

Aplicación del método de hilo caliente en la determinación de la resistencia térmica de bloques de concreto-material reciclado

ROBLES-SOLÍS, Manuel*†, VEJAR-RUIZ, Set, LOZANO-MANDUJANO, David y GUTIÉRREZ-VILLEGAS, Carlos

Universidad Politécnica de Zacatecas

Recibido Julio 15, 2016; Aceptado Septiembre 30, 2016

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la aplicación del método de hilo caliente sobre bloques de concreto adicionados con materiales de reciclaje, con el objetivo de determinar cuál de las muestras posee las mejores propiedades térmicas (capacidad de aislamiento). Los tipos materiales de reciclado utilizados en los bloques son PET y papel respectivamente, los cuales fueron adicionados independientemente en diferentes proporciones (25, 50 y 75 %). El método aplicado se calibró y validó utilizando materiales de control (ladrillo y block común de hormigón), obteniendo valores de conductividad térmica aproximados a los reportados en la literatura para este tipo de materiales. Los resultados muestran que el valor de la conductividad térmica disminuye proporcionalmente con el incremento de la cantidad de material reciclable en el bloque, así mismo se observa un comportamiento similar para la densidad. Los bloques prototipo con un agregado de 75 % de ambos materiales reciclados incrementaron su resistencia térmica respecto al bloque de control en el orden de 3.24 veces para el concreto-PET y de 4.35 para el Concreto-Papel. Por otro lado, la densidad disminuyó en una proporción similar en el orden de 3.20 para el concreto-PET y de 4.20 para el concreto-papel.

Conductividad térmica, aislamiento térmico, bloques de concreto-PET, bloques de concreto-papel

Abstract

This article presents the results of applying the Method of Hot Wire in concrete blocks added with recycled materials, in order to determine which sample has the best thermal properties (insulating capacity). The recycling materials used in the manufacturing process of concrete blocks were paper and PET respectively. These materials were added in different proportions (25, 50 and 75%). This method was calibrated and validated by using reference samples (brick and concrete block common). As a result, thermal conductivity values were obtained and the rates were similar to those reported in the literature. The final results show that the value of thermal conductivity decreases proportionally to the percentage of recycled material added to the block. A similar behavior was observed for density. Both prototypes added with a 75% of recycled materials, increased heat resistance in comparison to the reference sample in the proportion of 3.24 times for concrete-PET blocks and 4.35 for Concrete-Paper blocks. In the other hand, density decreased at a similar rates in order of 3.20 for the concret-pet blocks and 4.20 for concrete-paper blocks.

Thermal conductivity, thermal insulation, concrete-pet block, concrete-paper block

Citación: ROBLES-SOLÍS, Manuel, VEJAR-RUIZ, Set, LOZANO-MANDUJANO, David y GUTIÉRREZ-VILLEGAS, Carlos. Aplicación del método de hilo caliente en la determinación de la resistencia térmica de bloques de concreto-material reciclado. Revista de Energía Química y Física 2016, 3-8: 12-24.

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: jmrobles@upz.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

El acondicionamiento térmico en las viviendas y edificios en general debe ser agradable a los seres vivos que los habitan. Partiendo del hecho de que el ser humano tiene que mantener una temperatura corporal en promedio de 37 °C (1), al entrar en contacto con diferentes condiciones climáticas es obligado a implementar medidas de regulación térmica, tanto fisiológicas como externas en el medio ambiente que le rodea. Para lograr un clima confortable desde un enfoque térmico, es importante considerar el equilibrio que se debe de mantener entre las pérdidas y aportes energéticos en el recinto.

Para el estudio de esta área de la ingeniería surge una nueva disciplina denominada “bioclimatización” (2), la cual se define como el uso eficiente de la energía para mantener el recinto a una temperatura adecuada considerando entre otros aspectos, la temperatura del lugar y los materiales de construcción.

Por su parte, la arquitectura bioclimática considera: el diseño del proyecto arquitectónico y el uso eficiente de la energía para mantener el recinto a una temperatura adecuada. Todo esto considerando el clima del lugar, los materiales de construcción, la iluminación y la orientación de la construcción.

Atendiendo al clima del lugar de estudio de este trabajo, la Cd. de Fresnillo Zacatecas, la cual se sitúa entre los 43° 45' de latitud Norte y los 41° 45' de latitud Sur.

En dicha ciudad, de acuerdo a los registros de los últimos 10 años, se sabe que debido a su ubicación en invierno se han alcanzado temperaturas de hasta de -10 °C y en verano se han registrado hasta de 35 °C.

Por lo anterior, en esta ciudad, como en otras con las mismas características, es importante la implementación de nuevos materiales para la construcción que posean una mayor resistencia térmica en comparación a los utilizados actualmente, lo cual contribuirá directamente en la reducción de los consumos energéticos para la climatización en las edificaciones.

En la actualidad existen una serie de materiales para la industria de la construcción. Uno de los principales elementos constructivos utilizado como material para división de áreas es el denominado bloque, el cual está fabricado a base de cemento y arena (piedra con tamaño de grano inferior a 10 mm).

