



# Respuestas

Engineering journal



## INVESTIGACIÓN

<https://doi.org/10.22463/issn.0122-820X>

### Diseño y fabricación de un prototipo a escala de una cámara con variación de humedad y temperatura para curado de concretos de activación alcalina elaborados a partir de mezclas de escoria siderúrgica y cenizas volantes.

Carlos Daniel Hernández Montiel<sup>a</sup>, William Arnulfo Aperador Chaparro<sup>b</sup>, Manuel Jonathan Pinzón Cárdenas<sup>c\*</sup>, Jhon Wilmar Cárdenas Pulido<sup>d</sup>.  
<sup>a</sup>Ingeniero en Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá Colombia.

<sup>b</sup>Doctorado en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de Materiales, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá Colombia.

<sup>c</sup>Maestría en Materiales y Procesos, Universidad ECCI, Bogotá Colombia.

<sup>d</sup>Ingeniero Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá Colombia.

Recibido el 23 de Julio de 2017; Aprobado el 02 de Diciembre de 2017.

#### PALABRAS CLAVE

curado, humedad, temperatura, modular, concreto, escoria, ceniza

Diseño y fabricación de un prototipo a escala de una cámara con variación de humedad y temperatura para curado de concretos de activación alcalina elaborados a partir de mezclas de escoria siderúrgica y cenizas volantes

El estudio realizado da a conocer el diseño y fabricación de un prototipo modular a escala, de una cámara con variación de humedad y temperatura para curado de concretos de activación alcalina; elaborado a partir de mezclas de escoria siderúrgica y cenizas volantes, para ser montado directamente en obra; el estudio beneficia al sector industrial en el desarrollo de nuevos proyectos a dado que permite mejorar el desempeño, reducir riesgos y costos de transporte en los procesos de fabricación de los materiales que se presentan en la actualidad. El dispositivo requiere de la integración de distintos elementos mecánicos y electrónicos junto con conocimientos en el área del control y la programación para su correcto funcionamiento, además, es necesario un grado de precisión para garantizar niveles óptimos de resistencia en los diferentes tipos de concreto por activación alcalina, a partir del diseño y la buena elección de los materiales en la fabricación de la cámara.

#### KEYWORDS

curing, humidity, temperature, modular, concrete, slag, ash

Design and fabrication of a real scale prototype of a chamber with humidity and temperature variations for curing of alkaline-activation concretes elaborated from mixes of steel slag and flying ashes.

Through this document, the design and manufacture of a prototype of a chamber with humidity and temperature variations for curing alkaline activation concretes made from mixtures of steel slag and flying ash is presented, to be mounted directly on site, this benefits the industrial sector in the development of new projects by improving performance, reducing risks and transportation costs in the manufacturing processes of these materials that are currently present. The device requires the integration of distinct mechanical and electronic elements along with knowledge in the control and programming area for its correct operation, with the degree of precision necessary to guarantee optimal levels of resistance in the different types of concrete by alkaline activation, emanating from the design and the right choice of materials for the construction of the chamber.

#### PALABRAS - CHAVE

cura, umidade, temperatura, modular, concreto, escória, cinza

Projeto e fabricação de um protótipo em escala de câmara com variação de umidade e temperatura para a cura de concretos alcalinos acionados a partir de misturas de escória de aciaria e cinza volante

O estudo realizado revela o projeto e fabricação de um protótipo modular em escala, de uma câmara com variação de umidade e temperatura para a cura de concretos alcalinos ativados; feito de misturas de escória de aço e cinza volante, para ser montado diretamente no local; O estudo beneficia o setor industrial no desenvolvimento de novos projetos, pois permite melhorar o desempenho, reduzir riscos e custos de transporte nos processos de fabricação dos materiais que são apresentados hoje. O dispositivo requer a integração de diferentes elementos mecânicos e eletrônicos, juntamente com o conhecimento na área de controle e programação para operação adequada, além disso, um grau de precisão é necessário para garantir níveis ótimos de resistência em diferentes tipos de concreto por ativação alcalina, a partir do design e da boa escolha de materiais na fabricação da câmara.

\* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: [william.aperador@unimilitar.edu.co](mailto:william.aperador@unimilitar.edu.co) (William Arnulfo Aperador Chaparro).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Francisco de Paula Santander, Este es un artículo bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## Introducción

En lo que respecta a los problemas técnicos que presenta el hormigón de cemento Portland tradicional, vale la pena destacar los relacionados con la durabilidad, corrosión de armaduras, heladicidad, ataques por sulfatos, carbonatación, etc. [1-2]. De tal forma, que con el ánimo de contribuir a la reducción de emisiones de gases a la atmósfera y a solventar los problemas de durabilidad del cemento Portland, se ha planteado la utilización de adiciones minerales parciales al cemento tales como: cenizas volantes y escoria de alto horno, cuya fabricación no genera un consumo energético tan alto; además, no emiten volúmenes de gases contaminantes tan elevados y por su efecto filler y reacción puzolánica ayudan a mitigar los problemas de durabilidad del concreto convencional [3].

