

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/index>
www.ucr.ac.cr / ISSN: 2215-2652

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
JULIO/DICIEMBRE 2025 - VOLUMEN 35 (2)



Diseño y evaluación de concreto hidráulico celular utilizando cemento modificado y agregados de andesita

Design and Evaluation of Cellular Hydraulic Concrete Using Modified Cement and Andesite Aggregates

Einer Rodríguez Rojas ¹ , Alejandra Láinez Ayala ² 

¹ Profesor adjunto Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
correo: einer.rodriguez@ucr.ac.cr

² Graduado de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
correo: lainez.ale.a@gmail.com

Palabras clave:

Aditivo, concreto,
concreto celular, densidad,
diseño de mezcla.

Resumen

El concreto celular es un material liviano que requiere de un diseño especializado para cumplir con parámetros mecánicos, tales como densidades, así como resistencias a compresión y flexión. Aunque el concreto celular es utilizado en otros países, su fabricación en Costa Rica representa una innovación, ya que implica la creación de un diseño adaptado a los recursos materiales disponibles. Su importancia radica en la versatilidad y posibilidad de construcciones con una mayor productividad.

El objetivo de esta investigación es obtener, por medio de pruebas de laboratorio, los diseños de mezcla para la elaboración de concreto hidráulico celular, utilizando un aditivo inclusor de aire, cemento hidráulico mixto modificado tanto con caliza como puzolana y agregados procedentes de aluvión de andesita.

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, en el año 2023, bajo condiciones controladas, utilizando normas de la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales y guías del Instituto Americano del Concreto.

Los resultados sugieren que el agregado fino procedente de aluvión de andesita cumple con los requerimientos técnicos y permite obtener mezclas acordes a los parámetros de diseño. Además, las pruebas para la densidad del concreto fresco indican que no existe evidencia suficiente para determinar que las densidades experimentales sean diferentes a las densidades teóricas. Por último, los resultados de resistencia a la compresión y tracción del concreto celular son aceptables según los parámetros estadísticos que se utilizaron en el diseño.

Recibido: 10/10/2024

Aceptado: 29/04/2025

Keywords:

Additive, cellular
concrete, concrete,
density, mix design.

Abstract

Cellular concrete is a lightweight material that requires specialized design to meet mechanical parameters such as density, as well as compressive and flexural strength. Although cellular concrete is used in other countries, its production in Costa Rica represents an innovation, as it involves the development of a mix design adapted to locally available materials. Its significance lies in its versatility and its potential to increase construction productivity.

The objective of this study is to determine, through laboratory testing, the mix designs for producing cellular hydraulic concrete using an air-entraining admixture, blended hydraulic cement modified with limestone and pozzolan, and aggregates derived from andesite alluvium.

The tests were conducted in 2023 at the National Laboratory of Materials and Structural Models at the University of Costa Rica, under controlled conditions and in accordance with standards from the American Society for Testing and Materials (ASTM) and guidelines from the American Concrete Institute (ACI).

The results suggest that the fine aggregate sourced from andesite alluvium meets the technical requirements and enables the formulation of mixes that conform to the design parameters. In addition, tests on the density of fresh concrete indicate that there is insufficient evidence to conclude that the experimental densities differ from the theoretical values. Finally, the compressive and tensile strength results of the cellular concrete are acceptable according to the statistical parameters used in the design.

DOI: 10.15517/ri.v35i2.62236



I. INTRODUCCIÓN

El concreto hidráulico constituye un material compuesto, cuyo uso se extiende a la gran mayoría de obras constructivas. Dentro de la variabilidad de sus tipos, existen los convencionales, autocompactantes, de alta resistencia, permeables, livianos, entre otros. Para un concreto convencional, su densidad ronda los 2400 kg/m^3 ; sin embargo, se han evaluado modificaciones para mejorar sus propiedades. Por ejemplo, el concreto liviano por medio de aditivos inclusores de aire es conocido como concreto celular, cuya densidad es inferior a la convencional, con valores de hasta 800 kg/m^3 . Este se fabrica con cemento hidráulico, agua, aditivos y agregados.

El concreto celular es un material liviano que posee características muy favorables para la construcción. Es posible utilizarlo como material de relleno en zonas de alta actividad sísmica, además de ser empleado como bloques, similar a la mampostería [1]. Como material de alta resistencia a la compresión, baja densidad y estabilidad ambiental, se convierte en solución para una amplia variedad de aplicaciones geotécnicas [2].

De esta manera, su baja densidad permite analizar nuevas opciones para la construcción de vivienda, al elevar la productividad de las edificaciones. Asimismo, sus propiedades permiten considerar el uso de varios tipos de desechos como reemplazo potencial del cemento y el agregado fino en el concreto. Por ejemplo, los residuos sólidos industriales y agrícolas [3].

Sin embargo, no toda la documentación indica ventajas del concreto celular. Se menciona que, al analizar entresijos, los desplazamientos laterales máximos de la estructura de concreto estructural son menores a los de la estructura de concreto celular [4]. Además, el uso de concreto celular revela una disminución de la tensión de adherencia entre las barras de refuerzo y el hormigón celular, debido a la reducción del peso unitario de hormigón [5].

Por otro lado, el concreto celular requiere de un diseño especializado para cumplir con sus parámetros mecánicos, como sus densidades y resistencias tanto a compresión como flexión. A pesar de su uso en otros países, la fabricación de este material en Costa Rica representa una innovación, ya que implica la adaptación del diseño a los materiales disponibles localmente.

