

The background of the entire page is a detailed technical drawing or blueprint. It features various mechanical components, including gears, shafts, and structural elements, rendered in a fine-lined, hatched style. Overlaid on this background are a large, metallic compass and a circular protractor. The compass is positioned vertically, with its legs spread, and the protractor is placed horizontally below it. The overall image has a monochromatic, grey-toned appearance, giving it a professional and academic feel.

Análisis Comparativo de las Propiedades Mecánicas del Concreto Celular: una Perspectiva Aplicativa

Comparative Analysis The
Of The Mechanical
Properties Of Cellular Concrete:
An Application Perspective

Ballesteros B., Milton Fernando

Universidad Santo Tomás
milton.ballesteros@usantoto.edu.co
Master en Ingeniería del Terreno

Chaparro R., Andrés Esteban

Universidad Santo Tomás
andres.chaparror@usantoto.edu.co
Ingeniero Civil

Martínez G. Sebastián

Universidad Santo Tomás
sebastian.martinezg@usantoto.edu.co
Ingeniero Civil

Resumen

Este artículo caracteriza un material moderno y con grandes beneficios: el *concreto celular*, cuya caracterización se hace mediante diferentes propiedades mecánicas y estructurales de acuerdo con las investigaciones experimentales realizadas a nivel mundial. La resistencia a compresión, el módulo de elasticidad, la relación de Poisson y la densidad, son los parámetros elegidos para desarrollar la caracterización del material. Se realiza un análisis comparativo entre seis diferentes especímenes experimentales preparados en diferentes investigaciones para relacionarlos así con el concreto estructural, y luego realizar un análisis aplicativo del *concreto celular*, para finalmente comentar sobre el uso de este en Colombia. Como resultados se obtuvo que el *concreto celular* es un material ligero y su densidad varía entre 400 kg/m^3 y 1900 kg/m^3 , dependiendo de su resistencia a emplear y sus materiales; presenta algunos beneficios en relación con el concreto estructural y su utilización debe ser estudiada de acuerdo con el problema ingenieril que se presente. Debido a su baja densidad no presenta resistencias mecánicas altas; sin embargo, el material responde muy bien a la penetración y a la densificación.

Palabras clave: Concreto celular, Concreto estructural, Materiales de construcción, Propiedades mecánicas.

Abstract

This article provides an in-depth characterization of a modern material with significant advantages: cellular concrete. The characterization is based on diverse mechanical and structural properties, aligning with experimental research conducted globally. Key parameters chosen for material characterization include compressive strength, elastic modulus, Poisson's ratio, and density. A comparative analysis is conducted among six distinct experimental specimens prepared in various research studies to establish correlations with structural concrete. Following this, an applicative analysis of cellular concrete is conducted, followed by insights into its usage in Colombia. The results reveal that cellular concrete is a lightweight material, with its density varying between 400 kg/m^3 and 1900 kg/m^3 , contingent upon the desired strength and constituent materials. The material demonstrates several benefits compared to structural concrete. However, its application must be carefully studied concerning the specific engineering challenge at hand. Despite its low density, it may not exhibit high mechanical strength; nevertheless, the material exhibits excellent resistance to penetration and densification, enhancing its overall appeal.

Keywords: Cellular concrete, Structural concrete, Construction materials, Mechanical properties.

Para citar este artículo: Ballesteros B., Milton Fernando; Chaparro R., Andrés Esteban; Martínez G., Sebastián. "Análisis comparativo de las propiedades mecánicas del concreto celular: Una perspectiva aplicativa" In L'Esprit Ingenieux. Vol. 13-1, pp. X-X.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto celular fue patentado por Axel Eriksen en 1923 (Amran *et al.*, 2022) como una mezcla de cemento *Portland*, agregados pétreos, agente espumante y agua. De acuerdo con (Binod *et al.*, 2017), uno de los retos ingenieriles es mejorar las propiedades mecánicas de resistencia del material (resistencia a compresión, módulo de elasticidad, relación de Poisson), mejorar la capacidad de instalación, la consistencia y durabilidad de este.

El concreto celular presenta una estructura porosa en donde los vacíos internos del material no se conectan entre sí, y en consecuencia es un material ligero (Yahya y Amran, 2016); así pues, se caracteriza por ser un material ideal para usar en procesos ingenieriles. La ingeniería geotécnica es uno de los campos en donde más se ha usado este material como una solución eficiente a algunos problemas geotécnicos en situaciones específicas que requieran utilizar un material liviano debido a su baja densidad $<2300 \text{ kg/m}^3>$, a su fluidez extrema y capacidad para llenar cavidades de cualquier tamaño y forma, relacionando así su menor costo con respecto a la mayoría de las otras soluciones (Amran *et al.*, 2022). Como consecuencia, la investigación del concreto celular se ha desarrollado profundamente a nivel global enfocando la investigación a las propiedades mecánicas y estructurales del material de referencia: la resistencia a compresión, el aislamiento térmico, aislamiento acústico, su estructura interna de poros, densidad húmeda, la vida útil y durabilidad del material, atributos que son un ejemplo de las propiedades que más se han estudiado (Xu, Liu, Wang, Wen, y Yu, 2019).

Este artículo asume como objetivo determinar los principales valores mecánicos del material relacionando el módulo de elasticidad, la relación de Poisson, la resistencia a compresión máxima y el peso unitario como los principales índices mecánicos y estructurales del material, de acuerdo con los resultados experimentales de varios investigadores (Alam y Hu, 2023; Mugahed Amran *et al.*, 2020 y Song y Lange, 2020), para así realizar un análisis comparativo entre las diferentes muestras del *concreto celular* y relacionarla con el *concreto estructural*. También, presenta una descripción de algunos usos aplicativos ingenieriles en los que este material puede resultar una solución eficiente, a partir de una breve reseña histórica en Colombia del uso del material.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

En este capítulo se realizará una descripción con respecto a las definiciones principales contempladas para el desarrollo del documento de investigación.

2.1. Concreto

El concreto, también conocido en otros países como *hormigón*, es una mezcla de material aglutinante, agregados pétreos y agua que conforman una roca artificial capaz de soportar grandes esfuerzos (Zamora Terrones, 2015). Adicionalmente, se puede agregar en la mezcla aditivos o minerales para cambiar las propiedades físicas o estructurales del material (Sánchez de Guzmán, 2001) y mejorar la resistencia a la flexión y a la compresión en un rango del 25% al 35% (Schenk y Guest, 2011; Zhang, 2019; Osorio, Vélez y Ciró, 2007; Valore, 1954; Zamora, 2015).

En cuanto a la estructura del concreto estructural es heterogénea y compleja, de acuerdo con (Metha, 1998) se pueden distinguir varias fases del material aglutinante y de los agregados pétreos. Al revisar la sección transversal del concreto, se evidencia una estructura densa y sin cavidades porosas (cf. Figura 1 a y b). La pasta de cemento y agua cubre completamente cada partícula de agregado y llena todos los espacios entre las partículas.

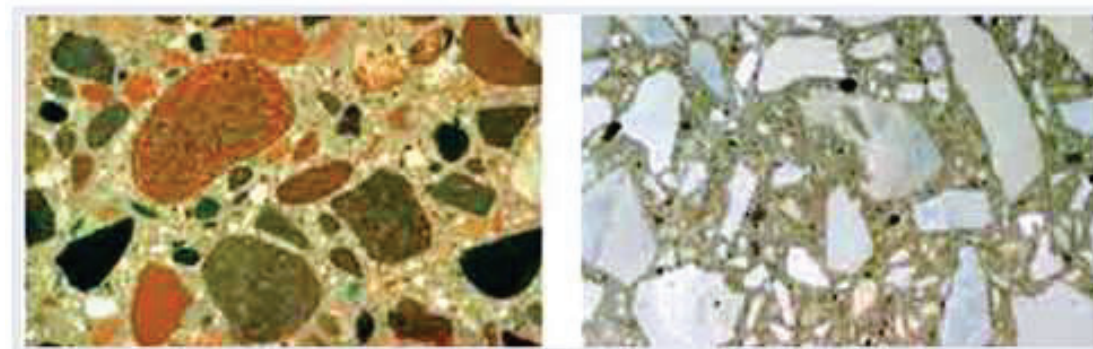


Figura. 1. Sección transversal del concreto A y B. Fuente: <http://notasdeconcretos.blogspot.com/2011/04/la-calidad-del-concreto-depnde-de-la.html>. Nota: A) Sección transversal del concreto endurecido, confeccionado con grava arredondeada de silicio (izquierda) y B) Calcéreo triturado (derecha).

Por su parte, la estructura de concreto celular está compuesta básicamente por material aglutinado y vacíos internos o poros que no se interconectan entre ellos. Sin embargo, el concreto celular no posee el tradicional agregado grueso o agregado pétreo y en vez de su estructura posee poros esféricos con forma regular, que marca la diferencia con el concreto ordinario (Zhou *et al.*, 2023).

En la estructura del *concreto celular*, usando agentes expansivos modernos, los poros crecen de forma escalonada y paulatina (Liu *et al.*, 2023). No obstante, el concreto celular debe cumplir con los parámetros ingenieriles y aprovechar al máximo sus propiedades. (Zhou *et al.*, 2023)

Más aún, las propiedades mecánicas es uno de los problemas que conviene solucionar en su popularización y aplicación. Corrientemente es arduo obtener el proceso de concreto celular a través de la mecánica ordinaria, como también es difícil que los métodos de análisis teóricos revelen la naturaleza de sus propiedades mecánicas desde el nivel mesoscópico (Jason, Huerta, Pijaudier-Cabot, y Ghavamian, 2006).

Al revisar la sección transversal del concreto celular, se evidencia una estructura porosa; no obstante, los poros no se interconectan entre sí (cf. Figura 2); por tanto, el comportamiento del concreto celular a compresión, flexión, penetración y cargas de impacto es un parámetro esencial para una valoración integral en orden a evaluar propiedades mecánicas en aplicaciones con mayor porosidad y menor densidad del concreto celular.

La resistencia a compresión del hormigón celular disminuye (Chen, Wu, y Zhou, 2013), y junto al módulo de elasticidad depende de los huecos de aire y la densidad.



Figura. 2. Sección transversal del concreto celular, matriz celular.
Fuente: (Thienel, Haller, y Beuntner, 2020).

Bajo esfuerzos de compresión, el *concreto celular* experimenta una carga máxima seguida de un aplastamiento, y luego presenta una meseta con cargas más bajas, donde los vacíos siguen colapsando y finalmente conducen a la densificación y falla del concreto (Song y Lange, 2020).

De acuerdo con Valore (1954), la relación de resistencia a la flexión y a la compresión para gamas de concreto celular puede ser del 25% al 35%, menor a la del concreto convencional. Por su fragilidad y baja resistencia a la flexión, el concreto celular presenta una falla abrupta sin mucha resistencia bajo carga de flexión (Flores-Johnson y Li, 2010).

Asimismo, la resistencia del concreto a la flexión y a la compresión depende directamente de la densidad del material, ya que una mayor densidad aumenta la resistencia del material (Falliano *et al.*, 2019).

No obstante, el *concreto celular* es un material que presenta algunos beneficios respecto de otros materiales. Por ejemplo, ostenta excelentes propiedades térmicas y acústicas (Liu *et al.*, 2023). También posee una excelente capacidad de absorción, que lo hace viable a utilizar en sistemas de contención y rampas de escape (Alam y Hu, 2023). Asimismo, la baja densidad y alta fluidez lo convierten en un material de construcción favorable en relación con los costos de manipulación, colocación y construcción (Abdigaliyev y Hu, 2019).

La conductividad térmica se puede definir como la capacidad por la cual se transfiere calor por conducción a través de una unidad de área de sección transversal de un material (Ratna, 2012). Es decir, es la medida de la facilidad con la que un material permite que el calor se transmita a través de él. De hecho, los materiales con alta conductividad térmica permiten que el calor se propague rápidamente a través de ellos, mientras que los materiales con baja conductividad térmica tienden a ser aislantes y no permiten que el calor se transmita fácilmente.

Por tanto, (Mugahed Amran *et al.*, 2020) hicieron ensayos experimentales de conductividad térmica con base en la norma de ensayo *ASTM C177*, contexto según el cual los autores concluyen que la conductividad térmica depende del volumen de vacíos existentes, ya que el aire presenta muy baja conductividad térmica (entre 0.56

y 0.64 W/m). Asimismo, los resultados experimentales muestran que la conductividad térmica disminuye al aumentar el contenido de espuma y cambiar el porcentaje de vacíos presentes en el espécimen (Wong, 2007). Li, Huang, Zhu, Tang y Liu, (2020) descubrieron que la conductividad térmica del concreto celular es proporcional a la del gas espumante que se utiliza para su fabricación. Además, con el envejecimiento, la conductividad térmica del *concreto celular* cuyo gas espumante no es aire se acerca gradualmente a la de aquellos que utilizan aire como gas espumante en la etapa inicial. Así mismo, Li *et al.* (2020) concluyen que usar gas espumante o cemento con menor conductividad térmica para preparar la mezcla celular puede ser eficaz para mejorar el aislamiento térmico del hormigón celular.

