

HD20: APARATO DE PLACA CALIENTE CON GUARDA PARA LA MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN EN HORMIGONES

A. E. Díaz, A. L. Hernández, J. E. Quiñonez, G. Ortiz y F. López

INENCO – Universidad Nacional de Salta – CONICET - Avda. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina
Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA).
Av. Bolivia 5150, C.P. 4400–Salta.
Tel. 0387-4255579–Fax: 0387-4255489. E-mail: andresmadara86@gmail.com

Recibido: 25/07/2021; Aceptado: 10/08/2021.

RESUMEN.- En este trabajo se presenta el diseño, la construcción y el funcionamiento de un aparato de placa caliente con guarda llamado Caja Caliente HD20 para evaluar, bajo condiciones de régimen estacionario, la transferencia de calor por conducción a través de probetas con forma de prisma de caras paralelas, y determinar indirectamente la conductividad térmica de hormigones de construcción con diferentes agregados. Para su diseño se aplicaron las normas IRAM 11559, IRAM 11549 e IRAM 11601 válidas en Argentina. La caja caliente consta de dos unidades principales: la unidad calefactora y la unidad de enfriamiento. Los valores de conductividad térmica obtenidos con este aparato concuerdan satisfactoriamente con los valores publicados en la bibliografía.

Palabras claves: Placa caliente con guarda, Hormigones especiales, Conductividad Térmica, Desechos Plásticos.

HD20: HOT PLATE APPARATUS WITH GUARD FOR THE MEASUREMENT OF HEAT TRANSFER PROPERTIES BY CONDUCTING IN CONCRETE

ABSTRACT.- This work presents the design, construction and operation of a hot plate device with guard called HD20 to evaluate, under steady-state conditions, the heat transfer by conduction through parallel-faced prism-shaped specimens. and indirectly determine the thermal conductivity of construction concrete with different aggregates. For its design, the IRAM 11559, IRAM 11549 and IRAM 11601 standards valid in Argentina were applied. The hot box consists of two main units: the heating unit and the cooling unit. The thermal conductivity values obtained with this apparatus agree satisfactorily with the values published in the literature.

Keywords: Hot Plate with Guard, Special concretes, Thermal conductivity, Plastic waste.

1. INTRODUCCIÓN

Es de suma importancia disponer de información sobre las propiedades de transmisión de calor de hormigones para distintos propósitos, incluyendo la evaluación del cumplimiento de reglamentaciones y especificaciones, para pautas de diseño, para investigación acerca del material y sus aplicaciones en la construcción, y para la verificación de modelos de simulación.

El hormigón es un material de construcción que permite en su elaboración la incorporación de residuos y consecuentemente el desarrollo de nuevos materiales; el estudio de sus propiedades termofísicas y mecánicas posibilita la creación de nuevos elementos y sistemas constructivos con un mayor

aprovechamiento de los recursos naturales y residuos de la industria. Reciclar los desechos de plástico para producir nuevos materiales es una de las soluciones para deshacerse de grandes cantidades de basura (Díaz y Hernández, 2018). Existen investigaciones sobre el uso de residuos plásticos como rellenos o agregados en hormigón, como el Tereftalato de polietileno (Choi, 2005), Poliestireno (Tang, 2008), Poliestireno Expandido (Kan, 2009), Cloruro de Polivinilo (Kou, 2009), Polietileno de Baja Densidad (Chaudhary, 2014), Polietileno de Alta Densidad (Naik, 1996), en residuos de E-plastic, en morteros (PET). Las investigaciones indicaron que el plástico reciclado podría reutilizarse como sustitutos parciales de la arena o agregado grueso (Albano, 2009).

Sin embargo, una vez que se tiene el nuevo material es preciso determinar sus propiedades físicas de transferencia de calor. Para ello se desarrolló y evaluó experimentalmente la Caja Caliente HD20, que es la abreviatura de los nombres de sus diseñadores, Hernández y Díaz. Dependiendo de los requisitos que deban cumplir las probetas, la caja HD20 determina las siguientes propiedades: resistencia térmica, transmitancia térmica, la conductividad térmica media y la resistividad térmica.

1.1. Antecedentes.

Existen diversas investigaciones sobre la implementación de Cajas Calientes con Guardas, como (Ghosh, 2013) que calculo la transmitancia térmica de un material. El autor utiliza dos tipos de calentadores en la caja de medición, un calentador de placa de 100 W y dos calentadores tubulares de 60 W. La caja de guarda consta de dos calentadores de resistencia tubular de 120 W. Finalmente la caja fría utiliza como fluido circulante una mezcla de etilenglicol con agua y un intercambiador de calor. Para lograr uniformidad de la temperatura se instalan ventiladores de 30 W en cada caja (medición, guarda y fría). El autor concluye que la temperatura de la caja de guarda, se obtuvieron fluctuaciones probablemente debido a la baja velocidad del aire circulante y que las pruebas deben realizarse durante períodos de tiempo más prolongados para evaluar el rendimiento del sistema con precisión.

El autor (Wernery, 2017) determina la conductividad térmica de ladrillos aislantes utilizando dos configuraciones de Cajas Calientes, una a gran escala para muestras de hasta 1000 x 1000 mm² (para matriz de mampostería de 4 ladrillos x 4 ladrillos) y otra para muestras a pequeña escala de 50 x 50 x 10 mm³. Ambas configuraciones son para muestras en posición horizontal y no tienen en cuenta la conductividad térmica del mortero. (Di Maio, 2018) obtiene conductividades térmicas de morteros con agregados plásticos, utilizando un aparato de Caja Caliente para probetas horizontales de 30 x 30 x 5 cm³. Realiza cinco ensayos por cada tipo de dosificación de morteros.