Debido a su importancia, en años recientes han surgido una serie de alternativas para la construcción en términos sustentables, algunas de las propuestas están enfocadas en la fabricación de estos bloques con una mezcla de concreto y materiales reciclables los cuales se ha demostrado agregan propiedades acústicas, térmicas y mecánicas, las cuales no han sido completamente evaluadas ni cuantificadas (3) (4) (5) (6) (7) (8). Por lo que la investigación aquí presentada queda justificada.

Marco teórico

Conductividad y resistividad

La conductividad térmica (k) se describe como el flujo de calor que, en régimen estacionario, atraviesa un material de caras plano-paralelas y de espesor unitario, durante una unidad de tiempo, cuando la diferencia de temperatura entre sus caras es de una unidad (9).

Por otro lado, la resistividad es el inverso de la conductividad ($1/k$) y por lo tanto representa la capacidad del material para resistir el flujo de calor y se expresa en metro grado Celsius por Watt ($m^{\circ}C/W$).

En algunos estudios el valor de la resistencia térmica de una capa de material se explica como la diferencia de temperatura que se requiere para producir una unidad de flujo de calor por unidad de superficie (10).

Conductividad térmica: métodos de cálculo.

Los métodos de medición de la conductividad térmica pueden ser clasificados en dos categorías, estáticos y dinámicos, dependiendo de si la distribución de la temperatura en el interior de la muestra es función del tiempo.

Los métodos estáticos involucran el uso de la ecuación de calor de Fourier y es necesario determinar la densidad de flujo de calor y el gradiente de temperatura a lo largo de la normal de la superficie isotérmica.

Por otra parte, los métodos dinámicos en general determinan la difusividad y requieren de medir variaciones de temperatura con respecto al tiempo a lo largo de una distancia conocida.

El calor específico y la densidad deben ser conocidas para obtener la conductividad térmica, aunque en algunos métodos dinámicos también se utilizan para determinar el calor específico (11).

Para el caso específico de materiales compuestos para la construcción A. Bonakdar, (3) en 2013 realizó una investigación en la cual contempla la inclusión de fibras cortas de polipropileno como refuerzo a bloques de hormigón celular conocido también como concreto aligerado (mezcla de cemento portland, ceniza u otras fuentes de sílice, cal viva, yeso, agua, y aluminio en polvo o pasta, como se describe en el ACI 523.2R3), realizando el proceso de curado a temperatura ambiente, caracterizando los bloques en relación a sus propiedades físicas y mecánicas, evaluando el efecto del contenido de las fibras sobre las características mecánicas obteniendo para los prototipos de más alta concentración una resistencia a la compresión de aproximadamente 3 MPa, resistencia a la flexión de 0.56 MPa, la flexión de más de 25 Nm, y una conductividad térmica de 0.15 W/Km. La determinación de esta última se realizó considerando el procedimiento de placa caliente guardada, como una versión modificada de la norma ASTM C-17 720.

El experimento se realizó de manera similar a los trabajos realizados por Ng (12) y Othuman (13). Se probaron dos bloques de 300 x 300 x 20 mm simultáneamente con seis termopares para cada muestra: tres en la superficie superior y tres en la superficie inferior. Los datos de temperatura se recopilaron mediante un sistema de adquisición de datos. Esta prueba se ejecuta hasta alcanzar un estado de equilibrio. Este procedimiento se aplica considerando un flujo de calor unidimensional q_x a través de un espécimen de una sección transversal A, para producir un gradiente de temperatura a través del espesor $\left(\frac{dT}{dx}\right)$, obteniendo la conductividad térmica k del material en W/mK al utilizar la ley de Fourier (ecuación 1).

$$q = -kA \frac{dT}{dx} . \quad (1)$$

Además, examinaron la precisión del método de ensayo calibrando con materiales de prueba con valores de conductividad conocidos. Por otra parte, Kann (14) señala que para el cálculo de la conductividad térmica, ésta depende del grado de humedad presente en el material, es decir, cuanto mayor es el contenido de humedad, mayor es el coeficiente de conductividad térmica. Por lo tanto es importante tener en cuenta el contenido de humedad cuando se realicen las pruebas de propiedades térmicas y disponer de procedimientos de secado antes de la prueba.

Métodos dinámicos para la medición de la conductividad térmica

Los métodos dinámicos pueden ser divididos en dos categorías, periódicos o transitorios, dependiendo de si la energía térmica se suministra a la muestra de forma modulada con un periodo fijo o simplemente se suministra un flujo de calor. La técnica del hilo caliente se clasifica dentro de los métodos dinámicos transitorios ya que emplea un flujo transitorio de calor para determinar la conductividad térmica. Estos métodos se basan en la transferencia de calor de una fuente controlada hacia un material y la medición del cambio de temperatura provocado por la disipación del calor a través de la muestra para determinar las propiedades térmicas de transporte del material.

El modelo matemático desarrollado para el método del hilo caliente (15), considera una fuente lineal de calor, delgada, infinitamente larga y con una distribución de temperatura uniforme, que disipa un flujo de calor por unidad de longitud en un medio homogéneo e infinito.

En la realidad se hace una aproximación de estas condiciones empelando un hilo delgado, de longitud finita e inmersa en un medio de prueba de dimensiones conocidas. La suposición general es que la transferencia de calor hacia el medio es solamente por conducción y por lo tanto se incrementan en el tiempo la temperatura de la fuente y la del medio de prueba.