En ese sentido, la industria metalúrgica y energética Colombiana genera cantidades considerables de materias primas alternativas al cemento (cenizas volantes y escorias siderúrgicas), sin embargo, la mayoría de estas no son completamente aprovechadas. En particular por cada tonelada de carbón pulverizado que se quema en una central termoeléctrica de carbón se producen aproximadamente unos 200 kg de cenizas volantes, y el consumo del carbón pulverizado origina problemas ambientales debido a la acumulación de cenizas volantes en zonas próximas de grandes depósitos [4].

La escoria granulada de alto horno (GBFS) y las cenizas volantes se han empleado por tradición como sustituto parcial del cemento Portland Ordinario dentro de las mezclas de concreto, dando lugar a materiales con desempeños mecánicos comparables a mezclas 100% cemento Portland [5].

Por lo tanto, debido a la elevada producción a escala nacional y mundial de cenizas volantes y escorias siderúrgicas es necesario un mayor reciclaje de dichos productos, por ello actualmente la vía de valorización de estos residuos puede ser su aprovechamiento para la sustitución total del cemento Portland en mezclas de concreto alternativas vía activación alcalina.

Los dos grandes precursores de cementos de activación alcalina que hoy día son objeto de estudio, son las escorias siderúrgicas de alto horno y cenizas volantes de las centrales termoeléctricas de carbón, los cuales se combinan con unos activadores químicos (hidróxidos + silicatos), y permiten la transformación a unos determinados geles con propiedades mecánicas (geles aluminosilicatos y silicatos cálcicos hidratados) de configuración o totalmente amorfa o vítrea, en compactos esqueletos cementantes [4],[6].

En general, el curado de estos materiales de activación alcalina requiere altas temperaturas, alrededor de 80 y 60 °C y humedades relativas cercanas al 90%, en un periodo de 24 horas. En la actualidad el curado de estos materiales se realiza en laboratorios especializados, ya que carecen de métodos que puedan aplicarse directamente en obra. Sin embargo, estas condiciones de curado resultan prácticas para aplicaciones en planta para la producción de prefabricados [7].

Como se ha mencionado, los métodos tradicionales para el curado del concreto convencional en obra están orientados a la utilización de ambientes húmedos fáciles de reproducir, mientras que para cementos por activación alcalina los procedimientos de curado con altas humedades y temperaturas por la técnica de prefabricados incrementan los costos de transporte y limitan su aplicabilidad. En consecuencia, el presente trabajo estudia el diseño y fabricación de una cámara de curado automatizada, modulable, y que se pueda aplicar directamente en obra, para curar elementos de activación alcalina de diversos tamaños [8].

El mecanismo del equipo propuesto consiste en variar y monitorear las condiciones de temperatura (hasta 80°C) y humedad (hasta 90% humedad relativa), requeridas para el proceso de curado, con la finalidad de garantizar una reducción en los gastos de transporte de los materiales de activación alcalina desde la planta hasta la obra. En tal sentido, mediante la aplicación de la tecnología de activación alcalina, residuos industriales como las cenizas volantes y las escorias siderúrgicas pueden ser adecuadamente aprovechadas y transformadas en nuevos materiales de bajo consumo energético, caracterizados por presentar elevada durabilidad y prestaciones mecánicas excelentes [9].

## Materiales y Métodos

**Planeamiento estructural** Se generaron varias ideas acerca de cómo abordar el desafío que supone aplicar el proceso de curado en un ambiente distinto al de un laboratorio, de tal forma, las condiciones de aplicación en éste caso particular, diferían de las aplicadas en el laboratorio, especialmente en lo referente a la geometría la cual puede ser variable, en tal sentido, se propuso una solución modular que se adecuara a la geometría de la edificación, y además fuese de fácil montaje y abatimiento.