Algunos investigadores realizaron modificaciones a las Cajas Calientes existentes, como (Dalla Santa, 2017) que modifico la Caja Caliente llamada Taurus TLP 800 para obtener la Conductividad Térmica de Gravas. Una de las modificaciones se basó en las dimensiones de las probetas a 50 x 50 x 6 cm³. El tiempo promedio de funcionamiento del aparato fue entre 6 y 7 horas. Se utilizaron una placa fría superior y una placa caliente inferior. La diferencia de temperatura impuesta entre la placa caliente y la fría se reduce a 5°C. Concluyen que la metodología propuesta resuelve los problemas relacionados con la alta variabilidad mineralógica de las litologías formadas por gravas. Los resultados son confiables tanto en muestras secas como húmedas. (Carbonaro, 2015) modifico el aparato Lasercomp FOX600 para la obtención de las propiedades térmicas de un yeso con material de cambio de fase. Unas de las modificaciones permiten obtener pruebas térmicas en condiciones dinámicas. Las mediciones de conductividad térmica se realizaron a tres temperaturas medias diferentes (6°C, 21°C y 36°C) mientras que la diferencia de temperatura entre las dos placas se fijó en 10°C. El tiempo de los ensayos con este aparato fue en promedio 48 horas. Los resultados concuerdan con los indicados en productos de yeso con Materiales de Cambio de Fase similares.

Finalmente tenemos que (Dai, 2017) diseño un aparato de caja caliente para calcular la conductividad térmica de objetos en forma cilíndrica en estado estable y transitorio. Hay varios aspectos que pueden influir en la precisión del método propuesto, que incluyen principalmente: el almacenamiento de calor de las paredes del tanque de agua; pérdida de calor al medio ambiente; la entrada de energía eléctrica del agitador; y los errores de medición en los sensores. Concluye que el diseño se puede calibrar utilizando dos barras de cobre cilíndricas con diferentes longitudes y los errores sistemáticos de la medición se pueden minimizar o incluso eliminar mediante una prueba de calibración. (Baldwin, 2015) diseño una Caja Caliente para medir el flujo de calor a través una pared de 1220 mm por 1500 mm. Realiza la comparación de pruebas en estado estable in situ de paredes de alta resistencia térmica. El período de prueba duro 15 horas y se utilizaron 144,8 Wh de calor para mantener la caja de medición a una temperatura constante. El autor determinó que las pruebas con una Caja Caliente evalúan de manera más apropiada los diseños de paredes que incorporan muchos puentes térmicos.

2. PROPIEDADES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN DETERMINADAS CON LA CAJA HD20

2.1. Conductividad y Resistividad térmicas.

La propiedad que caracteriza la capacidad del material para transferir calor por conducción a través de él es la conductividad térmica. Es una propiedad específica del material y se define como la cantidad de energía térmica que se transmite en una dirección a través de un espesor unitario y por unidad de tiempo perpendicular a la dirección de flujo (IRAM 11549, 2002). La determinación de la conductividad térmica es importante para comprender el flujo de calor en los hormigones (Gandage, 2013). Para determinar la conductividad térmica media, las probetas deben ser homogéneas o poroso-homogéneas. Se consideran probetas poroso-homogéneas a aquellas en las cuales cualquier heterogeneidad tiene medidas más pequeñas que un décimo del espesor de la probeta. Cuando se utiliza la caja HD20 la conductividad térmica se calcula con la Eq. (1). El múltiplo 2 en el denominador de la Eq. (1) se debe a que el equipo de caja caliente con guarda utiliza dos probetas.

A menudo es más conveniente emplear en los cálculos el recíproco de la conductividad térmica, llamada resistividad térmica. Esta propiedad se define como: el número de horas requeridas para la transmisión de una kilocaloría, a través de un metro cuadrado de superficie en un material de un metro de espesor, cuando la diferencia de temperatura entre las caras externas es de un grado centígrado (IRAM 11549, 2002). La resistividad térmica se expresa con la Eq. (2).

2.2. Resistencia y Transmitancia térmicas.

La Resistencia térmica (R) es una medida de la resistencia que se opone al flujo de calor ya sea de un material simple o en una combinación de distintos materiales de cualquier espesor. Se la define como el número de horas necesario para la transmisión de una kilocaloría, a través de un metro cuadrado de material, cuando entre las superficies que lo limitan existe una diferencia de temperaturas de un grado celsius (IRAM 11549, 2002). La resistencia térmica se calcula con la Eq. (3) cuando se cumplan las condiciones de que las probetas sean homogéneas o porosas-homogéneas.

Para determinar el consumo de energía de climatización de una vivienda o edificio se utiliza lo que se denomina la

transmitancia térmica. Esta propiedad térmica es la cantidad de energía que se transfiere por conducción en la unidad de tiempo a través de la unidad de superficie de un elemento constructivo, cuando la diferencia de temperatura entre las masas de aire es igual a la unidad (IRAM 11601, 2002). La transmitancia térmica es la cantidad de energía que fluye a

través de un material o de una combinación de materiales de un determinado espesor. Para el cálculo de la transmitancia térmica se utiliza la Eq. (4). En la Tabla 1 se muestran las ecuaciones de las propiedades térmicas obtenidas con la caja HD20.

Tabla 1. Ecuaciones de las propiedades de transmisión de calor.

