

Desarrollo y análisis de bloques de hormigón celular mediante el uso de aditivo espumante

Francisco Ramón Aranda Fornerón ^a; Fernando Nicolás Endler Ortiz ^b; Diego Chávez Castro ^c

^a Universidad Nacional de Itapúa. Encarnación, Paraguay. francisco.aranda@fiuni.edu.py

^b Universidad Nacional de Itapúa. Encarnación, Paraguay. fernando.endler@fiuni.edu.py

^c Universidad Nacional de Itapúa. Encarnación, Paraguay. diego.chavez@fiuni.edu.py

Resumen

En este trabajo se evaluaron las características físicas y mecánicas del hormigón celular con aditivo espumante a través de ensayos de laboratorio con el fin de conocer su comportamiento físico y mecánico para su aplicación en mamposterías no portantes utilizando como parámetro el ladrillo hueco cerámico, debido a que es el material de construcción más empleado en la región. Se realizaron ensayos de los materiales constituyentes para la elaboración de mezcla de hormigón celular; se determinó la dosificación adecuada para mezcla de hormigón celular, con ensayos tanto en estado fresco como en estado endurecido; se analizaron los costos de elaboración; se realizaron comparativas de las propiedades físicas y mecánicas con el material parámetro y por último se estableció una propuesta de protocolo de proceso constructivo con bloques de hormigón celular. Entre los resultados más sobresalientes se obtuvieron; un desempeño destacable como aislante térmico y reductor acústico, alcanzando densidades secas inferiores al ladrillo cerámico hueco, y resistencias a la compresión superiores al mismo tipo de ladrillo. El comportamiento hidrófugo del hormigón celular, analizado mediante ensayos de absorción y absorción capilar, presentó resultados notables.

Palabras clave: conductividad térmica, reducción acústica, absorción capilar.

Abstract

In this study, the physical and mechanical characteristics of cellular concrete with a foaming additive were evaluated through laboratory tests to understand its physical and mechanical behavior for application in non-load-bearing masonry, using ceramic hollow bricks as a reference parameter, as they are the most widely used construction material in the region. Tests were conducted on the constituent materials for preparing the cellular concrete mixture; the appropriate dosage for the cellular concrete mixture was determined through tests in both fresh and hardened states; production costs were analyzed; comparative analyses of physical and mechanical properties with the reference material were performed; and finally, a proposed construction process protocol for cellular concrete blocks was established. Among the most notable results were its remarkable performance as a thermal insulator and acoustic reducer, achieving dry densities lower than those of ceramic hollow bricks and compressive strengths higher than those of the same brick type. The water-repellent behavior of the cellular concrete, analyzed through absorption and capillary absorption tests, yielded significant results.

Keywords: thermal conductivity, acoustic reduction, capillary absorption.

1. Introducción

El hormigón celular es material homogéneo y macizo, aunque muy ligero, con considerables propiedades aislantes [1], [2], [3], éste no requiere aislamiento interno adicional, su estructura alveolar está formada por microburbujas, que le confieren propiedades de aislamiento térmico [1], [3]. La cantidad de aire incluido en las burbujas dentro del hormigón celular confieren unas características aislante-acústicas favorables [4] que hacen frente a la polución sonora, que está cada vez más presente en las urbes. Así mismo mediante la constitución molecular en forma de burbujas de aire no interconectadas entre sí dentro del hormigón celular, crea un entorno en donde se dificulta el paso de las partículas de agua, haciendo de este un material con poca absorción de agua. Por otra parte, la significativa reducción de densidad por parte de la masa de hormigón lo hace un material más ligero en relación con otros tipos de mampostería existentes [5], [6], [7].

Considerando el hormigón celular, se pretende presentar una alternativa en el mercado de la construcción de la región.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar las características físicas y mecánicas del hormigón celular con aditivo espumante a través de ensayos de laboratorio con el fin de conocer su comportamiento.

Objetivos específicos

1. Determinar la dosificación óptima de los bloques de hormigón celular a ser ensayados.
2. Describir las características físicas y mecánicas de los bloques de hormigón celular
3. Detallar el proceso de elaboración de

bloques de hormigón celular.

4. Comparar las características físicas y mecánicas de los bloques de hormigón celular con ladrillo cerámico hueco.

2. Materiales y Métodos

2.1. Materiales

Los materiales empleados para la fabricación de las probetas de ensayo fueron los siguientes; cemento Portland CP II; árido fino (arena proveniente del río Paraná); agua de amasado de fuente potable; aditivo espumante “Sika Poro Plus” el cuál fue utilizado para generar la espuma preformada, aditivo de acelerador de fraguado “Sika Aceleral”, su uso se fundamenta debido que permite desmoldar piezas sin descantillar aristas ni esquinas vivas, además de que el hormigón celular se caracteriza por tener tiempos de fraguado prolongados y fue de interés acelerar dicho proceso. Tanto el cemento portland como el árido fino (arena de río) fueron sometidos a ensayos de laboratorio para determinar sus propiedades físicas de interés, dichos ensayos fueron regidos por normativas ASTM.

2.2. Equipos

Prensa Hidráulica; que se utiliza para ensayos de resistencia a compresión, acompañada de bases metálicas con superficies de neopreno para asegurar la correcta distribución de las cargas aplicadas a las probetas. La prensa fue calibrada según la norma **ASTM C39** [8].