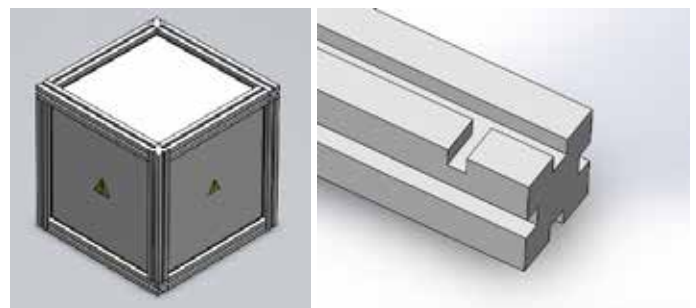


Figura 1 Modelo CAD de la Cámara  
Fuente: Autor

Basados en las condiciones fijadas, se planteó la idea de una estructura de láminas de bajo peso, ensambladas mediante placas de unión atornillada, pero se desistió de la idea ya que el peso de las láminas y en algunos casos la altura de la estructura, serían factores que afectarían la estabilidad de ésta. Por tal razón, se hizo evidente la necesidad de que la estructura tuviese elementos estructurales de apoyo, para lo cual se optó por paraleles acanalados que permitieran el acople de las láminas (Figura 1).

Enfocados en el objetivo del proyecto, es decir, la fabricación de un prototipo, se planteó que la geometría de este se adecuara a las dimensiones de tres cubos de mortero (50x50x50 mm), y se definieron las medidas que se presentan en los planos que se encuentran en los archivos anexos a este documento [10].

El proceso de delineación de los planos de los elementos del prototipo fue llevado a cabo mediante el programa de diseño mecánico SolidWorks, el cual permitió evidenciar que, para el acople de las láminas con los parales de apoyo, se hacían necesarios pequeños canales ubicados en los extremos de los parales principales, perpendiculares a los canales longitudinales, para evitar desajuste de dimensiones por interferencia de material.

Por otra parte, analizando la forma de unión entre los parales de apoyo y las láminas, se hizo evidente que solo acoplar las láminas en las ranuras de los parales no sería suficiente puesto que estas uniones generarían una cantidad considerable de fugas, situación que obstaculizaría la generación del ambiente controlado, pues para este fin se precisa de una cavidad hermética o en su defecto con la menor cantidad de filtraciones, pues estas aumentan la cantidad de pérdidas y redundan en defectos en el proceso de curado; a partir de ello, se examinaron varias opciones con el objetivo de disminuir la cantidad de filtraciones en las uniones. En ese sentido, dentro del esquema de alternativas se encontraban pegamentos y espumas de alta densidad, pero estas alternativas fueron descartadas rápidamente debido a que este tipo de productos no permitirían que los elementos del prototipo fueran fácilmente abatibles, se pensó entonces, en utilizar empaque de caucho, de manera análoga a la instalación de los vidrios en el marco de una ventana, idea que fue aceptada debido a su versatilidad y bajo costo [11].

Las dimensiones originales de los canales fueron modificadas para adecuarlas a las medidas de los empaques de caucho disponibles en el mercado y se actualizaron en los planos, quedando estas últimas establecidas como las dimensiones de diseño.

## Selección de materiales estructurales

Tomando como puntos de referencia las exigencias del proceso de curado (temperaturas de trabajo entre 60 y 80 °C y un porcentaje de humedad del 90 %, por periodos de 24 horas), las restricciones dimensionales planteadas en la etapa de planeamiento, y además teniendo en cuenta las condiciones logísticas de uso del prototipo, las cuales son las propias de una obra de construcción civil, se descartaron inmediatamente los materiales metálicos, ya que el costo de éstos, con las dimensiones requeridas era elevado, y el peso de algunos de estos repercutiría negativamente en el concepto modular y versátil del prototipo; esto sin contar con la dificultad que supondría controlar humedad y temperatura en una cavidad con paredes metálicas, ya que la capacidad de absorción de agua y la alta conductividad térmica de estos materiales, generaría una rápida degradación del prototipo bajo las condiciones de trabajo deseadas [12].

Por tal razón se evaluó por un instante la utilización de madera, pero debido a la alta absorción de agua de este material se desistió rápidamente de la idea, a pesar que, por costo, facilidad de embalaje y versatilidad en proceso de instalación, fuera una buena opción.

Luego analizando los diferentes procesos de fabricación se analizó la utilización de Acrilonitrilo Butadieno Estireno o ABS el cual es el plástico más común en los procesos de impresión 3D y debido a la disponibilidad del equipo de impresión 3d en el grupo de investigación, se procedió a la elaboración de una de las estructuras de apoyo que es la pieza con mayor material, esto para evaluar el comportamiento del material y la impresora en el momento de la fabricación de estructuras de este tipo.

El resultado obtenido de la prueba con la impresora arrojó que el tamaño de la pieza y la cantidad de material generaban deformaciones en la estructura por lo que se desistió de esta idea [11].