Propiedad Térmica	Ecuación	Unidades
Conductividad	$\lambda = \frac{\phi d}{2 A (T_1 - T_2)}$ (1)	W/mK
Resistividad	$r = \frac{1}{\lambda}$ (2)	mK/W
Resistencia	$R = \frac{T_1 - T_2}{\phi} A$ (3)	m ² K/W
Transmitancia	$K = \frac{1}{R}$ (4)	W/m ² K

3. DENSIDAD

La densidad es un parámetro fundamental para diferenciar la conductividad térmica de familias de materiales semejantes, como los hormigones, áridos y aislantes. El contenido de humedad de un material tiene un marcado efecto en el valor del λ del material; mientras mayor es el contenido de humedad, mayor será el valor de λ . Por ello, lo primero que se hace es acondicionar las probetas de ensayo secándolas con una estufa que trabaja entre 47°C y 57°C durante 24 horas (Tropea, 2014). Al final del proceso de secado de las probetas de hormigón se las introduce rápidamente en la caja HD20 para que no absorban humedad nuevamente. Se calcula la densidad seca ρ_d de la probeta acondicionada para el ensayo con la Eq. (5).

$$\rho_d = \frac{M_2}{V} \quad (\text{Kg/m}^3) \quad (5)$$

4. LA CAJA CALIENTE HD20

El término “placa caliente con guarda” se aplica a un aparato totalmente ensamblado, denominado en consecuencia “aparato de placa caliente con guarda”. La Caja Caliente HD20 es un aparato de placa caliente con guarda. Las características generales del aparato con los calefactores (A y C), las probetas (F), las unidades de enfriamiento (E) y termocuplas instaladas (G, H y J) se muestran en la Figura 1.

Las dimensiones de la caja HD20 son 39 cm x 39 cm x 19 cm. La caja exterior que envuelve a todo el ensamble es de madera con dos puertas laterales y un techo corredizo para la manipulación de las probetas.

Para sujetar firmemente todo el conjunto compuesto por las placas calefactoras, las muestras a ensayar y las unidades de enfriamiento, se instalaron varillas roscadas con tuercas galvanizadas en los 4 vértices de la caja que permiten comprimir adecuadamente los distintos elementos y lograr un buen contacto térmico entre las muestras y las fuentes caliente y fría (Figura 1, derecha). Además, permiten regular con precisión el espaciamiento entre las placas del aparato. Las puertas laterales y el techo del recinto de madera son sujetas con cierres metalizados de exteriores.

4.1. Principio de funcionamiento del aparato HD20.

Mediante el aparato HD20 se establece dentro de las probetas, cuya forma es la de una placa uniforme de caras plano-paralelas, un flujo de calor uniforme y unidimensional perpendicular a las caras en condiciones de régimen estacionario (IRAM 11559, 1995). La caja HD20 es un aparato de placa caliente con guarda para dos probetas aproximadamente iguales, con una unidad de enfriamiento por cada probeta y una unidad calefactora central.

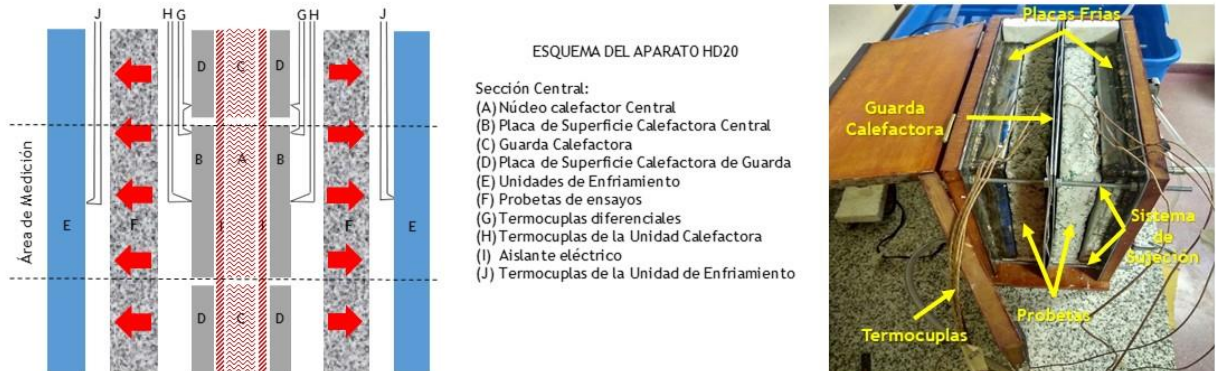


Fig.1. Esquema del Método de Placa Caliente con Guarda.

4.2. Unidad Calefactora.

La unidad calefactora (Figura 2a) consiste de una sección de medición central y una sección de guarda que la rodea construida con una PBC (Printed Circuit Board) de Pertinax, a la cual se le extrajo el cobre con un baño de óxido ferroso (Mitzner, 2009). La placa caliente central es cuadrada con dimensiones de 15 cm x 15 cm x 0.2 cm, en la cual se enrolla una resistencia eléctrica de alambre de Nicrom (aleación de 80% de Níquel y 20% de Cromo) de 0.4 mm de diámetro, cubriendo ambas caras de la placa. El valor de la resistencia eléctrica de este calefactor es de 70 Ω (valor medido a 20°C). Los 2 extremos de este devanado salen hacia afuera mediante terminales largos para enchufarlos en la bornera del variador de voltaje que permite seleccionar la temperatura de trabajo. La sección de guarda es de material Pertinax de dimensiones

30 cm x 30 cm x 0.2 cm con un hueco central de 15 cm x 15 cm donde se ubica la placa caliente central. Tiene bobinados de alambre Nicrom de 0.4 mm de diámetro en ambas caras de la placa de guarda que dan una resistencia eléctrica de 220 Ω . Los dos extremos de la resistencia eléctrica de la guarda salen hacia la bornera de otro variador de voltaje que permite igualar la temperatura de trabajo de esta franja con la de la placa central. De esta forma, se garantiza la existencia de un flujo de calor unidimensional en la región central de las muestras de hormigón a evaluar, perpendicular a sus caras. A fin de uniformizar la temperatura sobre las caras de las muestras que dan a la placa calefactora, se intercala entre ellas una placa de aluminio de 1.5 mm de espesor dividida también en una sección central y una sección de guarda según se observa en la Figura 2b.