Equipo generador de espuma; que se compone de un compresor de aire, una garrafa de presión y una pistola de descarga de espuma. El compresor inyecta aire a la garrafa y pistola para generar la espuma. La garrafa, conectada al compresor que

mantiene presiones de 2 a 5 bares, regulada por un manómetro y válvula de alivio. La pistola, unida a la garrafa, permite ajustar la cantidad de espuma aplicada en la mezcla de Hormigón Celular. El proceso involucra llenar la garrafa con la solución, conectarla al compresor, ajustar la presión y regular la salida de espuma mediante la boquilla de la pistola (Figura 1).



Figura 1. Equipo generador de espuma.

Artefacto de medición de la conductividad térmica (Figura 2); que fue construido en el año 2019 basándose en la norma **NCh 850** [9], cuyas partes principales son la placa caliente metálica rectangular de 25 cm x 20 cm que proporciona la fuente de calor mediante una resistencia eléctrica; la placa fría metálica con serpentines en espiral, refrigerada por una corriente de agua de flujo constante; las termocuplas tipo J, que miden la temperatura; el multímetro para medir magnitudes eléctricas y la placa de guarda o carcasa que protege el artefacto y cuenta con una capa aislante para resguardarlo del entorno. Además, el equipo viene provisto de una tapa metálica con núcleo de fibra de vidrio, cuya función es la de sellar el aparato y permitir la entrada y salida de las probetas.



Figura 2. Artefacto de medición de la conductividad térmica con probeta de HC en su interior.

La cámara de transmisión; que tiene dos paredes de poliestireno expandido y espuma de poliuretano para aislar las ondas sonoras externas. Posee ranuras para posicionar las probetas, dividiendo la cámara en dos partes iguales no conectadas. Además, cuenta con sonómetros y parlantes. El sonómetro está conectado a una computadora con software especial para registrar las mediciones en dB. En la Figura 3 se observa la cámara.



Figura 3. Cámara de transmisión para medición de reducción acústica.

2.3. Metodología de los ensayos

Para asegurar la fiabilidad de los resultados, y que sean representativos y replicables; se establecieron los procedimientos descritos a continuación:

Dosificación de espuma preformada

La densidad de la espuma preformada es un indicador crítico de su calidad y aplicabilidad en la producción de bloques de hormigón celular. Debido a la falta de normativas aplicables a la determinación de densidad de espumas preformada, se desarrolló un procedimiento experimental propio, basado en los ensayos de determinación de densidad aparente de un árido regidos por la norma **ASTM C29** [10]. En la Figura 4 se observa la espuma preformada.



Figura 4: Descarga de espuma preformada en recipiente de volumen conocido.

El procedimiento se inició con la preparación de las disoluciones del aditivo en proporciones de 10, 15 y 20 g/dm³, pesando el aditivo (solute) y el agua (solvente). Luego se cargaron, las distintas disoluciones en el recipiente del equipo generador de espuma, usando en cada repetición 100 dm³, esto permitió un rendimiento óptimo del equipo. Las presiones de trabajo abarcaron un rango de 2 a 5 bares. Los criterios de elección de la solución para la fabricación de los bloques

fueron dados por la estabilidad que mostraron las espumas preformadas 30 min después de su elaboración, además se tuvo en cuenta la poca variabilidad de los resultados para cada combinación de solución-presión.

Dosificación de hormigón celular

Se elaboraron 4 dosificaciones de hormigón celular, dos mezclas por dosificación, con un total de 8 mezclas. Se determinó la cuantía de materiales que componen al hormigón celular utilizando como referencia las dosificaciones planteadas en la norma **ACI 523.3R-93** [11]. Se priorizó trabajar con dosificaciones con menores densidades húmedas, por encima de aquellas que conferirían mayor resistencia a la compresión, considerando la ligereza final del hormigón.

Elaboración de los bloques de hormigón celular.

Se siguieron los pasos siguientes para la fabricación de las mezclas:

- 1) Selección de materiales; se pesaron los materiales siguiendo una dosificación previamente establecida.
- 2) Preparación del agua y acelerante; se introdujeron el agua junto con la dosis del acelerante (como el producto Sika Aceleral) en el recipiente de mezclado.
- 3) Incorporación del cemento; se agregó gradualmente el cemento total a la mezcla, manteniendo una velocidad de batido lento.
- 4) Agregado de arena; en el recipiente.
- 5) Homogeneización; utilizando una batidora especializada, que mezcló el cemento, la arena y el agua hasta lograr una consistencia homogénea.
- 6) Generación de espuma; con la máquina generadora, apuntando la pistola de espuma hacia el interior del recipiente de mezclado.
- 7) Control del caudal; se midió el tiempo

necesario para descargar el volumen requerido de espuma según la dosificación.

8) Mezcla fluida; se batió hasta obtener una mezcla homogénea y altamente fluida.

9) Colado en moldes metálicos; de la mezcla de hormigón celular cubiertos con aditivo desencofrante. Se debió evitar que la altura de colado superase los 30 cm para impedir la incorporación de aire ocluido.

10) Fraguado y desencofrado; la mezcla se dejó fraguar por aproximadamente 36 horas antes de proceder al desencofrado.