Por otro lado, la evaluación de las cualidades acústicas se basa principalmente en la relación entre el volumen de los poros interconectados y el volumen total de los poros (Laukaitis y Fiks, 2006). Los resultados de laboratorio muestran que el concreto poroso tal como el concreto celular puede absorber eficazmente la acústica y cumplir con los estándares mecánicos de resistencia al viento. Además, la granulometría del agregado grueso combinado tiene un efecto significativo sobre el rendimiento de la absorción acústica (Wang y Zhao, 2015).

Por su parte, Stolz, Boluk y Bindiganavile (2018) realizaron ensayos para obtener las propiedades acústicas del concreto celular, añadiendo ceniza activada de acuerdo con la norma *ASTM C384-04*, de los que concluyeron que el concreto celular con ceniza activada muestra una amplia absorción sonora, con un coeficiente de absorción menor a 0.1.

Más aún, el *concreto celular* también se ha aplicado ampliamente para la absorción de impactos estructurales (Zhang *et al.*, 2020). En consecuencia, Alam y Hu (2023) realizaron un estudio en donde evaluaron las propiedades o la capacidad de absorción del concreto celular en una sola capa y un sistema de multicapas, con el fin de verificar la capacidad de absorción del concreto celular. En este estudio se utilizó hormigón celular con tres densidades diferentes (400 kg/m³, 641 kg/m³ y 881 kg/m³) y concreto celular multicapa, que consiste en unir las tres densidades de la capa superior a la inferior por la más baja a la mayor densidad, respectivamente.

Según los ensayos de (Alam y Hu, 2023), la capacidad de absorción del concreto celular varía entre 340.3 KJ/m³ y 1571.4 KJ/m³ (cf. Tabla 1). Finalmente, los autores concluyen que la muestra de multicapa de concreto celular exhibió mayor absorción de energía que la muestra de hormigón celular monocapa de mayor densidad.

Al mismo tiempo, el concreto celular es económicamente viable. A primera vista, utilizar hormigón celular es más caro que utilizar concreto convencional. Sin embargo, es liviano, lo que permite ahorrar costos (Izquierdo y Ortega, 2017) y, al reducir las cargas muertas en el diseño, se traduce en ahorro en cimentaciones y refuerzos (Amran, Farzadnia y Ali, 2015).

Tabla 1. Resultados obtenidos del ensayo de impacto.				
Identificación superficial resultante de la prueba de impacto				
Id	Identificación Profundidad (mm)	Identificación Diámetro (mm)	Identificación Volumen (mm ³)	Energía Absorbida (KJ /m ³)
CC400	15.20	84.10	300.01	458.80
CC641	8.10	76.40	233.99	611.80
CC881	5.70	62.90	130.87	1094.00
ML881	16.90	85.10	343.22	443.80
FRCC400	14.10	84.80	319.70	447.80
FRCC641	5.90	57.90	101.70	1407.90
FRCC881	3.60	55.80	91.11	1571.40
MLFRCC	15.40	92.90	420.67	340.30

Fuente: Autores (tomado de Alam y Hu, 2023).

Nota: CC400, Concreto celular densidad de 400 kg/m³. CC641, Concreto celular densidad de 641 kg/m³ CC881, Concreto celular densidad de 881 kg/m³. MLCC, *multilayer cellular concrete*, FRCC 400 *fiber-reinforced*- Concreto celular densidad de 400 kg/m³, FRCC 641 *fiber-reinforced*- Concreto celular densidad de 641 kg/m³, FRCC 881 *fiber-reinforced*- Concreto celular densidad de 881 kg/m³, MLFRCC, FRCC 641 *fiber-reinforced-multilayer* Concreto celular.

Por otro lado, los bloques de concreto celular (cf. Figura 3) se prefieren en la construcción de edificios con estructura para mampostería de relleno, ya que el bloque de concreto celular es aproximadamente 40 % más ligero que el ladrillo de arcilla convencional o el bloque de hormigón macizo (Bhosale, Zade, Sarkar y Davis, 2020).

Otros investigadores como Kumar *et al.* (2021) han trabajado en usar desechos agrícolas en busca de un concreto celular ligero y resistente, usando estos materiales como agregados livianos; se han usado materiales como cáscara de palma de aceite, *clinker* de aceite de palma y cáscara de coco.

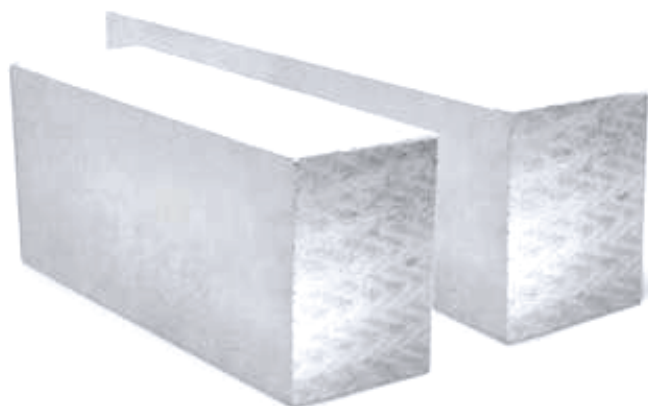


Figura. 3. Bloque en concreto celular.

Fuente: <https://barracacentral.com.uy/producto/bloque-retak-hcca/>

Materias primas usadas en el concreto celular: ultraliviano como concreto de ingeniería especial a base de cemento Portland, cenizas volantes, arena, agua y materiales preformados y espuma en diferentes cantidades; todos estos componentes se combinan para conformar un material solidificado con una densidad seca al horno máxima de 400 kg/m² (Amran *et al.*, 2022).

Cemento Portland: se utiliza como material conglomerante (Amran *et al.*, 2022). Arena: se usa como material de agregado fino también conocido como llenante (Kim, Jeon y Lee, 2012).

Filler: en concretos celulares con fines no estructurales, que tradicionalmente se relacionan con concretos de muy baja densidad, no se maneja agregado; en contraste, se implementan rellenos para minimizar el uso de cemento sin agregar peso. En la fabricación de concretos aireados estructurales (densidades superiores a 1200 kg/m³), se utilizan áridos o rellenos de cualquier procedencia. Los residuos industriales con actividad puzolánica son los materiales de relleno más utilizados. Las cenizas volantes son uno de los sobrantes más usados para sustituir los áridos naturales (Narayanan y Ramamurthy, 2000).

Agua: necesaria para activar la reacción química del cemento. La hidratación del cemento es el proceso por el cual el cemento -al mezclarse con el agua- reacciona y empieza a producir estructuras cristalinas, que a su vez lo transforman en un material aglutinante.

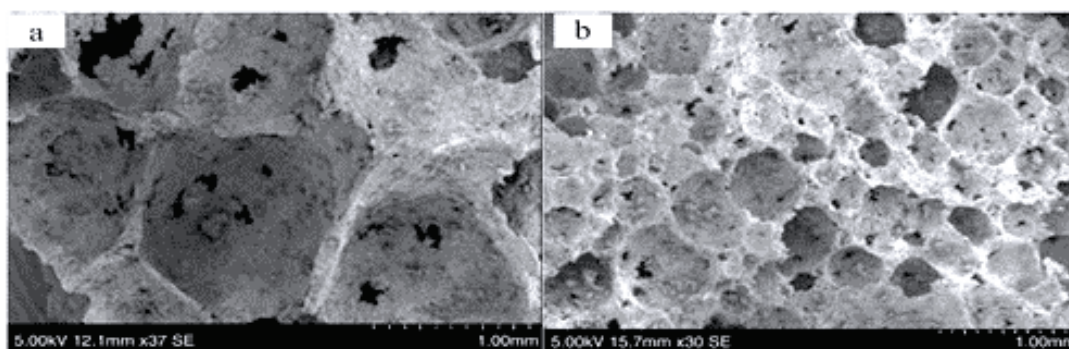
Agente espumante: las técnicas de espumación química y mecánica se utilizan comúnmente en la tecnología del concreto celular para desarrollar materiales de construcción livianos (Hajimohammadi, Ngo y Mendis, 2018).

La espuma es útil para regular la densidad y la porosidad del concreto celular al incluir burbujas de aire; además, los agentes espumantes controlan las características, como la densidad, la distribución de los poros y el rendimiento de resistencia (Amran *et al.*, 2022). Existen varios métodos para la creación de espuma, entre ellos el preespumado. Su proceso exige el uso de una herramienta de aire comprimido para producir burbujas de aire preespumado, que pueden ser incorporadas a una mezcla fresca de compuestos cementosos, dando lugar a una estructura celular ya que es muy importante el agente espumante que se use (Panesar, 2013). El método de preespumado, en el que se utiliza una espuma acuosa estable y una mezcla base se elaboran por separado y luego se mezclan adecuadamente (Amran *et al.*, 2020).

La espuma producida durante el proceso de mezcla conduce a una estructura porosa en el compuesto cementoso resultante (Amran *et al.*, 2022). Muchos agentes espumantes sintéticos a base de proteínas son muy populares, aunque también se pueden utilizar detergentes, resinas adhesivas y saponinas (Amran *et al.*, 2022; Raj, Sathyan, y Mini, 2019).

Por su parte, los agentes espumantes se producen a partir de proteínas hidrolizadas aprovechables de forma natural. El mecanismo de acción de un agente espumante es su descomposición, ya que produce burbujas. Las pequeñas moléculas hidrofóbicas se generan al romperse los enlaces de las moléculas grandes. Este procedimiento disminuye la tensión superficial y genera interfaces de burbujas de aire (Amran *et al.*, 2022). La figura 4 presenta el efecto formado por dos diferentes agentes espumantes (proteica y sintética): en la zona (a) se evidencia que la cantidad

de espuma aumenta al incrementar la concentración de aire, independientemente del tipo de espuma utilizada. En la zona (b) se evidencia que la densidad no parece verse afectada por el tipo de espuma que se utiliza. Por lo cual, en la Figura 4 se concibe el efecto de dos espumas desiguales (proteica y sintética) sobre la consistencia y la densidad (Amran *et al.*, 2022). No obstante, estudios como Amran (2020) aseguran que los agentes a base de proteínas hidrolizadas permiten una estructura de poros fuerte y cerrada, lo que resulta en una red estable de espacios vacíos. Por el contrario, Falliano, De Domenico, Ricciardi, y Gugliandolo (2018) afirman que los agentes espumantes sintéticos crean muestras de concreto celular espumado más estables que los agentes espumantes proteicos a una proporción fija de agua / cemento.



**Figura. 4. A) Representación aumentada de la muestra de espuma;
B) Efecto formado por una proteína y un agente sintético.**

Fuente: Amran *et al.* (2022).

Clases de concreto celular: se clasifica normalmente por su peso unitario o densidad, que normalmente varía entre 400 kg/m^3 a 1850 kg/m^3 (Amran *et al.*, 2015); en términos de resistencia se clasifican en tres tipos: de baja resistencia ($0.7\text{--}2.0 \text{ MPa}$), moderada resistencia ($7\text{--}14 \text{ MPa}$), y concretos estructurales ($17\text{--}63 \text{ MPa}$) (Alwarded, Jaeel, y Ismail, 2020), y las densidades de estas clases de concreto se encuentran en los siguientes rangos: 300 y 800 kg/m^3 de baja resistencia, 800 y 1350 kg/m^3 de moderada resistencia, y $1350\text{--}1920 \text{ kg/m}^3$ para concretos estructurales. Concreto celular autoclave: es un tipo de hormigón ligero producido al infundir burbujas de gas en el concreto fresco, y luego curando el concreto en una cámara de curado con vapor a alta presión, lo que se conoce como autoclave (Amran, Alyousef, Alabduljabbar, Alrshoudi, y Rashid, 2019). Este proceso se usa generalmente para crear bloques de concreto celular, ya que la estructura celular desarrollada es uniforme y contiene espacios de aire en el rango de $0,01$ a $1,01 \text{ mm}$ (Yahya y Amran, 2016). Comparado con el concreto convencional, el concreto celular autoclave ofrece mejor resistencia térmica y menor densidad (Cong, Lu, Yao, y Wang, 2016).

Concreto celular espumado: es una sustancia de muy baja densidad que incluye el 75% de vacíos en el interior de su estructura (Hashim y Tantray, 2021). El concreto espumado es ideal para llenar huecos superfluos, como tanques de combustible abandonados, sistemas de alcantarillado, tuberías y alcantarillas, especialmente en áreas con acceso limitado (Kadela, Kozłowski, y Kukiełka, 2017).