El hilo es eléctricamente calentado por efecto Joule, el cambio en su resistencia eléctrica es medido en función del tiempo, generalmente empleando un sistema de adquisición de datos. Finalmente, el valor de la conductividad térmica es determinado considerando la potencia disipada por el hilo y la pendiente de la curva ΔT contra $\ln(t)$. La ecuación que gobierna este fenómeno se deriva de la ecuación general de difusión de calor de Fourier, que en coordenadas cilíndricas para la componente radial, r , se expresa como en la ecuación 2

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2)$$

Donde, $T = T_0 + \Delta T$ es la temperatura del medio a cualquier tiempo t , T_0 es la temperatura inicial de la fuente y el medio y ΔT es la diferencia de temperatura entre el medio y la temperatura inicial. Las condiciones de frontera a las que está sujeta la solución de la ecuación en este caso son:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \left\{ r \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} = -\frac{q}{2\pi k} \text{ para } t = 0 \text{ y } r = 0 \dots \dots \quad (3)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \{ \Delta T(r, t) \} = 0 \text{ para } t \geq 0 \text{ y } r = \infty$$

Carslaw y Jaeger (15) demostraron que la solución de la ecuación anterior es:

$$\Delta T = T(r, t) - T_0 = \frac{q}{4\pi k} \int_{r^2}^{\infty} \frac{e^{-u} du}{4\alpha t u} \quad (4)$$

Donde k y α son la conductividad y la difusividad térmica del medio respectivamente y q es el flujo de calor por unidad de longitud de la fuente. La integral que aparece en la ecuación 4, es la función integral exponencial que está dada por:

$$-Ei(-x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u} du}{u} = -\gamma - \ln x + x - \frac{1}{4}x^2 \quad (5)$$

Donde $x = \frac{r^2}{4\alpha t}$ y γ es la constante de Euler ($\gamma=0.5772$). Para tiempos suficientemente grandes los términos de orden superior de la ecuación 5 se consideran despreciables con respecto a los primeros dos. Por lo tanto, sustituyendo la ecuación 5 en 4 se obtiene: sustituyendo ecuación 4 en 3:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \left[-\gamma + \ln \frac{4\alpha t}{r^2} \right] \quad (4)$$

Simplificando esta ecuación se obtiene:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \ln t + \frac{q}{4\pi k} \ln \frac{4\alpha}{r^2} - \frac{q}{4\pi k} \gamma \quad (5)$$

Derivando con respecto $\ln t$ se obtiene la ecuación 6:

$$\frac{d\Delta T}{d(\ln t)} = \frac{q}{4\pi k} \quad (6)$$

Y por último despejando la conductividad térmica k se obtiene:

$$k = \frac{q}{4\pi A} ; k = \frac{q}{4\pi} \left[\frac{d\Delta T}{d(\ln t)} \right]^{-1} \quad (7)$$

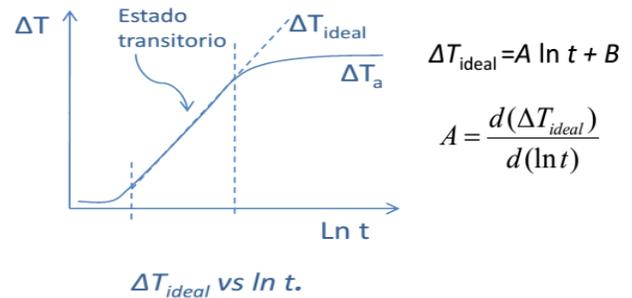


Gráfico 1 Gráfica sobre el comportamiento del modelo matemático para obtener la conductividad térmica (16)

Por lo anterior, si la temperatura del medio se mide en función del tiempo en cualquier posición radial fija, incluso en contacto con la fuente, la conductividad térmica del medio, es proporcional al flujo de calor de la fuente e inversamente proporcional a la pendiente, del gradiente de temperatura en relación con el logaritmo natural del tiempo, como se muestra en la Ecuación 7 y el Gráfico 1.

Análisis experimental

Montaje experimental

El diseño y la integración del sistema experimental se conforman por una serie de lineamientos definidos por el modelo matemático de método de medición. La teoría indica que el sistema debe ser tal que permita la realización de dos funciones básicas: (1) aplicar a la muestra una perturbación térmica consistente en la generación de calor con intensidad constante a lo largo de una línea contenida en la muestra, medición simultánea de la intensidad de generación de calor por unidad de longitud; (2) medir y registrar como función del tiempo el incremento de la temperatura producido por la perturbación térmica en un punto localizado a una distancia conocida de la fuente de calor.

Para realizar la primera función se emplea lo que en adelante se denomina como el sistema de calentamiento, mientras que para efectuar la segunda función se necesita un sistema de medición y registro de temperatura.

Subsistema de calentamiento.