11) Manejo cuidadoso de los bloques; ya que inicialmente no son resistentes para su uso. Se recomienda apilarlos en pallets, humedecerlos y embalarlos con filme para mantener la humedad superficial durante 28 días de curado.

12) Humedecimiento superficial; de los bloques según condiciones climáticas y de humedad en la zona de fabricación.

Ensayo de peso unitario de la mezcla del hormigón celular

La densidad en estado fresco del hormigón celular repercute en el peso final del bloque. Para determinar el peso específico se realizaron ensayos cumpliendo los procedimientos mencionados en la Norma **ASTM C138** [12].

Ensayo de consistencia o escurrimiento del hormigón celular

El hormigón celular tiene un alto contenido en aire incorporado, calificándose, así como un hormigón autocompactante. Mediante el ensayo de consistencia se puede observar la posible segregación, integración y fluidez de la mezcla que posteriormente brindará una visión clara de qué métodos de colado son necesarios para su correcta disposición en los moldes.

Ensayo de contenido de aire en mezcla de hormigón celular

La determinación se realizó mediante el uso de la Olla de Washington, siguiendo procedimientos establecidos en la norma **ASTM C231** [13].

Ensayos en estado endurecido

Ensayo de resistencia a compresión del hormigón celular

Se realizaron según las directrices impartidas por la norma **ASTM C39**. Se utilizaron probetas cilíndricas rotuladas de 15 cm x 30 cm para cada dosificación de hormigón celular, las cuales fueron almacenadas en una cámara de curado. Luego fueron seleccionadas al azar para su posterior rotura en 3 edades distintas; de 7, 21 y 28 días.

Ensayo de conductividad térmica

Se basó en la norma **NCh-850**, que establece las pautas y procedimientos para el uso del artefacto de medición de conductividad térmica cuya unidad de medida es $W/(m^2 K)$. Se elaboraron probetas de hormigón celular con dimensiones de 25 cm x 20 cm x 7 cm, curados por 28 días y posteriormente secados en hornos a 100°C durante 24 h.

Ensayo de reducción acústica

Se buscó la forma de desarrollar ensayos experimentales basados principalmente en la norma **ISO 140-3** [14], que establece las mediciones para la determinación de aislación acústica de materiales mediante el uso de cámara de transmisión. Se utilizaron probetas de hormigón celular de 25 cm x 50 cm x 10 cm, previamente curadas por 28 días y secadas en horno a 100°C por 24 h.

Ensayo de absorción y absorción capilar

El ensayo estuvo basado en la norma **ASTM C140-08** [15], sin embargo, fue adaptado al contexto del trabajo.

El procedimiento inició con el secado en horno a 100°C por 24 h de las probetas de hormigón celular curadas por 28 días, luego se pesaron en una balanza de plato superior con una exactitud de $\pm 0,01$ g, se tomaron las medidas de las probetas y se sumergieron en un recipiente con agua hasta saturación completa por 48 h. Se retiraron las probetas, se secaron superficialmente y se registraron los pesos. La diferencia entre el peso seco y el saturado estableció el porcentaje de agua que la muestra absorbió.



Figura 5: Bloque de hormigón celular de baja densidad flotando en tanque de curado.

Para el ensayo de absorción capilar (Figura 6) se siguieron los procedimientos indicados en la norma **ASTM C1585** [16]. Este consistió en sumergir parcialmente probetas cilíndricas rebanadas, cubiertas en papel film en la base superior, envolviendo toda la superficie del material a excepción de la base que se encuentra en contacto con el agua.

Las probetas se depositaron en una bandeja, sobre un soporte de material anticorrosivo, con un volumen de agua de 3 mm de altura por sobre el dispositivo de soporte, medida que se mantuvo durante el ensayo.

Se inició el cronómetro y se registraron las masas, primeramente, en intervalos de 60 s a 3600 s, luego se tomaron las mediciones cada hora hasta alcanzar las 6 h, seguidamente se

tomaron mediciones cada 24 h, del día 3 al día 7, la medición final se realizó el día 8. Estos intervalos dieron 7 puntos de contacto registrados entre los días 2 y 8.



Figura 6: Ensayo de absorción capilar.

Las determinaciones de masa se realizaron retirando las probetas de la bandeja, deteniendo el cronómetro en caso de alcanzar los 10 min fuera del agua. Se secó el agua superficial de las probetas con una toalla de papel y se pesaron las mismas con la superficie húmeda hacia arriba para evitar el contacto de agua con la balanza. Inmediatamente se volvieron a colocar las probetas en la bandeja e inició el cronómetro. Este proceso se repitió para cada medición de masa del día 1 al 8.

3. Resultados y discusión

3.1. Ensayos a espuma preformada

Tabla 1: Resultados de caudal y densidad de solución 10 g/L.

Sika Poro Plus 10 gr/L		
Presión de trabajo (Bar)	Caudal $\cdot 10^4$ (m ³ /seg)	Densidad (kg/m ³)
2	3,42	35,89
2	3,24	33,00
3	6,64	35,70
3	6,13	35,48
4	7,96	43,44
4	7,44	45,61
5	11,54	48,28
5	10,98	49,28

Tabla 2: Resultados de caudal y densidad de solución 15 g/L.

