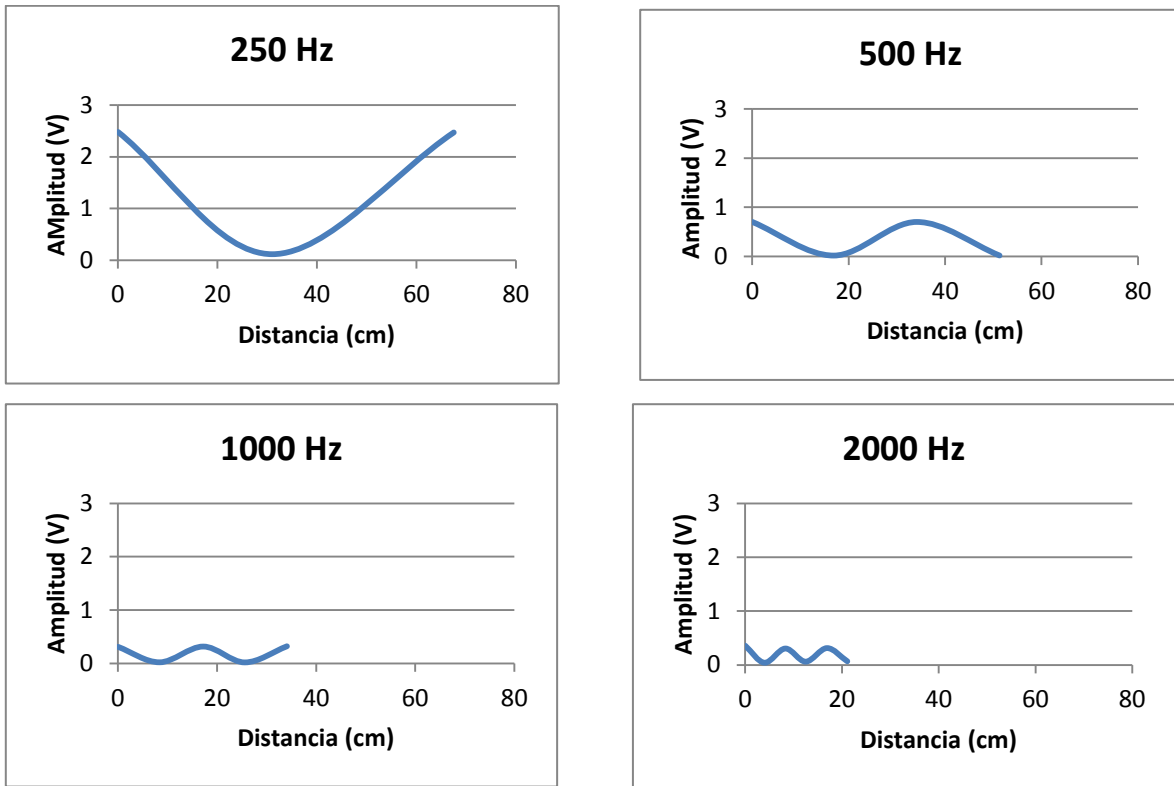


**Figura C2.** Patrón de ondas estacionarias de la fibra de vidrio 701 de 25mm de espesor.





**Figura C3.** Patrón de ondas estacionarias de la fibra de vidrio 701 de 50 mm de espesor.



**Figura C4.** Patrón de ondas estacionarias del poliestireno expandido (EPS) de 35 mm de espesor.

En la Tabla C1 se resumen los valores de absorción acústica obtenidos para cada material de prueba.

**Tabla C1.** Valores de absorción acústica y NRC de los materiales de referencia.

Material de prueba	Espesor (mm)	Frecuencias centrales en bandas de octavas (Hz)				NRC
		250	500	1000	2000	
Fibra de vidrio 701 obtenido.	25	0.3	0.56	0.81	0.99	0.67
Fibra de vidrio 701 reportado	25	0.33	0.64	0.83	0.90	0.67
Fibra de vidrio 701 obtenido.	50	0.88	0.93	1.0	1.0	0.95
Fibra de vidrio 701 reportado	50	0.87	0.98	1.02	0.98	0.96
Poliestireno expandido obtenido	35	0.18	0.1	0.22	0.34	0.21
Poliestireno expandido reportado						0.2 - 0.25

Se lograron obtener valores de coeficientes de absorción acústicas de materiales conocidos con el tubo de ondas estacionarias propuesto y al compararlos con los valores que se reportan en otros estudios, resultaron con un comportamiento bastante similar, por lo que se concluye que el tubo de ondas estacionarias si es útil y confiable para la medición del coeficiente de absorción acústica para materiales porosos.