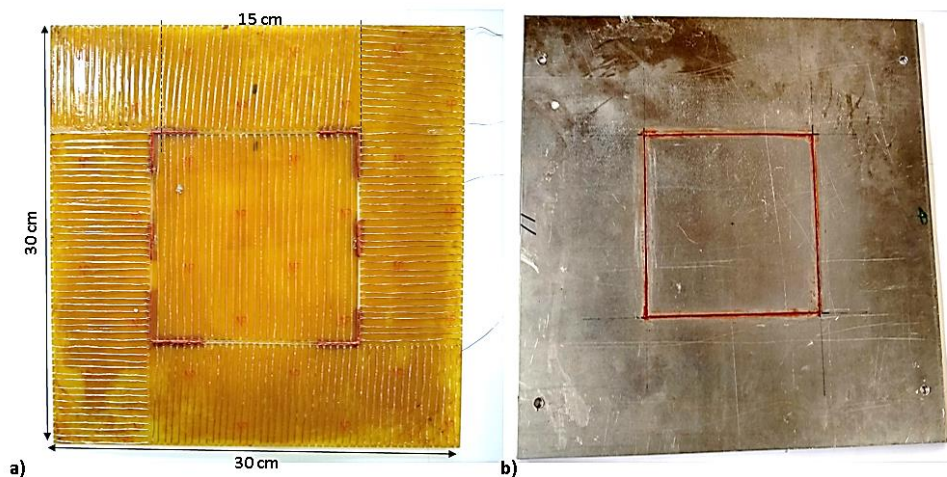


Fig 2. a) Placa calefactora central y de guarda. b) Placa de superficie caliente con guarda.

La unidad calefactora tiene una ranura de separación entre las placas de la sección central y la de la guarda. El espacio de esta ranura fue relleno con silicona para alta temperatura. A fin evitar el contacto eléctrico entre las placas de aluminio y las resistencias eléctricas calefactoras se intercaló entre ellas una película de poliéster denominada Mylar.

4.2.1. Alimentación eléctrica de la unidad calefactora.

Tanto la unidad calefactora central como la resistencia eléctrica de la guarda son alimentadas con Corriente Alterna. Cada resistencia tiene un regulador Dimmer marca RBC Sitel modelo 0520 con los cuales se regulan los voltajes y la potencia disipada en cada una de ellas hasta obtener un flujo de calor uniforme tanto de la sección central como de la guarda.

4.3. Unidad de Enfriamiento.

Las medidas de la superficie de la unidad de enfriamiento son iguales a las de la unidad calefactora, incluyendo el calefactor de la guarda. La unidad de enfriamiento es un sistema compuesto por tres elementos. El primero consiste en una caja metálica de acero inoxidable de 30 cm alto, 30 cm ancho y 3 cm de espesor en contacto con cada probeta a ensayar. El segundo elemento es el agua destilada que circula forzada por una bomba por el interior de las cajas de acero inoxidable a razón de 1.25 l/min. El fluido ingresa por la parte inferior de la caja metálica y sale por la parte superior, extrayendo el

calor que atraviesa la probeta de ensayo. El agua que sale de la caja, a una temperatura mayor a la que ingresó, pasa a un intercambiador de calor aire-agua de flujo cruzado del tipo radiador de automóvil a fin de disipar el calor extraído de la muestra. El aire circulado por este intercambiador está a la temperatura ambiente del laboratorio y es impulsado por un ventilador.

La tercera y última parte de la unidad de enfriamiento es un tanque de plástico de 40 litros de capacidad que cierra el circuito de circulación del fluido. En este tanque está instalada la bomba que recircula el agua entre el intercambiador de calor y la caja de acero inoxidable. El detalle de la unidad de enfriamiento se muestra en Figura 3.

4.4. Aislación térmica lateral y pérdida de calor.

A fin de minimizar la pérdida de calor desde la placa calefactora hacia el exterior y evitar la formación de un flujo de calor bidimensional a través de las probetas de ensayo se deben aislar térmicamente los bordes laterales de la unidad calefactora. Las pérdidas de calor por estos bordes desde la unidad calefactora y las probetas generan gradientes de temperatura en las placas de la sección de guarda perpendiculares a la dirección horizontal, lo que produce una desviación bidimensional en la dirección ideal del flujo de calor concebida como unidimensional (De Ponte & Di Filippo, 1974).