Por consiguiente, este estudio tiene como objetivo principal diseñar concretos hidráulicos celulares para diferentes densidades por medio de ensayos de laboratorio, utilizando un aditivo inclusor de aire, cemento hidráulico mixto modificado con caliza - puzolana y agregados procedentes de aluvión de andesita. Así, el alcance de la investigación corresponde a elaborar concretos livianos para densidades de 800 kg/m^3 , 960 kg/m^3 , 1120 kg/m^3 , 1280 kg/m^3 , 1440 kg/m^3 y 1600 kg/m^3 .

El concreto convencional es una mezcla de cemento hidráulico, agregados y agua. Si se requiere mejorar o cambiar sus propiedades es común el uso de aditivos. El concreto celular es un producto liviano que consiste en una combinación de cemento con material fino, mezclado con agua para formar una pasta que tiene una estructura celular homogénea. La estructura

celular se logra esencialmente mediante la incorporación mecánica de aire u otros gases.[6]. Para la presente investigación, se utiliza un aditivo inclusor de aire, de tal manera que permita la disminución de la densidad del concreto. Un aditivo se define como un ingrediente en la mezcla cementicia para modificar su estado fresco o endurecido, que es incluido antes o durante el mezclado.

Los aditivos inclusores de aire causan el desarrollo de un sistema de microscópico de burbujas en el concreto o el mortero [7]. Como se especificó anteriormente, la densidad, definida como la relación entre la masa y el volumen de un material, para un concreto endurecido convencional, ronda entre 2200 kg/m^3 a 2400 kg/m^3 ; sin embargo, para el concreto celular puede alcanzar valores de hasta 800 kg/m^3 .

Para lograr estas densidades, es necesario definir el proceso, las proporciones de materiales y obtener los especímenes finales en función de los parámetros mecánicos por medio de un diseño de mezcla.

II. MÉTODOS Y MATERIALES

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), en el año 2023, bajo condiciones controladas. En relación con los materiales utilizados para la investigación, el agregado fino es de extracción de río con procedencia geológica de aluvión de andesita. Para el muestreo, se utiliza la norma ASTM D75 [8]; posteriormente, se realiza una reducción con base en la norma ASTM C702 [9]. Para su caracterización, se utiliza el promedio de tres muestras para cada ensayo.

El cemento es de tipo MM/C(C-P)-28, el cual corresponde a cemento hidráulico modificado mixto que contiene una cantidad de caliza (C) y de puzolana (P) entre el 36 % y el 55 % en masa. Además, posee una clase de resistencia de 28 MPa a los 28 días de curado. La muestra se obtiene con base en la norma ASTM C183 [10]. Para su caracterización, los ensayos se repiten en tres ocasiones.

El aditivo inclusor de aire es un líquido de baja viscosidad color transparente a base de resinas neutralizadas. De forma adicional, se utiliza un aditivo plastificante reductor de agua a base de policarboxilatos. El agua que se utiliza para la mezcla corresponde con agua potable.

En primer lugar, se seleccionaron las muestras de materiales por ser caracterizados para el diseño de mezcla. Cada muestra es almacenada de forma sellada y numerada para garantizar su trazabilidad. Para determinar las características de diseño y cumplimiento de los materiales constitutivos del concreto, se procede a realizar ensayos de laboratorio normados.

Los procedimientos ejecutados se realizan con equipos calibrados que garantizan confiabilidad de resultados. En el CUADRO I, se indican los documentos de referencia utilizados para cada uno de los ensayos de laboratorio y normativa de cumplimiento.

CUADRO I
DOCUMENTOS DE REFERENCIA PARA LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

Material	Ensayo	Referencia
AGREGADOS	Práctica estándar para el muestreo de agregados	ASTM D75 [8]
	Práctica normativa para reducir las muestras de agregados a tamaño de prueba	ASTM C702 [9]
	Método de ensayo normalizado para materiales más finos que un tamiz No. 200 (75 μm) en agregados minerales mediante lavado	ASTM C117 [11]
	Método de ensayo normalizado para la determinación granulométrica de agregados finos y gruesos	ASTM C136 [12]
	Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados finos	ASTM C128 [13]
	Especificaciones estándar para agregados para concreto	ASTM C33 [14]
CEMENTO	Muestreo de cemento	ASTM C183 [10]
	Método de ensayo para la determinación de consistencia normal del cemento hidráulico	ASTM C187 [15]
	Método de ensayo para la determinación de la densidad del cemento hidráulico	ASTM C188 [16]
	Método de ensayo para la determinación del tiempo de fragua de un cemento hidráulico por medio de la aguja de Vicat	ASTM C191 [17]
	Especificaciones estándar para cemento Portland	ASTM C150 [18]
ADITIVOS	Método de prueba estándar para aditivos inclusores de aire para concreto	ASTM C233 [19]
	Especificaciones estándar para aditivos químicos para concreto	ASTM C494 [20]
	Especificación estándar para aditivos inclusores de aire para concreto	ASTM C260 [21]
CONCRETO	Método de prueba estándar para densidad, absorción y vacíos en el concreto endurecido	ASTM C642 [22]
	Método de prueba estándar para agentes espumantes para uso en producción de hormigón celular utilizando espuma preformada	ASTM C796 [23]
	Método de ensayo para la resistencia a la compresión uniaxial de especímenes cilíndricos de concreto	ASTM C39 [24]
	Método de prueba estándar para determinar la resistencia a la tracción de especímenes cilíndricos de concreto	ASTM C496 [25]
	Guía para el concreto celular sobre 800 kg/m ³	ACI 523.3R-14 [26]

Una vez que se determinan los parámetros de caracterización de materiales, se utiliza la guía ACI 523.3R-14 [26] y la ASTM C796 [23] para los métodos de diseño de las mezclas de concreto y valores teóricos para comparar resultados.