## ANEXO D

D1. Gráficas correspondientes al valor del coeficiente de conductividad térmica ( $k$ ) de las formulaciones establecidas en el intervalo de tiempo donde el controlador de temperatura se encuentra estable a  $50^{\circ}\text{C}$

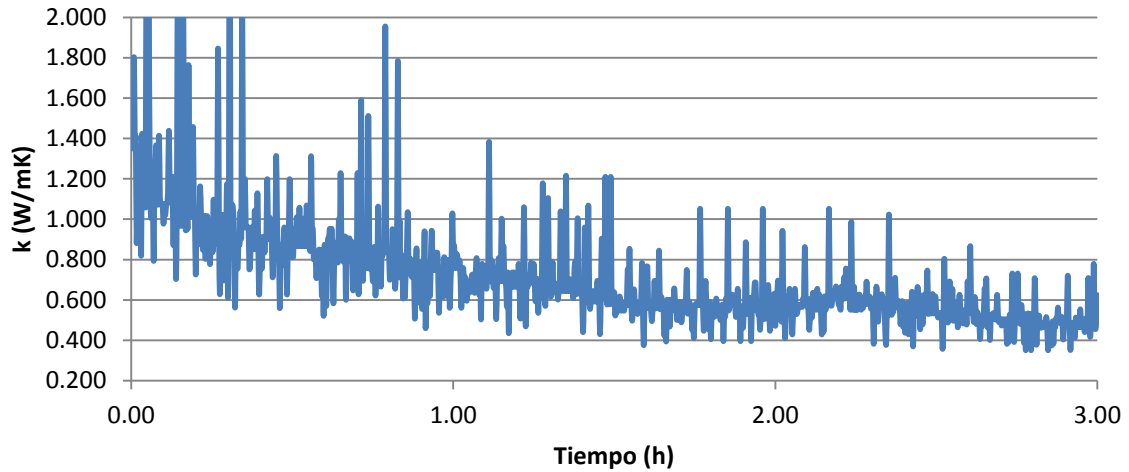
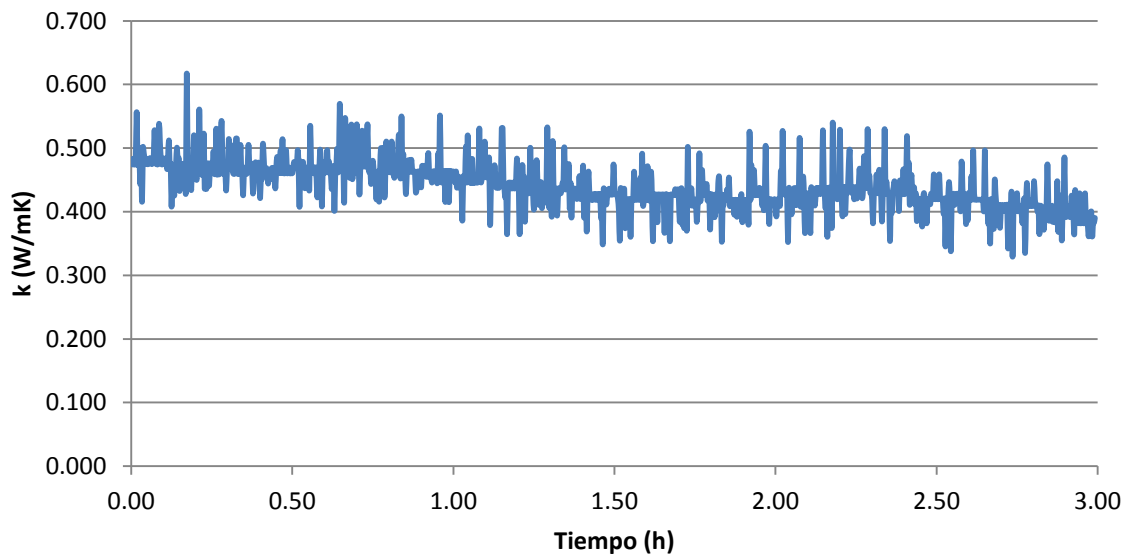
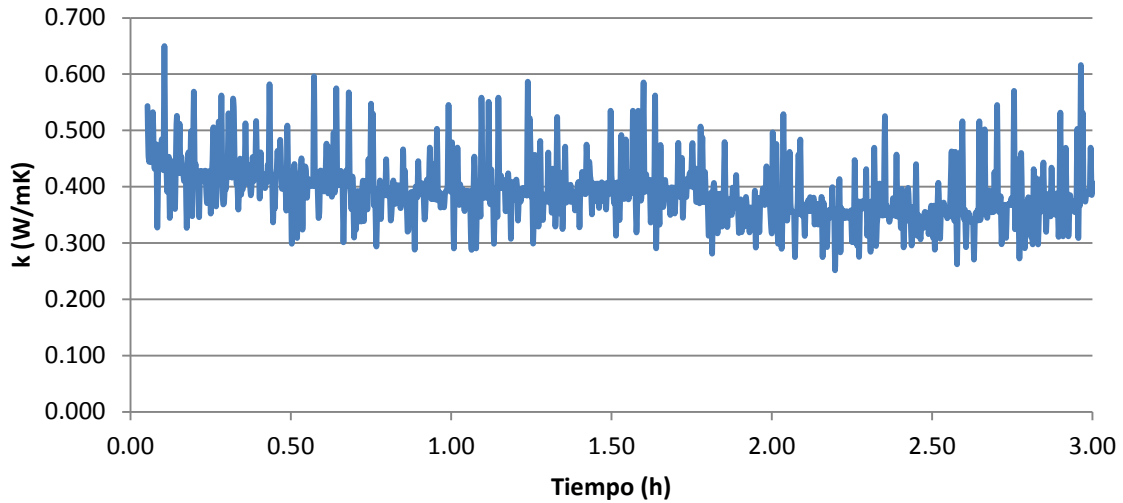