Los componentes del sistema de calentamiento son un calentador de resistencia eléctrica, una fuente de corriente alterna y dos multímetros digitales. El calentador desempeña en el sistema experimental la función de la fuente lineal de calor del modelo conceptual. La relación entre longitud calentada y el diámetro del calentador es igual a 50. Blackwell (17) ha demostrado que fuentes de calor reales con relación de longitud a diámetro mayor o igual a 30 se comportan para fines prácticos como una fuente de calor lineal ideal (relación longitud a diámetro infinita), tal como lo requieren las bases conceptuales del método de medición. La resistencia del calentador es del orden de los 9 ohm, el voltaje que se le suministro a esta resistencia fue de 10 y de 26 voltios aproximadamente, obteniéndose dos potencias de 55 y 90 watts aproximadamente. La corriente y voltaje que se le aplica al calentador proviene de un transformador conectado a una fuente de voltaje de 120 voltios. El esquema se muestra en la

Figura 1.

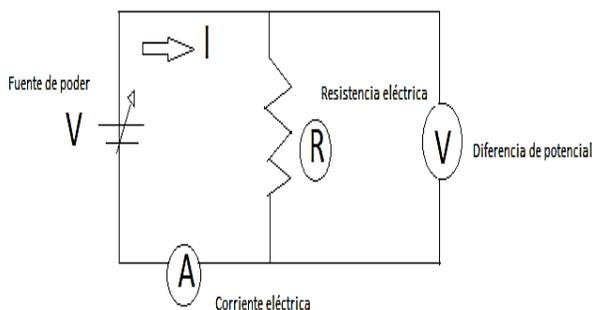


Figura 1 Sistema de calentamiento

Para determinar la potencia disipada por unidad de longitud en el calentador es necesario medir la caída de voltaje a través del calentador o bien, la intensidad de corriente circulante. En el caso particular del presente experimento se midieron tanto voltaje como intensidad de corriente.

Sistema de medición y registro de temperatura.

Los principales componentes son: el termopar tipo k, la tarjeta de adquisición de datos arduino, el módulo MAX6675, y el ordenador que se encarga de procesar los resultados obtenidos en el experimento. Para la captura y el almacenamiento de los datos temperatura-tiempo se hace uso de un adquirente computarizado que opera bajo el control de un programa de adquisición de datos. La frecuencia máxima de captura de datos que puede alcanzarse es de 4 eventos por segundo, lo que cubre holgadamente los requerimientos al respecto para los fines de aplicación del método experimental.

Procedimiento de aplicación del método.

El procedimiento para generar los datos temperatura-tiempo es como se describe a continuación: Haciendo las veces de medio infinito se emplea una muestra de bloque de 9.5 x 14.3 x 28 cm, en el cual en la parte central de su sección transversal se barrena de lado a lado. Un calentador de resistencia eléctrica de 0.5 cm de diámetro por 25 cm de longitud se inserta ajustadamente dentro de un orificio de igual diámetro que como se menciona anteriormente se taladra paralelamente al eje axial de la muestra. Este calentador desempeña satisfactoriamente en el sistema la función de fuente lineal de calor que estipula el modelo conceptual del método.

A cierta distancia radial se inserta un termopar en un barreno de 0.5 cm de diámetro por 5 cm de profundidad. El termopar se dispone de manera que la junta sensora del mismo quede en contacto directo con el material del fondo del barreno. Se le aplica energía al calentador en forma de corriente alterna de intensidad constante, durante un lapso de 20 minutos. Durante ese tiempo se mide y se registra continuamente el aumento de temperatura como función del tiempo en el punto de emplazamiento del termopar, obteniéndose de esta forma la historia temperatura-tiempo requerida para determinar la conductividad térmica del material. Simultáneamente también se monitorea constantemente el voltaje y la intensidad de corriente para obtener la potencia disipada por unidad de longitud, con los que se obtienen los datos experimentales requeridos para aplicar el método, en la

Figura se muestra el experimento con todos sus componentes.

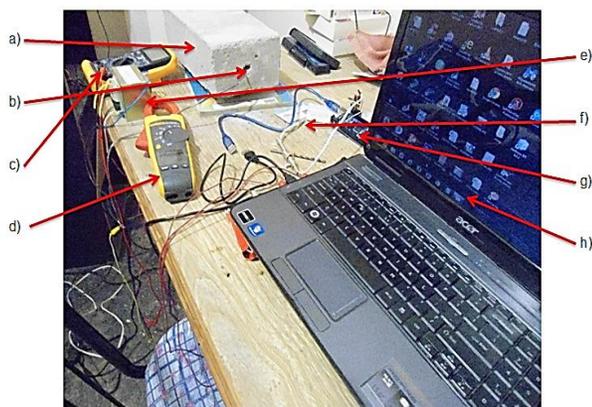


Figura 2 Componentes del sistema experimental: a) muestra, b) calentador, c) multímetro para medir voltaje, d) multímetro para medir intensidad de corriente, e) fuente de alimentación, f) termopar tipo k, g) tarjeta de adquisición de datos y h) ordenador

Validación y calibración del sistema de medición con materiales de referencia.

Para realizar la calibración y verificar el correcto funcionamiento del instrumento basado en la técnica del hilo caliente, se realizó la medición de la conductividad térmica de dos materiales de referencia (ladrillo y block común de hormigón), en el anexo IV se incluyen los valores de referencia para la conductividad térmica de estos materiales. Las mediciones se realizaron por un periodo de aproximadamente 25 minutos y la frecuencia de adquisición fue de una vez cada cuatro segundos aproximadamente para contar con suficientes puntos para la determinación de la conductividad térmica.