Sika Poro Plus 15 gr/L		
Presión de trabajo (Bar)	Caudal *10 ⁴ (m ³ /seg)	Densidad (kg/m ³)
2	3,24	25,83
2	3,66	24,72
3	4,35	31,72
3	4,71	31,22
4	6,21	33,94
4	7,09	36,56
5	10,59	41,72
5	10,71	40,00

Tabla 3: Resultados de caudal y densidad de solución 20 g/L.

Sika Poro Plus 20 gr/L		
Presión de trabajo (Bar)	Caudal *10 ⁴ (m ³ /seg)	Densidad (kg/m ³)
2	0,40	30,74
2	0,40	30,81
3	0,82	29,04
3	0,84	28,89
4	1,65	36,22
4	1,69	36,30
5	2,33	38,59
5	2,25	38,44

Se optó por utilizar 15 g/L a una presión de 5 bares ya que se obtuvo una densidad promedio de 40,86 kg/m³ que se encuentra dentro del rango deseado. También es la mezcla de espuma que más tiempo conservó su cuerpo en los 30 min luego de su fabricación, cabe mencionar que los 15 g/L son para elaborar la espuma preformada, esto no significa que la dosificación de los bloques de hormigón contenga esa cantidad de aditivo, ya que la espuma preformada contiene sola una parte del agua total añadida a la mezcla.

3.2. Dosificación de hormigón celular

En la siguiente tabla se puede visualizar las dosificaciones de hormigón celular, que fueron hechas 2 veces en diferentes fechas sumando un total de 8 mezclas.

Tabla 4: Dosificaciones y características de diseño del hormigón celular.

Dosificación por metro cubico					
Materiales	Un	A	B	C	D
Cemento CP	Kg	390	446	335	390
Espuma	Kg	25,17	24,54	22,32	20,29
Arena	Kg	214,5	129,3	425,4	374,4
Agua	Lts	161,83	192,0	166,2	163
Aceleral	Lts	3,9	4,46	3,35	3,90
Aire Teórico	%	59,14	57,65	52,45	53,11
CARACTERISTICAS DEL DISEÑO					
Cemento	Kg	390	446	335	390
Relación ar/c	-	0,55	0,29	1,27	0,96
Relación ag/c	-	0,50	0,50	0,60	0,50
Absorción de arena	%	2,33	2,33	2,33	2,33
Relación Aire/Espuma	-	1,04	1,04	1,04	1,04
Agua en Espuma	Lts	25,17	24,54	22,32	20,29
Aditivo Sika Poro Plus	g/Lts	15,00	15,00	15,00	15,00

Resultados en estado fresco

3.3. Ensayo de escurrimiento

Las dosificaciones pueden clasificarse como hormigón autocompactante con escurrimiento mayor a los 50 cm, permitiendo a la mezcla ocupar cualquier espacio del molde sin problemas y sin el uso de vibradores.

Tabla 5: Ensayo de escurrimiento y consistencia.

Escurrimiento (cm)			
N° de prueba	Código Dosificación	d1 y d2 (cm)	Promedio (cm)
1ra Prueba	A	56 57	56,5
2da Prueba	D	58 59	58,5
3ra Prueba	A	59 57,5	58,25
4ta Prueba	B	52,5 53,5	53
5ta Prueba	C	68,5 66	67,25
6ta Prueba	C	57,5 59	58,25
7ma Prueba	D	55 56	55,5
8va Prueba	B	59 58	58,5

3.4. Ensayo de peso unitario

La Tabla 6 muestra un resumen de los resultados de las densidades alcanzadas por las mezclas; en la 3ra y 4ta prueba se añadió más cantidad de espuma de la requerida a la mezcla, esto por cambios en la densidad de la espuma que estaba siendo inyectada, debido a una baja de presión en el equipo generador de espuma. Para solucionar este inconveniente se ajustó nuevamente el equipo a la presión de espuma antes de cada mezclado para garantizar que la producción posea la densidad esperada.

Tabla 6: Densidades en estado fresco del hormigón celular.

N° de prueba	Fecha de elaboración	Dosificación	P. Unitario de la mezcla (Kg/m ³)	Promedio (Kg/m ³)
1ra	24/5	A	810,00	810,25
	24/5		810,50	
2da	24/5	D	976,97	972,64
	24/5		968,31	
3ra	7/6	A	547,22	553,75
	7/6		560,28	
4ta	7/6	B	384,86	386,48
	7/6		388,10	
5ta	7/6	C	959,90	961,51
	7/6		963,13	
6ta	7/6	C	945,02	951,16
	7/6		957,31	
7ma	16/8	D	959,25	960,87
	16/8		962,48	
8va	07/09	B	789,78	798,84
	07/09		807,89	

3.5. Ensayo de contenido de aire

Se pudo apreciar que el contenido de aire que se incorpora a la mezcla ronda entre los 45% y 80%, y está ligado a la densidad de la espuma preformada.

Tabla 7: Densidades en estado fresco del hormigón celular.

Contenido de aire (%)		
N° de prueba	Código Dosificación	Promedio (%)
1ra	A	60
2da	D	60
3ra	A	75
4ta	B	80
5ta	C	50
6ta	C	45
7ma	D	50
8va	B	50

Resultados en estado endurecido

3.6. Resistencia a la compresión

En la Tabla 8 se puede apreciar que el cambio de la resistencia entre las edades de 7 días y 21 días varía mucho, entre los 7% a 50%, alcanzando casi el 88% de la resistencia final en este tiempo; entre los 21 días y 28 días el incremento de la resistencia fue de 4% a 12% alcanzando su resistencia final.