Para las mezclas de concreto, se utiliza una relación de agua cemento (a/c) constante de 0,45. La elaboración de los especímenes se realiza con una mezcladora de concreto de bajas revoluciones, de ahí la necesidad de utilizar un aditivo plastificante. Para cada densidad de concreto, luego de ajustar el modelo, se obtienen finalmente 12 especímenes por cada colada. Cuatro de ellos se utilizan para densidades endurecidas; cuatro, para determinar resistencia a la compresión; y los últimos cuatro, para ensayos de tensión indirecta del concreto.

Una vez transcurridos los 28 días, se determinan los valores de absorción y densidad según se especifica en la norma ASTM C642 [22]. En cuanto a la resistencia a compresión y tracción, estos valores se obtienen, respectivamente, según las normas ASTM C39/C39M [24] y ASTM C496 [25].

Ahora bien, los resultados experimentales que se presentan en la investigación corresponden con valores promedio, indicados en los cuadros según corresponda. Además, la confiabilidad y validez se determina evaluando, mediante estadística descriptiva y probabilística, las muestras de ensayo. Para la caracterización de los materiales, se utiliza estadística descriptiva para obtener valores promedio. Para las muestras

cilíndricas de concreto de diferentes densidades, se utiliza estadística descriptiva para obtener valores promedio y para correlacionar variables mediante gráficas.

Asimismo, se utiliza estadística inferencial que permita el establecimiento de hipótesis, con el objetivo de determinar si existían diferencias significativas entre los grupos evaluados.

Se utilizó la prueba t de Student para comparar promedios entre dos grupos independientes y el ANOVA para analizar diferencias entre más de dos grupos. Ambos análisis se realizaron bajo un nivel de significancia de $\alpha = 0.01$, lo que equivale a un 99 % de confianza. Con ello, se busca asegurar una interpretación rigurosa y confiable de los resultados.

Estos fueron analizados a partir de los valores p, tomando como referencia el nivel de significancia ya definido. Además, en cada tabla de resultados, se añadió una nota al pie, indicando que el análisis se interpretó con un 99 % de nivel de confianza, con el fin de mantener la coherencia metodológica y ofrecer mayor claridad.

III. RESULTADOS

A. Materiales

Respecto al agregado fino, los valores promedio obtenidos de la caracterización se presentan en el CUADRO II. Asimismo, en la Fig. 1, se puede observar su curva granulométrica.

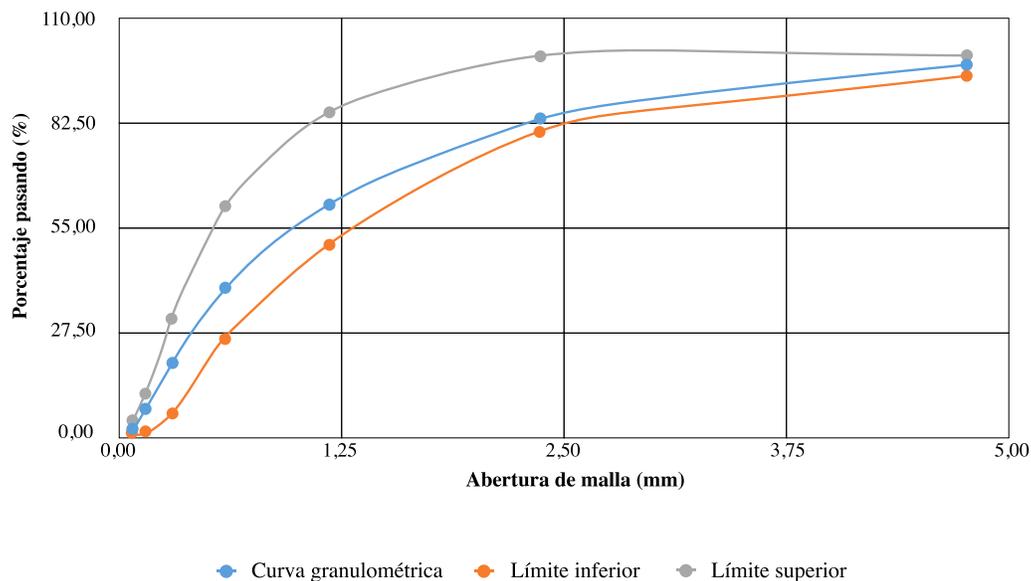


Fig. 1. Resultado de la curva granulométrica del agregado fino.

CUADRO II
RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO FINO UTILIZADO
EN LAS MEZCLAS DE CONCRETO CELULAR

Propiedad física	Valor Promedio	Valor usual
Módulo de finura (M.F)	2,96	2,3 – 3,1
Material lavado pasando la No.200 (%)	2,90	< 10
Gravedad específica, G_{BS}	2,48	2,4 – 2,9
Densidad, D_{BS} (kg/m ³)	2470	2400 – 2900
Granulometría	Conforme	Dentro de límites ASTM C33 [14]

Los resultados de los ensayos para el cemento se presentan en el CUADRO III, en cual se encuentran los valores promedios de tres muestras.