Después de haber evaluado y descartado materiales como el metal, la madera y Acrilonitrilo Butadieno Estireno, se puso a consideración la utilización de polímeros, los cuales según las fichas técnicas consultadas mostraban valores adecuados para las propiedades de interés en el diseño. Se propuso entonces, la utilización de Nylon (PA, poliamida 6.6) debido a su baja conductividad térmica y excelente comportamiento en ambientes externos, y como éste, otros polímeros tales como poliuretano (PUR), poliestireno (PS) y polietileno de alta densidad (HDPE).

En tal sentido, De la revisión de las propiedades estructurales (densidad) y mecánicas (rigidez, dureza, resistencia a la tracción) de los polímeros propuestos, se concluyó que el polietileno de alta densidad (HDPE), cumplía a cabalidad con los requerimientos demandados por el proceso, debido a que tolera temperaturas de trabajo de hasta 120°C, presenta una baja absorción de agua en ambientes húmedos y es inerte químicamente, características que el Nylon también cumplía, pero a un costo más elevado.

## Planeamiento del variador

Se plantearon varias ideas acerca de cómo realizar el sistema encargado de garantizar dentro de la cámara las condiciones de trabajo especificadas. Teniendo en cuenta que las condiciones de aplicación en este caso particular diferían de las aplicadas en el laboratorio esencialmente en que la geometría puede ser variable, se propuso una solución de control tipo On-Off, dado que esto permite que las variaciones en la planta no alteren significativamente las condiciones del control y dependa en mayor parte de la potencia de los actuadores.

Basados en las condiciones fijadas, y en un control tipo On-Off se planteó qué montaje de actuadores serían los necesarios, por lo que en principio se pensó en un sistema donde las entradas fueran dependientes una de la otra; de tal manera, se pensó en dos tipos de montajes:

## Diseño y fabricación de un prototipo a escala de una cámara con variación de humedad y temperatura para curado de concretos de activación alcalina elaborados a partir de mezclas de escoria siderúrgica y cenizas volantes

- Calentar agua con resistencias eléctricas a la temperatura deseada y humidificar el ambiente mediante un nebulizador ultrasónico.
- Calentar el agua con resistencias eléctricas a la temperatura deseada y mediante una bomba y un sistema de aspersión humidificar el ambiente

Estas ideas fueron descartadas debido a que no se conocían especificaciones técnicas de los montajes, además no era posible trabajar por separado la humedad y la temperatura en casos de aplicaciones especiales, por lo que se hizo necesario separar el sistema en dos tipos siso que trabajaran paralelamente (Figura 2), los cuales están basados en garantizar la uniformidad y calentar el ambiente con el uso de un calentador y mediante un sistema de nebulización por aspersión afrontar el reto de humidificar la cámara [12].

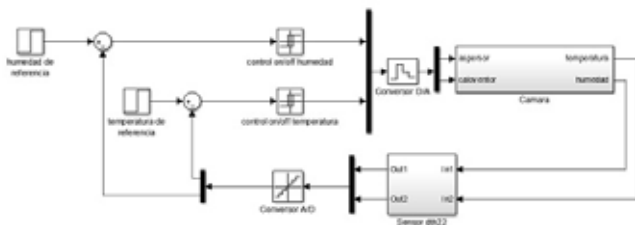


Figura 2 Proceso de Control  
Fuente: Autor

### Selección de materiales y fabricación del variador

Tomando como puntos de referencia las exigencias del proceso de curado (temperaturas de trabajo entre 60 y 80 °C y un porcentaje de humedad del 90 %, por periodos de 24 horas), las restricciones dimensionales planteadas en la etapa de planeamiento, teniendo en cuenta las condiciones logísticas de uso del prototipo, las cuales son las propias de una obra de construcción civil, y además conociendo el tipo de control junto con el montaje, se procedió a seleccionar los elementos necesarios para la fase del variador los cuales fueron:

- **Sistema de temperatura** (Figura 3)

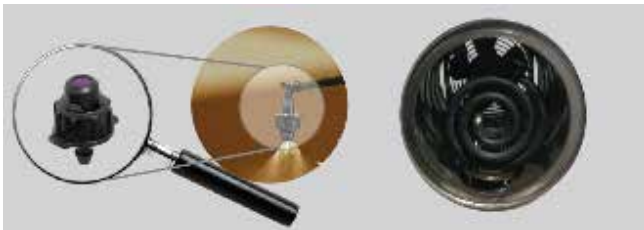


Figura 3 Actuadores y calefactor  
Fuente: Autor

- El sistema de temperatura está basado en el diseño de un calefactor el cual consiste en una resistencia eléctrica 110vac 1,5A que produce el calor y un ventilador de 2650 rpm (Figura 3) que impulsa el aire caliente al ambiente, este diseño fue el más óptimo basados en simulaciones de elementos finitos que determinaron que estas propiedades para los actuadores son las necesarias para garantizar uniformidad y las condiciones de estabilidad al interior de la cámara (Figura 4).