Tabla 8: Resultados de ensayo de resistencia a la compresión en 3 edades.

N° de prueba	Código Dosificación	Resistencia según sus edades (Mpa)			Porcentaje de cambio en la resistencia	
		7 días	21 días	28 días	21 días	28 días
1ra Prueba	A	1,04	1,18	1,25	13,33	5,90
2da Prueba	D	2,32	2,50	2,63	7,49	5,27
3ra Prueba	A	0,68	0,67	0,90	-1,67	34,33
4ta Prueba	B	0,57	0,46	0,65	-19,94	41,10
5ta Prueba	C	1,40	1,71	1,82	22,14	6,43
6ta Prueba	C	1,22	1,84	1,93	51,01	4,75
7ma Prueba	D	1,63	2,21	2,46	35,43	11,31
8va Prueba	B	1,02	1,16	1,22	13,36	5,17

Reuniendo los valores de las densidades secas de las distintas dosificaciones y comparándolas con su resistencia a la compresión logradas a distintas edades, se obtuvo la Figura 7. Se observa que a medida que disminuyó la densidad del material, disminuyó la resistencia a la compresión, que se debe a la mayor presencia de aire incorporado a la mezcla.

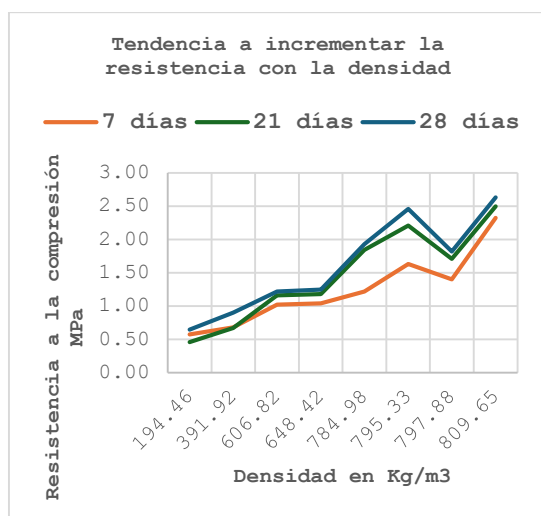


Figura 7: Resistencia a la compresión.

3.7. Determinación de la conductividad térmica

Para el hormigón celular de dosificación **tipo D** con 960 kg/m^3 , se obtuvieron temperaturas que se visualizan en la Figura 8. El promedio de valores de conductividad térmica fue de $0,61 \text{ W/m K}$, que, al compararse con el valor del hormigón convencional, de $0,8 \text{ W/m K}$ [17], se tuvo una reducción del 23,75%. El ensayo tuvo una duración máxima de 480 min y se obtuvieron 69°C en la superficie interna de la cámara y 30°C en la superficie de contacto externa.

Para el ensayo realizado en el hormigón celular de dosificación **tipo C** con 950 kg/m^3 , se obtuvieron los registros presentados en la Figura 9. Para la dosificación tipo C se

determinó un coeficiente de conductividad de $0,543 \text{ W/m K}$. Con respecto al hormigón convencional, se redujo un 32,12%. El ensayo tuvo una duración máxima de 5 h y se llegó a 73°C en la superficie interna de la cámara y 29°C en la superficie de contacto externa.

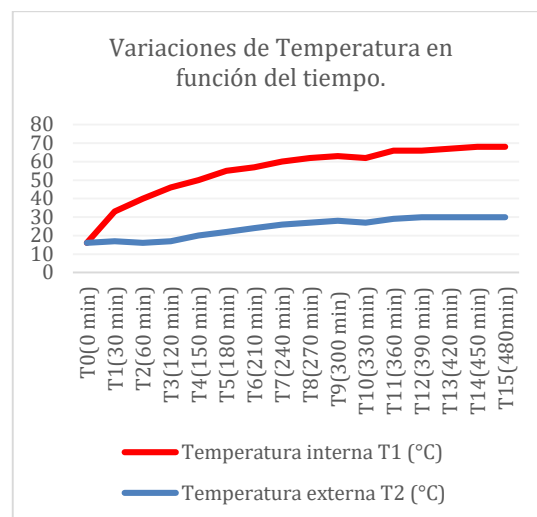


Figura 8: Temperatura en ambas placas para determinación de la conductividad térmica, en HC de dosificación tipo D.

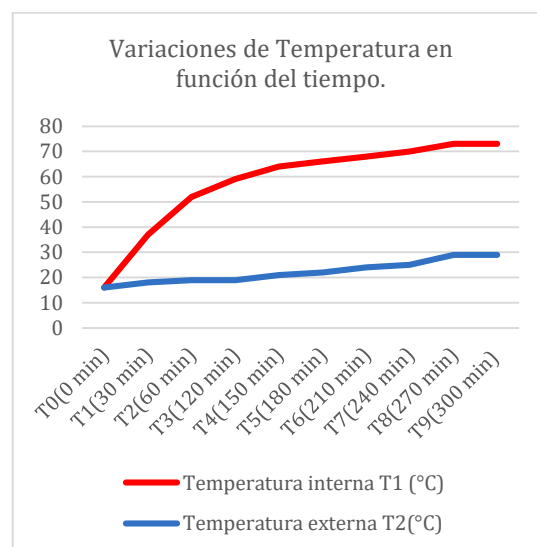


Figura 9: Temperatura en ambas placas para determinación de la conductividad térmica, en HC de dosificación tipo C.