Estudios han demostrado que si la técnica utilizada para crear concreto celular espumado tuviera una densidad de menos de 400 kg/m^3 y una conductividad térmica de menor a la cantidad de $0,10 \text{ W/mK}$, la resistencia del concreto celular espumado sería insuficiente, lo que resultaría en frágil concreto (Cuce, Cuce, Wood, y Riffat, 2014).

Concreto celular con *poliestireno*: Las investigaciones iniciales tuvieron como objetivo estudiar el concreto con poliestireno y así explotar sus propiedades como peso ligero, baja conductividad térmica y baja absorción de agua en comparación con otros hormigones ligeros. Poliestireno expandido posee muchas propiedades tales como: muy ligero (densidad en el rango de 10 a 50 kg/m³), conductividad térmica muy baja (aproximadamente 0,04 W/mK a 27 °C) y casi impermeable. Se añade al hormigón para reducir su peso y masa térmica (Ali, Fahmy, AbouZeid, Shaheen, y Mooty, 2020). El concreto celular con poliestireno ha sido usado en muchas obras ingenieriles, y como subbase en un pavimento por la facilidad de configuración y disponibilidad (Perry, Bischoff, y Yamura, 1991).

Concreto celular con agregados reciclados: La reutilización y el reciclaje de residuos de hormigón pueden ser estrategias exitosas para lograr la sostenibilidad a largo plazo. El concreto reciclado se utiliza para reemplazar el agregado grueso natural, que se recolecta, tritura y reutiliza eficientemente para lograr la sostenibilidad (Abdel-Hay, 2017).

Sin embargo, las características solicitadas del concreto celular establecen el tipo de agregado liviano a utilizar. Por consiguiente, se puede utilizar un agregado ligero y débil cuando existen requisitos estructurales mínimos, pero un excelente aislamiento térmico (Herki, 2020).

Concreto estructural aligerado: el EURO-código, contiene los requerimientos de diseño para concreto celular aligerado, así como sus agregados (National Standards Authority of Ireland, 2005). Si la densidad es inferior a 2200 kg/m³, se clasifica como hormigón ligero (asumiendo la densidad del hormigón normal entre 2.300 y 2.400 kg/m³) y la densidad del árido utilizado debe ser inferior a 2.000 kg/m³ (Bremner, 2008).

Técnicas de producción de concreto celular: El hormigón celular o concreto celular es similar al hormigón autocompactante en el sentido de que está destinado a proporcionar una fluidez y compactibilidad ideales, por lo cual su producción está regulada en parte por la cantidad de agua y espuma utilizada en la mezcla (Ramamurthy, Kunhanandan Nambiar, y Indu Siva Ranjani, 2009).

La mezcla por lotes y con tornillo son los dos sistemas de producción que generalmente se utilizan para mezclar el cemento y el agua en el concreto celular (Amran *et al.*, 2022).



Figura. 5. Diferentes compuestos para preparar concreto celular.

En la Figura 5 se observan los diferentes materiales con los cuales se puede elaborar un concreto celular; sin embargo, los agentes espumantes son la manera perfecta de hacer concreto celular (Thienel *et al.*, 2020).

Mezclado por lotes: esta técnica se refiere a crear el agente espumante en una máquina de espuma y es la más utilizada en la producción de concreto celular (Lesovik *et al.*, 2020). En seguida con una mezcladora de doble tornillo se mezclan los componentes del concreto celular y se garantiza las propiedades del mismo (Amran *et al.*, 2022).

Mezcla con tornillo: la mezcla con barrena o tornillo de Arquímedes se ejecuta en camiones de hormigón volumétricos móviles o *mixers* e implica mezclar los materiales con un eje giratorio; luego, las materias primas se reciben en un extremo del sinfín, que gira y mezcla los componentes a medida que son empujados. En la mayoría de los equipos de instalación de concreto celular se utiliza una bomba de cavidad progresiva, muy constante al mantener limpio su interior mientras está en uso. El transporte del concreto celular se hace mediante bombas peristálticas (Amran *et al.*, 2022).

Reseña histórica del uso del concreto celular a nivel global y una reseña en Colombia: La primera mención de este tipo de aglomerante con propiedades similares al hormigón es del escritor romano Plinio, quien menciona la proporción de conglomerante utilizada en la construcción de los embalses romanos (Pacheco Tinoco, 2018).

Según el Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones, el estudio de este elemento viene desde 6000 a. C.; la unión de cemento con agua, arena y áridos resultó en un nuevo material que se podía manipular rápidamente y que, cuando secaba, obtiene características de solidez, resistencia y durabilidad bastante buenas. Este nuevo material fue el origen del hormigón o del concreto como lo conocemos en Colombia.

El cemento *Portland* ha desempeñado un rol muy importante en la historia de los materiales de construcción, pero no fue hasta 1811 cuando James Frost patentó el primer compuesto artificial obtenido de la caliza molida y arcilla. En 1824, a su vez Joseph Apsdin patentó por primera vez un cemento tan duro como la piedra *portland*, conocido actualmente como cemento Portland (Alvarez, Martín, y García, 1995).

Aunque se tienen registros de construcción del primer concreto ligero desde hace más de 2.000 años (Herki, 2020), hasta en 1923, Axel Eriksson desarrolló el primer concreto celular (Amran *et al.*, 2015), y desde entonces diferentes investigadores alrededor del mundo han estudiado las propiedades mecánicas del *concreto celular*. En efecto, a nivel global es muy reconocido y utilizado en diferentes tipos de labores por sus diferentes ventajas como, por ejemplo, que es un material muy liviano (Pacheco Tinoco, 2018). Desde 1938, en la unión soviética se ha trabajado el concreto celular en diferentes procesos de producción para elementos no estructurales (Amran *et al.*, 2022).

Actualmente, el concreto celular se usa ya que suele optimizar el diseño estructural, y por sus propiedades reduce las cargas muertas a las que se someten los elementos estructurales de una edificación (Izquierdo y Ortega, 2017).

En Colombia, actualmente, las especificaciones generales de construcción de carreteras (2022, EGCC-22; Universidad Nacional de Colombia, Universidad del Quindío e Instituto Nacional de Vías, 2022), en el Artículo 611-22 denominado “Concreto celular para rellenos”, describe los estatutos y los parámetros técnicos que se deben cumplir en Colombia con respecto al uso de *concreto celular* en rellenos. En esa especificación enumeran el suministro, la fabricación, el transporte y la instalación

del concreto celular. Así mismo, la norma de referencia afirma las aplicaciones donde no puede ser utilizado el concreto celular: concreto estructural, concreto de capa funcional de pavimentos, prefabricados de concreto, adoquines de concreto, material expuesto a erosión, material que contenga aditivos que puedan generar corrosión al acero de refuerzo.

Por su parte, la norma *EGCC-22* establece el concreto celular como una mezcla homogénea de material cementante, agua y agente espumante, por la cual se obtiene un concreto liviano con un contenido de burbujas de aire distribuidas uniformemente. Los materiales o las materias primas de producción deben cumplir con los requisitos expuestos en la norma de referencia. En la instalación, la *EGCC-22* exige cumplir las recomendaciones de *ACI 523-Guide for cast-in-place Low-Density cellular concrete*. La norma insta que se debe realizar un ensayo establecido de acuerdo con la *ASTM C796* de la densidad y el contenido de aire del concreto celular en estado fresco. Este ensayo se debe hacer para cada lote de 80 m³ o por cada jornada de trabajo.

La norma señala que se debe hacer un ensayo de compresión según *ASTM C796* y *ASTM C495* para cada lote o jornada de trabajo. Se deben obtener cuatro muestras cilíndricas para ser fallas a compresión. De igual forma, las especificaciones generales de construcción de carreteras (2022) clasificó el concreto celular según la densidad (cf. Tabla 2) e indicó algunos parámetros mecánicos mínimos de resistencia a compresión y capacidad portante del concreto celular.

Tabla 2. Clasificación del concreto celular según con <i>EGCC-22</i>			
CLASE	Densidad concreto fresco máxima	Resistencia a la compresión mínima	Capacidad portante
	(Kg/m ³)	(MPa)	(MPa)
I	385	0.07	0.07
II	480	0.28	0.28
III	575	0.55	0.55
IV	670	0.83	0.83
V	800	1.10	1.10

Fuente: Autores. <Tomado de: Universidad Nacional de Colombia, Universidad del Quindío, e Instituto Nacional de Vías, 2022>.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En el siguiente capítulo, se realiza una revisión comparativa de las propiedades mecánicas del concreto celular, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en diferentes investigaciones a nivel mundial.

Uno de los parámetros más importantes en la evaluación del *concreto celular* es la densidad de la mezcla. Alam y Hu (2023) ensayaron 6 diferentes tipos de especímenes de concreto celular con diferentes densidades; para el presente estudio se tuvieron en cuenta 3 tipos: el primero con un peso unitario de 400 kg/m³, el segundo con un peso unitario de 641 kg/m³, y el tercero con peso unitario de 881 kg/m³; en el estudio de referencia (Alam y Hu, 2023) denominaron las muestras con la siguiente nomenclatura: *CC400*, *CC641* y *CC881*, respectivamente para cada densidad. Asimismo, en la preparación de las muestras utilizaron un agente espumante basado

en una proteína hidrolizada con una relación de agua cemento constante de 0.5. La mezcla la prepararon según la norma *ASTM C796*.

En la Tabla 3 se puede observar el diseño de mezcla para cada tipo de concreto evaluado en el presente artículo.

Tabla 3. Diseño de mezcla concreto celular para diferentes densidades.			
ID	Cemento, Kg/m ³	Agua, Kg/m ³	Agente Espumante, Kg/m ³
CC400	267	91	42
CC641	427	178	35
CC881	587	265	28

Fuente: Autores. Tomado de Alam y Hu (2023).

Para realizar los ensayos de laboratorio, Alam y Hu (2023) fabricaron prismas de concreto celular con las dosificaciones resaltadas en la Tabla 3 con unas dimensiones de 101.6 mm x 101.6 mm x 355.6 mm, con el fin de posteriormente cortar y formar cubos para las pruebas de impacto. Para los ensayos de los parámetros mecánicos, los autores dividieron las muestras de la siguiente forma: primero, para evaluar la resistencia a compresión realizaron cilindros de 76.2 mm de diámetro y 152.4 mm de altura en una sola capa de *concreto celular*. Segundo, para evaluar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson (Alam y Hu, 2023) fabricaron cilindros de 101.6 mm de diámetro y 203.2 mm de altura. Es muy importante que todos los especímenes fueron fabricados a una temperatura ambiente controlada de 23°C con un grado de humedad del 95%. Para el curado de las muestras la temperatura ambiente fue controlada de 23°C y la humedad fue del 100%.

Después de 28 días, Alam y Hu (2023) realizaron varios ensayos de laboratorio. En primer lugar, hicieron el ensayo de compresión de acuerdo con la norma *ASTM C109* para luego obtener el promedio de 3 muestras realizadas.

Enseguida, relacionaron la prueba de penetración de impacto (cf. Figura 6) para los prismas fabricados anteriormente (Moore, 1972). Generalmente, se usa el marco de prueba *Instron 4502* para este ensayo (Song y Lange, 2020). Efectivamente, se introduce una varilla de acero de 19,05 mm (0,75") de diámetro en el espécimen de *concreto celular* verticalmente desde la parte superior central.

Con este ensayo Alam y Hu (2023) realizaron la curva de carga versus el desplazamiento del concreto celular y también lograron evaluar la deformación de los poros después de la penetración (cf. Figura.6.). Adicionalmente, con este ensayo los autores calcularon la energía de absorción basados en el área de la curva debajo en la relación carga – desplazamiento y el punto de densificación.

A continuación, Alam y Hu (2023) realizaron la prueba de resistencia de impacto usando máquina de impacto *CADEX*. La energía de impacto fue hallada dejando caer un objeto estandarizado de 4.17 kg desde una altura de 3.5 m. Alam y Hu (2023) midieron la deformación por impacto y la familia de discontinuidades presentes en la muestra de ensayo.

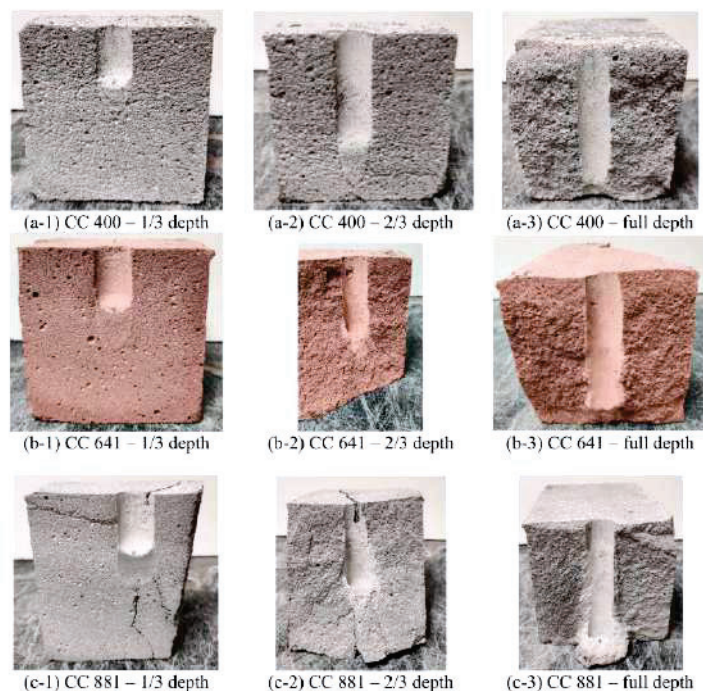


Figura. 6. Ensayo de penetración.
Fuente: Tomada de Alam y Hu (2023).