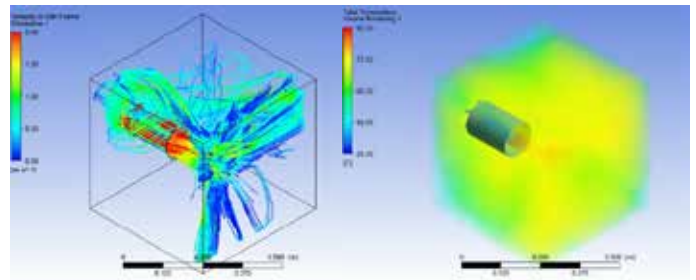


Figura 4 Distribución de Temperatura  
Fuente: Autor

- **Sistema de humedad** El sistema de humedad está basado en el diseño de un sistema de aspersión por nebulizador el cual consta de agua impulsada por una bomba eléctrica que va a una electroválvula hidráulica de 12vdc normalmente cerrada, la cual controla el paso de agua a una boquilla nebulizadora dig fogger con estría montado sobre un acople a medida que permite humidificar el ambiente.

- **Control** Con base en un sistema de control tipo On/Off se utilizó el Microcontrolador ATmega2560 y por medio del dth22 sensor digital de temperatura y humedad el cual utiliza un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, y muestra los datos mediante una señal digital en el pin de datos. El único inconveniente de este sensor está relacionado con que es que sólo se puede obtener nuevos datos una vez cada 2 segundos, así que las lecturas que se pueden realizar serán mínimas cada 2 segundos, pero debido a que el sistema está en uso por 24 horas y el tiempo de estabilización es de 30 minutos el muestreo está en el rango adecuado para esta aplicación.

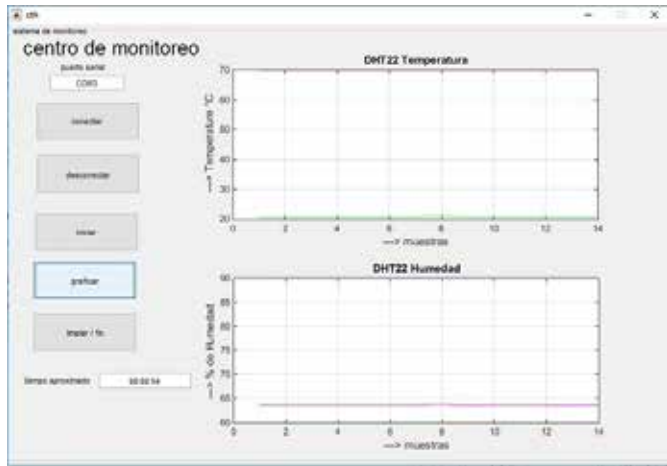


Figura 5 Cámara para Curado de Concretos  
Fuente: Autor

La etapa de adquisición de datos se realizó con base en una comunicación serial por medio del microcontrolador y una interfaz gráfica por computador en Matlab (Figura6) en la cual se procede a visualizar y monitorear el comportamiento de la cámara.

Paralelamente el microcontrolador dependiendo de las referencias de temperatura y humedad, de manera on/off junto con un acondicionamiento de potencia integrado por opto acopladores 4n35 y relés, activa dos pines que controlan los actuadores, en el caso del sistema de temperatura activa la resistencia y en el caso del sistema de humedad activa la electro-válvula, de esta manera se controla eficientemente la humedad y temperatura de la cámara.





## Resultados y Análisis

### Pruebas del funcionamiento de la cámara con cubos de mortero NTC220

**Objetivo:** Determinar el grado de variación en las resistencias de cubos de mortero de la misma dosificación a base de escoria siderúrgica y cenizas volantes curados durante 24 horas en la cámara contra los que fueron curados en condiciones de laboratorio.

**Procedimiento:** se realizaron 3 ensayos en los cuales se variaron los porcentajes de ceniza y escoria al igual que las condiciones de temperatura y humedad de la siguiente manera:

Tabla I Ensayos

ENSAYO	TEMP. (° C)	HUMEDAD	%CENIZA	%ESCORIA
1	70°C	90 % HR	100 %	100 %
2	70°C	90 % HR	50 %	50 %
3		90 % HR	0	100 %

Fuente: Autor

Para las pruebas se fabricaron 6 cubos por ensayo con base en la Norma Técnica Colombiana NTC220 de los cuales la mitad fueron curados en la cámara y la otra mitad en condiciones de laboratorio.