En los Gráficos 2 y 3 se muestra las gráficas ΔT contra tiempo (t) obtenidas a partir de los datos experimentales adquiridos durante la medición. ΔT representa la diferencia de temperatura entre la temperatura a un tiempo determinado y la temperatura al tiempo inicial de las muestras.

Una vez obtenida la gráfica ΔT contra t de acuerdo con la ecuación 6 se gráfica ΔT contra logaritmo natural del tiempo ($\ln t$) y se realizar un ajuste de mínimos cuadrados sobre la región lineal de la curva obtenida como se muestra en las Figuras 4 y 5.

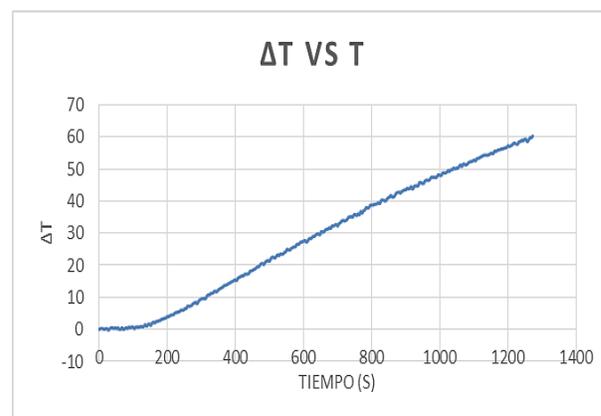


Figura 2 Gráfica de temperatura contra tiempo, para una muestra estándar de ladrillo

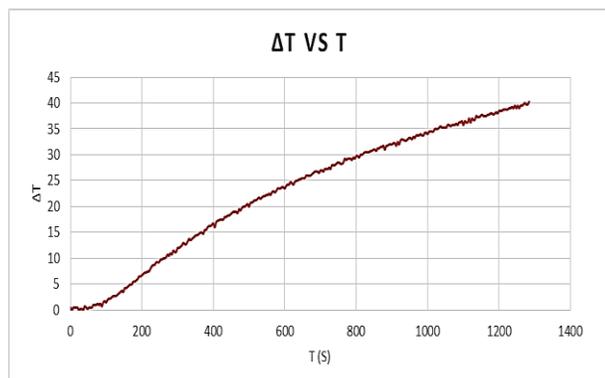


Gráfico 3 Gráfica de la temperatura contra tiempo, para una muestra del bloque estándar de hormigón

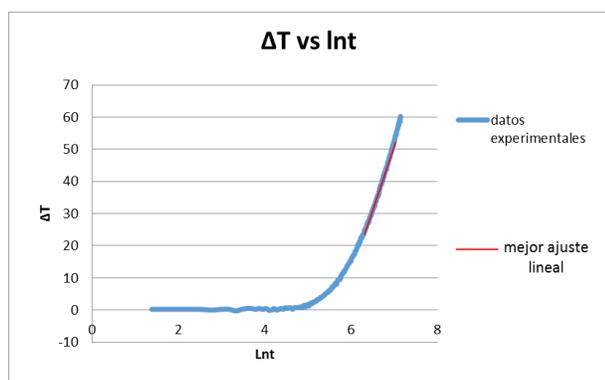


Gráfico 4 Gráfica del aumento de la diferencia de temperatura contra logaritmo natural del tiempo para el ladrillo.

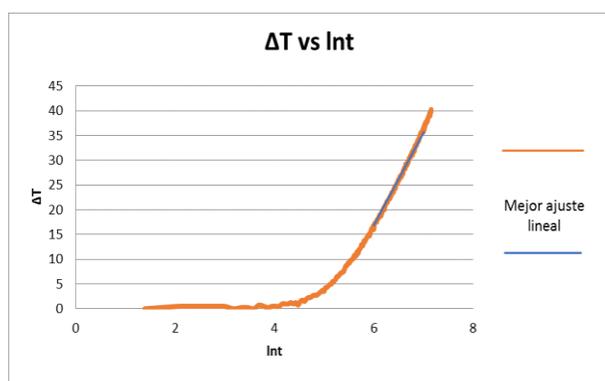


Gráfico 5 Gráfica del aumento de la diferencia de temperatura contra logaritmo natural del tiempo para el bloque de hormigón.

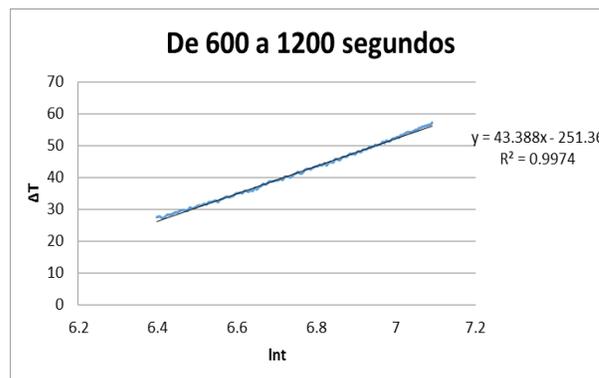


Gráfico 6 Pendiente A= 43.388 mediante el uso del método de mínimos cuadrados para el ladrillo.