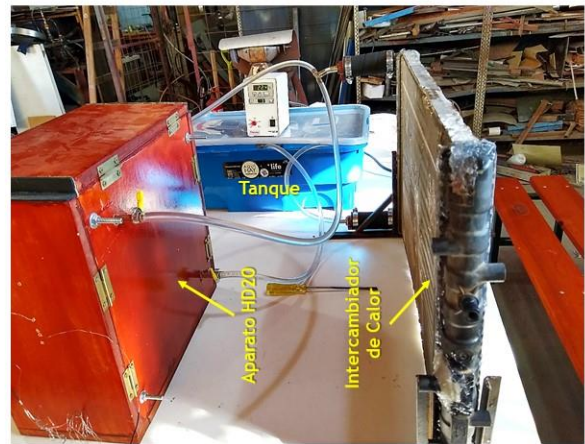
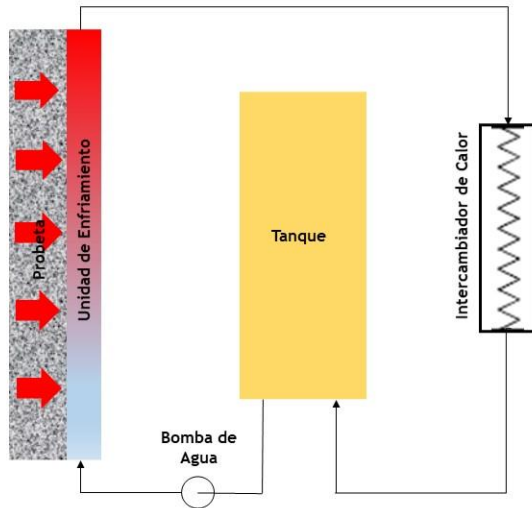
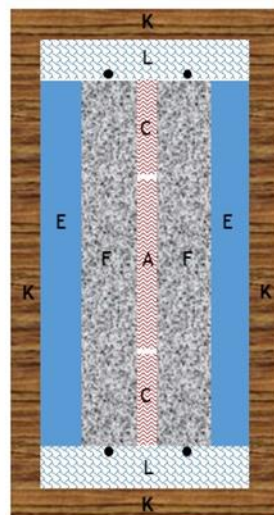


Fig 3. Esquema de la Unidad de Enfriamiento.

Las pérdidas de calor hacia el exterior provocarían errores en la determinación de la conductividad térmica de las muestras. Estos errores se calculan para probetas homogéneas, isotrópicas y opacas, bajo condiciones de borde simplificadas. Para reducir estos errores al mínimo, las temperaturas medias de las probetas se aproximan a la temperatura ambiente a fin de minimizar el gradiente térmico a través del borde lateral de la caja del HD20. Para lograr esto, sus aislaciones térmicas laterales son de espuma expandida de 3 cm de espesor cuya densidad es 15 Kg/m^3 y su conductividad térmica varía entre 0.032 W/mK y 0.037 W/mK . Finalmente, la envolvente exterior del HD20 es de madera de 1,5 cm de espesor. En la figura 4 se muestra la configuración de las aislaciones laterales y la envolvente de madera del aparato.

4.5. Sistema control electrónico.

Los sensores de diferencia de temperatura entre la zona central y la de la guarda se conectaron en forma diferencial a fin de medir directamente tal diferencia la cual, idealmente, debe ser 0°C . El aparato utiliza termocuplas de alambre grado termopar sólido calibre 20 AWG Tipo K (Cromel-Alumel) de pequeño diámetro (0.51 mm), con certificación ISO 9001:2008, resistencia a la abrasión aceptable y buena resistencia a la humedad hasta 150°C (el aparato HD20 trabaja a una temperatura Max de 75°C). Las temperaturas superficiales sobre la zona central y de guarda se miden también con estas termocuplas colocadas en las superficies de contacto con las probetas.



- (A) Núcleo Calefactor.
- (C) Guarda Calefactora.
- (E) Unidad de Enfriamiento.
- (F) Probetas de Ensayos.
- (K) Aislación de Madera.
- (L) Aislación Lateral (los puntos negros son Termocuplas).

Fig. 4. Configuración de la aislación lateral y envolvente del aparato HD20.

Para el control de temperatura de la Unidad Calefactora y la Unidad de Enfriamiento el aparato HD20 utiliza un termostato digital con sonda STC-1000. Primero programamos la Unidad Calefactora, por ejemplo, poniendo un valor de referencia (65°C) y un valor de histéresis (0°C).

De esta manera el termostato encenderá la Unidad Calefactora y la temperatura irá subiendo hasta alcanzar el valor de referencia, en este valor el termostato apagará la fuente de calor. Al bajar la temperatura de la unidad calefactora, del valor de referencia dado, el termostato se

volverá a encender y así sucesivamente. Luego programamos la Unidad de Enfriamiento ingresando un valor de referencia (20°C) para que el termostato encienda la bomba de agua. En la Figura 5a se muestra el sistema de control electrónico. Los datos de temperatura de todos los sensores fueron registrados mediante un datalogger Labjack U6, cuyas principales características son: 14 entradas analógicas con un rango de ± 10 V, ganancia ajustable por software y la posibilidad de elegir entre una resolución de 16 o de 18 bits.

Para medir la potencia eléctrica entregada por la unidad calefactora, tanto la de la sección de guarda como la de la placa central calefactora, se utilizó un osciloscopio marca Leader 20 MHz modelo LS 1040. En la figura 5b se muestra la onda triangular V-I entregada por la unidad calefactora a partir de la cual se calcula el valor eficaz promedio de tensión, V_{rms} , a lo largo de la medición.