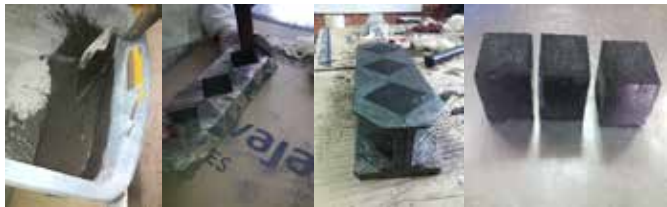


Figura 7 Proceso de Elaboración de Cubos de Mortero  
Fuente: Autor

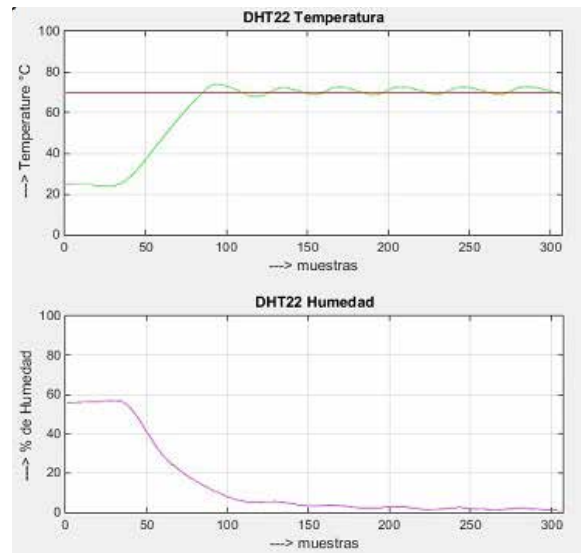


Figura 8 Ensayo 1: Temperatura 70°C  
Fuente: Autor

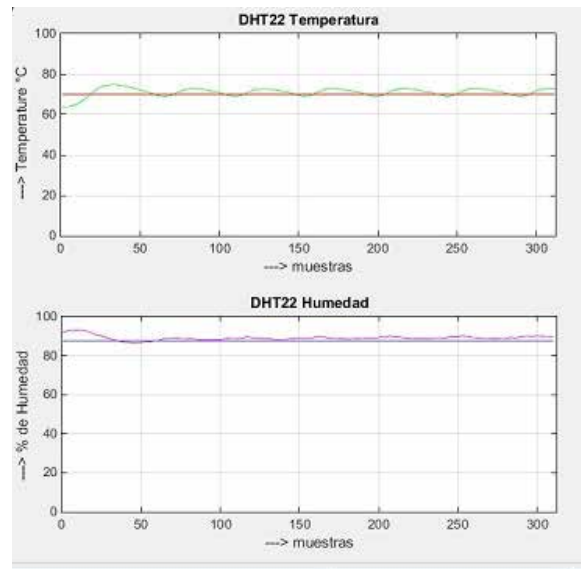


Figura 9 Ensayo 2: Temperatura 70°C - Humedad 90%  
Fuente: Autor

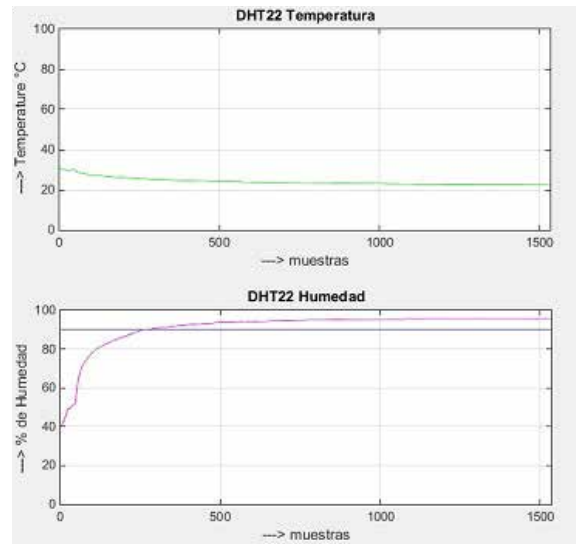


Figura 10 Ensayo 3: Humedad 90%  
Fuente: Autor

Luego del proceso de curado se determinaron las resistencias a la compresión de los cubos de mortero.