Gráfico 7 Pendiente A= 20.836 mediante el uso del método de mínimos cuadrados para el bloque de hormigón

A partir del ajuste lineal se obtiene el valor de la pendiente (A), Gráficos 6 y 7. Por otro lado, conociendo la longitud del alambre (L), corriente suministrada (I) y voltaje suministrado (V) se calcula la potencia disipada por unidad de longitud (q).

$$q = \frac{V * I}{L} = \frac{[(26.5V)(3.7A)]}{\frac{0.25m}{392.2W}} \text{ para el ladrillo}$$

$$q = \frac{V * I}{L} = \frac{[(26.2V)(3.5A)]}{0.25m} = \frac{366.8W}{m} \text{ para el bloque de hormigón}$$

Una vez obtenidos los parámetros involucrados en la ecuación 7 se calcula la conductividad térmica (k)

$$k = \frac{q}{4\pi A} ; k = \frac{q}{4\pi} \left[\frac{d\Delta T}{d(\ln t)} \right]^{-1}$$

Por lo tanto para el ladrillo $k = 0.6998$ W/m°C. Valor de la conductividad térmica que se aproxima al 0.7 W/m°C reportado en la literatura para el ladrillo. Por otro lado, para el bloque de hormigón se obtiene un valor de $k = 1.4008$ W/m°C, el cual coincide con el reportado en la literatura de 1.4 W/m°C para el bloque de hormigón.

Resultados

Con el fin de ilustrar el procedimiento aplicado para la determinación experimental de la conductividad térmica, en este apartado sólo se incluirá a detalle las pruebas para un bloque con 50% de PET, ya que se aplicó de la misma manera para todos los especímenes. En el Gráfico 8 se presenta la gráfica ΔT contra t obtenida a partir de datos experimentales adquiridos durante la medición. En el Gráfico 9 se muestra la gráfica de ΔT contra $\ln t$ con un ajuste de mínimos cuadrados sobre la región lineal de la curva obtenida. Los resultados deberán ser por sección del artículo.

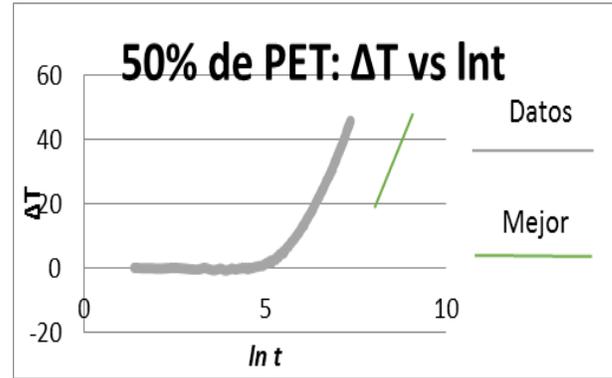


Gráfico 9 Gráfica de la temperatura contra logaritmo natural del tiempo, para 50% de PET

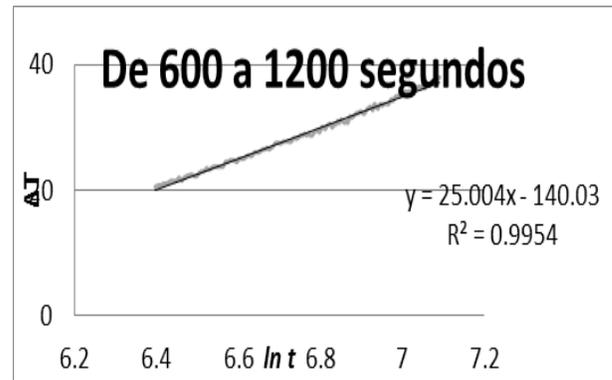


Gráfico 10 Obtención de la pendiente “A” mediante el uso del método de mínimos cuadrados

A partir del ajuste lineal en el rango de 600 a 1200 segundos (Gráfico 10), se obtiene el valor de la pendiente $A=25.004$. Por otro lado, se calcula la potencia disipada por unidad de longitud (q) a partir de la longitud del alambre (L), corriente suministrada (I) y voltaje suministrado (V)

$$q = \frac{V * I}{L} = \frac{[(26.2V)(3.6A)]}{0.25m} = 377.28W/m$$

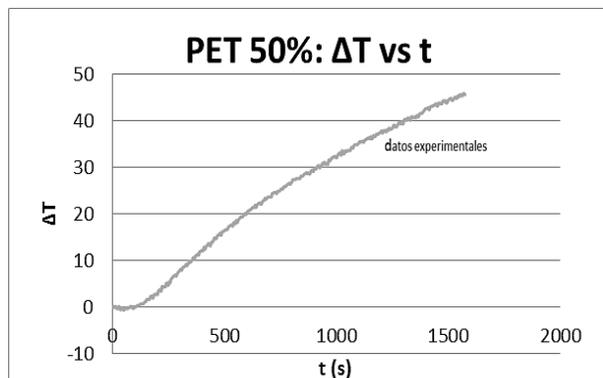


Gráfico 8 Gráfica de la temperatura contra tiempo para una muestra de bloque de 50% de PET

Con lo anterior se determina el valor de conductividad (k) a partir de la ecuación 7

$$k = \frac{q}{4\pi A} = \frac{377.28}{4\pi * 25.004} = 1.2007W/m^{\circ}C$$

Tabla de resultados

En la Tabla 1 se presentan los resultados de conductividad térmica obtenidos para las muestras analizadas en las que se incluye la Resistencia Térmica que resulta del inverso de la conductividad térmica multiplicado por el espesor (14.3cm = 0.143m)