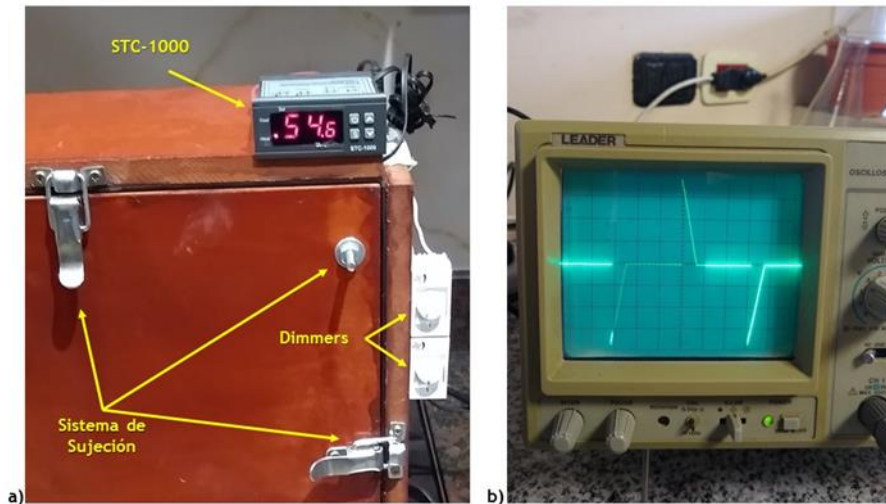


Fig. 5. a) sistema de control electrónico. b) curva V-I de la unidad calefactora.

5. PROBETAS DE ENSAYO

El HD20 está diseñado para alojar dos probetas de hormigón con diferentes agregados, idénticas en forma, dimensiones y constitución. Las probetas están ubicadas verticalmente siendo sus dimensiones 30 cm de alto, 30 cm de ancho y espesor mínimo de 4 cm o máximo de 4.5 cm. El espesor de las dos probetas tiene que diferir en menos de 2 %. El apartamiento máximo de la superficie real de las probetas respecto al plano de las placas, tanto de la unidad calefactora como de la unidad de enfriamiento, no deben exceder el 0.025 % en todas las condiciones de operación. Es decir, suponiendo un plano ideal que está en contacto con la superficie en M en la Figura 6, en cualquier otro punto O de

la superficie la relación entre la distancia N-O desde el plano y la distancia N-M desde el punto de contacto de referencia deberá ser menor que 0.025 %. En la ciudad de Salta Capital se arrojan 58 toneladas diarias de plástico, se recuperan solamente 5 toneladas diarias. En la producción de Perlita Expandida el 20% de la perlita cruda se desperdician. Se propone como solución el desarrollo de mezclas de hormigón para la fabricación de ladrillos, bloques y contrapisos con agregados de Polietileno de Alta y de Baja Densidad y Finos de Perlita (Díaz, 2018). Los agregados gruesos y finos fueron reemplazados en diversos porcentajes de volumen de mezcla por los plásticos reciclados. Se utilizó Perlita cruda en sustitución de una parte del cemento.

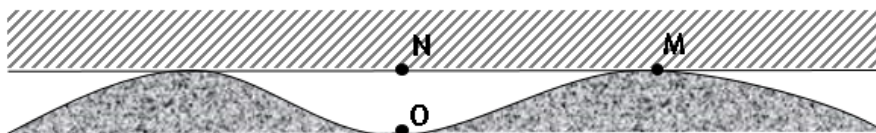


Fig. 6. Apartamiento de la superficie de la probeta respecto de un plano de la placa.5.1. Concrete Mix

En la Tabla 2 se detallan las probetas ensayadas con hormigón de diferentes agregados. Las probetas provienen de una investigación sobre dosificaciones de hormigón (Díaz & Hernández, 2018). La Tabla 2 muestra el peso de cada componente de las mezclas por m^3 de Hormigón con que se formaron las probetas, para la probeta de control con solo agregados pétreos (PE1); con reemplazo de 19% de agregado

grueso por plástico (PE2); con reemplazo de 37% de agregado grueso por plástico (PE3); con 19% de agregado plástico, 31% de agregado fino y 50% de agregado grueso (PE4); finalmente con 19% de agregado plástico más el reemplazo del 19% de cemento por finos de perlita (PE5). Los porcentajes de agregados elegidos se deben a su buen comportamiento ante los ensayos mecánicos realizados sobre las mezclas.

Tabla 2. Probetas ensayadas de hormigón con diferentes agregados.

Material (kg/m ³)	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5
Agua	140	140	140	140	140
Cemento	260	260	259	259	210
Agg. grueso	1364	1033	803	1094	999
Agg. Fino	816	749	749	752	721
Plástico	0	78	152	60	79
Aditivo	1.6	1.6	1.6	1.6	1.3
Perlita	0	0	0	0	49

6. CALIBRACIÓN Y COSTO DE FABRICACIÓN DEL APARATO HD20

Para la calibración del equipo se utilizaron probetas de hormigón con agregados pétreos de diferentes densidades aparentes, mármol y madera dura, cuyas conductividades térmicas son conocidas y se usaron como probetas de referencia de la norma IRAM 11601 “Acondicionamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario” (IRAM 11601, 2002).

El costo total, incluyendo los materiales y la fabricación del aparato HD20, fue de U\$S 350 dólares americanos.

7. RESULTADOS

La Tabla 3 detalla las características generales del aparato HD20 y las condiciones de operación utilizadas para obtener las propiedades térmicas. Con el sistema de circuito cerrado de la Unidad de Enfriamiento se ahorraron entre 360 litros y 437 litros de fluido por cada ensayo. El tiempo de pruebas de los cinco ensayos duro en promedio 5.5 horas y se utilizaron entre 37 Wh y 64 Wh de calor para mantener la Unidad Calefactora a una temperatura constante.

En las Tablas 4 a 6 se detallan las densidades de las muestras y las propiedades térmicas obtenidas con el aparato HD20. Los valores en que se redujo la densidad de la probeta PE1 van desde el 13 % al 19.6 %. Esto se debe al reemplazo de agregados pétreos por agregado plásticos a fin de disminuir la conductividad térmica global del hormigón.