Finalmente, Alam y Hu (2023) realizaron la prueba de fuerza de flexión para los especímenes de concreto celular de acuerdo con la norma *ASTM C1609* con una velocidad controlada hasta que el espécimen falló o se desplazó 4 mm.

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, al realizar el ensayo y compresión se observa que las muestras experimentaron cargas máximas en la etapa elástica dentro de un rango de 0 a 5 mm de desplazamiento, y se generan las primeras fisuras de falla en esta etapa. Cuando la compresión máxima es alcanzada se observa una propagación de fisuras al largo del espécimen. Enseguida, se observa en los especímenes una meseta de aplastamiento, en cuya etapa se generan la mayor cantidad de grietas longitudinales, y finalmente se observa el colapso de la muestra. Los resultados obtenidos por los autores con este ensayo se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 4. Resultados mecánicos obtenidos del concreto celular para diferentes densidades.			
ID	Esfuerzo de compresión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Relación de Poisson
CC400	1.80	977	0.26
CC641	2.51	2954	0.26
CC881	5.55	4617	0.25

Fuente: Tomado de Alam y Hu (2023).

En el ensayo de penetración, Alam y Hu (2023) observaron un compartimento similar en las muestras, sin embargo, los resultados del ensayo muestran que mientras que el concreto celular de mayor densidad resistió mayores cargas bajo

la prueba de penetración, el concreto celular de menor densidad proporcionó una zona de densificación más profunda con una penetración limpia y sin desgarros en el concreto. Esto se debe a que el concreto de baja densidad disipa mejor la energía bajo un ensayo de penetración.

En el ensayo de resistencia de impacto, la energía cinética del equipo fue transportada al espécimen través del dispositivo de impacto, y aunque se perdió un porcentaje de energía el *concreto celular* recibió la mayor parte del impacto. La profundidad de la abolladura y el diámetro de la misma son dos parámetros esenciales para entender la capacidad de absorción de energía y la capacidad del concreto celular para recibir los impactos (Alam y Hu, 2023). Según el ensayo, la densidad del concreto celular aumenta la profundidad, diámetro y volumen de la abolladura disminuyen indicando que los concretos de baja densidad son más frágiles y no tan resistentes para absorber los restos del impacto. Es decir, que el concreto celular con una densidad mayor adquiere una mejor capacidad de absorción de energía con respecto a las otras muestras.

Finalmente, el comportamiento de las muestras de esfuerzos de flexión muestra información acerca del comportamiento estructural del concreto celular (Alam y Hu, 2023). Según los resultados obtenidos en este ensayo, la mayor, es decir, el espécimen *CC881* mostró mayor fortaleza al esfuerzo de flexión. La resistencia a flexión del concreto celular depende de la densidad del material.

Por su parte, Mugahed Amran *et al.* (2020) realizaron pruebas de laboratorio para diferentes densidades y con diferentes materiales. Para el estudio se seleccionaron las siguientes mezclas: a) Mix III -1, cuya característica principal es que la densidad es de 1800 kg/m^3 ; b) Mix III-4, cuya característica principal es la densidad de 1900 kg/m^3 ; sin embargo, esta muestra contiene un porcentaje de arena fina en su composición.

En la Tabla 5 se observa la composición de las mezclas utilizadas por Mugahed Amran *et al.* (2020) para los ensayos experimentales que realizaron.

Tabla 5. Composición de diseño de las mezclas: MIX III-1 y MIX III-4.				
ID	Cemento, Kg/m^3	Agua, Kg/m^3	Agente Espumante, Kg/m^3	Arena Fina, Kg/m^3
MIX III-1	541	243	0.20	0
MIX III-4	541	243	0.20	1080

Fuente: Tomado de Mugahed Amran *et al.*, 2020.

Estos investigadores utilizaron un agente espumante aditivo sintético *AK-350* con una relación de 1:40 agua-aditivo. Para la mezcla se usó el método 1 “Mezclado por lotes” (Amran *et al.*, 2022) y se homogenizó la mezcla con una batidora; no obstante, se fijó una tolerancia entre 50 a 100 kg/m^3 con el diseño de mezcla original consecuentemente con los límites aceptados.

Los especímenes de laboratorio se fabricaron en muestras cúbicas de 150 mm de tamaño para los ensayos de la resistencia a la compresión del concreto con diferentes tiempos de curado: 3, 7, 14, 28, 56 y 90 días para la resistencia a la tracción a 28 días.

Enseguida, Mugahed Amran *et al.* (2020) fabricaron especímenes vigas prismáticas para el ensayo de contracción con dimensiones de 100 mm x 100 mm x 525 mm 3, 7, 14, 28, 56 y 90 días en condiciones de humedad del 95% +/- 3% y una temperatura 22°C +/- 2°C. Para el ensayo de contracción los moldes los pusieron en una sala por 23.5 hr +/- 0.5 con una humedad >60% y una temperatura de 20°C +/- 3 °C.

Para cada ensayo de laboratorio, Mugahed Amran *et al.* (2020) realizaron como mínimo 3 muestras y se tomó en los resultados el valor promedio de las mismas. Al respecto, ellos realizaron el ensayo de compresión tomando como referencia la norma ASTM C512, contexto en que se evidenció que a medida que el tiempo de curado aumenta, la resistencia de compresión también se incrementa.

Por su parte, la Figura 7 enseña que la resistencia a compresión aumenta a medida que crece la densidad, ya que existen menos espacios o vacíos de aire dentro de la estructura del concreto. Los mismos citados autores encontraron que el concreto celular puede llegar a obtener valores de resistencia a compresión entre 10 y 58 MPa.

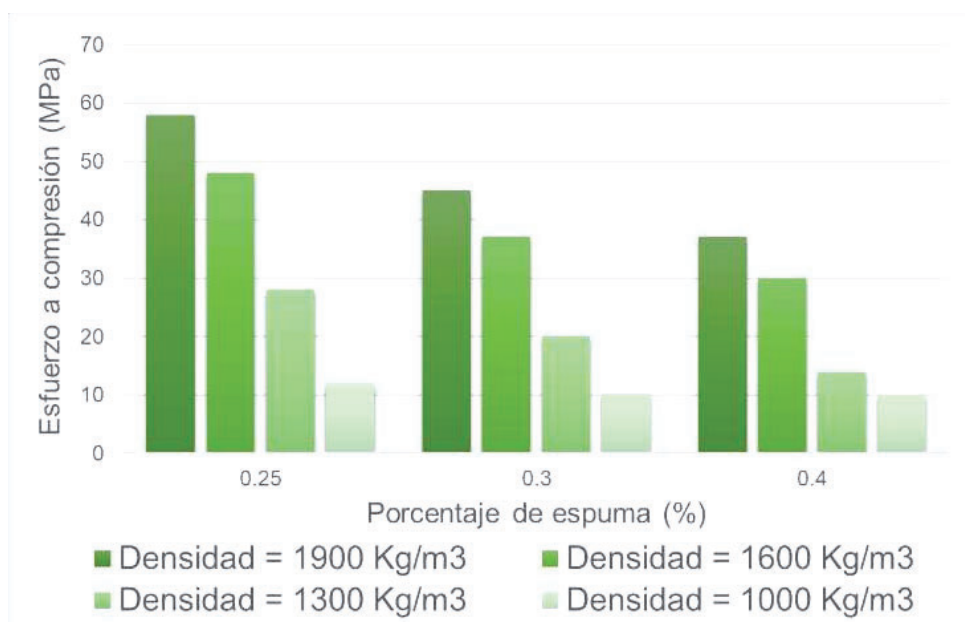


Fig. 7. Resultados del ensayo a compresión porcentaje de agente espumante.
Fuente: Autores: Tomada de Mugahed Amran et al. (2020).

Asimismo, en la evaluación del módulo de elasticidad de los materiales Mugahed Amran *et al.* (2020) observaron un mejor comportamiento en la muestra sin arena, ya que la ausencia de árido grueso arroja como resultado una buena homogeneidad.

Para los especímenes del ensayo de compresión, Mugahed Amran *et al.* (2020) -como se observa en la Figura 8- variaron el porcentaje de agente espumante añadido, dando como resultado que entre más porcentaje de aire dentro de la muestra el módulo de elasticidad del espécimen es menor.

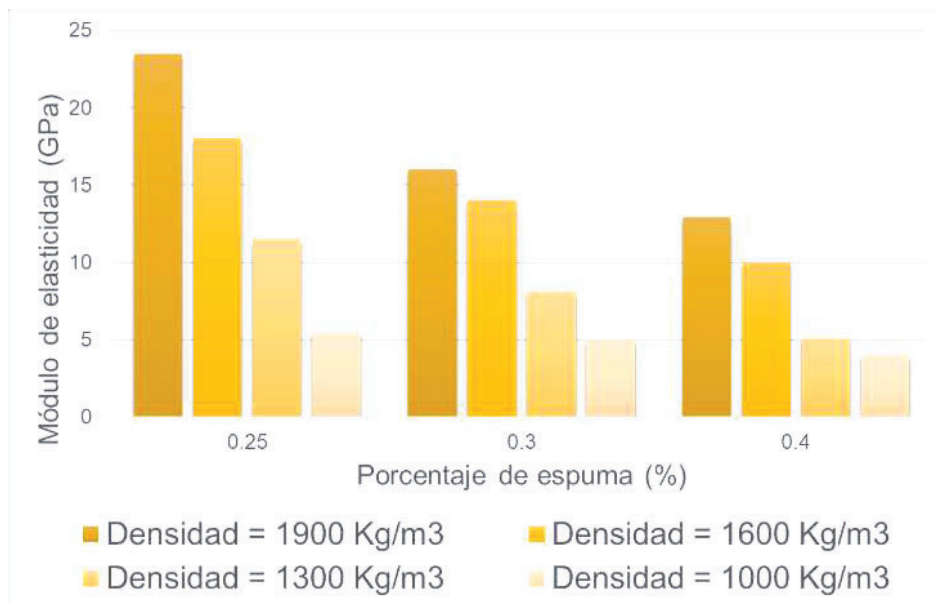


Figura. 8. Resultados ensayo de compresión, módulo de elasticidad.

Fuente: Autores: Tomada de Mugahed Amran *et al.* (2020).

El ensayo de tensión, Mugahed Amran *et al.* (2020) lo ejecutaron de acuerdo con la norma *ASTM C496*, en el cual se evidenció que la resistencia a tensión (cf. Figura 9) se redujo de acuerdo con el contenido de aire de la estructura del espécimen, es decir, a mayor densidad mayor resistencia a los esfuerzos de tensión tal como se patentiza en la Figura 9.

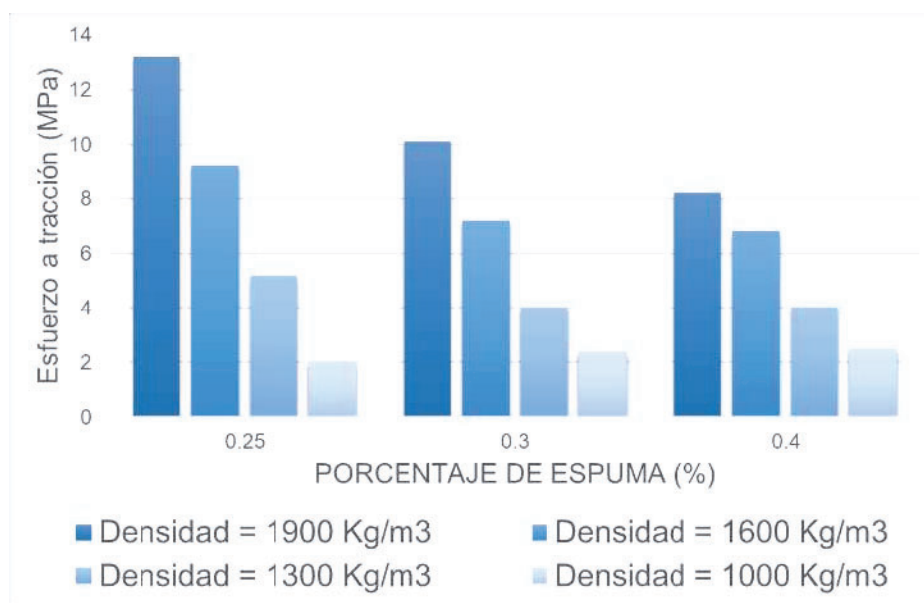


Fig. 9. Resultados del ensayo de flexión.