CUADRO III
RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DEL
CEMENTO UTILIZADO EN LAS MEZCLAS DE CONCRETO CELULAR

Propiedad	Valor Promedio	Valores usuales
Densidad relativa	2,85	2,8-2,90
Tiempo de fragua inicial (min)	214	Dentro de límites ASTM C150 [18]
Tiempo de fragua final (min)	255	Dentro de límites ASTM C150 [18]

CUADRO IV
RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS ADITIVOS UTILIZADOS
EN LAS MEZCLA DE CONCRETO CELULAR

Propiedad	Aditivo espumante	Aditivo plastificante	Valores usuales
	Valor promedio	Valor promedio	
Densidad (g/cm ³)	1,02	1,07	1,00-1,04
Potencial de Hidrogeno (pH)	6	5	5-7
Residuos sólidos por secado (%)	28,9	32	26-30

B. Aditivos

En el CUADRO IV, se resumen los valores obtenidos de los ensayos de los aditivos referentes a densidad, potencial de hidrógeno y residuos sólidos por secado.

C. Diseño de mezclas de concreto celular

Para el diseño de mezcla, se utiliza la guía ACI 523.3 R-14 [26], con base en la determinación de densidades y no en las propiedades de resistencia a la compresión.

Para todas las mezclas, se utiliza la relación de a/c (agua/cemento) de 0,45. Para obtener la espuma, se presuriza el equipo aproximadamente a 345 Pa, con la incorporación del agua y aditivo en una relación de 1:30.

El resultado es un material con una densidad masiva promedio de 62 kg/m³.

Luego de realizar pruebas piloto, ajustes al diseño y procedimiento de mezclado, se obtiene mezclas consistentes en función de las densidades. Las pruebas iniciales tuvieron los inconvenientes de mostrar poca cohesión entre el agregado y el cemento al formar grumos, producto de una baja relación a/c y bajas revoluciones del equipo de mezclado.

El aditivo plastificante que se incorpora tiene la función de mejorar la trabajabilidad de la mezcla, sin embargo, en condiciones no controladas, produce contracción al concreto fresco celular.

D. Concreto fresco

Las densidades de concreto fresco se verifican con base en el procedimiento para obtener las densidades masivas. Por medio de las ecuaciones de la norma ASTM C796 [23] se relaciona los valores finales de la dosificación con una densidad teórica en estado fresco. El CUADRO VI presenta los respectivos resultados acompañados del análisis de significancia por medio de la t de Student para un 99 % de nivel de confianza.

E. Concreto endurecido

Los especímenes cilíndricos obtenidos se desmoldan entre 24 horas a 48 horas después de su fabricación; posteriormente, se almacenan en la cámara húmeda hasta los 28 días de edad. Los valores correspondientes a la densidad seca al horno experimental y porcentajes de vacíos son producto de aplicación de la norma ASTM C642 [22]. Para el valor teórico de la densidad seca al horno, se utiliza la recomendación del ACI 523.3 R-14 [26], al restar el valor de densidad del concreto fresco 122 kg/m³.

La densidad seca al aire experimental se obtiene con base en las dimensiones y la masa de los especímenes. Su valor teórico se obtiene de sustraer 80 kg/m³ al valor de densidad del concreto fresco. Respecto a vacíos de los especímenes, el CUADRO V presenta los resultados de los porcentajes de vacíos en función de la densidad de diseño. Por su parte, el CUADRO VI muestra los valores de densidades tanto en estado fresco como endurecido y su análisis de significancia.

CUADRO V
RESULTADOS DE LOS PORCENTAJES DE VACÍOS PARA EL CONCRETO CELULAR
EN ESTADO ENDURECIDO SEGÚN LA DENSIDAD DE DISEÑO

Densidad de diseño (kg/m ³)	Porcentaje de vacíos promedio (%)
1600	15,25
1440	19,21
1280	21,28
1120	25,67
960	29,39
800	39,32

CUADRO VI
 RESULTADOS DE LAS DIFERENTES DENSIDADES DEL CONCRETO CELULAR EN ESTADO FRESCO Y
 ENDURECIDO Y SUS COMPARACIONES DE MEDIAS POR MEDIO DE PRUEBA T

Ensayo	Densidad diseño (kg/m ³)	Densidad Valor teórico (kg/m ³)	Densidad Valor experimental promedio (kg/m ³)	Valor t Student teórico	Valor t Student experimental
Densidad concreto fresco	1600	1610	1590		1,53
	1440	1450	1470		2,22
	1280	1290	1270		5,77
	1120	1130	1160		3,16
	960	970	990		2,49
	800	810	810		0,00
Densidad seca al horno	1600	1460	1470		3,38
	1440	1350	1330		2,03
	1280	1150	1140	5,84	2,59
	1120	1030	1010		6,55
	960	870	830		9,71
	800	690	690		0,00
Densidad seca al aire	1600	1510	1510		0,00
	1440	1390	1350		10,7
	1280	1190	1220	5,84	6,55
	1120	1080	1040		22,1
	960	910	890		9,73
	800	730	720		2,72

Notas: Los valores de densidad se aproximan a los 10 kg/m³ según especificaciones. Se utiliza un 99 % de nivel de confianza.

En relación con la resistencia a la compresión, su valor experimental a los 28 días de edad para cuatro especímenes se muestra en el CUADRO VII.