Figura 11 Ensayo a compresión  
Fuente: Autor

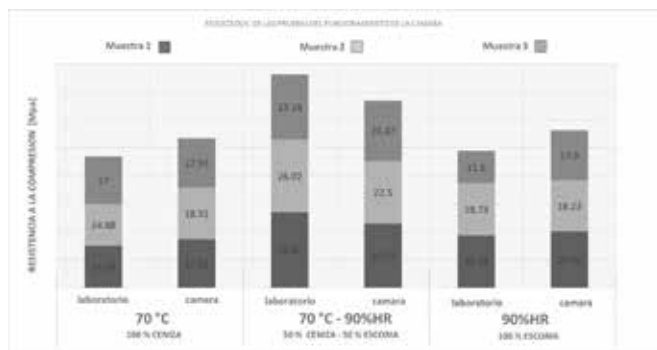


Figura 12 Resultados Ensayo a compresión  
Fuente: Autor

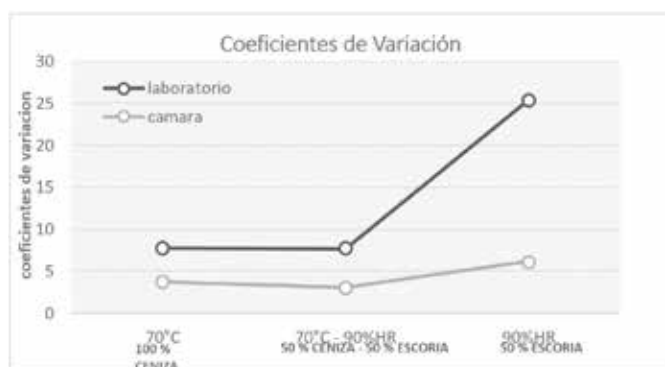


Figura 13 Coeficientes de variación  
Fuente: Autor

Tabla II Porcentaje de variación de resistencias laboratorio - Cámara

% Ceniza	% Escoria	% de variación Laboratorio - Cámara
100 %	0%	13,80 %
50%	50 %	12,21 %
0	100%	15,14 %

Fuente: Autor

## Análisis de resultados

La cámara presenta diferentes tipos de respuesta transitoria dependiendo del tipo de ensayo que se está realizando; en los casos que se usa el control de temperatura el sistema tiene un comportamiento sub- amortiguado, con un error en estado estacionario para la temperatura de aproximadamente  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$  y para la humedad de  $\pm 2,5 \%$ HR, esto se debe en principio al funcionamiento del control, a la capacidad del caloventor para responder a la referencia y a las propiedades térmicas e hidrofóbicas del material [13-14].

Cuando la cámara está funcionando exclusivamente con el control de humedad, se tiene una repuesta transitoria sobre-amortiguada y un error en estado estacionario aproximadamente de  $\pm 5\%$ HR, debido a que el sistema de humidificación es de respuesta lenta y a que la estructura tiene propiedades optimas de estanqueidad, junto con las propiedades hidrofóbicas del material, permiten mantener las condiciones estables en la cámara con un mínimo de pérdidas [14-15].

Los coeficientes de variación de la resistencia a compresión de cubos de mortero curados en la cámara mostrados en la (Figura 13) son menores respecto a los del curado realizado en el laboratorio, toda vez que la cámara tiene mejores condiciones de uniformidad y estabilidad independientemente de los valores de resistencia mecánica de los cubos o de las condiciones de trabajo [15-17].

De acuerdo a la (Figura 12) se confirma que la mezcla de cubos de motero, fabricados con 50% escoria y 50% ceniza, es la que obtiene los mayores valores de resistencia a la compresión, respecto de los fabricados con otros porcentajes de material. [18]

De los porcentajes de variación mostrados en la (Tabla II) no son mayores al 15% es decir que la variación entre los resultados de la cámara y los de laboratorio son tolerables teniendo en cuenta la aplicación industrial a la cual será sometida la cámara, las cuales son dichas de una obra de construcción civil.

## Conclusiones

El dispositivo es capaz de curar con alto grado de estabilidad y uniformidad muestras de concretos elaborados a partir de escoria siderúrgica y cenizas volantes, obteniendo resistencias a compresión en el material mayores a las del cemento Portland o muestras curadas en condiciones de laboratorio, en periodos continuos de 24 horas.