Fuente: Autores: Tomada de Mugahed Amran *et al.* (2020).

De esta manera, Mugahed Amran *et al.* (2020) evalúan la resistencia a la flexión de los especímenes, llegando a la conclusión de que la resistencia a flexión aumenta a medida que crece la densidad. El ensayo de contracción se aplicó de acuerdo con la norma *ASTM C490*, en donde los resultados establecieron que a un mayor contenido de espuma la contracción también es mayor.

Por su parte, Song y Lange (2020) realizaron una investigación sobre el comportamiento estructural al aplastamiento y la deformación del concreto celular a través del ensayo de penetración; según este análisis, el comportamiento del concreto celular depende de la densidad; ellos afirman que la densidad de un concreto celular debe estar entre 400 kg/m^3 y 1800 kg/m^3 ya que, inferior al rango, el concreto celular comienza a perder su estabilidad antes de que fragüe, y afirman que entre densidades de 800 y 1800 kg/m^3 el *concreto celular* se comienza a comportar similar a un elemento sólido tal como el concreto estructural.

Según su estudio, Song y Lange (2020) prepararon 3 diferentes clases de mezclas; asimismo, reemplazaron un porcentaje de cemento por cenizas volantes. Los diseños de las mezclas fueron creados de acuerdo con *ASTM C796*. Para tal clase de mezclas se utilizaron una mezcla pura y 5 mezclas de concreto celular con densidades entre 400 kg/m^3 y 800 kg/m^3 . La primera clase de mezcla la llamaron ‘clase controlada’, en la cual la relación agua - cemento es de 0.42, y reemplazaron el 10% de cemento con cenizas volantes. La segunda clase la llamaron ‘clase con alto contenido de ceniza volante’, manteniendo la relación agua - cemento en 0.42 pero reemplazando el 30% de cemento con cenizas volantes. Finalmente, la tercera clase la denominaron ‘alto contenido de agua’, versión que mantuvieron bajo el contado de ceniza volante en 10%, pero la relación agua - cemento fue de 0.47.

La preparación de la mezcla la realizaron por el método 1: “Mezclado por lotes” (Amran *et al.*, 2022), contexto en donde crearon la mezcla de cemento y agua, y luego crearon la mezcla del agente espumante, y finalmente revolvieron de acuerdo con los requerimientos de las *ASTM C305*. Para el proceso de producción los autores usaron un superplastificante *SIKA Visco créete 2100* en una dosificación del 8% del peso. El índice de agente espumante usado fue de 1:15, cuya modalidad usada por los autores fue *BASF Masterícelo 30*, es decir un agente sintético.

Las medidas de las probetas cilíndricas de concreto celular fueron de $101,6 \times 203,2 \text{ mm}$ (2 x 4 pulgadas) y para moldes prismáticos de $50,8 \times 50,8 \times 203,2 \text{ mm}$ (2x2x8 in). Las probetas fueron curadas a 21°C de temperatura con una humedad del 100%. Se procedió a analizar el comportamiento del *concreto celular* a desplazamientos versus cargas fue uno de los parámetros más importantes para entender el comportamiento estructural del concreto celular (Song y Lange, 2020).

Según los resultados de estos investigadores se evidenciaron que entre mayor sea la densidad mayor esfuerzo de penetración se debe aplicar en el espécimen. Asimismo, observaron 4 fases en el comportamiento del concreto celular -la fase lineal y elástica-, y enseguida una fase de transición, la tercera fase conocida como fase de creación de meseta o aplastamiento y la cuarta fase es la densificación. Los autores observaron que después de estas cuatro fases, se podía observar el material densificado debajo de la penetración del equipo, tal como se observa en la Fig.10; esta zona debajo del equipo en forma de cono se denomina normalmente ‘zona muerta’ (Song y Lange, 2020).

Más aún, ellos observaron que el concreto celular no sufrió agrietamiento después del ensayo de penetración. Este comportamiento se debió a la baja relación de Poisson del material. También captaron que la menor resistencia a la compresión a los 21 días fue para mezcla con menos densidad (400 kg/m^3), y mayor porcentaje de ceniza volante con un valor de resistencia a compresión de 0.27 MPa. En contraste,

el mayor valor de resistencia se provocó con relación a la mayor densidad (800 kg/m^3); sin embargo, este valor se obtuvo en la muestra con mayor porcentaje de ceniza volante con un valor de resistencia a compresión de 15.09 MPa.



Fig. 10. Material densificado debajo de la penetración del equipo.

Fuente: Tomada de Song y Lange (2020).

Con relación al módulo de elasticidad, los resultados de los ensayos realizados por Song y Lange (2020) dio como resultado que el menor valor del módulo fue para la mezcla con menos densidad (400 kg/m^3) y el mayor porcentaje de ceniza volante fue con un valor de 407 MPa; por el contrario, el mayor valor del módulo se dio a la mayor densidad (800 kg/m^3), y también en la muestra con mayor porcentaje de ceniza volante con un valor de resistencia de 3559 MPa.

Finalmente, concluyeron que el concreto celular de baja densidad asume un comportamiento de aplastamiento diferente al que usualmente vemos en materiales de concreto convencional. Su estructura altamente triturable admite una cantidad importante de energía que se disipa. Esta propiedad única acerca a la instalación del *concreto celular* como absorbente de energía o disipador de energía.

3. RESULTADOS

De acuerdo con lo previsto, se realizó un análisis comparativo entre los valores típicos del concreto convencional y los resultados obtenidos en los artículos de referencia. Se estableció una evaluación técnica teniendo en cuenta la densidad del material, la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson. En primer lugar, el concreto convencional obtuvo una densidad alrededor de 2300 Kg/m^3 y una resistencia a la compresión entre 20 MPa (concreto estructural-1) y 40 MPa (concreto estructural-2) (Song y Lange, 2020). A su vez, la relación de Poisson para un concreto estructural se pudo tomar de un valor de 0.20, y el módulo de elasticidad está dado por la ec.1 (Gobierno de la República de Colombia, 2010):

$$4700 \cdot \sqrt{([F']_C)} \quad (1)$$

Según esta ecuación (1) de referencia, el rango de módulo de elasticidad para concreto convencional es de 21019 en MPa (concreto estructural-1) a 29725 MPa (Concreto estructural-2).

Tabla 6. Resultados mecánicos obtenidos en la investigación.				
ID	Densidad (Kg/m ³)	Esfuerzo de compresión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Relación de Poisson
CC400	400	1.80	977	0.26
CC641	641	2.51	2954	0.26
CC881	881	5.55	4617	0.25
Ceniza volante 1	400	0.27	407	-
Ceniza volante 2	800	15.09	3559	-
MIX III-1	1800	42	14000	-
MIX III-4	1900	44	17000	-
Concreto estructural -1	2300	20	21019	0.20
Concreto estructural -2	2300	40	29725	0.20

Fuente: Autores.

Acorde con esta Tabla 6, se observan los valores mecánicos obtenidos para diferentes tipos de muestras: a) según Alam and Hu (2023): CC400 (400 Kg/m³), CC641 (641 Kg/m³), CC881 (881 Kg/m³); b) obtenido de los resultados de laboratorio de Song y Lange (2020): ceniza volante 1 (400 Kg/m³) y ceniza volante 2 (800 Kg/m³); c) obtenidos de los resultados de laboratorio (Mugahed Amran *et al.*, 2020): MIX III -1 (1800 Kg/m³) y MIX III-4 (1900 Kg/m³), resultantes de interpolaciones de las gráficas de los ensayos de laboratorio de Mugahed Amran *et al.* (2020); finalmente, d) concreto estructural 1 (2300 Kg/m³) y concreto estructural 2 (2300 Kg/m³) obtenidos por los métodos descritos en el presente documento (*Gobierno de la República de Colombia*, 2010).

3.1. Relación entre CC400 y Concreto estructural 1

De acuerdo con la Figura 11, se observaron los valores comparativos entre dos especímenes: por un lado, el *concreto celular CC400* en relación con el *concreto celular 1* del otro lado, cuya densidad de la muestra CC400 fue de 400 kg/m³, menor a la del concreto estructural que corresponde al 82%, más liviano en comparación con el concreto estructural 1. Sin embargo, la resistencia a la compresión de CC400 representó sólo 9% de la resistencia a la compresión del concreto estructural 1, y el módulo de elasticidad de CC400 correspondió al 4.6 % del total con respecto al *concreto estructural 1*.

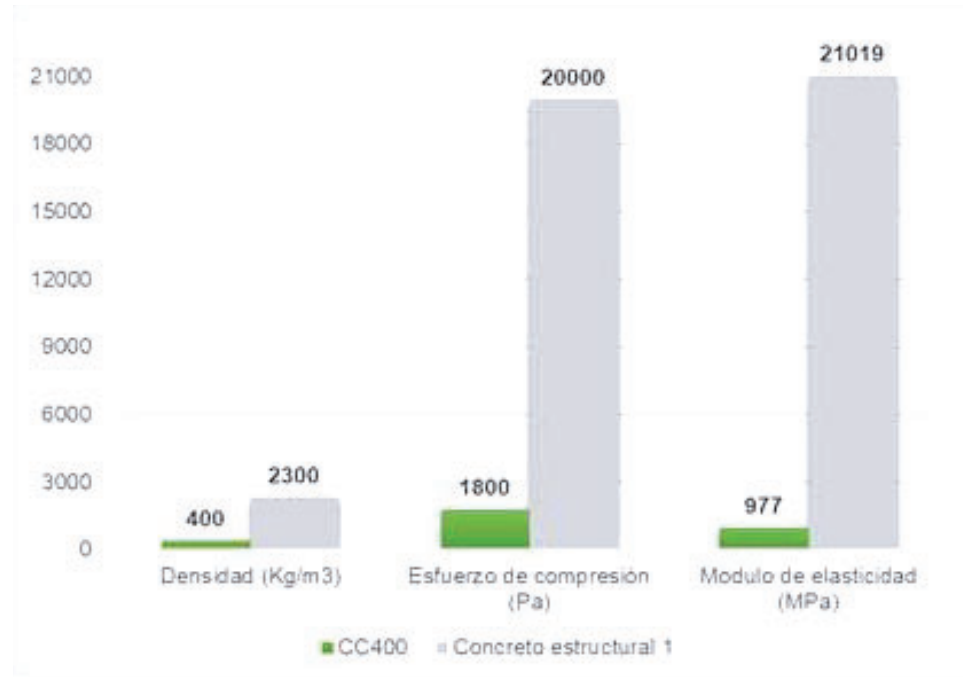


Figura 11. Gráfico comparativo entre CC400 y concreto estructural 1.

Fuente: Autores.

3.2. Relación entre CC641 y Concreto estructural 1

De conformidad con los resultados obtenidos (cf. Figura.12.), la densidad de la muestra CC641 corresponde sólo al 27.8% de la densidad del *concreto estructural 1*, es decir, la densidad del espécimen CC641 es 1641 kg/m³ menor a la del concreto estructural 1. Por su parte, la resistencia a la compresión del CC641 representa sólo 12.55% de la resistencia a compresión del concreto estructural 1, mientras el módulo de elasticidad del CC641 corresponde al 14.05 % del total que dio el concreto estructural 1.

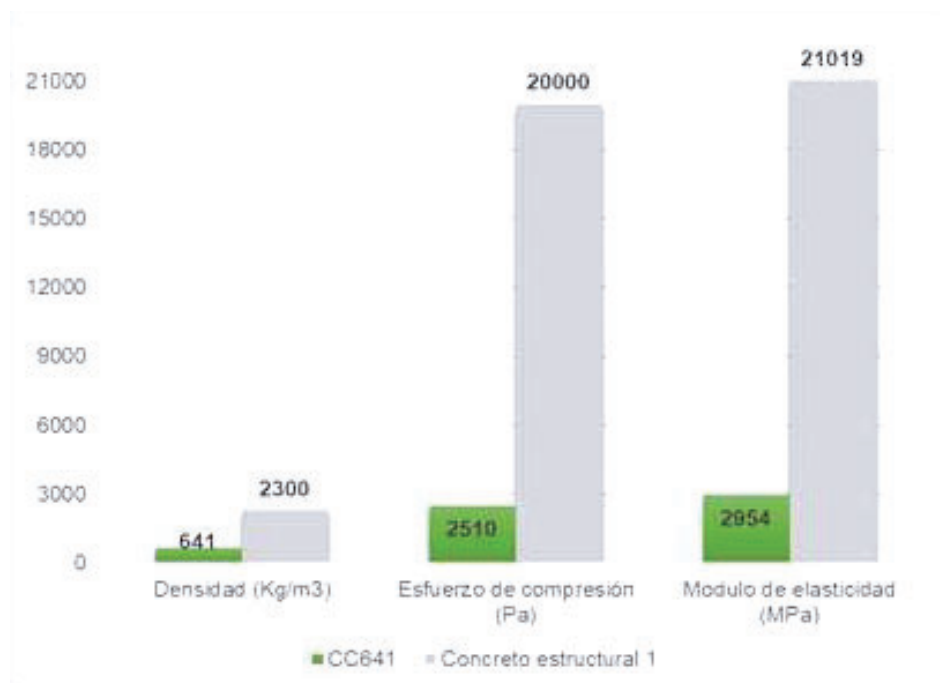


Figura. 12. Gráfico comparativo entre CC641 y el concreto estructural 1.