Muestra	Voltaje (V)	Intensidad corriente (A)	Potencia (q/4πL)	Valor de A	Conductividad térmica (w/m°C)	Resistencia térmica (m²C/W)
Bloque de control (arena y cemento)	21.1	3.8	32.795	13.798	2.375	0.06021
25% de papel	26.35	2.95	24.743	30.054	0.8232	0.1737
50% de papel	26.6	3.1	26.2478	32.338	0.8066	0.1772
75% de papel	10.78	1.5	3.147	9.4273	0.3439	0.2619
25% de PET	26.5	3.7	30.385	14.606	2.109	0.0678
50% de PET	26.2	3.6	30.0229	25.004	1.2	0.1191
75% de PET	10.69	1.5	3.3167	7.2455	0.7337	0.1949
Block comm (arena, cemento y árido)	26.1	3.4	28.2468	26.603	1.061	0.1347
Ladrillo	26.5	3.6	30.3667	43.388	0.6998	0.2043

Tabla 1 Resultados sobre la conductividad térmica de las muestras analizadas

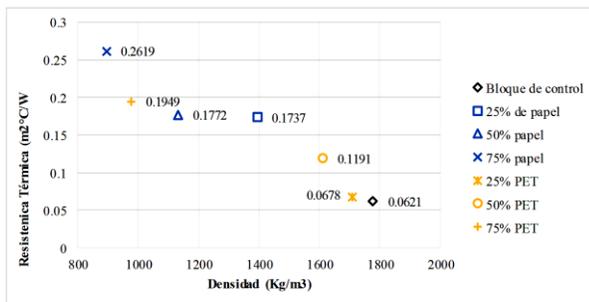


Gráfico 11 Resistencia térmica en función de la densidad

En la el Gráfico 11 se observa el efecto que tiene la densidad de las muestras sobre la resistencia térmica, resaltando que en comparación con el bloque de control, las muestras de 75% de PET y 75% de papel son las que presentan mayor resistencia térmica, por lo tanto son las de menor densidad.

Además, en el Gráfico 12 se puede observar el efecto del contenido de material reciclable en función de la resistencia térmica. Para el PET se presenta un incremento de resistencia sólo de $5.2 \times 10^{-3} m^2C/W$ para una concentración de material reciclable del 25%, respecto al valor de esta propiedad para el bloque de control (bloque fabricado con el método tradicional). Para concentraciones de 50% y 75% se mantiene una pendiente casi constante, incrementándose poco más del doble el valor de la resistencia térmica para una concentración del 50% y cerca del triple para una concentración del 75%. Un comportamiento distinto presentan las muestras de concreto-papel ya que en este caso el incremento en la resistividad se observa en el intervalo de 0% a 25% manteniendo un cambio casi nulo en el intervalo de 25% a 50%, volviendo a incrementar de manera considerable para el intervalo de 50% a 75%. Quizá por la distribución geométrica del material reciclado en la muestra. La diferencia de resistencia térmica entre los materiales reciclados utilizados (papel= ----, PET=) explica el por que los prototipos de concreto-papel presentan una resistencia térmica superior a los de concreto-PET

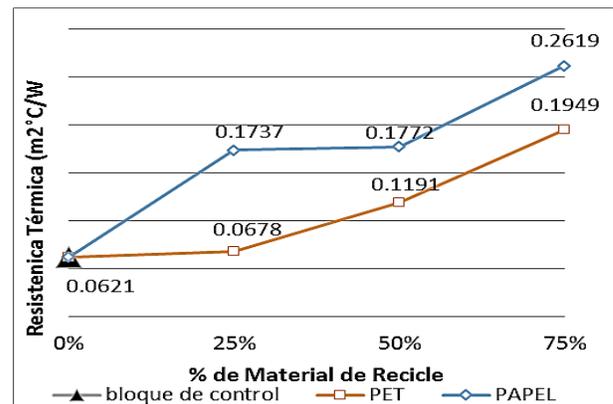


Gráfico 12 Resistencia Térmica contra % de Material Reciclable

Por otro lado, analizando los datos anteriores se puede concluir que en comparación con el bloque de control las muestras de 75% de PET y 75% de papel son las que presentan menor conductividad térmica, por lo tanto el incremento neto en su resistencia térmica es la que se presenta en la Tabla 2:

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.Muestra	Incremento de Resistencia térmica respecto al Bloque de control
25% de papel	2.80
50% de papel	2.85
75% de papel	4.22
25% de PET	1.09
50% de PET	1.92
75% de PET	3.14

Tabla 1 Incremento neto de Resistencia térmica

Agradecimiento

La presente investigación fue parcialmente financiada por la Fundación Educación Superior Empresa a través del proyecto “Manufactura y Caracterización de Bloques de Concreto con materiales Reciclados para Uso en Arquitectura Bioclimática”. Se agradece al CIATEQ sede Aguascalientes por las facilidades brindadas para el desarrollo del proyecto.

Conclusiones

Se logró la validación de las pruebas al obtener valores cercanos a los reportados en la literatura para el ladrillo y el bloque de hormigón, asegurando así la obtención de datos confiables en los materiales ensayados.