Para determinar su significancia, se utilizan valores teóricos por medio de fórmulas matemáticas sugeridas por el ACI 523.3 R-14 [26].

CUADRO VII
RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO CELULAR SEGÚN LAS DENSIDADES DE DISEÑO Y COMPARACIONES DE MEDIAS POR MEDIO DE PRUEBA T

Ensayo	Densidad diseño (kg/m ³)	Resistencia compresión Valor teórico (MPa)	Resistencia compresión Valor experimental promedio (MPa)	Valor t Student teórico	Valor t Student experimental
Resistencia a la compresión	1600	11,50	10,86	5,84	4,90
	1440	8,08	8,38		5,98
	1280	5,68	6,06		6,11
	1120	4,00	5,80		51,42
	960	2,81	5,60		86,14
	800	1,98	3,60		45,52

Nota: Se utiliza un 99 % de nivel de confianza.

CUADRO VIII
RESULTADOS DE LA PRUEBA ANOVA PARA VALORES EXPERIMENTALES DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO CELULAR

Fuente de variación	Suma cuadrados (SS)	Grados libertad (Df)	Media Cuadrática (MS)	ANOVA Valor F	ANOVA Valor P	ANOVA F crítico
Entre grupos	128,54	5,00	25,71	1422,56	0,00	2,77
Dentro de grupos	0,33	18,00	0,02			
Total	128,86	23,00				

Nota: Se utiliza un 99 % de nivel de confianza.

Al realizar una prueba de varianza ANOVA para los resultados de resistencia a la compresión en las densidades de estudio, se obtiene la información del CUADRO VIII.

Por medio de la norma ASTM C496 [25], se determina la resistencia a la tracción de los especímenes, valores que se presentan en el CUADRO IX.

CUADRO IX
DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A TENSIÓN DEL CONCRETO CELULAR EN FUNCIÓN DE LAS DENSIDADES DE DISEÑO

Densidad de diseño (kg/m ³)	Resistencia a la tensión promedio (MPa)
1600	3,85
1440	2,78
1280	2,07
1120	2,38
960	2,26
800	1,40

IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los materiales utilizados para los diseños de mezcla cumplen con los valores establecidos en las especificaciones o valores usuales registrados. En las siguientes figuras, es posible observar el comportamiento de los materiales al ser utilizados como componentes para las mezclas. De esta forma, la Fig. 2, hace referencia a la relación entre las densidades de diseño del concreto y el contenido de agregado fino. Por su parte, la Fig. 3, relaciona las densidades de diseño con el contenido de cemento utilizado. Finalmente, la Fig. 4, indica los contenidos de espuma según la densidad de las mezclas al diseñar.

La Fig. 2 muestra una relación directamente proporcional

entre la densidad de diseño del concreto celular y la cantidad de agregado fino. En contraste, la Fig. 4 evidencia una relación inversamente proporcional entre la densidad y la cantidad de espuma utilizada. Este comportamiento es coherente con la naturaleza del concreto celular, en el que las variaciones en la densidad se logran principalmente ajustando las proporciones de materiales en la mezcla. El aumento en la cantidad de agregado fino de andesita responde a la necesidad de lograr una mayor compactación en la mezcla y reducir el volumen de aire incluido cuando se busca una mayor densidad. Respecto a las cantidades de cemento, la Fig. 3 evidencia que mezclas aproximadamente inferiores a 1100 kg/m³ requieren una mayor cantidad, lo cual aumenta un posible costo de producción.

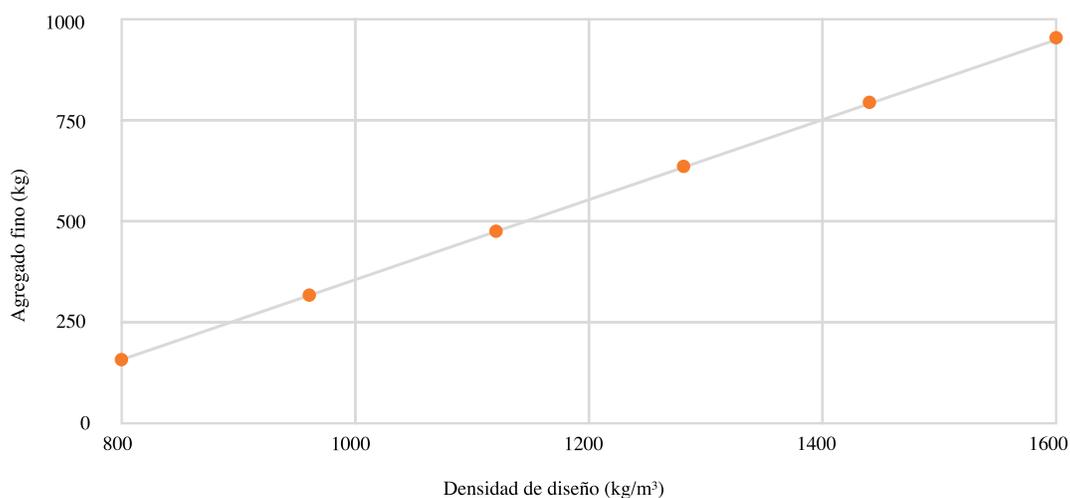


Fig. 2. Relación del contenido de agregado fino de andesita en función de densidad de diseño para las mezclas de concreto celular.