Para el ensayo realizado al hormigón celular de dosificación **tipo B** con 800 kg/m^3 se

obtuvo la Figura 10. Se determinó que el coeficiente de conductividad fue de 0,462 W/m K, y considerando el valor referencial del hormigón convencional, se tuvo una reducción del 42,25%. El ensayo tuvo una duración máxima de 5 h y se llegó a 73°C en la superficie interna de la cámara y 29°C en la superficie de contacto externa de esta.

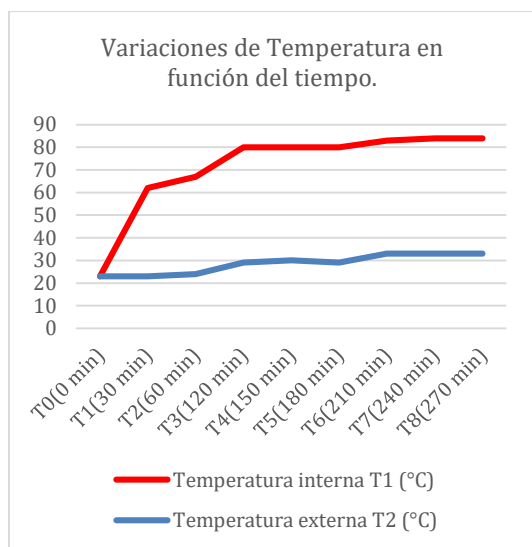


Figura 10: Temperatura en ambas placas para para determinación de la conductividad térmica, en HC de dosificación tipo B.

Para el ensayo sobre la probeta de **ladrillo cerámico hueco** de 6 agujeros con 750 kg/m³ se obtuvo la Figura 11. Se obtuvo un valor de 0,885 W/m K para la conductividad, que dista mucho de valores presentados en la literatura, por tanto, se supone la influencia del método de elaboración y configuración de los huecos. En la Figura 12, se observa la tendencia en la disminución de la conductividad térmica en función de la densidad. La disminución del peso unitario que poseen los bloques de hormigón celular se debe a la inclusión de aire mediante la creación de una red de celdas no conectadas entre sí, siendo favorable en el desempeño como aislante térmico.

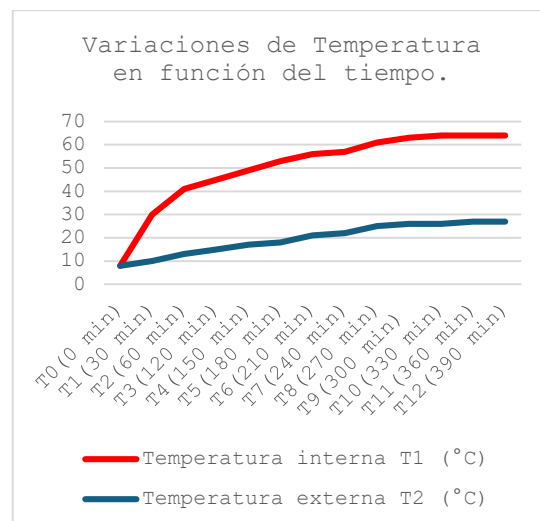


Figura 11: Temperatura en ambas placas para determinación de la conductividad térmica, en ladrillo cerámico hueco.

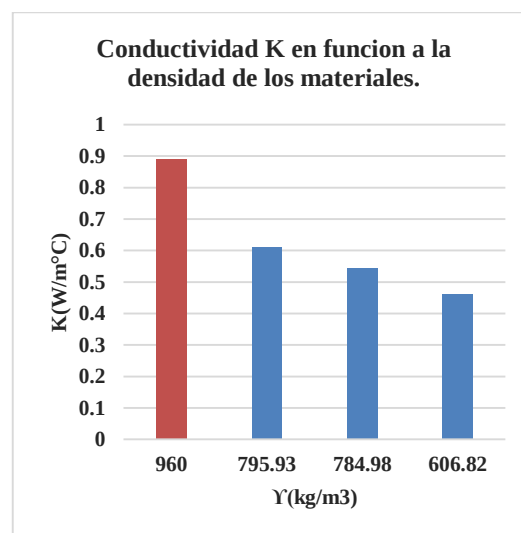


Figura 12: Conductividad térmica en función de la densidad.

3.8. Ensayo de reducción acústica

Los resultados mostrados en las tablas de presión sonora son el promedio obtenido de las mediciones, puesto que estas fueron medidas en intervalos de 1 s durante 30 s por cada frecuencia reproducida.

Para el bloque de hormigón celular de dosificación D con 606 kg/m³ y espesor de 12 cm, se obtuvo la Figura 13.