Los mejores valores de resistencia térmica 0.1949 y 0.2619 m²°C/W, se obtienen al agregar 75 %, PET y papel respectivamente, siendo muy cercanos al valor reportado para el ladrillo 0.2043 m²°C/W.

Los prototipos con un agregado de 75% de material reciclado incrementaron su resistencia térmica respecto al bloque de control en el orden de 3.24 veces para el concreto-PET y de 4.35 para el Concreto-Papel.

Por su parte los valores obtenidos para la muestra sin agregado de material reciclado fue de 0.0621 m²°C/W siendo este un valor bajo comparado con el reportado para los bloques comunes (0.1347m²°C/W).

Referencias

1. U.S. National library of Medicine. MedLine Plus. [Online] National Institutes of health, 01 22, 2013. [Cited: 05 01, 2014.] <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/ency/article/001982.htm>.
2. Senosiain, J. Bio-Arquitectura, En busca de un Espacio. México : Limusa A. de C.V. p. 156.
3. Physical and mechanical characterization of Fiber-Reinforced Aerated Concrete (FRAC). Bonakdar, A., Babbitt, F. and Mobasher, B. s.l.: Cement and Building Materials, April 2013, Vol. 38, pp. 82-91.
4. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. Foit, D. 4, 2011, Vol. 25, pp. 1906-15.
5. Foti, Dora. 4, s.l. : Construction and Building Material, Vol. 25, pp. 1906-1915.
6. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. Kim, Sung Bae, et al., et al. 3, s.l. : Cement and Concrete Composites, March 2010, Vol. 32, pp. 232-240.

7. Flexural, shear and bond strength of polymer concrete utilizing recycled resin obtained from post consumer PET bottles. Mahdi, Fareed, Abbas, H. and Khan, Asif Ali. s.l. : Construction and Building Materials, July 2013, Vol. 44, pp. 798-811.
8. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. Rahmani, E., et al., et al. s.l. : Construction and Building Materials, October 2013, Vol. 47, pp. 1302-1308.
9. sol.arq. Características térmicas básicas. [Online] julio 16, 2012. <http://www.sol-arq.com/index.php/caracteristicas-materiales/caracteristicas-basicas>.
10. Características térmicas básicas. [Online] julio 15, 2012. [Cited: diciembre 8, 2014.] <http://www.sol-arq.com/index.php/caracteristicas-materiales/caracteristicas-basicas>.
11. Ramirez, Ing. Salvador Alvarado. tecnica del hilo caliente. [Online] enero 2011. [Cited: diciembre 2, 2014.]
12. Thermal conductivity of newspaper sandwiched aerated lightweight. Ng, S. C., Low, K. S. 2010, Energy and Buildings, Vol. 42, pp. 2452–2456.
13. Elevated-temperature thermal properties of lightweight foamed concrete. Othuman, M. A., Wang, Y. C. 2011, Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 705–716.
14. Factors Affecting the Thermal Properties of Concrete and Applicability of Its Prediction Models. Khan, M. I. 2002, Building and Environment, Vol. 37, pp. 607-614.
15. H. S. Carslaw, J. C. Jaeger. Conduction of Heat in Solids. London : Oxford univ. Press, 1959.
16. Duarte, Saúl García. Medición de conductividad térmica de fluidos. [Online] noviembre 18, 2009.
17. Tippens, Paul E. Conductividad termica . Fisica conceptos y aplicaciones septima edicion. Cd. Mexico : McGraw-Hill, 2007, p. 372.
18. eoi.es. Arquitectura Bioclimática: Introducción y antecedentes. [Online] febrero 27, 2012. [Cited: octubre 1, 2014.] http://www.eoi.es/wiki/index.php/Arquitectura_Bioclim%C3%A1tica:_Introducci%C3%B3n_y_antecedentes_en_Ecomateriales_y_construcci%C3%B3n_sostenible.
19. inspiration. Material reciclado. [Online] agosto 16, 2010. [Cited: octubre 1, 2014.] <https://www.inspiration.org/cambio-climatico/reciclaje/material-reciclado>.
20. Bot G, P.A. Greenhouses Climate: From physical processes to dynamic model. PhD thesis, Wageningen Agricultural University : the Netherlands, 1983. p. 240, PhD thesis. PhD thesis.
21. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete, . Foti, , Dora. s.l. : Composite Structures, February 2013, Vol. 96, pp. 396-404.
22. Garzon, B. Arquitectura Sostenible Bases y casos demostrativos. Bogota Colombia : Nokubosa, 2011.

23. Polymer concrete with recycled PET: The influence of the addition of industrial waste on flammability. Guerra, Karina. s.l. : Construction and Building Materials, March 2013, Vol. 40, pp. 378-389.

24. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview. Pacheco-Togal, F., Ding, Yining and Jalali, Said. s.l. : Construction and Building Materials, May 2012, Vol. 30, pp. 714-724.

25. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. Saikia, Nabajyoti and de Brito, Jorge. s.l. : Construction and Building Materials, September 2012, Vol. 34, pp. 385-401.

26. Tylor, Charmaine R. Alternative Building Books. [Online] 1999. [Cited: Junio 2014, 20.] www.papercrete.com