Tabla 3. Características generales del aparato HD20

Dimensiones del aparato	39 cm x 39 cm x 19 cm
Potencia de operación	Entre 37 W y 64 W
Temperatura Max de operación	75°C
Tamaño de las probetas	30 cm x 30 cm x espesor (entre 4 cm y 4.5 cm)
Orientación de las probetas	Vertical
Volumen de agua utilizada en los ensayos	52.4 litros (circuito cerrado)
Promedio de horas por cada ensayo	5.5 hs
Método empleado	Placa caliente con guarda para 2 probetas
Peso del aparato	9 kg
Precio total de construcción del HD20	U\$S 350

Tabla 4. Composición de Agg. plástico en la mezcla y Densidad Seca (ρ_d) obtenida con el HD20.

Probetas de Ensayo	Agg. Plástico (%)	Densidad (kg/m ³)	$\Delta\rho_d$ (%)
PE1	--	2467 ^{±67}	--
PE2	19	2147 ^{±61}	-13
PE3	37	1983 ^{±58}	-19.6
PE4	19	2217 ^{±63}	-10.1
PE5	19	2111 ^{±69}	-14.4

Tabla 5. Conductividad (λ) y Resistencia (R) térmicas obtenidas con el HD20.

Probetas de Ensayos	Conductividad Térmica (W/mK)	$\Delta\lambda$ (%)	Resistencia Térmica (m^2K/W)	ΔR (%)
PE1	1.761 \pm 0.077	--	0.0210 \pm 0.0015	--
PE2	1.357 \pm 0.059	-23	0.0273 \pm 0.0020	30
PE3	1.049 \pm 0.045	-40	0.0353 \pm 0.0025	68
PE4	1.442 \pm 0.063	-18.1	0.0257 \pm 0.0019	22.4
PE5	1.296 \pm 0.056	-26.4	0.0286 \pm 0.0020	36.2

Tabla 6. Resistividad (r) y Transmitancia (K) térmicas obtenidas con el HD20.

Probetas de Ensayos	Resistividad Térmica (mK/W)	Δr (%)	Transmitancia Térmica (W/m^2K)	ΔK (%)
PE1	0.568 \pm 0.024	--	47.6 \pm 3.4	--
PE2	0.737 \pm 0.032	29.7	36.6 \pm 2.6	-23.1
PE3	0.954 \pm 0.040	67.9	28.3 \pm 2.0	-40.5
PE4	0.693 \pm 0.030	22	38.9 \pm 2.7	-18.3
PE5	0.776 \pm 0.033	36.6	35.0 \pm 2.5	-26.5

La tabla 5 muestra como la conductividad térmica de PE1 se redujo entre un 18.1 % y 40 %, mientras que la resistencia térmica aumento entre 22.4 % y los 68 %.

Los valores de resistividad térmica de la probeta de control aumentaron hasta valores de 67.9 %, mientras que la transmitancia térmica se redujo hasta el 40.5 % para la muestra PE3.

En el gráfico de barras de la Figura 7 se observa la tendencia a la disminución de la conductividad térmica en la medida que aumenta el porcentaje de agregado plástico. (Kook-Han, 2003) confirma esta tendencia afirmando que la fracción de volumen de agregado grueso se revela como uno de los factores que afectan principalmente a la conductividad térmica del hormigón.

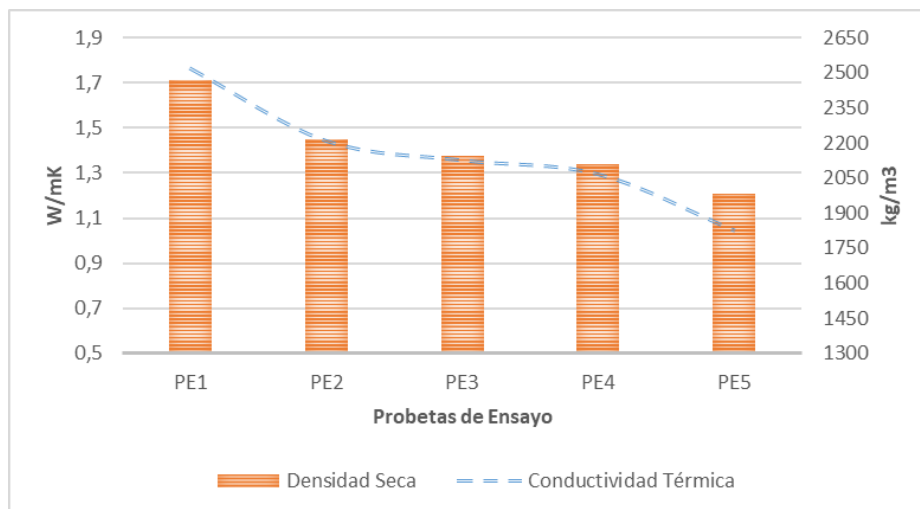


Fig 7. Comportamiento de la conductividad térmica respecto a la densidad.

8. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un equipo que permite medir las propiedades térmicas de hormigones comunes y hormigones con agregados especiales, más precisamente Polietileno de Alta y de Baja Densidad y Perlita. Este aparato cumple con las especificaciones técnicas de las normas nacionales IRAM 11559, IRAM 11549 e IRAM 11601 de Argentina. Mediante datos conocidos de propiedades térmicas de diferentes

hormigones, se validaron los resultados del aparato obteniéndose valores dentro del orden +/-2%.

El circuito cerrado de la Unidad de Enfriamiento permitió ahorrar al menos 360 litros de fluido por cada ensayo. El bajo consumo eléctrico y peso hacen del aparato de Caja Caliente de fácil traslado. El sistema de sujeción brinda seguridad y un sencillo mantenimiento.