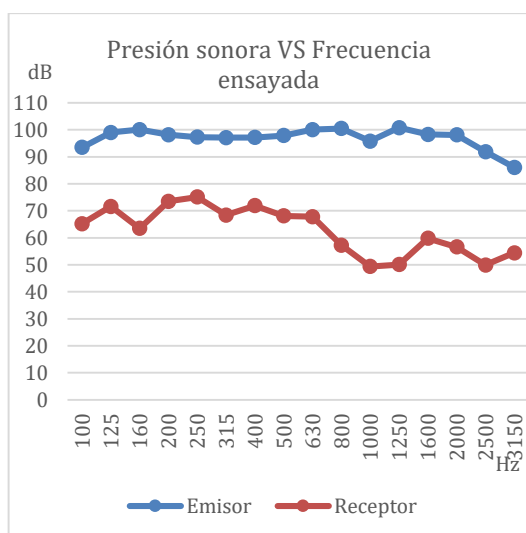


Figura 13: Mediciones de presión sonora en ambas cámaras.

Se promediaron los resultados de niveles de presión sonora en todas las amplitudes de frecuencias ensayadas, obteniendo un nivel de presión sonora del recinto emisor de 96,99 dB, mientras que en el recinto receptor se obtuvo un valor de 62,66 dB.

Se aplicó la fórmula de la reducción acústica dada por la **UNE-EN ISO 140-3** [18].

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{S}{A}$$

Se reemplazaron los valores de:

$L_1 = 96,99$ dB

$L_2 = 62,66$ dB

$S = 0,09$ m²

$A = 0,488 \times 0,3$ m²

Finalmente, $R = 32,22$ dB, resultado de los valores promedios de las mediciones a una amplitud de frecuencias igual a 1/3 de octava. En la Figura 14 se aprecia el comportamiento del índice de reducción acústica R para las frecuencias de 1/3 de octava desde 100 Hz a 3150 Hz. Se muestra el comportamiento del hormigón celular y su reducción de ruido en una amplia gama de frecuencias. Para frecuencias inferiores a 800 Hz se consiguió una R menor, y el material consiguió una reducción $R = 48,5$ dB en la frecuencia de 1250 Hz, valor más alto registrado.

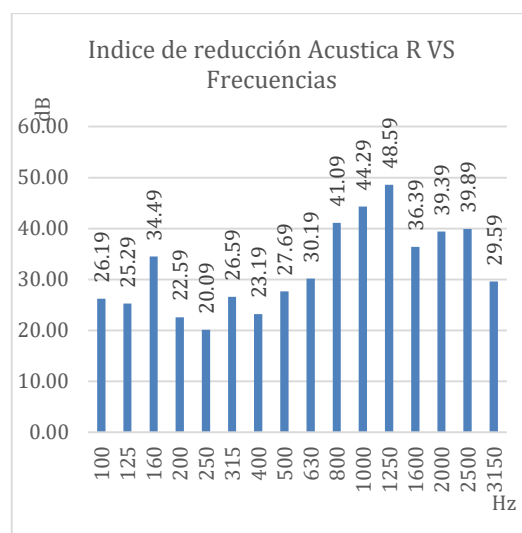


Figura 14: Índice de reducción acústica.

Para finalizar el análisis, se comparó de forma porcentual el rendimiento alcanzado en términos de reducción de sonido entre el ladrillo hueco (LH) y el hormigón celular (HC).

Tabla 9: Valores de reducción acústica.

Frecuencia (Hz)	Reducción R (dB)		%	
	LH	HC	LH	HC
100	27,99	26,19	100%	94%
125	24,39	25,29	100%	104%
160	33,09	34,49	100%	104%
200	25,09	22,59	100%	90%
250	24,19	20,09	100%	83%
315	27,19	26,59	100%	98%
400	22,09	23,19	100%	105%
500	37,59	27,69	100%	74%
630	31,49	30,19	100%	96%
800	30,49	41,09	100%	135%
1000	31,39	44,29	100%	141%
1250	32,09	48,59	100%	151%
1600	27,89	36,39	100%	130%
2000	38,59	39,39	100%	102%
2500	39,09	39,89	100%	102%
3150	23,29	29,59	100%	127%

Los resultados fueron congruentes con la teoría existente sobre absorción y reducción acústica puesto que los materiales porosos como el hormigón celular tienen un mejor desempeño de reducción acústica R a medida que las frecuencias sonoras son mayores.

3.9. Ensayo de absorción

Para realizar este ensayo se sumergió la muestra en agua durante 24 horas, tomando primero registro de su peso en seco, luego de estar secándose en el horno. Pasada las 24 h se registró su peso saturado, y se obtuvo un valor promedio de 10% de absorción.

Tabla 10: Absorción del hormigón celular.

Muestra	C	D	B
Peso saturado (g)	901,56	905,58	887,26
Peso seco (g)	818,28	824,62	805,47
% absorción	10,18	9,82	10,15

3.10. Ensayo de absorción capilar

En la Figura 15 se pueden apreciar los resultados de la prueba de absorción por capilaridad o succión, y se observa que el Hormigón Celular absorbió $0,37 \text{ g/cm}^2$ en un área de $78,5 \text{ cm}^2$ por un periodo de 192 h de exposición, a diferencia del ladrillo hueco que absorbió $1,46 \text{ g/cm}^2$ en un área y periodo de tiempo igual.