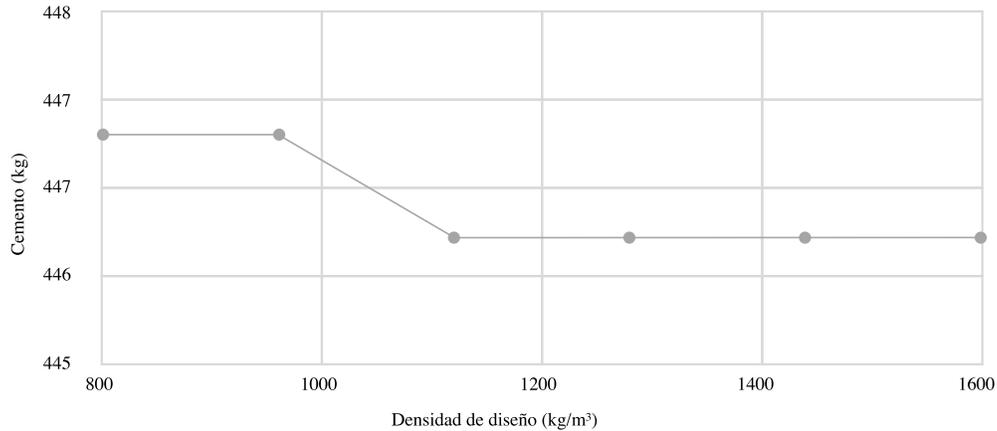


Fig. 3. Relación del contenido de cemento tipo MM/C(C-P)-28 en función de densidad de diseño para las mezclas de concreto celular.

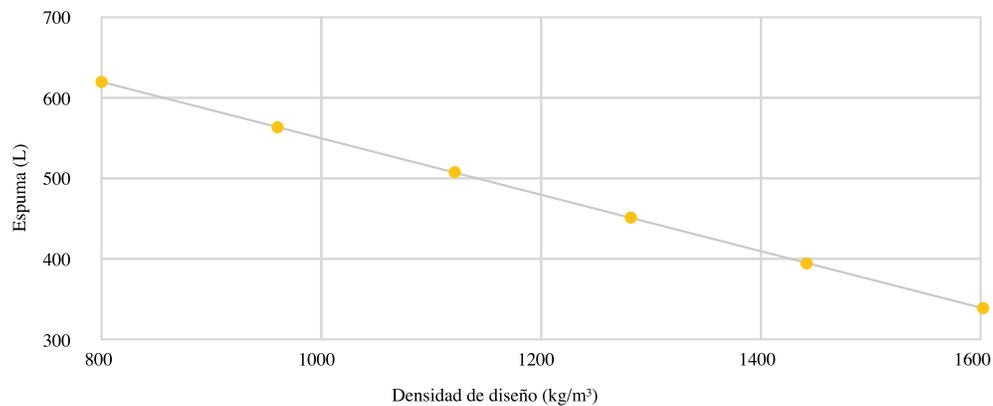


Fig. 4. Relación del contenido de aditivo espumante en función de densidad de diseño para las mezclas de concreto celular.

Las relaciones obtenidas a partir de los ensayos son clave para definir las proporciones adecuadas de los materiales en la mezcla del concreto celular. Esto permite ajustar el diseño según las propiedades mecánicas y físicas que se buscan, tomando en cuenta las características específicas de los materiales utilizados, como la arena de andesita y el cemento tipo MM/C(C-P)-28.

En la Fig. 5, el gráfico muestra la similitud de los valores obtenidos en laboratorio con aquellos que se pueden calcular según el ACI 523.3 R-14 [26]. Se realiza una prueba t de Student para comparar el valor teórico de cada densidad con respecto al valor experimental, considerando a μ como la media poblacional (teórica) y μ_0 como la media de la densidad experimental. Para las pruebas de densidad del concreto fresco, todos los t experimentales dan como resultado un valor menor al t teórico. Por lo tanto, no

se rechaza la hipótesis nula y no existe evidencia suficiente para decir que las densidades experimentales sean diferentes a las densidades teóricas.

Asimismo, el análisis de significancia para el parámetro de densidad seca al horno reveló que las densidades experimentales de diseño de 1120 kg/m³ y 960 kg/m³ son significativamente diferentes a las densidades teóricas. De forma contraria, para las demás densidades, no se encontró evidencia suficiente para concluir que sean diferentes.

Por otro lado, para el parámetro de densidad seca al aire, solamente las mezclas con densidades de diseño de 1600 kg/m³ y 800 kg/m³ evidencian que no se rechaza la hipótesis nula. Por ello, no existe evidencia suficiente para expresar que las densidades experimentales sean diferentes a las densidades teóricas.

En cuanto a las demás densidades, se observan diferencias significativas entre sus valores experimentales y las densidades teóricas.

Por otra parte, las fórmulas matemáticas para densidad que se indican en las guías de diseño en función del concreto fresco se aproximan acertadamente a los valores experimentales.

Existen muchas variables que pueden incidir en su diferencia, por lo que es prudente establecer un rango de valores para cada densidad y no un valor puntal. Está fuera del alcance de la investigación establecer un modelo o rangos de aceptación, sin embargo, el mayor valor de dispersión absoluto de los datos ronda el 5 %.

De igual forma, se evaluó la distribución de probabilidad de la resistencia a la compresión, considerando μ como la media poblacional (teórica) y μ_0 como la media experimental. Los resultados indican que, solo para la densidad de 1600 kg/m³, no se encontraron diferencias significativas entre la resistencia a la compresión experimental y la teórica. En cambio, para las demás densidades, se observaron diferencias significativas entre ambos valores. La Fig. 6 muestra la relación entre los resultados experimentales y teóricos para cada densidad. Se observa cómo los valores de resistencia son superiores a los esperados, principalmente para los de 800 kg/m³, 960 kg/m³ y 1120 kg/m³.