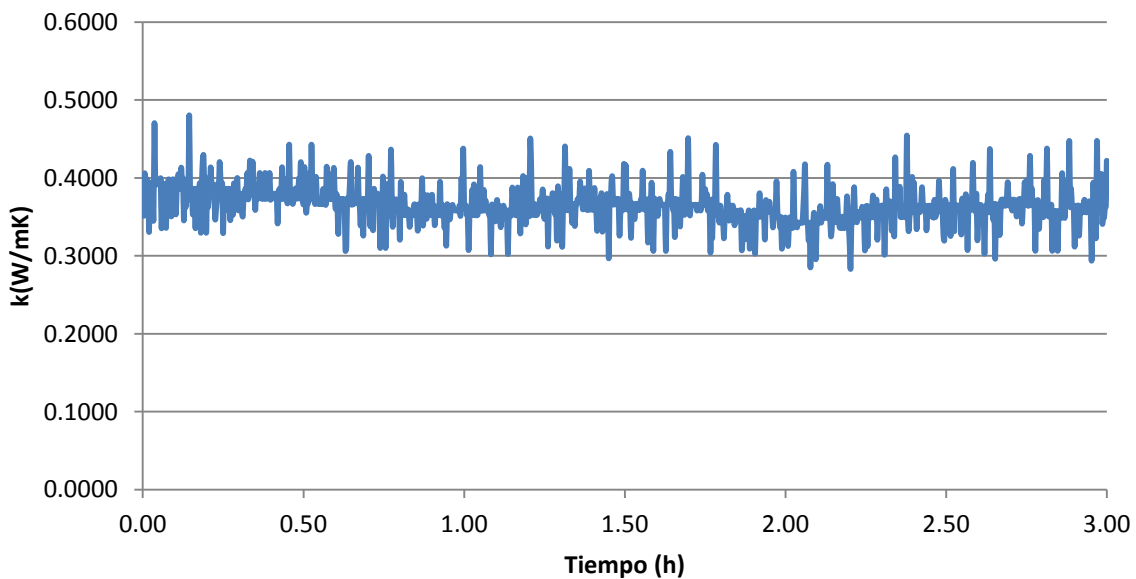
Figura D1. Valores del coeficiente de conductividad térmica ( $k$ ) de la muestra de referencia.



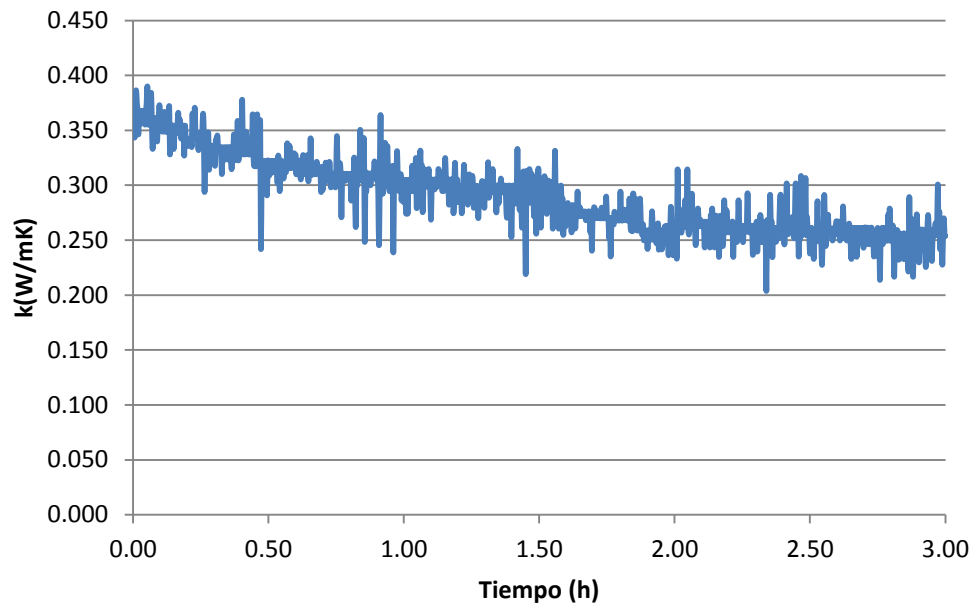
**Figura D2.** Valores del coeficiente de conductividad térmica (k) de la muestra correspondiente a 0.8 % EPS G.



**Figura D3.** Valores del coeficiente de conductividad térmica (k) de la muestra correspondiente a 0.8 % EPS F.



**Figura D4.** Valores del coeficiente de conductividad térmica (k) de la muestra correspondiente a 1.6 % EPS G.



**Figura D5.** Valores del coeficiente de conductividad térmica (k) de la muestra correspondiente a 1.6 % EPS F.