Los coeficientes de variación obtenidos del proceso de curado para los cubos de mortero curados en la cámara son menores con respecto a los presentados en el curado realizado en el laboratorio, debido a que la cámara tiene mejores condiciones de uniformidad y estabilidad independientemente de los valores de resistencia mecánica de los cubos o de las condiciones de trabajo. El montaje del dispositivo es de fácil instalación y su interfaz de monitoreo la cual permite una sencilla y eficaz interacción entre el usuario y el dispositivo,

El desarrollo del dispositivo es de gran ayuda para los análisis y proyectos desarrollados por la comunidad científica y el sector industrial, ya que permite abrir la posibilidad de realizar un sistema a escala real para desarrollar aplicaciones directamente en una construcción y reducir tanto los gastos de transporte como los propios al optar por materiales residuos de la industria como sustituciones al cemento Portland.

## Referencias

- [1] Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal Sustainable Built Environment*, 1(2), 194–216. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.019.
- [2] Provis, J.L., van Deventer J.S.J. *Alkali-activated Materials: State-of-the-Art Report*, RILEM TC 224-AAM, Springer/RILEM, Dordrecht, 2014.
- [3] O. Trocónis de Rincón, Duracon Collaboration "Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican Project. Preliminary results", *Building and Environment*, 41, (2006), p. 952-962.
- [4] ACI Committee 318. *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary (318R-14)*. Michigan: American Concrete Institute; 2014.
- [5] Cárdenas, J., Lizarazo, J., Aperador, W., "Comportamiento mecánico de sistemas cementantes binarios (cemento portland – ceniza volante – escoria de alto horno)," *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol.16, no.1, pp.78-98, Diciembre 2015.
- [6]. M. Sahmaran, T. K. Erdem, I. O. Yaman "Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to wetting-drying and heating-cooling environments", *Construction and Building Materials*, 21, (2007), p. 1771-1778.
- [7]. B. Johannesson, P. Utgenannt "Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar", *Cem. Concr. Res.*, 31, (2001), p. 925-931.
- [8]. E. T. Stepkowska "Simultaneous IR/TG study of calcium carbonate in two aged cement pastes", *J. Therm. Anal. Cal.*, 84, (2006), p. 175-180.
- [9]. K. Garbev, P. Stemmermann, L. Black, C. Breen, J. Yarwood, B. Gasharova "Structural features of C-S-H (I) and its carbonation in air-a Raman spectroscopic study. Part I: Fresh phases", *J. Am. Ceram. Soc.*, 90, (2007), p.900-907.22. J. Davidovits "Geopolymers: inorganic polymeric new materials", *J. Thermal Anal.*, 37, p. 1633-1656, (1991).
- [10] H. Shin, J. Yang, Y.Yoon, D. Mitchell, "Mix design of concrete for prestressed concrete sleepers using blast furnace slag and steel fibers", *Cement and Concrete Composites*, 74, 2016, p. 39-53.
- [11] C. Caruana, C. Yousif, P. Bacher, S. Buhagiar, C. Grima, "Determination of thermal characteristics of standard and improved hollow concrete blocks using different measurement techniques", *Journal of Building Engineering*, 13 (2017), p 336-346,
- [12] S. Lim, V. Prabhu, M. Anand, L. Taylor, "Extra-terrestrial construction processes – Advancements, opportunities and challenges", *Advances in Space Research*, 60, (2017), p. 1413-1429.
- [13] F. Bella, D. Pugliese, L. Zolin, C. Gerbaldi, "Paper-based quasi-solid dye-sensitized solar cells", *Electrochimica Acta*, 237 (2017), p. 87-93,
- [14] J. Lizárraga, A. Ramírez, P. Díaz, J. Marcobal, J. Gallego, "Short-term performance appraisal of half-warm mix asphalt mixtures containing high (70%) and total RAP contents (100%): From laboratory mix design to its full-scale implementation", *Construction and Building Materials*, 170 (2018), p. 433-445.
- [15] A.J. Buttress, D.A. Jones, C. Dodds, G. Dimitrakis, C.J. Campbell, A. Dawson, S.W. Kingman, Understanding the scabbling of concrete using microwave energy, *Cement and Concrete Research*, 75 (2015), p. 75-90
- [16] A. Duarte, B. Ferreira, P. Nóvoa, A. Torres, Multifunctional Material Systems: A state-of-the-art review, *Composite Structures*, 151 (2016), p. 3-35,
- [17] M. Criado, A. Fernández-Jiménez, A. Palomo "Alkali activation of fly ash. Effect of the SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ratio. Part I: FTIR study", *Microp. Mesop. Mat.*, (2007), (disponible on line).
- [18] A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, C. López-Hombrados, J. L. Lleyda "Precast Elements Made Of Alkali-Activated Fly Ash Concrete", 8th CANMET/ACI International conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Las Vegas, USA, Supplementary Volume, p. 545-558, (2004).