Fuente: Autores.

3.3. Relación entre MIX III-1 y Concreto estructural 1.

Probablemente, uno de los materiales de estudio con mejores propiedades mecánicas es el resultante en el espécimen *MIX III-1*, ya que, como se observa en la Fig. 13, la densidad de la muestra *MIX III-1* correspondió al 78.26% de la densidad del concreto estructural 1. Sin embargo, la resistencia a compresión del espécimen *MIX III-1* es mayor del doble con relación al concreto estructural 1 y, por su parte, el módulo de elasticidad de la muestra *MIX III-1* sí es menor al concreto estructural 1, es decir, es un material más rígido.

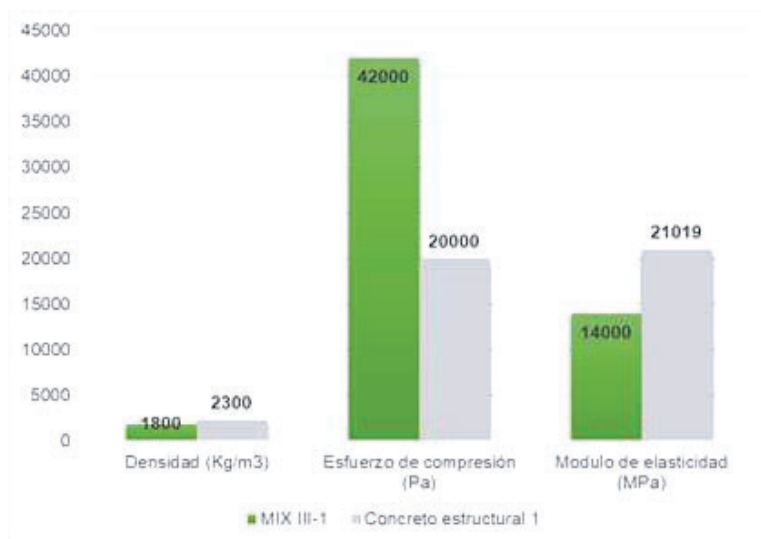


Fig. 13. Gráfico comparativo entre MIX III-1 y concreto estructural 1.

Fuente: Autores.

3.4. Relación entre CC881 y Concreto estructural 2

Por su parte, el material del espécimen *CC881*, es un material liviano con respecto al concreto estructural 2 (cf. Figura 14), mecánicamente se comporta mejor a la muestra *CC400*; sin embargo, la resistencia a compresión del *CC881* representa sólo el 13.87% de la resistencia a compresión del concreto estructural 2, mientras el módulo de elasticidad del *CC881* corresponde al 15.53 % del total resistente por el concreto estructural 2.

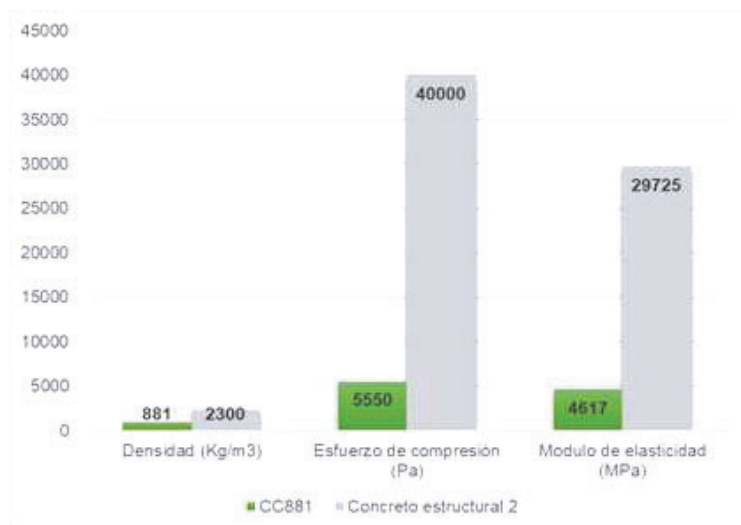


Figura. 14. Gráfico comparativo entre CC881 y concreto estructural 2.

Fuente: Autores.

3.5. Relación entre MIX III-4 y Concreto estructural 2

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa en la Figura 15 la relación entre la mezcla *MIX III-4* y el concreto estructural 2. En primer lugar, la densidad de la muestra *MIX III-4* corresponde al 82.60% de la densidad del concreto estructural 2, es decir es un material 17.4 % más liviano que el de la muestra de concreto estructural 2. Asimismo, es un material que resiste mayor carga a compresión; sin embargo, el módulo de elasticidad es menor con respecto al del concreto estructural 2.

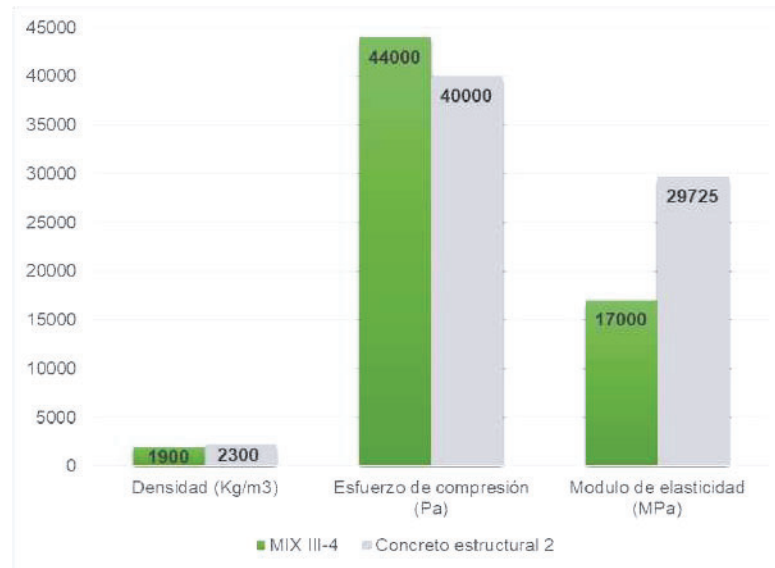


Figura. 15. Gráfico comparativo entre MIX III-4 y concreto estructural 2.

Fuente: Autores.

3.6. Relación entre CC400 y Ceniza volante 1

Un material alternativo para la creación del *concreto celular* es el uso de ceniza volante en la mezcla de preparación; sin embargo, como se observa en la Figura 16, los parámetros mecánicos como lo son la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad, son considerablemente menores a su homólogo con el mismo peso unitario o densidad (400 kg/m³), la muestra CC400.

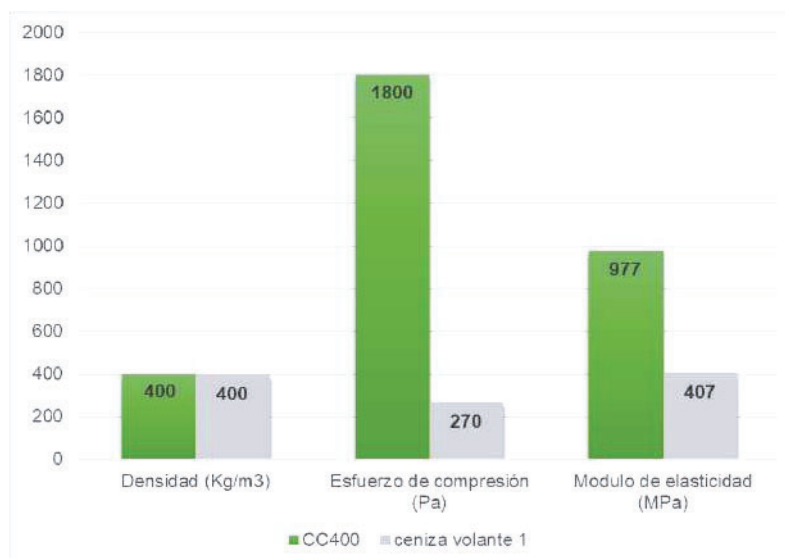


Figura. 16. Gráfico comparativo entre CC400 y Ceniza volante 1.

Fuente: Autores.

3.7. Relación entre CC881 y Ceniza volante 2

Según los resultados obtenidos, en la Fig.17 se observa que la densidad de la muestra CC881 es mayor con relación a la densidad de la ceniza volante 2. Por otro lado, se observa que la resistencia a compresión de la muestra CC881 representa el 36.77 % de la resistencia a compresión de la muestra ceniza volante 2, o sea, el espécimen de ceniza volante 2 soporta bien la compresión. No obstante, el módulo de elasticidad de ceniza volante 2 es menor con relación a la muestra CC881.

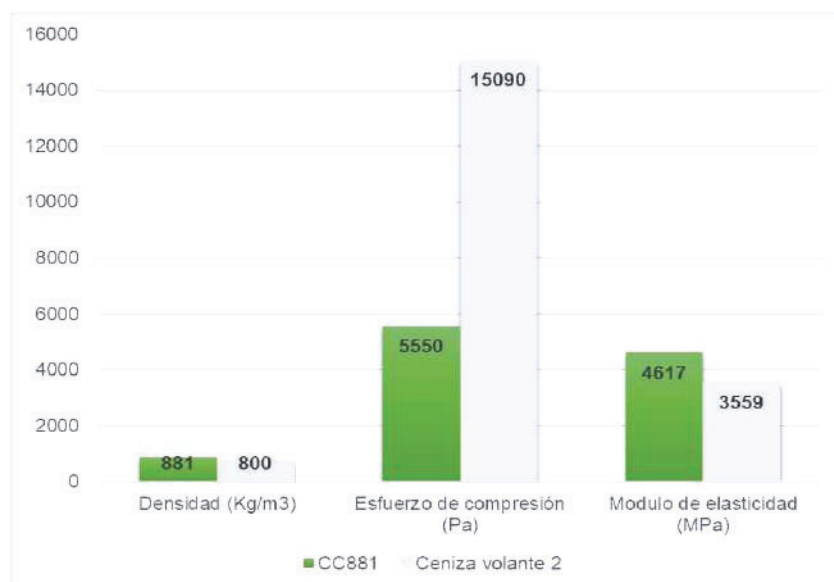


Fig. 17. Gráfico comparativo entre CC881 y Ceniza volante 2.

Fuente: Autores.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este apartado se analizó según los índices comparativos obtenidos en el capítulo anterior, se evaluaron las posibles aplicaciones del *concreto celular* y se realizó una reseña del uso de este concreto en un caso particular de aplicación en Colombia.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se evidenció que los parámetros estructurales del concreto dependen directamente de la densidad, es decir que la resistencia estructural del concreto es directamente proporcional a la densidad del concreto, debido a que una mayor densidad generalmente implica una mayor cantidad de material cementante y una menor cantidad de porosidad en la mezcla; por lo cual, el material se convierte en una matriz más compacta y resistente que puede

soportar cargas más altas; de hecho, los poros en el concreto pueden debilitar su estructura, por lo que una mayor densidad tiende a proporcionar una mayor resistencia a la compresión y a otras fuerzas, lo que es fundamental para su uso en construcción y aplicaciones estructurales. Sin embargo, la relación entre densidad y resistencia no es lineal y puede variar según la composición de la mezcla y otros factores.

Ahora bien, se observó en la primera comparación una reducción notable de los parámetros mecánicos de la probeta CC400 con respecto al concreto estructural 1. Este fenómeno se debió a que en el primer caso el porcentaje de vacíos dentro de la estructura del pavimento fue notablemente superior, parámetro que nos indicó la densidad del material, por lo cual, la primera probeta al tener muchos vacíos o bolas de aire

dentro de su estructura lo convirtió en un material ultraliviano, sin embargo, con muy malos parámetros mecánicos de resistencia. La relación de Poisson de la probeta *CC400* fue de 0.26, indicando que la relación de deformaciones fue buena y este material podría trabajar en donde los apremios del proyecto urjan una buena penetración dentro del material sin que se formen grietas o fisuras al momento de la penetración. También este material, por causa de la cantidad de burbujas de aire contenido en su estructura, se podría utilizar como aislante acústico en una situación determinada.