El remplazo de agregados gruesos y finos por polietileno de Alta y Baja densidad, logró disminuir la Densidad (entre 13 y 19.6 %), la Conductividad térmica (entre 18.1 y 40 %) y la Transmitancia térmica (entre 23 y 40.3 %) respecto al hormigón base sin agregados de plásticos. Mientras que la Resistividad térmica y la Resistencia térmica aumentaron correspondientemente (entre 22 y 68 %). El remplazo del 37 % de agregado plástico no es recomendable para el uso de hormigones en pisos, bloques y ladrillos debido a su baja resistencia a la compresión. Se recomienda el remplazo del 19 % de agregado plástico y 19 % de Perlita cruda. Los datos obtenidos servirán para futuras simulaciones energéticas edilicias para garantizar un gran ahorro energético.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y al Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa) por los fondos aportados para financiar este trabajo.

NOMENCLATURA

A: Área de medición, medida sobre una superficie isotérmica (m^2).
 d: Espesor medio de la probeta (m).
 M_1 : Masa de la probeta en el momento de la recepción (kg).
 M_2 : Masa de la probeta después del secado (kg).
 r: Resistividad Térmica (mK/W).
 R: Resistencia Térmica (m^2K/W).
 t: Tiempo (s).
 T_1 : Temperatura de la superficie caliente de la probeta ($^{\circ}C$).
 T_2 : Temperatura de la superficie fría de la probeta ($^{\circ}C$).
 T_a : Temperatura ambiente (temperatura en la proximidad de la probeta) ($^{\circ}C$).
 V: Volumen (m^3).
 λ : Conductividad Térmica, l/r (W/mK).
 K: Transmitancia Térmica, l/R (W/m^2K).
 Φ : Tasa de transferencia de calor (W).
 ρ_d : Densidad de la probeta seca (kg/m^3).
 $\Delta(propiedad)$: Diferencia porcentual entre la probeta de control y la probeta con agg. especiales (%).

REFERENCIAS

Albano, C., et al. (2009). Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*, **29** (10), 2707-2716.
 Baldwin C., Cruickshank C. (2015). Comparison of steady-state and in-situ testing of high thermal resistance walls incorporating vacuum insulation panels. *Energy Procedia* **78**, 3246 – 3251.
 Carbonaro C., Cascone Y., 2015. Energy assessment of a PCM-embedded plaster: embodied energy versus operational energy. *Energy Procedia* **78**, 3210 – 3215.
 Chaudhary, M., Srivastava V., and Agarwal V. (2014). Effect of waste low density polyethylene on mechanical properties of concrete. *Journal of Academia and Industrial Research (JAIR)*, **3**, 123-126.
 Choi, Y.-W., et al. (2005). Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, **35** (4), 776- 781.

DAI C., GUO X. (2017). Thermal Conductivity Measurement of A Bar-like Object. *Energy Procedia* **142**, 3975 – 3981.
 Dalla Santa G., Peron F. (2017). Laboratory Measurements of Gravel Thermal Conductivity: An Update Methodological Approach. *Energy Procedia* **125**, 671– 677.
 De Ponte F., Di Filippo P. (1974). Design Criteria for Guarded Hot Plate Apparatus. In *ASTM STP* No. 544, Philadelphia, pp. 97-117.
 Díaz Andrés E. y Hernández A. (2018). Dosage test for concrete blocks, bricks and subfloors with plastic waste and perlite fines. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **22**, 01.71-01.82.
 Di Maio L., Coppola B. (2018). Data on thermal conductivity, water vapour permeability and water absorption of a cementitious mortar containing end-of-waste plastic aggregates. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.083>.
 Gandage A., Vinayaka R. (2013). Effect of Perlite on Thermal Conductivity of Self-Compacting Concrete. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* **104**, 188 – 197.
 Ghosh A., Ghosh S., Neogi S. (2013). Performance Evaluation of a Guarded Hot Box U-value Measurement Facility under Different Software Based Temperature. *Energy Procedia*, **54**, 448 – 454.
 Kan, A. and Demirboğa R (2009) A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*, **209**(6): 2994-3000.
 Kook-Han, K., Sang-Eun, J., Jin-Keun, K. & Yang S. (2003). An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research*, **33**, 363-371.
 Kou, S., et al (2009). Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Management*, **29**(2): 621-628.
 Mitzner K. (2009). Complete PCB Design Using OrCAD Capture and PCB Editor. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8971-7.X0001-7>.
 Naik, T.R., et al. (1996). Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites. *Cement and Concrete Research*, **26**(10): 1489- 1492.
 Norma IRAM 11.559-1995. Thermal conditioning of buildings. Method of determining the thermal conductivity of building materials using the hot plate apparatus. Recuperado de <http://www.iram.org.ar/index.php>.
 Norma IRAM 11549-18. Thermal insulation of buildings. Definitions. Recuperado de: <http://www.iram.org.ar/index.php>
 Norma IRAM 11601-02. Thermal insulation of buildings. Calculation methods. Thermal properties of components and building elements in steady state. Recuperado de: <http://www.iram.org.ar/index.php>.
 Tang, W., Lo Y., and Nadeem A. (2008). Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, **30**(5): 403-409.
 Tropea I., Villagrán Z. (2014). Drying of the evaluated concrete by means of the impact resonance frequency and the ultrasonic pulse velocity. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/301889988>.
 Wernery J, Ben-Ishai A., Binder B & Brunner S. (2017). Aerobrick – An aerogel-filled insulating brick. *Energy Procedia* **134**, 490–498.