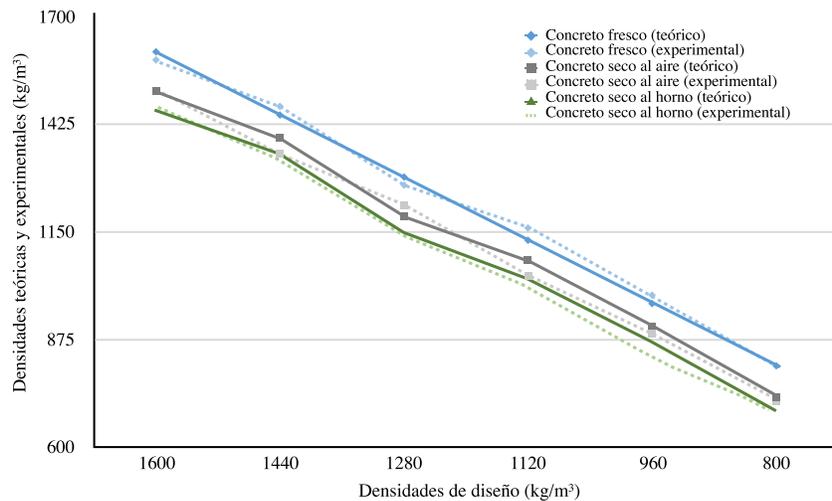


Fig. 5. Comparaciones teóricas y experimentales de los diferentes estados de densidad del concreto celular en función de las mezclas de diseño.

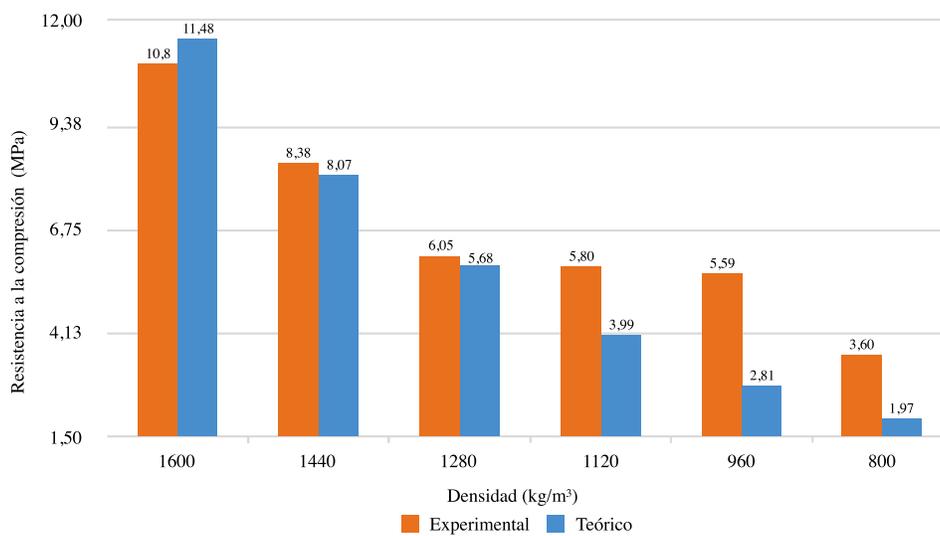


Fig. 6. Comparaciones teóricas y experimentales de las resistencias a la compresión del concreto celular para las diferentes densidades de diseño.

El análisis ANOVA de un factor indica que las medias de valores de resistencia a la compresión son diferentes entre sí.

El CUADRO IX indica los resultados de valores de tensión. La normativa no menciona referencia para comparar con valores teóricos en el concreto celular. Por consiguiente, existe una oportunidad de investigación para determinar un modelo que permita, a partir de valores experimentales de compresión, determinar de forma teórica valores del módulo de ruptura.

V. CONCLUSIONES

En primer lugar, el agregado fino procedente de aluvión de andesita cumple con los requerimientos técnicos. Por ello, permite obtener mezclas de concreto celular acordes a los parámetros de diseño.

En segundo lugar, el análisis estadístico muestra consistencia en las densidades del concreto celular en estado fresco, al comparar las relaciones experimentales con las teóricas. No obstante, se detectan diferencias estadísticas con un 99 % de nivel de significancia entre los valores teóricos y experimentales para las densidades secas al horno, específicamente, en los diseños de mezcla de 1120 kg/m³ y 960 kg/m³. Lo mismo ocurre con las densidades secas al aire en las mezclas de diseño de 1600 kg/m³ y 800 kg/m³. A pesar de estas diferencias, los resultados se consideran satisfactorios al tener en cuenta la variabilidad inherente en la fabricación del concreto. Lo anterior ocurre especialmente en el caso de concreto celular, que requiere un mayor conocimiento de sus compuestos y de su proceso de fabricación.

En tercer lugar, se obtuvieron parámetros de diseño para las diferentes mezclas de concreto celular con los materiales utilizados. En tercer lugar, se obtuvieron parámetros de diseño para las diferentes mezclas de concreto celular con los materiales utilizados al relacionar las variables de contenido de agregado fino de origen de andesita, cemento hidráulico tipo MM/C(C-P)-28, aditivo espumante y plastificante.