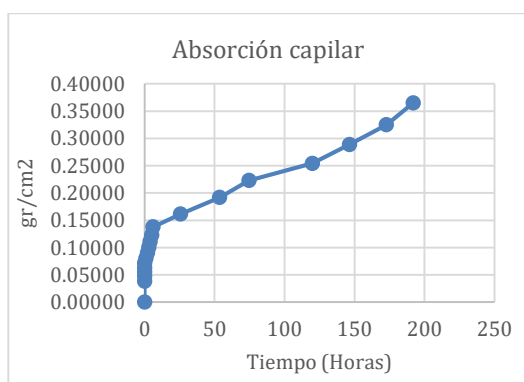


Figura 15: Absorción capilar de agua en función del tiempo.

3.11. Comparativa de HC y LH

Tabla 11: Comparativa general del hormigón celular (HC) y el ladrillo hueco de 6 agujeros (LH).

Ensayos	HC	LH
Densidad seca, kg/m^3	600 - 800	750 - 960
Resistencia a la compresión, MPa	0,9 - 2,63	2 - 3,5
Absorción de agua, %	9 - 10	11 - 15
Capilaridad, g/cm^2	0,37	1,46
Aislamiento acústico, dB	32,22	29,74
Conductividad térmica, W/m K	0,46	0,89

4. Conclusiones

Mediante la aplicación de presión de aire y el uso de fragmentadores de espuma, se produjo espuma con las características deseadas para fabricar bloques de hormigón celular. Se observaron variaciones en la densidad y el caudal de la espuma preformada, relacionadas con las presiones de trabajo y la concentración del aditivo empleado. Se diseñó una secuencia de producción tras realizar varios ensayos y elaborar distintas mezclas.

El ensayo de escurrimiento mostró que el hormigón celular se clasifica como un hormigón autocompactante, ya que las mezclas contienen una gran cantidad de aire integrado.

La resistencia a la compresión es adecuada para su uso en cerramientos no portantes, aunque un exceso de espuma preformada puede afectar negativamente su resistencia. El hormigón celular presentó una conductividad térmica menor en comparación con materiales de uso común, lo que indica una ventaja en términos de ahorro energético en estaciones del año más severas.

El nivel de absorción de agua fue del 10% y la succión por capilaridad de $0,37 \text{ g/cm}^2$, dentro del rango de materiales de poca absorción.

Tanto los bloques de hormigón celular como las probetas de ladrillo hueco ensayadas presentaron ventajas relativas según la banda de frecuencia del sonido. Para frecuencias superiores a 800 Hz, los bloques de hormigón celular mostraron una reducción significativa en comparación con el ladrillo cerámico hueco.

Las muestras variaron en densidad desde 600 kg/m³ hasta 800 kg/m³ en condiciones de sequedad, cumpliendo adecuadamente con los atributos esperados, como resistencia, capacidad de aislamiento acústico, conductividad térmica, absorción de agua y capilaridad.

6. Referencias

- [1] A. A. Hilal, "Properties and microstructure of pre-formed foamed concretes", Doctor Thesis, The University of Nottingham. United Kingdom, 2015.
- [2] C. Arcos d'Hainaut, "Algunos aspectos del hormigón con aire incorporado", Informes de la Construcción, vol. 29, no. 286, 1976.
- [3] X. Arce, Y. Mendoza, and J. Polanco, "El hormigón celular", Universidad de las Américas, 2011.
- [4] T. E. Vigran, *Building acoustic*, New York: Taylor & Francis e-Library, 2008.
- [5] X. Arce Pezo, "Hormigones livianos", Guayaquil, Ecuador, 1997.
- [6] R. Huerta, "Concretos ligeros", Ciudad de México, México, 2009.
- [7] K. C. Thienel, T. Haller, and N. Beuntner, "Lightweight concrete-from basics to innovations", Materials, vol. 13, issue, 2020.
- [8] ASTM C39/C39M, *Método de prueba estandar para la Resistencia a la compression de probetas cilíndricas de concreto*, ASTM International.
- [9] NCh 850, *Aislación térmica: Determinación de resistencia térmica en estado estacionario y propiedades relacionadas – aparato de placa caliente de guarda*, Instituto Nacional de Normalización, Santiago de Chile, 2008.
- [10] ASTM C29/C29M, *Método de ensayo normalizado para determinar la densidad aparente ("peso unitario") e índice de huecos en los áridos*, ASTM International.
- [11] 523.3R-93, *Guide for Cellular Concretes Above 50 pcf and for Aggregate Concretes Above 50 pcf with Compressive Strengths Less Than 2500 psi*, International Concrete Abstracts Portal.
- [12] ASTM C138, *Método de ensayo estandar para densidad (peso unitario), volume y contenido de aire (método gravimétrico) en una mezcla de concreto*, ASTM International.
- [13] ASTM C231, *Contenido de aire del hormigón fresco, método de presión*, ASTM International.
- [14] ISO 140-3, *Acoustics-Measurement of sound insulation in buildings and of building elements*, International Standar.
- [15] ASTM C140/C140M-14b (section 08), *Standard test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units*, ASTM International.
- [16] ASTM C1585, *Método de ensayo normalizado para medir el ritmo de absorción de agua de los hormigones de cemento hidráulico*, ASTM International.
- [17] H. Young and R. Freedman, "Física universitaria," vol. 1, 12th ed., México: Pearson Educación, 2009.
- [18] UNE-EN ISO 140-3, *Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Medición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido*, Asociación Española de Normalización, UNE.