Más aún, con base en los resultados obtenidos con la muestra *CC641*, se confirma que los parámetros de resistencia estructurales son directamente proporcionales con la densidad del material. Con este material respecto al material *CC400*, se evidencia que a medida que el material se hace más denso el comportamiento estructural del material mejora. Aunque este material no es resistente a esfuerzos de compresión, es decir, no es posible su uso en elementos estructurales, se evidencia que el módulo de elasticidad mejora, es decir que es un material más resistente (con respecto al *CC400*) a la deformación permanente bajo los efectos de las cargas de compresión.

Por otro lado, se evidencia que la ceniza volante en un concreto celular de baja densidad (400 kg/m³) disminuye significativamente los parámetros estructurales, por lo que es recomendable no usar ceniza volante en concreto, pero la ceniza volante en una mezcla de 800 kg/m³ presenta comportamientos estructurales muy superiores con su análogo *CC881*, pero para los autores estos valores dejan incertidumbre, ya que el aumento en la resistencia a compresión es demasiado alto respecto a la ceniza volante 1,

por lo que es recomendable hacer un estudio de verificación de los resultados obtenidos en la investigación.

A su vez, la mezclas de concreto celular con mayor densidad *MIX III-1* y *MIX III-4* presentan grandes valores de resistencia mecánica y estructural, así que abre una brecha a la posibilidad de usar este tipo de mezcla con esta dosificación establecida para elementos estructurales reduciendo el peso unitario, lo que beneficiaría en gran medida el cálculo de cargas muertas de diseño, sin embargo, este tema se sale del alcance del presente documento y se recomienda realizar una investigación evaluando esta posibilidad.

4.1. Posibles usos en estructuras y aplicaciones

Carretera ligera, bases y presas llenas. Una capa de estructura de pavimento, generalmente está compuesta por la subbase granular, la base granular y la capa de rodadura apoyadas sobre una capa de subrasante estable. Cuando las condiciones de la subrasante no son óptimas o no cumplen con los requisitos mínimos para instalar una estructura de pavimento, el concreto celular puede ser una solución fuerte y liviana con el fin de fortalecer y superar muchos de los desafíos que plantean los pobres materiales de subrasante (*Concrete Pavement Technology Center, 2021*).

La primera consideración que se debe revisar para usar el *concreto celular* como material de mejoramiento de la subrasante son las situaciones en donde se deban hacer compensaciones de peso del material. Otra situación es cuando las cargas excesivas deforman el suelo blando de fundación. Para este caso, el concreto celular puede ser utilizado como reemplazo total o parcial de la capa de subbase en estas aplicaciones para producir un material fuerte y

liviano que no produzca sobrecargas en el suelo fundación (*Concrete Pavement Technology Center, 2021*).

Muro de contención, rellenos y detención en sistemas de contención. El material es apropiado para muros de contención que necesitan rellenos de material ligero. Para el diseño de este material, la práctica más común es instalar el relleno del muro de contención, para así no generar empujes laterales, debido a que se utilizara en la parte del *trasdós* del muro, como si el *concreto celular* fuera un material granular.

Este material también es utilizado en muros de contención prefabricados y para muros de tierra mecánicamente estabilizados (*MSE*) como relleno de terraplén en los muros (*Concrete Pavement Technology Center, 2021*).

4.2. Concreto celular en Colombia

El uso del *Concreto Celular* en Colombia ha estado creciendo en los últimos años, y un ejemplo de esto es en el proyecto *Rehabilitación del PR 87 de la Transversal Cusiana* en Pajarito (Boyacá), en el cual se presentó un movimiento en masa de alrededor de 300.000 m³ aproximadamente. En efecto, el concreto celular se empleó como reemplazo y relleno de una zona de falla, la cual presentaba inestabilidad en el carril derecho en un tramo de 20 m de longitud, de 4.80 m de ancho, y un espesor de 3 metros, cuyo objeto de relleno con Concreto Celular es reducir la carga muerta presentada en esta zona de falla, debido a que el material reduce la carga muerta debido a su baja densidad, y priorizando su estabilidad y durabilidad.

En la Figura 18 se evidencia la zona de falla presentada y su alta inestabilidad, en la cual el primer método de contención fue un trinchero en madera o muro de contención en tabla

estaca para la estabilización de esta zona, que no funcionó y debido al peso del material existente falló; en la Figura 19 se evidencia el proceso constructivo del concreto celular en la zona de falla para reducir la carga en este punto y proceder a la estabilización de la zona a través del método de reemplazo de material por uno más liviano. El proceso constructivo es muy rápido, y esto agiliza el tiempo de la ejecución de la obra, puesto que no es necesario vibrar la mezcla debido a su fluidez; asimismo, es importante tener en cuenta que debido a su baja densidad en puntos donde se presenten pendientes se debe hacer la instalación por escalones, y esto no afecta la estructura del concreto celular, debido a que no se presentan juntas frías en este material.



Figura 18. Estado del tramo en falla del proyecto Transversal Cusiana antes de la instalación del concreto celular.

Fuente: Autores.



Figura 19. Estado del tramo en falla del proyecto Transversal Cusiana en el proceso de instalación del concreto celular.

Fuente: Autores.

5. CONCLUSIONES

Este artículo ha llevado a cabo una breve reseña del *concreto celular*, debido a que en los últimos años se presenta un crecimiento en el uso de las obras de ingeniería, así como un rápido desarrollo con un enfoque a mejorar los materiales de construcción que no generen sobrecargas. Por ello, este artículo investigó parámetros mecánicos del *concreto celular* y su uso adecuado en proyectos de ingeniería, referenciando sucintamente las soluciones ingenieriles de este material y su actuación en la ingeniería colombiana. De las discusiones se derivaron las siguientes conclusiones:

El *concreto celular* es un material liviano, de baja densidad, que presenta algunos beneficios con respecto al concreto convencional: a) utilizado en llenado de vacíos, b) provee 100% de compactación, c) no produce empujes sobre las estructuras, d) reduce cargas muertas debido a su baja densidad, e) permite rápido fraguado, f) no presenta juntas frías, y g) aumenta los rendimientos de producción e instalación respecto de los sistemas convencionales.

El *concreto celular* es una alternativa que brinda soluciones en obras ingenieriles donde se necesita un material de baja densidad, pero, según los parámetros encontrados, es necesario elegir la mezcla a utilizar considerando la variación de los parámetros mecánicos para cada mezcla evaluada.

Los rangos de densidad del *concreto celular* pueden situarse entre 400 kg/m³ hasta 1900 kg/m³, dependiendo sus agregados y el tipo de agente cementante y, en este orden de ideas, es de vital importancia llevar a término el correcto estudio para la aplicación del concreto celular de acuerdo con los rangos obtenidos según el comportamiento del material y los

parámetros mecánicos (resistencia a compresión entre 0.27 y 44 MPa, módulo de elasticidad entre 407 y 17000 MPa).

La *ceniza volante* es una alternativa del material con el cual se prepara el *concreto celular*; sin embargo, según la revisión de información es necesario seguir investigando y aplicando pruebas experimentales, ya que los resultados del estudio de revisión no dejan un resultado concreto debido a la gran variación de parámetros mecánicos que se presentan entre los rangos de las propiedades mecánicas de las muestras ensayadas.

A decir verdad, en Colombia, el *concreto celular* se ha venido utilizando en los últimos años como alternativa de construcción en obras civiles y el país cuenta como referencia para el uso del material el Artículo 611-22 del *Invías* denominado “Concreto celular para rellenos” de las especificaciones generales de construcción de carreteras año 2022 (EGCC-22).

REFERENCIAS

- Abdel-Hay, A. S. (2017). “Properties of recycled concrete aggregate under different curing conditions”. *HBRC Journal*, 13(3), 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2015.07.001>
- Abdigaliyev, A. y Hu, J. (2019). “Investigation on Improvement of Flexural Behavior of Low-Density Cellular Concrete through Fiber Reinforcement for Non-Structural Applications”. *Transportation Research Record*, 2673(10), 641–651. <https://doi.org/10.1177/0361198119853547>
- Alam, A., y Hu, J. (2023a). “Mechanical properties and energy absorption capacity of plain and fiber-reinforced single- and multi-layer cellular concrete”. *Construction and Building Materials*, 394. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132154>

- Ali, Y. A. Y.; Fahmy, E. H. A.; AbouZeid, M. N.; Shaheen, Y. B. I. y Mooty, M. N. A. (2020). "Use of expanded polystyrene in developing solid brick masonry units". *Construction and Building Materials*, 242, 118109. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118109>
- Álvarez, J., Martín, A. y García, P. (1995). "Historia de los morteros". *Boletín informativo del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 13, 52–59.
- Alwared, A. I.; Jaeel, A. J. y Ismail, Z. Z. (2020). "New application of eco-friendly biosorbent giant reed for removal of reactive dyes from water followed by sustainable path for recycling the dyes-loaded sludge in concrete mixes". *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(4), 1036–1046. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-00998-4>
- Amran, M.; Lee, Y. H.; Vatin, N.; Fediuk, R.; Poi-Ngian, S.; Lee, Y. Y. y Murali, G. (2020, octubre 1). "Design efficiency, characteristics, and utilization of reinforced foamed concrete: A review". *Crystals*, Vol. 10, pp. 1–35. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/cryst10100948>
- Amran, M.; Onaizi, A. M.; Fediuk, R.; Danish, A.; Vatin, N. I.; Murali, G., ... Azevedo, A. (2022). "An ultra-lightweight cellular concrete for geotechnical applications: A review". *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01096>
- Amran, Y. H. M. (2020). "Influence of structural parameters on the properties of fibred-foamed concrete". *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(1), 16. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-0262-8>
- Amran, Y. H. M.; Farzadnia, N. y Ali, A. A. (2015). "Properties and applications of foamed concrete: A review". *Construction and Building Materials*, 101, 990–1005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>
- Bhosale, A.; Zade, N. P.; Sarkar, P. y Davis, R. (2020). "Mechanical and physical properties of cellular lightweight concrete block masonry". *Construction and Building Materials*, 248, 118621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118621>
- Binod, T.; Beena, A.; Ryan, M.; Ryan, C.; Diego, V. y Peter, P. (2017). "Mechanical Properties of Lightweight Cellular Concrete for Geotechnical Applications". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(7), 06017007. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001885](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001885)
- Bremner, T. W. (2008). "Lightweight concrete". *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*, 307–323. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102616-8.00013-7>
- Chen, X., Wu, S., y Zhou, J. (2013). "Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar". *Construction and Building Materials*, 40, 869–874. <https://doi.org/10.1016/J.conbuildmat.2012.11.072>
- Concrete Pavement Technology Center, N. (2021). *Lightweight Cellular Concrete for Geotechnical Applications JANUARY 2021*. Recuperado de <https://www.cement.org/>
- Cong, X. Y.; Lu, S.; Yao, Y. y Wang, Z. (2016). "Fabrication and characterization of self-ignition coal gangue autoclaved aerated concrete". *Materials y Design*, 97, 155–162. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2016.02.068>
- Cuce, E.; Cuce, P. M.; Wood, C. J. y Rif-fat, S. B. (2014). "Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 273–299. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.017>
- Falliano, D.; De Domenico, D.; Ricciardi, G. y Gugliandolo, E. (2018). "Experimental investigation on the

- compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density". *Construction and Building Materials*, 165, 735–749. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.241>
- Falliano, D.; De Domenico, D.; Sciarrone, A.; Ricciardi, G.; Restuccia, L.; Ferro, G., ... Gugliandolo, E. (2019). "Investigation on the fracture behavior of foamed concrete". *Procedia Structural Integrity*, 18, 525–531. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.196>
- Flores-Johnson, E. A. y Li, Q. M. (2010). "Indentation into polymeric foams". *International Journal of Solids and Structures*, 47(16), 1987–1995. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.03.025>
- Flores-Johnson, E. A. y Li, Q. M. (2012). "Structural behaviour of composite sandwich panels with plain and fibre-reinforced foamed concrete cores and corrugated steel faces". *Composite Structures*, 94(5), 1555–1563. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.12.017>
- Abdel-Hay, A. S. (2017). "Properties of recycled concrete aggregate under different curing conditions". *HBRC Journal*, 13(3), 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2015.07.001>
- Abdighaliyev, A. y Hu, J. (2019). "Investigation on Improvement of Flexural Behavior of Low-Density Cellular Concrete through Fiber Reinforcement for Non-Structural Applications". *Transportation Research Record*, 2673(10), 641–651. <https://doi.org/10.1177/0361198119853547>
- Alam, A., y Hu, J. (2023a). "Mechanical properties and energy absorption capacity of plain and fiber-reinforced single- and multi-layer cellular concrete". *Construction and Building Materials*, 394. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132154>
- Ali, Y. A. Y.; Fahmy, E. H. A.; AbouZeid, M. N.; Shaheen, Y. B. I. y Mooty, M. N. A. (2020). "Use of expanded polystyrene in developing solid brick masonry units". *Construction and Building Materials*, 242, 118109. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118109>
- Álvarez, J.; Martín, A. y García, P. (1995). "Historia de los morteros". *Boletín informativo del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 13, 52–59.
- Alwared, A. I.; Jaeel, A. J. y Ismail, Z. Z. (2020). "New application of eco-friendly biosorbent giant reed for removal of reactive dyes from water followed by sustainable path for recycling the dyes-loaded sludge in concrete mixes". *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(4), 1036–1046. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-00998-4>
- Amran, M.; Lee, Y. H.; Vatin, N.; Fediuk, R.; Poi-Ngian, S.; Lee, Y. Y. y Murali, G. (2020, octubre 1). "Design efficiency, characteristics, and utilization of reinforced foamed concrete: A review". *Crystals*, Vol. 10, pp. 1–35. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/cryst10100948>
- Amran, M.; Onaizi, A. M.; Fediuk, R.; Danish, A.; Vatin, N. I.; Murali, G., ... Azevedo, A. (2022). "An ultra-lightweight cellular concrete for geotechnical applications – A review". *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01096>
- Amran, Y. H. M. (2020). "Influence of structural parameters on the properties of fibred-foamed concrete". *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(1), 16. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-0262-8>
- Amran, Y. H. M.; Farzadnia, N. y Ali, A. A. (2015). "Properties and applications of foamed concrete: A review". *Construction and Building Materials*, 101, 990–1005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>