En cuarto lugar, los valores de resistencia a la compresión y tensión del concreto celular resultaron aceptables según los parámetros estadísticos que se utilizaron en el diseño. La media de sus valores se encuentra muy cerca o superiores de las resistencias esperadas.

Por último, los resultados permitirán desarrollar nuevas investigaciones para Costa Rica en el tema de concreto celular, adicionando variaciones en sus mezclas y desarrollando elementos constructivos que permitan una mayor productividad constructiva.

ROLES DE LOS AUTORES

Alejandra Láinez Ayala: Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Validación.

Einer Rodríguez Rojas: Conceptualización, Análisis formal, Adquisición de fondos, Metodología, Administración del proyecto, Recursos, Supervisión, Validación, Visualización, Redacción - borrador original, Redacción - revisión y edición.

REFERENCIAS

- [1] N. P. Zade, A. Bhosale, P. Kumar Dhir, P. Sarkar y R. Davis, "Variability of Mechanical Properties of Cellular Lightweight Concrete Infill and Its Effect on Seismic Safety", *Am. Soc. Civ. Eng.*, vol. 22, no.04, jul. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000501.
- [2] N. Sutmoller, "An Introduction to Low-Density Cellular Concrete and Advanced Engineered Foam Technology", en *Geo-Congress 2020, Minnesota, USA., 2020*, pp. 630–640, doi:10.1061/9780784482780.062.
- [3] S. P. Muñoz Pérez, W. R. García Chumacero y T. M. Salazar Pretel, "Uso de residuos sólidos en la elaboración de concreto celular: una revisión", *Aporte Santiaguino*, vol. 14, no. 1, pp. 104-119, jun.2021, doi: 10.32911/as.2021.v14.n1.714.
- [4] H. P. Góngora Rojas y F. Huamán Más, "Análisis y diseño estructural comparativo de una vivienda multifamiliar de muros de ductilidad limitada de concreto celular y concreto estructural en Chachapoyas - 2015", Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería Civil, Univ. Nac. Toribio Rodríguez Mendoza, Chachapoyas, Perú, 2015.
- [5] P. R. N. Soudais, J. S. Camacho y G. A. Parsekian, "Influence of transverse rebars on bond between steel reinforcement and cellular concrete with very low compressive strength", *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, vol. 11, no. 3, pp. 620-643, may. 2018, doi: 10.1590/s1983-41952018000300011.
- [6] Guía para concreto celular prefabricado de techos, pisos y unidades de bloques, ACI 523.2R-96, ACI Internacional, 1996.
- [7] Terminología referente al concreto y agregados para concreto, ASTM C125-21a, ASTM Internacional, 2021.
- [8] Práctica estándar para el muestreo de agregados, ASTM D75/D75M-19, ASTM Internacional, 2019.
- [9] Práctica estándar para reducir las muestras de agregados a tamaño de prueba, C702/C702M-18, ASTM Internacional, 2018.
- [10] Práctica estándar para el muestreo y la cantidad de pruebas de cemento hidráulico, ASTM C183/ C183M-23, ASTM Internacional, 2023.
- [11] Método de ensayo estándar para materiales más finos que un tamiz No. 200 (75 µm) en agregados minerales mediante lavado, ASTM C117-23, ASTM Internacional, 2023.
- [12] Método de ensayo estándar para la determinación granulométrica de agregados finos y gruesos, ASTM C136/ C136M-19, ASTM Internacional, 2019.

- [13] Método de ensayo estándar para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados finos, ASTM C128-22, ASTM Internacional, 2022.
- [14] Especificaciones estándar para agregados para concreto, ASTM C33/C33M-23, ASTM Internacional, 2023.
- [15] Método de prueba estándar para determinar la cantidad de agua para consistencia normal de la pasta de cemento hidráulico, ASTM C187-23, ASTM Internacional, 2023.
- [16] Método de ensayo estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico, ASTM C188-17, ASTM Internacional, 2023.
- [17] Método de ensayo estándar para la determinación del tiempo de fragua de un cemento hidráulico por medio de la aguja de Vicat, ASTM C191-21, ASTM Internacional, 2021.
- [18] Especificaciones estándar para cemento Portland, C150/C150M-22, ASTM Internacional, 2023.
- [19] Método de prueba estándar para aditivos inclusores de aire para concreto, ASTM C233/C233M-18, ASTM Internacional, 2019.
- [20] Especificaciones estándar para aditivos químicos para concreto, ASTM C494/C494M-19e1, ASTM Internacional, 2022.
- [21] Especificación estándar para aditivos inclusores de aire para concreto, ASTM C260/ C260M-10a(2016), ASTM Internacional, 2016.
- [22] Método de prueba estándar para densidad, absorción y vacíos en el concreto endurecido, ASTM C642-21, ASTM Internacional, 2022.
- [23] Método de prueba estándar para agentes espumantes para uso en producción de hormigón celular utilizando espuma preformada, ASTM C796/C796M-19, ASTM Internacional, 2019.
- [24] Método de ensayo para la resistencia a la compresión uniaxial de especímenes cilíndricos de concreto, ASTM C39/C39M-23, ASTM Internacional, 2023.
- [25] Método de prueba estándar para determinar la resistencia a la tracción de especímenes cilíndricos de concreto, C496/C496M-17, ASTM Internacional, 2017.
- [26] Guía para el concreto celular sobre 800 kg/m³, ACI 523.3R-14, ACI Internacional, 2014.