- Bhosale, A.; Zade, N. P.; Sarkar, P. y Davis, R. (2020). "Mechanical and physical properties of cellular lightweight concrete block masonry". *Construction and Building Materials*, 248, 118621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118621>
- Binod, T.; Beena, A.; Ryan, M.; Ryan, C.; Diego V. y Peter, P. (2017). "Mechanical Properties of Lightweight Cellular Concrete for Geotechnical Applications". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(7), 06017007. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001885](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001885)
- Bremner, T. W. (2008). "Lightweight concrete". *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*, 307–323. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102616-8.00013-7>
- Chen, X.; Wu, S. y Zhou, J. (2013). "Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar". *Construction and Building Materials*, 40, 869–874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.072>
- Concrete Pavement Technology Center, N. (2021). "Lightweight Cellular Concrete for Geotechnical Applications January 2 0 2 1". Recuperado de: <https://www.cement.org/>
- Cong, X. Y.; Lu, S.; Yao, Y. y Wang, Z. (2016). "Fabrication and characterization of self-ignition coal gangue autoclaved aerated concrete". *Materials y Design*, 97, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.068>
- Cuce, E.; Cuce, P. M.; Wood, C. J. y Riffat, S. B. (2014). "Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 273–299. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.017>
- Falliano, D.; De Domenico, D.; Ricciardi, G. y Gugliandolo, E. (2018). "Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density". *Construction and Building Materials*, 165, 735–749. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.241>
- Falliano, D.; De Domenico, D.; Sciarrone, A.; Ricciardi, G.; Restuccia, L.; Ferro, G., ... Gugliandolo, E. (2019). "Investigation on the fracture behavior of foamed concrete". *Procedia Structural Integrity*, 18, 525–531. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.196>
- Flores-Johnson, E. A. y Li, Q. M. (2010). "Indentation into polymeric foams". *International Journal of Solids and Structures*, 47(16), 1987–1995. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.03.025>
- Flores-Johnson, E. A. y Li, Q. M. (2012). "Structural behaviour of composite sandwich panels with plain and fibre-reinforced foamed concrete cores and corrugated steel faces". *Composite Structures*, 94(5), 1555–1563. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.12.017>
- Gobierno de la República de Colombia. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Título C., Pub. L. No. Decreto No. 1000 de 2010 (2010). Colombia.
- Hajimohammadi, A.; Ngo, T. y Mendis, P. (2018). "Enhancing the strength of pre-made foams for foam concrete applications". *Cement and Concrete Composites*, 87, 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.014>
- Hashim, M. y Tantray, M. (2021). "Comparative study on the performance of protein and synthetic-based foaming agents used in foamed concrete". *Case Studies in Construction Materials*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00524>
- Herki, B. M. A. (2020). "Lightweight concrete using local natural lightweight aggregate". *Journal of Critical Reviews*, Vol. 7, pp. 490–497.

Innovare Academics Sciences Pvt. Ltd. <https://doi.org/10.31838/jcr.07.04.93>

- Hossain, Z., y Islam, K. T. (2022). "Prospects of rice husk ash as a construction material. Sustainable Concrete Made with Ashes and Dust from Different Sources". *Materials, Properties and Applications*, 61–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824050-2.00009-7>
- Izquierdo Cárdenas, M. I. y Ortega Rivera, O. E. (2017). "Desarrollo y aplicación del concreto celular a base de aditivo espumante para la elaboración de bloques macizos destinados a tabiquerías no portantes en edificaciones". Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima.
- Jason, L.; Huerta, A.; Pijaudier-Cabot, G. y Ghavamian, S. (2006). "An elastic plastic damage formulation for concrete: Application to elementary tests and comparison with an isotropic damage model". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(52), 7077–7092. <https://doi.org/10.1016/J.CMA.2005.04.017>
- Jaya, R. P. (2020). "Porous concrete pavement containing nanosilica from black rice husk ash". *New Materials in Civil Engineering*, 493–527. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818961-0.00014-4>
- Kadela, M.; Kozłowski, M. y Kukielka, A. (2017). "Application of Foamed Concrete in Road Pavement - Weak Soil System". *Procedia Engineering*, 193, 439–446. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.235>
- Kim, H. K.; Jeon, J. H. y Lee, H. K. (2012). "Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air". *Construction and Building Materials*, 29, 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.067>
- Kumar, V. K.; Priya, A. K.; Manikandan, G.; Naveen, A. S.; Nitishkumar, B. y Pradeep, P. (2021). "Review of materials used in light weight concrete". *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 3538–3539. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.425>
- Laukaitis, A. y Fiks, B. (2006). "Acoustical properties of aerated autoclaved concrete". *Applied Acoustics*, 67(3), 284–296. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.07.003>
- Lesovik, V.; Voronov, V.; Glagolev, E.; Feduk, R.; Alaskhanov, A.; Amran, Y. H. M. ... Baranov, A. (2020). "Improving the behaviors of foam concrete through the use of composite binder". *Journal of Building Engineering*, 31, 101414. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101414>
- Li, T.; Huang, F.; Zhu, J.; Tang, J. y Liu, J. (2020). "Effect of foaming gas and cement type on the thermal conductivity of foamed concrete". *Construction and Building Materials*, 231, 117197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117197>
- Liu, X.; Lu, M.; Sheng, K.; Shao, Z.; Yao, Y. y Hong, B. (2023). "Development of new material for geopolymers lightweight cellular concrete and its cementing mechanism". *Construction and Building Materials*, 367. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130253>
- Metha, K. M. P. (1998). "Concreto Estructura, propiedades y materiales (segunda; Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A. C., Ed.)". Florida: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A. C.
- Moore, R. T. (1972). Penetration resistance tests of reinforced concrete barriers. National Institute of Standards and Technology. Retrieved September 28, 2023, from <https://www.nist.gov/publications/penetration-resistance-tests-reinforced-concrete-barriers>.
- Mugahed Amran, Y. H.; Alyousef, R.; Alabduljabbar, H.; Alrshoudi, F. y Rashid,

- R. S. M. (2019). "Influence of slenderness ratio on the structural performance of lightweight foam concrete composite panel". *Case Studies in Construction Materials*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00226>
- Mugahed Amran, Y. H.; Alyousef, R.; Alabduljabbar, H.; Khudhair, M. H. R.; Hejazi, F.; Alaskar, A. ... Siddika, A. (2020). "Performance properties of structural fibred-foamed concrete". *Results in Engineering*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100092>
- Narayanan, N. y Ramamurthy, K. (2000). "Microstructural investigations on aerated concrete". *Cement and Concrete Research*, 30(3), 457–464. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00199-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00199-X)
- National Standards Authority of Ireland. (2005). Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Retrieved September 28, 2023, from <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf>.
- Osorio Saraz, J. A., Vélez Restrepo, J. M., & Ciro Velásquez, H. J. (2007). *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 60(2), 4067–4076. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179914078013>.
- Pacheco Tinoco, R. D. (2018). *Propiedades físico-mecánicas del concreto celular con poliestireno expandido y su aplicación en la industria de la construcción*. Universidad César Vallejo, Lima. Retrieved from <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/27247>.
- Panesar, D. K. (2013). "Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents". *Construction and Building Materials*, 44, 575–584. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.024>
- Perry, S. H.; Bischoff, P. H. y Yamura, K. (1991). "Mix details and material behaviour of polystyrene aggregate concrete". *Magazine of Concrete Research*, 43(154), 71–76. <https://doi.org/10.1680/mac.1991.43.154.71>
- Raj, A.; Sathyan, D. y Mini, K. M. (2019). "Physical and functional characteristics of foam concrete: A review". *Construction and Building Materials*, 221, 787–799. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.052>
- Ramamurthy, K.; Kunhanandan Nambiar, E. K. y Indu Siva Ranjani, G. (2009). "A classification of studies on properties of foam concrete". *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 388–396. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>
- Ratna, D. (2012). "Thermal Properties of Thermosets". *Thermosets: Structure, Properties and Applications*, 62–91. <https://doi.org/10.1533/9780857097637.1.62>
- Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Santafé de Bogotá, D. C.: (5ª ed.; Bhandar Editor Ltda, Ed.).
- Schenk, M., & Guest, S. D. (2011). Folded shell structures. Retrieved from <https://www-structures.eng.cam.ac.uk/system/files/documents/folded-shell-structures.pdf>.
- Shackelford, J. F. (2005). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros* (6ª ed.). Pearson Educación.
- Song, Y., y Lange, D. A. (2020). "Crushing Behavior and Crushing Strengths of Low-Density Foam Concrete". *ACI Materials Journal*, 117, 43–52. <https://doi.org/10.20944/preprints201902.0208.v1>
- Stolz, J., Boluk, Y. y Bindiganavile, V. (2018). "Mechanical, thermal and acoustic properties of cellular alkali activated fly ash concrete". *Cement and Concrete Composites*, 94, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.08.004>

- Thienel, K. C.; Haller, T. y Beuntner, N. (2020, marzo 1). "Lightweight concrete-from basics to innovations". *Materials*, Vol. 13. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma13051120>
- Universidad Nacional de Colombia, Universidad del Quindío e Instituto Nacional de Vías. (2022). "Especificaciones generales de construcción de carreteras". Bogotá.
- Vaidya, A. y Pathak, K. (2019). "Mechanical stability of dental materials: Applications of Nanocomposite". *Materials in Dentistry*, 285–305. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813742-0.00017-1>
- Valore, R. C. (1954). "Cellular Concretes Part 1: Composition and Methods of Preparation". *ACI Journal Proceedings*, 50(5). <https://doi.org/10.14359/11794>
- Wang, P. y Zhao, C. (2015). "Study on reducing railway noise by porous concrete sound-absorbing panel". *Materials Research Innovations*, 19(sup5), S5-1156-S5-1160. <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.0000000001269>
- Wong, K. H. (2007). Thermal conductivity of foamed concrete. ScholarBank@NUS Repository. Retrieved from <https://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/17572>.
- Xu, Q.; Liu, L.; Wang, X.; Wen, P. y Yu, G. (2019). "Strength analysis of the cast-in-situ foamed lightweight soil materials". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 304(5), 052130. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/5/052130>
- Yahya, M., & Amran, H. (2016). Determination of structural behavior of precast foamed concrete sandwich panel. Universiti Putra Malaysia. Retrieved from <http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/70170/1/FK%202016%202%20-%20IR.pdf>.
- Zamora Terrones, L. P. (2015). "Diseño de un bloque de concreto celular y su aplicación como unidad de albañilería no estructural". Universidad Nacional de Cajamarca (Perú).
- Zhang, J. J. (2019). "Rock physical and mechanical properties". *Applied Petroleum Geomechanics*, 29–83. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814814-3.00002-2>
- Zhang, S.; Cao, K.; Wang, C.; Wang, X.; Deng, G. y Wei, P. (2020). "Influence of the porosity and pore size on the compressive and splitting strengths of cellular concrete with millimeter-size pores". *Construction and Building Materials*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117508>
- Zherebtsov, S.; Semenova, I. P.; Garbacz, H. y Motyka, M. (2019). "Advanced mechanical properties". *Nanocrystalline Titanium*, 103–121. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814599-9.00006-7>
- Zhou, L.; Deng, Z.; Li, W.; Ren, J.; Zhu, Y. y Mao, L. (2023). "Mechanical behavior of the cellular concrete and numerical simulation based on meso-element equivalent method". *Construction and Building Materials*, 394. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132118>

